

Ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian ép đến một số chỉ tiêu chất lượng của vật liệu composite từ keo phenol formaldehyde phân tử lượng thấp và tre

Trịnh Hiền Mai^{1*}, Nguyễn Thị Minh Hoài², Nguyễn Minh Hùng¹, Tăng Thị Kim Hồng², Trịnh Hiền Phương³

¹Trường Đại học Lâm nghiệp

²Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh

³Viện Kỹ thuật Công nghệ - Trường Đại học Thủ Dầu Một

Effect of temperature and pressing time on some quality parameters of composite materials made from low molecular weight phenol formaldehyde glue and bamboo

Trinh Hien Mai^{1*}, Nguyen Thi Minh Hoai², Nguyen Minh Hung¹, Tang Thi Kim Hong², Trinh Hien Phuong³

¹Vietnam National University of Forestry

²Nong Lam University – Ho Chi Minh City

³Institute of Engineering and Technology - Thu Dau Mot University

*Corresponding author: maith@vnuf.edu.vn

<https://doi.org/10.55250/jo.vnuf.15.2.2026.121-129>

TÓM TẮT

Trong quá trình ép nhiệt tạo vật liệu composite từ tre cán dập tẩm nhựa phenol formaldehyde phân tử lượng thấp (PF PTLT), nhiệt độ ép và thời gian ép là hai thông số công nghệ then chốt, có ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng và tính chất cơ học của sản phẩm. Nghiên cứu này áp dụng phương pháp thiết kế thí nghiệm đáp ứng bề mặt (Response Surface Method) với bố trí phức hợp tâm (Central Composite Design) nhằm đánh giá và định lượng ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian ép đến một số chỉ tiêu chất lượng quan trọng của vật liệu composite tre, bao gồm: độ trương nở theo chiều dày (TS), độ bền cắt dọc thớ (SS) và độ bền uốn tĩnh (MOR). Kết quả nghiên cứu cho thấy độ trương nở theo chiều dày TS biến thiên trong khoảng 1,95–4,76% và có xu hướng thay đổi phi tuyến theo các thông số công nghệ. Độ bền cắt dọc thớ SS đạt giá trị trong khoảng 16,33–20,01 MPa, trong khi độ bền uốn tĩnh MOR dao động từ 105,40 đến 165,44 MPa. Trên cơ sở mô hình hồi quy và tối ưu hóa đa mục tiêu theo hướng ưu tiên kiểm soát TS và MOR, đồng thời đáp ứng yêu cầu kỹ thuật và khả năng áp dụng trong sản xuất, tổ hợp thông số công nghệ tối ưu được xác định là nhiệt độ ép 148,35°C và thời gian ép 18,26 phút. Tại điều kiện này, giá trị dự đoán của MOR đạt 146,84 MPa, TS giảm còn 3,36% và SS đạt 18,24 MPa, cho thấy sự cân bằng hợp lý giữa độ ổn định kích thước và các tính chất cơ học của vật liệu composite tre.

ABSTRACT

In the hot pressing process of creating composite materials from densified bamboo bundles impregnated with low molecular weight phenol formaldehyde resin (PF-LMW), pressing temperature and pressing time are considered the most critical technological parameters affecting the physical and mechanical performance of the final composite. In this study, the Response Surface Method (RSM) combined with a Central Composite Design (CCD) was employed to systematically investigate the effects of pressing temperature and pressing time on key quality indicators of bamboo composite materials, including thickness swelling (TS), shear strength parallel to grain (SS), and modulus of rupture (MOR). Experimental results indicated that thickness swelling varied in the range of 1.95-4.76% and exhibited a nonlinear response

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 09/12/2025

Ngày phản biện: 14/01/2026

Ngày quyết định đăng: 09/02/2026

Từ khóa:

Composite từ tre, độ bền cắt dọc thớ, độ bền uốn tĩnh, độ trương nở chiều dày, PF phân tử lượng thấp, tre cán dập.

Keywords:

Bamboo composite, densified bamboo bundles, modulus of rupture, PF-LMW, shear strength parallel to grain, thickness swelling.

to the processing parameters. The shear strength parallel to the grain ranged from 16.33 to 20.01 MPa, while the modulus of rupture varied between 105.40 and 165.44 MPa, demonstrating a strong dependence on the applied pressing conditions. Based on the developed regression models and multi-objective optimization with priority given to controlling TS and MOR while satisfying technical and production requirements, the optimal processing parameters were determined to be a pressing temperature of 148.35°C and a pressing time of 18.26 minutes. Under these conditions, the predicted values of MOR, TS, and SS were 146.84 MPa, 3.36%, and 18.24 MPa, respectively. These results indicate a favorable balance between dimensional stability and mechanical performance, confirming the effectiveness of the proposed processing conditions for bamboo composite production.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Composite tre là một vật liệu kỹ thuật có độ bền cơ học lớn và độ cứng cao, độ biến dạng nhỏ và tương đối ổn định khi sử dụng trong điều kiện khô. Composite tre có tỷ lệ độ bền riêng (độ bền/khối lượng riêng) cao và vượt xa các loại vật liệu khác dùng trong xây dựng như: thép, hợp kim nhôm, gang, gỗ và bê tông, nghĩa là có khả năng chịu tải rất hiệu quả [1].

