

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO  
TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM TP. HỒ CHÍ MINH**

\*\*\*\*\*

**BÙI THỊ THIÊN KIM**

**NGHIÊN CỨU CÔNG NGHỆ SẤY GỖ CẨM XE (*Xylia xylocarpa*)  
BẰNG PHƯƠNG PHÁP SẤY CHÂN KHÔNG**

**Chuyên ngành: Kỹ thuật Chế biến Lâm sản**

**Mã số: 9.54.90.01**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT**

**Người hướng dẫn khoa học: PGS.TS. LÊ ANH ĐỨC  
TS. HOÀNG THỊ THANH HƯƠNG**

**TP. HỒ CHÍ MINH – NĂM 2023**

## LỜI CAM ĐOAN

Tác giả xin cam đoan rằng công trình “Nghiên cứu công nghệ sấy gỗ Căm xe (*Xylia xylocarpa*) bằng phương pháp sấy chân không” được trình bày trong luận án này là do chính tác giả thực hiện. Các số liệu và kết quả có trong luận án là trung thực chưa được công trình của các tác giả khác công bố.

Tp. Hồ Chí Minh, năm 2023

Tác giả

Bùi Thị Thiên Kim

## LỜI CẢM ƠN

Trước hết, tôi xin chân thành cảm ơn Trường Đại Học Nông Lâm Tp. Hồ Chí Minh, Ban Giám Hiệu, Phòng đào tạo Sau đại học, Khoa Lâm Nghiệp, Bộ môn Chế biến Lâm sản đã tạo điều kiện cho tôi học nghiên cứu sinh chuyên ngành Kỹ Thuật Chế Biến Lâm Sản khóa 2015.

Xin gửi lời cảm ơn chân thành sâu sắc đến Thầy Cô hướng dẫn khoa học PGS.TS Lê Anh Đức và TS. Hoàng Thị Thanh Hương, người đã tận tình hướng dẫn, giúp đỡ và động viên trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu và thực hiện luận án.

Xin gửi lời cảm ơn nồng ấm đến toàn thể Thầy Cô Khoa Lâm Nghiệp đã giúp đỡ và tạo điều kiện cho tôi trong suốt quá trình học tập và nghiên cứu. Đặc biệt là Thầy PGS.TS Hồ Xuân Các, Cô PGS.TS Hứa Thị Huân, Thầy PGS.TS Phạm Ngọc Nam, Thầy PGS.TS. Đặng Đình Bôi, Cô TS. Tăng Thị Kim Hồng đã tận tình giúp đỡ, góp ý xây dựng cho những nội dung của luận án được hoàn thiện hơn.

Xin gửi lời cảm ơn đến toàn thể Thầy Cô Bộ môn Chế Biến Lâm sản đã giúp đỡ và tạo điều kiện, hỗ trợ thời gian cho tôi trong suốt quá trình học tập và nghiên cứu.

Xin gửi lời cảm ơn đến toàn thể đồng nghiệp, quý Anh Chị Em, bạn bè thân hữu đã động viên, giúp đỡ tôi trong suốt quá trình học tập và nghiên cứu.

Cuối cùng, gửi lời cảm ơn yêu thương đến gia đình Ba Mẹ, Anh Chị đã luôn bên cạnh con luôn động viên, ủng hộ, giúp đỡ con trong bất kỳ hoàn cảnh nào, đồng thời tạo mọi điều kiện tốt nhất cho con trong suốt thời gian học tập và nghiên cứu. Con yêu quý cả nhà rất nhiều.

Xin trân trọng gửi ngàn lời cảm ơn!

Tp. Hồ Chí Minh, năm 2023

Nghiên cứu sinh

Bùi Thị Thiên Kim

## TÓM TẮT

Tên luận án: Nghiên cứu công nghệ sấy gỗ Căm xe (*Xylia xylocarpa*) bằng phương pháp sấy chân không

Nghiên cứu sinh: Bùi Thị Thiên Kim

Chuyên ngành: Kỹ thuật Chế biến Lâm sản

Mã số: 9.54.90.01

Nghiên cứu công nghệ sấy gỗ Căm xe bằng phương pháp sấy chân không với mục tiêu chính là xây dựng mô hình toán truyền nhiệt và ẩm cùng với thực nghiệm để xác định chế độ sấy chân không phù hợp cho nguyên liệu gỗ Căm xe.

Để giải quyết mục tiêu trên, nghiên cứu đã tiến hành tìm hiểu các kết quả nghiên cứu lý thuyết của các tác giả trong lĩnh vực truyền nhiệt, truyền ẩm về sấy gỗ và các vật liệu xốp khác. Đồng thời ứng dụng lý thuyết toán học, vật lý để xây dựng mô hình vật lý về quá trình sấy chân không gỗ Căm xe, mô hình toán học mô tả bản chất truyền nhiệt truyền ẩm trong nguyên liệu gỗ; thực hiện giải mô hình toán bằng phương pháp phần tử hữu hạn và tìm nghiệm của mô hình toán truyền nhiệt, truyền ẩm, sử dụng phương pháp thực nghiệm để xác định các thông số nhiệt vật lý của gỗ Căm xe thông qua đó kiểm chứng mô hình toán lý thuyết bằng thực nghiệm. Dựa vào kết quả thực nghiệm xác định các thông số công nghệ sấy chân không phù hợp góp phần xây dựng các bước trong qui trình sấy gỗ Căm xe bằng phương pháp sấy chân không.

Kết quả nghiên cứu của luận án đã thực hiện được các nội dung như sau:

Bằng thực nghiệm xác định được các thông số nhiệt vật lý của gỗ Căm xe phụ thuộc theo độ ẩm của vật liệu sấy, với các thông số bao gồm:

- Khối lượng riêng của gỗ Căm xe:

$$\rho_{wo} = 0,0068.W + 0,7875 \quad (R^2 = 0,9532)$$

Với :  $W = 10 - 40\%$ ,  $W$  độ ẩm gỗ (%),  $\rho_{wo}$  khối lượng riêng gỗ Căm xe ( $\text{g/cm}^3$ )

- Nhiệt dung riêng của gỗ Căm xe:

$$C_{wop} = - 0,058.W^2 + 10,982.W + 1538,2 \quad (R^2 = 0,9998)$$

Với:  $W = 10 - 40\%$ ,  $W$  là độ ẩm gỗ (%),  $C_{wop}$  là nhiệt dung riêng gỗ ( $\text{J/kg.K}$ )

- Hệ số dẫn nhiệt của gỗ Căm xe:

$$\text{Dọc thớ : } k_l = - 0,0001.W^2 + 0,019.W + 0,1995 \quad (R^2 = 0,9776)$$

$$\text{Ngang thớ : } k_r = 0,0002.W^2 - 0,056.W + 0,2083 \quad (R^2 = 0,992)$$

Với:  $W = 10 - 40\%$ ,  $W$  là độ ẩm (%),  $k_l$ ;  $k_r$  là độ dẫn nhiệt dọc thớ và ngang thớ ( $W/m.K$ )

- Độ ẩm bão hòa thớ gỗ Căm xe:

Độ ẩm bão hòa đạt được trong khoảng  $18,14 - 23,07\%$  kết quả giá trị trung bình độ ẩm bão hòa thớ gỗ Căm xe đạt  $W_{woFSP} = 20,556\%$ .

- Độ ẩm thăng bằng (cân bằng) của gỗ Căm xe:

Thông qua biểu đồ xác định độ ẩm thăng bằng của gỗ tại thành phố Hồ Chí Minh thời điểm nhiệt độ  $T = 32^\circ C$ , độ ẩm tương đối không khí  $\phi = 75\%$ , cho kết quả độ ẩm thăng bằng là  $W_{woEQ} = 14\%$ .

- Độ ẩm ban đầu của gỗ Căm xe:

Độ ẩm ban đầu trong khoảng  $39,21 - 41,63\%$ , kết quả giá trị trung bình độ ẩm ban đầu gỗ Căm xe đạt  $W_{woIN} = 40,36\%$ .

Sử dụng phương pháp sấy chân không hồng ngoại cho nguyên liệu gỗ Căm xe. Xây dựng được mô hình toán biểu diễn quá trình truyền nhiệt, truyền ẩm trong quá trình sấy, giải mô hình toán bằng phương pháp phần tử hữu hạn, dùng phần mềm Comsol Multiphysics mô phỏng quá trình sấy, kết quả được thể hiện thông qua các hình ảnh, biểu đồ phân bố nhiệt độ và ẩm độ.

Kết quả thực nghiệm ghi nhận sự phân bố nhiệt độ, ẩm độ, trong quá trình sấy chân không gỗ Căm xe, so sánh với kết quả được tính từ mô hình toán có biên dạng và xu hướng phù hợp với diễn biến thực nghiệm sấy, sai số về trung bình lớn nhất khi sấy bằng phương pháp chân không bức xạ hồng ngoại là dưới  $5\%$ .

Bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm đã xác định được phương trình tương quan và hồi qui biểu diễn sự phụ thuộc giữa thời gian sấy, tỷ lệ khuyết tật gỗ với nhiệt độ, và cường độ bức xạ hồng ngoại. Xác định được các thông số công nghệ phù hợp cho quá trình sấy chân không gỗ Căm xe qui cách chiều dày  $20 - 50$  mm các giá trị như sau: nhiệt độ sấy  $T_s = 58,5 - 58,9^\circ C$ , áp suất  $p = 0,2$  bar và cường độ bức xạ hồng ngoại  $P_{hn} = 625 - 641$   $W/m^2$ .

## SUMMARY

Thesis: Study on the drying technology of Pyinkado (*Xylia xylocarpa*) by vacuum drying method

PhD student: Bui Thi Thien Kim

Major: Forest products processing engineering technology

Code: 9.54.90.01

The main objective of research on the drying technology of Pyinkado by vacuum drying method was to build a mathematical model of heat and moisture transfer along with experiments to determine the suitable vacuum drying schedules for Pyinkado wood.

To solve the research objective, the study has been conducted to understand the results of the theoretical research of the authors in the field of heat transfer, and moisture transfer on drying wood and other porous materials. Simultaneously, applying mathematical and physical theory to build a physical model of the Pyinkado wood vacuum drying process, a mathematical model describing the nature of heat transfer and moisture transfer in wood materials; solved the mathematical model by the finite element method and found the solution of the heat and moisture transfer mathematical model, used the experimental method to determine the thermo-physical properties of Pyinkado wood through which to verify the model theoretical model by experiment. Based on the experimental results, determined the appropriate vacuum drying technology parameters contributing to the construction of steps in the Pyinkado wood drying process by the vacuum drying method.

The results of the study have been presented as follows:

By experiment, the thermophysical parameters of Pyinkado wood depended on the moisture content of the drying material, with parameters including:

- Density of Pyinkado:

$$\rho_{wo} = 0,0068.W + 0,7875 \quad (R^2 = 0,9532)$$

with :  $W = 10 - 40\%$ ,  $W$  moisture content of Pyinkado (%),  $\rho_{wo}$  density of Pyinkado ( $\text{g/cm}^3$ )

- Specific heat capacity of Pyinkado:

$$C_{wop} = -0,058.W^2 + 10,982.W + 1538,2 \quad (R^2 = 0,9998)$$

with:  $W = 10 - 40\%$ ,  $W$  moisture content of Pyinkado (%),  $C_{wop}$  Specific heat capacity of Pyinkado (J/kg.K)

- The coefficient of thermal conductivity of Pyinkado:

$$\text{Longitudial : } k_l = -0,0001.W^2 + 0,019.W + 0,1995 \quad (R^2 = 0,9776)$$

$$\text{Radial \& tangential : } k_r = 0,0002.W^2 - 0,056.W + 0,2083 \quad (R^2 = 0,992)$$

with:  $W = 10 - 40\%$ ,  $W$  moisture content of Pyinkado (%),  $k_l$ ;  $k_r$  coefficient of thermal conductivity of Pyinkado wood longitudinal and radial & tangential (W/m.K)

- Fiber saturation moisture content of Pyinkado:

The fiber saturation point was achieved in the range of 18,14 – 23,07%. The results showed that the average value of fiber saturated moisture content of Pyinkado was  $W_{woFSP} = 20,556\%$ .

- Equilibrium moisture content of Pyinkado:

Through the chart to determine the equilibrium moisture of wood in Ho Chi Minh City at the time of temperature  $T = 32^\circ\text{C}$ , the relative humidity of the air  $\phi = 75\%$ , resulting in equilibrium moisture of Pyinkado  $W_{woEQ} = 14\%$ .

- Initial moisture content of Pyinkado:

The initial moisture content was in the range of 39,21 – 41,63%, resulting in the average value of the initial moisture content of Pyinkado  $W_{woIN} = 40,36\%$ .

Using infrared radiation vacuum drying method for Pyinkado wood materials. Building a mathematical model to represent the process of heat and moisture transfer in the drying process, solving the mathematical model by the finite element method, and using Comsol Multiphysics software to simulate the drying process, the results were shown through images, charts, and graphs of temperature and moisture content distributions.

The experimental results recorded the distribution of temperature and moisture during vacuum drying, compared with the results calculated from the mathematical model, whose contours and trends were consistent with the drying

experiment. , the maximum mean error when drying by vacuum infrared radiation method was less than 5%.

By experimental planning method, the correlation and regression equations have been determined showing the dependence between drying time, wood defect rate with temperature, and infrared radiation intensity. The appropriate technological parameters for the vacuum drying process of wood with a thickness of 20 - 50 mm were determined as follows: drying temperature  $T_s = 58,5 - 58,9^\circ\text{C}$ , pressure  $p = 0,2$  bar, and infrared radiation intensity  $P_{\text{hn}} = 625 - 641$   $\text{W/m}^2$ .



## MỤC LỤC

**Trang**

DANH MỤC CÁC HÌNH ẢNH.....	xv
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU.....	xix
DANH SÁCH CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT.....	xx
<b>GIỚI THIỆU</b> .....	1
1.Đặt vấn đề .....	1
2. Mục tiêu nghiên cứu .....	3
3. Phạm vi và đối tượng nghiên cứu.....	3
4. Phương pháp nghiên cứu .....	3
5.Nội dung nghiên cứu .....	3
6. Điểm mới của luận án.....	4
<b>Chương 1</b>	
<b>TỔNG QUAN</b> .....	5
<b>1.1 Tổng quan về nguyên liệu gỗ Cẩm xe</b> .....	5
1.1.1 Đặc điểm cây Cẩm xe.....	5
1.1.2 Môi trường sinh trưởng và phân bố tự nhiên.....	5
1.1.3 Đặc điểm về cấu tạo gỗ .....	7
1.1.4 Hướng sử dụng gỗ Cẩm xe.....	9
<b>1.2 Các yếu tố của gỗ ảnh hưởng đến quá trình sấy</b> .....	9
1.2.1 Cấu tạo gỗ - cấu trúc xốp.....	9
1.2.2 Độ ẩm của gỗ.....	10
1.2.3 Sự co rút và biến dạng của gỗ.....	11
<b>1.3 Công nghệ và thiết bị sấy gỗ bằng phương pháp chân không</b> .....	12
<b>1.4 Cơ chế truyền nhiệt bức xạ hồng ngoại</b> .....	12
<b>1.5 Những kết quả nghiên cứu sấy gỗ trong và ngoài nước bằng phương pháp chân không</b> .....	15
1.5.1 Những kết quả nghiên cứu sấy gỗ ngoài nước bằng phương pháp chân không.....	15
1.5.2 Những kết quả nghiên cứu lý thuyết về mô hình truyền nhiệt và thoát ẩm trong sấy gỗ chân không.....	25
1.5.3 Những kết quả nghiên cứu sấy gỗ bằng phương pháp chân không trong nước .....	31
<b>Kết luận chương 1</b> .....	32
<b>Chương 2</b>	

<b>VẬT LIỆU, PHƯƠNG PHÁP VÀ PHƯƠNG TIỆN NGHIÊN CỨU ..</b>	<b>34</b>
<b>2.1 Vật liệu nghiên cứu.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2 Phương pháp nghiên cứu lý thuyết.....</b>	<b>34</b>
<b>2.3. Phương pháp xác định các thông số nhiệt vật lý của gỗ Cắm xe ...</b>	<b>35</b>
2.3.1 Phương pháp xác định khối lượng riêng .....	36
2.3.2 Phương pháp xác định nhiệt dung riêng .....	37
2.3.3 Phương pháp xác định hệ số dẫn nhiệt .....	38
<b>2.4 Phương pháp xác định độ ẩm bão hòa thớ gỗ</b>	
<b>(hay còn gọi là điểm bão hòa thớ gỗ) - <math>W_{woFSP}</math> .....</b>	<b>40</b>
<b>2.5 Phương pháp xác định độ ẩm thăng bằng của gỗ - <math>W_{woEQ}</math> .....</b>	<b>41</b>
<b>2.6 Phương pháp xác định độ ẩm ban đầu của gỗ - <math>W_{woIN}</math> .....</b>	<b>41</b>
<b>2.7 Phương tiện nghiên cứu .....</b>	<b>42</b>
<b>2.8 Phương pháp đo các thông số.....</b>	<b>45</b>
<b>2.9 Phương pháp xác định các thông số .....</b>	<b>46</b>
<b>2.10 Phương pháp xác định mô hình toán cho quá trình</b>	
<b>truyền nhiệt và truyền ẩm sấy chân không gỗ Cắm xe.....</b>	<b>49</b>
<b>2.11 Phương pháp mô phỏng bằng Comsol Multiphysic .....</b>	<b>51</b>
<b>2.12 Phương pháp qui hoạch thực nghiệm.....</b>	<b>52</b>
<b>2.13 Phương pháp tối ưu hóa.....</b>	<b>57</b>
<b>2.14 Phương pháp xác định thời gian sấy và tỷ lệ khuyết tật gỗ sau sấy</b>	<b>59</b>
<b>2.15 Phương pháp xử lý số liệu.....</b>	<b>60</b>
<b>Kết luận chương 2.....</b>	<b>60</b>
<b>Chương 3</b>	
<b>KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN.....</b>	<b>62</b>
<b>3.1 Kết quả xác định tính chất nhiệt vật lý của gỗ Cắm xe.....</b>	<b>62</b>
3.1.1 Xác định khối lượng riêng của gỗ Cắm xe.....	62
3.1.2 Xác định nhiệt dung riêng .....	64
3.1.3 Xác định hệ số dẫn nhiệt .....	65
<b>3.2 Độ ẩm bão hòa thớ gỗ - <math>W_{woFSP}</math> (%).....</b>	<b>67</b>
<b>3.3 Độ ẩm thăng bằng (cân bằng) – <math>W_{woEQ}</math> (%).....</b>	<b>68</b>
<b>3.4 Độ ẩm ban đầu – <math>W_{woIN}</math> (%).....</b>	<b>68</b>
<b>3.5 Ảnh hưởng của độ ẩm đến tính chất nguyên liệu gỗ Cắm xe.....</b>	<b>69</b>
<b>3.6 Xây dựng mô hình vật lý, xác định mô hình toán</b>	
<b>quá trình truyền nhiệt và ẩm trong sấy gỗ chân không.....</b>	<b>73</b>
3.6.1 Mô hình sấy chân không gỗ Cắm xe .....	73
3.6.2 Xác định phương trình truyền nhiệt và ẩm trong quá trình sấy gỗ.....	75

<b>3.7 Giải mô hình toán quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm trong sấy chân không gỗ Căm xe .....</b>	<b>81</b>
<b>3.8 Kết quả giải mô hình toán thông qua mô phỏng quá trình truyền nhiệt, truyền ẩm trong sấy chân không gỗ Căm xe .....</b>	<b>86</b>
3.8.2 Kết quả mô phỏng truyền nhiệt mẫu gỗ 50 x 50 x 500 mm .....	91
3.8.3 Kết quả mô phỏng truyền nhiệt mẫu gỗ 20 x 150 x 500 mm .....	93
3.8.4 Kết quả mô phỏng truyền nhiệt mẫu gỗ 50 x 150 x 500 mm .....	95
3.8.5. So sánh truyền nhiệt trong thanh gỗ các kích thước 20 x 50 x 500 mm, 50 x 50 x 500 mm, 20 x 150 x 500 mm, 50 x 150 x 500 mm, .....	96
<b>3.9 Kết quả mô phỏng truyền ẩm mẫu gỗ sấy chân không.....</b>	<b>98</b>
<b>3.10 Kết quả thực nghiệm kiểm chứng lý thuyết quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm sấy chân không gỗ Căm xe .....</b>	<b>102</b>
3.10.1 Kết quả kiểm chứng gỗ Căm xe kích thước 20 x 50 x 500 mm ....	102
3.10.1.1 Đường cong nhiệt độ sấy gỗ Căm xe 20 x 50 x 500 mm .....	103
3.10.1.2 Đường cong sấy gỗ Căm xe 20 x 50 x 500 mm .....	105
3.10.2 Kết quả kiểm chứng gỗ Căm xe kích thước 50 x 50 x 500 mm ....	106
3.10.2.1 Đường cong nhiệt độ sấy gỗ Căm xe 50 x 50 x 500 mm .....	106
3.10.2.2 Đường cong sấy gỗ Căm xe 50 x 50 x 500 mm .....	108
<b>3.11 Xác định các thông số công nghệ sấy chân không gỗ Căm xe .....</b>	<b>110</b>
3.11.1 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Căm xe 20 x 50 x 500 mm - thông số đầu ra thời gian sấy ( $Y_{25tg1}$ ).....	112
3.11.1.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{25tg1}$ .....	112
3.11.1.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{25tg2}$ .....	113
3.11.1.3 Thông số tối ưu đối với hàm thời gian - $Y_{25tg2}$ .....	114
3.11.2 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Căm xe kích thước gỗ 20x50x500 mm - thông số đầu ra tỷ lệ khuyết tật gỗ ( $Y_{25kt}$ ) .....	115
3.11.2.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{25kt1}$ .....	115
3.11.2.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{25kt2}$ .....	116
3.11.2.3 Xác định các thông số tối ưu hàm tỷ lệ khuyết tật $Y_{25kt2}$ .....	117
3.11.3 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Căm xe kích thước 50 x 50 x 500 mm - thông số thời gian sấy ( $Y_{55tg1}$ ).....	118
3.11.3.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{55tg1}$ .....	118
3.11.3.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{55tg2}$ .....	118
3.11.3.3 Xác định các thông số tối ưu đối với hàm thời gian $Y_{55tg2}$ .....	120
3.11.4 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Căm xe kích thước 50 x 50 x 500 mm - thông số tỷ lệ khuyết tật ( $Y_{55kt}$ ).....	120

3.11.4.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{55kt1}$ .....	120
3.11.4.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{55kt2}$ .....	121
3.11.4.3 Xác định các thông số tối ưu hàm tỷ lệ khuyết tật $Y_{55kt2}$ .....	122
3.11.5 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Cắm xe kích thước 20 x 150 x 500 mm - thông số đầu ra thời gian sấy ( $Y_{215tg}$ )...	123
3.11.5.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{215tg1}$ .....	123
3.11.5.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{215tg2}$ .....	124
3.11.5.3 Xác định các thông số tối ưu hàm thời gian $Y_{215tg2}$ .....	125
3.11.6 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Cắm xe kích thước 20 x 150 x 500 mm - thông số đầu ra tỷ lệ khuyết tật ( $Y_{215kt}$ ).....	126
3.11.6.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{215kt1}$ .....	126
3.11.6.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{215kt2}$ .....	126
3.11.6.3 Xác định các thông số tối ưu hàm tỷ lệ khuyết tật $Y_{215kt2}$ .....	128
3.11.7 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Cắm xe kích thước 50x150mm - thông số thời gian sấy $Y_{515tg}$ .....	128
3.11.7.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{515tg1}$ .....	128
3.11.7.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{515tg2}$ .....	129
3.11.7.3 Xác định các thông số tối ưu đối với hàm thời gian $Y_{515tg2}$ .....	131
3.11.8 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Cắm xe kích thước 50x150mm - thông số tỷ lệ khuyết tật $Y_{515kt1}$ .....	131
3.11.8.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{515kt1}$ .....	131
3.11.8.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{515kt2}$ .....	132
3.11.8.3 Xác định các thông số tối ưu hàm tỷ lệ khuyết tật gỗ $Y_{515kt2}$ .....	134
3.11.9 Xác định các thông số và chỉ tiêu phù hợp cho máy sấy chân không gỗ Cắm xe .....	134
3.11.9.1 Kích thước gỗ 20 x 50 x 500 mm $Y_{sum25}$ .....	135
3.11.9.2 Kích thước gỗ 50 x 50 x 500 mm $Y_{sum55}$ .....	135
3.11.9.3 Kích thước gỗ 20 x 150 x 500 mm $Y_{sum215}$ .....	136
3.11.9.4 Kích thước 50 x 150 x 500 mm $Y_{sum515}$ .....	136
<b>3.12 Quy trình công nghệ sấy chân không gỗ Cắm xe .....</b>	<b>137</b>
Kết luận chương 3 .....	139
<b>KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....</b>	<b>141</b>
Kết luận.....	141
Kiến nghị .....	142
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO.....</b>	<b>143</b>
<b>DANH MỤC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU CỦA TÁC GIẢ.....</b>	<b>151</b>

Phụ lục A. Phương pháp đánh giá chất lượng gỗ bằng việc xác định tỷ lệ khuyết tật gỗ sau sấy

Phụ lục B. Nghiên cứu sấy đối lưu gỗ Căm xe

Phụ lục 1. Khối lượng riêng của gỗ Căm xe

Phụ lục 2. Khối lượng riêng khô kiệt của gỗ Căm xe

Phụ lục 3. Nhiệt dung riêng của gỗ Căm xe

Phụ lục 4. Hệ số dẫn nhiệt theo chiều dọc thớ của gỗ Căm xe

Phụ lục 5. Hệ số dẫn nhiệt theo chiều ngang thớ của gỗ Căm xe

Phụ lục 6. Độ ẩm bão hòa thớ gỗ của gỗ Căm xe

Phụ lục 7. Độ ẩm ban đầu gỗ Căm xe

Phụ lục 8. Các thông số cơ bản

Phụ lục 9. Bảng tra – các hệ số truyền nhiệt

Phụ lục 10. Chương trình mô phỏng – Gỗ kích thước 20 x 50 x 500

Phụ lục 11. Chương trình mô phỏng – Gỗ kích thước 50 x 50 x 500

Phụ lục 12. Chương trình mô phỏng – Gỗ kích thước 20 x 150 x 500

Phụ lục 13. Chương trình mô phỏng – Gỗ kích thước 50 x 150 x 500

Phụ lục 14. Chương trình – mô phỏng ẩm

Phụ lục 15. Ma trận thí nghiệm sấy chân không gỗ Căm xe 20 x 50 x 500 mm bậc 1

Phụ lục 16. Bảng ANOVA hàm thời gian sấy gỗ Căm xe 20 x 50 x 500 mm bậc 1

Phụ lục 17. Bảng hệ số hồi qui hàm thời gian sấy Căm xe 20 x 50 x 500 mm bậc 1

Phụ lục 18. Bảng ANOVA hàm khuyết tật sau sấy Căm xe 20 x 50 x 500 mm bậc 1

Phụ lục 19. Bảng hệ số hồi qui hàm khuyết tật sấy gỗ Căm xe 20 x 50 x 500 mm bậc 1

Phụ lục 20. Ma trận thí nghiệm sấy chân không gỗ Căm xe 20 x 50 x 500 mm bậc 2

Phụ lục 21. Bảng ANOVA hàm thời gian sấy gỗ Căm xe 20 x 50 x 500 mm bậc 2

Phụ lục 22. Bảng hệ số hồi qui hàm thời gian sấy Căm xe 20 x 50 x 500 mm bậc 2

Phụ lục 23. Bảng ANOVA hàm khuyết tật sau sấy Căm xe 20 x 50 x 500 mm bậc 2

Phụ lục 24. Bảng hệ số hồi qui hàm khuyết tật sấy gỗ Căm xe 20 x 50 x 500 mm bậc 2

Phụ lục 25. Ma trận thí nghiệm sấy chân không gỗ Căm xe 50 x 50 x 500 mm bậc 1

Phụ lục 26. Bảng ANOVA hàm thời gian sấy gỗ Căm xe 50 x 50 x 500 mm bậc 1

Phụ lục 27. Bảng hệ số hồi qui hàm thời gian sấy Căm xe 50 x 50 x 500 mm bậc 1

Phụ lục 28. Bảng ANOVA hàm khuyết tật sau sấy Căm xe 50 x 50 x 500 mm bậc 1

Phụ lục 29. Bảng hệ số hồi qui hàm khuyết tật sấy gỗ Căm xe 50 x 50 x 500 mm bậc 1

Phụ lục 30. Ma trận thí nghiệm sấy chân không gỗ Căm xe 50 x 50 x 500 mm bậc 2

Phụ lục 31. Bảng ANOVA hàm thời gian sấy gỗ Căm xe 50 x 50 x 500 mm bậc 2

Phụ lục 32. Bảng hệ số hồi qui hàm thời gian sấy Căm xe 50 x 50 x 500 mm bậc 2

Phụ lục 33. Bảng ANOVA hàm khuyết tật sau sấy Căm xe 50 x 50 x 500 mm bậc 2

- Phụ lục 34. Bảng hệ số hồi qui hàm khuyết tật sấy gỗ Căm xe 50 x 50 x 500 mm bậc 2
- Phụ lục 35. Ma trận thí nghiệm sấy chân không gỗ Căm xe 20 x 150 x 500 mm bậc 1
- Phụ lục 36. Bảng ANOVA hàm thời gian sấy gỗ Căm xe 20 x 150 x 500 mm bậc 1
- Phụ lục 37. Bảng hệ số hồi qui hàm thời gian sấy Căm xe 20 x 150 x 500 mm bậc 1
- Phụ lục 38. Bảng ANOVA hàm khuyết tật sau sấy Căm xe 20 x 150 x 500 mm bậc 1
- Phụ lục 39. Bảng hệ số hồi qui hàm khuyết tật sấy gỗ Căm xe 20 x 150 x 500 mm bậc 1
- Phụ lục 40. Ma trận thí nghiệm sấy chân không gỗ Căm xe 20 x 150 x 500 mm bậc 2
- Phụ lục 41. Bảng ANOVA hàm thời gian sấy gỗ Căm xe 20 x 150 x 500 mm bậc 2
- Phụ lục 42. Bảng hệ số hồi qui hàm thời gian sấy Căm xe 20 x 150 x 500 mm bậc 2
- Phụ lục 43. Bảng ANOVA hàm khuyết tật sau sấy Căm xe 20 x 150 x 500 mm bậc 2
- Phụ lục 44. Bảng hệ số hồi qui hàm khuyết tật sấy gỗ Căm xe 20 x 150 x 500 mm bậc 2
- Phụ lục 45. Ma trận thí nghiệm sấy chân không gỗ Căm xe 50 x 150 x 500 mm bậc 1
- Phụ lục 46. Bảng ANOVA hàm thời gian sấy gỗ Căm xe 50 x 150 x 500 mm bậc 1
- Phụ lục 47. Bảng hệ số hồi qui hàm thời gian sấy Căm xe 50 x 150 x 500 mm bậc 1
- Phụ lục 48. Bảng ANOVA hàm khuyết tật sau sấy Căm xe 50 x 150 x 500 mm bậc 1
- Phụ lục 49. Bảng hệ số hồi qui hàm khuyết tật sấy gỗ Căm xe 50 x 150 x 500 mm bậc 1
- Phụ lục 50. Ma trận thí nghiệm sấy chân không gỗ Căm xe 50 x 150 x 500 mm bậc 2
- Phụ lục 51. Bảng ANOVA hàm thời gian sấy gỗ Căm xe 50 x 150 x 500 mm bậc 2
- Phụ lục 52. Bảng hệ số hồi qui hàm thời gian sấy Căm xe 50 x 150 x 500 mm bậc 2
- Phụ lục 53. Bảng ANOVA hàm khuyết tật sau sấy Căm xe 50 x 150 x 500 mm bậc 2
- Phụ lục 54. Bảng hệ số hồi qui hàm khuyết tật sấy gỗ Căm xe 50 x 150 x 500 mm bậc 2
- Phụ lục 55. Hàm thời gian - tối ưu hóa sấy chân không gỗ Căm xe 20 x 50 x 500 mm
- Phụ lục 56. Hàm khuyết tật - tối ưu hóa sấy chân không gỗ Căm xe 20 x 50 x 500 mm
- Phụ lục 57. Hàm chung - tối ưu hóa sấy chân không gỗ Căm xe 20 x 50 x 500 mm
- Phụ lục 58. Hàm thời gian - tối ưu hóa sấy chân không gỗ Căm xe 50 x 50 x 500 mm
- Phụ lục 59. Hàm khuyết tật - tối ưu hóa sấy chân không gỗ Căm xe 50 x 50 x 500 mm
- Phụ lục 60. Hàm chung - tối ưu hóa sấy chân không gỗ Căm xe 50 x 50 x 500 mm
- Phụ lục 61. Hàm thời gian - tối ưu hóa sấy chân không gỗ Căm xe 20 x 150 x 500 mm
- Phụ lục 62. Hàm khuyết tật - tối ưu hóa sấy chân không gỗ Căm xe 20 x 150 x 500 mm
- Phụ lục 63. Hàm chung - tối ưu hóa sấy chân không gỗ Căm xe 20 x 150 x 500 mm
- Phụ lục 64. Hàm thời gian - tối ưu hóa sấy chân không gỗ Căm xe 50 x 150 x 500 mm
- Phụ lục 65. Hàm khuyết tật - tối ưu hóa sấy chân không gỗ Căm xe 50 x 150 x 500 mm
- Phụ lục 66. Hàm chung - tối ưu hóa sấy chân không gỗ Căm xe 50 x 150 x 500 mm

## DANH MỤC CÁC HÌNH ẢNH

Hình 1.1. Cây – thân cây Căm xe ( <i>Xylia xylocarpa</i> ) .....	6
Hình 1.2. Quả và hạt Căm xe ( <i>Xylia xylocarpa</i> ) .....	6
Hình 1.3. Lá cây Căm xe ( <i>Xylia xylocarpa</i> ) .....	6
Hình 1.4. Gỗ Căm xe ( <i>Xylia Xylocarpa</i> ).....	7
Hình 1.5. Cấu tạo (1) mạch gỗ, (2) nhu mô quanh mạch, (3) Sợi gỗ dạng H,I,L của gỗ Căm xe .....	8
Hình 1.6. Cấu tạo (1) mạch gỗ đơn và kép với 2-3 hàng tế bào (2) nhu mô quanh mạch, (3) Tia gỗ Căm xe ( <i>Xylia xylocarpa</i> ) .....	8
Hình 1.7. Cấu tạo (1) mặt cắt ngang (2) mặt tiếp tuyến, (3) mặt xuyên tâm gỗ Căm xe ( <i>Xylia xylocarpa</i> ) .....	8
Hình 1.8. Cấu tạo hiển vi - tia gỗ và nhu mô gỗ Căm xe ( <i>Xylia xylocarpa</i> ) .....	9
Hình 1.9. Biến dạng ở các loại ván các vị trí khác nhau tiết diện ngang của gỗ .....	12
Hình 1.10. Máy sấy chân không dạng buồng sấy tròn.....	13
Hình 1.11. Máy sấy chân không dạng buồng sấy chữ nhật .....	13
Hình 1.12. Chiều dòng nhiệt và dòng ẩm khi sấy bức xạ hồng ngoại .....	14
Hình 1.13. Máy sấy chân không đầu tiên được thiết kế do nhà khoa học Vincenzo Pagnozzi (1965).....	15
Hình 1.14. Hệ thống sấy gỗ chân không của Zhangjing Chen .....	18
Hình 1.15. Máy sấy gỗ chân không thực nghiệm của Thitinan Sattho và Ram Yamsaengsung .....	21
Hình 1.16. Sơ đồ sấy gỗ chân không vi sóng .....	21
Hình 1.17. Sơ đồ máy sấy chân không sóng siêu âm thí nghiệm .....	23
Hình 1.18. Mô hình sấy chân không theo chu kỳ của Assouad và Jomaa (2003) .....	26
Hình 2.1. Gỗ Căm xe ( <i>Xylia xylocarpa</i> ) .....	34
Hình 2.2. Gỗ Căm xe kích thước 20 x 20 x 30 mm xác định khối lượng riêng. 37	
Hình 2.3 Bình nhiệt lượng kế	
Hình 2.4 Mẫu gỗ thí nghiệm .....	38
Hình 2.5. Sơ đồ của thiết bị đo hệ số dẫn nhiệt	
Hình 2.6. Mẫu gỗ thí nghiệm .....	39
Hình 2.7. Biểu đồ xác định độ ẩm thăng bằng của gỗ trong môi trường không khí .....	41
Hình 2.8. Phương pháp cắt mẫu xác định độ ẩm ban đầu gỗ.....	42

Hình 2.9. Thiết bị sấy chân không gỗ Căm xe .....	45
Hình 2.10. Lưu đồ các bước mô phỏng truyền nhiệt, ẩm sấy gỗ chân không ...	52
Hình 3.1. Mối quan hệ tương quan khối lượng riêng và độ ẩm của gỗ Căm xe	63
Hình 3.2. Mối quan hệ tương quan nhiệt dung riêng và độ ẩm .....	65
Hình 3.3. Mối quan hệ tương quan hệ số dẫn nhiệt và độ ẩm .....	66
Hình 3.4. Kết quả xác định độ ẩm bão hòa thứ gỗ của gỗ Căm xe.....	68
Hình 3.5. Kết quả xác định độ ẩm ban đầu của gỗ Căm xe .....	69
Hình 3.6. Phần trăm thể tích các pha trong gỗ Căm xe khi $W = 40\%$ .....	71
Hình 3.7. Phần trăm thể tích các pha trong gỗ Căm xe khi $W = 10\%$ .....	72
Hình 3.8. Mô hình sấy gỗ Căm xe bằng phương pháp sấy chân không .....	73
Hình 3.9. Biểu diễn quá trình thoát hơi nước khi sấy gỗ chân không .....	74
Hình 3.10. Sơ đồ mô tả mô hình vật lý quá trình sấy gỗ Căm xe .....	76
Hình 3.11. Cân bằng nhiệt trong một phần tử vô cùng nhỏ.....	77
Hình 3.12. Lưu đồ thuật toán giải phương trình truyền nhiệt và truyền ẩm.....	86
Hình 3.13. Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 20 x 50 x 500 mm thể hiện toàn thanh (a) và mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm $t = 5$ phút.....	90
Hình 3.14. Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 20 x 50 x 500 mm thể hiện toàn thanh (a) mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm $t = 15$ phút .....	90
Hình 3.15. Đồ thị thể hiện diễn biến nhiệt (a) các vị trí (b) bên trong mẫu gỗ kích thước 20 x 50 x 500 mm .....	91
Hình 3.16. Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 50 x 50 x 500 mm thể hiện toàn thanh (a) mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm $t = 15$ phút .....	92
Hình 3.17. Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 50 x 50 x 500 mm thể hiện toàn thanh (a) mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm $t = 35$ phút .....	92
Hình 3.18. Đồ thị thể hiện diễn biến nhiệt (a) các vị trí (b) bên trong mẫu gỗ kích thước 50 x 50 x 500 mm .....	93
Hình 3.19. Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 20 x 150 x 500 mm thể hiện toàn thanh (a) và mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm $t = 5$ phút.....	94
Hình 3.20. Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 20 x 150 x 500 mm thể hiện toàn thanh (a) mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm $t = 15$ phút .....	94
Hình 3.21. Đồ thị thể hiện diễn biến nhiệt (a) các vị trí (b) bên trong mẫu gỗ kích thước 20 x 150 x 500 mm .....	95
Hình 3.22. Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 50 x 150 x 500 mm thể hiện toàn thanh (a) mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm $t = 15$ phút .....	95
Hình 3.23. Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 50 x 150 x 500 mm thể hiện toàn thanh (a) mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm $t = 35$ phút .....	96



Hình 3.24. Đồ thị thể hiện diễn biến nhiệt (a) các vị trí (b) bên trong mẫu gỗ kích thước 50 x 150 x 500 mm .....	96
Hình 3.25. Đồ thị biểu diễn nhiệt bên trong mẫu gỗ kích thước 20 x 50 x 500 mm (a), 50 x 50 x 500 mm (b), 20 x 150 x 500 mm (c), 50 x 50 x 500 mm (d) .....	97
Hình 3.26. Mô phỏng biểu diễn truyền ẩm trong mẫu gỗ kích thước 20 x 50 x 500 mm thời điểm 10 phút (a) và 50 phút (b) .....	98
Hình 3.27. Mô phỏng biểu diễn truyền ẩm trong mẫu gỗ kích thước 50 x 50 x 500 mm thời điểm 20 phút (a) và 60 phút (b) .....	98
Hình 3.28. Mô phỏng biểu diễn truyền ẩm trong mẫu gỗ kích thước 20 x 150 x 500 mm thời điểm 30 phút (a) và 50 phút (b) .....	99
Hình 3.29. Mô phỏng biểu diễn truyền ẩm trong mẫu gỗ kích thước 50 x 150 x 500 mm thời điểm 35 phút (a) và 80 phút (b) .....	99
Hình 3.30. Biểu diễn quá trình thoát ẩm gỗ trong sấy chân không.....	100
Hình 3.31. Đồ thị biểu diễn lượng truyền ẩm bên trong mẫu gỗ 20 x 50 x 500 mm (a), 50 x 50 x 500 mm (b), 20 x 150 x 500 mm (c), 50 x 50 x 500 mm (d) .....	101
Hình 3.32. Mô phỏng tốc độ bay hơi trên và dưới điểm bão hòa .....	101
Hình 3.33. Nhiệt độ lý thuyết và thực nghiệm tại tâm thanh gỗ Cắm xe 20 x 50 x 500 mm sấy chân không .....	104
Hình 3.34. Đường giảm ẩm lý thuyết và thực nghiệm trong quá trình sấy chân không gỗ Cắm xe 20 x 50 x 500 mm.....	106
Hình 3.35. Nhiệt độ lý thuyết và thực nghiệm tâm thanh gỗ Cắm xe 50 x 50 x 500 mm sấy chân không. ....	107
Hình 3.36. Đường giảm ẩm lý thuyết và thực nghiệm trong quá trình sấy chân không gỗ Cắm xe .....	109
Hình 3.37. Mối quan hệ thông số đầu vào và đầu ra.....	111
Hình 3.38. Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b) mối quan hệ $X_1$ , $X_2$ và $Y_{25tg2}$ .....	114
Hình 3.39. Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b) mối quan hệ $X_1$ , $X_2$ và $Y_{25kt2}$ .....	117
Hình 3.40. Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b) mối quan hệ $X_1$ , $X_2$ và $Y_{55tg2}$ .....	119
Hình 3.41. Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b) mối quan hệ $X_1$ , $X_2$ và $Y_{55kt2}$ .....	122
Hình 3.42. Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b)	

quan hệ $X_1, X_2$ và $Y_{215tg2}$ .....	125
Hình 3.43. Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b)	
mối quan hệ $X_1, X_2$ và $Y_{215kt2}$ .....	127
Hình 3.44. Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b)	
mối quan hệ $X_1, X_2$ và $Y_{515tg2}$ .....	130
Hình 3.45. Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b)	
mối quan hệ $X_1, X_2$ và $Y_{515kt2}$ .....	133
Hình 3.46. Sơ đồ các bước qui trình công nghệ sấy gỗ Cắm xe phù hợp.....	138

## DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1. Mô hình mô tả quá trình truyền nhiệt và thoát ẩm trong sấy gỗ chân không theo chu kỳ .....	26
Bảng 1.2. Mô hình mô tả áp suất, quá trình truyền nhiệt và thoát ẩm và trong quá trình sấy gỗ chân không đối lưu.....	27
Bảng 1.3. Mô hình 1D mô tả quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm trong quá trình sấy gỗ chân không sóng tần số .....	28
Bảng 1.4. Mô hình 2D mô tả quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm và áp suất trong quá trình sấy gỗ chân không .....	29
Bảng 1.5. Mô hình mô tả quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm và trong quá trình sấy gỗ chân không hơi quá nhiệt .....	29
Bảng 2.1. Thông số kỹ thuật cơ bản của các thiết bị đo .....	43
Bảng 3.1. Bảng giá trị các thông số nhiệt ẩm.....	87
Bảng 3.2. Kết quả thực nghiệm và lý thuyết nhiệt độ tâm thanh gỗ Cắm xe kích thước 20 x 50 x 500 mm sấy chân không.....	103
Bảng 3.3. Kết quả thực nghiệm và lý thuyết quá trình giảm ẩm của gỗ Cắm xe kích thước 20 x 50 x 500 mm sấy chân không .....	105
Bảng 3.4. Kết quả thực nghiệm và lý thuyết nhiệt độ tâm thanh gỗ Cắm xe kích thước 50 x 50 x 500 mm sấy chân không.....	106
Bảng 3.5. Kết quả thực nghiệm và lý thuyết độ ẩm gỗ Cắm xe kích thước 50 x 50 x 500 mm sấy chân không .....	108
Bảng 3.6. Mức và khoảng biến thiên của các yếu tố nghiên cứu mô hình thí nghiệm bậc nhất (a) và bậc hai (b).....	111
Bảng 3.7. Nhiệt độ sấy và áp suất chân không tương ứng .....	112
Bảng 3.8. Giá trị tối ưu - hàm thời gian $Y_{25tg2}$ (giờ).....	114
Bảng 3.9. Giá trị tối ưu - hàm tỷ lệ khuyết tật $Y_{25kt2}$ (%).....	117
Bảng 3.10. Giá trị tối ưu- hàm thời gian $Y_{55tg2}$ (giờ).....	120
Bảng 3.11. Giá trị tối ưu - tỷ lệ khuyết tật $Y_{55kt2}$ (%).....	123
Bảng 3.12. Giá trị tối ưu hàm thời gian $Y_{215tg2}$ (giờ).....	125
Bảng 3.13. Giá trị tối ưu - hàm tỷ lệ khuyết tật $Y_{215kt2}$ (%).....	128
Bảng 3.14. Giá trị tối ưu - hàm thời gian $Y_{515tg2}$ (giờ) .....	130
Bảng 3.15. Giá trị tối ưu - hàm tỷ lệ khuyết tật $Y_{50x150kt2}$ (%).....	133
Bảng 3.16 Giá trị tối ưu hàm đa mục tiêu $Y_{sum25}$ .....	135

Bảng 3.17 Giá trị tối ưu hàm đa mục tiêu $Y_{\text{sum55}}$ .....	135
Bảng 3.18 Giá trị tối ưu hàm đa mục tiêu $Y_{\text{sum215}}$ .....	136
Bảng 3.19 Giá trị tối ưu hàm đa mục tiêu $Y_{\text{sum515}}$ .....	136
Bảng 3.20. Giá trị thông số công nghệ sấy phù hợp cho từng dạng kích thước .....	137

