

MỨC ĐỘ CHÊNH LỆCH ẨM VÀ SỰ PHÁT TRIỂN KHUYẾT TẬT TRONG QUÁ TRÌNH SẤY GỠ KEO TAI TƯỢNG (*Acacia mangium* Willd.)

Hà Tiến Mạnh¹, Phạm Văn Chương², Bùi Duy Ngọc¹,
Nguyễn Thị Phượng¹, Trần Đức Trung¹

¹ Viện Nghiên cứu Công nghiệp Rừng

² Trường Đại học Lâm nghiệp

TÓM TẮT

Nghiên cứu này đã xác định được mức độ chênh lệch ẩm và quá trình phát triển khuyết tật gỗ Keo tai tượng (*Acacia mangium* Willd.) trong suốt quá trình sấy quy chuẩn. Hai mẻ sấy cứng với dốc sấy $U = 4,5 - 5,0$ và mềm với dốc sấy $U = 2,0 - 2,5$ đã được thí nghiệm để xác định mức độ chênh lệch ẩm theo chiều dày tấm gỗ bằng phương pháp cắt lát và diễn biến các khuyết tật nứt mặt, nứt đầu, mo móp, cong vênh bằng tiêu chuẩn AS/NZS 4787:2001 và AS 2082:2007 tại 4 thời điểm trước sấy, khi độ ẩm gỗ (MC) đạt 50%, 20% và sau sấy. Kết quả khảo sát cho thấy diễn biến chênh lệch ẩm có liên quan rõ ràng đến sự phát triển của các khuyết tật suốt quá trình sấy và mức độ chênh lệch ẩm cũng như khuyết tật ở hai mẻ sấy là khác nhau. Sự giảm ẩm ở lớp bề mặt tấm gỗ trong mẻ sấy cứng nhanh hơn và nhanh chóng xuống dưới điểm bão hòa thứ gỗ (FSP) trong giai đoạn từ khi bắt đầu sấy về MC 50% làm cho chênh lệch ẩm giữa tâm và bề mặt (cao nhất 140%) là lớn hơn so với mẻ sấy mềm (cao nhất 100%). Đây là nguyên nhân khiến khuyết tật nứt mặt, nứt đầu, mo móp, cong vênh ở mẻ sấy cứng có mức độ lớn hơn và nhiều hơn so với mẻ sấy mềm. Mức độ chênh lệch ẩm có xu hướng giảm khi tiếp tục sấy do lớp bề mặt đã bắt đầu khô chậm lại và lớp phía trong tiếp tục khô và khi kết thúc đạt 24% và 14% lần lượt ở mẻ sấy cứng và mẻ sấy mềm. Đây là lý do làm các vết nứt có xu hướng đóng dần lại. Mức độ mo móp ở mẻ sấy cứng (4-6 mm) lớn hơn nhiều ở mẻ sấy mềm (trong khoảng 0,5 mm) làm cho cấp chất lượng gỗ sấy ở mẻ sấy cứng phân theo tiêu chí này đạt mức thấp (loại E theo AS/NZS 4787:2001). Sự phát triển cong vênh ở mẻ sấy mềm hầu như không có nhưng ở mẻ sấy cứng, xu hướng tăng cong vênh xuất hiện suốt quá trình sấy (chiều cao cong vênh tăng lên 2-3 mm khi kết thúc quá trình sấy). Mức độ chênh lệch ẩm của mẻ sấy cứng luôn cao hơn mẻ sấy mềm ở cả 4 thời điểm kiểm tra là nguyên nhân của mức độ khuyết tật gỗ sấy ở mẻ sấy cứng luôn cao hơn mẻ sấy mềm.

Từ khóa: Mức độ chênh lệch ẩm, sự phát triển khuyết tật gỗ sấy, Keo tai tượng

Keywords: *Acacia mangium* Willd., defect development, moisture content gradient

Moisture content gradient and defect development of *Acacia mangium* Willd. during drying process

This study investigated the moisture content gradient and the defect development of *Acacia mangium* Willd. during the conventional drying. Two batches of fast drying with drying gradient $U = 4.5 - 5.0$ and slow drying with drying gradient $U = 2.0 - 2.5$ were conducted to determine the moisture content gradient according to timber thickness by the oven-drying method and the defect development by AS/NZS 4787:2001 and AS 2082:2007 at before drying, MC of 50%, MC of 20% and after drying. The

results showed that the moisture content gradient had a significant correlation to the defects development during drying process and their values were different in the two drying batches. The moisture decrease in the surface layer of the timber in the fast drying batch is faster and rapidly below the fibre saturation point (FSP) in the period from the start of drying to MC of 50%, causing the moisture difference between the core and the surface (highest 140%) was larger than that in the slow drying batch (highest 100%). This was the reason why the degree of surface check, end check, collapse and distortion in the fast drying batch are higher and more frequent than that in the slow drying batch. The moisture content gradient tended to decrease with continued drying as the surface layer started to dry slowly and the core layer continued to dry fastly and reached 24% and 14% respectively in the fast and slow drying batches at the end. Therefore, the checks tend to gradually close. The degree of collapse in the fast drying batch (4-6 mm) was much greater than that in the slow drying batch (within 0.5 mm), making the quality grade of the dried wood in the fast drying batch reached a low level (grade E according to AS/NZS 4787:2001). The distortion development was almost absent in the slow drying batch, but was a tendency to increase during the fast drying batch (warping height increased by 2-3 mm at the end of drying). The moisture content gradient in the fast drying batch was always higher than that in the slow drying batch at all 4 test times, which led to the degree of wood defects in the fast drying batch were always larger than those in the slow drying batch.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Quá trình sấy gỗ là tổng hợp các quá trình vận chuyển xảy ra bên trong gỗ và trên bề mặt gỗ, bao gồm vận chuyển ẩm, bay hơi bề mặt, vận chuyển nhiệt, trao đổi nhiệt (Vũ Huy Đại, 2006). Nghiên cứu này tập trung vào quá trình vận chuyển ẩm trong gỗ sấy. Động lực chủ yếu để vận chuyển ẩm (nước và hơi nước) từ trong gỗ ra bề mặt khi sấy là mức độ chênh lệch ẩm, được đặc trưng bằng dốc ẩm (moisture gradient hay moisture content gradient, sau đây gọi tắt là MC gradient) (C. Skaar, 1988; Vũ Huy Đại, 2006). Tuy nhiên, mức độ chênh lệch ẩm cũng dẫn đến sự co rút không đều, sản sinh nội ứng suất là nguyên nhân gây ra các hiện tượng nứt vỡ và biến dạng. Điều tiết mức độ chênh lệch ẩm trong gỗ sẽ giúp quá trình sấy gỗ đạt hiệu quả cao, gỗ khô nhanh nhưng khuyết tật được hạn chế (J. M. McMillen, 1958). Nghiên cứu xác định mức độ chênh lệch ẩm tại các vị trí theo chiều dày từ tâm ra bề mặt gỗ trong suốt quá trình sấy là một trong

các cơ sở khoa học vững chắc để đánh giá nguyên nhân của khuyết tật gỗ sấy.

Ở cùng một điều kiện môi trường sấy bên ngoài, tức là tốc độ bay hơi bề mặt gỗ sấy như nhau, gỗ có tốc độ vận chuyển ẩm lớn thì chênh lệch ẩm trong gỗ sẽ nhỏ, nội ứng suất sinh ra cũng nhỏ hơn. Sự vận chuyển ẩm trong gỗ, được gọi là quá trình chuyển khối (mass transfer), có vai trò quan trọng vì ảnh hưởng trực tiếp đến tốc độ sấy và chất lượng gỗ sấy. Tuy nhiên, sự vận chuyển ẩm này rất phức tạp thông qua hệ thống các kênh mao quản chính được kết nối với nhau bằng các lỗ nhỏ hơn và phụ thuộc vào cấu tạo gỗ (J. C. F. Walker, 2006) nên ít được thực hiện trong các nghiên cứu trước đây tại Việt Nam. Các kết quả xác định khả năng vận chuyển ẩm và các yếu tố tác động thuộc về đặc tính gỗ đã được Hà Tiến Mạnh và đồng tác giả (2021, 2022) công bố sẽ là cơ sở giải thích cho sự ảnh hưởng của chênh lệch ẩm đến khuyết tật khi sấy.

Keo tai tượng là cây gỗ rừng trồng chủ lực, cung cấp nguyên liệu cho ngành chế biến gỗ xẻ đã được lựa chọn để nghiên cứu. Đây là loài gỗ rừng trồng khó sấy và có nhiều khuyết tật khi sấy làm cản trở đến năng suất và lợi nhuận của quá trình chế biến. Nghiên cứu tập trung vào công việc xác định mức độ chênh lệch ẩm và sự phát triển khuyết tật trong gỗ Keo tai tượng suốt quá trình sấy quy chuẩn.