Đã có một số công trình nghiên cứu mang tính đại diện về composite tre như: nghiên cứu của Anwar và cộng sự (2012) đã đánh giá chất lượng dán dính của các thanh tre *Gigantochloa scortechinii* khi ngâm tẩm trong dung dịch phenol formaldehyde phân tử lượng thấp (PF PTLT). Kết quả nghiên cứu cho thấy, sử dụng keo PF PTLT để sản xuất ván dán tre 3 lớp và 5 lớp có kích thước 300 mm × 300 mm làm từ các thanh tre đã xử lý với PF PTLT có chất lượng dán dính tốt nhất với thời gian ép nhiệt phù hợp để sản xuất ván dán tre 3 lớp (dày 12 mm) và 5 lớp (dày 20 mm) lần lượt là 22 phút và 33 phút (với cùng chế độ ép: nhiệt độ 140°C, áp suất 14 kg/cm²) [2];

Nghiên cứu của Yahui Zhang và cộng sự (2021) về tạo vật liệu composite từ tre (BFBC – Bamboo fiber base composite) với nguyên liệu là tre *Bambusa distegia* (tuổi 4-6) và keo PF có thông số đặc tính: Hàm lượng khô 47,49%; độ nhớt 37 cps (25°C), pH 10,22. Kết quả nghiên cứu chứng tỏ rằng nhiệt độ ảnh hưởng đến

chất lượng BFBC. Cụ thể, khi khối lượng riêng của BFBC tăng từ 1,05-1,20 g/cm³ thì mô đun đàn hồi (MOE) tăng đáng kể từ 23,09 GPa lên 27,01 GPa cùng với sự gia tăng của nhiệt độ ép (150°C-200°C). Tỷ lệ trương nở chiều dày (TSR), tỷ lệ trương nở chiều rộng (WSR) và tỷ lệ hấp thụ nước (WAR) giảm hơn 30% với sự gia tăng khối lượng riêng [3].

Nghiên cứu của Rao và cộng sự (2020) đã đánh giá khả năng chịu nước và độ bền cơ học của vật liệu BFRC (Bamboo fiber reinforced composite) sản xuất từ tre Moso (*Phyllostachys pubescens* Mazel) 4 tuổi và nhựa PF PTLT có hàm lượng rắn 47,91%, độ nhớt 35 cps và pH 10-11. Tre được cán dập, tẩm để đạt được các hàm lượng PF PTLT là 10%, 15%, 20% và 25% so với trọng lượng khô của tre ban đầu, ép nhiệt ở nhiệt độ 150°C, áp suất ép 3,5-7 MPa, thời gian ép 0,5 phút/mm chiều dày ván. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi hàm lượng PF PTLT tăng lên từ 10-25%, khả năng chống hút nước của vật liệu BFRC tăng dần, độ bền kéo trượt màng keo ban đầu tăng và sau đó giảm dần, độ bền nén ép giảm. Khi hàm lượng PF PTLT tăng từ 20-25% khả năng chống hút nước thay đổi không đáng kể nhưng độ bền cơ học giảm đáng kể, kết quả này cho thấy hàm lượng PF PTLT tối ưu cho vật liệu BFRC là 20% [4].

Trong nghiên cứu của Yu và cộng sự (2018) đã sử dụng tre Ci (*Neosinocalamus affinis*) 3 tuổi với độ dày của thành tre từ 4-5 mm và

nhựa PF PTLT với hàm lượng rắn 46%, độ nhớt 40,5 CPs và giá trị pH 10-11 để sản xuất vật liệu BFC (Bamboo fiber composite). Tre được cắt ngắn, cán dập, ngâm vào dung dịch PF PTLT trong 6 phút ở nhiệt độ phòng. Sau đó, để ráo loại bỏ nhựa dư thừa trong khoảng 6-10 phút, và được cân để đảm bảo hàm lượng nhựa tích tụ là 13%. Vật liệu BFC được sản xuất bằng công nghệ ép với các bó sợi tre được sắp xếp theo chiều dọc trong khuôn ép nhiệt ở 160°C, áp suất 6,0 MPa và thời gian ép 1 phút/mm. Kết quả nghiên cứu cho thấy: với ván có chiều dày 16 mm, độ bền uốn (MOR) và modul đàn hồi uốn (MOE) của BFC có KLR 1,3 g/cm³ đạt 398 MPa và 32,3 Gpa [5].