## DANH SÁCH CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT

<b>Ký hiệu</b>		<b>Đơn vị</b>
$A_R$	: diện tích nguồn bức xạ $=x.y$	$(m^2)$
$A_s$	: diện tích tiếp xúc với nguồn bức xạ	$(m^2)$
$b_o, b_i, b_{ij}$	: các ước lượng hệ số hồi qui, gọi tắt là hệ số hồi qui	
$c_1$	: nhiệt dung riêng của mẫu gỗ	$(J/g.K)$
$c_2$	: nhiệt dung riêng của nước $c_2 = 4,185$	$(J/g.K)$
$c_{ap}$	: nhiệt dung riêng của không khí	$(J/kg.K)$
$c_{wap}$	: nhiệt dung riêng của nước $(J/kg.K)$ hoặc	$(kg_m/kg_{airdry})$
$c_{wop}$	: nhiệt dung riêng của gỗ	$(J/kg.K)$
$c_{wodryp}$	: nhiệt dung riêng của gỗ khô kiệt	$(J/kg.K)$
$D$	: hệ số khuếch tán ẩm	$(m^2/s)$
$G_m$	: trọng lượng riêng gỗ	
$h$	: hệ số tỏa nhiệt	$(W/m^2.K)$
$h_m$	: hệ số truyền ẩm	$(m/s)$
$h_R$	: hệ số truyền nhiệt bức xạ	$(W/m^2.K)$
$I^p$	: là năng suất bức xạ	
$k_a$	: hệ số dẫn nhiệt của không khí	$(W/m.K)$
$k_l$	: hệ số dẫn nhiệt chiều dọc thớ gỗ	$(W/m.K)$
$k_r$	: hệ số dẫn nhiệt chiều ngang thớ gỗ	$(W/m.K)$
$k_y$	: hệ số dẫn nhiệt theo phương y	$(W/m.K)$
$k_z$	: hệ số dẫn nhiệt theo phương z	$(W/m.K)$
$K_{crtt}$	: tỷ lệ co rút thể tích	$(\%)$
$k_{wo}$	: hệ số dẫn nhiệt của gỗ	$(W/m.K)$
$L$	: khoảng cách nguồn bức xạ đến gỗ	$(m)$
$Le$	: hệ số Lewis	
$m_1$	: khối lượng mẫu gỗ	$(g)$
$m_{12\%}$	: khối lượng gỗ khi độ ẩm tại 12%	$(g)$
$m_2$	: khối lượng của nước	$(g)$
$m_A$	: khối lượng ban đầu của mẫu A	$(g)$

$m_B$	: khối lượng ban đầu của mẫu B	(g)
$m_{oA}$	: khối lượng khô kiệt của mẫu A	(g)
$m_{oB}$	: khối lượng khô kiệt của mẫu B	(g)
$m_v$	: tốc độ bay hơi của nước trong gỗ	(kg/m <sup>3</sup> .s)
$m_{wodry}$	: khối lượng gỗ khô kiệt	(g)
$N$	: số thí nghiệm.	
$N_1$	: số thí nghiệm bậc nhất (nhân của kế hoạch)	
$N_o$	: số thí nghiệm tại tâm (thí nghiệm ở mức không)	
$N_{say}$	: tổng số thanh gỗ sấy	
$N_{tkd}$	: số thanh độ ẩm không đạt	
$N_\alpha$	: số thí nghiệm ở mức điểm sao	
$R$	: hằng số khí lý tưởng ( $R = 8,314 \text{ J/mol.K}$ )	
$T$	: nhiệt độ sấy	(K)
$t_1, t_m$	: nhiệt độ mẫu gỗ trước và sau khi trao đổi nhiệt với nước.	
$T_{1v}, T_{2v}$	: nhiệt độ ở phía ngoài 2 vách phẳng của thiết bị ( $^0\text{C}$ )	
$t_2, t_m$	: nhiệt độ nước trước và sau khi trao đổi nhiệt với vật thể.	
$T_R$	: nhiệt độ nguồn bức xạ	(K)
$T_s$	: nhiệt độ bề mặt gỗ gia nhiệt bức xạ	(K)
$V_a$	: thể tích phân trỗng (khí) trong gỗ (cm <sup>3</sup> )	
$V_{kt}$	: thể tích gỗ khuyết tật	
$V_{say}$	: thể tích gỗ sấy	
$V_{sowo}$	: thể tích chất gỗ (phần chất tạo nên vách tế bào) (cm <sup>3</sup> )	
$V_{sum}$	: tổng thể tích	(cm <sup>3</sup> )
$V_{wa}$	: thể tích của nước và ẩm trong gỗ	(cm <sup>3</sup> )
$V_{wo}$	: thể tích phần gỗ	(cm <sup>3</sup> )
$V_{wo12\%}$	: thể tích gỗ trạng thái độ ẩm 12%	(cm <sup>3</sup> )
$V_{wodry}$	: thể tích gỗ khô kiệt	(cm <sup>3</sup> )
$V_{woEQ}$	: thể tích gỗ tại độ ẩm thăng bằng	(cm <sup>3</sup> )
$V_{woFSP}$	: thể tích gỗ tại độ ẩm bão hòa thớ gỗ	(cm <sup>3</sup> )
$V_{wogre}$	: thể tích gỗ tươi	(cm <sup>3</sup> )
$W$	: độ ẩm của gỗ	(%)

$W_A$	: độ ẩm của mẫu A	(%)
$W_B$	: độ ẩm của mẫu B	(%)
$W_{woEQ}$	: độ ẩm thăng bằng	(%)
$W_{woFSP}$	: độ ẩm bão hòa thớ gỗ	(%)
$W_{woIN}$	: độ ẩm ban đầu của gỗ	(%)
$W_{woS}$	: độ ẩm bề mặt gỗ nhận nhiệt bức xạ	(%)
$y$	: chiều rộng thanh gỗ - phương tiếp tuyến gỗ	(mm)
$x_i, x_j$	: các yếu tố đầu vào	
$x_r$	: chiều rộng nguồn bức xạ	(m)
$x$	: chiều dài thanh gỗ - phương dọc thớ gỗ	(mm)
$Y_2$	: tỷ lệ phần trăm tổng gỗ khuyết tật	
$Y_{2'}$	: tỷ lệ phần trăm không đạt độ ẩm	
$Y_{2''}$	: tỷ lệ phần trăm gỗ khuyết tật	
$Y_{215kt2}$	: yếu tố đầu ra khuyết tật sấy gỗ 20 x 150 bậc 2	
$Y_{215kt1}$	: yếu tố đầu ra khuyết tật sấy gỗ 20 x 150 bậc 1	
$Y_{215tg1}$	: yếu tố đầu ra thời gian sấy gỗ 20 x 150 bậc 1	
$Y_{215tg2}$	: yếu tố đầu ra thời gian sấy gỗ 20 x 150 bậc 2	
$Y_{25kt1}$	: yếu tố đầu ra khuyết tật sấy gỗ 20 x 50 bậc 1	
$Y_{25kt2}$	: yếu tố đầu ra khuyết tật sấy gỗ 20 x 50 bậc 2	
$Y_{25tg2}$	: yếu tố đầu ra thời gian sấy gỗ 20 x 50 bậc 2	
$Y_{25tg1}$	: yếu tố đầu ra thời gian sấy gỗ 20 x 50 bậc 1	
$Y_{515kt1}$	: yếu tố đầu ra khuyết tật sấy gỗ 50 x 150 bậc 1	
$Y_{515kt2}$	: yếu tố đầu ra khuyết tật sấy gỗ 50 x 150 bậc 2	
$Y_{515tg1}$	: yếu tố đầu ra thời gian sấy gỗ 50 x 150 bậc 1	
$Y_{515tg2}$	: yếu tố đầu ra thời gian sấy gỗ 50 x 150 bậc 2	
$Y_{55kt2}$	: yếu tố đầu ra khuyết tật sấy gỗ 50 x 50 bậc 2	
$Y_{55kt1}$	: yếu tố đầu ra khuyết tật sấy gỗ 50 x 50 bậc 1	
$Y_{55tg1}$	: yếu tố đầu ra thời gian sấy gỗ 50 x 50 bậc 1	
$Y_{55tg2}$	: yếu tố đầu ra thời gian sấy gỗ 50 x 50 bậc 2	
$Y_{chung}$	: yếu tố đầu ra chung hai thông số	
$Y_{cr}$	: Độ co rút tổng quát (%)	

$Y_i$	: các yếu tố đầu ra	
$y_i$	: các yếu tố đầu ra	
$y_{lt}$	: giá trị lý thuyết (giá trị tính toán)	
$y_r$	: chiều dài nguồn bức xạ	(m)
$y_{tb}$	: giá trị trung bình	
$y_{tn}$	: giá trị thực nghiệm,	
$z$	: chiều dày thanh gỗ - phương xuyên tâm gỗ	(mm)
$\Delta h$	: ẩn nhiệt hóa hơi	(J/kg)
$\varepsilon$	: hệ số phát xạ của vật xám (còn gọi độ đen)	
$\varepsilon_R$	: hệ số phát xạ của đèn bức xạ	
$\varepsilon_s$	: hệ số phát xạ của gỗ	
$\rho_a$	: khối lượng riêng của không khí	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{sowo}$	: khối lượng riêng chất gỗ $\rho_{sowo} = 1,5$	g/cm <sup>3</sup>
$\rho_{wa}$	: khối lượng riêng của nước	(g/cm <sup>3</sup> )
$\rho_{wo}$	: khối lượng riêng gỗ Căm xe	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{wo12\%}$	: khối lượng riêng gỗ tại độ ẩm 12%	(g/cm <sup>3</sup> )
$\rho_{wodry}$	: khối lượng riêng gỗ khô kiệt	(g/cm <sup>3</sup> )
$t$	: thời gian sấy	(phút, giờ)
CL	: chất lượng	
TN	: thực nghiệm	
TNTA	: truyền nhiệt, truyền ẩm	
TNKC	: thực nghiệm kiểm chứng	
TNS	: tác nhân sấy	
VLS	: vật liệu sấy	
QTS	: quá trình sấy	



## GIỚI THIỆU

### 1. Đặt vấn đề

Theo Tổng cục Lâm nghiệp năm 2021, 5/5 chỉ tiêu của ngành lâm nghiệp đều đạt và vượt mục tiêu đề ra. Đặc biệt, trị giá xuất khẩu gỗ và lâm sản đạt 15,87 tỉ USD, tăng 20% so với kế hoạch và tăng 20% so với năm 2020 (riêng gỗ và sản phẩm gỗ đạt 14,72 tỉ USD); xuất siêu cả năm ước đạt 12,94 tỉ USD, tăng 21,2% so với năm trước. Với những kết quả đạt được, trị giá xuất khẩu gỗ và lâm sản chiếm trên 30% tổng trị giá xuất khẩu các mặt hàng nông, lâm, thủy sản; 4,7% trị giá xuất khẩu toàn quốc và là một trong những mặt hàng có trị giá xuất khẩu trên 10 tỉ USD. Trị giá xuất siêu gỗ và lâm sản chiếm lớn nhất trong sản phẩm nông, lâm, thủy sản (đạt 12,94 tỉ USD, tăng 21,2% so với cùng kỳ năm trước), đóng góp quan trọng vào trị giá xuất siêu của toàn ngành Nông nghiệp. Vì vậy, để gia tăng mức đóng góp và vị thế quan trọng của gỗ và sản phẩm gỗ, cần thiết phải đầu tư nghiên cứu, tập trung phát triển công nghệ sản xuất[1].

Theo số liệu báo cáo tình hình nhập khẩu nguyên liệu gỗ Căm xe từ 2018 đến tháng 8 năm 2021, nguyên liệu gỗ nhập khẩu tăng rất nhanh từ 2.278.000 m<sup>3</sup> năm 2018 đến 11.483.000 m<sup>3</sup> vào năm 2021 [2]. Đây là một trong nguồn nguyên liệu chính, giá trị cao ứng dụng rất nhiều trong sản xuất sản phẩm gỗ nội ngoại thất và các sản phẩm gỗ khác trong công nghiệp chế biến gỗ hiện nay. Tuy nhiên để nâng cao chất lượng sản phẩm một trong những công nghệ không thể thiếu là công nghệ sấy gỗ. Đây là một trong những công nghệ rất quan trọng trong quá trình gia công sản xuất các sản phẩm gỗ.

Vấn đề quan tâm trong sấy gỗ là thời gian sấy và chất lượng gỗ sau sấy, đặc biệt đối với những loại gỗ nhiều dầu nhựa như Căm xe, chất này gây cản trở quá trình thoát ẩm làm kéo dài thời gian sấy và gây ra nhiều khuyết tật nứt tét, công vênh gỗ sau sấy. Vì vậy, cần phải có giải pháp để rút ngắn thời gian sấy và giảm tỷ lệ khuyết tật gỗ sau sấy. Phương pháp sấy là một trong những chọn lựa hữu ích vì đây là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp quá trình sấy. Nghiên cứu phương pháp sấy phù hợp với nguyên liệu sấy để rút ngắn thời gian sấy đồng thời giảm khuyết tật

gỗ sau sấy góp phần nâng cao chất lượng và giá trị nguyên liệu gỗ cần nhanh chóng tập trung giải quyết.

Sấy chân không dựa vào sự chênh lệch áp suất là động lực chính của quá trình sấy và nguyên lý hạ điểm sôi của nước dưới áp suất thấp đã được nghiên cứu là một trong những giải pháp hiệu quả giải quyết vấn đề trên, thể hiện qua các công trình nghiên cứu của các tác giả điển hình như : Chen, Lamb [36], Deliiski, Syuleymanov [42], He, Yao, Chen, Yi [52], Defo, Cloutier, Fortin [40, 41], Koumoutsakos [64], Koumoutsakos, Avramidis, Hatzikiriakos Savvas [65, 66, 67], Torres, Jomaa, Puiggali [101], Espinoza, Bond [46], Fu, Avramidis, Weng, Cai, Zhou [49], Guler, Dilek [50], Scott Lyon, Scott Bowe, Michael Wiemann [93]. Trong ba phương thức truyền nhiệt: dẫn nhiệt, đối lưu và bức xạ thì chỉ duy nhất truyền nhiệt bằng bức xạ là có hiệu quả trong môi trường chân không. Đề tài đã chọn truyền nhiệt bằng bức xạ hồng ngoại vì đây là phương pháp gia nhiệt cho vật liệu sấy theo phương thức gia nhiệt thể tích, có nhiều ưu điểm so với các phương thức gia nhiệt khác. Từ đó phương pháp sấy kết hợp giữa chân không với gia nhiệt bức xạ mang lại ưu thế lớn trong việc thúc đẩy rất mạnh quá trình thoát ẩm trong gỗ và giúp rút ngắn đáng kể thời gian sấy do sử dụng cùng lúc nhiều loại động lực trong quá trình sấy như: dòng ẩm, dòng nhiệt và sự chênh lệch áp suất. Với nhiều nguồn động lực được tận dụng tối đa cho quá trình thoát ẩm, phương pháp này là giải pháp phù hợp cho gỗ khó sấy, chứa nhiều dầu nhựa điển hình là gỗ Cẩm xe.

Như vậy, phương pháp sấy chân không kết hợp bức xạ hồng ngoại có thể là giải pháp cho việc sấy gỗ Cẩm xe với nhiều dầu nhựa hạn chế quá trình thoát ẩm ở nhiệt độ cao. Khi sấy chân không với nhiệt độ thấp, truyền nhiệt bức xạ hồng ngoại sẽ hạn chế sự nóng chảy của dầu nhựa góp phần tạo điều kiện thuận lợi nước và hơi nước di chuyển nhanh trong quá trình thoát ẩm. Tuy nhiên, kỹ thuật và công nghệ sấy này chưa được nghiên cứu và áp dụng phổ biến cho nguyên liệu gỗ nói chung và gỗ Cẩm xe nói riêng trong bối cảnh hiện nay. Trước tình hình trên, đề tài tiến hành “Nghiên cứu công nghệ sấy Gỗ Cẩm xe (*Xylia xylocarpa*) bằng phương pháp sấy chân không” được thực hiện.

## 2. Mục tiêu nghiên cứu

Nghiên cứu công nghệ sấy gỗ Cắm xe bằng phương pháp sấy chân không với các mục tiêu chính như sau:

- Nghiên cứu xác định các thông số nhiệt vật lý của gỗ Cắm xe để làm cơ sở cho việc tính toán và mô phỏng quá trình truyền nhiệt, truyền ẩm trong sấy chân không gỗ Cắm xe.
- Xác định mô hình toán cho quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm trong sấy chân không gỗ Cắm xe nhằm mô phỏng diễn biến quá trình phân bố nhiệt độ và ẩm độ trong vật liệu sấy từ đó đưa ra dự báo về quá trình sấy.
- Kiểm chứng mô hình lý thuyết so với thực nghiệm
- Xác định các bước công nghệ để xây dựng chế độ sấy chân không gỗ Cắm xe phù hợp.

## 3. Phạm vi và đối tượng nghiên cứu

Nghiên cứu trên máy sấy chân không hồng ngoại qui mô thí nghiệm

Đối tượng: Gỗ Cắm xe (*Xylia xylocarpa*), gỗ tròn có kích thước đường kính 0,5 - 0,7 m, chiều dài 3 - 7m, độ ẩm khoảng  $40 \pm 2\%$ .

Hiệu quả kinh tế và kỹ thuật là một phần giới hạn của nghiên cứu khi tiến hành trên mô hình thí nghiệm.

## 4. Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu chung của luận án là nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm. Nghiên cứu lý thuyết dựa trên xây dựng mô hình vật lý, thông qua mô hình vật lý xác định mô hình toán, kết hợp phương pháp số giải mô hình truyền nhiệt, truyền ẩm trong quá trình sấy gỗ chân không. Nghiên cứu thực nghiệm xác định các thông số nhiệt vật lý của gỗ Cắm xe, kiểm chứng mô hình lý thuyết và thực nghiệm, để xác định các thông số công nghệ sấy góp phần xây dựng chế độ sấy phù hợp cho các dạng kích thước gỗ Cắm xe khác nhau trong quá trình sấy chân không.

## 5. Nội dung nghiên cứu

Để đạt được mục tiêu đề ra, đề tài tập trung giải quyết các nội dung chính như sau:

Tìm hiểu tổng quan về công nghệ sấy gỗ trong và ngoài nước, các công trình nghiên cứu đã công bố, từ đó phân tích đánh giá đề xuất phương pháp sấy gỗ phù hợp với điều kiện sản xuất tại Việt Nam.

Nghiên cứu thực nghiệm xác định các tính chất nhiệt vật lý của nguyên liệu gỗ Cẩm xe.

Xây dựng mô hình vật lý làm cơ sở xác định mô hình toán cho quá trình truyền nhiệt, truyền ẩm trong sấy gỗ Cẩm xe bằng phương pháp sấy chân không hồng ngoại.

Xác định và giải mô hình toán cho quá trình truyền nhiệt, truyền ẩm bằng phương pháp số, nhằm dự đoán diễn biến phân bố nhiệt độ và ẩm độ trong sấy chân không hồng ngoại gỗ Cẩm xe.

Nghiên cứu thực nghiệm kiểm chứng mô hình lý thuyết truyền nhiệt và truyền ẩm, nhằm kiểm tra tính phù hợp của mô hình lý thuyết với thực nghiệm sấy chân không hồng ngoại gỗ Cẩm xe.

Nghiên cứu xác định các thông số công nghệ sấy phù hợp cho việc xây dựng chế độ sấy chân không hồng ngoại với những kích thước nguyên liệu gỗ Cẩm xe khác nhau.

Đề xuất các bước công nghệ sấy phù hợp trong quá trình sấy chân không kết hợp hồng ngoại cho gỗ Cẩm xe.

## **6. Điểm mới của luận án**

Xác định được các thông số nhiệt vật lý của gỗ Cẩm xe: độ ẩm ban đầu, độ ẩm bão hòa thứ gỗ và các thông số phụ thuộc theo độ ẩm của vật liệu sấy bao gồm: nhiệt dung riêng, khối lượng riêng, hệ số dẫn nhiệt theo chiều dọc và chiều ngang thứ gỗ.

Xây dựng được mô hình toán học mô tả quá trình truyền nhiệt, truyền ẩm của gỗ Cẩm xe bằng phương pháp sấy chân không hồng ngoại.

Sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn giải bài toán truyền nhiệt, truyền ẩm và mô phỏng được diễn biến quá trình phân bố nhiệt độ, ẩm độ của gỗ Cẩm xe trong quá trình sấy bằng phương pháp sấy chân không hồng ngoại.

Sử dụng thuật toán tối ưu hóa xác định được các thông số công nghệ sấy phù hợp và xây dựng chế độ sấy trên một số dạng kích thước gỗ Cẩm xe khi sấy chân không hồng ngoại.

## Chương 1

### TỔNG QUAN

#### 1.1 Tổng quan về nguyên liệu gỗ Căm xe

**Tên Việt Nam:** Căm xe

**Tên thương mại:** Ironwood, Pyinkado

**Tên khoa học:** *Xylia xylocarpa* (Roxb.) Taub.

**Tên đồng nghĩa:** *Xylia dolabriformis* Benth, *X. kerrii* Craib and Hutch,  
*Inga xylocarpa* (Roxb.) DC, *Mimosa xylocarpa* Roxb.

**Họ thực vật:** Leguminosae subfamily Mimosoideae

**Tên theo quốc gia :** Sokram (Campuchia); Cam-xe (Việt Nam); Irul (Ấn Độ); Daeng (Thái Lan); Burma ironwood (My-an-mar); Deng (Lào) [82]

##### 1.1.1 Đặc điểm cây Căm xe

Cây gỗ lớn, thân tròn có thể cao trên 25 m, một vài trường hợp cao hơn 40 m khi cây mọc ở vùng đất ẩm và màu mỡ. Thân thẳng với nhiều cành lớn nhỏ. Vỏ cây từ xám đến đỏ, vỏ mỏng và rụng từng mảng nhỏ, trong vỏ màu hồng. Lá kép với 3 - 7 cặp lá đối xứng. Lá non màu hồng đậm, lá trưởng thành nhẵn, tron mượt mặt dưới là màu xanh xám. Hoa màu vàng nhạt hình cầu. Hoa xuất hiện trên cụm không phải nhánh gần nách lá. Đài hoa hình phễu, có lông măng, hình trứng nhọn có dạng ba mặt với chiều dài 2,9 – 4 mm. Cánh hoa hình thuôn hẹp, nhọn, trưởng thành có lông măng chiều dài từ 3,5 – 4,6 mm. Nhị hoa chứa phấn hoa 5 – 12 mm chiều dài, bầu nhụy dài 2 – 2,5 mm. Quả dày và mập kích thước 10 – 15 x 5 – 6 cm và hình mảnh cong và hẹp dần về phía đáy. Quả còn non màu nâu xanh mượt về sau quả chuyển thành màu nâu sậm [12], [82].

##### 1.1.2 Môi trường sinh trưởng và phân bố tự nhiên

*Xylia xylocarpa* là loài cây nhiệt đới phân bố tự nhiên ở Campuchia, Việt Nam, Lào, Thái Lan và My-an-mar trải rộng hướng Tây đến Ấn Độ. Cây phát triển trong rừng rậm và rừng hỗn giao. Đặc biệt phát triển trên độ cao 850 m với lượng mưa trung bình hằng năm 1200 – 1700 mm [82].



**Hình 1.1.** Cây – thân cây Cắm xe (*Xylia xylocarpa*)  
(Cắm xe giữa mùa khô tại Campuchia) [62], [82]



**Hình 1.2.** Quả và hạt Cắm xe (*Xylia xylocarpa*) [62], [82]



**Hình 1.3.** Lá cây Cắm xe (*Xylia xylocarpa*) [62], [82]  
(Lá non và lá trưởng thành với 3 - 7 cặp đối xứng nhau)

### 1.1.3 Đặc điểm về cấu tạo gỗ Cẩm xe

#### Cấu tạo thô đại

Gỗ giác có màu vàng nâu, gỗ lõi có màu đỏ nâu, màu đỏ càng đậm theo tuổi gỗ (hình 1.4), thính thoảng trên bề mặt thấm một ít nhựa gỗ hơi đen. Thớ gỗ rõ ràng thẳng dài, thính thoảng gợn sóng. Gỗ có giác lõi phân biệt, giác màu hồng xám, lõi màu đỏ nâu. Vòng sinh trưởng rõ ràng và dứt khoát, thường rộng 2 – 3 mm với mặt gỗ mịn [12], [82].



**Hình 1.4.** Gỗ Cẩm xe (*Xylia Xylocarpa*)

#### Cấu tạo hiển vi

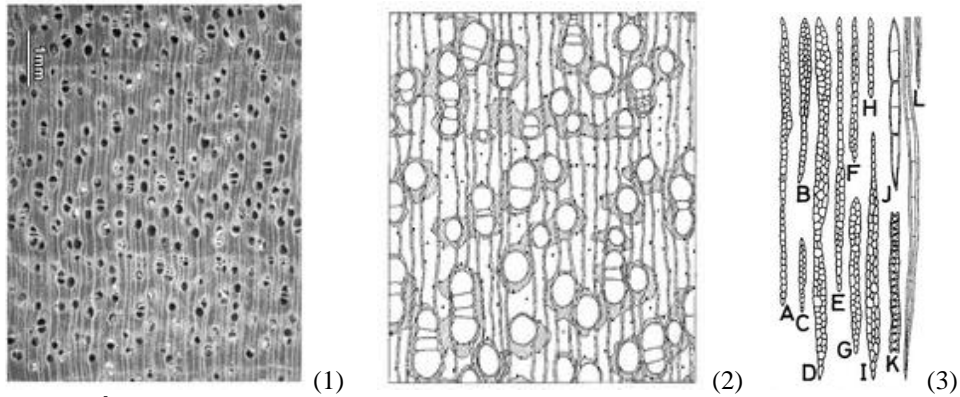
Mạch gỗ: mạch đơn và kép ngắn, ít khi gặp mạch kép dài, có xu hướng tập hợp thành những hàng lệch. Trong mạch có nhiều chất chứa màu nâu đỏ, mạch đơn từ 2 – 3 và kép 5 – 7 lỗ mạch, thường càng về sau càng dễ nhận thấy, thông thường khoảng 7,5 – 12,5 (-20/mm<sup>2</sup>), đường kính lớn nhất của ống mạch đơn khoảng 160 - 220  $\mu\text{m}$ , tấm xuyên mạch đơn, trong ống mạch chứa gom xen kẽ giữa các ống mạch với đường kính từ 5 - 6  $\mu\text{m}$ , gom trong tia gỗ cũng giống gom trong mạch gỗ, sự xuất hiện của gom làm gỗ sẫm màu hơn [63].

Tia gỗ: tia gỗ nhỏ và hẹp từ 1 - 2 hoặc 1 - 3 hàng được xếp liên tiếp, với một vài tia gỗ không đều nhau, chiều cao lớn nhất từ 1250 - 2100  $\mu\text{m}$  thông thường cùng một dãy [63].

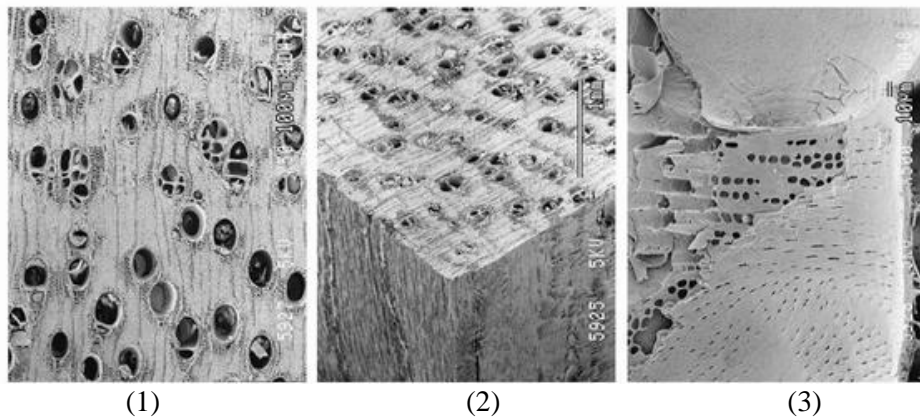
Nhu mô: nhu mô quanh mạch với nhiều lỗ nhỏ, nhu mô hình cánh quanh mạch với phần mở rộng và ngắn cũng có khi hình cánh, cánh nối tiếp và dải băng xa mạch bao quanh các ống dẫn gom cạnh ranh giới vòng sinh trưởng [63].

Sợi gỗ : sợi dài từ 0,9 – 1,6 mm, trung bình 1,4 mm với đường kính 13 - 22  $\mu\text{m}$  và chiều dày vách khoảng 5  $\mu\text{m}$  thể bít thỉnh thoảng xuất hiện [63].

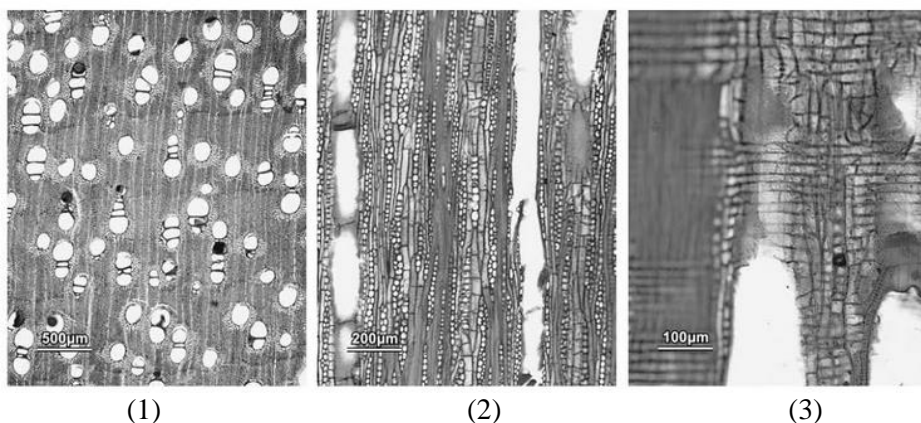
Ống dẫn nhựa: đường kính bằng khoảng 1/3 đường kính lỗ mạch [63].



**Hình 1.5.** Cấu tạo (1) mạch gỗ, (2) nhu mô quanh mạch, (3) Sợi gỗ dạng H,I,L của gỗ Cẩm xe [63]

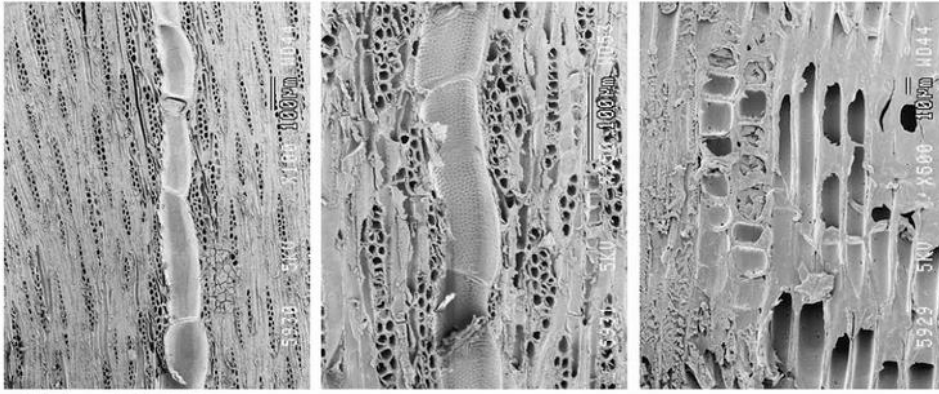


**Hình 1.6.** Cấu tạo (1) mạch gỗ đơn và kép với 2-3 hàng tế bào (2) nhu mô quanh mạch, (3) Tia gỗ Cẩm xe (*Xylocarpus xylocarpa*) [63]



**Hình 1.7.** Cấu tạo (1) mặt cắt ngang (2) mặt tiếp tuyến, (3) mặt xuyên tâm gỗ Cẩm xe (*Xylocarpus xylocarpa*) [63]





**Hình 1.8.** Cấu tạo hiển vi - tia gỗ và nhu mô gỗ Cẩm xe (*Xylia xylocarpa*) [63]

### 1.1.4 Hướng sử dụng gỗ Cẩm xe

Gỗ Cẩm xe rất cứng và nặng, có phần gỗ lõi lớn, có màu sắc, vân đẹp, mặt gỗ mịn. Độ bền tự nhiên rất tốt, độ bền cơ học cao. Trong xây dựng, có thể dùng vào những cấu kiện cần đến độ bền uốn tĩnh cao, dùng làm ván sàn và những công dụng đặc biệt. Sử dụng rộng rãi trong ngành xây dựng, phát triển xơ sợi cho công nghiệp gỗ nhân tạo [34] và đặc biệt sản xuất các sản phẩm nội thất [12], [26].

Việc chọn nguyên liệu gỗ Cẩm xe nghiên cứu sấy chân không dựa vào 3 yếu tố chính như sau : thứ nhất căn cứ vào báo cáo tình hình xuất nhập khẩu nguyên liệu gỗ Cẩm xe [2] có xu hướng tăng nhanh cho thấy tiềm năng nhu cầu sử dụng lớn, thứ hai đặc điểm tự nhiên gỗ nhiều dầu nhựa, xảy nhiều khuyết tật gỗ khi áp dụng các phương pháp sấy nhiệt độ cao, thứ ba phương pháp sấy chân không là giải pháp công nghệ sấy góp phần để nâng cao chất lượng gỗ Cẩm xe, phục vụ cho quá trình sản xuất sản phẩm gỗ cung cấp thị trường tiêu dùng và xuất khẩu.

## 1.2 Các yếu tố của gỗ ảnh hưởng đến quá trình sấy

### 1.2.1 Cấu tạo gỗ - cấu trúc xốp

Gỗ cũng như nhiều vật liệu ẩm khác có cấu trúc xốp. Khoảng cách giữa các phân tử cấu tạo nên khung vật chất khô lớn hơn kích thước của phân tử. Không gian giữa các phân tử gọi là các mao dẫn hay các lỗ xốp. Đối với các vật liệu ẩm thì các mao dẫn hay lỗ xốp chứa đầy nước.

Cấu trúc không gian của các mao dẫn hay lỗ xốp rất phức tạp. Tính chất của nó được xác định bởi một loạt các yếu tố như độ xốp, độ thấm thấu, dạng và kích thước của các lỗ xốp [4], [26].

Cấu tạo gỗ có liên quan chặt chẽ đến tính chất gỗ và khuyết tật tự nhiên, đồng thời là cơ sở cho sự nhận biết, gia công, chế biến và sử dụng đồ gỗ. Hiểu rõ vấn đề này sẽ sử dụng đúng mục đích và xác định chế độ sấy và gia công hợp lý, qua đó nâng cao được hiệu suất sử dụng gỗ.

Khảo sát gỗ Cắm xe, về mặt cấu tạo mạch gỗ đơn và ngắn, ít mạch kép, trong mạch nhiều chất chứa màu nâu đỏ, tia gỗ nhỏ và hẹp trong tia gỗ cũng chứa nhiều gôm, phần tia gỗ chiếm  $5 \div 10\%$  thể tích cây. Qua cấu tạo gỗ cho thấy hệ thống ống mạch, tia gỗ là hai hệ thống dẫn chất dinh dưỡng, nước và muối khoáng khi cây còn sống, sau khi chặt hạ hệ thống này góp phần dẫn thoát nước trong quá trình sấy. Vì có chứa nhiều dầu nhựa, gôm, các chất chứa trong ống mạch và tia gỗ, điều này cản trở quá trình thoát nước, đặc biệt sấy nhiệt độ cao ảnh hưởng đến việc dầu nhựa, gôm, chất chứa bị hóa lỏng di chuyển làm bít các ống mạch và tia gỗ, gây khó khăn việc thoát nước nên được ghi nhận là gỗ khó sấy. Để giải quyết vấn đề này, cần một giải pháp và đó chính là sấy nhiệt độ thấp và một trong những phương pháp sấy nhiệt độ thấp là phương pháp sấy chân không.

### 1.2.2 Độ ẩm của gỗ

Lượng nước trong gỗ được biểu thị là độ ẩm của gỗ. Độ ẩm là tỷ lệ phần trăm lượng nước có trong gỗ so với khối lượng gỗ.

Độ ẩm ảnh hưởng lớn đến tính chất của gỗ. Nước nằm trong gỗ có hai dạng: nước mao dẫn (tự do) và nước liên kết.

Nước tự do tồn tại trong gỗ nằm trong ruột tế bào và khe hở giữa các tế bào, được giữ lại trong gỗ nhờ các lực cơ học, hàm lượng nước tự do trong gỗ thể hiện qua độ ẩm gỗ. Dạng nước này chỉ ảnh hưởng đến khối lượng thể tích, nhiệt lượng cháy, khả năng thẩm thấu dịch thể vào gỗ

Nước liên kết (nước kết cấu) tồn tại trong gỗ nằm ở giữa các mixenxenlulo trong vách tế bào (khoảng cách các mixen :  $10 - 100\text{Å}$  trong vách tế bào, chiếm khoảng 1%), được giữ lại trong gỗ nhờ các lực cơ học và các liên kết hóa lý. Lượng nước liên kết thay đổi sẽ ảnh hưởng đến rất nhiều tính chất cơ lý của gỗ [10, 26].

### **Độ ẩm thăng bằng $W_{woEQ}$ (%)**

Nếu ta đặt hai mẫu gỗ trong một môi trường không khí có độ ẩm  $\varphi$  nào đó. Một mẫu gỗ có độ ẩm ban đầu khá lớn và mẫu kia có độ ẩm khá nhỏ, xấp xỉ 0%. Người ta nhận thấy, độ ẩm của mẫu gỗ ướt có xu hướng giảm dần và độ ẩm của mẫu gỗ khô tăng dần. Độ ẩm của hai mẫu này có xu hướng tiệm cận dần đến một giá trị nào đó gọi là độ ẩm thăng bằng  $W_{woEQ}$  (ngoài ra còn gọi độ ẩm cân bằng). Thực tế cho thấy độ ẩm của hai mẫu gỗ rất khó đạt giá trị cân bằng mà thường chênh lệch nhau từ 1÷3% xung quanh giá trị đó [4], [10], [18], [26].

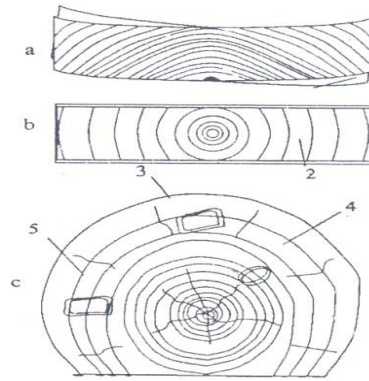
### **Độ ẩm bão hòa thớ gỗ - $W_{woFSP}$ (%) (Điểm bão hòa thớ gỗ)**

Nếu đặt gỗ tươi hoặc gỗ ướt trong môi trường nào đó (môi trường không khí hay môi trường sấy...) ở nhiệt độ và độ ẩm tương đối của không khí nước trong gỗ sẽ thoát ra ngoài. Khi nước tự do thoát hết, nước liên kết còn bão hòa trong gỗ (vách tế bào), điểm đó gọi là điểm bão hòa thớ gỗ và độ ẩm tương ứng gọi là độ ẩm bão hòa thớ gỗ, ký hiệu:  $W_{woFSP}$ . Ngược lại, khi gỗ khô trong môi trường nào đó với nhiệt độ và độ ẩm không khí nhất định, gỗ sẽ hút hơi nước, khi nước liên kết bão hòa trong vách tế bào và nước tự do bắt đầu xuất hiện thì điểm đó gọi là điểm bão hòa thớ gỗ, độ ẩm tại điểm này là độ ẩm bão hòa thớ gỗ. Điểm bão hòa thớ gỗ là ranh giới giữa nước liên kết và nước tự do, đồng thời là điểm có ý nghĩa rất lớn là ranh giới về sự thay đổi của tính chất gỗ [4], [10], [18], [26].

### **1.2.3 Sự co rút và biến dạng của gỗ**

Gỗ là vật liệu không đồng nhất, có cấu tạo dị hướng, có cấu tạo theo thớ. Môi trường không đẳng hướng nên sự co rút của gỗ theo các hướng là không giống nhau. Đặc biệt hiện tượng co rút theo phương xuyên tâm và tiếp tuyến của các thớ gỗ khác nhau rất nhiều, mức độ khác biệt phụ thuộc vào từng loại gỗ. Tỷ lệ co rút theo phương tiếp tuyến và xuyên tâm là 1,5 ÷ 2,2 lần [4], [7], [8], [26].

Sự chênh lệch này sẽ ảnh hưởng rất nhiều đến tính chất và ứng suất bên trong gỗ trong quá trình sấy. Điều này sẽ tạo nên những vấn đề nan giải khi sấy gỗ, tùy thuộc vào cấu tạo của từng tấm gỗ cụ thể mà có thể làm cho tấm gỗ bị biến dạng khi sấy.



a-Kích thước vân xuyên tâm khi gỗ khô, b- Biến dạng tổng hợp co rút vân trong thực tế, c - Biến dạng ở vị trí khác nhau trên tiết diện ngang

**Hình 1.9.** Biến dạng ở các loại vân các vị trí khác nhau tiết diện ngang của gỗ

### 1.3 Công nghệ và thiết bị sấy gỗ bằng phương pháp chân không

Phương pháp sấy chân không sấy ở nhiệt độ tương đối thấp 40 - 60<sup>0</sup>C, ứng với nhiệt độ sấy này áp suất sấy ở khoảng 50 - 140 mmHg vì thế sẽ làm giảm hiện tượng nứt, vênh, giữ được màu sắc sản phẩm gỗ sau khi sấy và rút ngắn được thời gian sấy [13, 14].

Thiết bị sấy gỗ chân không bao gồm 4 cụm bộ phận chính: buồng sấy, bộ phận cấp nhiệt, bộ ngưng tụ ẩm, bơm chân không.

**Dạng buồng sấy:** Hầu hết các loại máy sấy chân không hiện có trên thế giới tập trung chủ yếu ở 2 dạng: dạng buồng sấy tròn và dạng hình chữ nhật. Mỗi loại có những ưu nhược điểm như sau:

+ Dạng buồng sấy tròn: ưu điểm là chịu lực hút chân không tốt hơn nhưng không gian chứa thì bị hạn chế, máy sấy dạng này thường sử dụng hai phương pháp gia nhiệt là đối lưu và bức xạ.

+ Dạng hình chữ nhật thì chịu lực hút chân không yếu hơn dạng tròn nhưng không gian buồng sấy thì lại rộng hơn, phương pháp cung cấp nhiệt thì cũng giống như buồng sấy dạng tròn.



**Hình 1.10.** Máy sấy chân không dạng buồng sấy tròn



**Hình 1.11.** Máy sấy chân không dạng buồng sấy chữ nhật

Nhìn chung, nếu thiết kế công suất máy sấy nhỏ hơn  $15\text{m}^3/\text{m}^2$  thì thường người ta sử dụng dạng buồng tròn, còn từ  $15\text{m}^3/\text{m}^2$  trở lên thì người ta chọn dạng buồng hình chữ nhật [9, 13, 16, 23].

**Bộ phận cấp nhiệt:** đây là bộ phận hết sức quan trọng trong máy sấy chân không. Trong thực tế có rất nhiều phương pháp cấp nhiệt bao gồm đối lưu, bức xạ hồng ngoại, dùng cao tần, vi sóng... Trong các phương pháp cấp nhiệt nêu trên thì dòng điện cao tần và vi sóng là có ưu thế lớn nhất vì quá trình truyền nhiệt không phụ thuộc vào qui cách gỗ cũng như độ chân không. Tuy nhiên giá thành cũng như yêu cầu kỹ thuật sử dụng tương đối cao. Phương pháp bức xạ cũng không phụ thuộc vào độ chân không, tuy nhiên lại gặp khó khăn trong việc bố trí sắp xếp gỗ và thiết bị bức xạ trong buồng sấy, khả năng bức xạ tỷ lệ nghịch với khoảng cách với nguyên liệu và chiều dày nguyên liệu. Phương pháp cấp nhiệt đối lưu thì rất khó khăn trong môi trường chân không [9, 13, 23].

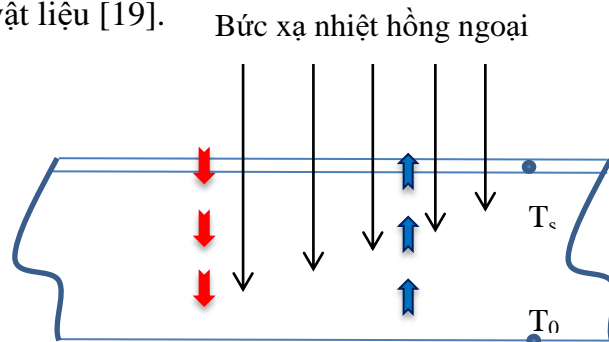
**Bộ phận ngưng tụ ẩm:** có nhiệm vụ làm ngưng tụ lượng hơi nước bay theo không khí trong quá trình hút chân không, đảm bảo độ bền cho bơm. Đồng thời đây là bộ phận thu lượng nước đã ngưng tụ trong buồng sấy.

**Bơm chân không** có nhiệm vụ tạo ra môi trường chân không trong buồng sấy theo độ chân không yêu cầu [9, 13, 23].

#### 1.4 Cơ chế truyền nhiệt bức xạ hồng ngoại

Vật liệu sấy là nguyên liệu gỗ được cấu tạo chủ yếu bởi chất hữu cơ và nước, phổ hấp thụ năng lượng bức xạ của nước và các chất hữu cơ là khác nhau. Ở mỗi bước sóng, chất hữu cơ trở thành vật trong suốt - không hấp thụ năng lượng bức xạ hồng ngoại; tuy nhiên nước trong vật liệu sẽ trở thành vật đen hấp thụ năng lượng bức xạ tối đa. Do đó, khi chiếu bức xạ hồng ngoại có bước sóng nằm trong khoảng 0,76 – 1000  $\mu\text{m}$  lên vật liệu, các O - H của nước hấp thụ năng lượng bức xạ và bắt đầu rung động với tần số của bức xạ nhiệt chiếu tới. Việc chuyển đổi bức xạ nhiệt sang năng lượng sẽ làm cho vật liệu trong nước bốc hơi.

Hình 1.12 mô tả cơ chế truyền nhiệt và truyền ẩm của QTS bức xạ hồng ngoại, dòng nhiệt sẽ truyền từ ngoài bề mặt VLS vào tâm VLS. Khi các lớp bên trong VLS nhận nhiệt và nóng lên, sẽ hình thành dòng ẩm di chuyển từ tâm VLS ra ngoài bề mặt vật liệu [19].