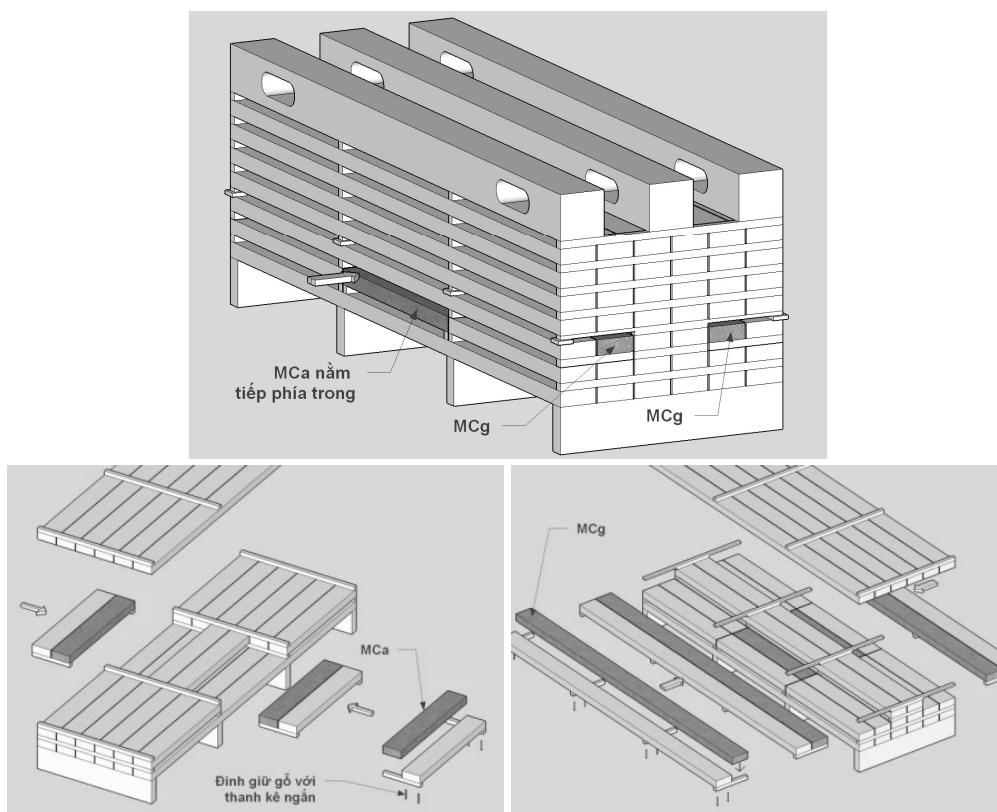
II. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu và thiết bị nghiên cứu

Vật liệu được sử dụng 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. Gỗ được xẻ thanh kích thước dài \times rộng \times dày là $1.322 \times 80 \times 25$ mm. Tất cả các thanh gỗ không dính tâm (tuý), ít khuyết tật đã được lựa chọn để xác định độ ẩm. Từ mỗi 2 đầu thanh gỗ, loại bỏ 1 đoạn dài 200 mm, sau đó cắt

tiếp mẫu có kích thước dọc thứ 5 mm để xác định độ ẩm thanh gỗ bằng phương pháp cân-sấy. Kết quả sau kiểm tra cho thấy, độ ẩm các thanh gỗ nằm trong khoảng 88,2 - 158,6%. Ở mỗi mẻ sấy, 60 thanh dài 900 mm có độ ẩm lớn hơn 100% đã được lựa chọn từ các thanh gỗ ở trên để sơn bịt đầu bằng nhựa epoxy, đo đếm kích thước, khuyết tật, xếp đóng vào lò sấy và đánh giá mức chênh lệch ẩm trong suốt quá trình sấy quy chuẩn tại phòng thí nghiệm, Viện Nghiên cứu Công nghiệp Rừng.

Sơ đồ hình 1 dưới đây đã được sử dụng với mẻ sấy các thanh gỗ dài 1.800 mm để thực hiện nội dung nghiên cứu khác. Ở nghiên cứu này, sơ đồ đó được kế thừa nhưng chiều dài gỗ là 900 mm nên số thanh kê trên 1 lớp gỗ giảm từ 4 thành 3 thanh. Cách xếp mẫu kiểm tra độ ẩm trung bình (MC_a) và kiểm tra mức độ chênh lệch ẩm trong tấm gỗ (MC_g) cũng thay đổi về vị trí, nhưng nguyên lý là tương tự.



Hình 1. Sơ đồ xếp đóng gỗ sấy để rút 2 mẫu MC_a và 2 mẫu MC_g

Thiết bị thí nghiệm:

- Lò sấy gỗ theo phương pháp sấy quy chuẩn Shepherd Systems P/L, Model: Melb Uni 2074-4 do Úc thiết kế chế tạo được sử dụng để sấy thí nghiệm (hình 2).

Mô tả: Lò sấy hoạt động theo nguyên lý của lò sấy quy chuẩn gia nhiệt bằng điện. Hai thông số môi trường sấy được đo, hiển thị và báo về bộ điều khiển là nhiệt độ T và độ ẩm RH

(thông qua nhiệt kế khô và nhiệt kế ướt). Hệ thống điều khiển gồm 9 chương trình, mỗi chương trình có 9 bước được sử dụng để cài đặt thông số sấy của từng bước hoặc từng giai đoạn sấy. Lò sấy không có cảm biến đo độ ẩm gỗ nên để cài đặt các thông số sấy theo diễn biến giảm độ ẩm gỗ cần có các thanh mẫu sấy được rút ra để kiểm tra độ ẩm theo các khoảng thời gian sấy.

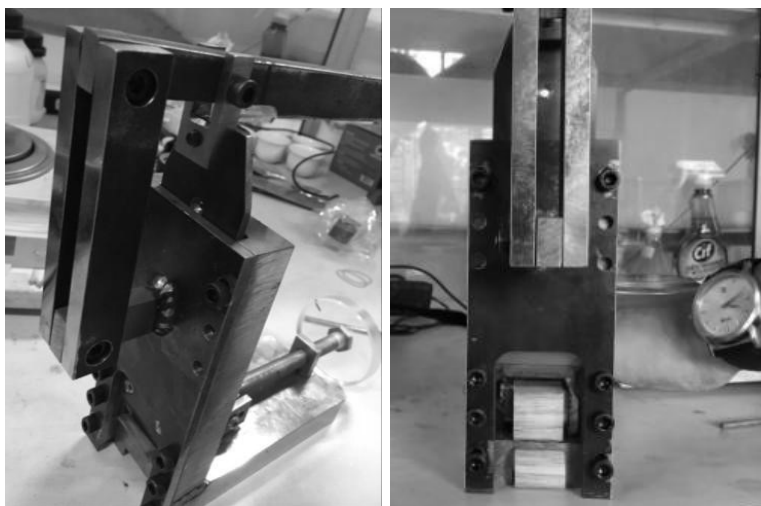


Hình 2. Lò sấy gỗ quy chuẩn Melb Uni 2074-4

- Lò sấy mẫu Memmert của Đức được sử dụng để sấy kiểm tra độ ẩm trung bình tức thời của các mẻ sấy và độ ẩm của các lát cắt.

- Cửa đa năng bàn trượt để cắt mẫu kiểm tra độ ẩm và chênh lệch ẩm trong suốt quá trình sấy.

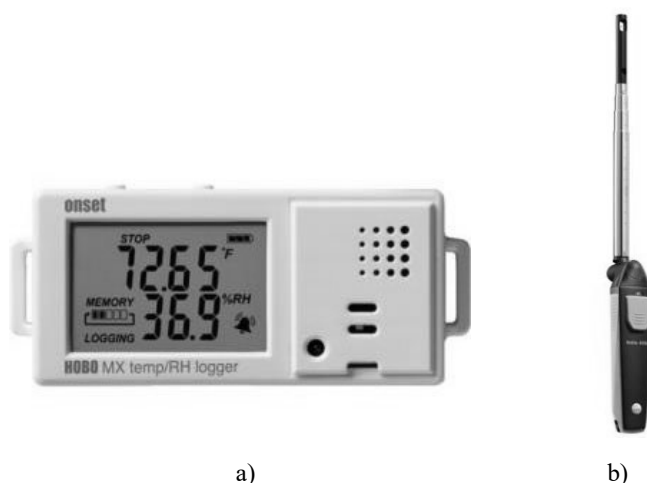
- Thiết bị cắt lát như hình 3 (chế tạo tại Việt Nam theo thiết kế của DAF, Úc) được sử dụng để cắt lát mẫu mỏng xác định mức chênh lệch ẩm theo chiều dày tấm gỗ trong suốt quá trình sấy.