Anwar và cộng sự (2006) đã nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian ép đến tính chất vật lý và cơ học của vật liệu composite tre (BC - Bamboo Composite). Tre *Gigantochloa scortechinii* 4 tuổi được gia công thành các nan tre có kích thước 400 × 20 × 4 (mm) và sấy đến độ ẩm xấp xỉ 10%. Sau đó, nan tre được ngâm tẩm với dung dịch PF PTLT ở điều kiện chân không 750 mmHg trong 1 giờ và 1,5 giờ ở điều kiện áp suất khí quyển. Sắp xếp các nan tre theo chiều hướng song song nhau và ép nhiệt ở nhiệt độ 140°C, áp suất 14 kg/cm², thời gian ép 5, 8, 11, 14 và 17 phút. Kết quả nghiên cứu cho thấy, các tính chất cơ vật lý của BC xử lý với PF PTLT được cải thiện đáng kể so với BC đối chứng. Hệ số chống trương nở ASE của mẫu BC được ngâm tẩm với PF PTLT tăng khi thời gian ép nhiệt tăng từ 5-17 phút, ASE đạt 75% với thời gian ép 17 phút. Độ bền cơ học của BC đạt giá trị cao nhất ở thời gian ép 17 phút [6].

Nguyễn Thị Phượng và cộng sự (2023) đã nghiên cứu ảnh hưởng của thời gian và nhiệt độ sấy đóng rắn keo trong khuôn của tre ép khối. Sau khi được ép nguội, tre ép khối được đóng rắn keo bằng thiết bị sấy băng chuyền CFGH-3000 với 3 cấp thời gian (10 h, 11 h, và 12h) và 3 dải nhiệt độ khác nhau trên 6 vùng

của băng chuyền sấy. Kết quả nghiên cứu đã chỉ ra chế độ sấy với thông số công nghệ sấy: tổng thời gian sấy là 11 giờ, chiều dài theo các vùng và nhiệt độ sấy ở 6 vùng sấy lần lượt là: 1) 3 m nhiệt độ môi trường; 2) 3 m nhiệt độ 80 - 110°C; 3) 3 m tiếp nhiệt độ 110 - 120°C; 4) 21 m nhiệt độ 120 - 130°C; 5) 10 m nhiệt độ 130 - 80°C; 6) 5 m còn lại nhiệt độ môi trường sẽ cho sản phẩm tre ép khối đạt chất lượng tốt nhất với độ bền uốn tĩnh (MOR): 149,38 MPa, mô đun đàn hồi khi uốn tĩnh (MOE): 18.256, 82 MPa, độ bền trượt dọc: 14,21 MPa, độ bền nén dọc: 100,25 MPa, độ trương nở chiều dày (TS): 1,45% [7].

Qua các công trình nghiên cứu nêu trên cho thấy, bên cạnh những ưu điểm về sinh khối, độ bền riêng... tre là loại vật liệu vẫn có hạn chế kích thước nhỏ và có sự thay đổi lớn tại các vị trí trên thân cây khi sử dụng tre làm nguyên liệu chế tạo những vật liệu dạng tấm có kích thước lớn. Đặc biệt, với cây luồng (*Dendrocalamus Barbatulus* Hsueh & D.Z.Li) là 1 trong những loài tre phổ biến ở Việt Nam chưa có nhiều nghiên cứu được công bố khi sử dụng chúng là nguyên liệu chính để tạo vật liệu composite tấm lớn từ nhựa PF PTLT bằng công nghệ ép nhiệt. Do đó, vấn đề nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian ép đến một số chỉ tiêu chất lượng của vật liệu composite từ keo phenol formaldehyde phân tử lượng thấp và tre là thật sự cần thiết và có ý nghĩa thực tiễn cao.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu và thiết bị thí nghiệm

2.1.1. Vật liệu thí nghiệm

a) Nan luồng cán dập

- Luồng (*Dendrocalamus Barbatulus* Hsueh & D.Z.Li) có độ tuổi 3-4 năm, khai thác tại Thanh Hóa.