**Hình 1.12.** Chiều dòng nhiệt và dòng ẩm khi sấy bức xạ hồng ngoại

Nguồn bức xạ hồng ngoại sản sinh ra các tia hồng ngoại chiếu tới vật liệu ẩm trong buồng sấy. Do đó khi nhận được nguồn năng lượng bức xạ mà đèn hồng ngoại chiếu tới, thì nội năng của nước trong vật liệu ẩm sẽ tăng lên nhanh chóng, vì thế ma sát giữa các phân tử nước sẽ tăng lên dẫn đến nhiệt độ của nước tăng lên dần tới nhiệt độ sôi, cắt đứt các liên kết giữa các phân tử nước với phân tử nước, giữa các phân tử nước với các cấu trúc hữu cơ. Kết quả nước sẽ chuyển pha từ trạng thái lỏng sang trạng thái hơi và bốc hơi theo chiều ly tâm bên trong vật liệu ẩm ra ngoài môi trường sấy.

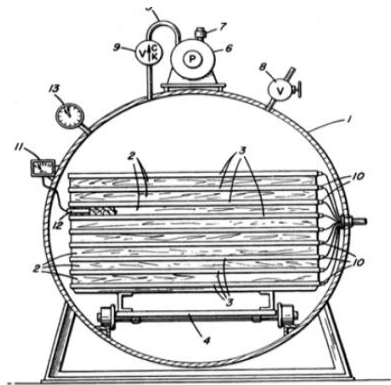
Trên thực tế, việc điều chỉnh năng lượng bức xạ của tia hồng ngoại về tới bước sóng mà nước tự do trong vật liệu ẩm hấp thụ cực đại là hoàn toàn thực

hiện được, vì mối quan hệ giữa bước sóng và nhiệt độ của bóng đèn hồng ngoại là:  $\lambda_{\max} = 2886/T$ . Cụ thể từ công thức này có thể chủ động điều khiển nhiệt độ bóng đèn có thể thu được bước sóng phù hợp, bước sóng phù hợp vào khoảng 2,5 – 3,5  $\mu\text{m}$ , và đây cũng chính là khoảng cách bước sóng mà nước hấp thụ cực đại [19, 39].

Ngoài ra, khả năng làm bay hơi nước bằng bước sóng thì nhiệt độ cũng đóng vai trò quan trọng vào quá trình làm khô vật liệu ẩm, do tính chất nhiệt mà tia hồng ngoại sinh ra. Vậy có hai tác nhân chính để làm khô vật liệu ẩm đó là: cường độ bức xạ từ bước sóng của tia hồng ngoại và nhiệt độ do tia hồng ngoại phát ra. Và đây cũng chính là đặc điểm quan trọng làm tăng tốc độ quá trình sấy từ đó làm giảm đáng kể thời gian sấy, góp phần tăng hiệu quả của quá trình sấy [19, 39].

## 1.5 Những kết quả nghiên cứu sấy gỗ trong và ngoài nước bằng phương pháp chân không

### 1.5.1 Những kết quả nghiên cứu sấy gỗ ngoài nước bằng phương pháp chân không



**Hình 1.13.** Máy sấy chân không đầu tiên được thiết kế do nhà khoa học Vincenzo Pagnozzi (1965)

Năm 1965 Vincenzo Pagnozzi là nhà khoa học người Italia, được biết đến là người đầu tiên thiết kế cơ bản cho máy sấy chân không và được cấp bằng sáng chế về máy sấy chân không (hình 1.13). Phương pháp sấy dựa trên khái niệm chung của sấy chân không với tốc độ cao, gia nhiệt bằng dẫn nhiệt thông qua nồi hơi cung cấp liên tục cho bảng nhiệt tiếp xúc trực tiếp với gỗ để làm nóng [33].

Năm 1971 Bror Hager được cấp bằng sáng chế qui trình Royal, đây là một quá trình sấy và xử lý gỗ sử dụng nhiệt độ sôi của dầu dưới điều kiện chân không. Phương pháp này là mô hình rất thành công của sấy gỗ trong dầu sôi được ứng dụng cho gỗ có độ ẩm cao (gỗ ướt). Trong gỗ ướt thông qua tế bào và các ống mạch được xử lý với dầu đạt điểm sôi ở nhiệt độ cao 150 - 400<sup>0</sup>C. Dầu được gia nhiệt từ 60 - 90<sup>0</sup>C, cùng thời điểm đó áp suất chân không là 0,03 - 0,16 bar (Powell, 2003). Khi áp suất giảm, độ chân không giảm và hạ điểm sôi của nước trong gỗ làm cho chúng bốc hơi. Kết quả nghiên cứu cho thấy thời gian sấy từ 4 - 6 giờ đối với gỗ có qui cách dày 25 mm và 6 - 8 giờ đối với gỗ có qui cách dày 50 mm. Phương pháp này có sự tương đồng với một phương pháp được phát triển ở Đức dưới tên gọi là xử lý nhiệt dầu (OHT<sup>TM</sup>) sử dụng dầu thực vật chưa tinh luyện để xử lý. Tuy nhiên, điểm khác biệt là OHT sử dụng dầu thực vật gia nhiệt với nhiệt độ cao từ 180 - 220<sup>0</sup>C đã gây ra những thay đổi thành phần hóa học trong gỗ, chính yếu tố này làm phương pháp OHT không được ứng dụng phổ biến trong sấy gỗ [33].

Thời kỳ đầu thập niên 80 sấy chân không theo chu kỳ phát triển ở Nga, phương pháp này được ứng dụng trong công nghiệp quân sự phức tạp để sấy những chất với nhiệt độ không ổn định. Sau này, công nghệ này nhận được sự phát triển rộng khắp khi hợp tác cùng Hàn Quốc và Siberia. Trong quá trình nghiên cứu và ứng dụng phương pháp này không những sử dụng trong công nghiệp thực phẩm mà còn cho công nghiệp sấy gỗ [33].

Sấy nén ép chân không, dựa trên sáng chế của nhà khoa học Haygreen vào cuối 1986, phương pháp này là sự dịch chuyển nước trong gỗ bằng phương pháp cơ học trong suốt quá trình nén ép. Phương pháp này được phát triển nhiều trong các nghiên cứu của nhà khoa học Ressel [88], Lee, Hayashi, Jung, [73], Sachin Gupta, Kishan Kumar [89]. Tuy nhiên, phương pháp này đòi hỏi hệ thống thiết bị phức tạp với công nghệ nén ép trực tiếp điều này ảnh hưởng đến trật tự, cấu trúc vân thớ gỗ sau khi xử lý, nhưng mang lại ưu điểm gia tăng tính chất cơ học của gỗ sau khi xử lý. Điều này có ý nghĩa rất lớn trong giúp cải thiện tính chất cơ học những loại gỗ rừng trồng mọc nhanh sau khi sấy nén ép gỗ chân không [33, 73, 88].

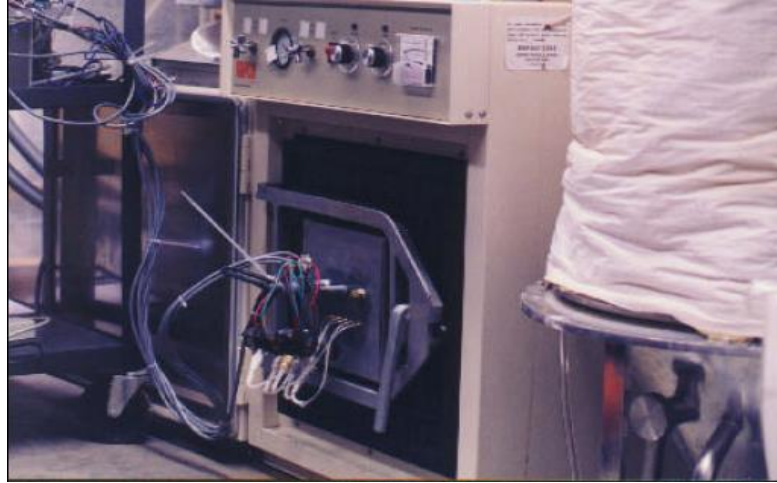


Vào cuối thế kỷ 20 và đầu thế kỷ 21, trong lĩnh vực sấy chiếm ưu thế là khuynh hướng kết hợp. Hai nguyên lý khác nhau được kết hợp trong cùng qui trình vì thế mang lại ưu điểm cao nhất và hạn chế tối đa khuyết điểm của mỗi phương pháp đây chính là điểm riêng đặc biệt. Phổ biến nhất là phương pháp “lai” là kết quả sự kết hợp gia nhiệt vi sóng, hồng ngoại hoặc sóng tần số, sóng siêu âm với sấy chân không của các tác giả: Ahmet Kaya [27], Altun, Yapici, Korkmaz [28], Avramidis, Koumoutsakos, Hatzikiriakos [31], Fang, John, Ruddick, Avramidis [47], Guler, Dilek [50], He, Yang, Yi, Gao [52], Lee, Li [74], Ressel [88], Xian Jun Li, Bi Guang Zhang, Wen Jun Li [107], Xianran Jia, Jingyao Zhao, Yingchun Cai [108], Zhenbin He, Fe Yang, Yiqing Peng, Songlin Yi [112], Zhengbin He, Yu Zhang, Zhenyu Wang, Zijian Zhao, Songlin Yi [115].

Trong cuối hai thập kỷ của thế kỷ 20, theo xu hướng phát triển thị trường trong lĩnh vực sấy gỗ và những yêu cầu của gỗ cho mục đích xây dựng. Các phương pháp sấy nhiệt độ cao như hơi quá nhiệt, sóng cao tần với nhiệt độ sấy từ 160 - 245<sup>0</sup>C, khi thay đổi nhiệt độ sấy dẫn đến sự thay đổi tính chất hóa học của gỗ. Kết quả làm thay đổi cấu trúc gỗ bao gồm làm giảm tính chất cơ học của hemicelluloses và lignin. Vì vậy xu hướng này dần hạn chế ứng dụng trong công nghiệp sấy gỗ [33].

Vào thập niên 1950 và 1960 ứng dụng kết hợp vi sóng và chân không thấp đạt tốc độ sấy cao đã cho thấy được tiềm năng của công nghệ, nhưng tại cùng thời điểm đó phát sinh vấn đề về sự phân bố của từ trường và qui trình điều khiển khi sấy khi những tấm ván nguyên liệu được xếp thành từng khối quá dày ảnh hưởng quá trình thoát ẩm của vật liệu sấy [33].

Năm 1997 Zhangjing Chen đã nghiên cứu về động lực cơ bản trong quá trình sấy gỗ chân không, tác giả đánh giá hiệu quả tốc độ sấy cho 4 dạng kích thước gỗ sấy theo chiều dày và 3 dạng kích thước theo chiều dài. Trong chu kỳ sấy với nhiệt độ 60<sup>0</sup>C và áp suất là 18 mmHg trong thời gian 140 phút. Kết quả cho thấy tốc độ sấy không ảnh hưởng bởi chiều dày mà bị ảnh hưởng bởi chiều dài và chu kỳ sấy được chia thành 2 phần: chu kỳ sấy nhanh và chu kỳ sấy chậm xảy ra kế tiếp cho đến khi áp suất bên trong gỗ đạt giá trị bằng áp suất xung quanh (hình 1.14) [35].



**Hình 1.14.** Hệ thống sấy gỗ chân không của Zhangjing Chen [38]

Năm 1997 Lin Zhang, Stavros Avramidis, Savvas G. Hatzikiriakos đã nghiên cứu đặc điểm của dòng ẩm di chuyển trong sấy chân không sóng tần số theo chiều dày thanh gỗ. Sử dụng hai loại gỗ lá kim là Tuyết Tùng (Cedar) và Độc Càn (Hemlock) cho thí nghiệm để kiểm tra sự di chuyển của dòng ẩm trong thanh gỗ. Sự phân bố ẩm theo chiều dọc và phương ngang đã được xác định theo thời gian và số lượng di chuyển. Kết quả cho thấy rằng, cả phương dọc và phương ngang ẩm di chuyển phân phối theo cấu trúc ống dẫn mạch và tia gỗ, dòng ẩm di chuyển trong gỗ theo phương dọc chiếm ưu thế nhưng không có sự khác biệt lớn giữa phần trăm lượng ẩm di chuyển trong gỗ trên cả hai phương. Đồng thời, khi quan sát liên tục không có sự thay đổi dòng ẩm đột ngột trong quá trình sấy. Đối với gỗ Độc Càn (Hemlock) được nghiên cứu ảnh hưởng của kích thước chiều dài với đặc điểm của qui trình sấy như là: tốc độ sấy, áp suất hơi bên trong gỗ, nhiệt độ sấy. Kết quả cho thấy gỗ kích thước ngắn sấy nhanh hơn gỗ kích thước dài có cùng độ ẩm khi ở trên điểm bão hòa thứ gỗ [75].

Năm 2000 Maurice Defo, Alain Cloutier và Yves Fortin đã nghiên cứu mô hình sấy gỗ chân không gia nhiệt tiếp xúc dựa trên phương pháp thế năng của nước (khả năng của nước). Nghiên cứu đã đưa ra mô hình toán hai chiều (2D) mô tả quá trình sấy gỗ chân không tiếp xúc phần giác gỗ Maple (Thích). Kết quả mô tả các thông số công nghệ: mối quan hệ độ ẩm và quá trình thoát ẩm, hiệu quả sự truyền ẩm, tỷ lệ di chuyển của hơi nước và quá trình truyền nhiệt, hiệu quả khuếch tán của hơi trong gỗ, tính thấm hút của khí và mối quan hệ tính thấm hút. [41].

Trong năm 2000 Jung, J Lee, N Lee đã nghiên cứu sấy chân không gia nhiệt bằng nhiệt nén ép trên kích thước chiều dày của gỗ Thông. Kết quả nghiên cứu cho thấy sự biến thiên nhiệt độ của gỗ theo phương chiều dày và ở tâm gỗ nhiệt độ hầu như ổn định khi đạt nhiệt độ sấy trong quá trình sấy. Thời gian sấy gỗ tươi đến độ ẩm cuối cùng 15% mất 4 ngày cho gỗ Thông trắng, 5 ngày đối với gỗ Thông đỏ và gỗ Độc Càn, 6 ngày cho gỗ Thông rụng lá. Kết quả cho thấy tốc độ sấy của gỗ Thông đỏ thì cao hơn gỗ Độc Càn, thấp hơn gỗ Thông trắng và tương đương gỗ Thông rụng lá, khi so sánh cùng một chiều dài thanh gỗ sấy. Bên cạnh đó, biến thiên độ ẩm theo phương ngang và phương dọc thì nhỏ đối với gỗ Độc Càn, Thông đỏ và lớn đối với gỗ Thông trắng và Thông rụng lá. Gỗ sau sấy với chất lượng khá tốt, nứt mặt không đáng kể và nứt trong không có, co rút theo chiều dày lớn hơn theo chiều rộng [59].

Năm 2001 Avramidis, Koumoutsakos, Hatzikiriakos nghiên cứu sự kết hợp ứng dụng sóng tần số và chân không áp suất thấp đạt kết quả sấy tốt hơn và rút ngắn thời gian. Tiếp đó, các nhà khoa học đã nghiên cứu sấy vi sóng dựa trên ý nghĩa của dãy sóng Perre, Mosnier, Turner [84, 86]. Tuy nhiên, bởi vì kích thước nguyên liệu và chủng loại nguyên liệu có rất nhiều dạng vì thế khi áp dụng đòi hỏi phải phù hợp với từng kích thước cho từng loại gỗ [31].

Năm 2003 Assouad và Jomaa đã nghiên cứu mô tả chế độ sấy chân không theo chu kỳ (không liên tục) cho gỗ Sồi. Nguyên lý sấy chân không theo chu kỳ là chuỗi các giai đoạn gia nhiệt và rút chân không xen kẽ nhau. Năng lượng cung cấp cho gỗ là truyền nhiệt đối lưu trong suốt giai đoạn nhiệt và bay hơi trong giai đoạn bơm hút chân không. Trong quá trình sấy, có hai cách thức truyền âm giữa gỗ và môi trường: giai đoạn đầu gọi là chủ động khi bơm chân không hoạt động, giai đoạn sau gọi là bị động khi bơm chân không dừng. Kết quả nghiên cứu là mô phỏng quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm gián đoạn trong sấy chân không gỗ Sồi và thể hiện sự tương đồng với mô hình được đề xuất bởi Jomaa và Baixeras (1997) trong quá trình sấy gỗ chân không [30].

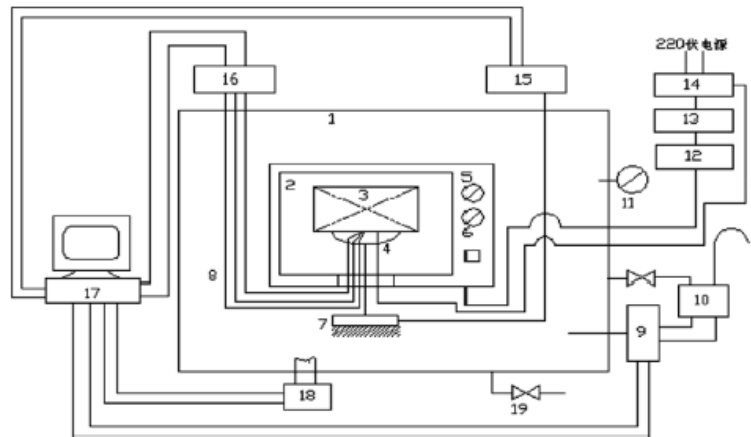
Năm 2004 Ian Turner và Patrick Perre đã nghiên cứu mô hình mô tả động lực quá trình sấy, truyền nhiệt và ẩm ứng dụng kết hợp chân không và bức xạ nhiệt cho gỗ. Nghiên cứu được thực hiện trên gỗ giác và gỗ lõi của gỗ Dẻ Gai,

Linh Sam và Vân Sam. Kết quả nghiên cứu cho thấy sự khác biệt không quá lớn giữa gỗ giác và gỗ lõi Dẻ Gai, nhưng gỗ giác của loài này khô nhanh hơn, với nhiệt độ cao gần với nhiệt độ sôi và hóa hơi của nước trong gỗ, hai loại gỗ Linh Sam và Vân Sam giống nhau cho phần gỗ giác và gỗ lõi nhiệt độ sấy và áp suất giống nhau. Thông qua nghiên cứu các tác giả ghi nhận điểm đặc biệt về áp suất là khi nhiệt độ thanh gỗ tăng trên điểm sôi của nước thì áp suất bắt đầu tăng theo, áp suất này sẽ biến mất khi độ ẩm bên trong thanh đạt độ ẩm thăng bằng [102, 103, 104].

Năm 2005 Thitinan Sattho và Ram Yamsaengsung [92] đã nghiên cứu sấy chân không gỗ Cao su trên máy sấy chân không với kích thước đường kính 0,5 m và chiều dài 1,2 m hình trụ dài (hình 1.15). Thực nghiệm trên gỗ Cao su kích thước 1000 x 25,4 x 76,2 mm, được đặt trong buồng sấy áp suất 190 - 210 mmHg và nhiệt độ 60, 70 và 80°C. Hơi nước quá nhiệt ở 110°C được bơm vào buồng sấy liên tục để làm giảm sự tích tụ ứng suất và loại bỏ sự nứt vỡ, Sau 24 giờ sấy, độ ẩm của gỗ từ 80% về 12%. Kết quả cho thấy gỗ sấy không có sự thay đổi màu sắc, không tồn tại ứng suất dư thông qua kiểm tra Prong Test. Công nghệ sấy chân không kết hợp hơi quá nhiệt thể hiện hiệu quả cao về mặt kinh tế và năng lượng, chi phí hoạt động tiết kiệm, giảm xuống dưới 20 giờ so với phương pháp sấy đối lưu bằng khí nóng trong khoảng thời gian 7 ngày. Gỗ được kiểm tra các tính chất cơ học cho thấy những cải thiện đáng kể về độ nén song song với thớ, nén vuông góc với thớ, cắt song song với thớ, độ cứng ở mọi nhiệt độ sấy 60, 70 và 80°C. Sấy ở nhiệt độ 70°C và phun hơi quá nhiệt gián đoạn đã mang lại các đặc tính cơ học tốt nhất và thời gian sấy rất tốt.



**Hình 1.15.** Máy sấy gỗ chân không thực nghiệm của Thitinan Sattho và Ram Yamsaengsung [92]



**Hình 1.16.** Sơ đồ sấy gỗ chân không vi sóng [107].

(1) Buồng sấy chân không (2) lò vi sóng (3) mẫu gỗ (4) khay (5) điều chỉnh thời gian (6) điều chỉnh công suất (7) Cảm biến ẩm (8) Cảm biến nhiệt (9) điều chỉnh áp suất (10) bơm chân không (11) đồng hồ áp suất (12) điều khiển thời gian (13) manô (14) máy tăng thế (15) bộ kiểm tra khối lượng (16) bộ kiểm tra nhiệt độ (17) Máy tính (18) nguồn nhiệt (19) Van khí

Năm 2008 Xian Jun Li, Bi Guang Zhang và Wen Jun Li [107] đã nghiên cứu thực nghiệm mô hình, thí nghiệm với sơ đồ hệ thống sấy chân không vi sóng cho gỗ. Phần chính máy sấy bao gồm hệ thống chân không, bộ đo khối lượng trực tiếp, đo nhiệt độ nhiều vị trí, gia nhiệt vi sóng tiêu chuẩn với công suất 800W - 2450W, bộ ghi nhận dữ liệu (hình 1.16).

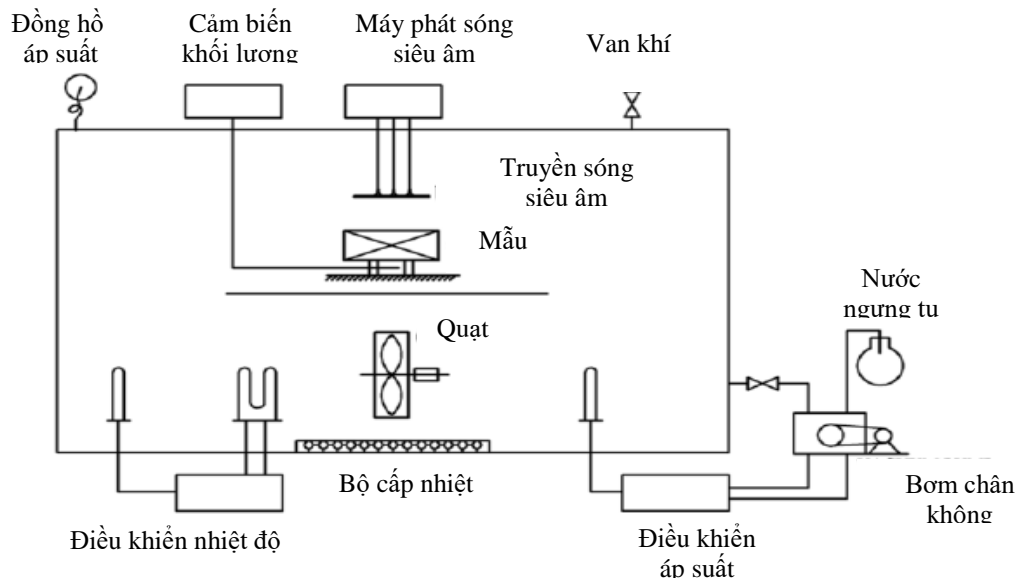
Các mẫu thí nghiệm gỗ Thông Masson kích thước 100 x 100 x 40 mm, khối lượng thể tích cơ bản là  $0,441\text{g/cm}^3$  và độ ẩm ban đầu 50%, sau đó được bịt kín 4 mặt bằng keo và lá nhôm để chắc chắn rằng nhiệt và ẩm dịch chuyển theo phương dọc của gỗ. Sau đó, mẫu được đặt trên cảm biến khối lượng trong buồng sấy vi sóng, chân không duy trì tại 0,06 Mpa tạo áp suất tuyệt đối thông qua bơm chân không. Mẫu gỗ được gia nhiệt trong buồng sấy chân không vi sóng với cường độ vi sóng  $115\text{ kW/m}^3$ . Dựa trên cơ chế truyền âm và nhiệt trong gỗ khi sấy chân không vi sóng, mô hình toán học đã mô tả quy trình sấy gỗ chân không vi sóng được thiết lập và thực hiện bởi thực nghiệm trong nghiên cứu. Kết quả là quy trình sấy gỗ chân không vi sóng với 3 giai đoạn: 1) giai đoạn sấy làm nóng từ từ với tốc độ khởi động ngắn, 2) giai đoạn tốc độ sấy và nhiệt độ sấy không đổi trong khoảng dài, 3) giai đoạn gia nhiệt với tốc độ sấy giảm. Ngược lại với sấy

đổi lưu, tổng qui trình sấy được không chế bởi giai đoạn tốc độ sấy không đổi trong sấy gỗ chân không vì sóng chỉ xuất hiện trong phạm vi độ ẩm dưới điểm bão hòa thứ gỗ. Mô hình được chứng minh là phù hợp với kết quả thực nghiệm cho nhiệt độ và độ ẩm của gỗ trong suốt quá trình sấy chân không vì sóng, để cải tiến sự mô phỏng chính xác của mô hình, các thông số liên quan trong mô hình có thể điều chỉnh trong điều kiện sấy, độ ẩm ban đầu và cường độ vi sóng [112].

Năm 2010 Vongpradubchai và Rattanadecho [105] đã nghiên cứu sấy vi sóng và không khí nóng cho gỗ, các tác giả sử dụng buồng sấy vi sóng hình chữ nhật ( $TE_{10}$  mode) để nghiên cứu thực nghiệm. Thiết bị thực nghiệm cho nghiên cứu bao gồm hệ thống vi sóng là sóng đơn sắc của  $TE_{10}$  hoạt động với công suất 2,45GHz. Vi sóng được phát ra bởi manhêtron và được truyền dọc theo phương z của lò vi sóng hình chữ nhật với kích thước bên trong là 109,2 mm x 54,61 mm<sup>2</sup> hệ thống dẫn nước riêng biệt cuối lò sấy vi sóng. Công suất vi sóng đưa vào có thể điều chỉnh trong khoảng 0 - 1500W. Kết quả cho thấy sự khác nhau của thời gian bức xạ, cường độ vi sóng, nhiệt độ không khí nóng, chiều dày mẫu giữ vai trò quan trọng đến toàn bộ động lực học trong quá trình sấy. Thêm vào đó, các tác giả khẳng định giá trị định lượng của dữ liệu thực nghiệm rất có ích và đặc biệt là cung cấp thông tin trong việc phát triển qui trình sấy vi sóng.

Năm 2013 Zhengbin He, Fei Yang, Yiqing Peng, Songlin Yi [112] đã nghiên cứu sấy gỗ chân không kết hợp sóng siêu âm, năng lượng siêu âm được sử dụng trong quá trình sấy gỗ chân không dưới nhiệt độ 60<sup>0</sup>C, áp suất tuyệt đối 0,05 Mpa hoặc 0,08 Mpa (hình 1.17). Năng lượng siêu âm và tần số tương ứng là 100W và 28 kHz. Kết quả cho thấy hiệu quả đến khuyếch tán nước trong mẫu gỗ sấy bởi sóng siêu âm tác động sấy chân không tại 0,05MPa hoặc 0,08 MPa thì cao hơn mẫu sấy không có sóng siêu âm tác động. Tốc độ sấy chân không sóng siêu âm nhanh hơn sấy chân không với các hình thức gia nhiệt khác, đặc biệt cho gỗ có độ ẩm trên điểm bão hòa thứ gỗ. Sấy tại áp suất tuyệt đối 0,05 Mpa thì tốc độ diễn ra nhanh hơn tại 0,08,Mpa. Sóng siêu âm hỗ trợ sấy mang lại nhiều lợi ích khi di chuyển nước tự do trong thời gian ngắn. Phương pháp sấy chân không sóng siêu âm có thể áp dụng trong công nghiệp sấy gỗ mang lại tiết kiệm năng

lượng và giảm khuyết tật gỗ sấy, tuy nhiên yêu cầu về mặt đầu tư thiết bị công nghệ cho đề phương pháp này phát huy hiệu quả.



**Hình 1.17.** Sơ đồ máy sấy chân không sóng siêu âm thí nghiệm [112]

Năm 2015 Honghai Liu, Lin Yang, Wei Xu, Zhihui Wu, Kazuo Hayashi, Qiongtao Huang đã nghiên cứu độ ẩm thăng bằng dưới điều kiện sấy gỗ chân không được thực hiện trên 3 loại gỗ : Russian larch (*Larix gmelinii*), Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*), Sugi (*Cryptomeria japonica*) với kích thước là 5 x 30 x 30 mm. Kết quả nghiên cứu cho thấy độ ẩm của gỗ giảm khi nhiệt độ giảm khi độ ẩm môi trường (RH) không đổi, và tăng khi RH tăng tại nhiệt độ không đổi. Áp suất ảnh hưởng đến độ ẩm thăng bằng (EMC) của gỗ nhưng sự tác động này không rõ ràng khi RH phạm vi cao và thấp. Sự khác biệt khi EMC từ 0,1-0,4% khi áp suất cao và EMC từ 1,2-1,9% khi áp suất thấp [54].

Năm 2016 Zhenyu Wang, Zijian Zhao, Songlin Yi, Zhengbin He, Yu Zhang [115] đã nghiên cứu rút ngắn thời gian sấy bằng xử lý trước sấy bằng sóng siêu âm. Nghiên cứu thực hiện trên gỗ Bạch Dương (Polar) bằng phương pháp dùng sóng siêu âm xử lý gỗ với cường độ là  $10 \text{ W/cm}^2$ , tần số từ 28 – 40 kHz với thời gian tương ứng 30, 60 và 90 phút. Sau khi gỗ được xử lý, chuyển sang sấy chân không với nhiệt độ  $40^{\circ}\text{C}$  và áp suất là 0,08 MPa. Kết quả nghiên cứu cho thấy gỗ được xử lý sóng siêu âm trước sẽ rút ngắn thời gian sấy và làm thông thoáng

kênh dẫn nước và chất chiết từ trong gỗ ra ngoài góp phần làm giảm khuyết tật và nâng cao chất lượng gỗ khi sấy.

Năm 2020 Guler và Dilek [50] nghiên cứu sấy chân không kết hợp sóng cao tần cho gỗ Oak (Sồi) và gỗ Walnut (Óc Chó), nghiên cứu xác định mối quan hệ quá trình sấy chân không cao tần ảnh hưởng với đặc tính gỗ cơ lý của gỗ Sồi với độ bền uốn giảm 20%, gỗ Óc Chó giảm 17%, một số khuyết tật cong vênh, nứt tét xảy ra trên bề mặt gỗ, lý giải việc này là do áp dụng chế độ sấy với nhiệt độ cao, thoát nước nhanh, ảnh hưởng các sợi gỗ, làm biến dạng các xơ sợi, điều này làm thay đổi và giảm tính chất cơ học gỗ Sồi và Óc Chó.

Năm 2021 Scott Lyon, Scott Bowe, Michael Wiemann, [93] nghiên cứu so sánh màu sắc gỗ Maple (gỗ Thích) sau khi sấy chân không bằng nhiệt tiếp xúc và sấy đối lưu bằng hơi nước kết quả cho thấy không có sự khác biệt trực quan về màu sắc giữa hai phương pháp sấy, thời gian sấy chân không nhanh gấp 5 lần so với sấy đối lưu bằng hơi nước. Ngoài ra, màu sắc gỗ Thích sau khi sấy chân không sáng đẹp hơn sấy đối lưu bằng hơi nước, điều này mang lại hiệu quả tích cực trong việc sử dụng gỗ sau sấy trong sản xuất sản phẩm gỗ trong công nghiệp trang trí nội thất.

Sấy chân không là một trong những kỹ thuật mạnh nhất được ứng dụng trong lĩnh vực sấy. Thực vậy, hạ thấp áp suất là yếu tố quyết định: sự di chuyển của nước trong nguyên liệu dưới áp suất 60 mmHg nhanh gấp 5 lần ở áp suất 760mmHg. Đây là đặc tính cơ bản nhất được sử dụng trong qui trình sấy chân không. Điều này rất cần thiết và được chú ý khi áp suất chân không để đạt nhiệt độ sôi của nước làm tăng lượng bốc hơi trên bề mặt dẫn đến nhiệt độ của gỗ tăng lên, sự bay hơi mãnh liệt bề mặt ngoài sẽ nhanh góp phần làm tăng tốc độ sấy. Mặt khác, nó cũng rất cần trong việc truyền năng lượng từ gỗ bù vào lượng nhiệt mất đi do bay hơi. Truyền nhiệt dưới áp suất thấp rất khó xảy ra, do đó để giải quyết cần phải dùng rút chân không với khoảng thời gian hợp lý và gia nhiệt trong điều kiện áp suất thường (áp suất khí quyển) hoặc sử dụng gia nhiệt bằng bức xạ, sóng điện từ, vi sóng hay sóng siêu âm [35].

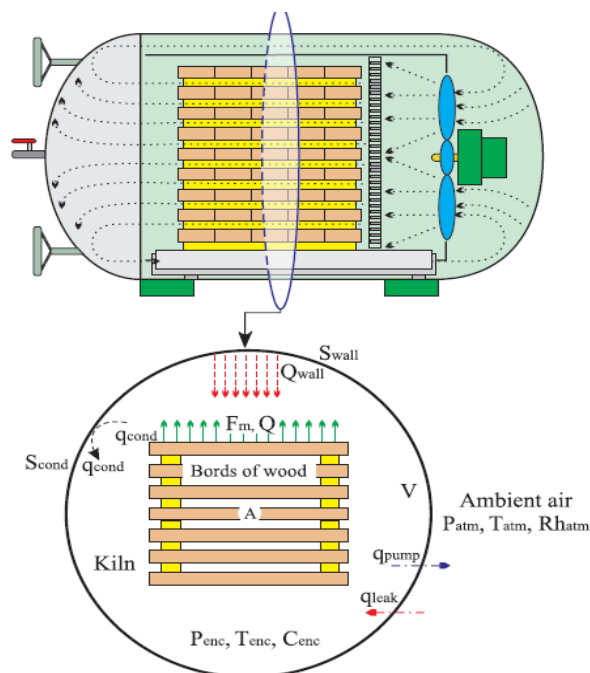
Ưu điểm lớn nhất sấy chân không là rút ngắn thời gian sấy và nâng cao chất lượng sản phẩm khi đặt trong so sánh với các hoạt động sấy đối lưu (Ressel



1994). Thực tế, việc hạ áp suất là hạ điểm sôi của nước, điều này rất quan trọng tạo động lực đẩy ẩm từ bên trong ra ngoài bề mặt gỗ trong suốt quá trình sấy. Đối với những loại gỗ khó sấy ở nhiệt độ cao, sấy chân không là lựa chọn tốt nhất không ảnh hưởng tính chất cơ học của gỗ tránh móp méo và biến màu, các khuyết tật nứt tét, công vênh. Với những lợi ích trên, việc nghiên cứu trong lĩnh vực này ngày càng được nhiều nước trên thế giới quan tâm. Đặc biệt là những loại gỗ cứng rất khó đạt chất lượng cao khi sấy theo phương pháp thông thường như gỗ Sồi trắng, gỗ Bạch đàn Úc [35].

### 1.5.2 Những kết quả nghiên cứu lý thuyết về mô hình truyền nhiệt và thoát ẩm trong sấy gỗ chân không

Năm 2003 theo nghiên cứu của Assouad và Jomaa qui trình sấy chân không của nguyên liệu xốp như gỗ được xuất hiện nhiều gần đây. Từ nghiên cứu quá trình sấy chân không của gỗ Sồi trong phạm vi buồng sấy thí nghiệm (hình 1.18). Đây là gỗ rất phức tạp bởi vì tính chất có rất ít sự tương đồng các loại gỗ khác chính vì vậy gỗ Sồi được chọn sấy thực nghiệm. Về cấu trúc hiển vi thì không đồng nhất, gỗ bao gồm các dạng tế bào khác nhau như: mạch gỗ, sợi gỗ, tế bào mô mềm ngoài ra còn có ống dẫn dầu nhựa, tinh thể, thể bít... Về cấu tạo thô đại, gỗ Sồi là nguyên liệu vùng ôn đới vì vậy nó thể hiện những đặc điểm các vòng năm, gỗ sớm gỗ muộn, sự khác biệt giữa gỗ giác và gỗ lõi và có thể có những mấu mắt do trong quá trình phát triển tự nhiên [30].



**Hình 1.18.** Mô hình sấy chân không theo chu kỳ của Assouad và Jomaa (2003)  
[30]

Kết quả mô hình sấy thể hiện sự khác nhau rất ít với mô hình được đề xuất bởi Jomaa [30] (bảng 1.1). Sự khác nhau này thể hiện chi tiết khi mô tả ẩm di chuyển trong giai đoạn bị động khi sấy chân không (lúc bơm chân không ngừng hoạt động). Đồng thời nghiên cứu thể hiện mô hình thoát ẩm với chế độ sấy trên được thiết lập cho áp suất thấp trên bề mặt gỗ bằng áp suất trong buồng sấy suốt quá trình hút chân không. Dòng khuếch tán ẩm được mô tả và được phân tích đơn giản bằng giải pháp số tương đồng với mô hình lý thuyết. Đặc biệt chế độ sấy gỗ chân không được thiết lập trên cơ sở sấy truyền thống với các thông số công nghệ được điều chỉnh hợp lý và mang lại hiệu quả sấy nhất định.

**Bảng 1.1.** Mô hình mô tả quá trình truyền nhiệt và thoát ẩm trong sấy gỗ chân không theo chu kỳ

Tên mô hình	Mô hình toán	Tác giả tham khảo
Cân bằng năng lượng	$\frac{dT_{enc}}{dt} = \frac{F_m A}{V(\rho C_v)_g} (C_{p_v} - C_{v_v}) T_{enc} - \frac{q_{con}}{V C_{v_v}} T_{enc} (C_{p_v} - C_{v_v})$ $+ \frac{q_{pump}}{V} T_{enc} \left( 1 - \frac{(\rho C_p)_g}{(\rho C_v)_g} \right) - \frac{q_{leak}}{V} T_{enc} \left( 1 - \frac{(\rho C_p)_{atmg}}{(\rho C_v)_{atmg}} \right) + \frac{(Q_{wall} + Q)}{V(\rho C_v)_g}$ <p>Trong đó  <math>(\rho C_v)_g = \rho_{aenc} C_{v_a} + \rho_{venc} C_{v_v}</math>  <math>(\rho C_p)_g = \rho_{aenc} C_{p_{enc}} + \rho_{venc} C_{p_v}</math></p>	A.Assouad W.Jomaa (2003) (1.1) [30]
Cân bằng chất cho hơi	$\frac{d\rho_{venc}}{dt} = -\frac{\rho_{venc} q_{cond}}{V} + \rho_{vatm} \frac{q_{leak}}{V} + 2D \frac{(\rho_{vsurf} - \rho_{venc})}{d_{ave}} \cdot \frac{A}{V}$	A.Assouad W.Jomaa (2003) (1.2) [30]
Cân bằng chất cho không khí khô	$\frac{d\rho_{aenc}}{dt} = -\frac{\rho_{aenc}}{V} + \rho_{aatm} \frac{q_{leak}}{V}$	A.Assouad W.Jomaa (2003) (1.3) [30]

**Chú thích bảng 1.1 :**

$q_{pump}$  tốc độ bơm chân không;  $q_{leak}$  biểu hiện tốc độ dòng thất thoát ra ngoài;  $q_{cond}$  tốc độ dòng tương ứng sự ngưng tụ hơi trên vách của tổng diện tích bề mặt máy sấy;  $Q_{wall}$  là nhiệt trao đổi trên một đơn vị thời gian qua vách của máy sấy và không khí ẩm;  $S_{wall}$  tổng diện tích bề mặt vách;  $A$ : tổng bề mặt trao đổi ( $m^2$ );  $C$ : sự tập trung hơi nước ( $g.g^{-1}$ );  $C_v$ : sự tập trung trên vách lò sấy ( $g.g^{-1}$ );  $C_p, C_v$ : nhiệt dung riêng ( $J/kg.K$ );  $d_{ave}$ : khoảng cách trung bình giữa bề mặt gỗ và vách lò sấy ( $m$ );  $D$ : hệ số khuếch tán ( $m^2/s$ ) tính toán theo (Sacadura, 1978);  $F_m$ :

dòng hơi ( $kg/m^2.s$ );  $J$ : dòng khuếch tán ( $kg/m^2.s$ );  $P$ : áp suất (Pa);  $q$ : tốc độ dòng ( $m^3/s$ );  $Q$ : dòng nhiệt trao đổi ( $W/m^2$ );  $S$ : bề mặt ( $m^2$ );  $T$ : nhiệt độ ( $^{\circ}C$ );  $t_{he}$ : thời gian gia nhiệt (s)

Năm 2006 Nencho Deliiski [42] nghiên cứu quá trình thoát ẩm trong sấy chân không đối lưu trên gỗ Beech, nghiên cứu dựa trên hệ thống công thức của Luikov and Mihaylov về mô hình sấy đã được phát triển và giải quyết bằng sự tính toán của phân bố nhiệt độ, độ ẩm và áp suất trong gỗ Beech dưới điều kiện sấy chân không đối lưu (bảng 1.2). Mô hình toán thể hiện sự ảnh hưởng của hệ số dịch chuyển phân tử và phương hướng của dòng hơi nước đến sợi gỗ trong điều kiện phân bố áp suất trong nguyên liệu gỗ trong quá trình sấy chân không đối lưu. Mô hình toán mô tả cơ chế di chuyển của nhiệt và chất cùng lúc với vùng sôi và vùng chưa sôi trong nguyên liệu khi sấy chân không đối lưu. Với sự hỗ trợ của mô hình xác định sự tác động ảnh hưởng của hệ số di chuyển phân tử đã được thể hiện theo chiều hướng hơi không khí ẩm đến sợi gỗ trong việc phân bố áp suất trên nguyên liệu gỗ Beech trong suốt quá trình sấy chân không đối lưu. Sự phát triển của mô hình và thuật toán của chương trình phần mềm thể hiện mối quan hệ sự ảnh hưởng nhiệt và chất trong qui trình di chuyển trong gỗ (sự thấm, sự biến thiên....) tại áp suất thấp hơn áp suất khí quyển khi sấy chân không đối lưu.

**Bảng 1.2.** Mô hình mô tả áp suất, quá trình truyền nhiệt và thoát ẩm và trong quá trình sấy gỗ chân không đối lưu

Tên mô hình	Mô hình toán	Tác giả tham khảo
Truyền nhiệt	$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda_l}{c \cdot \rho_0} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda_l}{c \cdot \rho_0} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\varepsilon}{c} \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau}$	Nencho Deliiski (2006) (1.4)[42]
Truyền ẩm	$\frac{\partial U}{\partial \tau} = D_{gt} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + D_{gl} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + D_{gt} \cdot \delta \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + D_{gl} \cdot \delta \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\lambda_{pval}}{\rho_0} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\lambda_{pval}}{\rho_0} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}$	Nencho Deliiski (2006) (1.5)[42]
Áp suất	$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \frac{\lambda_{pval}}{c_{pva} \cdot \rho_0} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\lambda_{pval}}{c_{pva} \cdot \rho_0} \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{T}{P} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} - \frac{\varepsilon}{c_{pva}} \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau}$	Nencho Deliiski (2006) (1.6)[42]
Điều kiện ban đầu	$T(x, y, 0) = T_0 \quad (10)$ $U(x, y, 0) = U_0 \quad (11)$ $P(x, y, 0) = P_0 \quad (12)$	Nencho Deliiski (2006) (1.7)[42]

Điều kiện biên	$\alpha \cdot (T_m - T_s) - \lambda \cdot (\nabla T)_s - (1 - \varepsilon) \cdot r \cdot \alpha_U \cdot \rho_0 \cdot (U_s - U_{me}) = 0$ $\alpha_U \cdot \rho_0 \cdot (U_s - U_{me}) + D \cdot \rho_0 \cdot (\nabla U)_s + D \cdot \rho_0 \cdot \delta (\nabla T)_s + \lambda_{pva} \cdot (\nabla P)_s = 0$ $P_s = P_m$	Nencho Deliiski (2006) (1.8)[42]
----------------	---	--

**Chú thích bảng 1.2:**

*c*: nhiệt dung riêng của gỗ (J/kg.K);  $U_s$ : ẩm độ bề mặt gỗ (kg/kg);  $\alpha$ : hệ số truyền nhiệt (W/m<sup>2</sup>K);  $\alpha_U$ : hệ số truyền chất (m/s);  $\delta$ : hệ số biến thiên nhiệt của gỗ (1/K);  $\varepsilon$ : hệ số chuyển pha (tỷ số giữa sự khuếch tán hơi và tổng sự di chuyển ẩm:  $\varepsilon = 0 \div 1$ );  $\eta_g$ : độ nhớt động lực học của khí di chuyển trong gỗ (Pa.s);  $\varphi$ : độ ẩm của hỗn hợp khí hơi trong gỗ;  $\varphi_m$ : độ ẩm trung bình của qui trình  $\varphi = 0 \div 1$ ;  $\lambda$ : hệ số dẫn nhiệt của gỗ (W/m.K);  $\lambda_1$ : hệ số dẫn nhiệt theo của gỗ phương dọc (W/m.K);  $\lambda_t$ : hệ số dẫn nhiệt của gỗ theo phương ngang (W/m.K);  $\lambda_p$ : hệ số di chuyển phân tử (kg/m.s.Pa);  $\lambda_{pv}$ : hệ số di chuyển phân tử của hơi trong gỗ (kg/m.s.Pa);  $\lambda_{pva}$ : hệ số di chuyển phân tử của hơi khí hỗn hợp trong gỗ (kg/m.s.Pa);  $\lambda_{pva1}$ : hệ số di chuyển phân tử của hơi khí hỗn hợp trong gỗ theo chiều dọc (kg/m.s.Pa);  $\lambda_{pva1}$ : hệ số di chuyển phân tử của hơi khí hỗn hợp trong gỗ theo chiều ngang (kg/m.s.Pa);  $\rho_g$ : tỷ trọng của khí, di chuyển trong gỗ dưới biến thiên áp suất (kg/m<sup>3</sup>);  $\rho_0$ : tỷ trọng của gỗ khô (kg/m<sup>3</sup>);  $\rho_v$ : tỷ trọng của hơi nước (kg/m<sup>3</sup>);  $\tau$ : thời gian (s)

Năm 2001 Anastasios Koumoutsakos, Stavros Avramidis và Savvas G. Hatzikiriakos [65] nghiên cứu mô tả hiện tượng di chuyển ẩm trong suốt quá trình sấy chân không gia nhiệt sóng tần số liên tục trong sấy gỗ được thể hiện trên phương trình bảo toàn tổng quát (bảng 1.3). Khi sấy ảnh hưởng gradient áp suất pha khí khi ẩm di chuyển trong gỗ rất quan trọng. Thêm vào đó, mao dẫn di chuyển trong sấy chân không sóng tần số đã được thảo luận, hiệu quả của nó đã được so sánh với sấy đối lưu. Phương trình truyền nhiệt và truyền ẩm mô tả hiện tượng nhiệt bên trong và ảnh hưởng gradient áp suất pha khí, được chuyển hóa và giải bằng mô hình 1D sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn.