Hình 3. Thiết bị cắt lát mẫu gỗ mỏng

- Thiết bị đo nhiệt độ và độ ẩm môi trường sấy HOBO meter của Mỹ và thiết bị đo tốc độ gió Testo 405i Smart Probe của Đức (hình 4) được đặt vào khe gió giữa 2 lớp gỗ sấy và được sử dụng bổ sung để lưu trữ dữ liệu, vẽ biểu đồ thông số môi trường sấy tự động trên điện thoại

thông minh phục vụ cho báo cáo kết quả. Các thiết bị này đã được khuyến cáo sử dụng trong quá trình tập huấn phương pháp xác định chênh lệch ẩm tại DAF, Úc. HOBO meter đo được nhiệt độ từ -15°C đến 70°C và độ ẩm môi trường từ 15% đến 95% với độ chính xác là $\pm 3,5\%$.



Hình 4. Thiết bị đo thông số môi trường trong lò sấy

a - đo nhiệt độ và độ ẩm môi trường HOBO meter; b - đo tốc độ gió Testo 405i Smart Probe

Chế độ sấy:

Để nghiên cứu đánh giá sự ảnh hưởng của mức độ chênh lệch ẩm đến khuyết tật gỗ Keo tai tượng khi sấy, 02 mẻ sấy quy chuẩn với 02 chế độ sấy cứng (mẻ số 1) và mềm (mẻ số 2) đã được thực hiện. Chế độ sấy cho mẻ sấy

mềm được tham khảo từ các cơ sở sản xuất hiện nay và chế độ sấy gỗ keo trong sách "Chế độ sấy cho các loại gỗ thương mại" (R. S. Boone *et al.*, 1988). Mẻ sấy số 1 lựa chọn chế độ sấy rất cứng để sự khác biệt về chất lượng giữa 2 mẻ sấy là rõ ràng.

Bảng 1. Chế độ sấy cứng với dốc sấy $U = 4,4 - 5,0$

Các bước thực hiện	MC _a (%)	T (°C)	RH (%)	EMC (%)	Dốc sấy U	Thời gian (h)
Gia nhiệt + xử lý phun ẩm		60	90	24	-	6
Sấy đẳng tốc	> 50	60	72	11,4	4,4	-
	50 - 40	60	60	9,1	4,4	-
	40 - 30	60	46	6,8	4,4	-
Xử lý phun ẩm giữa chừng	30	70	70	10	3,0	6
Sấy tăng tốc	30 - 20	70	28	4,0	5,0	-
	20 - 15	70	20	3,0	5,0	-
	15 - 12	70	15	2,4	5,0	-
Xử lý cuối (điều hòa ẩm)	12	70	78	12	1,0	6
Kết thúc, để nguội	12	-	-	-	-	-

Bảng 2. Chế độ sấy mềm với dốc sấy U = 2,0 - 2,5

Các bước thực hiện	MC _a (%)	T (°C)	RH (%)	EMC (%)	Dốc sấy U	Thời gian (h)
Gia nhiệt + xử lý phun ẩm		40	98	25,0	-	6
Sấy đẳng tốc	> 50	40	98	25,0	2,0	-
	50 - 40	40	92	20,0	2,0	-
	40 - 30	40	80	15,0	2,0	-
Xử lý phun ẩm giữa chừng	30	60	90	17,2	1,7	6
Sấy tăng tốc	30 - 20	60	54	8,0	2,5	-
	20 - 15	60	40	6,0	2,5	-
	15 - 12	60	30	4,8	2,5	-
Xử lý cuối (điều hoà ẩm)	12	60	75	12	1,0	6
Kết thúc, để nguội	12	-	-	-	-	-

Các yếu tố cố định: Tốc độ gió 2 m/s, thanh kê vuông 20 × 20 mm.

Phương pháp đánh giá độ ẩm trung bình mẻ sấy (MC_a):

02 thanh mẫu (ký hiệu mẫu là số 1 và 2), đại diện để xác định độ ẩm đồng gỗ sấy MC_a (%), đã được kiểm tra độ ẩm ban đầu MC_{ai} bằng cân - sấy và được rút ra định kỳ mỗi ngày một lần để cân và xác định MC_{at} theo công thức sau:

$$MC_{at} = \frac{m_t}{m_i} \left(1 + \frac{MC_{ai}}{100} \right) - 1 \quad (1)$$

Trong đó:

MC_{at} - Độ ẩm của thanh mẫu tại các thời điểm đo (%);

m_t - Khối lượng thanh mẫu tại các thời điểm đo (g);

m_i - Khối lượng ban đầu của thanh mẫu (g);

MC_{ai} - Độ ẩm ban đầu của thanh mẫu (%).

Phương pháp đánh giá mức độ chênh lệch ẩm trong tấm gỗ sấy (MC_g):

02 thanh mẫu (ký hiệu mẫu là số 3 và 4), đại diện để xác định mức độ chênh lệch ẩm MC_g, được rút ra để lấy mẫu cắt lát xác định mức độ chênh lệch ẩm mỗi ngày một lần. Sau mỗi lần, 2 thanh mẫu này được sơn bịt đầu và cho vào

lại trong lò sấy để tiếp tục sấy. Mẫu có chiều dọc thớ là 25 mm được cắt sau khi loại bỏ phần đầu dài 15 mm, chiều dày bằng chiều dày thanh gỗ (25 mm), chiều rộng là 25 mm được cắt tại chính giữa chiều rộng thanh gỗ. Các mẫu được cho vào túi zip để giữ ẩm và chuyển ngay đến phòng thí nghiệm để tiến hành cắt lát và cân sấy xác định độ ẩm. 20 lát cắt có chiều dày khoảng 1 mm được cắt từ 2 bề mặt và tiến dần vào tâm của mỗi mẫu. Các lát này lập tức được đo chiều dày và cân khối lượng, sau đó đưa vào sấy khô kiệt ở 103°C để xác định độ ẩm từng lát. Đồ thị độ ẩm theo vị trí từng lát trong mẫu được sử dụng để đánh giá mức độ chênh lệch ẩm trong tấm gỗ sấy.

Phương pháp đánh giá khuyết tật gỗ sấy:

Khuyết tật nứt ngàm không được thực hiện trong nghiên cứu này vì không có thiết bị mô phỏng mức độ nứt ngàm mà không phá hủy mẫu trong suốt quá trình sấy.

Các khuyết tật nứt mặt, nứt đầu (bao gồm nứt đầu từ bề mặt này tới bề mặt kia của thanh gỗ và nứt đầu chỉ ở 1 bề mặt) được đo chiều dài vết nứt. Biến dạng mo móp được đo tổng chiều sâu vị trí bị mo móp nhất của 2 bề mặt ván. Tiêu chuẩn AS/NZS 4787:2001 Timber-Assessment of drying quality (Gỗ xẻ - đánh giá chất lượng gỗ sấy) được sử dụng làm phương pháp đo.

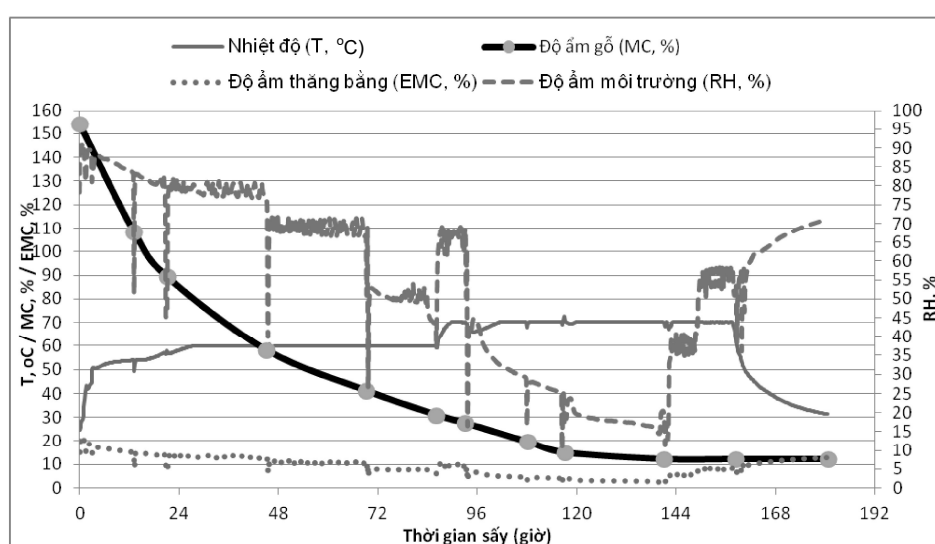
Các biến dạng cong vênh (cong mặt - bow, cong cạnh - spring, vặn vò xoắn - twist và cong lòng máng - cup) được đo tại chiều cao chỗ cong vênh nhất theo tiêu chuẩn AS 2082:2007 Timber-Hardwood-Visually stress-graded for structural purposes (Gỗ xẻ - gỗ lá rộng - đánh giá mức độ giảm cấp gỗ kết cấu theo ứng suất).