- Nan luồng cán dập đã qua các bước của công đoạn sơ chế và xử lý thủy nhiệt.

b) Keo phenol – formaldehyde phân tử lượng thấp (PF PTLT)

- Thông số kỹ thuật:

+ Hàm lượng chất rắn, % (sấy 3 giờ, 105°C):

54,5 – 57,5

+ Độ nhớt, mPa.s (30°C): 50 - 90

+ pH (30°C): 10,5 - 11

+ Khối lượng riêng, g/cm³ (30°C): 1,175 – 1,195

+ Phân tử lượng: 676 g/mol

2.1.2. Thiết bị thí nghiệm chính

- *Máy ép thủy lực (của Trường ĐH Thủ Dầu Một):* kích thước mặt bàn ép 650 x 650 mm; áp lực ép tối đa 50 kg/cm²; nhiệt độ mặt bàn ép tối đa 250°C

- *Tủ sấy thí nghiệm:* tủ sấy Memmert UN260 với nhiệt độ cài đặt từ 20 - 300°C, tủ sấy có độ chính xác ±0,1°C

- *Tủ ổn định mẫu:* tủ vi khí hậu Memmert HPP260Eco dùng để ổn định mẫu gỗ thí nghiệm với kích thước buồng tủ sấy (ngang x cao x sâu) 640 x 800 x 500 mm, nhiệt độ cài đặt từ 0 - 70°C và độ ẩm cài đặt từ 10 - 90%.

- *Máy thử tính chất cơ học:* máy thử tính chất cơ học Instron 3367 dùng để xác định các chỉ tiêu cơ học của vật liệu.

2.2. Quy trình sản xuất vật liệu composite từ keo PF PTLT và tre cán dập

Bước 1 - Sơ chế và xử lý thủy nhiệt: luồng tươi được cắt ngắn, bổ dọc (tạo nan), cán dập (Hình 1a); kích thước nan: 600 x 5 x 45-70 (mm); nan luồng cán dập được xử lý thủy nhiệt ở chế độ 140°C trong 3,5 giờ (Hình 1b) rồi sấy đến độ ẩm 8 – 10% trước khi ngâm tẩm keo.

Bước 2 - Ngâm tẩm nan tre cán dập trong PF PTLT theo chu trình chân không - áp lực với lượng keo tích tụ 18,5%; Nan sau ngâm tẩm keo được sấy đạt độ ẩm 11 – 12% (Hình 1c).

Bước 3 - Định lượng, tạo form: cân lượng nan sau ngâm tẩm theo kích thước vật liệu và khối lượng riêng đã xác định; xếp nan theo cùng 1 hướng trong khuôn (cỡ thép) có chiều dày 20 mm.

Bước 4 - Ép nhiệt: cố định áp suất ép 4,5 MPa, thay đổi nhiệt độ và thời gian ép (theo quy hoạch thực nghiệm).

Bước 5 - Ổn định tấm vật liệu ít nhất 7 ngày sau ép; gia công mẫu kiểm tra tính chất cơ lý của vật liệu composite.



Hình 1. Nan tre cán dập

2.3. Bố trí thực nghiệm

Căn cứ vào phân tích ảnh hưởng của các yếu tố và chỉ tiêu chất lượng vật liệu gỗ mong muốn đạt được, căn cứ thông tin tham khảo từ các chuyên gia và từ các tài liệu liên quan, nghiên

cứu chọn các thông số đầu vào và đầu ra để nghiên cứu như sau:

a) *Nhóm các yếu tố đầu vào cố định*

+ Lượng chất nền là hàm lượng keo PF PTLT tích tụ trong nan sau ngâm tẩm so với khối

lượng tre khô kiệt: 18,5%;

+ Áp suất ép 4,5 MPa; chiều dày của sản phẩm cố định: 20 mm;

+ Các thông số còn lại được xem như là yếu tố ngẫu nhiên và cố định.

b) Nhóm các yếu tố đầu vào thay đổi (biến số)

+ Nhiệt độ ép (°C) là nhiệt độ cao nhất của quá trình ép, $T = (120; 135; 150)$;

+ Thời gian ép (phút) là thời gian ép khi đạt nhiệt độ và áp suất ép (cao nhất) đã xác định bởi chế độ ép, $t = (15; 20; 25)$.

c) Nhóm các yếu tố đầu ra

+ Độ trương nở chiều dày - TS (%);

+ Độ bền cắt - SS (MPa);

+ Độ bền uốn tĩnh - MOR (MPa).

d) Xác định tính chất cơ lý vật liệu (TS, SS, MOR): theo tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 14117:2024. Mẫu kiểm tra tính chất cơ lý được mô tả ở Hình 2.

e) Bố trí thí nghiệm: theo phương án đáp ứng bề mặt (Response Surface Methods – RSM) áp dụng phương thức bố trí phức hợp tâm (Central Composite Design - CCD).