**Bảng 1.3.** Mô hình 1D mô tả quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm trong quá trình sấy gỗ chân không sóng tần số

Tên mô hình	Mô hình toán	Tác giả tham khảo
Cân bằng khối lượng	$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_M \frac{\partial m}{\partial x} + D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1.9)$	
Cân bằng năng lượng	$\left( \rho c_p \right)_{tot} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_M \frac{\partial m}{\partial x} + k_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \Phi \quad (1.10)$	Anastasios Koumoutsakos, Stavros Avramidis và Savvas G. Hatzikiriakos [65]
Điều kiện ban đầu	Tại t=0 theo x, m và T bằng với độ ẩm ban đầu và nhiệt độ ban đầu của gỗ	
Điều kiện biên	Theo t tại x = 0 thì $\frac{\partial m}{\partial x} = 0$ và $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ do đối xứng Theo t tại x = $\frac{L}{2}$ và m = 0 do chân không và	

---

$T = T_{đo}$  khi  $L =$  tổng chiều dài mẫu sấy.

---

**Chú thích bảng 1.3:**

$c_p$ : công suất nhiệt tại áp suất thường (J/kgK);  $D$ : hệ số khuếch tán ( $m^2/s$ );  $M$ : độ ẩm phân đoạn;  $M_v$ : trọng lượng phân tử của hơi nước = 0.018 (kg/mol);  $P$ : áp suất (Pa);  $T$ : nhiệt độ (K);  $V$ : vận tốc (m/s);  $Z$ : hằng số nén (m/s);  $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \zeta$ : hệ số điều chỉnh đường cong cho nhân tố tổn thất chất điện môi;  $\mu$ : độ nhớt (kg/m.s=Pa.s);  $\rho$ : tỷ trọng (kg/m<sup>3</sup>);  $\Phi$ : nguồn nhiệt bên trong (W/m<sup>3</sup>)

Sau đó các tác giả đã phát triển mô hình toán học này sang 2D với thực nghiệm hai loại gỗ lá kim [67], được sấy trong phòng thí nghiệm bằng máy sấy chân không gia nhiệt sóng tần số, để theo dõi cho việc phát triển dòng ẩm bên trong (bảng 1.4). Tổng độ ẩm trung bình và nhiệt độ, áp suất được giám sát thông qua thời gian. Một số sự hoạt động được đưa ra khỏi các điều kiện của điện thế, tỷ trọng, công suất, áp suất xung quanh, nhiệt độ, độ ẩm ban đầu. Kết quả đạt được thì so sánh với dự đoán của mô hình đơn giản 1D.

**Bảng 1.4.** Mô hình 2D mô tả quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm và áp suất trong quá trình sấy gỗ chân không

Tên mô hình	Mô hình toán	Tác giả tham khảo
Cân bằng khối lượng	$\frac{\partial m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{mlong} \cdot \frac{\partial m}{\partial x} + D_{Tlong} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{mtran} \frac{\partial m}{\partial y} + D_{Ttran} \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1.11)$	Anastasios Koumoutsakos, Stavros Avramidis và Savvas G. Hatzikiriakos [67]
Cân bằng năng lượng	$(\rho c_p)_{tot} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_{mlong} \frac{\partial m}{\partial x} + k_{Tlong} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_{mtran} \frac{\partial m}{\partial y} + k_{Ttran} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \Phi \quad (1.12)$	

Năm 2000 Maurice Defo, Yves Fortin và Alain Cloutier [41] đã nghiên cứu mô hình toán học cho quá trình sấy gỗ bằng phương pháp chân không bằng tiếp xúc đã được mô phỏng theo mô hình sấy chân không hơi quá nhiệt (bảng 1.5). Các phương trình ẩm và nhiệt đều dựa trên khái niệm thế năng của nước nhưng ngược lại phương trình áp suất thì dựa theo công thức bảo toàn khối lượng trạng thái không ổn định của không khí khô. Nghiên cứu tiến hành sấy gỗ Maple trong máy sấy chân không thí nghiệm đối lưu thông qua phương pháp kỹ thuật thích hợp của đường cong sấy. Tốc độ gió trung bình là 2,5m/s, nhiệt độ là 60 - 66<sup>0</sup>C, áp suất môi trường trong khoảng 15 - 11 kPa. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ số truyền nhiệt và truyền ẩm phụ thuộc vào độ ẩm, đường cong sấy mô phỏng dựa trên hệ số truyền tính từ lý thuyết lớp biên kết hợp với kết quả thực nghiệm. Mối quan hệ liên quan tính thấm hút của gỗ đối với không khí là thông số quan trọng

trong quá trình nghiên cứu, quá trình thay đổi áp suất trong gỗ trong quá trình sấy.

**Bảng 1.5.** Mô hình mô tả quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm và trong quá trình sấy gỗ chân không hơi quá nhiệt

Tên mô hình	Mô hình toán	Tác giả tham khảo
Cân bằng khối lượng - Định luật tổng quát Darcy	$\frac{\partial M}{\partial t} - \frac{100}{G_m \rho_w} \vec{\nabla} \cdot \underline{\underline{K}}(M, T, P) \vec{\nabla} \psi = 0 \quad (1.13)$	Maurice Defo, Yves Fortina & Alain Cloutier (2000) [41]
truyền nhiệt Định luật Fourier	$\frac{\partial H}{\partial t} - \vec{\nabla} \cdot \underline{\underline{k}}(M) \vec{\nabla} T - \varepsilon(\Delta h_0 + \beta \Delta h_s) \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad (1.14)$	Maurice Defo, Yves Fortina & Alain Cloutier (2000) [41]
áp suất	$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{RT}{\chi_g M_a} \left[ -\vec{\nabla} \cdot \left( \chi_g \rho_a \frac{k_g k_{rg}}{\mu_g} + \xi \chi_g \rho_g \underline{\underline{D}}_{eff} P_v \right) \vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot \left( \left( \xi \chi_g \rho_g \underline{\underline{D}}_{eff} P \right) \vec{\nabla} P_v \right) \right]$ $- \left( \frac{\partial P_v}{\partial M} \right)_T \frac{\partial M}{\partial t} - \left( \frac{\partial P_v}{\partial T} \right)_M \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{P_a}{\chi_g} \frac{\partial \chi_g}{\partial t} - \frac{P_a}{T} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1.15)$ $\xi = \frac{M_a M_v}{(M_a P_a + M_v P_v)^2} \quad (1.16)$	Maurice Defo, Yves Fortina & Alain Cloutier (2000) [41]
Điều kiện ban đầu	$\psi(x_1, x_1, x_1) = \psi_0$ $T(x_1, x_2, t_0) = T_0 \quad (1.17)$ $P(x_1, x_2, t_0) = P_0$	Maurice Defo, Yves Fortina & Alain Cloutier (2000) [41]
Điều kiện biên	$q_m = h_\psi (\psi_s - \psi_\infty)$ $q_h = (h_r + h_h)(T_s - T_\infty) + (1 - \varepsilon)(\Delta h_0 + \beta \Delta h_s) h_\psi (\psi_s - \psi_\infty) \quad (1.18)$ $P = P_e$	Maurice Defo, Yves Fortina & Alain Cloutier (2000) [41]

**Chú thích bảng 1.5:**

$\psi$  : tổng thế năng của nước

$\psi_m$  trong trường hợp sấy chân không là tổng thế năng hệ thống

$\psi_p$  thế năng áp suất trong giới hạn nào đó được bỏ qua

Phát triển mô hình toán học hai chiều cho sấy chân không tiếp xúc được phỏng theo sự mô phỏng sấy chân không hơi quá nhiệt. Hầu hết các tham số của mô hình đã được xác định trong những nghiên cứu trước đó. Sự mô phỏng thì sử dụng hệ số truyền nhiệt và truyền chất được đánh giá bởi phương pháp hiệu chỉnh đường cong và lý thuyết lớp biên. Kết quả sự mô phỏng được so sánh kết quả thực nghiệm đạt được và từ sấy chân không hơi quá nhiệt cho gỗ Thích (Maple).

### **1.5.3 Những kết quả nghiên cứu sấy gỗ bằng phương pháp chân không trong nước**

Sấy gỗ bằng phương pháp chân không trên thế giới đã hình thành và phát triển từ rất lâu nhưng ở Việt Nam thì công nghệ này còn khá mới, hiện nay một số doanh nghiệp bắt đầu quan tâm phát triển. Tuy nhiên để các doanh nghiệp thật sự an tâm và tin tưởng vào phương pháp sấy mới đòi hỏi phải được thực nghiệm nghiên cứu góp phần xây dựng cơ sở khoa học vững chắc, để việc ứng dụng mang lại hiệu quả thiết thực và hiệu quả nhất. Xuất phát từ yêu cầu trên một vài nhiệm vụ đã được quan tâm nghiên cứu và triển khai trong nước bao gồm các công trình sau đây:

Năm 2006 Trần Hữu Việt nghiên cứu tính toán- thiết kế - khảo nghiệm mô hình sấy gỗ chân không, tác giả đã tính toán và thiết kế mô hình sấy gỗ chân không công suất  $0,1 \text{ m}^3$  với nguyên liệu sấy gỗ cao su kích thước  $20 \times 50 \times 1000$  mm, độ ẩm ban đầu 35% về độ ẩm cuối cùng 8% thời gian sấy 48 giờ rút ngắn 72 giờ so với sấy đối lưu thông thường (sấy qui chuẩn, tỷ lệ khuyết tật hầu như ít xuất hiện và màu sắc gỗ tươi sáng. Với kết quả thí nghiệm đã cho thấy một bước đi mới trong công nghệ sấy gỗ đặc biệt là sấy gỗ chân không [22].

Năm 2008 Nguyễn Văn Công Chính nghiên cứu, thiết kế, chế tạo, khảo nghiệm mô hình máy sấy gỗ kiểu chân không. Đã khảo nghiệm sấy gỗ cao su với quy cách dày 20 mm, ở nhiệt độ sấy là  $49^{\circ}\text{C}$ , áp suất 50 mmHg, chu kỳ xả ẩm 3,9 giờ cho kết quả thời gian sấy trung bình là 60 giờ, tỷ lệ khuyết tật của gỗ sau khi sấy 3,5 - 5,5%, chất lượng gỗ sau sấy đạt hiệu quả [16].

Năm 2014 Phạm Ngọc Nam nghiên cứu ứng dụng, xây dựng công nghệ sấy gỗ Bạch đàn bằng phương pháp sấy chân không. Tác giả tiến hành nghiên cứu với hai loại gỗ bạch đàn (bạch đàn trắng, bạch đàn đỏ) đây là loại gỗ dễ nhạy cảm với nhiệt độ và dễ bị móp méo, nứt mặt khi nhiệt độ lên trên  $55^{\circ}\text{C}$ . Kết quả nghiên cứu chế độ sấy chân không tối ưu khi sấy gỗ bạch đàn trắng ở nhiệt độ sấy  $52,3^{\circ}\text{C}$  và thời gian xử lý ban đầu là 5,18 giờ thì tỷ lệ khuyết tật gỗ bạch đàn trắng là 4,41% và thời gian sấy là 79,52 giờ. Sấy chân không tối ưu khi sấy gỗ bạch đàn đỏ ở nhiệt độ  $50^{\circ}\text{C}$  và thời gian xử lý ban đầu là 4,8 giờ, tỷ lệ khuyết tật gỗ bạch đàn đỏ là 4,6% và thời gian sấy là 111,1 giờ, đạt kết quả chất lượng cao,

giảm khuyết tật và góp phần ứng dụng giải pháp hiệu quả trong sấy gỗ đặc biệt là gỗ Bạch Đàn [17].

Năm 2010 Đặng Hữu Tiếp và các công sự Công ty CP Thương mại Công nghiệp và Chế biến gỗ (INWO) cùng góp sức nghiên cứu, chế tạo máy sấy hơi nước kết hợp chân không. Đây là kết quả công trình nghiên cứu kéo dài 6 năm từ năm 2005 – 2010. Mục tiêu chính của công trình là nghiên cứu, thiết kế và chế tạo thiết bị sấy gỗ với công nghệ hiện đại, tiếp cận trình độ công nghệ châu Âu, tiết kiệm năng lượng, thân thiện với môi trường, đồng thời đáp ứng các yêu cầu đặc thù của các doanh nghiệp chế biến gỗ quy mô nhỏ và vừa. Việc áp dụng công nghệ sấy chân không đã giúp thời gian sấy 1 mẻ nhanh hơn so với sấy bằng hơi nước thông dụng. Chất lượng gỗ sấy khá tốt so với công nghệ sấy hơi nước thông dụng, tỷ lệ khuyết tật của gỗ sấy giảm [3].

### **Kết luận chương 1**

Qua nghiên cứu tìm hiểu về sấy gỗ bằng phương pháp sấy chân không cho thấy việc ứng dụng công nghệ sấy chân không đã xuất hiện từ rất lâu trên thế giới và được ứng dụng khá phổ biến đến ngày nay [33, 35 - 38], [46], [49], [50]. Từ những nghiên cứu sơ khai ban đầu về sấy áp suất thấp, công nghệ sấy gỗ chân không dần được hình thành, qua các kết quả thực nghiệm sấy gỗ chân không đã cho thấy những lợi ích thiết thực khi áp dụng cho nguyên liệu gỗ, đặc biệt là những loại gỗ khó sấy [43], [53], [64 – 67]. Với những ưu điểm đạt được trong sấy chân không: rút ngắn thời gian sấy, chất lượng gỗ sấy cải thiện, cơ chế vận hành logic, khoa học phù hợp ứng dụng trong sản xuất công nghiệp, cùng với sự phát triển không ngừng của khoa học kỹ thuật công nghệ hiện đại trên thế giới, theo thời gian các nhà khoa học đã không ngừng nghiên cứu để từng bước hoàn thiện công nghệ sấy gỗ chân không sao cho giảm tối đa, tiết kiệm kính phí đầu tư. Vì vậy, hàng loạt các công trình nghiên cứu đã ra đời, thể hiện rõ mục tiêu của các nhà khoa học luôn hướng đến hiệu quả tốt nhất trong việc sấy gỗ. Đầu tiên là sấy chân không liên tục với gia nhiệt bằng điện cực tiếp xúc trực tiếp nguyên liệu gỗ, gia nhiệt bằng vi sóng, gia nhiệt bằng tần số cao, gia nhiệt sóng tần số, và gia nhiệt hơi quá nhiệt, đối lưu không khí nóng,....những nghiên cứu tiếp theo cho thấy sấy chân không áp dụng công nghệ mới sấy theo chu kỳ (không liên tục) với



quá trình gia nhiệt và rút chân không đan xen nhau, bên cạnh đó sấy chân không kết hợp nhiều nguồn năng lượng khác nhau như vi sóng kết hợp không khí nóng, hay sóng tần số kết hợp đối lưu... Thông qua kết quả nghiên cứu của các nhà khoa học trên thế giới đã chứng minh công nghệ sấy gỗ chân không là công nghệ mang đến nhiều hiệu quả cao trong công nghiệp sấy gỗ. Các nghiên cứu được áp dụng trên các loại nguyên liệu gỗ ôn đới từ Châu Mỹ và Châu Âu như : Sồi, Thông, Dẻ, Thích, Bạch Dương.... kết quả đạt được mang đến nhiều hiệu quả cao. Để khai thác triệt để ưu điểm của công nghệ cần thiết áp dụng cho các loại nguyên liệu gỗ nhiệt đới từ Châu Á, đặc biệt là những loại gỗ khó sấy như gỗ Căm xe nhằm góp phần nâng cao chất lượng nguyên liệu gỗ sấy và rút ngắn thời gian sấy. Ở Việt Nam ngoài các công trình nghiên cứu sấy chân không cho gỗ Cao su, Bạch đàn trắng, Bạch đàn đỏ thì chưa có bất kỳ công trình nghiên cứu nào liên quan đến sấy chân không gỗ Căm xe. Đây là một trong những loại gỗ khó sấy với đặc điểm cấu tạo chứa nhiều dầu nhựa gây hạn chế quá trình thoát ẩm, nước khi sấy ở nhiệt độ cao, đồng thời việc thoát ẩm này ảnh hưởng trực tiếp đến thời gian sấy cũng như khuyết tật xảy ra trong quá trình sấy.

Tóm lại, cần phải có giải pháp công nghệ cho gỗ nhiệt đới khó sấy vừa rút ngắn thời gian sấy vừa nâng cao chất lượng gỗ góp phần nâng cao giá trị nguyên liệu gỗ. Điều này là bước đi tiên phong trong công nghiệp sấy gỗ góp phần đưa ra giải pháp nhằm giải quyết từ ba yếu tố chính như sau: thứ nhất loại nguyên liệu nhiều dầu nhựa khó sấy nhiệt độ cao như gỗ Căm xe, thứ hai công nghệ sấy chân không, thứ ba gia nhiệt bức xạ hồng ngoại, kết quả thí nghiệm ghi nhận sẽ là cơ sở khoa học cho doanh nghiệp tham khảo, ứng dụng vào thực tế sản xuất. Từ sự kết nối ba yếu tố chính trên là giải pháp đồng thời là nhiệm vụ hết sức cấp thiết mà chúng tôi tiến hành thực hiện nghiên cứu công nghệ sấy gỗ Căm xe bằng phương pháp sấy chân không.

## Chương 2

### VẬT LIỆU, PHƯƠNG PHÁP VÀ PHƯƠNG TIỆN NGHIÊN CỨU

#### 2.1 Vật liệu nghiên cứu

Vật liệu nghiên cứu: gỗ Cẩm xe có tên khoa học *Xylia xylocarpa*, đây là một trong những loài gỗ có giá trị cao được sử dụng rất phổ biến trong việc gia công, sản xuất các sản phẩm gỗ nội ngoại thất tại Việt Nam. Chính vì vậy, luận án tập trung nghiên cứu vào nguyên liệu gỗ Cẩm xe, gỗ chọn làm thí nghiệm là nguyên liệu gỗ được nhập từ Campuchia, kích thước đường kính 0,5 – 0,7m, chiều dài 3 – 7m. Nguyên liệu gỗ sau đó mang đi cưa xẻ và cắt gia công qui cách theo yêu cầu mẫu thí nghiệm (hình 2.1) và các tiêu chuẩn trong xác định tính chất nhiệt vật lý và một số đặc tính khác.



**Hình 2.1.** Gỗ Cẩm xe (*Xylia xylocarpa*)

#### 2.2 Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

Phương pháp thu thập thông tin: Thông qua quá trình tìm hiểu, thu thập tài liệu sách, bài báo khoa học, các công trình nghiên cứu của các nhà khoa học trong và ngoài nước...từ đó làm cơ sở trong quá trình nghiên cứu cơ sở lý thuyết, khái niệm, cơ chế truyền nhiệt, truyền ẩm trong quá trình sấy

Qua các kết quả nghiên cứu trong và ngoài nước khi sấy gỗ cho thấy các tác giả thường sử dụng mô hình toán thực nghiệm để xây dựng mối quan hệ biến thiên độ ẩm với thời gian sấy.

Các tính chất nhiệt vật lý của gỗ là thông số quan trọng và ảnh hưởng đến kết quả trong việc giải hệ phương trình truyền nhiệt, truyền ẩm. Các đại lượng nhiệt vật lý của nguyên liệu gỗ phụ thuộc vào độ ẩm, vị trí, độ tuổi, vùng miền, thổ nhưỡng, quốc gia.... thông qua nghiên cứu trên một số loại gỗ như: gỗ Tuyết Tùng đỏ (*Thuja plicata*), Độc Càn (*Conium maculatum*) [31], gỗ Vân Sam Na uy (*Picea abies*) [32], gỗ Sồi đỏ (*Quercus* spp) [29], gỗ Độc Càn miền Tây (*Tsuga heterophylla*) [29], một số gỗ lá kim như Vân Sam (*Picea abies*), Thông đen (*Pinus nigra*), gỗ lá rộng Dẻ Ngựa (*Aesculus hippocastanum*), Dẻ Gai (*Fagus sylvatica*) [80]. Vì vậy, trong đề tài này sẽ tiến hành nghiên cứu xác định các tính chất nhiệt vật lý của gỗ Căm xe được dùng làm vật liệu nghiên cứu.

Hệ phương trình truyền nhiệt, truyền ẩm được giải bằng phương pháp phân tử hữu hạn. Đây là một công cụ được nhiều tác giả sử dụng để giải hệ phương trình vi phân bằng cách chuyển các hệ phương trình này về dạng rời rạc theo không gian và thời gian. Thuật toán giải hệ phương trình này được chúng tôi trình bày chi tiết trong chương 3.

Nghiệm của hệ phương trình truyền nhiệt, truyền ẩm là cơ sở để đánh giá, so sánh và phân tích các vấn đề liên quan đến động học quá trình sấy như ảnh hưởng của nhiệt độ TNS, cường độ bức xạ hồng ngoại ... đến thay đổi độ ẩm trong gỗ Căm xe.

### **2.3. Phương pháp xác định các thông số nhiệt vật lý của gỗ Căm xe**

#### **Chọn mẫu**

Quy trình chọn mẫu, lấy mẫu thực hiện theo TCVN 8044 : 2014, để đảm bảo các mẫu gỗ và các chỉ tiêu của mẫu đại diện cho lô mẫu. Gỗ được chọn làm mẫu ở dạng gỗ khúc, gỗ xẻ và dạng tấm.

Xẻ khúc gỗ lấy một tấm ở giữa. Nếu khúc gỗ lệch tâm thì tấm giữa phải bao gồm tâm trục. Khi lấy mẫu cắt các tấm giữa theo chiều hai đường kính vuông góc với nhau. Chiều dày của tấm giữa không được nhỏ hơn 40 - 60 mm. Có thể cắt các tấm giữa có chiều dày 40 mm từ các khúc có đường kính bằng hoặc nhỏ hơn 180 mm.

Khi lấy mẫu từ gỗ xẻ, một thanh hoặc các thanh được xẻ song song với trục dọc khúc gỗ. Số lượng thanh phải đủ để đảm bảo các mẫu và các chỉ tiêu là đại diện cho lô. Chiều dày các thanh 20 - 60 mm.

Hình dạng và kích thước mẫu thử được quy định trong các tiêu chuẩn tương ứng với từng phương pháp xác định tính chất gỗ.

Mỗi mẫu thử phải được ghi ký hiệu để nhận biết vị trí mẫu được cắt từ mẫu gỗ đã chọn. Trên mẫu có thể có các thông tin khác nếu có yêu cầu.

### **Số lượng mẫu**

Theo phương pháp lấy ngẫu nhiên TCVN 8044 : 2014, số lượng mẫu được quy định và lấy theo đúng mục đích (xác định chất lượng của gỗ, của lô gỗ xẻ, của từng thanh gỗ), cũng như phương pháp lấy mẫu đã sử dụng và yêu cầu của phép thử. Giá trị của các chỉ tiêu chính được xác định với chỉ số của phép thử bằng 5% ứng với độ tin cậy bằng 95 %.

#### **2.3.1 Phương pháp xác định khối lượng riêng**

Khối lượng riêng là khối lượng vật chất trên một đơn vị thể tích tính bằng  $\text{kg/m}^3$  hoặc  $\text{g/cm}^3$  [26], trong lĩnh vực chế biến gỗ, khối lượng riêng của gỗ còn được gọi là khối lượng thể tích gỗ [10], [18] được xác định theo tiêu chuẩn TCVN 8048-2 : 2009. Để xác định khối lượng riêng của gỗ tại giá trị độ ẩm nhất định (W%) nghiên cứu dùng phương pháp cân đo, phương pháp này đã được áp dụng trên một số loại gỗ khác [10], [18], [26], [77] được thực hiện như sau:

- Gia công mẫu gỗ kích thước 20 x 20 x 30 mm, trong đó kích thước 30 mm theo chiều dọc thớ gỗ (hình 2.2), số lượng 10 mẫu cho 7 cấp độ ẩm khác nhau, tổng số mẫu cho thí nghiệm này 70 mẫu. Tiến hành sấy mẫu gỗ và theo dõi độ ẩm gỗ qua máy đo độ ẩm Vogel, sau 5 phút cập nhật độ ẩm một lần, khi mẫu đạt độ ẩm yêu cầu, tiến hành cân xác định khối lượng mẫu gỗ bằng cân điện tử Bel, đồng thời đo kích thước mẫu gỗ bằng thước kẹp để xác định thể tích mẫu gỗ.

- Áp dụng công thức (2.1) để xác định khối lượng riêng của gỗ tại trạng thái độ ẩm W(%). Khối lượng riêng gỗ tại độ ẩm nhất định W(%).

$$\rho_{wo} = \frac{m}{V_{wo}} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (2.1)$$

Trong đó,  $\rho_{wo}$  là khối lượng riêng gỗ tại độ ẩm  $W$  ( $\text{g/cm}^3$ );  $m$  là khối lượng gỗ tại độ ẩm  $W$  (g);  $V_{wo}$  là thể tích gỗ tại độ ẩm  $W$  ( $\text{cm}^3$ ).



**Hình 2.2.** Gỗ Căm xe kích thước 20 x 20 x 30 mm xác định khối lượng riêng

### 2.3.2 Phương pháp xác định nhiệt dung riêng

Nhiệt dung riêng của một chất là nhiệt lượng cần phải cung cấp cho một đơn vị đo lường chất đó để nhiệt độ của nó tăng lên một độ trong quá trình truyền nhiệt. Để xác định nhiệt dung riêng của gỗ Căm xe [26], [48], [78] như sau:

Mẫu gỗ kích thước 10 x 10 x 20 mm, số lượng 10 mẫu cho 4 cấp độ ẩm khác nhau, tổng số mẫu cho thí nghiệm này 40 mẫu, gia nhiệt cho các mẫu này trong nước có nhiệt độ  $t_1$  bằng phương pháp sau: đổ nước vào bình đun cho đến khi gỗ được nhúng ngập hoàn toàn trong nước, dùng bếp điện nung nóng nước và mẫu gỗ trong bình đun, dùng nhiệt kế đo nhiệt độ của gỗ trong bình đun  $t_1$  và dùng cân xác định khối lượng mẫu gỗ  $m_1$ .

Lấy mẫu gỗ có khối lượng  $m_1$  đã được gia nhiệt ở nhiệt độ  $t_1$  cho vào bình nhiệt lượng kế (hình 2.3, 2.4) đã có sẵn lượng nước được cân trước (có khối lượng  $m_2$ ) với nhiệt độ  $t_2$ .

Trong quá trình mẫu gỗ và nước trong bình nhiệt lượng trao đổi nhiệt, thỉnh thoảng lắc nhẹ bình nhiệt lượng để mẫu gỗ và nước được trao đổi nhiệt cho nhau hoàn toàn và có nhiệt độ chung là  $t_m$ .

Nhiệt giải phóng ra của mẫu gỗ là:

$$Q_1 = c_1 m_1 (t_1 - t_m) \quad (2.2)$$

Trong đó:  $c_1$  là nhiệt dung riêng của mẫu gỗ (J/kg.K);  $m_1$  là khối lượng mẫu gỗ (kg);  $t_1$ ,  $t_m$  là nhiệt độ của mẫu gỗ trước và sau khi trao đổi nhiệt với nước (K).

Lượng nhiệt này sẽ cân bằng với lượng nhiệt hấp thụ của nước:

$$Q_2 = c_2 m_2 (t_m - t_2) \quad (2.3)$$

Trong đó:  $c_2$  là nhiệt dung riêng của nước  $c_2 = 4185$  J/kg.K;  $m_2$  là khối lượng của nước (kg);  $t_2$ ,  $t_m$  là nhiệt độ của nước trước và sau khi trao đổi nhiệt với vật thể.

Do vậy nhiệt dung riêng  $c_1$  của gỗ là có thể tính toán được thông qua các giá trị  $t_2$ ,  $c_2$ ,  $m_2$ ,  $m_1$ ,  $t_1$ .

Từ (2.2) và (2.3) ta có nhiệt dung riêng của mẫu gỗ là:

$$c_1 = \frac{c_2 m_2 (t_m - t_2)}{m_1 (t_1 - t_m)} \quad (2.4)$$



**Hình 2.3** Bình nhiệt lượng kế



**Hình 2.4** Mẫu gỗ thí nghiệm

### 2.3.3 Phương pháp xác định hệ số dẫn nhiệt

Hệ số dẫn nhiệt của vật liệu là một đại lượng vật lý đặc trưng cho khả năng dẫn nhiệt của vật liệu [15], [76], hệ số dẫn nhiệt được xác định thông qua thiết bị thể hiện hình 2.5.

Thiết bị đo hệ số dẫn nhiệt xung quanh được bọc cách nhiệt bằng 1 lớp sứ, 1 lớp polyurethan và 1 lớp bông thủy tinh có chiều dày là  $40 \cdot 10^{-2}$  m để đảm bảo thiết bị là một hệ đoạn nhiệt. Ampe kế đo dòng điện (A), volt kế đo hiệu điện thế (V).

Gia công mẫu gỗ kích thước 15 x 30 x 30 mm (hình 2.6), số lượng 10 mẫu cho 4 cấp độ ẩm khác nhau, theo 2 phương dọc và ngang nên tổng số mẫu cho thí nghiệm này 80 mẫu, tiến hành sấy mẫu gỗ và theo dõi độ ẩm gỗ qua máy đo độ

âm Vogel, khi mẫu đạt độ ẩm yêu cầu, mang mẫu gỗ đặt bảo quản trong tủ định ôn, bảo quản và giữ ổn định độ ẩm gỗ để thực hiện thí nghiệm tiếp theo xác định hệ số dẫn nhiệt của gỗ theo các cấp độ ẩm.

Tiến hành đặt mẫu gỗ có kích thước dày 15 mm, rộng 30 mm vào thiết bị sơ đồ mô tả ở hình 2.5, khi tiến hành đo hệ số dẫn nhiệt theo chiều dọc thớ thì đặt mẫu phương dọc thớ gỗ theo chiều dày mẫu, khi đo hệ số dẫn nhiệt theo chiều ngang thớ đặt mẫu phương ngang thớ gỗ theo chiều dày mẫu.

Trong đó:  $\delta_1 = 15.10^{-3}$  m,  $\lambda_1 = 383,8$  W/m.K,  $F = 55,2.10^{-4}$  m<sup>2</sup> của tấm đồng, ( $a \gg \delta_1$ ),

$T_{1v}, T_{2v}$ : (°C) nhiệt độ ở phía ngoài 2 vách phẳng của thiết bị;  $\delta = 15.10^{-3}$  m là chiều dày của mẫu gỗ cần xác định hệ số dẫn nhiệt (hình 2.5).

Vì không có dung kháng ( $Z_c = 0$ ) và cảm kháng ( $Z_L = 0$ ), do đó năng lượng chỉ tiêu hao trên điện trở thuần xác định theo định luật Jun – Len Xơ, với  $U = RI$  nên:

$$+ Q = RI^2\tau = UI\tau, J \quad (2.5)$$

$$+ \text{Mật độ dòng nhiệt: } q_{md} = \frac{Q}{F\tau} = \frac{RI^2\tau}{F\tau} = \frac{UI\tau}{F\tau} = \frac{UI}{F}, W/m^2 \quad (2.6)$$

+ Hệ số dẫn nhiệt của mẫu gỗ cần khảo sát được xác định:

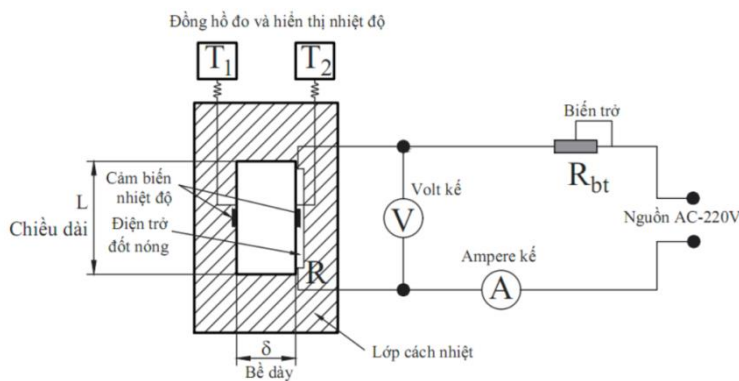
$$k_{wo} = \frac{qmd\delta_{day}}{(T_{2v}-T_{1v})-2\frac{q\delta_1}{\lambda_1}} (W/m.K) \quad (2.7)$$

Trong đó:

$\delta_1 = 1,5.10^{-3}$  m,  $\lambda_1 = 383,8$  W/m.K,  $F = 55,2.10^{-4}$  m<sup>2</sup> tấm đồng, ( $a \gg \delta_1$ )

$T_{1v}, T_{2v}$  : nhiệt độ ở phía ngoài 2 vách phẳng của thiết bị (°C)

$\delta_{day} = 15.10^{-3}$  m là bề dày của mẫu gỗ cần xác định hệ số dẫn nhiệt



**Hình 2.5.** Sơ đồ của thiết bị đo hệ số dẫn nhiệt

**Hình 2.6.** Mẫu gỗ thí nghiệm

## 2.4 Phương pháp xác định độ ẩm bão hòa thớ gỗ (hay còn gọi là điểm bão hòa thớ gỗ) - $W_{woFSP}$

Độ ẩm bão hòa thớ gỗ được xác định bởi lượng nước liên kết tối đa trong gỗ, phương pháp xác định độ ẩm bão hòa thớ gỗ : dựa vào mối quan hệ giữa độ ẩm gỗ và tỷ lệ co rút, nên trong nghiên cứu tiến hành xác định tỷ lệ co rút theo TCVN 8048 – 13 : 2009, từ đó xác định độ ẩm tại điểm bão hòa thớ gỗ [20, 21].

Yêu cầu kỹ thuật của các mẫu gỗ kích thước 20 x 20 x 20 mm, số lượng mẫu 30 mẫu cho được đánh số hiệu, mẫu gỗ được cân khối lượng và ngay sau khi cân tiến hành đo kích thước chiều tiếp tuyến tại giao điểm hai đường chéo đã xác định trên mặt xuyên tâm.

Khi đo kích thước mẫu gỗ phải đảm bảo vị trí của các mẫu gỗ được xác định và cố định trong cả quá trình thực nghiệm bằng cách đánh dấu trên thiết bị đo vị trí đặt mặt mẫu gỗ khi đo.

Sau khi cân khối lượng và đo kích thước lần thứ nhất, các mẫu gỗ được đặt trong khay, không chạm vào nhau và lưu giữ trong phòng có nhiệt độ  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$  và độ ẩm  $65 \pm 3\%$ , kết quả ghi nhận được xác định  $V_{woGRE}$ . Cứ sau mỗi 12 giờ, cân khối lượng và đo kích thước chiều tiếp tuyến của mẫu gỗ, đo kích thước mẫu ngay sau khi cân. Khi mẫu gỗ đạt khối lượng không đổi nghĩa là khối lượng giữa hai lần cân liên kế bằng nhau ghi nhận kết quả tính toán  $V_{woEQ}$  và  $W_{woEQ}$ . Sau đó cho các mẫu gỗ vào tủ sấy, sấy ở nhiệt độ  $40^{\circ}\text{C}$  trong 48 giờ. Sau đó tăng nhiệt độ và sấy ở nhiệt độ  $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$  cho đến khi mẫu gỗ đạt trạng thái khô kiệt (khi khối lượng mẫu gỗ giữa hai lần cân cách nhau 6 giờ chênh lệch không quá 0,5% khối lượng mẫu) xác định  $V_{wodry}$ . Trong thời gian sấy mẫu gỗ, định kỳ cân và đo kích thước sau mỗi 12 giờ.

Từ các kết quả cân và đo xác định độ co rút tổng quát  $Y_{cr}$  và hệ số co rút  $K_{crtt}$  của mẫu gỗ. Từ đó xác định độ ẩm bão hòa thớ gỗ theo công thức sau:

$$W_{woFSP} = \frac{Y_{cr}}{K_{crtt}} \quad (2.8)$$

Trong đó:  $K_{crtt}$  : Hệ số co rút thể tích (%);  $Y_{cr}$  : Độ co rút tổng quát (%)

$$K_{crtt} = \frac{(V_{woEQ} - V_{wodry}) \times 100}{V_{wodry} \times W_{woEQ}} \quad (2.9)$$



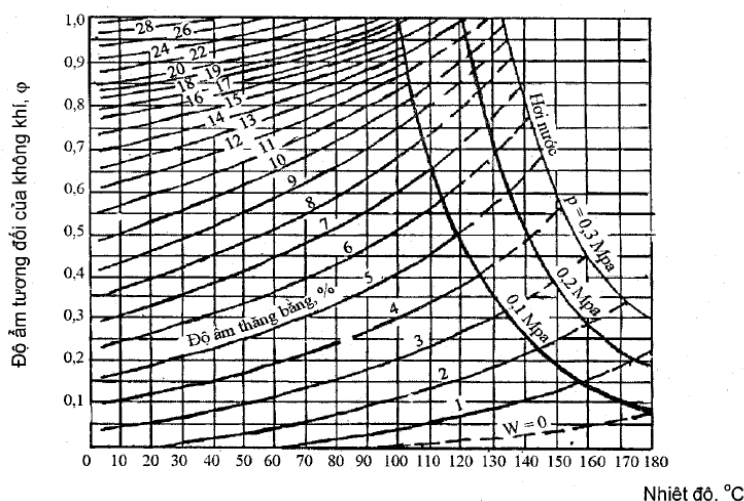
$$Y_{cr} = (V_{wogre} - V_{wodry}) \times \frac{100}{V_{wogre}} \quad (2.10)$$

Trong đó:  $V_{wogre}$  thể tích gỗ tươi ( $\text{cm}^3$ );  $V_{wodry}$  thể tích gỗ khô kiệt ( $\text{cm}^3$ );  $V_{woEQ}$  thể tích gỗ tại độ ẩm thăng bằng ( $\text{cm}^3$ );  $W_{woIN}$  độ ẩm ban đầu (%);  $W_{woFSP}$  độ ẩm bão hòa thứ gỗ (%);  $W_{woEQ}$  độ ẩm thăng bằng (%).

### 2.5 Phương pháp xác định độ ẩm thăng bằng của gỗ - $W_{woEQ}$

Độ ẩm thăng bằng ( $W_{woEQ}$ ) một số tài liệu còn gọi độ ẩm cân bằng [26], trong điều kiện môi trường nhất định, quá trình nhả ẩm hoặc hút ẩm của gỗ chỉ đạt đến một độ ẩm nhất định khi đặt trong môi trường. Độ ẩm gỗ ở trạng thái này được gọi là độ ẩm thăng bằng.

Độ ẩm thăng bằng (cân bằng) của gỗ được xác định bởi trạng thái không khí ( $t$  và  $\varphi$ ). Đường cong biểu diễn quan hệ giữa độ ẩm thăng bằng (cân bằng) và  $\varphi$  (ở nhiệt độ không đổi) – đường đẳng nhiệt thể hiện hình 2.7. Tiến hành thí nghiệm với mẫu gỗ kích thước 20 x 20 x 20 mm, số lượng mẫu 10 mẫu được đánh số hiệu để theo dõi và ghi nhận kết quả. Độ ẩm thăng bằng (cân bằng) của gỗ phụ thuộc vào nhiệt độ và độ ẩm tương đối của môi trường. Khi nhiệt độ không đổi, độ ẩm tương đối của không khí tăng thì độ ẩm thăng bằng (cân bằng) của gỗ sẽ tăng; khi độ ẩm tương đối của không khí không đổi, độ ẩm thăng bằng (cân bằng) của gỗ sẽ giảm khi nhiệt độ môi trường tăng lên [26].

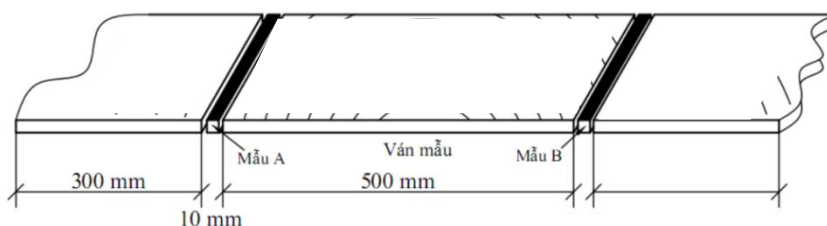


**Hình 2.7.** Biểu đồ xác định độ ẩm thăng bằng của gỗ trong môi trường không khí

### 2.6 Phương pháp xác định độ ẩm ban đầu của gỗ - $W_{woIN}$

Để đặc trưng lượng nước trong gỗ người ta sử dụng khái niệm độ ẩm, độ ẩm gỗ tính theo tỷ lệ phần trăm lượng nước trong gỗ và khối lượng gỗ có nước gọi là độ ẩm tương đối (cơ sở ướt).

Xác định độ ẩm ban đầu của gỗ theo TCVN 8048 – 1: 2009 [21] nghiên cứu tiến hành cắt mẫu gỗ với kích thước 10 x 10 x 10 mm từ hai đầu tấm nguyên liệu gỗ đặt tên là mẫu A (số lượng 10 mẫu) và mẫu B (số lượng 10 mẫu), (hình 2.8).



**Hình 2.8.** Phương pháp cắt mẫu xác định độ ẩm ban đầu gỗ

Xác định độ ẩm của mẫu A và mẫu B bằng phương pháp cân sấy như sau:

- Cân để xác định khối lượng của mẫu A và mẫu B sau đó đưa vào tủ sấy và tiến hành sấy ở nhiệt độ  $100 \pm 3^{\circ}\text{C}$  cho đến khi khô kiệt
- Xác định khối lượng mẫu ở độ ẩm này. Độ ẩm của mẫu A được xác định theo công thức sau:

$$W_A = \frac{m_A - m_{0A}}{m_A} \times 100\% \quad (2.11)$$

Độ ẩm của mẫu B được xác định theo công thức sau:

$$W_B = \frac{m_B - m_{0B}}{m_B} \times 100\% \quad (2.12)$$

Độ ẩm của gỗ là độ ẩm trung bình của mẫu A và mẫu B

$$W_{woIN} = \frac{W_A + W_B}{2} \quad (2.13)$$

Trong đó:  $m_A$  khối lượng ban đầu của mẫu A (g);  $m_{0A}$  khối lượng khô kiệt của mẫu A (g);  $m_B$  khối lượng ban đầu của mẫu B (g);  $m_{0B}$  khối lượng khô kiệt của mẫu B (g);  $W_A$  độ ẩm của mẫu A (%);  $W_B$  độ ẩm của mẫu B (%);  $W_{woIN}$  độ ẩm ban đầu của gỗ (%)

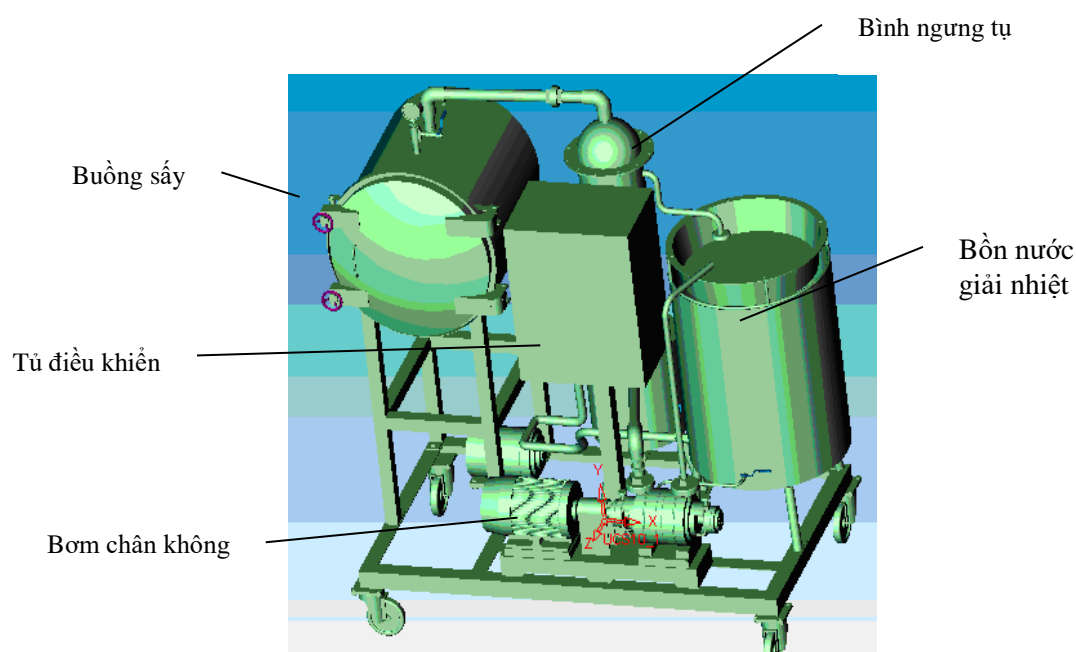
## 2.7 Phương tiện nghiên cứu

**Bảng 2.1.** Thông số kỹ thuật cơ bản của các thiết bị đo

Stt	Tên	Thông số kỹ thuật	Công dụng	Ghi chú
1	Cân điện tử	Bel Engineering - Italia thang đo (0 - 3000) g, sai số $\pm 0,01$ g.	Xác định khối lượng, trong việc xác định độ ẩm ban đầu	Đo trước khi sấy
2	Tủ sấy thí nghiệm	Memmert - Đức Nhiệt độ hoạt động : $5^{\circ}\text{C}$ - $300^{\circ}\text{C}$ , sai số $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .	Sấy mẫu gỗ thí nghiệm	Xác định khối lượng gỗ
3	Thước cuộn Thước kẹp	Thước cuộn - Stanley – Mỹ thang đo 0 - 5 m, sai số $\pm 0,1$ mm Thước kẹp Vogel - Đức thang đo 0 - 150 mm, sai số $\pm 0,02$ mm.	Đo kích thước gỗ	Đo chiều dày, chiều rộng và chiều dài thanh gỗ
4	Nhiệt kế (hồng ngoại)	Microlife FR1MF1 – Thụy sĩ, thang đo 0 - $100^{\circ}\text{C}$ , bước nhảy số đo $0,1^{\circ}\text{C}$ , độ chính xác $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$	Đo nhiệt độ VLS trước khi sấy	Đo trực tiếp trên thanh gỗ
5	Cảm biến nhiệt độ	ASIT Gsensor – Italia thang đo $-20^{\circ}\text{C}$ - $750^{\circ}\text{C}$ , sai số $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ .	Đo nhiệt độ	Đặt ngay vị trí tiếp xúc với VLS
6	Cảm biến áp suất	Danfoss - Ấn Độ, thang đo 0 - $35 \text{ kg/cm}^2$ và 0 - 760 mmHg, sai số $\pm 0,05 \text{ kg/cm}^2$ và $\pm$ 0,0005 mmHg	Đo áp suất buồng sấy	Đặt trong buồng sấy, điều khiển bơm chân không
7	Máy đo độ ẩm sử dụng kim	Vogel – Đức thang đo: 2 - 70% Độ chính xác: 0,5 - 1%	Đo độ ẩm VLS trong quá trình sấy	Máy đặt ngoài buồng sấy, kết nối dây dẫn đưa vào trong buồng, kim đo đặt vào lỗ khoan trên thanh gỗ
8	Máy đo độ ẩm gỗ cầm tay	Prometer - EPM-828 –Anh, thang đo: 8 - 28% Độ chính xác: $\pm 0,5$ - 1%	Đo độ ẩm VLS trước và sau khi sấy	Dùng máy ghim đầu kim vào thanh gỗ
9	Thiết bị đo cường độ bức xạ	TENMARS TM - 206 – Đài Loan, thang đo: 0 - 2000 $\text{W/m}^2$ , 634 BTU/(ft <sup>2</sup> xh) Độ phân giải: $0,1 \text{ W/m}^2$ , $0,1$ BTU/ (ft <sup>2</sup> xh) Đơn vị: $\text{W/m}^2$ ; BTU	Đo cường độ bức xạ hồng ngoại	Dùng xác định cường độ bức xạ hồng ngoại
10	Bình nhiệt lượng kế	Bình nhiệt lượng kế - công ty thiết bị trường học. Vô	Đo nhiệt lượng	Dùng xác định nhiệt dung

		nhựa hình trụ $\Phi 100\text{mm}$ , cao $100\text{mm}$ ; ruột trong inox $\Phi 70\text{mm}$ , cao $75\text{mm}$ ; nắp nhựa PVC dày $7\text{mm}$		riêng của gỗ
--	--	---	--	--------------

Gỗ Cắm xe được đưa vào buồng sấy bố trí các cảm biến nhiệt độ và ẩm độ đặt vào thanh gỗ. Đóng cửa buồng sấy, tiến hành cài đặt nhiệt độ, áp suất sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại theo yêu cầu. Sau đó khởi động hệ thống gia nhiệt bằng bức xạ hồng ngoại thông qua bộ điều khiển gồm thanh đèn phía trên và phía dưới, nguồn nhiệt này làm nóng gỗ, đồng thời bơm chân không hoạt động tiến hành rút chân không trong buồng sấy, nhằm hạ điểm sôi của nước trong gỗ, khi nước đạt điểm sôi sẽ hóa hơi, ẩm trong gỗ di chuyển từ trong ra ngoài bề mặt, khuếch tán ra môi trường được TNS mang ra khỏi buồng sấy theo hệ thống bơm hút chân không, tiến trình này diễn ra liên tục cho đến độ ẩm gỗ đạt yêu cầu và kết thúc quá trình sấy.