Khuyết tật và biến dạng được đo trên 10 thanh trong đồng gỗ sấy (trừ 2 hàng chứa mẫu đo MC_a , MC_g , mỗi hàng lấy 1 thanh thứ 2 từ phía ngoài vào) tại 4 thời điểm: trước sấy, khi độ ẩm trung bình đạt 50%, 20% và sau sấy để mô tả được diễn biến khuyết tật trong quá trình sấy của hai mẻ sấy cứng, mềm khác nhau.

III. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Diễn biến giảm độ ẩm gỗ và diễn biến môi trường sấy

Mẻ sấy cứng



Hình 5. Diễn biến độ ẩm gỗ và các thông số môi trường theo thời gian ở mẻ sấy cứng (độc sấy $U = 4,4 - 5,0$)

Hình 5 cho thấy diễn biến giảm độ ẩm gỗ sấy và diễn biến thay đổi các thông số môi trường sấy theo thời gian ở mẻ sấy số 1 với chế độ sấy cứng. Thời gian để gỗ giảm độ ẩm (MC) từ ban đầu (154,25%) về 50% mất 55 giờ, bình quân 1,89%/giờ. Thời gian gỗ giảm ẩm từ 50% xuống 30% là 31 giờ, bình quân 0,64%/giờ. Trong hai khoảng này, độc sấy duy trì $U = 4,4$. Khi đạt MC 30%, gỗ được xử lý phun ẩm giữa chừng trước khi giai đoạn sấy tăng tốc bắt đầu để duy trì độc sấy $U = 5,0$ cho tới khi gỗ đạt MC 12%. Tốc độ giảm ẩm bình quân giai đoạn tăng tốc chỉ hơn 0,2%/giờ. Nhìn tổng thể từ khi bắt đầu sấy, tốc độ giảm ẩm của gỗ đã có sự giảm dần theo thời gian.

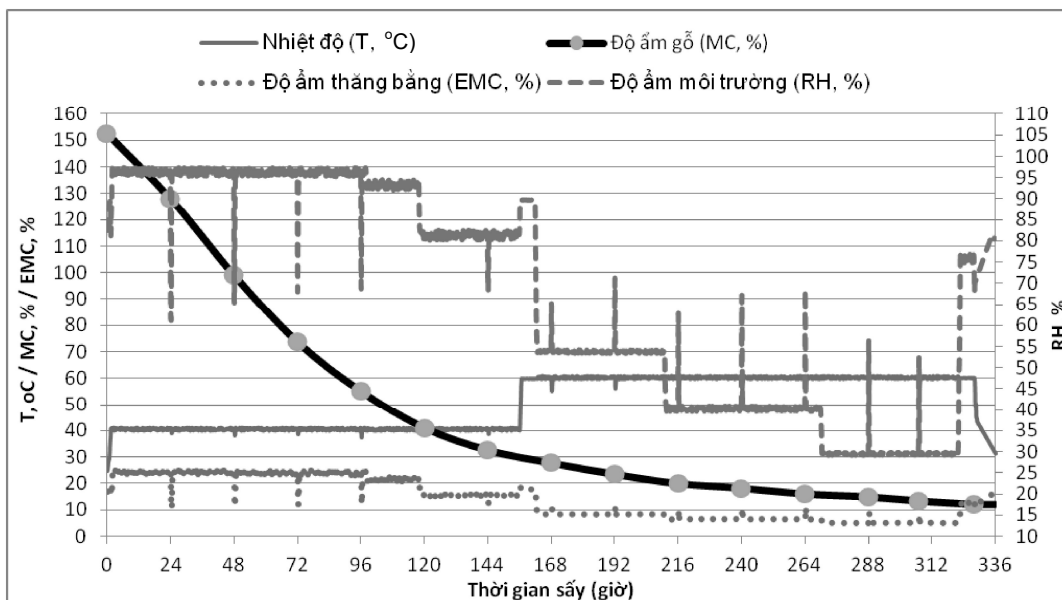
Mẻ sấy mềm

Hình 6 là diễn biến giảm ẩm gỗ sấy và diễn biến thay đổi các thông số môi trường sấy theo thời gian ở mẻ sấy số 2 với chế độ sấy mềm, có sự khác biệt rõ ràng so với mẻ sấy số 1. Tốc độ giảm ẩm bình quân của gỗ từ khi bắt đầu sấy tới 50% là 1,05%/giờ. Tốc độ giảm ẩm trong giai đoạn này ở mẻ sấy số 2 thấp hơn 1,8 lần so với mẻ sấy số 1 có thể vì độc sấy nhỏ hơn 2,2 lần ($U = 2,0$ so với $U = 4,4$).

Điều này có liên quan đến cấu tạo và đặc tính gỗ. Ở giai đoạn MC trên 50%, hầu hết các vị trí trong tâm gỗ (trừ một lớp rất mỏng phía ngoài bề mặt dày khoảng 2 mm) đều có MC trên điểm

bảo hoà thớ gỗ (FSP) (hình 7), chủ yếu chứa ẩm tự do với cơ chế vận chuyển là thẩm dẫn. Kết quả nghiên cứu trước về đánh giá đặc điểm cấu tạo (Hà Tiến Mạnh *et al.*, 2021) cho thấy gỗ Keo tai tượng có lỗ mạch phân tán, thông thoáng (ít chất tích tụ), lỗ xuyên mạch không có màng ngăn, gần như mở hoàn toàn và đặc biệt có màng lỗ thông ngang không đóng (vì không có nút) trên tất cả các tế bào. Đây là các lý do làm cho khả năng vận chuyển ẩm bằng thẩm

dẫn là rất dễ dàng. Kết quả kiểm tra cũng cho thấy hệ số thẩm dẫn gỗ Keo tai tượng rất cao, cao hơn nhiều so với một số loài Bạch đàn Úc. Bên cạnh đó, chênh lệch áp suất tại các vị trí trong gỗ là động lực của quá trình thẩm dẫn (R. E. Booker, 1977; J. F. Siau, 1984). Môi trường sấy ở mẻ sấy số 1 cứng hơn nên mức chênh lệch áp suất ở các vị trí trong gỗ lớn hơn, dẫn đến tốc độ giảm ẩm nhờ thẩm dẫn cũng lớn hơn khi so với mẻ sấy số 2.



Hình 6. Diễn biến độ ẩm gỗ và các thông số môi trường theo thời gian ở mẻ sấy mềm (đốc sấy $U = 2,0 - 2,5$)

Ở giai đoạn sấy từ 50% về 30%, tốc độ giảm ẩm bình quân của mẻ sấy số 2 chỉ đạt 0,34 %/giờ, cũng thấp hơn gần 2 lần so với mẻ sấy số 1. Đồ thị hình 7 cho thấy độ ẩm các vị trí theo chiều dày tấm gỗ vẫn chủ yếu ở trên FSP (ngoại trừ độ ẩm lớp ngoài dày 3 mm ở mẻ số 1 và dày 5 mm ở mẻ số 2 đã xuống dưới FSP) nên sự vận chuyển ẩm chủ yếu vẫn là cơ chế thẩm dẫn.