Để tìm ra các phương trình tương quan, tiến hành thực nghiệm mô hình thí nghiệm với 5 mức thí nghiệm; giá trị cánh tay đòn: $\alpha = 1,4142$; số nghiệm thức ở phương án bậc hai bất biến quay cần phải tiến hành: $N = 11$.

f) Xử lý số liệu: bằng phần mềm Design Expert và phân tích các đại lượng thống kê bằng ANOVA.



a. Tấm ván thí nghiệm



b. Mẫu thử độ trương nở



c. Mẫu thử MOR và Mô đun đàn hồi



d. Mẫu thử độ bền cắt song song

Hình 2. Mẫu thử tính chất cơ lý vật liệu

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả kiểm tra tính chất composite tre

Dữ liệu ghi trong Bảng 1 là giá trị trung bình của 3 lần lặp lại ($k=3$) của kết quả thí nghiệm

các phép thử. Việc xác định chất lượng vật liệu TS - Tỷ lệ trương nở chiều dày, SS - Độ bền cắt song song, MOR - Độ bền uốn tĩnh, được thực hiện theo TCVN 14117:2024.

Bảng 1. Kết quả tính chất cơ lý của vật liệu composite tre

Thí nghiệm	Nhiệt độ ép T (°C)	Thời gian ép t (phút)	Tỷ lệ trương nở TS (%)	Độ bền cắt SS (MPa)	Độ bền uốn tĩnh MOR (MPa)
1	135	20	4,59	18,11	121,62
2	120	15	2,85	16,33	130,41
3	120	25	3,75	18,79	107,43
4	150	15	1,95	17,52	158,86
5	150	25	4,30	20,01	136,39
6	135	20	4,76	18,13	121,71
7	113,787	20	2,90	17,22	124,81
8	156,213	20	2,75	18,94	165,44
9	135	12,929	1,70	16,35	137,79
10	135	27,072	4,45	19,83	105,40
11	135	20	4,67	18,12	121,58

3.2. Phân tích ANOVA, xây dựng mô hình hồi quy và biểu diễn đồ thị

3.2.1. Kết quả ANOVA và phương trình hồi quy cho TS (độ trương nở chiều dày)

Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) cho thấy mô hình hồi quy bậc hai được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ ép và thời gian ép đến độ trương nở chiều dày (TS) là có ý nghĩa thống kê ở mức tin cậy 95%. Giá trị F của mô hình đạt 60,91 với $p < 0,001$, cho thấy sự phù hợp giữa mô hình và dữ liệu thực nghiệm. Hệ số xác định R^2 đạt 98,38%, trong khi R^2 hiệu chỉnh và R^2 dự đoán lần lượt là 96,77% và 89,07%, phản ánh khả năng giải thích tốt sự biến thiên của TS trong miền khảo sát.

Sau khi loại bỏ các hệ số không có ý nghĩa thống kê, phương trình hồi quy mô tả mối quan hệ giữa TS (%) với nhiệt độ ép và thời gian ép được xác định như sau:

$$TS (\%) = -66,49 + 0,929T + 0,7t - 0,003816T^2 - 0,02934t^2 + 0,00483Tt \quad (1)$$

3.2.2. Kết quả ANOVA và phương trình hồi quy cho SS (độ bền cắt)

Đối với độ bền cắt, kết quả phân tích ANOVA cho thấy mối quan hệ giữa SS và các thông số ép được mô tả rất tốt bởi mô hình hồi quy xây dựng, với ý nghĩa thống kê cao ở mức tin cậy 95%. Giá trị F của mô hình đạt 1220,97 ($p < 0,001$), cùng với hệ số xác định R^2 đạt 99,92%, cho thấy mô hình giải thích gần như toàn bộ sự

biến thiên của dữ liệu thực nghiệm.

Kết quả ANOVA chi tiết chỉ ra rằng thành phần tuyến tính đóng vai trò quyết định đối với sự biến thiên của SS. Trong đó, thời gian ép là yếu tố ảnh hưởng mạnh nhất với giá trị F đạt 4920,60 ($p < 0,001$), tiếp theo là nhiệt độ ép với giá trị F đạt 1184,09 ($p < 0,001$). Điều này cho thấy độ bền cắt tăng rõ rệt khi tăng cường độ và thời gian tác động nhiệt trong quá trình ép. Ngược lại, các thành phần bậc hai và tương tác giữa hai yếu tố không thể hiện ý nghĩa thống kê ($p > 0,05$), cho thấy mối quan hệ giữa SS và các thông số ép trong miền nghiên cứu chủ yếu mang tính tuyến tính. Nhận định này phù hợp với biểu đồ Pareto (Hình 4), trong đó chỉ các hiệu ứng tuyến tính vượt ngưỡng ý nghĩa thống kê.