**Hình 2.9.** Thiết bị sấy chân không gỗ Cắm xe

***Thông số kỹ thuật cơ bản của thiết bị thực nghiệm***

Kích thước máy sấy : 700 x 1500 x 1450 mm

Kích thước buồng sấy : chiều dài 600 mm, đường kính 500 mm

Công suất bơm chân không : 1,5 HP, bơm được điều khiển thông qua cảm biến áp suất

Nhiệt độ TNS:  $40 \div 70^{\circ}\text{C}$ , điều chỉnh đến  $0,1^{\circ}\text{C}$

Điện áp sử dụng: 3 pha 380 V/50 Hz

Đèn sấy hồng ngoại

- Công suất hồng ngoại : 1000 W (gồm hai thanh đèn)
- Chiều dài (mm) : 300 mm
- Đường kính (mm) :  $\phi 15$  mm
- Hồng ngoại bước sóng (mm): 2.0 – 10  $\mu\text{m}$
- Nhiệt độ màu (K): 800 – 1500 K

Bộ điều khiển : các thông số vận hành máy được cài đặt, hiển thị và giám sát tự động, cụ thể nhiệt độ, áp suất, cường độ bức xạ...trong buồng sấy.

**2.8 Phương pháp đo các thông số**

Để thực hiện đo và lấy số liệu trên thiết bị, các cảm biến nhiệt độ, độ ẩm trên thiết bị sấy được thực hiện như sau:

- Nhiệt độ TNS được đo bằng cảm biến nhiệt độ ASIT và được lắp đặt tại trong buồng sấy. Nhiệt độ này được hiển thị và cài đặt thông qua bộ điều khiển.

- Độ ẩm VLS được đo bằng máy đo độ ẩm Vogel, lắp đặt kim đo ghim vào thanh gỗ vị trí lỗ khoan giữa, dây dẫn nối máy đo đặt ngoài buồng sấy, theo dõi chỉ số ghi nhận trên màn hình hiển thị.
- Nhiệt độ VLS được đo bằng cách sử dụng hai cảm biến nhiệt độ ASIT đặt vào các vị trí khoan phần đầu, phần cuối thanh gỗ, trên thanh gỗ với độ sâu tâm gỗ và bề mặt gỗ thông qua bộ điều khiển. Số liệu được ghi nhận 15 phút một lần, giá trị trung bình của cảm biến được sử dụng để so sánh với nhiệt độ VLS khi mô phỏng.
- Áp suất trong buồng sấy được đo bằng cách sử dụng cảm biến áp suất Danfoss đặt trong buồng sấy, số liệu thể hiện đồng hồ đo áp suất.
- Kích thước của VLS được đo bằng thước dây và thước kẹp Vogel, giá trị trung bình được đo tại ba vị trí đầu, giữa và cuối của thanh gỗ được sử dụng làm thông số tính toán khi giải mô hình toán lý thuyết.
- Nhiệt độ ban đầu của VLS được xác định bằng cách sử dụng nhiệt kế hồng ngoại ở phần đầu, giữa và phần cuối thanh gỗ, giá trị trung bình đo tại ba vị trí đầu, giữa và cuối của thanh gỗ được sử dụng làm thông số tính toán khi giải mô hình toán lý thuyết.
- Cường độ bức xạ hồng ngoại được cài đặt thông qua bộ điều khiển tăng giảm bằng dimmer, thiết bị đo cường độ bức xạ TENMARS xác định cường độ bức xạ ( $W/m^2$ ) phát trên hai thanh đèn hồng ngoại.

## 2.9 Phương pháp xác định các thông số

Theo Sandoval Torres [101], Yan Yang [109], Zhengbin He [115] nghiên cứu nguyên lý truyền nhiệt bức xạ kết luận như sau:

$$q_{rad} = \varepsilon_s \cdot I^P \quad (2.14)$$

Trong đó:  $\varepsilon_s$  là hệ số phát xạ của vật xám (còn gọi độ đen),  $I^P$ : là năng suất bức xạ

$$\varepsilon_s = \frac{1}{\frac{1 - \varepsilon_R}{\varepsilon_R \cdot A_R} + \frac{1}{F_{ij} \cdot A_R} + \frac{1 - \varepsilon_s}{\varepsilon_s \cdot A_s}} \quad (2.15)$$

Trong đó:

$F_{ij}$ : hệ số góc bức xạ theo công thức sau

$$F_{ij} = \frac{2}{\pi \cdot X \cdot Y} \left[ \ln \sqrt{\frac{(1-X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2}} + \sqrt{X \cdot (1+Y^2)} \cdot \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} + \sqrt{Y \cdot (1+X^2)} \cdot \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} - X \cdot \tan^{-1} X - Y \cdot \tan^{-1} Y \right] \quad (2.16)$$

Trong đó:

$$X = x_r/L ; Y = y_r/L \quad (2.17)$$

$x_r$ : chiều rộng nguồn bức xạ (m),  $y_r$ : chiều dài nguồn bức xạ (m),  $L$ : khoảng cách nguồn bức xạ đến gỗ (m),  $\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  (hằng số Stephen Boltzman),  $T_R$ : nhiệt độ bức xạ (K),  $T_s$ : nhiệt độ bề mặt gỗ gia nhiệt bức xạ (K),  $\varepsilon$ : hệ số phát xạ,  $\varepsilon_R$ : hệ số phát xạ của đèn bức xạ,  $\varepsilon_s$ : hệ số phát xạ của gỗ,  $A_R$ : diện tích nguồn bức xạ  $=x \cdot y$  ( $\text{m}^2$ ),  $A_s$ : diện tích tiếp xúc với nguồn bức xạ ( $\text{m}^2$ )

### Hệ số truyền ẩm

Theo Sandoval Torres [101], Yan Yang [109], Zhengbin He [115] nghiên cứu nguyên lý truyền nhiệt và truyền ẩm nhận định như sau:

$$h_m = \frac{h_R}{\rho_a \cdot c_a \cdot Le^{1-n}} = \frac{h_R \cdot D \cdot Le^n}{k_a} = \frac{h_R \cdot D}{k_a} \cdot \left( \frac{\frac{k_{wo}}{c_{wop} \cdot \rho_{wo}}}{D} \right)^n \quad (\text{m/s}) \quad (2.18)$$

Hệ số Lewis xác định như sau:

$$Le = \frac{\alpha_{dif}}{D} = \frac{\lambda_{dif}}{\rho \cdot D_{aver} \cdot c_p} \quad (2.19)$$

Trong đó:  $\rho_a$ : khối lượng riêng của không khí ( $\text{kg/m}^3$ ),  $c_a$ : nhiệt dung riêng của không khí ( $\text{J/kg.K}$ ),  $k_a$ : độ dẫn nhiệt của không khí ( $\text{W/m.K}$ ),  $Le$ : hệ số Lewis,  $D$ : hệ số khuếch tán ẩm ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $k_{wo}$ : hệ số dẫn nhiệt của gỗ ( $\text{W/m.K}$ ),  $\rho_{wo}$ : khối lượng riêng của gỗ ( $\text{kg/m}^3$ ),  $C_{wop}$ : nhiệt dung riêng của gỗ ( $\text{J/kg.K}$ ),  $n=1/3$ ,  $T$ : nhiệt độ sấy (K),  $R$ : hằng số khí lý tưởng ( $R = 8,314 \text{ J/mol.K}$ ).

### Ẩn nhiệt hóa hơi

Theo Stanish, M.A.; Schajer, G.S.; Kayihan, F. A [97], Sandoval-Torres [101], Yan Yang [109], Zhengbin He [115] nghiên cứu mô hình sấy trong các vật liệu xốp, nguyên liệu gỗ đã đưa ra kết luận

$$\Delta h = 2,792.10^6 - 160.T - 3,43.T^2 \text{ (J/kg)} \quad (2.20)$$

### **Hệ số khuếch tán ẩm ( $D_{ls}$ )**

Theo Siau [94], Sandoval Torres [101], Yan Yang [109], Zhengbin He [115] nghiên cứu quá trình thoát ẩm trong gỗ đã kết luận như sau:

$$D = 7.10^{-6} \exp\left(-\frac{9200 - 70.W}{RT}\right) \text{ (m}^2\text{/s)} \quad (2.21)$$

### **Hệ số trao đổi nhiệt**

Hệ số trao đổi nhiệt đối lưu là đại lượng đặc trưng cho cường độ trao đổi nhiệt giữa TNS và VLS. Theo Zhengbin He, Zijian Zhao, Yu Zhang, Huan Lv, Songlin Yi [114], nghiên cứu hệ số trao đổi nhiệt đối lưu trên gỗ trong sấy chân không đã kết luận như sau:

$$h = \frac{m\Delta h}{A(T-T_s)} \quad (2.22)$$

Trong đó:

h: hệ số trao đổi nhiệt đối lưu ( $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ), m: tốc độ bay hơi nước (g/s),  $\Delta h$ : ẩn nhiệt hóa hơi (J/g), A: diện tích bề mặt hóa hơi ( $\text{m}^2$ )

Thông qua thực nghiệm các nhà nghiên cứu [114] đã tìm ra mối liên hệ giữa hệ số trao đổi nhiệt với nhiệt độ và áp suất như sau.

$$h = 3209,07 - 15,38T + 2893,23\ln P + 0,392T^2 + 905,34(\ln P)^2 - 3.713T\ln P - 2,62.10^{-3}T^3 + 91,885(\ln P)^2 + 1,7.10^{-3}T^2\ln P \quad (2.23)$$

Trong đó: h là hệ số trao đổi nhiệt đối lưu ( $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ), T là nhiệt độ trong buồng sấy chân không ( $^{\circ}\text{C}$ ), P là áp suất chân không (Mpa).

### **Phương pháp kiểm chứng mô hình toán**

Để xem xét sự phù hợp của mô hình lý thuyết, thông thường dựa vào giá trị sai lệch giữa kết quả tính toán từ mô hình đó và một giá trị đối sánh (thông thường là giá trị thực nghiệm). Căn cứ vào các tiêu chí thống kê tiến hành đưa ra nhận xét. Trong nghiên cứu này, sử dụng các tiêu chí thống kê sau đây: hệ số tương quan  $R^2$ , căn bậc hai sai số bình phương trung bình RMSE (Root Mean



Square Error), sai số tương đối trung bình MRE (Mean Relative Percentage Error) [11], để xem xét sự phù hợp của mô hình lý thuyết và thực nghiệm.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_{tni} - y_{lti})^2}{\sum_{i=1}^N (y_{tni} - y_{tbi})^2} \quad (2.24)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{tni} - y_{lti})^2} \quad (2.25)$$

$$MRE = \frac{100 \sum_{i=1}^N \frac{|y_{tni} - y_{lti}|}{y_{tni}}}{N} \quad (2.26)$$

Trong đó:  $y_{tn}$ : giá trị thực nghiệm,  $y_{lt}$ : giá trị lý thuyết (giá trị tính toán),  $y_{tb}$ : giá trị trung bình,  $N$ : số thí nghiệm.

## 2.10 Phương pháp xác định mô hình toán cho quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm sấy chân không gỗ Cắm xe

Phân tích các yếu tố ảnh hưởng quá trình sấy chân không, từ đó làm cơ sở cho việc xây dựng mô hình vật lý, xác định mô hình toán và mô phỏng quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm trong quá trình sấy.

Động học sấy của gỗ Cắm xe thu được trên cơ sở lý thuyết mô phỏng và thực nghiệm kiểm chứng, quá trình sấy thực nghiệm thực hiện trên máy sấy chân không. Trong quá trình thí nghiệm sấy chân không, Gỗ cắm xe được đưa vào trong buồng sấy, đặt trên các lớp thanh kê, dữ liệu đầu vào là các thông số về nguyên liệu gỗ và máy sấy chân không, quá trình sấy tiến hành dưới điều kiện chân không, gỗ được làm nóng nhờ hệ thống gia nhiệt bức xạ hồng ngoại nước trong gỗ nóng lên sôi và hóa hơi di chuyển ra bề mặt gỗ và khuếch tán ra môi trường. Quá trình này diễn ra xác định được hành trình giảm ẩm của thanh gỗ cũng như phân bố nhiệt trong thanh gỗ trong quá trình sấy chân không gỗ. Sau khi kết thúc quá trình sấy ghi nhận thời gian sấy và đánh giá tỷ lệ khuyết tật gỗ sau khi sấy.

Để xác định mô hình toán cho nguyên liệu gỗ Cắm xe thì cần tiến hành các bước sau:

- Bước 1: tiếp cận hệ thống (đối tượng thực), phân tích (định tính, định lượng) hệ thống và mô hình hóa hệ thống bằng mô hình vật thể.
- Bước 2: xây dựng mô tả toán học cho nguyên liệu gỗ dưới dạng các phương trình hay hệ phương trình..., đồng thời xác lập điều kiện giới hạn và các tham số của MHT
- Bước 3: tìm thuật toán giải mô hình toán, xác định nghiệm tổng quát.

- Bước 4: nhận dạng tham số mô hình toán, xác định nghiệm riêng.
- Bước 5: kiểm tra sự tương thích mô hình toán giữa tính toán của mô hình với thực nghiệm.
- Bước 6: mô phỏng, hiệu chỉnh và ứng dụng mô hình vào thực tế.

Phương pháp này sẽ ứng dụng xây dựng mô hình toán truyền nhiệt và truyền ẩm trong điều kiện sấy gỗ chân không

Trong kỹ thuật, có nhiều phương pháp giải bài toán truyền nhiệt không ổn định như:

- Phương pháp trung bình hóa
- Phương pháp chồng chất siêu vị (super – position)
- Phương pháp toán tử Laplace (Laplace)
- Phương pháp sai phân hữu hạn – Finite Difference Method – FDM
- Phương pháp phần tử hữu hạn – Finite Element Method – FEM
- Phương pháp số

Phụ thuộc vào điều kiện của bài toán (điều kiện ban đầu, điều kiện biên), bản chất của quá trình truyền nhiệt (truyền nhiệt ổn định hay không ổn định, có chuyển pha hay không, lớp biên di động hay cố định,...) mức độ chấp nhận sai số, thời gian cho phép, dạng nghiệm (dạng nghiệm tổng quát, dạng nghiệm thuần số hoặc thuần ẩn ...) chọn phương pháp giải cho phù hợp với từng trường hợp cụ thể. Đối với bài toán truyền nhiệt trong sấy gỗ chân không : quá trình truyền nhiệt ổn định, gia nhiệt liên tục, sấy có chuyển pha, nhưng điều kiện ban đầu của bài toán khá đơn giản. Vì vậy, chọn phương pháp số để tiếp cận lời giải của bài toán trên góc độ mô phỏng quá trình. Sau đó, lấy kết quả thực nghiệm để đánh giá lời giải của phương pháp, mức độ phù hợp giữa phương pháp giải đã chọn với bài toán, mức độ sai lệch giữa lý thuyết và thực nghiệm.

Qua phân tích phương pháp giải mô hình toán truyền nhiệt không ổn định trong quá trình sấy gỗ chân không cho thấy phương pháp số phù hợp với những lý do như sau:

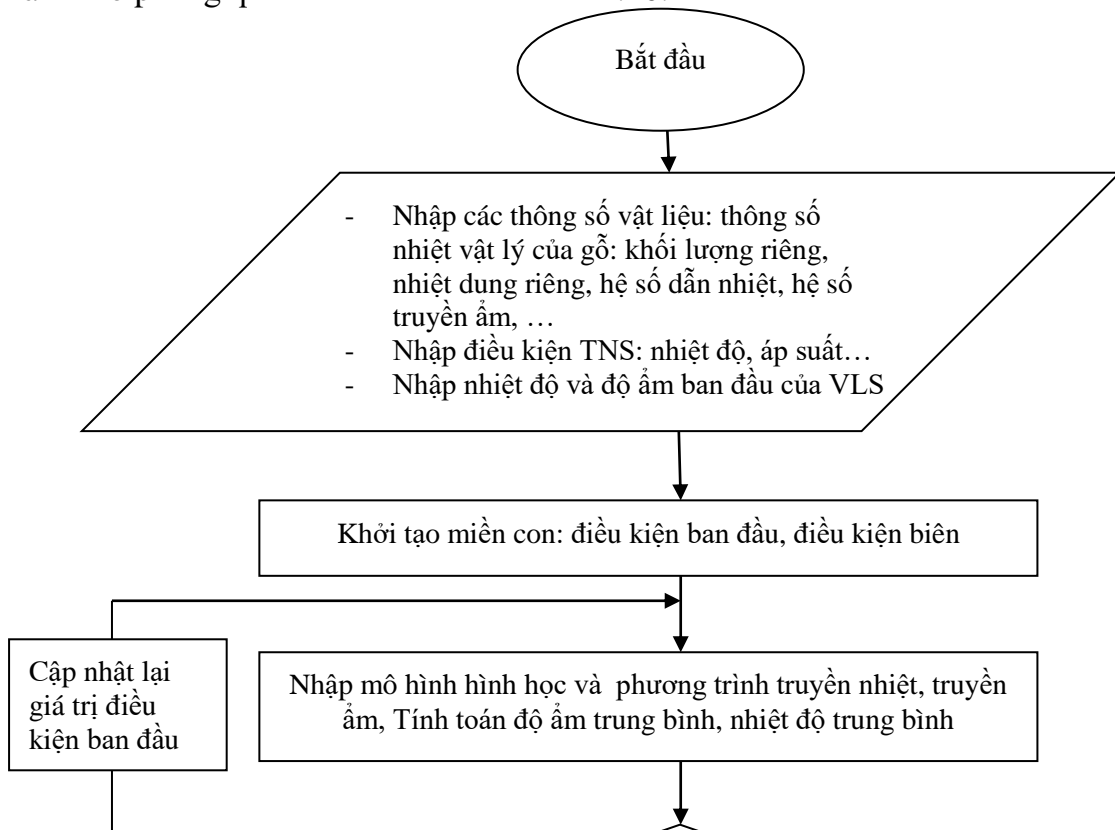
- Bài toán phương trình truyền nhiệt không ổn định.
- Kích thước ma trận số trên mỗi lớp lưới phải giải giảm đáng kể.
- Điều kiện biên xác định.

- Dựa vào chương trình máy tính phần mềm Comsol Multiphysics 5.3a bài toán sẽ được giải bằng phương pháp số.

## 2.11 Phương pháp mô phỏng bằng Comsol Multiphysics

Hiện nay, ứng dụng phương pháp mô hình hóa trong nghiên cứu khoa học tại Việt Nam vẫn còn nhiều hạn chế và vẫn ở bước đầu tiếp cận những phần mềm mới. Với kỳ vọng đáp ứng được những yêu cầu về nghiên cứu khoa học chúng tôi tiến hành ứng dụng vào trong nghiên cứu sấy chân không gỗ Căm xe.

Các hiện tượng nói chung thường được miêu tả bằng các phương trình toán học, thông thường đó là các phương trình vi phân từng phần [51], [60], [61], [68-71], [84 - 87], [97], [98], [100],[108], [110], [111]. Giải pháp giải tích cho phương trình vi phân từng phần đòi hỏi hàm diễn tả theo biến phụ thuộc liên tục trong một miền nào đó. Tuy nhiên ở đây gặp một khó khăn thực sự khi xây dựng phương trình vi phân cho chất rắn ở môi trường sấy là một bài toán cực kỳ phức tạp. Trong đề tài này xây dựng mô hình toán theo mô hình vật lý của quá trình sấy chân không từ đó tìm hiểu tác động của một số tham số chính, dự đoán chiều hướng ảnh hưởng của những tham số đó đến kết quả của quá trình, từ đó tìm ra một giải pháp tối ưu để thiết kế nên công nghệ sấy phù hợp nhất. Sau khi xây dựng được mô hình toán, công đoạn tiếp theo sử dụng công cụ mô phỏng để giải hệ phương trình vi phân. Trong đề tài này chọn Comsol vì tính trực quan của phần mềm, và Matlab để xử lý các kết quả thu được từ mô phỏng. Các bước tiến hành mô phỏng quá trình theo lưu đồ hình 2.10.



**Hình 2.10.** Lưu đồ các bước mô phỏng truyền nhiệt, ẩm sấy gỗ chân không

### **2.12 Phương pháp qui hoạch thực nghiệm**

Để xác định chế độ sấy phù hợp cho gỗ Cẩm xe với phương pháp sấy chân không gia nhiệt bằng hồng ngoại, tiến hành thực nghiệm xác định các yếu tố công nghệ ảnh hưởng đến các yếu tố kỹ thuật và chất lượng, chính vì vậy nghiên cứu tiến hành thí nghiệm sấy chân không gỗ Cẩm xe trên 4 dạng kích thước: 20 x 50 x 500 mm, 50 x 50 x 500 mm, 20 x 150 x 500 mm, 50 x 150 x 500 mm.

- Theo dõi quá trình giảm ẩm của gỗ
- Theo dõi quá trình tăng nhiệt độ của gỗ Cẩm xe
- Xác định thời gian sấy
- Đánh giá chất lượng gỗ sau sấy theo các tiêu chuẩn EDG (European Drying Group) [106].

Thí nghiệm được bố trí theo kiểu hoàn toàn ngẫu nhiên. Các nghiệm thức được bố trí và lặp lại hoặc tất cả các số liệu của các nghiệm thức được thu thập trong điều kiện hoàn cảnh tương đối giống nhau [11].

#### **Tổ chức thí nghiệm chọn các thông số công nghệ đầu vào và đầu ra**

##### ***Chọn yếu tố đầu vào***

Do có rất nhiều yếu tố ảnh hưởng đến các chỉ tiêu kinh tế kỹ thuật của nguyên lý sấy chân không, cho nên trong quá trình nghiên cứu một số thông số

ảnh hưởng sẽ bị loại bỏ nếu nó ảnh hưởng quá ít hoặc không thể điều khiển được trong quá trình khảo nghiệm. Các yếu tố loại bỏ sẽ trở thành các yếu tố ngẫu nhiên tác động nhiều đến quá trình nghiên cứu. Trên cơ sở lý thuyết, tất cả những thông số có ảnh hưởng đến quá trình sấy chân không bao gồm: nhiệt độ sấy, áp suất, cường độ bức xạ hồng ngoại, loại gỗ, độ ẩm gỗ ban đầu, bố trí gỗ trong buồng sấy...

- Loại gỗ (loại nguyên liệu): giới hạn nghiên cứu trên gỗ Cẩm xe (như tên đề tài). Đây là yếu tố cố định nên không thể chọn làm thông số đầu vào.
- Độ ẩm ban đầu của gỗ: theo độ ẩm trung bình của gỗ Cẩm xe khi đưa vào sấy khoảng  $40 \pm 2$  %, với độ ẩm xác định từ thực tế sản xuất nên không thể thay đổi.
- Kết cấu buồng sấy và bố trí phân phối tác nhân sấy: trên cơ sở tham khảo các dạng máy sấy chân không trên thế giới đã và đang sản xuất, cũng như các lý thuyết về sấy chân không, mô hình máy thiết kế đã được phân tích, lựa chọn cho phù hợp trước khi tiến hành thí nghiệm. Chính vì thế các thông số thiết bị được cố định theo mô hình thiết kế.
- Nhiệt độ sấy: nhiệt độ sấy là yếu tố quan trọng trong quá trình sấy. Theo các nghiên cứu cho thấy ở nhiệt độ sấy nhất định, tương ứng áp suất nhất định sẽ đạt độ sôi tương ứng, hai thông số nhiệt độ và áp suất có mối quan hệ lẫn nhau cùng ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng gỗ cũng như thời gian sấy, áp suất và nhiệt độ trong buồng sấy phải đảm bảo đạt giá trị tại trạng thái sôi của nước thì quá trình sấy chân không mới phát huy được tác dụng, thấp hơn thì sấy không hiệu quả, cao hơn thì sản sinh khuyết tật. Nói cách khác, không thể xem nhiệt độ và áp suất là hai thông số độc lập để nghiên cứu. Các công trình nghiên cứu về sấy của Iman Golpour và cộng sự [55], Jinfeng Bi, Qinquin Chen, Yuhan Zhou, Xuan Liu, Xinye Wu, Ruijuan Chen [57], Safary và Amiri [90] đã đánh giá nhiệt độ là yếu tố quan trọng ảnh hưởng chất lượng vật liệu. Vì thế chỉ chọn một trong hai thông số, và nhiệt độ là yếu tố được chọn làm thông số đầu vào ( $X_1$ )
- Cường độ bức xạ hồng ngoại: Cường độ bức xạ hồng ngoại của đèn ảnh hưởng đến thời gian sấy và tỷ lệ khuyết tật của gỗ, việc điều chỉnh cường độ

bức xạ phù hợp góp phần rút ngắn thời gian sấy nhưng cũng hạn chế khuyết tật của gỗ trong quá trình sấy. Các nghiên cứu của Iman Golpour và cộng sự [55], Jinfeng Bi, Qinquan Chen, Yuhang Zhou, Xuan Liu, Xinye Wu, Ruijuan Chen [57], Safary và Amiri [90], Zhihua Geng, Mehdi Torki, Mohammad Kaveh, Mohsen Beigi, Xuhai Yang, [116] đã đánh giá cường độ bức xạ hồng ngoại là yếu tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình sấy chân không hồng ngoại, vì vậy được chọn làm thông số đầu vào ( $X_2$ ).

- Tham khảo kết quả của các nghiên cứu trên thế giới để lựa chọn các thông số đầu vào, kiểm tra các thông số đầu vào bằng việc tiến hành thí nghiệm thăm dò. Thông qua thí nghiệm thăm dò cài đặt nhiệt độ  $50^{\circ}\text{C}$ , theo dõi thông qua cảm biến nhiệt, cài đặt cường độ bức xạ hồng ngoại  $600\text{W}/\text{m}^2$ , điều khiển mức cường độ thông qua dimer tăng giảm. Quá trình tăng giảm cường độ bức xạ không ảnh hưởng đến nhiệt độ, khi cường độ tăng thì rút ngắn thời gian đạt nhiệt độ, khi cường độ giảm thì kéo dài thời gian đạt nhiệt độ, nhưng không làm thay đổi nhiệt độ sấy. Kết quả thí nghiệm thăm dò thể hiện nhiệt độ và cường độ bức xạ là hai thông số độc lập không ảnh hưởng, không phụ thuộc nhau.

### **Chọn yếu tố đầu ra**

Thông qua các nghiên cứu Zhengbin He, Fe Yang, Yiqing Peng, Songlin Yi [114], Sachin Gupta1, V. S. Kishan Kumar (2017) [89], Altun, Yapici, Korkmaz, [28], tiến hành phân tích đánh giá sơ bộ các yếu tố đầu ra như sau:

- Độ ẩm của gỗ sau khi sấy: Độ ẩm của gỗ là thông số hết sức quan trọng ảnh hưởng đến chất lượng gỗ cũng như đảm bảo các yêu cầu gia công phục vụ cho chế biến về sau. Theo các nghiên cứu Altun, Yapici, Korkmaz, [28], Sachin Gupta1, Kishan Kumar (2017) [89], độ ẩm của gỗ thích hợp cho quá trình gia công từ 8 đến 12%. Trong một mẻ sấy, độ ẩm cuối cùng là thông số quan trọng quyết định thời điểm kết thúc một quá trình sấy. Vấn đề là độ đồng đều về độ ẩm của gỗ sau khi sấy và được đặc trưng bằng độ lệch chuẩn (standard deviation) trong thống kê. Nếu độ lệch chuẩn cao, những thanh có độ ẩm cao hơn thì không đạt yêu cầu, còn thanh thấp hơn thì lại tốn chi phí sấy và dễ bị nứt tét, cong vênh. Tuy

nhiên với máy sấy thí nghiệm cỡ nhỏ (kích thước buồng sấy dạng thí nghiệm) cho thấy độ chênh lệch độ ẩm của các thanh gỗ trong cùng một mẻ sấy là không đáng kể. Trong giới hạn của luận án yếu tố này được xem như một ràng buộc và độ ẩm sau sấy của gỗ là 8 - 10% nên không chọn làm thông số đầu ra.

- Thời gian sấy: thời gian sấy hoàn thành một mẻ sấy, đây là yếu tố quan trọng, phụ thuộc vào yếu tố đầu vào nhiệt độ và cường độ bức xạ hồng ngoại đồng thời yếu tố này có thể đo lường được nên chọn làm thông số đầu ra ( $Y_1$ ).
- Chất lượng của gỗ sấy (tỷ lệ khuyết tật) : Chất lượng gỗ sấy được đánh giá qua ứng suất dư trong gỗ, các khuyết tật của gỗ thông qua các chỉ tiêu: độ ẩm đồng đều các vị trí, màu sắc, độ cong vênh, độ nứt (theo tiêu chuẩn EDG [106])... Tất cả các chỉ tiêu này ngoài việc đảm bảo cho chất lượng gỗ đúng theo qui cách còn ảnh hưởng rất lớn đến giá trị về mặt kinh tế của sản phẩm. Trong chỉ tiêu về chất lượng, yếu tố này rất quan trọng để đánh giá chất lượng sản phẩm gỗ sau sấy, vì vậy chọn làm thông số đầu ra ( $Y_2$ ).

Dựa vào kết quả phân tích các thông số đầu vào ( $X_1, X_2$ ) và thông số đầu ra ( $Y_1, Y_2$ ) bao gồm các yếu tố:

$X_1$  : nhiệt độ sấy ( $^{\circ}\text{C}$ )

$X_2$  : cường độ bức xạ hồng ngoại ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$Y_1$ : thời gian sấy (h)

$Y_2$  : tỷ lệ khuyết tật gỗ (%) (theo tiêu chuẩn đánh giá EDG [106])

Theo kết quả nghiên cứu tổng quan các công trình nghiên cứu trước đó, nghiên cứu lựa chọn phạm vi nghiên cứu của các thông số đầu vào có giá trị như sau:

- Qua tham khảo, kế thừa một số công trình đã công bố như của Chen và cộng sự [35, 36, 37], Scott Lyon, Scott Bowe, Michael Wiemann [93] chọn phạm vi nghiên cứu nhiệt độ TNS nằm trong giới hạn từ  $40 \div 60^{\circ}\text{C}$ .

- Kế thừa công trình nghiên cứu của Safary và ctv [90], Iman Golpour và cộng sự [55], Erzsébet Cserta [39] chọn phạm vi nghiên cứu công suất phát hồng ngoại nằm trong khoảng  $200 \text{ W} \div 750 \text{ W}$ .

Với các thông số nghiên cứu vừa xác định, có thể mô tả đối tượng nghiên cứu như một phần tử hộp đen với các thông số đầu vào và đầu ra.

Mối quan hệ giữa các thông số đầu vào và đầu ra được xác định bằng phương pháp thống kê thực nghiệm. Mối quan hệ này được đánh giá và kiểm tra định tính bằng phương pháp phân tích phương sai và định lượng bằng phương pháp phân tích hồi qui, hàm của bài toán được mô tả dưới dạng đa thức.

Phương án quy hoạch thực nghiệm bậc hai bất biến quay của Box & Hunter. Theo phương án bậc 2 mô hình toán học được biểu diễn bằng phương trình hồi qui như sau:

$$y = b_o + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i \neq j=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 \quad (2.27)$$

Trong đó :

$y_i$  : các yếu tố đầu ra

$x_i, x_j$  : các yếu tố đầu vào

$b_o, b_i, b_{ij}$  : các ước lượng hệ số hồi qui, gọi tắt là hệ số hồi quy

Nội dung của phương pháp

Khác với kế hoạch yếu tố toàn phần  $N = 2^k$  và riêng phần  $N = 2^{k-p}$  có tính trực giao nhưng không có tính chất quay, trong hoạch định quay vùng thí nghiệm được mở rộng với hai điểm ngoài cùng được gọi là điểm sao và nó xác định bởi cánh tay đòn  $\alpha = 2^{k/4}$  với  $k < 5$  hoặc  $\alpha = 2^{k-1/4}$  với  $k \geq 5$  ( $k$  là số biến nghiên cứu).

$$\text{vậy số thí nghiệm là : } N = n * (N_1 + N_\alpha + N_0) \quad (2.28)$$

Trong đó :

$N_1 = 2^k$  số thí nghiệm bậc nhất (nhân của kế hoạch)

$N_\alpha = 2 \times k$  số thí nghiệm ở mức điểm sao

$N_0$  số thí nghiệm tại tâm (thí nghiệm ở mức không)

### Lập ma trận thí nghiệm

Dựa trên các nghiên cứu kế thừa, tiến hành thí nghiệm thăm dò để xác định khoảng biến thiên và các mức giá trị của các thông số công nghệ đầu vào.

Do đặc điểm của quá trình nghiên cứu thực nghiệm nên mô hình được biểu diễn dưới hai dạng là: dạng mô hình bậc nhất và dạng đa thức bậc II Box & Hunter [11].



Mô hình thí nghiệm bậc nhất

✦ Số mức thí nghiệm là 3 bao gồm mức cơ sở (mức điểm 0 - mức trung tâm), mức trên (+1), mức dưới (-1)

✦ Số thí nghiệm cần phải tiến hành là:

$$N = N_1 + N_0 = 2^k + N_0 = 2^2 + 3 = 7 \quad (2.29)$$

Trong đó:  $k$  : số thông số đầu vào  $k = 2$

$2^2 = 4$  số thí nghiệm ở mức trên và dưới

3 : số thí nghiệm lặp thực hiện ở mức trung tâm

Mô hình thí nghiệm bậc hai

✦ Số mức thí nghiệm là 5 bao gồm mức cơ sở (mức điểm 0 - mức trung tâm), mức trên (+1), mức dưới (-1), mức sao trên ( $+\alpha$ ) và mức sao dưới ( $-\alpha$ )

✦ Số thí nghiệm cần phải tiến hành là :

$$N = N_1 + N_0 + N_s = 2^k + N_0 + 4 = 2^2 + 5 + 4 = 13 \quad (2.30)$$

Trong đó:  $k$  : số thông số đầu vào  $k = 2$

$2^2 = 4$  số thí nghiệm ở mức trên và dưới

5 : số thí nghiệm lặp thực hiện ở mức trung tâm

### 2.13 Phương pháp tối ưu hóa

Bài toán tối ưu hóa được áp dụng trong việc xác định các chỉ tiêu kinh tế kỹ thuật tối ưu cho từng khâu công nghệ trong quá trình nghiên cứu.

Nội dung chủ yếu của bài toán tối ưu dựa theo các hàm toán học được xây dựng bằng phương pháp thống kê thực nghiệm. Trong đó hàm mục tiêu là những chỉ tiêu kinh tế - kỹ thuật đặc trưng cho mục đích nghiên cứu.

Việc tìm kiếm một phương án như vậy không phải là khó nhưng không phải lúc nào cũng thực hiện được. Bởi vì trong sản xuất có rất nhiều yếu tố chi phối đến quá trình mà chưa lường hết được, hoặc những giới hạn hay quy định phải tuân thủ. Trong lý thuyết quy hoạch toán học những giới hạn đó được gọi là những ràng buộc, điều kiện biên hay điều kiện ràng buộc.

Bài toán tối ưu hoá sẽ có nhiều nghiệm số, trong nhiều nghiệm số đó chọn ra một nghiệm. Nghiệm này phải thoả mãn các điều kiện giới hạn và phải có cực trị (cực đại hoặc cực tiểu) của một chỉ tiêu nào đó. Để giải quyết vấn đề này, quy hoạch toán học là công cụ chủ yếu cần sử dụng.

Việc chọn lựa phương án tối ưu trong một tập hợp nhiều phương án chấp nhận được là một quá trình tính toán phức tạp.

Bài toán tối ưu hoá cần tiến hành theo các bước như sau:

- Bước một : Xây dựng mô hình định tính cho vấn đề thực tế. Ở đây cần phải xác định được mục tiêu cần đạt là cái gì, và cái đó bị chi phối bởi yếu tố nào.
- Bước hai : Xây dựng mô hình toán học cho vấn đề đang xét. Mô hình toán học thiết lập các mối quan hệ giữa các biến số và các tham số điều khiển hiện tượng.
- Bước ba : Sử dụng các công cụ toán học để khảo sát và giải quyết bài toán đã thiết lập ở bước hai.
- Bước bốn : Phân tích và kiểm tra lại kết quả tính toán thu được ở bước ba. Xác lập mức độ phù hợp của mô hình lý thuyết với vấn đề thực tế mà nó mô tả. Kiểm tra các điều kiện ràng buộc về kỹ thuật hoặc ràng buộc về vùng thực nghiệm nghiên cứu.

Sau khi thực hiện các bước trên có hai khả năng xảy ra

- Khả năng thứ nhất: kết quả tính toán phù hợp với thực tế, khi đó có thể áp dụng nó vào việc giải quyết vấn đề từ thực tế đặt ra.
- Khả năng thứ hai: kết quả tính toán không phù hợp với thực tế. Trong trường hợp này cần thiết phải kiểm tra thuật toán và phương thức tính toán ở ba bước có đủ độ tin cậy hay không? Nếu kiểm tra thấy rằng nghiệm bài toán thu được tương ứng với qui hoạch đã được xây dựng thì điều đó khẳng định “sai sót” nằm ở bước hai và bước một. Vì thế phải kiểm tra lại bước hai với những thông tin thu ở bước một, việc xây dựng dạng mô hình đã hợp lý chưa, đã phản ánh đúng quy luật của hiện tượng không? Sau đó kiểm tra lại bước một xem có bỏ sót yếu tố nào không? Việc kiểm tra, điều chỉnh và sửa đổi lại mô hình có thể lặp lại nhiều lần cho đến khi thu được kết quả tính toán phù hợp với thực tế để có thể áp dụng vào việc giải quyết các vấn đề do thực tế sản xuất đặt ra.

Từ kết quả nghiên cứu kế hoạch hoá thực nghiệm, chúng ta đã xác định các mô hình thống kê thực nghiệm bậc hai mô tả gần đúng đối tượng nghiên cứu. Dựa trên mô hình bài toán chính là phương trình hồi qui dạng đa thức bậc hai chúng ta có thể xây dựng bài toán tối ưu hoá dạng qui hoạch phi tuyến cho các hàm  $y_1$  và  $y_2 \dots$  của các thông số đầu ra.

### ***Giải bài toán tối ưu một mục tiêu***

Mục tiêu này tùy thuộc vào thông số đầu ra nên có thể tiến đến cực đại (max) và cực tiểu (min). Sử dụng phần mềm Matlab để giải bài toán tối ưu một mục tiêu và đa mục tiêu.  $Y \Rightarrow \max$  hoặc  $\min$

Thoả mãn điều kiện ràng buộc như sau  $-1.414 < x_i < +1.414$ ,  $i=1:2$

### ***Giải bài toán tối ưu đa mục tiêu***

Mục tiêu này tùy thuộc vào thông số đầu ra nên có thể tiến đến cực đại (max) và cực tiểu (min). Sử dụng phần mềm Matlab để giải bài toán tối ưu đa mục tiêu.  $Y_{\text{chung}} (Y_1 ; Y_2) \Rightarrow \max$  hoặc  $\min$

Thoả mãn điều kiện ràng buộc như sau  $-1.414 < x_i < +1.414$ ,  $i=1:2$

## **2.14 Phương pháp xác định thời gian sấy và tỷ lệ khuyết tật gỗ sau sấy**

### ***Xác định thời gian sấy gỗ***

Thời gian sấy được xác định từ lúc bắt đầu quá trình sấy cho đến khi độ ẩm gỗ đạt yêu cầu, kết thúc quá trình sấy.

### ***Xác định tỷ lệ khuyết tật gỗ sau sấy***

Để đánh giá tỷ lệ khuyết tật của gỗ sau sấy, đề tài căn cứ vào các tiêu chí đánh giá chất lượng gỗ theo tiêu chuẩn EDG [106] được hầu hết các nghiên cứu về sấy gỗ sử dụng để đánh giá chất lượng, chi tiết các tiêu chí đánh giá như sau (chi tiết thể hiện phụ lục A):

- Độ ẩm trên thanh gỗ sấy
- Khuyết tật nứt, tách trên bề mặt
- Khuyết tật nứt trong
- Khuyết tật nứt đầu
- Khuyết tật mo móp, biến màu gỗ

Tính toán xác định tỷ lệ khuyết tật gỗ sau sấy tiến hành như sau :

- Xác định phần trăm số thanh không đạt độ ẩm yêu cầu trên tổng số thanh gỗ sấy, theo tiêu chí độ ẩm

Dựa vào tiêu chuẩn EDG [106] tiến hành xác định số thanh đạt và không đạt độ ẩm sau sấy. Dùng công thức tính phần trăm số thanh không đạt theo tiêu chí độ ẩm như sau:

$$Y_2 = \frac{N_{tkd}}{N_{say}} \times 100\% \quad (2.31)$$

Trong đó:  $N_{tkd}$ : số thanh độ ẩm không đạt

$N_{say}$ : tổng số thanh gỗ sấy

$Y_2$ : tỷ lệ phần trăm không đạt độ ẩm

- Xác định tính phần trăm thể tích gỗ khuyết tật trên tổng thể tích gỗ sấy theo từng tiêu chí: nứt tách trên bề mặt, nứt trong, nứt đầu, mo móp, biến màu.

Dựa vào tiêu chuẩn EDG [106] tiến hành xác định thể tích các vùng khuyết tật trên thanh gỗ sau sấy. Dùng công thức tính phần trăm gỗ khuyết tật sau sấy như sau:

$$Y_{2''} = \frac{V_{kt}}{V_{say}} \times 100\% \quad (2.32)$$

Trong đó:  $V_{kt}$ : thể tích gỗ khuyết tật

$V_{say}$ : thể tích gỗ sấy

$Y_{2''}$ : tỷ lệ phần trăm gỗ khuyết tật

- Tỷ lệ khuyết tật là tổng phần trăm các chỉ tiêu trên.

Công thức tính phần trăm tổng khuyết tật gỗ như sau:

$$Y_2 = Y_2' + Y_{2''} \quad (2.33)$$

Trong đó:  $Y_2$ : tỷ lệ phần trăm tổng khuyết tật gỗ

### 2.15 Phương pháp xử lý số liệu

Để hỗ trợ việc tính toán và mô phỏng, qui hoạch thực nghiệm, tối ưu hóa nghiên cứu sử dụng các phần mềm COMSOL, STATGRAPHICS, MATLAB, EXCEL, CALCULATION trong nghiên cứu này.