Giai đoạn sấy 30 - 20%, tốc độ giảm ẩm bình quân của mẻ sấy số 2 chỉ đạt 0,20 %/giờ, thấp hơn 2,5 lần khi so với mẻ sấy số 1. Giai đoạn sấy 20 - 12%, tốc độ giảm ẩm bình quân của mẻ

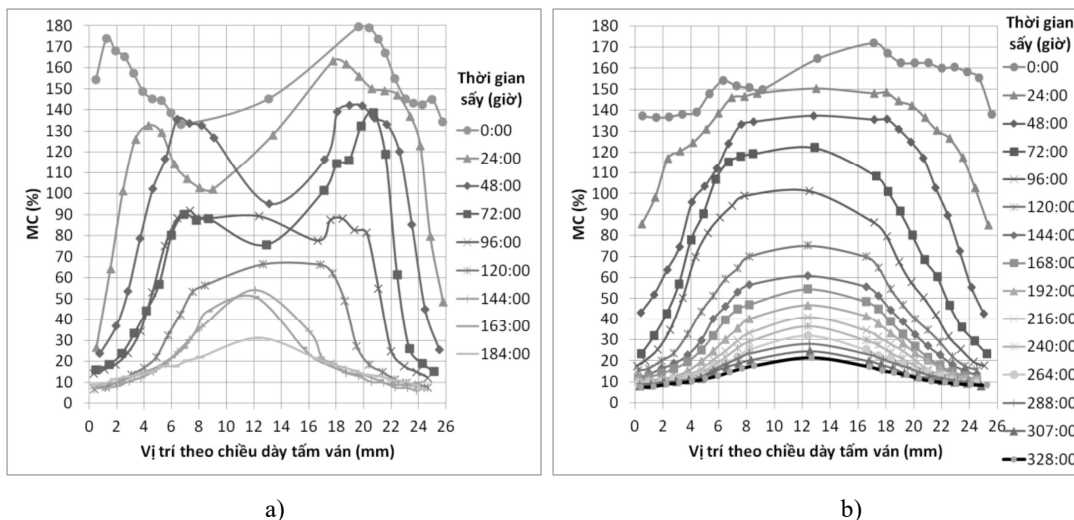
sấy số 2 là 0,07 %/giờ, thấp hơn 2,9 lần so với mẻ sấy số 1. Các đồ thị hình 7 cho thấy chiều dày lớp bề mặt tấm gỗ có độ ẩm đạt dưới FSP ở mẻ sấy số 2 dày hơn ở mẻ sấy số 1 trong cả 2 giai đoạn cuối này. Cơ chế khuếch tán đã tham gia nhiều vào quá trình vận chuyển ẩm của 2 giai đoạn này và phụ thuộc nhiều hơn vào môi trường sấy so với cơ chế thẩm dẫn. Động lực của cơ chế khuếch tán là chênh lệch nồng độ và nó cần được cường bức nhiều hơn từ thông số môi trường sấy để có thể đưa ẩm ra ngoài (P. Perré, 2007). Điều này là lý do làm cho tốc độ giảm ẩm theo thời gian của mẻ sấy số 2 chậm hơn so với mẻ sấy số 1.

Tổng thời gian sấy của mẻ sấy số 2 (sấy mềm) là 336 giờ (14,0 ngày), dài hơn gấp 1,86 lần so với tổng thời gian sấy của mẻ sấy số 1 (180,67 giờ, tức 7,5 ngày). Tốc độ giảm ẩm bình quân từ lúc bắt đầu sấy đến khi kết thúc của mẻ số 1 và số 2 lần lượt là 0,79%/giờ và 0,42%/giờ.

Sự thay đổi mức độ chênh lệch ẩm trong suốt quá trình sấy

Hình 7 là hai đồ thị mô tả các đường cong của mức độ chênh lệch ẩm tại các vị trí theo chiều dày tấm gỗ ở các thời điểm từ khi bắt đầu đến khi kết thúc hai mẻ sấy cứng và mềm. Mức độ chênh lệch ẩm thể hiện rõ ràng giữa bề mặt và tâm tấm gỗ. MC giữa hai bề mặt phía trên và dưới tấm gỗ trong suốt quá trình sấy gần như không khác nhau cho thấy sự tuần hoàn môi trường sấy là tốt. Các đường cong chênh lệch ẩm trong tấm gỗ nhận được từ cả 2 mẻ sấy đều

có hình dạng "quả chuông". Kết quả này cũng tương đồng như kết quả nghiên cứu trước đây của Yuniarti (2015). Có sự khác biệt nhỏ ở đây là các đường cong trong 96 giờ đầu tiên của mẻ sấy số 1 có hình dạng của hàm bậc 4 với 3 điểm cực trị, tức là MC phía trong tâm tấm gỗ không phải cao nhất và giảm dần về phía hai bên bề mặt như đồ thị dạng parabol của hàm bậc 2 phổ biến. Hình dạng đồ thị này cũng đã xuất hiện ở mẻ sấy gỗ Thông Slash ở Úc trong quá trình học tập và thực hành phương pháp này và cũng xuất hiện ở các loài gỗ có hệ số thấm dẫn cao và sấy với tốc độ nhanh. Tốc độ sấy quá nhanh ở giai đoạn đầu của mẻ số 1 làm cho ẩm không kịp phân bố lại theo đúng hình "quả chuông" có đỉnh nằm ở giữa đường cong. Tuy nhiên nhìn sang mẻ sấy số 2, với tốc độ sấy chậm hơn, ẩm ở các vị trí đã phân bố lại theo hình "quả chuông" sau khoảng 24 - 48 giờ.



Hình 7. Mức độ chênh lệch ẩm trong tấm gỗ suốt quá trình sấy
a - mẻ số 1 (sấy cứng); b - mẻ số 2 (sấy mềm)

Hình 7 cũng thể hiện sự khác nhau rõ ràng về diễn biến mức độ chênh lệch ẩm trong tấm gỗ giữa hai mẻ sấy. Thời điểm bắt đầu sấy (0 giờ) của cả hai mẻ sấy, MC bề mặt gần tương đương với MC trong tâm tấm gỗ và dao động trong độ ẩm trung bình MC_a của cả mẻ sấy. Từ sau thời điểm 24 giờ, sự giảm ẩm ở các lớp bề mặt tấm gỗ của mẻ sấy số 1 bắt đầu nhanh hơn mẻ sấy

số 2 và nhanh chóng xuống dưới điểm FSP. Ở mẻ sấy số 1, chỉ sau 24 giờ, lớp bề mặt đã xuống dưới điểm FSP và bắt đầu co rút nên chịu ứng suất kéo. Lúc này, lớp bên trong nơi mà có MC cao nhất vẫn đang có trên 160% tức chênh lệch 140% so với bề mặt và đang chịu ứng suất kéo. Sự chênh lệch ứng suất này là nguyên nhân gây ra nứt mặt (J. C. F. Walker,

2006) và được sử dụng để giải thích cho sự phát triển khuyết tật gỗ sậy ở phần sau.

Trong khoảng thời gian gỗ sậy về MC 50%, mức độ chênh lệch ẩm giữa lớp bề mặt và lớp phía trong ở mẻ sậy số 1 luôn cao hơn ở mẻ số 2. Khi bắt đầu sấy là xu hướng tăng của mức độ chênh lệch ẩm do tốc độ khô ở bề mặt nhanh hơn ở trong tâm. Tuy nhiên, giai đoạn tiếp theo đó, xu hướng giảm mức độ chênh lệch ẩm xuất hiện và được sử dụng để giải thích cho xu hướng đóng lại của các vết nứt mặt sau khi đạt kích thước nứt tối đa.

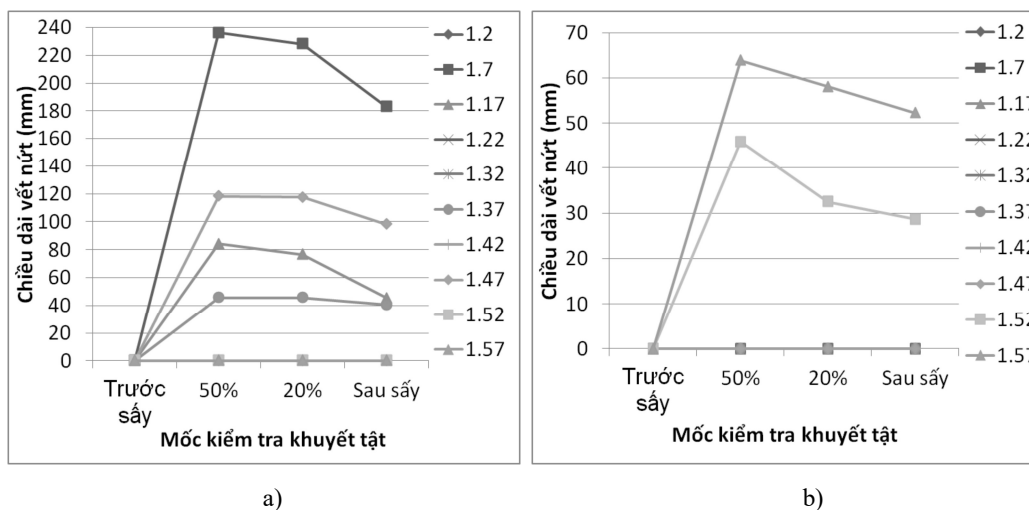
Giai đoạn sấy về MC 30%, mức độ chênh lệch ẩm mẻ số 1 giảm xuống 80% và mẻ số 2 giảm xuống 40%. Mức chênh lệch ẩm vẫn tiếp tục giảm ở giai đoạn sấy qua mốc MC 20% cho tới khi kết thúc các mẻ sậy. Mức độ chênh lệch ẩm khi kết thúc mẻ số 1 và số 2 lần lượt là 24% và 14%.