Sau khi loại bỏ các hệ số không có ý nghĩa thống kê, phương trình hồi quy tuyến tính mô tả mối quan hệ giữa độ bền cắt và các thông số ép được xác định như sau:

$$SS (MPa) = 7,739 + 0,040354T + 0,24679t \quad (2)$$

3.2.3. Kết quả ANOVA và phương trình hồi quy cho MOR (độ bền uốn tĩnh)

Kết quả phân tích ANOVA cho thấy mô hình hồi quy được xây dựng mô tả ảnh hưởng của nhiệt độ ép và thời gian ép đến độ bền uốn tĩnh (MOR) là phù hợp với dữ liệu thực nghiệm ở mức tin cậy 95%. Giá trị F của mô hình đạt 1220,97 với $p < 0,001$, cùng với hệ số xác định

R^2 đạt 99,92%, cho thấy mô hình có khả năng giải thích gần như toàn bộ sự biến thiên của MOR trong miền khảo sát.

Sau khi loại bỏ các hệ số không có ý nghĩa thống kê, phương trình hồi quy mô tả mối quan hệ giữa độ bền uốn tĩnh và các thông số ép được xác định như sau:

$$\text{MOR (MPa)} = 993,11 - 13,1586T - 2,5109t + 0,052155T^2 + 0,0017Tt \quad (3)$$

3.3. Đồ thị mặt đáp ứng

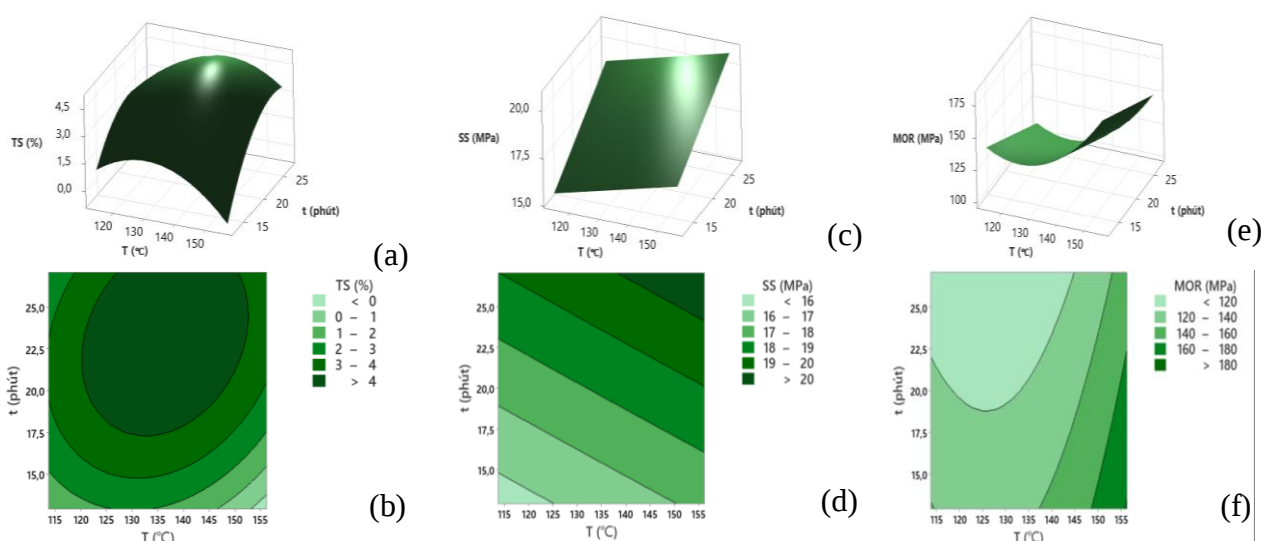
Đồ thị đường đồng mức và đồ thị bề mặt đáp ứng ba chiều được xây dựng dựa trên các phương trình hồi quy đã hiệu chỉnh nhằm minh họa trực quan ảnh hưởng đồng thời của nhiệt độ ép và thời gian ép đến độ trương nở chiều dày (TS), độ bền cắt (SS) và độ bền uốn tĩnh (MOR). Các đồ thị được trình bày trong Hình 3 cho phép so sánh trực tiếp đặc điểm biến thiên của từng chỉ tiêu trong cùng miền thông số công nghệ.

Đối với độ trương nở chiều dày, các đồ thị mặt đáp ứng cho thấy TS biến thiên theo dạng phi tuyến rõ rệt theo nhiệt độ và thời gian ép. Vùng TS thấp tập trung chủ yếu tại khu vực nhiệt độ ép cao kết hợp với thời gian ép ngắn, trong khi TS tăng lên khi thời gian ép kéo dài, đặc biệt ở vùng nhiệt độ trung bình. Dạng cong khép kín của các đường đồng mức và bề mặt

đáp ứng phản ánh rõ vai trò chi phối của các thành phần bậc hai và sự tương tác giữa hai thông số ép.