### Kết luận chương 2

Nghiên cứu trong chương 2 đã thực hiện được các công việc như sau:

- Nghiên cứu các phương pháp xác định các tính chất nhiệt vật lý gỗ Căm xe bao gồm: khối lượng riêng, nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt, độ ẩm ban đầu, độ ẩm cân bằng, độ ẩm bão hòa thớ gỗ.
- Nghiên cứu các phương pháp xác định các thông số có liên quan đến động học sấy khi sấy chân không hồng ngoại gỗ Căm xe như: hệ số khuếch tán ẩm (D), hệ số truyền ẩm ( $h_m$ ), hệ số trao đổi nhiệt (h), hệ số phát xạ ( $\epsilon$ ), ẩn nhiệt hóa hơi ( $\Delta h$ )
- Với phương pháp, kết hợp giữa tính toán lý thuyết, số liệu kết quả thực nghiệm và thuật toán tối ưu xác định các thông số D,  $h_m$ , h,  $\epsilon$ . Điều này góp phần giảm được số lượng thực nghiệm đáng kể khi xác định các thông số cần thiết có trong phương trình truyền nhiệt truyền ẩm của vật liệu gỗ Căm xe.
- Phân tích phương pháp đánh giá mô hình toán, lựa chọn phần mềm hỗ trợ mô phỏng khi nghiên cứu lý thuyết quá trình sấy chân không gỗ Căm xe.
- Bằng nghiên cứu thăm dò xác định các thông số và miền giá trị của các thông số công nghệ sấy chân không hồng ngoại gỗ Căm xe
- Thực nghiệm sấy chân không hồng ngoại trên 4 dạng kích thước khác nhau bằng phương pháp qui hoạch thực nghiệm để xác định các giá trị thông số công nghệ sấy phù hợp
- Phân tích đánh giá chất lượng gỗ sau sấy thông qua các tiêu chuẩn chất lượng
- Tổng hợp xử lý số liệu bằng các phần mềm tính toán và xử lý kết quả thực nghiệm.

### **Chương 3**

## **KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN**

### **3.1 Kết quả xác định tính chất nhiệt vật lý của gỗ Cẩm xe**

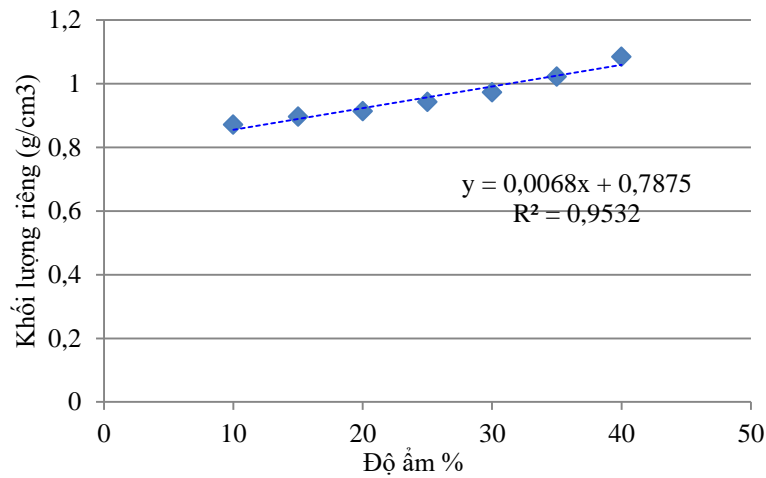
#### **3.1.1 Xác định khối lượng riêng của gỗ Cẩm xe**

Khối lượng riêng của gỗ (theo một số tài liệu chuyên ngành gỗ còn gọi khối lượng thể tích) tại các giá trị độ ẩm theo TCVN 8048 - 2 : 2009 [21],[26]. Để xác định xác định khối lượng riêng của gỗ tại các giá trị độ ẩm dùng phương pháp cân sấy được trình bày mục 2.3.1 chương 2. Thực nghiệm xác định khối lượng riêng của gỗ được trình bày kết quả thể hiện phụ lục 1. Khối lượng riêng của gỗ Cẩm xe được xác định trong phạm vi độ ẩm từ 10% đến 40%. Kết quả xác định được khối lượng riêng của gỗ tại các mức độ ẩm thay đổi trong phạm vi 0,871 – 1,084 g/cm<sup>3</sup>.

Giá trị được thể hiện trong hình 3.1, từ kết quả thực nghiệm cho thấy khối lượng riêng của gỗ tăng khi độ ẩm tăng, mối quan hệ giữa khối lượng riêng và độ ẩm thể hiện qua phương trình tương quan hồi qui, kiểm định có ý nghĩa của các hệ số hồi quy theo chuẩn Student, kiểm tra sự tương thích của phương trình với kết quả thực nghiệm theo chuẩn Fisher đã thu được phương trình như sau:

$$\rho_{wo} = 0,0068.W + 0,7875 \quad (3.1)$$

Với :  $W = 10 - 40\%$ ,  $\rho_{wo}$  khối lượng riêng gỗ Cẩm xe ( $\text{g/cm}^3$ ),  $W$  độ ẩm gỗ (%).



**Hình 3.1.** Mối quan hệ tương quan khối lượng riêng và độ ẩm của gỗ Cẩm xe

Để biểu diễn mối quan hệ giữa khối lượng riêng của gỗ Cẩm xe với độ ẩm, sử dụng phương trình (3.1) để thể hiện mối quan hệ tương quan giữa các thông số. Do đó phương trình (3.1) có thể dùng để dự đoán khối lượng riêng của gỗ Cẩm xe khi biết được các giá trị ẩm độ của gỗ.

Khối lượng riêng gỗ Cẩm xe khô kiệt, thực nghiệm đã tiến hành xác định cho kết quả thể hiện chi tiết phụ lục 2.

$$\rho_{wodry} = \frac{m_{wodry}}{V_{wodry}} = \frac{7,966}{10,11} = 0,788(\text{g/cm}^3)$$

Một số nghiên cứu của các tác giả Chen, Lamb [38], Souhila Kadem [96] về mối quan hệ khối lượng riêng với độ ẩm của gỗ sậy. Các phương trình tương quan xác định khối lượng riêng của gỗ tại các mức độ ẩm khác nhau, điều này góp phần hỗ trợ quá trình tính toán và dự đoán khối lượng riêng nguyên liệu gỗ tại mỗi giá trị độ ẩm nhất định.

$$\rho = G_m \times (1 + 0,01 \times W) \times \rho_{wa} \quad [38] \quad (3.2)$$

$$\rho = 1000G_m \left(1 + \frac{W}{100}\right) \quad [96] \quad (3.3)$$

Nguyên cứu của Guler, Dilek [50] về khối lượng riêng trung bình tại độ ẩm 13% của gỗ Sồi (*Quercus robur*) là  $0,753 \text{ g/cm}^3$  khi sấy đối lưu bằng không khí,  $0,749 \text{ g/cm}^3$  khi sấy chân không sóng cao tần, gỗ Óc Chó (*Juglans regia*) là

0,702 g/cm<sup>3</sup> khi sấy đối lưu bằng không khí, 0,691 g/cm<sup>3</sup> khi sấy chân không sóng cao tần. Thông qua kết quả cho thấy không sự khác biệt đáng kể về kết quả khối lượng riêng khi dùng phương pháp sấy khác nhau, trong phạm vi  $\pm 0,004 - 0,011$ . Theo nghiên cứu của Bijan Adl-Zarrabi, Lars Boström [32] khối lượng riêng gỗ Thông Nauy (*Picea abies*) là 0,503 g/cm<sup>3</sup>. Nghiên cứu của Josue cho gỗ Cẩm xe 9 tuổi ở vùng Sabah, Malaysia có khối lượng riêng khô kiệt 0,78 g/cm<sup>3</sup> [58], kết quả này khá tương đồng với kết quả đề tài là 0,788 g/cm<sup>3</sup>.

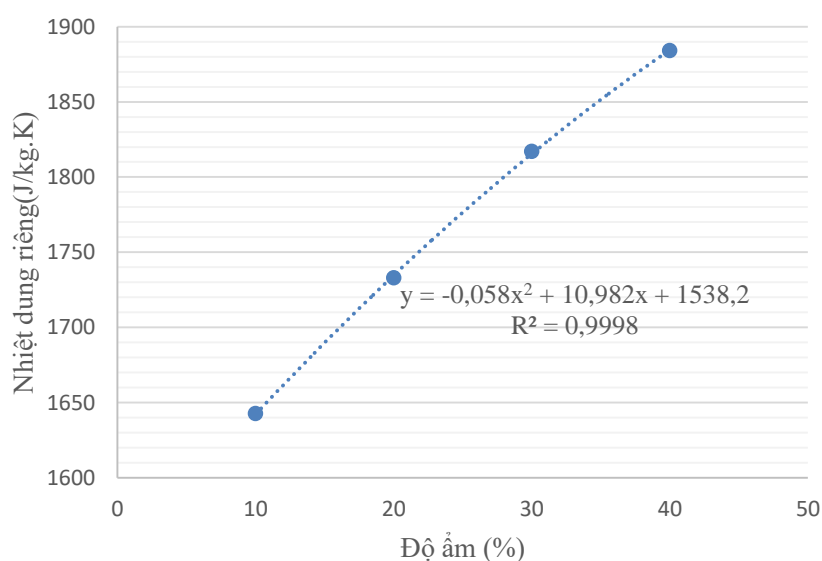
### 3.1.2 Xác định nhiệt dung riêng

Thực nghiệm xác định nhiệt dung riêng của gỗ Cẩm xe theo phương pháp trình bày mục 2.3.2 chương 2, kết quả thể hiện phụ lục 3 và hình 3.2. Kết quả cho thấy nhiệt dung riêng của gỗ Cẩm xe thay đổi theo ẩm độ và đạt giá trị từ 1640,7 đến 1884,05 J/kg.K tương ứng với ẩm độ thay đổi từ 10% đến 40%.

Từ kết quả thí nghiệm nhận thấy rằng nhiệt dung riêng của gỗ Cẩm xe tăng với sự gia tăng độ ẩm của gỗ. Quan hệ giữa nhiệt dung riêng của gỗ  $C_{wop}$  (J/kg.K) theo độ ẩm  $W(\%)$  được biểu diễn bằng phương trình tương quan thể hiện hình 3.2, kiểm định ý nghĩa của các hệ số hồi quy theo chuẩn Student, kiểm tra sự tương thích của phương trình với kết quả thực nghiệm theo chuẩn Fisher đã thu được phương trình tương quan như sau:

$$C_{wop} = -0,058.W^2 + 10,982.W + 1538,2 \quad (3.4)$$

Với:  $W = 10 - 40\%$ ,  $W$  là Độ ẩm (%),  $C_{wop}$  là nhiệt dung riêng (J/kg.K)





### Hình 3.2. Mối quan hệ tương quan nhiệt dung riêng và độ ẩm

Kết quả hình 3.2 cho thấy, mối quan hệ nhiệt dung riêng của gỗ Cẩm xe với độ ẩm là phương trình hàm bậc 2 với  $C_{wop} = f(W) = -0,058.W^2 + 10,982.W + 1538,2$  ( $10 \leq W \leq 40$ ), khi độ ẩm thay đổi trong khoảng từ 10% đến 40% thì nhiệt dung riêng cũng thay đổi theo hướng tăng dần. Điều này thể hiện sự thay đổi của độ ẩm sẽ làm thay đổi nhiệt dung riêng của gỗ Cẩm xe. Bên cạnh đó, một số nghiên cứu của Chen and Lamb [38] thể hiện mối quan hệ nhiệt dung riêng và độ ẩm thông qua phương trình sau:

$$C_{wop} = \frac{0,324 + 0,01 \times W}{1 + 0,01 \times W} \quad (3.5)$$

Nghiên cứu của Souhila Kadem [96] cho thấy nhiệt dung riêng gỗ phụ thuộc vào nhiệt dung riêng của nước, vật liệu khô tuyệt đối và độ ẩm thể hiện các phương trình như sau:

$$C_{wop} = \frac{C_{wodryp} + 0,01 C_{wap} W}{(1 + 0,01 W) + A_c} \quad (3.6)$$

$$C_{wodryp} = 0,1031 + 0,003867.T \quad (3.7)$$

$$A_c = W(-0,06191 + 2,36.10^{-4}T - 1,3310^{-4}W) \quad (3.8)$$

Nghiên cứu của Anusha, Samarasekara, Ramal, Coorey [29] cho gỗ Sri Lankan với Attoniya  $1694 \pm 0.055$  (J/kg.K), Pine  $1732 \pm 0.054$  (J/kg.K), Halmilla  $1715 \pm 0.064$  (J/kg.K), Ginisapu  $1736 \pm 0.045$  (J/kg.K), Rubber  $1724 \pm 0.047$  (J/kg.K) tại độ ẩm 10%. Các tác giả cũng đã nghiên cứu mối quan hệ nhiệt dung riêng và độ ẩm ( $W$  trong phạm vi từ 0 - 25%) thể hiện qua phương trình sau:

$$C_{wop} = 37,2.W + 1340 \quad (3.9)$$

Thông qua các nghiên cứu cho thấy điểm chung các phương trình là mối quan hệ tỷ lệ thuận giữa nhiệt dung riêng và độ ẩm của gỗ, đồng thời kết quả nghiên cứu nhiệt dung riêng gỗ Cẩm xe cũng tương tự.

#### 3.1.3 Xác định hệ số dẫn nhiệt

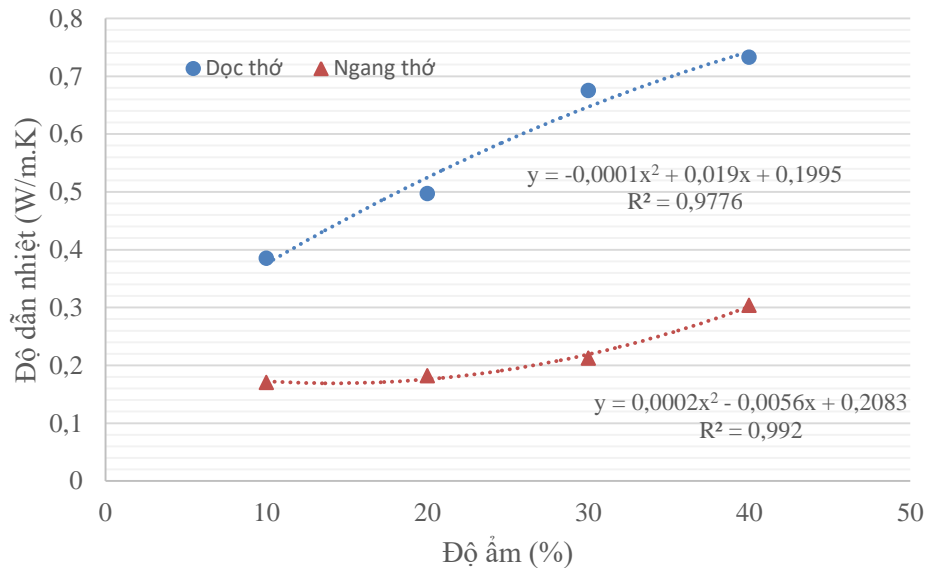
Thực nghiệm xác định độ dẫn nhiệt của gỗ Cẩm xe theo phương pháp trình bày mục 2.3.3 chương 2 kết quả thể hiện phụ lục 4, 5 và hình 3.3, sau khi xử lý số liệu thực nghiệm, tính toán các hệ số phương trình tương quan. Kiểm định sự có nghĩa của các hệ số hồi quy theo chuẩn Student, kiểm tra sự tương thích của

phương trình với kết quả thực nghiệm theo chuẩn Fisher đã thu được phương trình tương quan như sau :

$$\text{Dọc thớ} : k_l = -0,0001 \cdot W^2 + 0,019 \cdot W + 0,1995 \quad (3.10)$$

$$\text{Ngang thớ} : k_r = 0,0002 \cdot W^2 - 0,056 \cdot W + 0,2083 \quad (3.11)$$

Với:  $W = 10 - 40\%$ ,  $W$  là độ ẩm (%),  $k_l$ ;  $k_r$  là độ dẫn nhiệt dọc thớ và ngang thớ ( $W/m.K$ )



**Hình 3.3.** Mối quan hệ tương quan hệ số dẫn nhiệt và độ ẩm

Hình 3.3 cho thấy mối quan hệ độ ẩm và độ dẫn nhiệt của gỗ Cắm xe là một hàm bậc 2 với  $k = f(W) = b_0 + b_1W + b_2W^2$  ( $10 \leq W \leq 40$ ,  $b_1 > 0$ ), khi độ ẩm tăng thì độ dẫn nhiệt theo dọc thớ gỗ và ngang thớ đều tăng. Tuy nhiên, hệ số dẫn nhiệt theo dọc thớ tăng nhanh hơn theo chiều ngang thớ, kết quả này liên quan đến đặc điểm cấu tạo của gỗ, chính điều này khẳng định theo nguyên lý dẫn nhiệt theo chiều dọc thớ gỗ thuận lợi vì đây là chiều thớ dẫn truyền nước và chất dinh dưỡng, nhựa nguyên...cho thân cây sinh trưởng và phát triển, vì vậy hoàn toàn phù hợp với đặc điểm cấu trúc tự nhiên của nguyên liệu gỗ.

Các nghiên cứu hệ số dẫn nhiệt Chen and Lamb [38], Souhila Kadem [96] cho thấy ảnh hưởng độ ẩm của gỗ như sau:

Hệ số dẫn nhiệt dọc thớ gỗ [38]:

$$k_l = 4,18 \times [G_m \times (4,8 + 0,09 \times W)0,57] \times 10^{-5} \quad (3.12)$$

Hệ số dẫn nhiệt ngang thớ gỗ [38]:

$$k_r = 4,18 \times [G_m \times (4,8 + 0,125 \times W)0,57] \times 10^{-5} \quad (3.13)$$

$$k_l = 2,5 \times k_r \quad (3.14)$$

Hệ số dẫn nhiệt theo chiều ngang thứ gỗ [96]:

$$k_z = k_y = G_m(0,1941 + 0,004064W) + 0,01864 \quad (3.15)$$

Hệ số dẫn nhiệt theo chiều dọc thứ gỗ [96]:

$$k_x = 2k_y = 2k_z \quad (3.16)$$

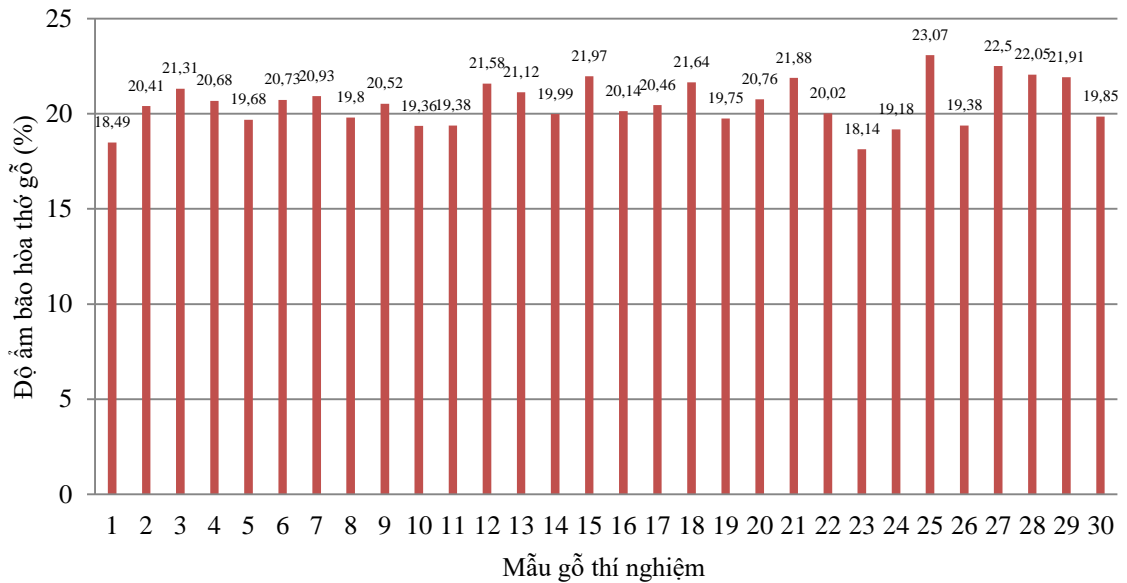
Với: W là độ ẩm (%),  $G_m$ : trọng lượng riêng gỗ

Theo nghiên cứu của Nakaya, Yamasaky, Fukuta và Sasaki, [81] độ dẫn nhiệt ván nhân tạo làm từ sợi gỗ có giá trị 0,069 (W/m.K) thấp hơn 5 lần độ dẫn nhiệt dọc thứ và 2,5 lần ngang thứ của gỗ Căm xe khi độ ẩm  $W = 10\%$  .

Ba thông số khối lượng riêng, nhiệt dung riêng và hệ số dẫn nhiệt của gỗ Căm xe giữ vai trò quan trọng là các thông số trong phương trình truyền nhiệt, vì vậy để giải bài toán truyền nhiệt khi sấy chân không gỗ Căm xe cần thiết phải xác định giá trị của các thông số này.

### 3.2 Độ ẩm bão hòa thứ gỗ - $W_{woFSP}$ (%)

Độ ẩm bão hòa hay còn gọi là điểm bão hòa thứ gỗ là độ ẩm xác định bởi lượng nước liên kết tối đa trong gỗ, nó là ranh giới đánh dấu mọi sự thay đổi về tính chất cơ lý của gỗ, quá trình thay đổi hình dạng, kích thước của gỗ cũng như cường độ chỉ xảy ra khi độ ẩm gỗ dưới điểm bão hòa thứ gỗ. Đối với các loại gỗ khác nhau điểm bão hòa thứ gỗ khác nhau. Nghiên cứu này đã tiến hành thực nghiệm theo phương pháp đã trình bày ở mục 2.3.4 chương 2 để xác định điểm bão hòa thứ gỗ Căm xe ở điều kiện môi trường có nhiệt độ không khí  $T = 32^\circ\text{C}$ , độ ẩm tương đối  $\varphi = 75\%$  tại thành phố Hồ Chí Minh, kết quả chi tiết ở phụ lục 6 và được thể hiện hình 3.4.



**Hình 3.4.** Kết quả xác định độ ẩm bão hòa thứ gỗ của gỗ Cẩm xe

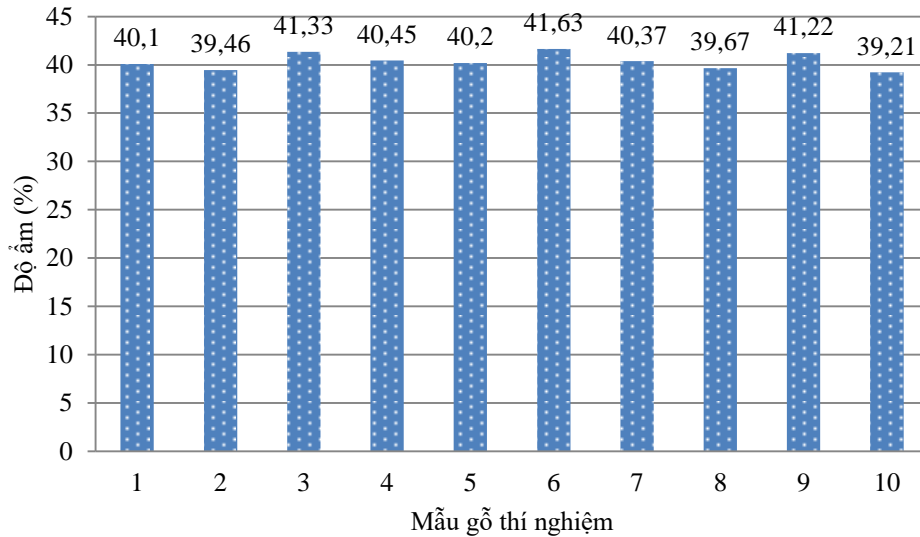
Hình 3.4 thể hiện kết quả thực nghiệm xác định độ ẩm bão hòa thứ gỗ Cẩm xe trên 30 mẫu gỗ, giá trị độ ẩm bão hòa đạt được trong khoảng 18,14 – 23,07%. Thông qua tính toán xử lý số liệu, kết quả giá trị trung bình độ ẩm bão hòa thứ gỗ Cẩm xe đạt giá trị  $W_{woFSP} = 20,556\%$ .

### 3.3 Độ ẩm thăng bằng (cân bằng) – $W_{woEQ}$ (%)

Độ ẩm thăng bằng (cân bằng) của gỗ Cẩm xe trong môi trường không khí được xác định theo dựa 3 yếu tố: độ ẩm thăng bằng của gỗ, nhiệt độ môi trường, độ ẩm tương đối môi trường, thể hiện biểu đồ hình 2.2 mục 2.3.5 chương 2. Thông qua biểu đồ xác định độ ẩm thăng bằng của gỗ tại thành phố Hồ Chí Minh thời điểm nhiệt độ  $T = 32^{\circ}\text{C}$ , độ ẩm tương đối không khí  $\varphi = 75\%$ , cho kết quả độ ẩm thăng bằng là  $W_{woEQ} = 14\%$ .

### 3.4 Độ ẩm ban đầu – $W_{woIN}$ (%)

Độ ẩm ban đầu của gỗ Cẩm xe thí nghiệm là thông số quan trọng quá trình sấy, vì vậy cần thiết để xác định độ ẩm gỗ Cẩm xe trước khi áp dụng qui trình sấy. Thí nghiệm xác định giá trị độ ẩm ban đầu được thực hiện theo phương pháp trình bày mục 2.3.6 chương 2. Kết quả thực nghiệm đạt giá trị trung bình  $W_{woIN} = 40,36\%$  được trình bày ở phụ lục 2 và được thể hiện qua hình 3.5.



**Hình 3.5.** Kết quả xác định độ ẩm ban đầu của gỗ Cẩm xe

Hình 3.5 thể hiện kết quả thực nghiệm xác định độ ẩm ban đầu Cẩm xe trên 10 mẫu gỗ, giá trị độ ẩm ban đầu trong khoảng 39,21 – 41,63%. Thông qua tính toán xử lý số liệu, kết quả giá trị trung bình độ ẩm ban đầu gỗ Cẩm xe đạt giá trị  $W_{woIN} = 40,36\%$ .

### 3.5 Ảnh hưởng của độ ẩm đến tính chất nguyên liệu gỗ Cẩm xe

Nguyên liệu gỗ là hệ thống ba trạng thái được thể hiện như sau: pha rắn gồm có phần gỗ, pha lỏng bao gồm nước tự do và nước liên kết và pha khí bao gồm không khí và hơi nước. Phân tích sự cân bằng của ba pha này trong gỗ làm cơ sở khoa học để xác định về động lực của quá trình truyền nhiệt và thoát ẩm trong sấy gỗ chân không.

Thể tích của gỗ bằng tổng thể tích mỗi pha (Chen, 1997) [35].

$$V_{sum} = V_{wa} + V_{wo} + V_a \quad (3.17)$$

Trong đó:  $V_{sum}$ : tổng thể tích ( $cm^3$ ),  $V_{wo}$ : thể tích phần gỗ ( $cm^3$ ),  $V_a$ : thể tích phần trống (khí) trong gỗ ( $cm^3$ ),  $V_{wa}$ : thể tích của nước và ẩm trong gỗ ( $cm^3$ )

Phần thể tích gỗ ( $V_{wo}$ ) có thể được tính toán như (Chen, 1997) [35].

$$V_{wo} = \frac{\frac{W_{wo}}{\rho_{sowo}}}{\frac{\rho_{woba}\rho_{wa}}{\rho_{sowo}}} \quad (cm^3) \quad (3.18)$$

Phần thể tích nước ( $V_{wa}$ ) có thể được tính toán như (Chen, 1997) [35].

$$V_{wa} = \frac{\frac{W_{wa}}{d_{wa}}}{\frac{W_{wo}}{\rho_{woba} d_{wa}}} = \rho_{woba} \cdot \frac{W}{100} \quad (\text{cm}^3) \quad (3.19)$$

Phần thể tích khí ( $V_a$ ) là trạng thái xốp (nếu hơi nước không được xem xét) điều này có thể tính toán theo công thức như sau (Chen, 1997) [35].

$$V_a = 1 - \rho_{woba} \cdot \left(0,667 + \frac{W}{100}\right) \quad (\text{cm}^3) \quad (3.20)$$

Trong đó:  $\rho_{woba}$  : khối lượng riêng cơ bản của gỗ ( $\text{g/cm}^3$ ),  $\rho_{wa}$  : khối lượng riêng của nước ( $\text{g/cm}^3$ ),  $W$ : độ ẩm của gỗ (%),  $\rho_{sowo}$  : khối lượng riêng phần gỗ không tính phần rỗng và phần chứa nước  $\rho_{sowo} = 1,5 \text{ g/cm}^3$  [26]

Dựa vào các công thức kết quả tính toán cho nguyên liệu gỗ Căm xe khi  $W = 40\%$  và  $W = 10\%$  như sau:

$$\rho_{woba} = 0,714 \text{ g/cm}^3 \text{ (tại độ ẩm 20\%)}$$

$$\rho_{wa} = 0,99567 = 1 \text{ (g/cm}^3 \text{) (nhiệt độ } 30^0\text{C)}$$

**Khi độ ẩm gỗ Căm xe  $W = 40\%$**

Thể tích nguyên liệu gỗ (pha rắn)

$$V_{wo} = \frac{\rho_{woba} \rho_{wa}}{\rho_{sowo}} = \frac{0,714 \times 1}{1,5} = 0,476 \quad (\text{cm}^3)$$

Thể tích nước trong gỗ (pha lỏng)

$$V_{wa} = \rho_{woba} \cdot \frac{W}{100} = 0,714 \cdot \frac{40}{100} = 0,286 \quad (\text{cm}^3)$$

Thể tích phần rỗng trong gỗ (pha khí)

$$V_a = 1 - \rho_{woba} \cdot \left(0,667 + \frac{W}{100}\right) = 1 - 0,714 \left(0,667 + \frac{40}{100}\right) = 0,238 \quad (\text{cm}^3)$$

**Khi độ ẩm gỗ Căm xe  $W = 10\%$**

Thể tích nguyên liệu gỗ (pha rắn)

$$V_{wo} = \frac{\rho_{woba} \rho_{wa}}{\rho_{sowo}} = \frac{0,714 \times 1}{1,5} = 0,476 \quad (\text{cm}^3)$$

Thể tích nước trong gỗ (pha lỏng)

$$V_{wa} = \rho_{woba} \cdot \frac{W}{100} = 0,714 \cdot \frac{10}{100} = 0,071 \quad (\text{cm}^3)$$

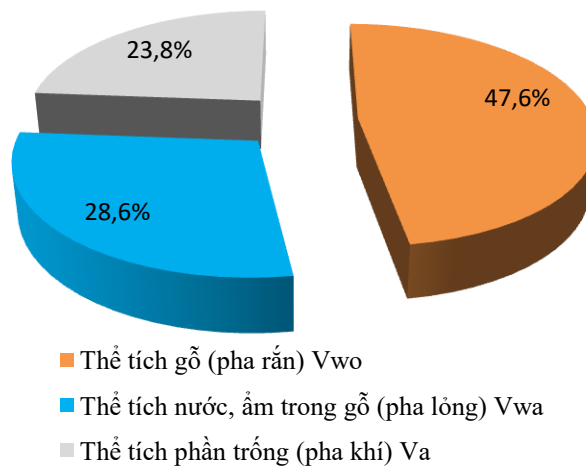
Thể tích phần rỗng trong gỗ (pha khí)

$$V_a = 1 - \rho_{woba} \cdot \left(0,667 + \frac{W}{100}\right) = 1 - 0,714 \left(0,667 + \frac{10}{100}\right) = 0,452 \text{ (cm}^3\text{)}$$

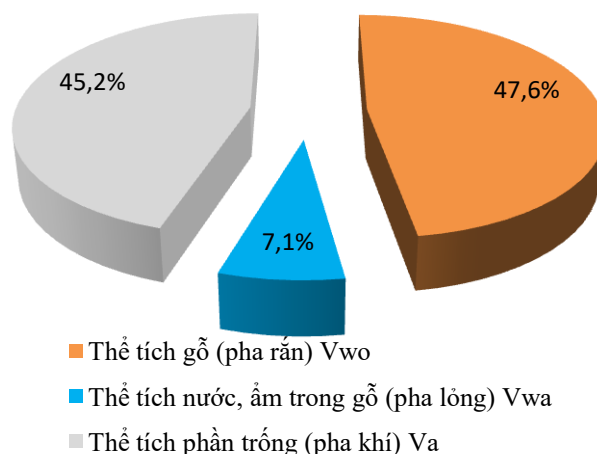
Kết quả tính toán cho sự cân bằng của ba pha cho gỗ Căm xe ( $\rho_{woba} = 0,714 \text{ g/cm}^3$ ) được thể hiện:

- + Phần trăm của nguyên liệu gỗ không thay đổi 47,6%
- + Phần trăm của chỗ trống tăng khi độ ẩm giảm, từ 23,8% lên 45,2%
- + Phần trăm của nước giảm khi độ ẩm giảm, từ 28,6% còn 7,1%

Thông qua hình 3.6 và 3.7 thể hiện sự cân bằng của ba pha tại độ ẩm 40% và 10%. Nếu độ ẩm của gỗ Căm xe với khối lượng riêng cơ bản là 0,714 thì tại độ ẩm  $W = 40\%$ , phần thể tích ẩm là khoảng 0,286 và nguyên liệu gỗ là 0,476, phần trống 0,238. Điều này có nghĩa là  $1 \text{ cm}^3$  gỗ Căm xe sẽ chứa  $0,238 \text{ cm}^3$  phần rỗng,  $0,476 \text{ cm}^3$  phần gỗ và  $0,286 \text{ cm}^3$  phần nước. Nước bao gồm  $0,286/2 = 0,143 \text{ cm}^3$  nước liên kết và  $0,143 \text{ cm}^3$  nước tự do hoặc  $0,143 \text{ gram}$  nước liên kết và  $0,143 \text{ gram}$  nước tự do.



**Hình 3.6.** Phần trăm thể tích các pha trong gỗ Căm xe khi  $W = 40\%$



**Hình 3.7.** Phân trăm thể tích các pha trong gỗ Cắm xe khi  $W = 10\%$

Trong sấy chân không, áp suất bên trong gỗ lớn hơn áp suất môi trường xung quanh, nước hóa hơi thành hơi nước, đồng thời hơi nước được đưa ra ngoài bằng sự chênh lệch của áp suất hơi nước trong môi trường sấy. Vấn đề là bao nhiêu thể tích khí và hơi nước sẽ được đưa ra ngoài trong suốt quá trình sấy chân không.

Nếu  $1 \text{ cm}^3$  gỗ Cắm xe được sấy từ độ ẩm 40% về độ ẩm cuối cùng 10%, thể tích của khí là  $0,238 \text{ cm}^3$  tại độ ẩm 40%. Lượng ẩm tại 40% khoảng 0,286 gram và tại 10% thì khoảng 0,071 gram. Vì vậy tổng lượng ẩm di chuyển khỏi  $1 \text{ cm}^3$  gỗ là  $0,286 - 0,071 = 0,213$  gram. Nếu lượng này của nước hóa hơi ở nhiệt độ là  $50^\circ\text{C}$ , thể tích riêng của hơi bão hòa tại nhiệt độ này là khoảng  $12032 \text{ cm}^3/\text{g}$  (dựa trên bảng hơi)

Vậy, thể tích hơi nước là :  $0,215 \times 12032 = 2586,88 \text{ cm}^3$ . Thể tích này gấp 10869,24 lần thể tích khí trong gỗ. Nếu chỉ một lượng nhỏ nước tự do hóa hơi, thể tích của nó gia tăng rất lớn so với thể tích khí trong gỗ.

### **Kết luận**

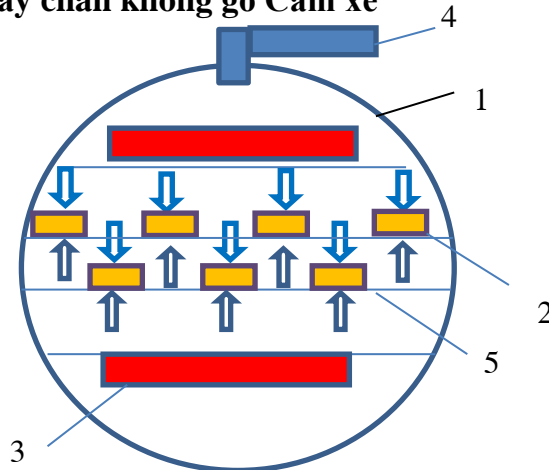
- + Trong quá trình sấy chân không thể tích hơi nước tăng lên khi sự hóa hơi diễn ra. Sự hóa hơi diễn ra mang hơi ẩm thoát ra ngoài, điều này chứng minh dòng hoạt động của chất khí là chiếm ưu thế trong hoạt động giảm ẩm của gỗ.
- + Hoạt động hóa hơi diễn ra theo thứ tự từng lớp từ ngoài vào trong, khi quá trình hóa hơi diễn ra.



- + Các hiện tượng vật lý diễn ra trong hai vùng sôi và vùng chưa sôi bao gồm: quá trình truyền nhiệt, dịch chuyển ẩm trong gỗ với sự biến thiên các thông số nhiệt độ, ẩm độ.

### 3.6 Xây dựng mô hình vật lý, xác định mô hình toán quá trình truyền nhiệt và ẩm trong sấy gỗ chân không

#### 3.6.1 Mô hình sấy chân không gỗ Cắm xe



**Hình 3.8.** Mô hình sấy gỗ Cắm xe bằng phương pháp sấy chân không

1. Buồng sấy, 2. Gỗ Cắm xe, 3. Đèn hồng ngoại,
4. ống dẫn hút chân không, 5. Thanh kê (thanh đỡ)

Sơ đồ mô hình sấy gỗ Cắm xe bằng phương pháp sấy chân không được thể hiện hình 3.8. Hệ thống sấy chân không có kết cấu gồm buồng sấy, hệ thống gia nhiệt bằng đèn hồng ngoại và hệ thống rút chân không, hệ thống điều khiển.

Gỗ Cắm xe (2) độ ẩm ban đầu  $W_{woIN} = 40 \pm 1\%$  được xếp vào trong buồng sấy (1), cài đặt nhiệt độ hệ thống gia nhiệt (3), gỗ được gia nhiệt với sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại. Áp suất bơm chân không cài đặt theo nhiệt độ sấy để đạt điểm sôi của nước trong gỗ, hệ thống vận hành dưới điều kiện áp suất thấp phù hợp điểm sôi của nước, nước trong gỗ hóa hơi di chuyển ra bề mặt gỗ và khuếch tán trong buồng sấy, quá trình này diễn ra liên tục cho đến khi độ ẩm gỗ giảm dần về  $10 \pm 1\%$  đạt yêu cầu sau sấy.

Động lực của quá trình sấy chân không phụ thuộc vào nhiệt độ sấy, áp suất chân không bên trong của buồng sấy và tính chất vật lý của gỗ.

Tại thời điểm đầu, sự sôi xảy ra trên bề mặt và sau đó di chuyển vào bên trong tâm thanh gỗ tốc độ di chuyển phụ thuộc vào nhiệt cung cấp và đặc tính của gỗ như là tính thấm hút và tính dẫn nhiệt của gỗ. Sự di chuyển sự sôi chia hệ

thống thành hai vùng cụ thể là vùng sôi và vùng chưa sôi. Trong vùng sôi, nước tồn tại dạng hỗn hợp là dạng hơi và dạng lỏng. (hình 3.9)

**Hình 3.9.** Biểu diễn quá trình thoát hơi nước khi sấy gỗ chân không

**Các giả thiết khi xây dựng mô hình toán học**

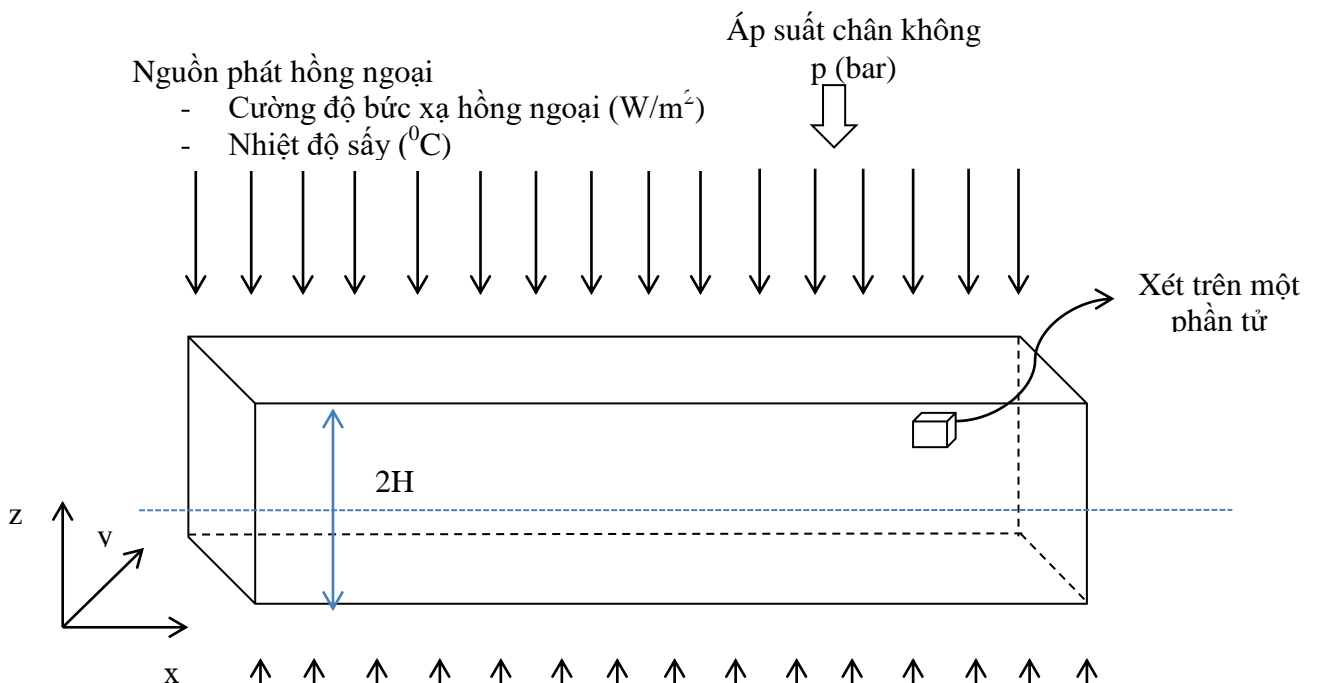
- Mô hình vật thể sấy thanh gỗ có kích thước : 20 x 50 x 500 mm, 50 x 50 x 500 mm, 20 x 150 x 500 mm, 20 x 150 x 500 mm, 50 x 150 x 500 mm.
- Độ ẩm ban đầu gỗ  $W_{woIN} = 40\%$  và nhiệt độ ban đầu phân bố đồng đều trong gỗ, cấu trúc sinh học nguyên liệu là cấu trúc dạng rắn.
- Pha khí là hơi nước được xem khí lý tưởng.
- Nước liên kết và nước tự do có tính chất vật lý như nhau.
- Các thông số nhiệt vật lý, ẩn nhiệt hóa hơi lấy trung bình theo nhiệt độ.
- Truyền nhiệt và truyền ẩm bên trong thanh gỗ được xem là 3 chiều theo phương x, y, z (căn cứ mặt cắt thanh gỗ chọn z: phương tiếp tuyến, y: theo phương xuyên tâm, x : phương dọc thớ gỗ).
- Sự phân bố nhiệt độ và độ ẩm ban đầu của thanh gỗ là đồng nhất.
- Thanh gỗ được xem là vật liệu xám.

- Buồng sấy trang bị cách nhiệt đảm bảo việc tổn thất nhiệt ra môi trường bên ngoài là hạn chế và gần như không đáng kể.
- Để đơn giản hơn cho quá trình nghiên cứu mô hình toán, bỏ qua sự thay đổi thể tích và hình dáng thanh gỗ trong quá trình sấy chân không.
- Quá trình sấy là quá trình thanh gỗ nhận năng lượng mà chủ yếu là nhiệt năng từ một nguồn nhiệt (bức xạ hồng ngoại)

### 3.6.2 Xác định phương trình truyền nhiệt và ẩm trong quá trình sấy gỗ

Mô hình quá trình truyền nhiệt, truyền ẩm bên trong buồng sấy bằng phương pháp sấy chân không bức xạ hồng ngoại được trình bày trong hình 3.10. Thanh gỗ ở dạng thanh kích thước  $50 \times 50 \times 500$  mm. TNS có nhiệt độ  $T_s$ , bơm chân không áp suất  $p$  (bar) phù hợp nhiệt độ sấy, bức xạ hồng ngoại có bước sóng là  $\lambda$ , nguồn phát hồng ngoại có cường độ  $P_{hm}$  được đặt ở phía trên và phía dưới của thanh gỗ.

Quá trình sấy là quá trình VLS nhận năng lượng mà chủ yếu là nhiệt năng từ một nguồn nhiệt nào đó để ẩm từ trong lòng dịch chuyển ra bề mặt và đi vào TNS. Do đó, QTS là quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm xảy ra đồng thời. Quá trình TNTA xảy ra cả ở bên trong VLS và giữa bề mặt VLS với môi trường TNS. Bên trong VLS, quá trình đó được gọi là quá trình dẫn nhiệt và khuếch tán ẩm hỗn hợp. Trao đổi nhiệt - ẩm giữa bề mặt VLS với môi trường TNS là quá trình trao đổi nhiệt - ẩm đối lưu liên hợp. Vì vậy khi phân tích bài toán TNTA trong QTS phải bao gồm bài toán TNTA bên trong và bên ngoài VLS [9], [23].



**Hình 3.10.** Sơ đồ mô tả mô hình vật lý quá trình sấy gỗ Căm xe

Khi nghiên cứu quá trình TNTA cần phải xem xét đến các yếu tố ảnh hưởng của dẫn nhiệt đến khuếch tán ẩm và ngược lại. Trong QTS, mục tiêu là cấp nhiệt để tạo ra dòng dịch chuyển ẩm nên cần xét đến ảnh hưởng của dòng dịch chuyển ẩm đến dòng nhiệt. Truyền nhiệt bức xạ có điểm khác biệt so với truyền nhiệt đối lưu trong việc thiết lập phương trình truyền nhiệt là có xét đến bức xạ nhiệt thông qua hệ số bức xạ nhiệt khi xây dựng điều kiện biên của bài toán về truyền nhiệt và truyền ẩm.

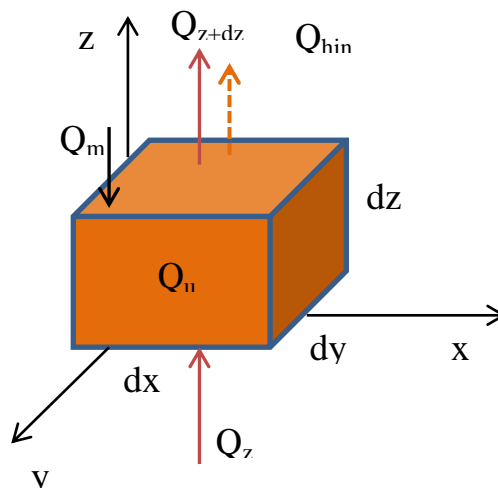
**Thiết lập phương trình truyền nhiệt**

Quá trình truyền nhiệt bao gồm dẫn nhiệt bên trong vật liệu và trao đổi nhiệt giữa bề mặt vật liệu và TNS bằng bức xạ dòng nhiệt từ nguồn bức xạ hồng ngoại truyền đến VLS được VLS hấp thụ trong toàn bộ thể tích.