Sự cao hơn về mức độ chênh lệch ẩm của mẻ số 1 so với mẻ số 2 luôn xuất hiện ở các thời điểm ngay sau khi bắt đầu sấy, khi MC đạt 50%, 30%, 20% và khi kết thúc (MC 12%). Đây là cơ sở để giải thích cho sự phát triển các khuyết tật gỗ sậy ở 2 mẻ sậy.

3.2. Sự phát triển khuyết tật trong suốt quá trình sấy

3.2.1. Nứt mặt

Walker (2006) đã định nghĩa nứt là một vết tách song song với thớ gỗ. Trong đó, nứt mặt thường xuất hiện ở giai đoạn đầu của quá trình sấy khi chế độ sấy quá cứng. Để tránh khuyết tật này, độ ẩm tương đối RH cần giữ ở mức cao và nhiệt độ T cần giữ ở mức thấp để duy trì độ bền của gỗ. Các vết nứt mặt có thể đóng lại khi bề mặt gỗ chuyển sang chịu ứng suất nén và trong tâm gỗ chuyển sang chịu ứng suất kéo.



Hình 8. Chiều dài các vết nứt mặt của các tấm gỗ suốt quá trình sấy
a - mẻ số 1 (sấy cứng); b - mẻ số 2 (sấy mềm)

Hình 8 cho thấy ở cả hai mẻ sậy, sự phát triển của các vết nứt mặt có xu hướng giống như nhận định ở trên, dài nhất ở giai đoạn đầu và sau đó đóng dần lại. Từ khi bắt đầu sấy đến MC 50%, mức độ chênh lệch ẩm giữa lớp bề mặt (MC xuống dưới FSP) và lớp bên trong tấm gỗ là cao nhất ở cả 2 mẻ sậy, mẻ 1 là 140% sau 24 giờ và mẻ 2 là 100% sau 72 giờ. Chiều dài các

vết nứt mặt phát triển theo xu hướng tăng mức độ chênh lệch ẩm ở giai đoạn đầu và đạt dài nhất khi mức độ chênh lệch ẩm lớn nhất. Sau đó, mặc dù MC_a của gỗ chưa xuống dưới FSP, nhưng xu hướng giảm mức độ chênh lệch ẩm đã làm cho các vết nứt mặt đóng lại một phần. Điều này cũng có thể được giải thích là MC của các lớp tiếp giáp lớp bề mặt đã giảm xuống

dưới FSP để bắt đầu co rút và chịu ứng suất kéo như lớp bề mặt, làm giảm chênh lệch ứng suất của lớp này với lớp bề mặt. Sự đóng lại của các vết nứt mặt trong khi sấy được thể hiện ngay ở lần đo thứ 2 (thời điểm MC 20%) và tiếp tục đóng cho đến khi kết thúc mẻ sấy do xu hướng giảm mức độ chênh lệch ẩm vẫn tiếp tục.

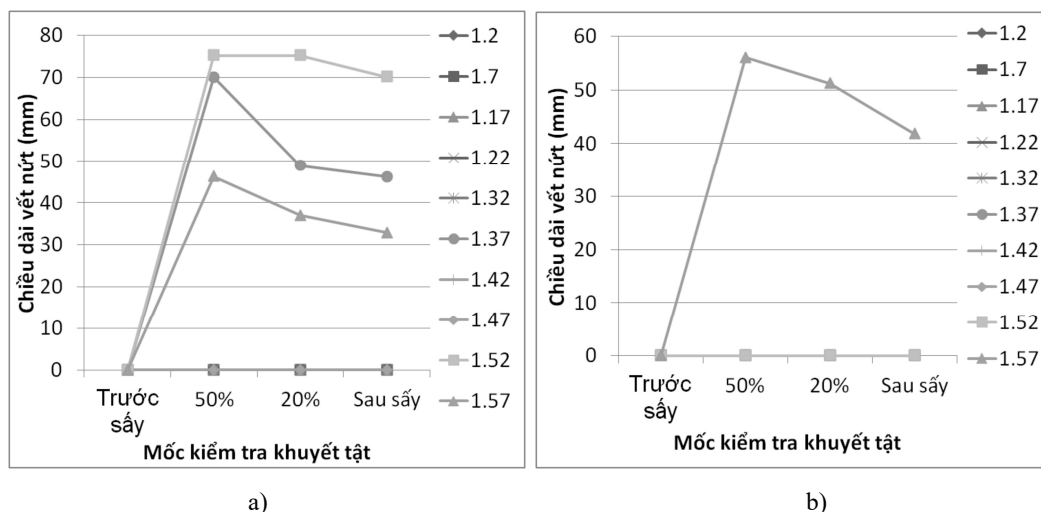
Xu hướng phát triển nứt mặt của cả hai mẻ sấy là giống nhau nhưng mức độ nứt mặt có sự khác nhau rõ ràng. Mẻ số 1, mức độ chênh lệch ẩm lớn hơn, nên có 4/10 mẫu gỗ bị nứt mặt với chiều dài vết nứt lớn hơn nhiều so với mẻ số 2 (có 2/10 mẫu bị nứt mặt). Vết nứt mặt dài nhất được đo ở mẻ số 1 và số 2 lần lượt là 236,1 mm và 63,9 mm tại thời điểm gỗ đạt MC 50%.

So sánh với gỗ Bạch đàn *E. saligna* được sấy gián đoạn (gia nhiệt 40°C, RH 60% trong 12 giờ và không gia nhiệt trong 12 giờ tiếp theo) trong nghiên cứu của Yuniarti (2015) cho thấy mức độ nứt mặt của gỗ Keo tai tượng thấp hơn rất nhiều. Mặc dù sấy gián đoạn với pha gia nhiệt tương đối mềm (EMC luôn 11,2%), nhưng gỗ Bạch đàn *E. saligna* vẫn xuất hiện vết nứt mặt có chiều dài lên tới gần 500 mm (gấp đôi vết nứt mặt dài nhất của gỗ Keo tai tượng khi sấy cứng). Điều này một mặt là do ứng suất

sinh trường và nội ứng suất khác trong các loài thuộc chi bạch đàn là đặc biệt lớn (Đỗ Văn Bản, 2012). Mặt khác, nghiên cứu trước (Hà Tiến Mạnh *et al.*, 2021) cho thấy gỗ Keo tai tượng có độ rỗng cao hơn, cấu tạo thông thoáng hơn là lý do làm hệ số thấm dẫn và hệ số khuếch tán cao hơn hẳn so với các loài Bạch đàn Úc này nên khả năng vận chuyển nước từ trong tâm ra bề mặt khi sấy thuận lợi hơn, tức mức độ chênh lệch ẩm giữa tâm và bề mặt là thấp hơn làm cho mức độ nứt mặt của gỗ Keo tai tượng thấp hơn. Hai đặc điểm này cũng là lý do giải thích khi so sánh về mức độ nứt đầu ở phần dưới đây.

3.2.2. Nứt đầu

Nứt đầu là một loại nứt khác với nứt mặt, xuất phát từ lý do chênh lệch ẩm giữa phần đầu và phần giữa tấm gỗ. Phần đầu thanh gỗ co rút khi MC giảm xuống dưới FSP, nhưng phần giữa vẫn có MC cao và cường bức sự co rút ở phần đầu, kết quả là nứt đầu xảy ra (Z. Chen, 1997). Trong phạm vi của nghiên cứu này, mức độ chênh lệch ẩm theo chiều dài tấm ván không được xác định, nhưng sự phát triển của các vết nứt đầu vẫn được xác định thông qua việc đo chiều dài vết nứt theo các mốc thời gian như khi đo đếm các khuyết tật khác.