Ngược lại, các đồ thị mặt đáp ứng của độ bền cắt thể hiện xu hướng biến thiên tương đối tuyến tính trong toàn bộ miền khảo sát. Giá trị SS tăng dần theo cả nhiệt độ và thời gian ép, với các đường đồng mức gần song song, cho thấy ảnh hưởng chủ yếu của các thành phần tuyến tính và sự hạn chế của các hiệu ứng phi tuyến. Điều này phản ánh sự cải thiện liên tục mức độ liên kết trong cấu trúc vật liệu khi cường độ và thời gian tác động nhiệt tăng lên.

Đối với độ bền uốn tĩnh, các đồ thị mặt đáp ứng cho thấy MOR chịu ảnh hưởng đồng thời của nhiệt độ và thời gian ép, trong đó nhiệt độ đóng vai trò chi phối rõ rệt hơn. Giá trị MOR tăng mạnh ở vùng nhiệt độ cao, trong khi ảnh hưởng của thời gian ép thể hiện rõ hơn ở các mức nhiệt độ trung bình. Hình dạng bề mặt đáp ứng cho thấy xu hướng biến thiên gần tuyến tính trong miền khảo sát, phù hợp với đặc trưng cơ học uốn của vật liệu. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Yahui Zhang và cộng sự (2021) [3]; Anwar và cộng sự (2006) [6] về tạo vật liệu composite từ tre với nguyên liệu là tre cán đập và keo PF PTLT.



Hình 3. Đồ thị bề mặt đáp ứng và đồ thị đường đồng mức thể hiện ảnh hưởng của nhiệt độ ép và thời gian ép đến (a, b) độ trương nở chiều dày (TS), (c, d) độ bền cắt (SS) và (e, f) độ bền uốn tĩnh (MOR)

Nhìn chung, các đồ thị mật đáp ứng cho thấy sự khác biệt rõ rệt về bản chất ảnh hưởng của các thông số ép đến từng chỉ tiêu chất lượng. Trong khi TS chịu chi phối mạnh bởi các hiệu ứng phi tuyến và tương tác, SS và MOR chủ yếu chịu ảnh hưởng của các thành phần tuyến tính. Các kết quả này bổ sung và củng cố cho phân tích ANOVA, đồng thời cung cấp cơ sở trực quan cho việc lựa chọn và tối ưu hóa chế độ ép nhằm cân bằng giữa ổn định kích thước và tính chất cơ học của sản phẩm.

3.4. Tối ưu hóa hàm đa mục tiêu

Việc lựa chọn chế độ ép trong nghiên cứu này đòi hỏi thỏa mãn các mục tiêu khác nhau, theo thứ tự ưu tiên, bao gồm: giảm thiểu độ trương nở chiều dày (TS), tối đa hóa độ bền uốn tĩnh (MOR) và đảm bảo độ bền cắt (SS) không vượt quá 5%, đồng thời cũng xem xét đến yêu cầu kỹ thuật đáp ứng điều kiện trong sản xuất, nhiệt độ cho quá trình ép nhiệt không nên vượt quá 150°C.

Giải bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu theo hàm tại công thức (1), (2), (3) xác định tổ hợp thông số công nghệ phù hợp nhất trong miền khảo sát. Kết quả tối ưu cho thấy tổ hợp thông số ép với nhiệt độ 148,35°C và thời gian 18,26 phút cho giá trị hàm độ mong muốn tổng hợp $D = 0,7826$, phản ánh mức độ thỏa hiệp cao giữa các mục tiêu chất lượng đặt ra. Tại điều kiện này, giá trị dự đoán của MOR đạt 146,84 MPa, TS giảm xuống còn 3,36% và SS đạt 18,24 MPa.

Phân tích các hàm mong muốn riêng lẻ cho thấy TS và MOR đều đạt mức độ mong muốn rất cao, với giá trị desirability lần lượt là 0,9944 và 1,0000, trong khi SS đạt mức độ mong muốn trung bình ($d = 0,5114$). Điều này cho thấy nghiệm tối ưu được xác định ưu tiên rõ rệt cho việc nâng cao độ ổn định kích thước và khả năng chịu uốn của vật liệu, trong khi độ bền cắt vẫn được duy trì ở mức chấp nhận được trong phạm vi ứng dụng. Dạng biến thiên của các hàm đáp ứng riêng lẻ cũng cho thấy TS đạt giá trị cực tiểu trong vùng nhiệt độ cao kết hợp với thời gian ép trung bình, trong khi MOR tiếp tục tăng

theo nhiệt độ ép, phù hợp với xu hướng đã được xác định trong các phân tích trước đó.