Dựa trên định luật bảo toàn năng lượng ta có phương trình cân bằng nhiệt cho phân tử vô cùng nhỏ của vật liệu sấy (hình 3.11) xét trên phương z được viết như sau:

$$\sum E_g = \sum E_{in} - \sum E_{out} \quad (3.21)$$

$$Q_u = Q_z + Q_m + Q_{inf} - Q_{z+dz} \quad (3.22)$$



**Hình 3.11.** Cân bằng nhiệt trong một phần tử vô cùng nhỏ

Trong đó:

+  $Q_z$  và  $Q_{z+dz}$  là nhiệt lượng vào và ra của phân tử vô cùng nhỏ tại vị trí  $z$  và  $z+dz$ , theo định luật Fourier được tính như sau:

$$Q_z = -k_p \frac{\partial T}{\partial z} dydx \quad (3.23)$$

$$Q_{z+dz} = Q_z + dQ_z = \left[ -k_p \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( -k_p \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz \right] dydx \quad (3.24)$$

+  $Q_m$  là nhiệt lượng cần thiết cấp cho ẩm biến đổi pha từ lỏng thành hơi trong VLS.

Nhiều nghiên cứu hiện tượng TNTA trong QTS thường không xét đến ảnh hưởng của độ ẩm đến hiện tượng dẫn nhiệt. Tuy nhiên, trong QTS, mục đích chính là cấp nhiệt để ẩm trong vật liệu biến đổi pha từ lỏng thành hơi và tạo ra dòng khuếch tán ẩm từ trong lòng VLS ra bề mặt biên và tại biên sẽ xảy ra quá trình trao đổi nhiệt - ẩm đối lưu giữa các phân tử thuộc biên và TNS.

Trong phương trình truyền nhiệt một số tác giả đã xét đến hiện tượng khuếch tán ẩm ảnh hưởng đến trường nhiệt độ, kết quả cho thấy mô hình toán khi xét đến hiện tượng này có độ chính xác tốt hơn [19]

Trong nghiên cứu này, VLS là gỗ Căm xe có độ ẩm ban đầu khoảng 40% nên ảnh hưởng của dòng ẩm đến hiện tượng dẫn nhiệt cần được xem xét, do đó trong phương trình truyền nhiệt nghiên cứu xét đến hiện tượng khuếch tán ẩm ảnh hưởng đến trường nhiệt độ thông qua nhiệt lượng cần thiết cấp cho ẩm biến đổi pha từ lỏng thành hơi trong VLS và  $Q_m$  được tính theo biểu thức (3.25).

$$Q_m = D\rho_{wodry}C_p \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} dx dy dz \quad (3.25)$$

Trong phương trình (3.25) có  $D$  (kJ/kg),  $\rho_{wodry}$  (kg/m<sup>3</sup>),  $W$  (kg ẩm/kg VLK) lần lượt là hệ số khuếch tán ẩm, khối lượng riêng của vật liệu khô, nhiệt dung riêng của vật liệu sấy và ẩm độ của vật liệu.

+  $Q_{hin}$  là năng lượng cung cấp cho quá trình hóa hơi gọi là ẩn nhiệt hóa hơi

$$Q_{hin} = -m_v \Delta h dx dy dz \quad (3.26)$$

+  $Q_u$  là độ biến thiên nội năng trong phân tử sau khoảng thời gian  $dt$  và được tính theo công thức.

$$Q_u = C_p \rho_{wo} \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.27)$$

Thay thế các phương trình từ (3.23) ÷ (3.27) vào (3.22), ta có phương trình truyền nhiệt được viết như sau.

$$C_p \rho_{wo} \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz = -k_p \frac{\partial T}{\partial z} dy dx + D \rho_{wodry} C_p \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} dx dy dx - m_v \Delta h dx dy dz - \left( \left[ -k_p \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( -k_p \frac{\partial T}{\partial z} \right) dz \right] dy dx \right) \quad (3.28)$$

Rút gọn phương trình (3.28) ta được:

$$C_p \rho_{wo} \frac{\partial T}{\partial t} = k_p \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + D \rho_{wodry} C_p \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} - m_v \Delta h \quad (3.29)$$

Tổng hợp trên 3 phương x,y,z phương trình (3.29) ta được:

$$\rho_{wo} C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_l \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_r \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_r \frac{\partial T}{\partial z} \right) + D \rho_{wodry} C_p \left( \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \right) - m_v \Delta h \quad (3.30)$$

### Thiết lập phương trình truyền ẩm

Theo A.V LuiKov thì gradient nhiệt độ sẽ gây nên sự khuếch tán ẩm trong vật thể [23], [79]. Tuy nhiên, với VLS là thanh gỗ Cắm xe, đây là gỗ chứa nhiều dầu nhựa trong các ống mạch, gây khó khăn quá trình thoát ẩm trong quá trình sấy nhiệt độ cao khi dầu nhựa chảy ra bít các đường thoát ẩm, khi sấy chân không ở nhiệt độ thấp để đảm bảo quá trình thoát ẩm thuận lợi, hạn chế sản sinh khuyết tật co rút, cong vênh gỗ. Nghiên cứu sấy trên một số mức nhiệt độ và lựa chọn nhiệt độ sấy thực nghiệm là 50°C để kiểm chứng. Các nghiên cứu của Erriguible, Bernada, Couture, Roques [44], [45], Lili Zhao, Zhijun Zhang, Shiwei Zhang, Wenhui Zhang [72], Slye [95], Time [99], Yan Yang, Jianxiong Lu, Chunlei Dong, Tianyi Zhan, Jinghui Jiang, Bei Luo [109], nghiên cứu dòng ẩm trong quá trình sấy và ảnh hưởng của dòng nhiệt đến quá trình khuếch tán ẩm là không đáng kể, do đó trong phương trình truyền ẩm bỏ qua ảnh hưởng của dòng nhiệt đến khuếch tán ẩm. Phương trình này có dạng

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial W}{\partial z} \right) - \frac{\dot{m}_v}{\rho_{wodry}} \quad (3.31)$$

Trong đó:

- $\rho_{wo}$  : khối lượng riêng gỗ Cẩm xe ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $C_p$  : nhiệt dung riêng gỗ Cẩm xe ( $\text{J/kg.K}$ )  
 $T$  : nhiệt độ sấy ( $\text{K}$ )  
 $t$  : thời gian sấy (phút)  
 $k_l$  : hệ số dẫn nhiệt theo phương dọc thớ gỗ (phương x) ( $\text{W/m.K}$ )  
 $k_r$  : hệ số dẫn nhiệt theo phương ngang (tiếp tuyến và xuyên tâm gỗ - phương y và z) ( $\text{W/m.K}$ )  
 $m_v$  : tốc độ bay hơi của nước trong gỗ ( $\text{kg/m}^3.\text{s}$ )  
 $D$  : hệ số khuếch tán ẩm ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $\rho_{wodry}$  : khối lượng riêng gỗ khô kiệt ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\Delta h$  : ẩn nhiệt hóa hơi ( $\text{J/kg}$ )  
 $C_{wa}$  : nhiệt dung riêng của nước ( $\text{J/kg.K}$ ) hoặc ( $\text{kg}_m/\text{kg}_{airdry}$ )  
 $W$  : độ ẩm gỗ (biểu thị lượng nước chứa trong gỗ) (% hoặc ( $\text{kg}_m/\text{kg}_{wodry}$ ))  
 $y$  : chiều rộng gỗ - phương tiếp tuyến gỗ (mm)  
 $z$  : chiều dày gỗ - phương xuyên tâm gỗ (mm)  
 $x$  : chiều dài gỗ - phương dọc thớ gỗ (mm)

### **Điều kiện đơn trị để giải bài toán truyền nhiệt truyền ẩm**

Để giải được hệ phương trình truyền nhiệt và truyền ẩm cần phải xác định được điều kiện ban đầu, điều kiện biên phù hợp với phương pháp sấy và từng điều kiện cụ thể như sau:

#### ***Điều kiện ban đầu***

Gỗ được gia nhiệt theo phương thức truyền nhiệt bức xạ hồng ngoại trong môi trường chân không (áp suất thấp). Trong mô hình truyền nhiệt và ẩm, ranh giới nguồn bức xạ nhiệt chân không và gỗ được biểu diễn bằng cách sử dụng điều kiện biên. Tại thời điểm  $t = 0$  trên trục x, gỗ đạt độ ẩm ban đầu  $W = W_{woIN}$  và  $T_0$

nhệt độ ban đầu của gỗ Cắm xe trước khi đưa vào trong buồng sấy. Độ ẩm và nhiệt độ ban đầu thì được giả định là đồng bộ.

$$T = T_0 \text{ khi } t = 0 \quad (3.32)$$

$$W = W_{\text{woIN}} \text{ khi } t = 0 \quad (3.33)$$

### Điều kiện biên truyền nhiệt

Quá trình trao đổi nhiệt tại bề mặt của VLS theo phương z bao gồm các quá trình dẫn nhiệt, trao đổi nhiệt đối lưu và bức xạ giữa các phân tử bề mặt và TNS,. Áp dụng phương trình bảo toàn năng lượng tại mặt biên của VLS, ta có phương trình (3.34 – 3.37).

Trên lớp mặt

$$\begin{aligned} -\left(k_r \frac{\partial T}{\partial z}\right)_{z=H} &= h_R(T_R - T_S)_{z=H} + h(T_R - T_S)_{z=H} \\ &= \varepsilon\sigma_0(T_s + T_R)(T_s^2 + T_R^2)(T_R - T_S) + h(T_R - T_S) \\ &= \varepsilon\sigma_0(T_R^4 - T_S^4) + h(T_R - T_S) \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$-\left(k_r \frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=B} = h(T_R - T_S) \quad (3.35)$$

$$-\left(k_l \frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=L} = h(T_R - T_S) \quad (3.36)$$

Lớp trung tâm

$$\left(k_l \frac{\partial T}{\partial x}\right) = 0 \quad \left(k_r \frac{\partial T}{\partial y}\right) = 0 \quad \left(k_r \frac{\partial T}{\partial z}\right) = 0 \quad (3.37)$$

### Điều kiện biên truyền ẩm

Quá trình trao đổi chất tại bề mặt của VLS theo phương z bao gồm các quá trình trao đổi chất giữa VLS và môi trường. Áp dụng bảo toàn ẩm tại bề mặt của VLS ta có phương trình (3.38, 3.39)

$$D \left(\frac{\partial W}{\partial z}\right) = h_m W_s \quad D \left(\frac{\partial W}{\partial y}\right) = h_m W_s \quad D \left(\frac{\partial W}{\partial x}\right) = h_m W_s \quad (3.38)$$

$$D \left(\frac{\partial W}{\partial z}\right) = 0 \quad D \left(\frac{\partial W}{\partial y}\right) = 0 \quad D \left(\frac{\partial W}{\partial x}\right) = 0 \quad (3.39)$$

Trong đó:



- $\varepsilon$  : hệ số phát xạ của vật xám (còn gọi độ đen)  
 $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8}$  (W/.m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>) hằng số Stephen Boltzmann  
 $T_R$  : nhiệt độ nguồn bức xạ (K)  
 $T_S$  : nhiệt độ bề mặt gỗ nhận nhiệt bức xạ (K)  
 $h_R$  : hệ số truyền nhiệt bức xạ (W/m<sup>2</sup>.K)  
 $h$  : hệ số trao đổi nhiệt (W/m<sup>2</sup>.K)  
 $h_m$  : hệ số truyền ẩm (m/s)  
 $W_{woS}$  : độ ẩm bề mặt gỗ nhận nhiệt bức xạ (%)  
 $W_{woEQ}$  : độ ẩm cân bằng (thăng bằng) (%)

Các phương trình (3.30, 3.31) mô tả quá trình truyền nhiệt - truyền ẩm trong quá trình sấy. Lời giải của hệ phương trình sẽ giúp xác định được nhiệt độ và độ ẩm tại các thời điểm khác nhau.

### 3.7 Giải mô hình toán quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm trong sấy chân không gỗ Căm xe

Để giải phương trình truyền nhiệt không ổn định theo thời gian bằng các phương pháp giải tích, kỹ thuật tách biến, các hàm đổi biến... đã sử dụng. Tuy nhiên trong thực tế có thể gặp các bài toán nhiệt trên các vật thể có cấu trúc đa dạng và các điều kiện biên phức tạp... vì vậy điều này dẫn đến việc phát triển mô hình phương pháp số ra đời để giải các bài toán truyền nhiệt thực tế và truyền nhiệt trong sấy gỗ là một điển hình trong thí nghiệm nghiên cứu.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_l \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_r \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_r \frac{\partial T}{\partial z} \right) + D \rho_{wodry} C_{wa} \left( \frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho_{wo} C_{wop} \frac{\partial T}{\partial \tau} - m_v \Delta h = 0 \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \nabla(D\nabla W) - \frac{\dot{m}_v}{\rho_{wodry}} \quad (3.41)$$

Áp dụng phương pháp Galerkin [24], [25] nhiệt độ được rời rạc theo không gian như sau:

$$T(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) T_i(t) \quad (3.42)$$

ở đây,  $N_i$  là hàm nội suy nhiệt độ theo nhiệt độ các nút, cũng là hàm nội suy tọa độ,  $n$  là số nút trong một phần tử, và  $T_i(t)$  là nhiệt độ tại mỗi nút phụ thuộc thời gian.  $T_i(t)$

$$\int_V N_i \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + D \rho_{wody} c_{wa} \left( \frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - m_v \Delta h - \rho_{wo} C_{wop} \frac{\partial T}{\partial \tau} \right] dV = 0 \quad (3.43)$$

Áp dụng tích phân từng phần 3 số hạng đầu của (3.43) như sau:

Số hạng đầu

$$\begin{aligned} \int_V N_i \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dV &= \int_V N_i \left( k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)_x dx dy dz = \int_V N_i d \left( k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dy dz \\ &= \int_{S_{yz}} N_i \left( k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dy dz - \int_V \left( k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dN_i dy dz \\ &= \int_{S_2} N_i \left( k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) dS_2 - \int_V k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} dx dy dz \end{aligned} \quad (3.44)$$

Hai số hạng còn lại biến đổi tương tự và phương trình (3.43) sẽ thành như sau

$$\begin{aligned} - \int_V \left[ k_x(T) \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k_y(T) \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k_z(T) \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} + N_i D_{ls} \rho_{wody} c_{wa} \left( \frac{\partial M}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial M}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + N_i m_v \Delta h + N_i \rho_{wo} C_{wop} \frac{\partial T}{\partial \tau} \right] dV \\ + \int_{S_2} N_i k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} l dS_2 + \int_{S_2} N_i k_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} m dS_2 + \int_{S_2} N_i k_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} n dS_2 = 0 \end{aligned} \quad (3.45)$$

Từ điều kiện biên (3.34), (3.35, 3.36, 3.37)

$$\int_{S_2} N_i k_z(T) \frac{\partial T}{\partial z} n dS_2 = - \int_{S_2} N_i \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_R^4 - T_{sur}^4) dS_2 - \int_{S_2} N_i h \cdot (T_R - T_{sur}) dS_2 \quad (3.46)$$

$$\int_{S_2} N_i k_x(T) \frac{\partial T}{\partial x} l dS_2 = - \int_{S_2} N_i h \cdot (T_R - T_{sur}) dS_2 \quad (3.47)$$

$$\int_{S_2} N_i k_y(T) \frac{\partial T}{\partial y} l dS_2 = - \int_{S_2} N_i h \cdot (T_R - T_{sur}) dS_2 \quad (3.48)$$

Từ (3.43) viết nhiệt độ theo thời gian cho các nút ký hiệu  $j$  là

$$T(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^n N_j(x, y, z) T_j(t) \quad (3.49)$$

Với  $N_j$  là hàm nội suy theo thời gian tại các nút

Đạo hàm nhiệt độ theo thời gian

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = N_j \frac{\partial N_j}{\partial \tau} \quad (3.50)$$

Thay (3.46, 3.47, 3.48), nhiệt độ (3.49) và đạo hàm theo thời gian (3.50) vào (3.45) sẽ được

$$\begin{aligned} & - \int_V \left[ k_x(T) \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} T_j(t) + k_y(T) \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} T_j(t) + k_z(T) \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} T_j(t) \right] dV \\ & - \int_V \left[ -N_i D_{ls} \rho_{wody} c_{wa} \left( \frac{\partial M}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial M}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - N_j N_i m_v \Delta h \right] dV \\ & - \int_{S_2} N_i \varepsilon \sigma_0 (T_R^4 - T_{sur}^4) dS_2 - \int_{S_2} N_i h (T_R - T_{sur}) dS_2 = 0 \\ & - \int_{S_2} N_i h (T_R - T_{sur}) dS_2 = 0 \\ & - \int_{S_2} N_i h (T_R - T_{sur}) dS_2 = 0 \end{aligned} \quad (3.51)$$

Ở đây,  $i$  và  $j$  là các chỉ số đại diện cho các nút

Do nhiệt độ tại các nút là không đổi nên đưa ra khỏi tích phân, sắp xếp lại sẽ được

$$\begin{aligned} & \left\{ \int_V \left[ k_x(T) \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_y(T) \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + k_z(T) \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right] dV \right\} \{ T_j(t) \} \\ & + \left[ \int_V N_i N_j D_{ls} \rho_{wody} c_{wa} dV \right] \left\{ \frac{\partial M \partial T_j(t)}{\partial x \partial t} \right\} = - \int_V [N_i N_j m_v \Delta h] dV \\ & - \int_{S_2} N_i \varepsilon \sigma_0 (T_R^4 - T_{sur}^4) dS_2 - 3 \int_{S_2} N_i h (T_R - T_{sur}) dS_2 \end{aligned} \quad (3.52)$$

Đặt

$$[K] = \left\{ \int_V \left[ k_x(T) \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_y(T) \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + k_z(T) \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right] dV \right\} \quad (3.53)$$

$$[C] = \left[ \int_V N_i N_j D_{ls} \rho_{wody} c_{wa} dV \right] \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned} \{f\} &= -\int_V [N_i \cdot m_v \Delta h] dV \\ &- \int_{S_2} N_i \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_R^4 - T_{sur}^4) dS_2 - 3 \int_{S_2} N_i h \cdot (T_R - T_{sur}) dS_2 \end{aligned} \quad (3.55)$$

Các tích phân trên các phần tử là

$$[K] = \int_V [B]^T [D][B] dV \quad (3.56)$$

$$[C] = \int_V \rho \cdot c_p [N]^T [N] dV \quad (3.57)$$

$$\{f\} = -\int_V m_v \Delta h [N]^T dV - \int_{S_2} \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_R^4 - T_{sur}^4) [N]^T dS_2 - 3 \int_{S_2} h \cdot (T_R - T_{sur}) [N]^T dS_2 \quad (3.58)$$

Phương trình (3.52) trở thành

$$\begin{aligned} &\left[ \int_V \rho \cdot c_p [N]^T [N] dV \right] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + \left[ \int_V [B]^T [D][B] dV \right] \{T\} = \\ &- \int_V (m_v) \gamma [N]^T dV - \int_{S_2} \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_R^4 - T_{sur}^4) [N]^T dS_2 - 3 \int_{S_2} h \cdot (T_R - T_{sur}) [N]^T dS_2 \end{aligned} \quad (3.59)$$

Phương trình ma trận đặc trưng được viết gọn ở dạng sau

$$[C] \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [K] \{T\} = \{f\} \quad (3.60)$$

Tương tự phương trình truyền nhiệt, áp dụng phương pháp Galerkin ẩm độ được rời rạc theo không gian như sau:

$$W(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) W_i(t) \quad (3.61)$$

$N_i$  là hàm nội suy ẩm độ theo ẩm độ các nút, cũng là hàm nội suy tọa độ,  $n$  là số nút trong một phần tử, và  $W_i(t)$  là ẩm độ tại mỗi nút phụ thuộc thời gian  $W_i(t)$ .

Áp dụng tích phân từng phần của (3.62) như sau:

$$\begin{aligned} &\int_V N_i \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial W}{\partial z} \right) - \frac{\dot{m}_v}{\rho_{wodry}} \right] dV \\ &+ \int_{S_2} N_i D \frac{\partial W}{\partial x} l dS_2 + \int_{S_2} N_i D \frac{\partial W}{\partial y} m dS_2 + \int_{S_2} N_i D \frac{\partial W}{\partial z} n dS_2 = 0 \end{aligned} \quad (3.62)$$

Từ điều kiện biên (3.38), (3.39)

$$\int_{S_2} N_i D \frac{\partial W}{\partial x} l dS_2 + \int_{S_2} N_i D \frac{\partial W}{\partial y} m dS_2 + \int_{S_2} N_i D \frac{\partial W}{\partial z} n dS_2 = - \int_{S_2} N_i h_m W_s dS_2 \quad (3.63)$$

Từ (3.61) viết ảm độ theo thời gian cho các nút ký hiệu j là

$$W(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^n N_j(x, y, z) T_j(t) \quad (3.64)$$

Với  $N_j$  là hàm nội suy theo thời gian tại các nút

Đạo hàm ảm theo thời gian

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = N_j \frac{\partial N_j}{\partial \tau} \quad (3.65)$$

Thay (3.63), ảm độ (3.64) và đạo hàm theo thời gian (3.65) vào (3.62) sẽ được

$$\begin{aligned} & \int_V N_i \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial W}{\partial z} \right) - \frac{\dot{m}_v}{\rho_{wodry}} \right] dV \\ & - \int_V - N_i \frac{\dot{m}_v}{\rho_{wodry}} dV \\ & - \int_{S_2} N_i h_m W_s dS_2 = 0 \end{aligned} \quad (3.66)$$

Ở đây, i và j là các chỉ số đại diện cho các nút

Do ảm độ tại các nút là không đổi nên đưa ra khỏi tích phân, sắp xếp lại sẽ được

$$\begin{aligned} & \left\{ \int_V \left[ D \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + D \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + D \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right] dV \right\} \{W_j(t)\} = \int_V - N_i \frac{\dot{m}_v}{\rho_{wodry}} dV \\ & - \int_{S_2} N_i h_m W_s dS_2 = 0 \end{aligned} \quad (3.67)$$

Đặt

$$[K] = \left\{ \int_V \left[ D \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + D \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + D \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right] dV \right\} \quad (3.68)$$

$$[C] = \left[ \int_V - N_i \frac{\dot{m}_v}{\rho_{wodry}} dV \right] \quad (3.69)$$

$$\{f\} = - \int_{S_2} N_i h_m W_s dS_2 \quad (3.70)$$

Các tích phân trên các phần tử là

$$[K] = \int_V [B]^T [D][B] dV \quad (3.71)$$

$$[C] = \int_V [N]^T [N] dV \quad (3.72)$$

$$\{f\} = - \int_{S_2} N_i h_m W_s dS_2 = 0 \quad (3.73)$$

Phương trình 3.67 trở thành

$$\left[ \int_V [N]^T [N] dV \right] \left\{ \frac{\partial W}{\partial t} \right\} + \left[ \int_V [B]^T [D][B] dV \right] \{W\} = - \int_{S_2} N_i h_m W_s dS_2 \quad (3.74)$$

Phương trình ma trận đặc trưng được viết gọn ở dạng sau

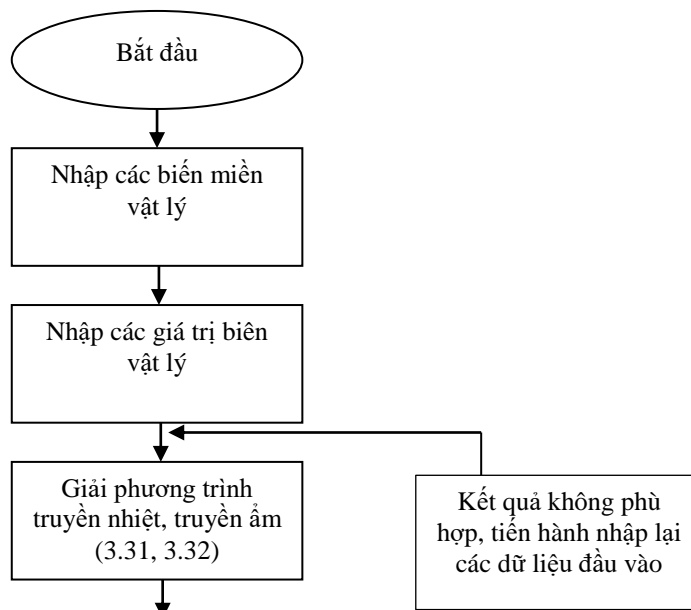
$$[C] \left\{ \frac{\partial W}{\partial t} \right\} + [K] \{W\} = \{f\} \quad (3.75)$$

### 3.8 Kết quả giải mô hình toán thông qua mô phỏng quá trình truyền nhiệt, truyền ẩm trong sấy chân không gỗ Cẩm xe

Sử dụng phần mềm COMSOL Multiphysics để giải các hệ phương trình theo lưu đồ thuật toán hình 3.12 (chi tiết thể hiện phụ lục 10, 11, 12, 13)

Thông qua lưu đồ hình 3.12 thể hiện chi tiết các bước thực hiện giải hệ phương trình bằng phương pháp số đồng thời mô phỏng quá trình truyền nhiệt, truyền ẩm thông qua hình ảnh, đồ thị một cách trực quan. Kết quả của hệ phương trình thể hiện mối quan hệ giữa các thông số nhiệt vật lý vào diễn biến quá trình sấy chân không gỗ Cẩm xe.

Trong đó giá trị các thông số cơ bản chính là giá trị tại các điểm nút khi giải hệ phương trình truyền nhiệt và dịch chuyển ẩm trong quá trình sấy gỗ chân không. Giá trị biên của miền tính toán được lấy kết quả từ thực nghiệm sấy gỗ chân không.



**Hình 3.12.** Lưu đồ thuật toán giải phương trình truyền nhiệt và truyền ẩm

Kết quả bảng 3.1 thể hiện thông qua thực nghiệm và kế thừa công thức tính toán các giá trị nhiệt ẩm của nguyên liệu gỗ Căm xe và môi trường sấy. Các giá trị đạt được là thông số quan trọng trong việc giải mô hình toán để mô phỏng quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm trong sấy gỗ Căm xe bằng phương pháp sấy chân không.

**Bảng 3.1.** Bảng giá trị các thông số nhiệt ẩm

Stt	Thông số	Giá trị	Ghi chú
01	Hệ số dẫn nhiệt gỗ Căm xe	$k_l = 0,733$ (W/m.K) khi W = 40% $k_r = 0,304$ (W/m.K) khi W = 40% $k_l = 0,0122.W + 0,267$ (W/m.K) $k_r = 0,0043.W + 0,1096$ (W/m.K)	Thực nghiệm
02	Nhiệt dung riêng gỗ Căm xe	$c_{wop} = 1884,05$ (J/kg.K) khi W = 40% $c_{wop} = 8,082.W + 1567,2$ (J/kg.K)	Thực nghiệm
03	Khối lượng riêng gỗ Căm xe	$\rho_{wo} = 1,084$ (g/cm <sup>3</sup> ) khi W = 40% $\rho_{wo} = 0,0068.W + 0,7875$ (g/cm <sup>3</sup> )	Thực nghiệm
04	Khối lượng riêng khô kiệt của gỗ Căm xe	$\rho_{wodry} = 0,788$ g/cm <sup>3</sup>	Thực nghiệm
05	Kích thước thanh gỗ	Dày :H <sub>1</sub> = 20 (mm), H <sub>2</sub> = 50 (mm)	Thực nghiệm

		Rộng : $B_1 = 50$ (mm), $B_2 = 150$ (mm) Dài: $L = 500$ (mm)	
06	Hệ số khuếch tán ẩm	$D = 7.10^{-6} \exp\left(-\frac{9200-70.W}{RT}\right)$ (m <sup>2</sup> /s)	Siau J.F .(1984) [94]
07	Án nhiệt hóa hơi	$\Delta h = 2,792.10^6 - 160.T - 3,43.T^2$ (J/kg) $\Delta h = 2382115,086 J / kg = 2382,115 kJ / kg$	Stanish, M.A.; Schajer, G.S.; Kayihan, F. A (1986) [97]
08	Hệ số truyền ẩm	$h_m = \frac{h_{bx}}{\rho_k \cdot c_k \cdot Le^{1-n}} = \frac{h_{bx} \cdot D_{ikbm} \cdot Le^n}{k_k}$ (m/s) $= \frac{h_{bx} \cdot D_{ikbm}}{k_k} \cdot \left(\frac{k_{bm}}{c_{bm} \cdot \rho_{bm}} \cdot \frac{D_{ikbm}}{D_{ikbm}}\right)^n$	S. Sandoval-Torres (2011) [101], Yan Yang, (2016) [109], Zhengbin He (2016) [115]
09	Hệ số Lewis	$Le = \frac{\alpha_{df}}{D} = \frac{\lambda_{df}}{\rho \cdot D_{aver} \cdot c_p}$	S. Sandoval-Torres (2011) [101], Yan Yang, (2016) [109], Zhengbin He (2016) [115]
10	Hệ số trao đổi nhiệt	$h = 3209,07 - 15,38T + 2893,23 \ln P + 0,392T^2 + 905,34(\ln P)^2 - 3.713T \ln P - 2,62.10^{-3}T^3 + 91,885(\ln P)^2 + 1,7.10^{-3}T^2 \ln P$ $h = \frac{m\Delta h}{A(T - T_s)}$	Zhengbin He, Zijian Zhao, Yu Zhang, Huan Lv, Songlin Yi [114],
11	Khối lượng riêng của không khí	$\rho_a = 1,1614 kg / m^3 \approx 1kg / m^3$ $\rho_a = 4,06.10^{-14}.T + 6,86.10^{-12}$ $T = 50 \Rightarrow \rho_k = 19,9738.10^{-12}$	Chen (1997) [35]
12	Áp suất bão hòa	$P_0 = 8,75.10^8 \cdot e^{\frac{-43472}{RT}}$	Chen (1997) [35]
13	Khối lượng riêng của hơi nước bão hòa nhiệt độ từ 27 đến 200°C	$\rho_{var ser} = 10^6 \cdot \exp(-46,49 + 0,26179.T - 5,0104.10^{-4}.T^2 + 3,4712.10^{-7}.T^3)$	Stanish và cộng sự (1986) [97]
14	Tốc độ bay hơi	$m_v = 0,04075 \cdot v^{0,8} \cdot (p_m - p) \cdot A$ $= 0,04075 \cdot 0,5^{0,8} (0,015 - 0,012) \cdot 0,81$	Chen (1997) [35]



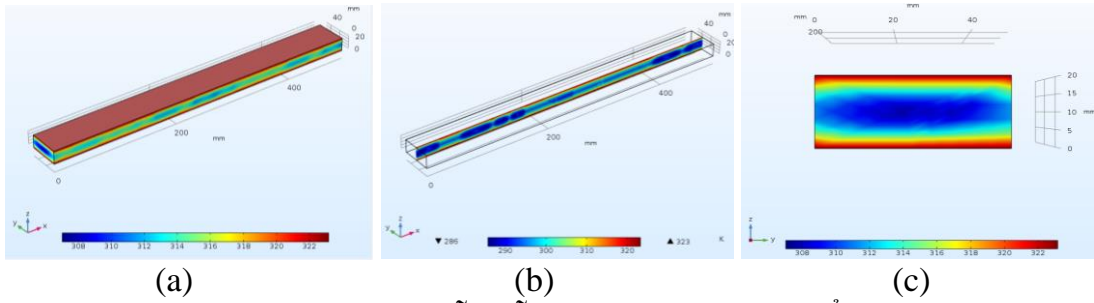
		$m_v = 3,588e-4 \text{ (kg/m}^3 \cdot \text{s)}$	
15	Nhiệt độ sấy	Nhiệt độ $T = 50^{\circ}\text{C} = 323,15\text{(K)}$ $T = T^{\circ}\text{C} + 273,15 = T\text{(K)}$	Theo thực nghiệm
16	Hằng số Stephen Boltzman	$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$	
17	Hằng số khí lý tưởng	$R = 8,314 \text{ kJ/kmol.K}$	

Cắm xe là nguyên liệu được sử dụng nhiều trong gia công các sản phẩm nội thất chủ yếu dùng trong sản xuất : ván sàn, cầu thang, khung cửa, cửa đi, cửa sổ, bàn ghế, giường tủ và một số vận dụng khác nên các qui cách chiều dày và chiều rộng thường sử dụng như sau: 20, 50, 150 mm....Đây cũng chính là lý do mà nghiên cứu tập trung mô phỏng quá trình truyền nhiệt, truyền ẩm trên một số dạng các kích thước 20, 50, 150 mm...

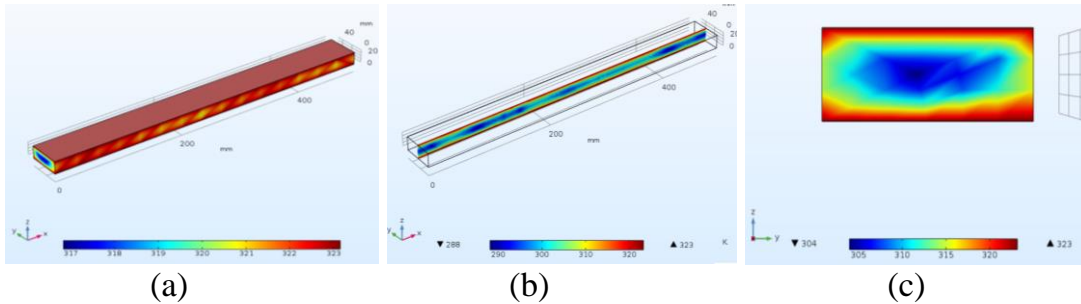
Phương trình truyền nhiệt và ẩm đã mô tả diễn biến quá trình thay đổi nhiệt độ và ẩm độ trong quá trình sấy chân không gỗ Cắm xe. Kết quả giải bài toán truyền nhiệt và ẩm thông qua mô phỏng sẽ góp phần tiên đoán về mặt lý thuyết diễn biến thay đổi nhiệt và ẩm trong gỗ xảy ra trong suốt quá trình sấy. Bên cạnh đó, để kiểm nghiệm độ tương thích của phương trình toán so với thực tế, đề tài tiến hành bước tiếp theo là thực nghiệm. Từ kết quả thực nghiệm được so sánh với lý thuyết để kiểm chứng mô hình toán, thông qua thí nghiệm xác lập chế độ sấy phù hợp cho nguyên liệu gỗ Cắm xe khi áp dụng phương pháp sấy chân không hồng ngoại.

### 3.8.1 Kết quả mô phỏng truyền nhiệt mẫu gỗ 20 x 50 x 500 mm

Đề tài tiến hành giải hệ phương trình toán truyền nhiệt và truyền ẩm bằng phương pháp số. Từ kết quả đạt được xác định sự phân bố nhiệt, ẩm độ trong quá trình sấy chân không gỗ Cắm xe. Kết quả thể hiện qua mô phỏng và đồ thị.



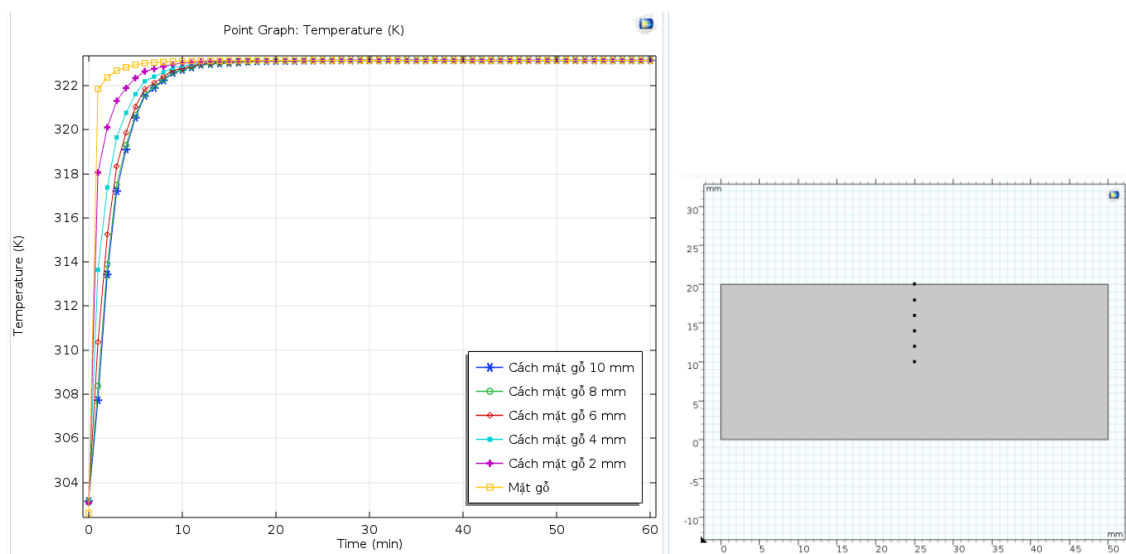
**Hình 3.13.** Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 20 x 50 x 500 mm thể hiện toàn thanh (a) và mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm  $t = 5$  phút



**Hình 3.14.** Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 20 x 50 x 500 mm thể hiện toàn thanh (a) và mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm  $t = 15$  phút

Hình 3.13 mô phỏng diễn biến nhiệt độ trên mặt cắt dọc, ngang và mẫu gỗ sấy chân không kích thước 20 x 50 x 500 mm, qua hình ảnh mô phỏng cho thấy nhiệt độ xuất hiện trên bề mặt gỗ trước, trong tâm thanh gỗ vẫn chưa có sự xuất hiện tăng nhiệt độ. Để thể hiện nhiệt thay đổi theo chiều dày thanh tiến hành mô phỏng trên mặt cắt ngang Oyz (hình 3.13 c), nhiệt độ trên mẫu gỗ Cắm xe trên bề mặt và bên trong mẫu gỗ và có sự thay đổi sau thời gian 5 phút sấy.

Hình 3.14 mô phỏng diễn biến nhiệt độ trên mẫu gỗ và mặt cắt dọc, ngang khi sấy chân không gỗ Cắm xe kích thước 20 x 50 x 500 mm thời điểm 15 phút, qua mô phỏng cho thấy nhiệt độ trên bề mặt ngoài bắt đầu xâm nhập sâu vào bên trong tâm mẫu gỗ theo phương y – phương xuyên tâm và phương z – phương tiếp tuyến. Thông qua mô phỏng thể hiện nhiệt độ mẫu gỗ có sự khác biệt thời điểm 5 phút và 15 phút, quá trình dẫn nhiệt trong mẫu gỗ phụ thuộc vào hệ số dẫn nhiệt, hệ số dẫn nhiệt phụ thuộc vào độ ẩm gỗ, khi độ ẩm gỗ càng lớn, hệ số dẫn nhiệt càng cao, điều này lý giải vì sao nhiệt độ tăng nhanh trong giai đoạn đầu khi sấy gỗ chân không.



(a) (b)  
**Hình 3.15.** Đồ thị thể hiện diễn biến nhiệt (a) các vị trí (b) bên trong mẫu gỗ kích thước 20 x 50 x 500 mm

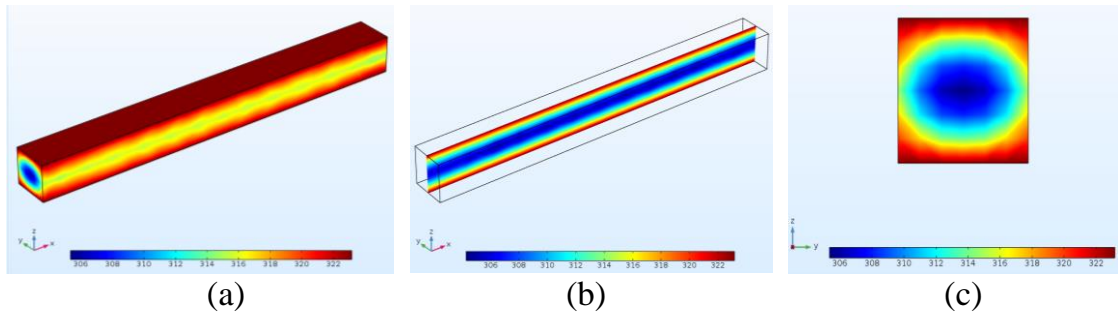
Hình 3.15 mô tả diễn biến của đường cong nhiệt độ sấy tại sáu vị trí (hình 3.15 b), các vị trí từ mặt gỗ vào tâm, các vị trí cách nhau 2 mm. Đồ thị thể hiện trong khi nhiệt độ tăng nhanh nhất với vị trí mặt gỗ, mặt tiếp xúc nhiệt đầu tiên. Đặc biệt đường cong nhiệt độ tăng theo thời gian hướng đến nhiệt độ sấy. Các đường cong nhiệt độ sấy cùng chung hướng tăng, khi vị trí càng gần mặt gỗ thì nhiệt độ nhanh đạt nhiệt độ sấy, càng xa mặt gỗ nhiệt độ cần nhiều thời gian hơn. Theo kết quả mô phỏng các vị trí trong mẫu gỗ cách đều nhau 2 mm, trên đồ thị diễn biến nhiệt cho thấy khoảng cách giữa các đường cong nhiệt biến thiên có sự khác biệt rõ rệt, các đường cong nhiệt gần tâm có khoảng cách gần nhau, càng xa tâm khoảng cách càng lớn. Kết quả mô phỏng có thể dùng để dự đoán các giá trị biến thiên nhiệt độ trong mẫu gỗ diễn ra trong quá trình sấy chân không.

### 3.8.2 Kết quả mô phỏng truyền nhiệt mẫu gỗ 50 x 50 x 500 mm

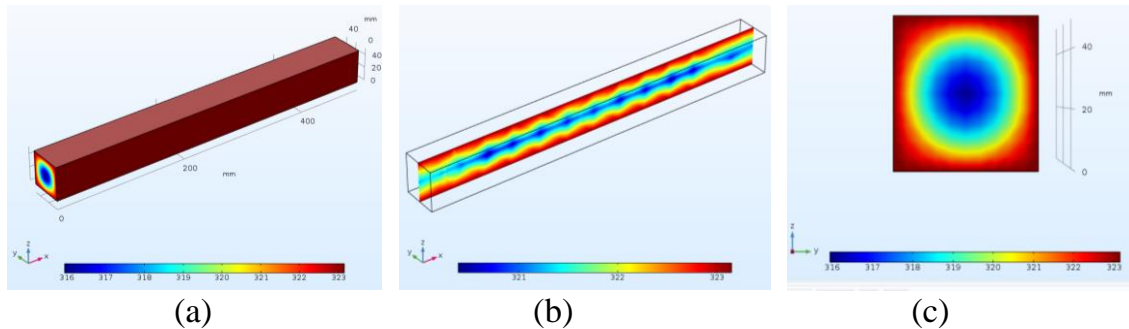
Thông qua mô phỏng thể hiện hình ảnh nhiệt xâm nhập nhanh chóng khắp thanh gỗ tăng dần theo thời gian thể hiện qua hình 3.16 và 3.17. Nhiệt độ bắt đầu tăng dần từ ngoài vào trong.

Hình 3.16, 3.17 mô phỏng diễn biến nhiệt độ trên mẫu gỗ và mặt cắt dọc, ngang khi sấy chân không kích thước 50 x 50 x 500 mm thời điểm 15 phút và 35 phút, thông qua mô phỏng cho thấy nhiệt độ trên bề mặt gỗ bắt đầu xâm nhập sâu vào bên trong tâm thanh gỗ theo phương y – phương xuyên tâm và phương z –

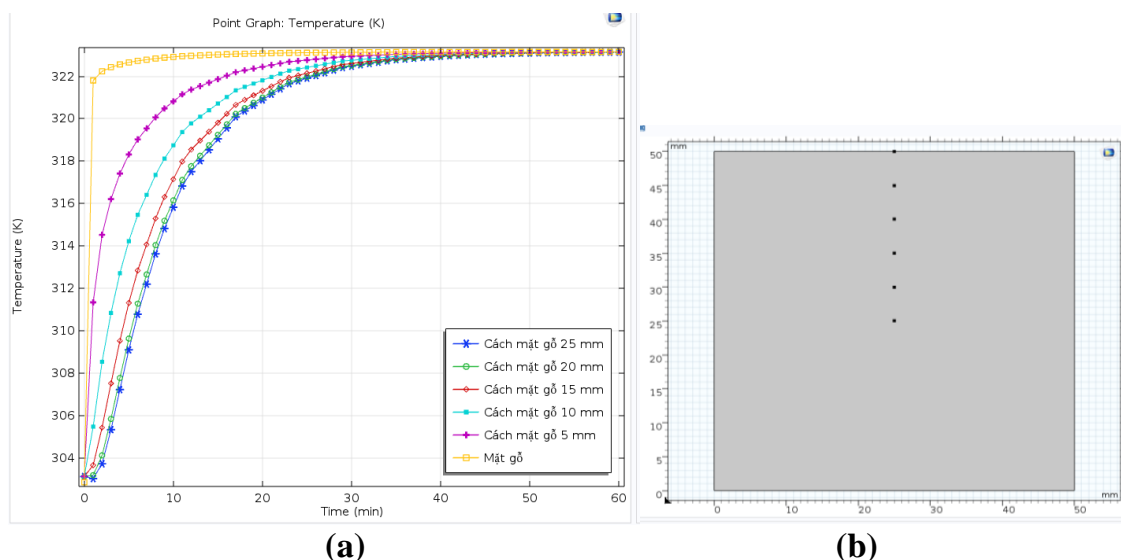
phương tiếp tuyến. Mô phỏng thể hiện nhiệt độ mẫu gỗ khi sấy chân không có sự khác biệt thời điểm 15 phút và 35 phút, điều này thể hiện diễn biến nhiệt độ mẫu gỗ thay đổi theo thời gian, quá trình dẫn nhiệt trong mẫu gỗ phụ thuộc vào độ ẩm gỗ, hệ số dẫn nhiệt. Khi độ ẩm gỗ càng lớn, hệ số dẫn nhiệt càng cao, diễn biến nhiệt nhanh, điều này góp phần gia tăng nhiệt hồ trợ nước trong gỗ hóa hơi, khuếch tán ra ngoài góp phần làm giảm độ ẩm trong quá trình sấy.