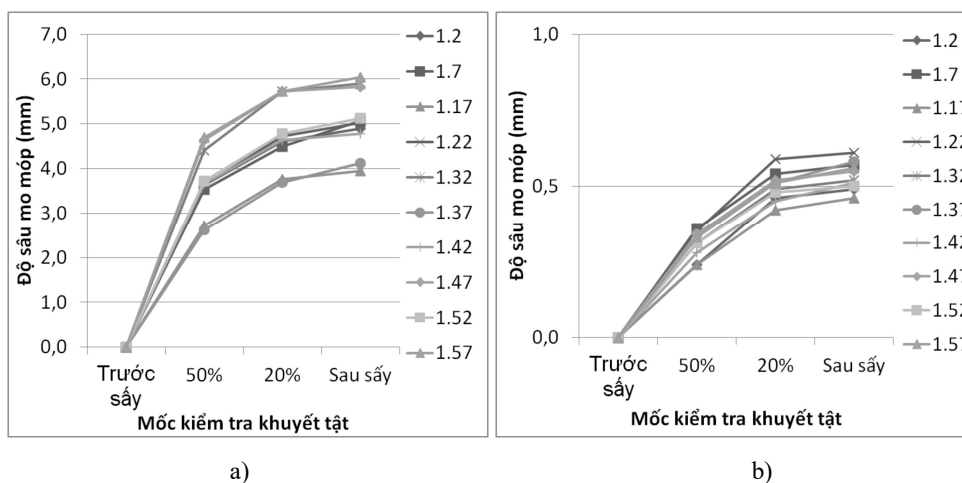
Hình 9. Chiều dài các vết nứt đầu của các tấm gỗ suốt quá trình sấy
a - mẻ số 1 (sấy cứng); b - mẻ số 2 (sấy mềm)

Hình 9 cho thấy mẻ số 1 có 3/10 thanh gỗ xuất hiện các vết nứt đầu và mẻ số 2 con số này là 1/10 với xu hướng phát triển giống nhau nhưng chiều dài vết nứt khác nhau. Tất cả các vết nứt đều được hình thành ở khoảng thời gian sấy ban đầu về MC 50% và có xu hướng giảm dần qua các lần kiểm tra ở MC 20% và ở cuối mẻ sấy. Chiều dài vết nứt đầu ở mẻ số 1 lớn hơn ở mẻ số 2 nhưng mức độ lớn hơn không cao bằng các vết nứt mặt. Sự dài hơn và số lượng vết nứt nhiều hơn ở mẻ số 1 là vì tốc độ sấy nhanh hơn làm cho chênh lệch ẩm theo chiều dọc thớ cũng cao hơn khi so với mẻ số 2. Tuy nhiên, mức độ lớn hơn về chiều dài vết nứt đầu của mẻ số 1 so với mẻ số 2 không cao bằng vết nứt mặt có thể được giải thích là do mức độ chênh lệch ẩm theo chiều dày lớn hơn theo chiều dài. Kết quả nghiên cứu trước cho thấy tỷ lệ dị hướng của thấm dẫn và khuếch tán giữa chiều dọc và ngang thớ của gỗ Keo tai tượng là không cao như các loài gỗ lá rộng khác (Ha Tien Manh *et al.*, 2022). Sự

chênh lệch ẩm theo chiều ngang thớ lớn hơn chiều dọc thớ làm cho các vết nứt mặt dễ xảy ra hơn các vết nứt đầu trong quá trình sấy.

3.3. Mo móp

Hiện tượng mo móp xuất hiện trước khi có sự co rút bình thường của các tế bào gỗ và chỉ xảy ra ở trên FSP tại các tế bào bão hòa ẩm, thể hiện bằng sự xuất hiện một loạt các chỗ lõm xuống ở phần gỗ sớm trên mặt cắt tiếp tuyến theo hướng xuyên tâm (J. C. F. Walker, 2006). Kết quả kiểm tra cấu tạo hiển vi của gỗ Keo tai tượng cũng như các lý thuyết (J. F. Siau, 1984; J. C. F. Walker, 2006) đều chỉ ra rằng lỗ thông ngang giữa các sợi gỗ chủ yếu nằm trên mặt cắt xuyên tâm và là kênh vận chuyển ẩm bằng thấm dẫn theo chiều tiếp tuyến. Sự co rút tế bào luôn xảy ra theo hướng vuông góc với hướng vận chuyển ẩm nên các mo móp tế bào thường xuất hiện theo hướng xuyên tâm trong quá trình thấm dẫn.



Hình 10. Độ sâu mo móp xuyên tâm lớn nhất suốt quá trình sấy
a - mẻ số 1 (sấy cứng); b - mẻ số 2 (sấy mềm)

Hình 10 thể hiện sự giống nhau về xu hướng phát triển của mức độ mo móp của hai mẻ sấy. Khác với khuyết tật nứt vỡ, sự mo móp xuất hiện ở cả 10 mẫu kiểm tra của mỗi mẻ sấy. Chúng phát triển rất nhanh ngay sau khi bắt đầu sấy đến MC 50%. Sự phát triển mo móp vẫn tiếp tục nhưng có tốc độ chậm hơn ở khoảng thời gian sấy tiếp về MC 20% và gần như

chững lại ở giai đoạn từ MC 20% đến khi kết thúc mẻ sấy. Xu hướng phát triển này có thể giải thích bằng kết quả nghiên cứu về sự thay đổi mức độ chênh lệch ẩm trong 2 mẻ sấy. Đồ thị hình 7 cho thấy lớp trong tâm gỗ (nơi có MC trên FSP) ở giai đoạn sấy về MC 20% và đến khi kết thúc có chiều dày nhỏ hơn ở giai đoạn sấy đầu về MC 50%, tức là lượng tế bào

gỗ bị mo móp khi thấm dần cũng nhỏ hơn nên tốc độ tăng mo móp giảm dần. Ở giai đoạn MC dưới 20%, phần gỗ phía trong có MC trên FSP vẫn còn, nhưng lượng nước trong ruột hầu hết các tế bào không còn tối đa (bão hòa) nên sự mo móp hầu hết không xuất hiện thêm nữa.

Hình 10 cũng thể hiện sự khác nhau về mức độ mo móp giữa hai mẻ sấy. Ở mẻ số 2 (sấy mềm), độ sâu mo móp sau khi sấy chỉ nằm trong khoảng 0,5 mm (cao nhất là 0,61 mm). Tiêu chuẩn AS/NZS 4787:2001 đã phân loại chất lượng gỗ sấy theo mo móp đạt cấp A, B khi độ sâu mo móp bằng 0 mm và cấp C khi giá trị này nhỏ hơn 2 mm. Nghiên cứu cấu tạo hiển vi cho thấy gỗ Keo tai tượng có tỷ lệ giữa đường kính ruột và vách tế bào sợi gỗ rất cao (4,09) nên dễ mo móp. Khi sấy với chế độ cứng như mẻ số 1, độ sâu mo móp của 10 mẫu kiểm tra là rất lớn, nằm trong khoảng 4 - 6 mm. Có 6 mẫu (tức 60% số lượng mẫu kiểm tra) có độ sâu mo móp lớn hơn 5 mm nên xếp loại thấp nhất (loại E).

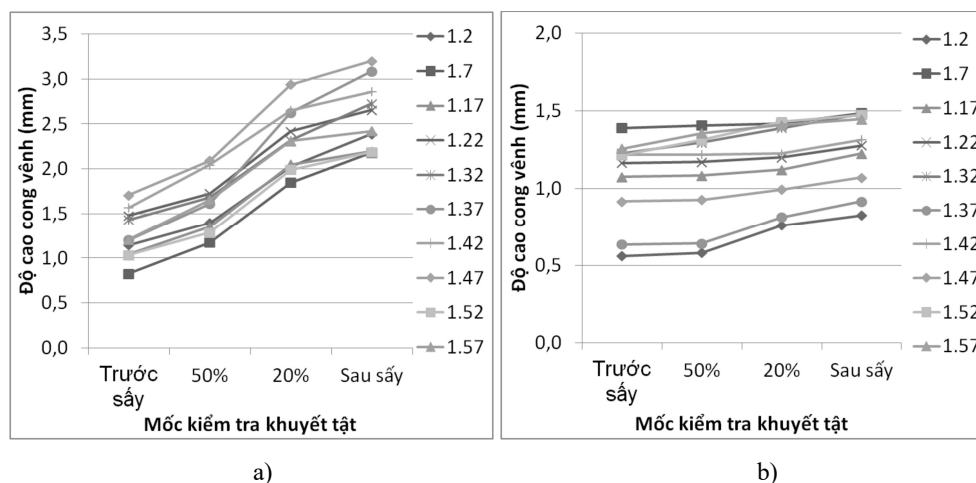
Nghiên cứu của Hồ Thu Thủy (2005) đã xác định ngưỡng nhiệt độ hình thành móp méo (móp méo là thuật ngữ mà tác giả sử dụng thay cho mo móp) của gỗ Chò chỉ là 55 - 60°C. Tác giả cho rằng sự móp méo phụ thuộc vào nhiệt độ sấy vì nhiệt độ cao làm cường độ cơ học của vách tế bào giảm. Kết quả nghiên cứu của tác giả cũng có thể là cơ sở để giải thích cho sự khác biệt lớn về độ sâu mo móp giữa chế độ

sấy cứng với $T = 60 - 70^{\circ}\text{C}$ và chế độ sấy mềm với $T = 40 - 60^{\circ}\text{C}$.