Tóm lại, kết quả tối ưu hóa đa mục tiêu khẳng định rằng việc áp dụng hàm độ mong muốn cho phép xác định một chế độ ép cân bằng, đáp ứng đồng thời các yêu cầu về ổn định kích thước và tính chất cơ học của vật liệu. Tổ hợp thông số tối ưu được đề xuất không chỉ phù hợp với kết quả phân tích ANOVA và đồ thị mật đáp ứng, mà còn cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn chế độ công nghệ trong sản xuất nhằm nâng cao chất lượng tổng thể của sản phẩm.

4. KẾT LUẬN

Qua kết quả nghiên cứu sự ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian ép (trong miền khảo sát (nhiệt độ ép từ 120-150°C và thời gian ép 15 - 25 phút) tới chất lượng của vật liệu composite từ PF PTLT và tre, ta có một số kết luận như sau:

- Độ trương nở theo chiều dày TS biến thiên từ 1,95 - 4,76% và có xu hướng phi tuyến theo nhiệt độ và thời gian ép.

- Độ bền cắt dọc SS đạt 16,33 - 20,01 MPa, trong đó giá trị cao thường gắn với thời gian ép lớn hơn, phản ánh nhu cầu thời gian đủ để mạng PF phát triển và liên kết đạt độ bền chắc.

- Độ bền uốn tĩnh MOR dao động trong khoảng 105,40 – 165,44 MPa và chịu ảnh hưởng nổi bật của nhiệt độ ép; khi tăng nhiệt độ ép sẽ làm tăng tốc độ ngưng tụ tạo cầu nối và mật độ liên kết chéo, từ đó sự gia tăng khả năng truyền ứng suất giữa các lớp tre khi chịu uốn có cơ hội hình thành.

- Trên cơ sở mô hình hồi quy và tối ưu hóa đa mục tiêu theo hướng ưu tiên kiểm soát TS và MOR, đồng thời đáp ứng yêu cầu kỹ thuật và khả năng áp dụng trong sản xuất, tổ hợp thông số công nghệ tối ưu được xác định là nhiệt độ ép 148,35°C và thời gian ép 18,26 phút. Tại điều kiện này, giá trị dự đoán của MOR đạt 146,84 MPa, TS giảm còn 3,36% và SS đạt 18,24 MPa, cho thấy sự cân bằng hợp lý giữa độ ổn định kích thước và các tính chất cơ học của vật liệu composite tre.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn Bộ Khoa học và Công nghệ đã tạo điều kiện, hỗ trợ nguồn lực và kinh phí để thực hiện nghiên cứu này thông qua đề tài “Nghiên cứu chế tạo vật liệu composite tấm lợp từ nhựa Phenol Formaldehyde (PF) và tre làm nguyên liệu cho đóng tàu cá vỏ gỗ và tấm lót đường”, mã số ĐTDL.CN-03/24.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. Mahdavi, P. L. Clouston, A. M. Asce & S. R. Arwade (2011). Development of Laminated Bamboo Lumber: Review of Processing, Performance, and Economical Considerations. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 23(7): 1036-1042. DOI: 10.1061/(ASCE).
- [2]. UMK Anwar, MT Paridah, H Hamdan, A Zaidon, A Roziela Hanim & AS Nordahlia (2012). Adhesion and bonding properties of low molecular weight phenol formaldehyde – treated plybamboo. *Journal of Tropical Forest Science*. 24(3): 379–386
- [3]. Yahui Zhang, Wenji Yu, Namhun Kim & Yue Qi (2021). Mechanical Performance and Dimensional

Stability of Bamboo Fiber-Based Composite. *Polymers (Basel)*. 13(11): 1732. DOI: 10.3390/polym13111732

- [4]. Fei Rao, Yaohui Ji, Neng Li, Yahui Zhang, Yuhe Chen & Wenji Yu (2020). Outdoor bamboo-fiber-reinforced composite: Influence of resin content on water resistance and mechanical properties. *Construction and Building Materials*. 261. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120022

[5]. Yanglun Yu, Yuxiang Huang, Yahui Zhang, Ru Liu, Fandan Meng & Wenji Yu (2018). The Reinforcing Mechanism of Mechanical Properties of Bamboo Fiber Bundle-Reinforced Composites, polymer composites. Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com).

- [6]. UMK. Anwar, M. T. Paridah, H. Hamdan, A. Zaidon & E. S. Bakar (2006). Impregnation of bamboo (*Gigantochloa scortechinii*) strips with low-molecular-weight phenol formaldehyde resin. *J. Bamboo and Rattan*. 5(3-4): 159-165

[7]. Nguyễn Thị Phương, Nguyễn Thanh Tùng, Nguyễn Văn Định & Tạ Thị Thanh Hương (2023). Ảnh hưởng của thời gian và nhiệt độ sấy của quá trình sấy đóng rắn keo đến tính chất cơ học, vật lý của sản phẩm tre ép khối. *Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp*. 5: 128–135