3.4. Cong vênh

Các biến dạng cong vênh bao gồm cong mặt, cong cạnh, vặn vẹo xoắn và cong lòng máng được đo chiều cao chỗ cong vênh nhất và chia trung bình để so sánh mức độ cong vênh giữa các chế độ sấy và các mốc thời gian sấy.

Các đồ thị cho thấy xu hướng phát triển và mức độ của các biến dạng cong vênh suốt quá trình sấy. Lý do để giải thích cho xu hướng phát triển cong vênh vẫn đang được tranh luận và nghiêng về chiều hướng do sự không đồng nhất về cấu tạo gỗ, sự nghiêng thớ, cách xếp gỗ sấy (K. Yuniarti, 2015). Mặc dù vậy, nghiên cứu này đã cho thấy sự phát triển nhanh hơn và mức độ lớn hơn rõ ràng về chiều cao các biến dạng cong vênh của mẻ sấy số 1 so với mẻ sấy số 2. Sự cong vênh ở cả hai mẻ sấy xuất hiện ngay trước khi sấy (sau khi xẻ) với độ cao cong vênh trung bình khoảng 1 - 1,5 mm. Trong khi ở mẻ sấy mềm, sự cong vênh hầu như không phát triển thì ở mẻ sấy cứng, xu hướng tăng theo suốt quá trình sấy là tương đối lớn, lớn nhất ở giai đoạn sấy từ MC 50% về MC 20%. Sau khi sấy, độ cao cong vênh trung bình ở mẻ số 1 đã tăng lên 2 - 3 mm. Như vậy, kết quả này cho thấy sự cong vênh của gỗ rõ ràng có phụ thuộc vào chế độ sấy.



Hình 11. Độ cao cong vênh trung bình của các tấm gỗ suốt quá trình sấy
a - mẻ số 1 (sấy cứng); b - mẻ số 2 (sấy mềm)

So sánh với gỗ Bạch đàn *E. saligna* sấy ở chế độ gián đoạn và mềm hơn thì mức độ cong vênh gỗ Keo tai tượng sấy ở chế độ cứng hơn là thấp hơn. Mặc dù sự chênh lệch về co rút giữa chiều tiếp tuyến và xuyên tâm của gỗ Keo tai tượng tương đối lớn nhưng sự ảnh hưởng của nó đến mức độ cong vênh có thể không lớn bằng yếu tố xoắn thớ của gỗ bạch đàn là lý do dẫn đến biến dạng cong vênh của gỗ Keo tai tượng là ít hơn.

IV. KẾT LUẬN

Kết quả khảo sát 2 mẻ sấy quy chuẩn với 2 chế độ sấy cứng và mềm để cho thấy diễn biến chênh lệch ẩm có liên quan rõ ràng đến sự phát triển của các khuyết tật suốt quá trình sấy, cụ thể:

- Sự chênh lệch ẩm giữa bề mặt và tâm tấm gỗ ở cả 2 mẻ sấy là rất rõ ràng trong suốt quá trình sấy, cao nhất lần lượt là 140% và 100% ở mẻ sấy cứng và mẻ sấy mềm.
- Diễn biến thay đổi chênh lệch ẩm suốt quá trình sấy có sự khác nhau rõ ràng giữa 2 mẻ sấy. Trong giai đoạn sấy từ đầu về MC 50%, sự giảm ẩm ở lớp bề mặt tấm gỗ trong mẻ sấy cứng nhanh hơn và nhanh chóng xuống dưới FSP làm cho chênh lệch ẩm giữa tâm và bề mặt là lớn hơn so với mẻ sấy mềm. Đây là nguyên nhân khiến khuyết tật nứt mặt, nứt đầu, mo móp, cong vênh ở mẻ sấy cứng có mức độ lớn hơn và nhiều hơn so với mẻ sấy mềm. Diễn biến chênh lệch ẩm là một cơ sở vững chắc cho việc lập chế độ sấy. Tùy thuộc vào yêu cầu về thời gian và khuyết tật cho phép của gỗ sấy, chế độ sấy có thể được

điều chỉnh sao cho mức độ chênh lệch ẩm là phù hợp ở các giai đoạn sấy.

- Xu hướng giảm của mức độ chênh lệch ẩm xuất hiện khi tiếp tục sấy, thể hiện rõ hơn ở mẻ sấy mềm, do lớp bề mặt đã bắt đầu khô chậm lại và lớp phía trong tiếp tục khô. Xu hướng này làm các vết nứt đóng dần lại.
- Mức độ chênh lệch ẩm của mẻ sấy cứng luôn cao hơn mẻ sấy mềm ở các thời điểm khi bắt đầu sấy, khi MC đạt 50%, 30%, 20% và khi kết thúc là nguyên nhân của sự phát triển các khuyết tật gỗ sấy ở mẻ sấy cứng luôn cao hơn mẻ sấy mềm.
- Các vết nứt mặt và nứt đầu ở cả hai mẻ sấy có xu hướng phát triển giống nhau, dài nhất ở giai đoạn sấy đầu và sau đó đóng dần lại. Số lượng và chiều dài vết nứt mặt là lớn hơn ở mẻ sấy cứng so với mẻ sấy mềm. Mức độ nứt đầu ở mẻ sấy cứng cũng lớn hơn mẻ sấy mềm nhưng không chênh lệch bằng nứt mặt.
- Sự phát triển mo móp có xu hướng phát triển tương tự nứt vỡ ở giai đoạn bắt đầu sấy nhưng khác là tiếp tục phát triển với tốc độ chậm hơn ở khoảng thời gian sấy về MC 20% và gần như chững lại ở giai đoạn từ MC 20% đến khi kết thúc mẻ sấy.
- Mẻ sấy cứng có mức độ mo móp lớn hơn ở nhiều so với mẻ sấy mềm nên cấp chất lượng gỗ sấy phân theo tiêu chí này đạt mức rất thấp.
- Sự phát triển cong vênh ở mẻ sấy mềm hầu như không có nhưng ở mẻ sấy cứng, xu hướng tăng cong vênh suốt quá trình sấy là tương đối lớn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. AS/NZS 4787:2001 Timber - assessment of drying quality. AS/NZS, Standards Australia International Ltd, NSW and Standards New Zealand, Wellington, p. 22.
2. Đỗ Văn Bản, 2012. Nghiên cứu một số giải pháp công nghệ làm giảm nứt vỡ gỗ Bạch đàn trắng (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) ở Việt Nam để sản xuất gỗ xẻ cho đồ mộc thông dụng. Luận án tiến sĩ kỹ thuật. Viện Khoa học Lâm nghiệp Việt Nam, Hà Nội

3. Booker, R.E., 1977. Problems in the measurement of longitudinal sapwood permeability and hydraulic conductivity. *N Z J For Sci.* 7, 297-306.
4. Boone, R.S., Kozlik, C.J., Bois, P.J., Wengert, E.M., 1988. Dry Kiln Schedules for Commercial Woods - Temperate and Tropical. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory Madison, WI.
5. Chen, Z., 1997. Primary driving force in wood vacuum drying, Ph.D. Thesis, Wood Science and Forest Products, Virginia Tech, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, USA
6. Vũ Huy Đại, 2006. Giáo trình sấy gỗ. Trường Đại học Lâm nghiệp Việt Nam, Hà Nội.
7. 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*) ảnh hưởng đến quá trình sấy. *Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp.* 2, 100-112.
8. Manh, H.T., Redman, A.L., Van, C.P., Ngọc, B.D., 2022. Mass transfer properties of *Acacia mangium* plantation wood. *Maderas-Cienc Tecnol.* 24, 1-12.
9. McMillen, J.M., 1958. Stresses in wood during drying. Forest Products Laboratory, Forest Service, U. S. Department of Agriculture, in cooperation with the University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, USA.
10. Perré, P., 2007. Fundamentals of wood drying. European COST and A.R.BO.LOR, Nancy, France.
11. Siau, J.F., 1984. Transport Process in Wood. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
12. Skaar, C., 1988. Wood-Water Relationships. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
13. Walker, J.C.F., 2006. Primary wood processing: Principles and practice. Springer-Dordrecht, The Netherlands.
14. Yuniarti, K., 2015. Intermittent drying of *Eucalyptus Saligna*, Ph.D. Thesis, School of Ecosystem and Forest Science, Faculty of Science, University of Melbourne, Melbourne, Australia.

Email tác giả liên hệ: hatienmanhfsiv@gmail.com

Ngày nhận bài: 07/11/2022

Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 16/11/2022

Ngày duyệt đăng: 18/11/2022