**Hình 3.16.** Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 50 x 50 x 500 mm thể hiện toàn thành (a) và mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm  $t = 15$  phút



**Hình 3.17.** Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 50 x 50 x 500 mm thể hiện toàn thành (a) và mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm  $t = 35$  phút

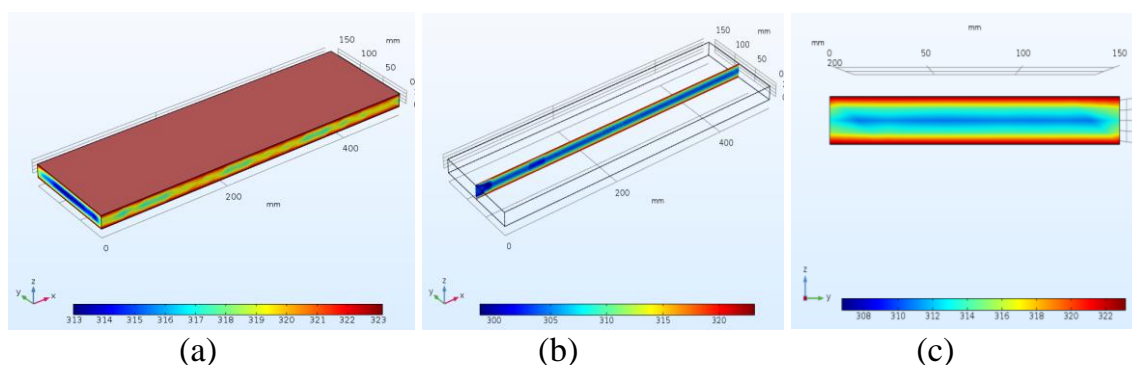


**Hình 3.18.** Đồ thị thể hiện diễn biến nhiệt (a) các vị trí (b) bên trong mẫu gỗ kích thước 50 x 50 x 500 mm

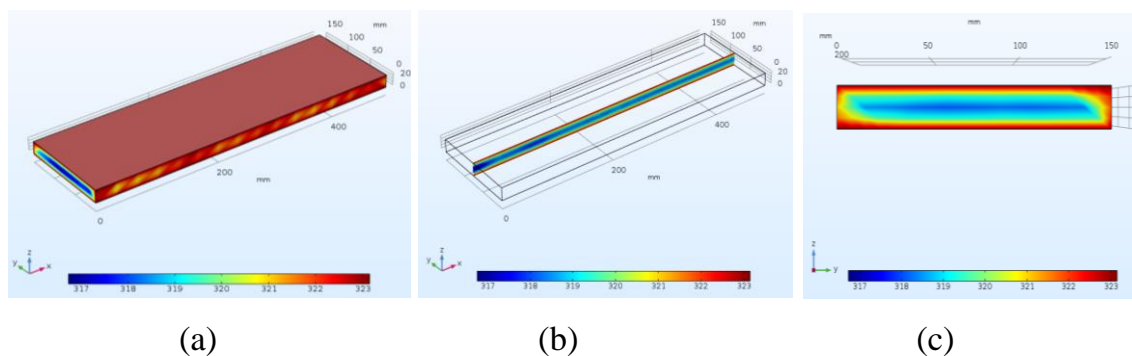
Hình 3.18 mô tả diễn biến đường cong nhiệt độ sấy tại sáu vị trí, từ mặt gỗ vào tâm, khoảng cách giữa các vị trí 5 mm trên mẫu gỗ kích thước 50 x 50 x 500 mm. Đồ thị thể hiện nhiệt độ tăng nhanh nhất vị trí mặt gỗ, bề mặt tiếp xúc nhiệt đầu tiên sau đó vào bên trong tâm thanh gỗ. Các đường cong nhiệt độ cùng chung hướng tăng, các vị trí là cách đều nhau 5 mm tuy nhiên có sự khác biệt phân bố nhiệt trên các đường cong, đường cong nhiệt có vị trí gần tâm khoảng cách càng nhỏ, càng gần vị trí mặt khoảng cách càng lớn. Tại vị trí bề mặt gỗ thì nhiệt độ tăng nhanh nhất chỉ vài phút là đạt nhiệt độ sấy, càng xa mặt gỗ cần nhiều thời gian hơn, đặc biệt vị trí tâm gỗ khoảng 60 phút sau mới đạt nhiệt độ sấy. Kết quả tính toán từ mô hình thể hiện diễn biến quá trình tăng nhiệt độ các vị trí trong thanh gỗ, góp phần dự đoán những diễn biến thay đổi của nhiệt độ thanh gỗ diễn ra trong quá trình sấy gỗ chân không.

### 3.8.3 Kết quả mô phỏng truyền nhiệt mẫu gỗ 20 x 150 x 500 mm

Mô phỏng sấy gỗ chân không kích thước 20 x 150 x 500 mm thể hiện chi tiết quá trình truyền nhiệt trong gỗ theo thời gian thông qua hình 3.21, 3.22.



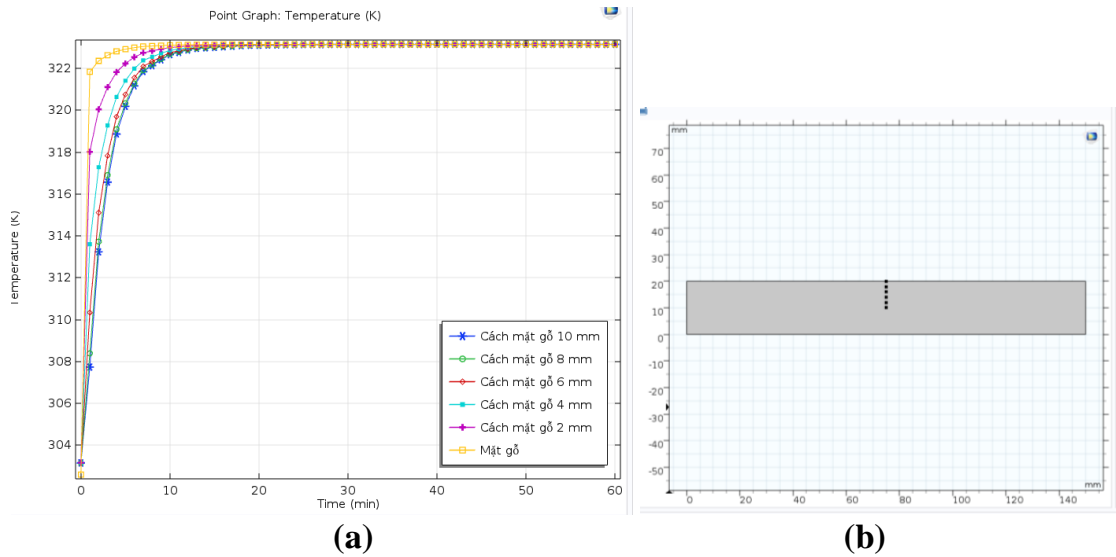
**Hình 3.19.** Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 20 x 150 x 500 mm thể hiện toàn thành (a) và mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm  $t = 5$  phút



**Hình 3.20.** Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 20 x 150 x 500 mm thể hiện toàn thành (a) và mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm  $t = 15$  phút

Hình 3.19, 3.20 thể hiện diễn biến thay đổi nhiệt độ trong quá trình sấy. Khi quá trình sấy bắt đầu, nhiệt độ trên bề mặt gỗ tăng nhanh chóng và kết quả tạo điều kiện sự bay hơi phạm vi rộng, sự truyền nhiệt không những diễn ra trên bề mặt còn xâm nhập vào bên trong mẫu gỗ. Vì vậy, một phần nhiệt cần để nước bay hơi và một phần cung cấp cho chính thanh gỗ xâm nhập vào sâu tâm gỗ. Quá trình sấy tiếp diễn, nhiệt độ của gỗ tăng dần dần cho đến khi đến gần nhiệt độ sấy.

Hình 3.21 mô tả sự tiến triển của đường cong nhiệt độ tại sáu điểm (thể hiện hình 3.21 b) cho mẫu gỗ kích thước 20 x 150 x 500 mm. Có thể thấy rằng nhiệt độ tăng nhanh trên bề mặt gỗ sau vài phút đạt nhiệt độ sấy. Tuy kích thước chiều rộng được gia tăng từ 50 mm lên 150 mm, nhưng đường cong nhiệt thể hiện không có sự khác biệt, mặt ngoài đạt nhiệt độ sấy sau vào phút, tâm gỗ đạt nhiệt độ sấy sau 25 - 30 phút. Điều này thể hiện diễn biến nhiệt phụ thuộc vào kích thước chiều dày mà không phụ thuộc và kích thước chiều rộng gỗ. Đây là yếu tố quan trọng góp phần quyết định thời gian sấy và chất lượng gỗ sau sấy.

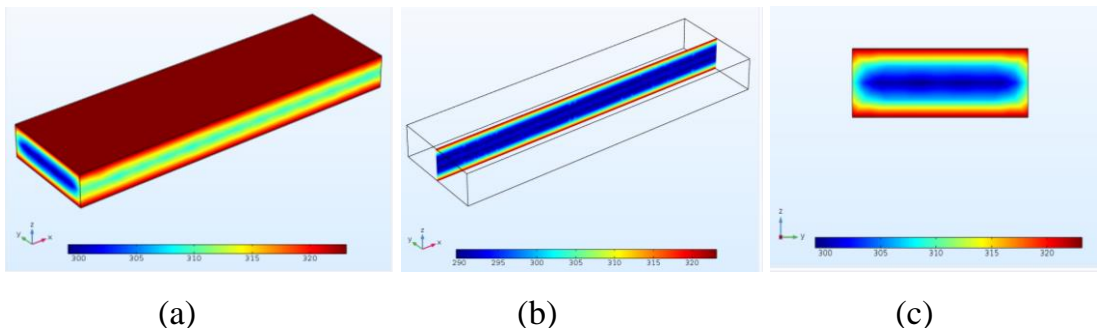


**Hình 3.21.** Đồ thị thể hiện diễn biến nhiệt (a) các vị trí (b) bên trong mẫu gỗ kích thước 20 x 150 x 500 mm

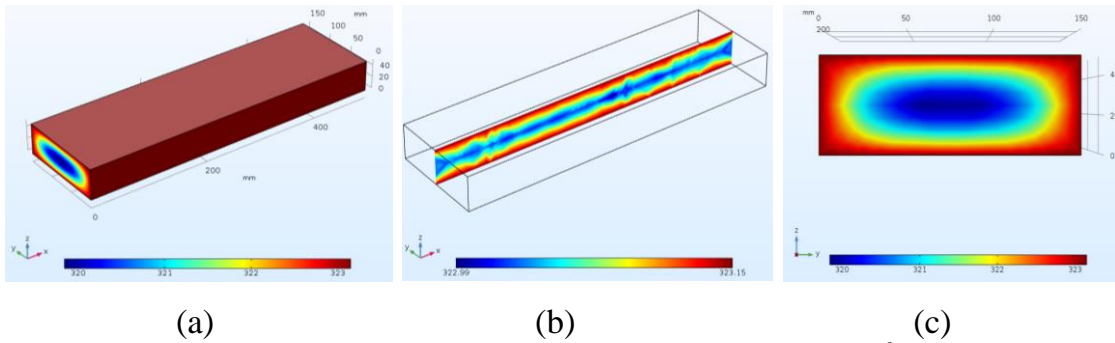
### 3.8.4 Kết quả mô phỏng truyền nhiệt mẫu gỗ 50 x 150 x 500 mm

Kết quả mô phỏng thể hiện nhiệt độ mẫu gỗ kích thước 50 x 150 x 500 mm tăng lên sau thời gian gia nhiệt, các vị trí ngoài nhận được nhiệt đầu tiên, quá trình diễn biến tăng nhiệt độ thể hiện qua hình 3.22, 3.23.

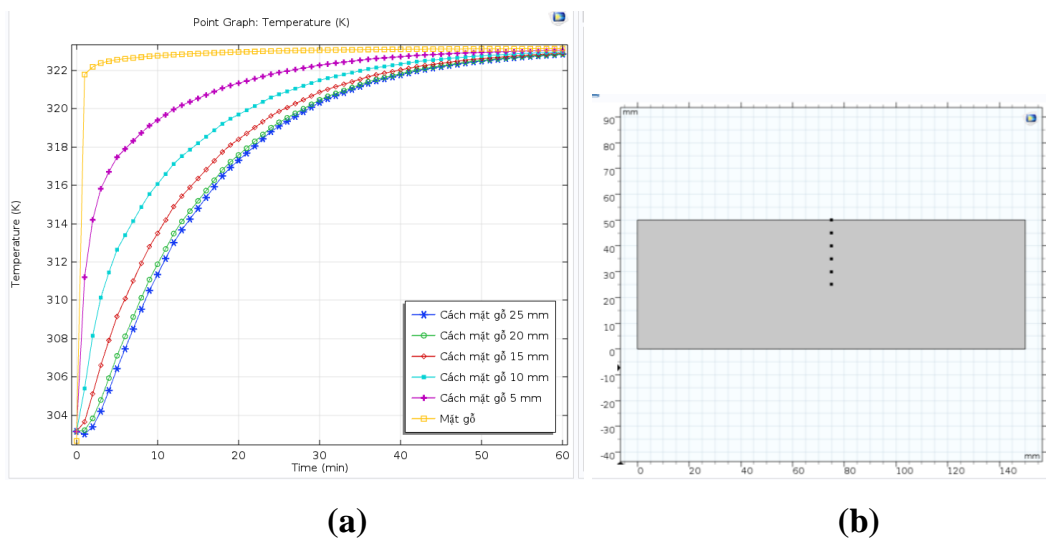
Kết quả cho thấy hình 3.22, 3.23 thể hiện mô phỏng quá trình truyền nhiệt trên mẫu gỗ ở hai thời điểm khác nhau, tại thời điểm 15 phút và 35 phút. Kết quả truyền nhiệt thể hiện diễn biến quá trình truyền nhiệt trong mẫu gỗ khi sấy chân không. Sự khác biệt đã mô tả nhiệt di chuyển trong mẫu gỗ từ mặt ngoài vào tâm gỗ. Kết quả so sánh này có thể góp phần dự đoán quá trình truyền nhiệt trong sấy gỗ chân không.



**Hình 3.22.** Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 50 x 150 x 500 mm thể hiện toàn thành (a) và mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm  $t = 15$  phút



**Hình 3.23.** Mô phỏng nhiệt độ mẫu gỗ 50 x 150 x 500 mm thể hiện toàn thanh (a) và mặt cắt dọc (b), mặt cắt ngang (c) thanh gỗ tại thời điểm  $t = 35$  phút



**Hình 3.24.** Đồ thị thể hiện diễn biến nhiệt (a) các vị trí (b) bên trong mẫu gỗ kích thước 50 x 150 x 500 mm

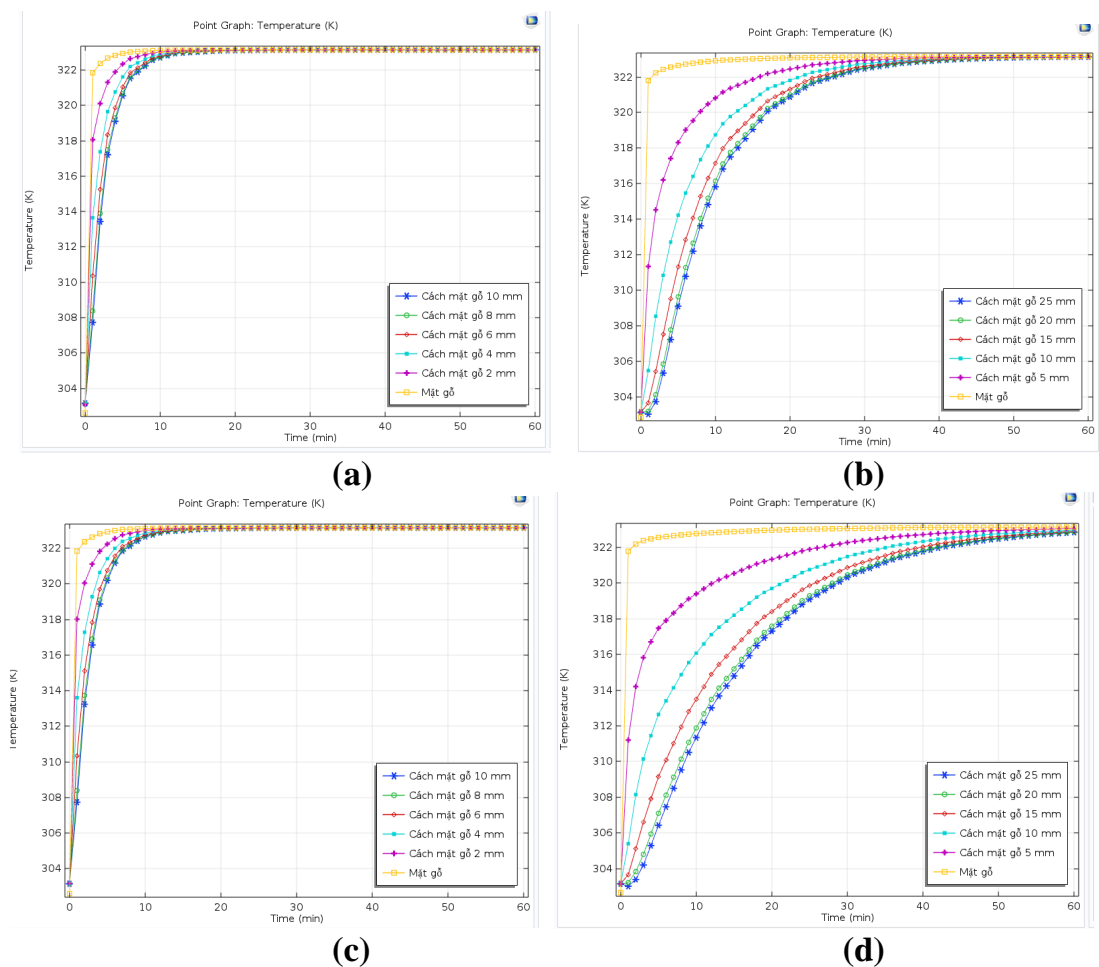
Truyền nhiệt trong mẫu gỗ sấy được mô phỏng qua đường cong nhiệt, qua đồ thị hình 3.24 biểu diễn nhiệt độ 6 vị trí từ mặt vào tâm gỗ cách nhau 5mm. Mỗi đường cong nhiệt biểu diễn cho nhiệt độ tại 1 vị trí. So sánh giữa các vị trí đều có sự khác biệt đáng kể, đặc biệt vị trí mặt gỗ và tâm gỗ nhiệt thể hiện khác biệt lớn nhất. Đường cong nhiệt mô tả diễn biến quá trình truyền nhiệt trong thanh gỗ, với kết quả mô phỏng đạt được sẽ là cơ sở khoa học cho việc nghiên cứu thực nghiệm diễn biến quá trình sấy.

### 3.3.5.5 So sánh truyền nhiệt trong thanh gỗ các kích thước 20 x 50 x 500 mm, 50 x 50 x 500 mm, 20 x 150 x 500 mm, 50 x 150 x 500 mm.

Truyền nhiệt trong mẫu gỗ sấy được mô phỏng qua đường cong nhiệt 4 dạng kích thước, qua đồ thị hình 3.25 biểu diễn nhiệt độ 6 vị trí từ mặt vào tâm gỗ cách nhau 2mm (chiều dày 20 mm) và 5 mm (chiều dày 50 mm). Mỗi đường cong nhiệt biểu diễn cho nhiệt độ tại 1 vị trí. So sánh đồ thị hình 3.25 a, c cho



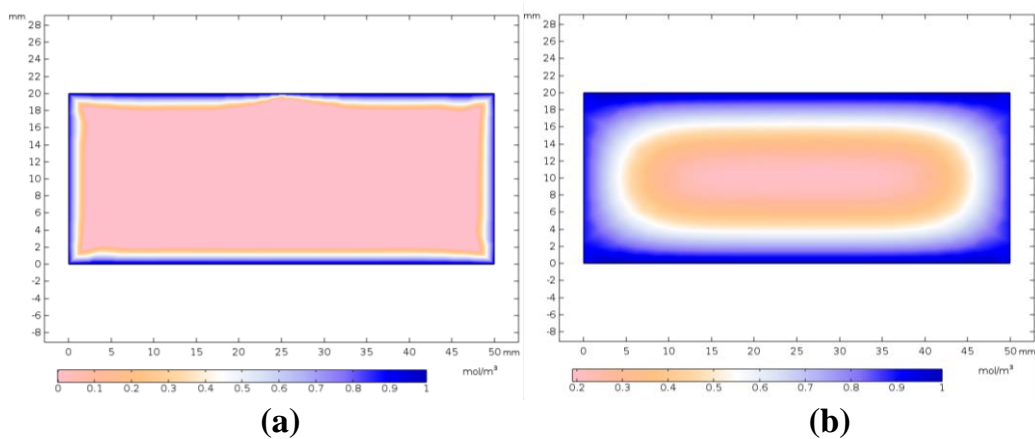
thấy cùng kích thước chiều dày 20 mm, khác kích thước chiều rộng thì diễn biến quá trình truyền nhiệt không có sự khác biệt lớn. Nhiệt các vị trí diễn tiến tương đối giống nhau. So sánh hình 3.25 b, d mô tả diễn biến quá trình truyền nhiệt cho thấy cùng kích thước chiều dày 50 mm, khác kích thước chiều rộng, diễn biến quá trình truyền nhiệt các có sự khác biệt rất lớn, so sánh nhiệt vị trí mặt gỗ và tâm gỗ trên 2 dạng kích thước này có sự khác rõ nhất, cụ thể là mẫu gỗ kích thước 50 x 50 x 500 mm nhiệt tâm gỗ đạt nhiệt độ sấy sau 45 phút, tuy nhiên mẫu gỗ kích thước 50 x 150 x 500 mm nhiệt tâm gỗ đạt nhiệt độ sấy sau 60 phút, diễn biến nhiệt lúc này không những phụ thuộc vào chiều dày còn phụ thuộc vào chiều rộng mẫu gỗ sấy. Chính vì vậy khi sấy mẫu gỗ có kích thước dày hơn 50 mm thì chiều rộng mẫu gỗ càng lớn thì tốn nhiều thời gian trong quá trình gia nhiệt khi sấy gỗ.



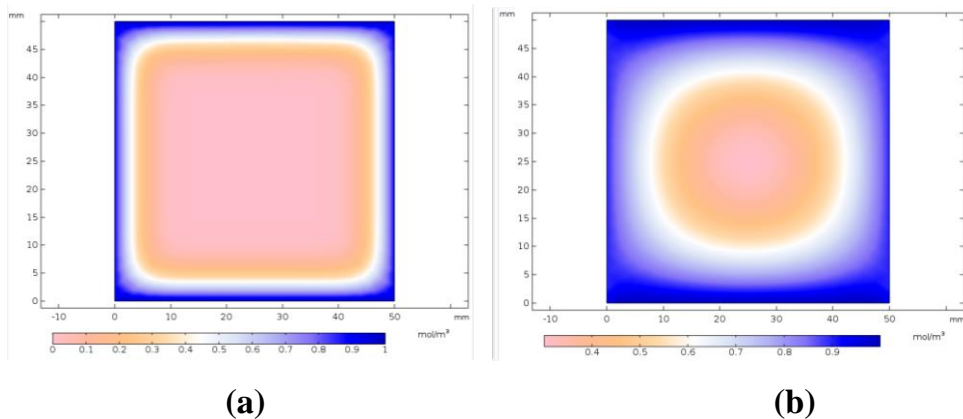
**Hình 3.25.** Đồ thị biểu diễn nhiệt bên trong mẫu gỗ kích thước 20 x 50 x 500 mm (a), 50 x 50 x 500 mm (b), 20 x 150 x 500 mm (c), 50 x 50 x 500 mm (d)

### 3.9 Kết quả mô phỏng truyền ẩm mẫu gỗ sấy chân không

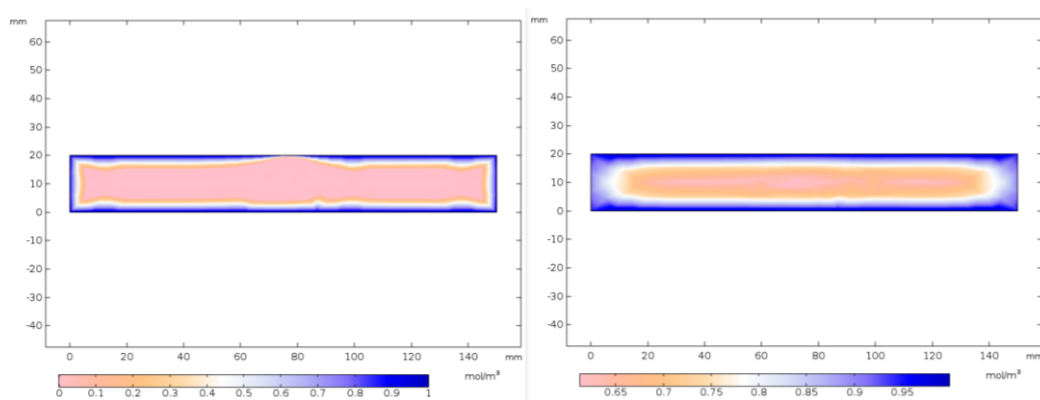
Quá trình sấy gỗ chân không là sự di chuyển ẩm từ bên trong ra bề mặt gỗ và bay hơi ẩm từ bề mặt ra môi trường. Có ba dạng ẩm di chuyển tồn tại trong gỗ như sau: dòng ẩm khuếch tán và dòng hơi nước và dòng nước tự do. Sự di chuyển của các dạng ẩm này là kết quả của ba loại cơ chế: sự di chuyển của nước liên kết thông qua vách tế bào, sự di chuyển của hơi nước trong không bào và sự di chuyển của nước tự do trong không bào và mao quản ở dạng chất lỏng.



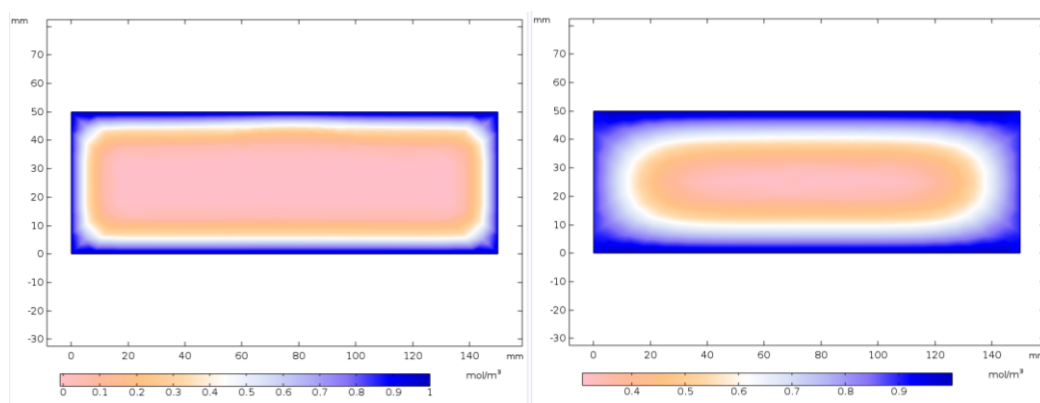
**Hình 3.26.** Mô phỏng biểu diễn lượng thoát ẩm trong mẫu gỗ kích thước 20 x 50 x 500 mm thời điểm 10 phút (a) và 50 phút (b)



**Hình 3.27.** Mô phỏng biểu diễn lượng thoát ẩm trong mẫu gỗ kích thước 50 x 50 x 500 mm thời điểm 20 phút (a) và 60 phút (b)



(a) (b)  
**Hình 3.28.** Mô phỏng biểu diễn lượng thoát ẩm trong mẫu gỗ kích thước 20 x 150 x 500 mm thời điểm 30 phút (a) và 50 phút (b)



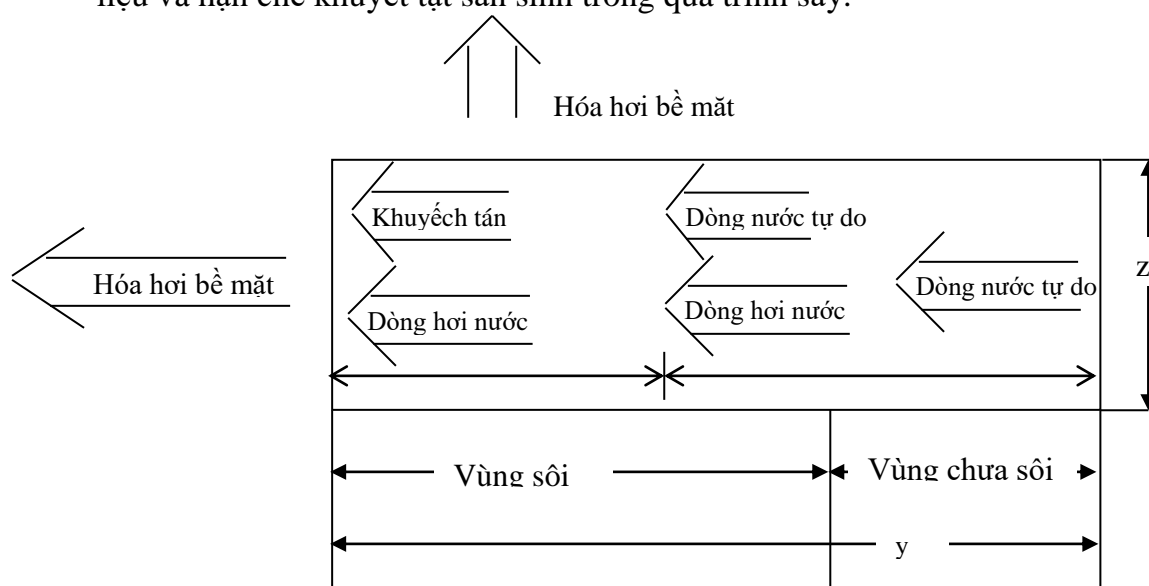
(a) (b)  
**Hình 3.29.** Mô phỏng biểu diễn lượng thoát ẩm trong mẫu gỗ kích thước 50 x 150 x 500 mm thời điểm 35 phút (a) và 80 phút (b)

Hình 3.26, 3.27, 3.28, 3.29 mô phỏng quá trình ẩm di chuyển trong quá trình sấy chân không, lượng ẩm di chuyển được mô phỏng tính toán lượng  $\text{mol/m}^3$ , quá trình di chuyển này thể hiện từ mặt ngoài gỗ, có sự đồng thời với quá trình truyền nhiệt (phụ lục 14). Khi nhiệt độ đạt nhiệt độ sấy, rút chân không để hạ thấp điểm sôi và nước trong gỗ hóa hơi, sự sôi xảy ra trong gỗ vì nhiệt độ của gỗ thì lớn hơn nhiệt độ bão hòa bên trong buồng sấy chân không. Tại thời điểm đầu, sự sôi xảy ra trên bề mặt và sau đó di chuyển vào bên trong tâm thanh gỗ. Tốc độ di chuyển phụ thuộc vào nhiệt cung cấp và đặc tính của gỗ như là tính thấm hút và tính dẫn nhiệt.

Hình 3.30 quá trình sôi di chuyển chia hệ thống thành hai vùng cụ thể là vùng sôi và vùng chưa sôi. Trong vùng sôi, ẩm tồn tại dạng hỗn hợp là dạng hơi

và dạng lỏng. Trong vùng chưa sôi, ẩm tồn tại dạng chất lỏng nếu có một lượng nhỏ hơi nước chứa đựng trong không khí thông qua không bào thì được bỏ qua.

Động lực của quá trình sấy chân không phụ thuộc vào áp suất bên trong của máy chân không và tính chất vật lý của gỗ. Trong sấy chân không, gỗ được gia nhiệt đến một nhiệt độ nhất định, hút chân không ở áp suất phù hợp nhiệt độ sấy để đạt điểm sôi của nước trong nguyên liệu gỗ. Đây chính là ưu điểm lớn nhất của sấy chân không, sấy nhiệt độ thấp giữ được màu sắc và chất lượng nguyên liệu và hạn chế khuyết tật sản sinh trong quá trình sấy.

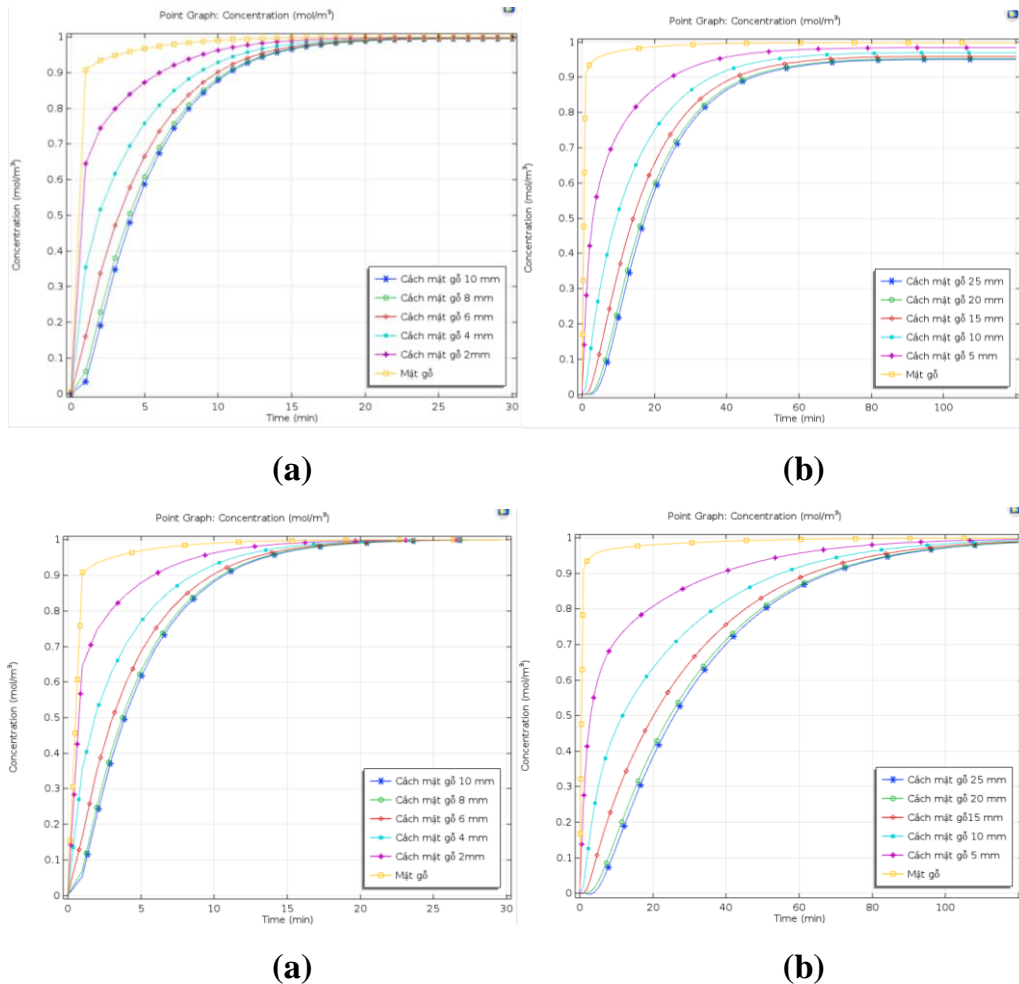


**Hình 3.30.** Biểu diễn quá trình thoát ẩm gỗ trong sấy chân không

Gỗ là nguyên liệu tự nhiên chứa ẩm quá trình sấy là tách ẩm khỏi nguyên liệu, trong quá trình sấy sự thoát ẩm trải qua hai giai đoạn: trên điểm bão hòa thứ gỗ và dưới điểm bão hòa thứ gỗ. Theo kết quả xác định điểm bão hòa thứ gỗ Cẩm xe 20%, với độ ẩm ban đầu gỗ Cẩm xe khi sấy là 40%. Như vậy có thể khẳng định giai đoạn đầu sấy trên điểm bão hòa thứ gỗ làm giảm 20% độ ẩm gỗ, giai đoạn sau sấy dưới điểm bão hòa thứ gỗ làm giảm 10% độ ẩm gỗ còn lại để đạt độ ẩm sau cùng là 10%.

Hình 3.31 thể hiện lượng truyền ẩm trong quá trình sấy gỗ chân không trên 4 dạng kích thước, so sánh lượng truyền ẩm bề mặt và tâm gỗ có sự khác biệt đáng kể, điều này là do ẩm trên bề mặt hóa hơi khi đạt điểm sôi tại nhiệt độ sấy và áp suất chân không nhanh hơn tâm gỗ. So sánh, lượng ẩm di chuyển thành nhiều hay ít phụ thuộc và kích thước nguyên liệu đặc biệt là chiều dày nguyên

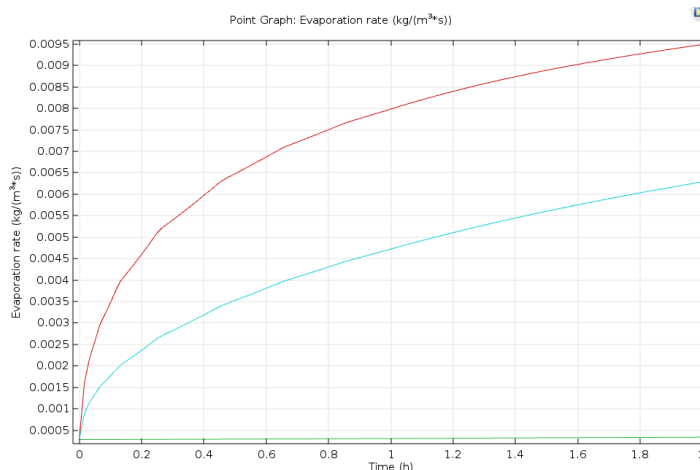
liệu gỗ. Khi gỗ có kích thước chiều dày 20 mm, chiều rộng khác nhau thì lượng truyền ẩm không có sự khác biệt, kích thước gỗ cùng chiều rộng 150 mm nhưng chiều dày khác nhau thì có sự khác biệt rất lớn. Sự thoát ẩm có mối tương quan song song cùng sự truyền nhiệt, nhiệt truyền càng nhanh, thoát ẩm càng nhanh và ngược lại.



**Hình 3.31.** Đồ thị biểu diễn lượng truyền ẩm bên trong mẫu gỗ 20 x 50 x 500 mm (a), 50 x 50 x 500 mm (b), 20 x 150 x 500 mm (c), 50 x 50 x 500 mm (d)

Thông qua mô phỏng tiến hành tính toán và xác định tốc độ hóa hơi trong hai giai đoạn sấy: trên điểm bão hòa thớ gỗ tốc độ bay hơi tăng nhanh qua đồ thị hình 3.32 cho thấy tốc độ bay hơi tăng sau 120 phút, trong 40 phút đầu tiên tăng rất nhanh, sau đó tăng đều qua từng giai đoạn. Quá trình di chuyển ẩm ra bề mặt thanh gỗ và khuếch tán ẩm ra môi trường là một diễn biến cộng hợp nhiệt và ẩm, khi nhiệt làm nóng gỗ và áp suất hạ thấp tạo điều kiện sự sôi xảy ra nước bên trong gỗ, nước sẽ hóa hơi và di chuyển ra bề mặt, khuếch tán ra môi trường. Quá

trình này diễn ra liên tục đến khi độ ẩm gỗ giảm đến giá trị đạt yêu cầu. Giai đoạn sấy dưới điểm bão hòa thứ gỗ tốc độ bay hơi tăng chậm qua đồ thị hình 3.32, so sánh tốc độ bay hơi hai giai đoạn có sự khác biệt rất lớn, điển hình sau 2 giờ tốc độ bay hơi khi độ ẩm dưới điểm bão hòa mới đạt được tương đương với tốc độ bay hơi sau 40 phút khi độ ẩm trên điểm bão hòa. Điều này được giải thích là phụ thuộc vào cấu tạo nguyên liệu gỗ, trên điểm bão hòa nước tự do trong ruột tế bào dễ dàng di chuyển và thoát ra và khuếch tán vào môi trường, trong khi nước liên kết nằm vách tế bào sẽ rất khó khăn trong việc thoát ra và khuếch tán vào môi trường. Đây là điểm chính yếu quan trọng lý giải việc thoát ẩm tốc độ nhanh giai đoạn đầu quá trình sấy khi độ ẩm nguyên liệu lớn hơn 20%, chậm vào giai đoạn sau khi độ ẩm nguyên liệu nhỏ hơn 20%.



**Hình 3.32.** Mô phỏng tốc độ bay hơi trên và dưới điểm bão hòa

### Kết luận

Thông qua mô hình vật lý sấy gỗ Cẩm xe bằng phương pháp chân không, xác định mô hình toán quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm trong sấy gỗ chân không, từ mô hình toán tiến hành giải bằng phương pháp số và mô phỏng truyền nhiệt và ẩm trên các dạng kích thước khác nhau của thanh gỗ Cẩm xe. Kết quả thể hiện qua hình ảnh mô phỏng, đồ thị và các giá trị lý thuyết đạt được là cơ sở khoa học cho việc dự đoán diễn biến quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm trong quá trình sấy gỗ Cẩm xe bằng phương pháp sấy chân không.

### 3.10 Kết quả thực nghiệm kiểm chứng lý thuyết quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm sấy chân không gỗ Cẩm xe

#### 3.10.1 Kết quả kiểm chứng gỗ Cẩm xe kích thước 20 x 50 x 500 mm

Để kiểm chứng sự phù hợp và tính chính xác của mô hình toán đã thiết lập cho máy sấy chân không gỗ Cắm xe, kết quả mô phỏng mô hình toán được so sánh với kết quả sấy thực nghiệm sấy chân không gỗ Cắm xe.

Thực nghiệm: sấy chân không thanh gỗ kích thước 20 x 50 x 500 mm, gỗ có độ ẩm ban đầu  $W_{woIN} = 40\%$ , nhiệt độ sấy  $50^{\circ}\text{C}$ , áp suất chân không 0,12 bar, cường độ bức xạ hồng ngoại  $600 \text{ W/m}^2$ , gỗ giảm độ ẩm từ 40% về 10% sau thời gian 36 giờ, kết quả thể hiện trên hình 3.35, 3.36.

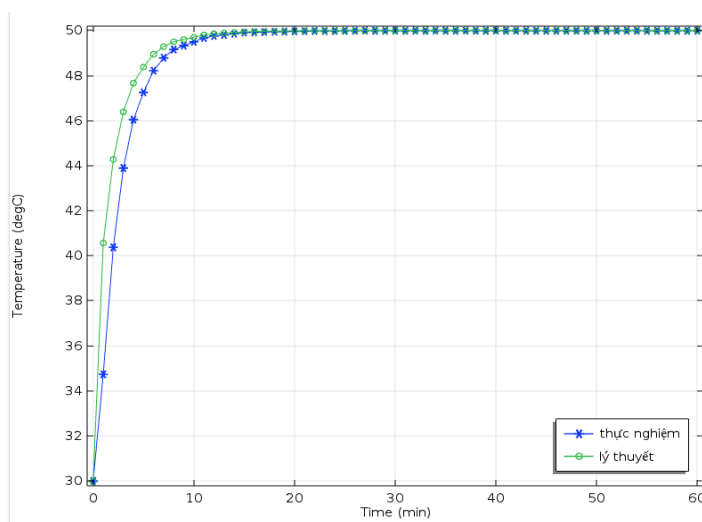
Lý thuyết: thông qua mô hình toán về truyền nhiệt và ẩm sấy chân không gỗ Cắm xe, tiến hành giải các mô hình toán và kết quả thể hiện trên hình 3.35, 3.36.

### 3.10.1.1 Đường cong nhiệt độ sấy gỗ Cắm xe 20 x 50 x 500 mm

Quá trình truyền nhiệt trên thanh gỗ, kết quả lý thuyết được ghi nhận thông qua mô phỏng truyền nhiệt, kết quả thực nghiệm thì ghi nhận từ thí nghiệm đo trực tiếp nhiệt độ tâm thanh gỗ thông qua cảm biến nhiệt.

**Bảng 3.2.** Kết quả thực nghiệm và lý thuyết nhiệt độ tâm thanh gỗ Cắm xe kích thước 20 x 50 x 500 mm sấy chân không

STT	Thời gian (phút)	Nhiệt độ thực nghiệm ( $^{\circ}\text{C}$ )	Nhiệt độ lý thuyết ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	0	29,9	30
2	1	40,5	40,8
3	2	44,3	44,7
4	3	46,4	47,1
5	4	47,7	47,9
6	5	48,4	48,8
7	6	48,9	49,1
8	7	49,3	49,5
9	8	49,5	49,7
10	9	49,6	49,8
11	10	49,7	49,8
12	11	49,8	49,9
13	12	49,9	50,0
14	13	49,9	50,0
15	14	49,9	50,0
16	15	50,1	50,0



**Hình 3.33.** Nhiệt độ lý thuyết và thực nghiệm tại tâm thanh gỗ Cỡ xe 20 x 50 x 500 mm sấy chân không

So sánh hai đường cong nhiệt tại tâm thanh gỗ lý thuyết và thực nghiệm thông qua hình 3.33 cho thấy nhiệt độ thực nghiệm diễn biến chậm hơn lý thuyết từ 1 – 2<sup>o</sup>C trong 10 phút đầu tiên, thời gian tiếp theo lý thuyết thì có sự ổn định, nhiệt độ thực nghiệm diễn tiến sau lý thuyết nhưng chiều hướng tương đồng với lý thuyết, điều này được giải thích như sau:

Thứ nhất, trên thực tế nhiệt bức xạ còn tồn thất các vị trí vách buồng sấy, hay các bộ phận khác đặt trong buồng sấy, ảnh hưởng đến quá trình hấp thụ nhiệt bức xạ của nguyên liệu gỗ.

Thứ hai, gỗ là nguyên liệu tự nhiên không đồng chất ở các vị trí nên khả năng hấp thụ bức xạ nhiệt các vị trí có sự khác biệt nhau, trong khi đó về mặt lý thuyết được cho là gỗ đồng chất nên nhiệt được hấp thụ bằng nhau tại các vị trí. Vì vậy kết quả nhiệt thực nghiệm có sự chênh lệch so với lý thuyết.

Thứ ba, hệ số dẫn nhiệt theo tính toán lý thuyết luôn ổn định và logic, trong khi đó thực tế thực nghiệm có sự thay đổi nhất định tùy thuộc vào nguyên vật liệu và điều kiện diễn biến của quá trình hấp thụ nhiệt bức xạ.

Đường cong nhiệt lý thuyết và thực nghiệm cho thấy cả hai quá trình không có sự sai khác đáng kể, sai lệch tiêu chuẩn lý thuyết so với thực nghiệm là 1,33, sự sai lệch chủ yếu diễn ra trong giai đoạn đầu của quá trình, do thực nghiệm diễn ra chậm hơn lý thuyết, giai đoạn sau thì hai quá trình này gần như tương đồng nhau.



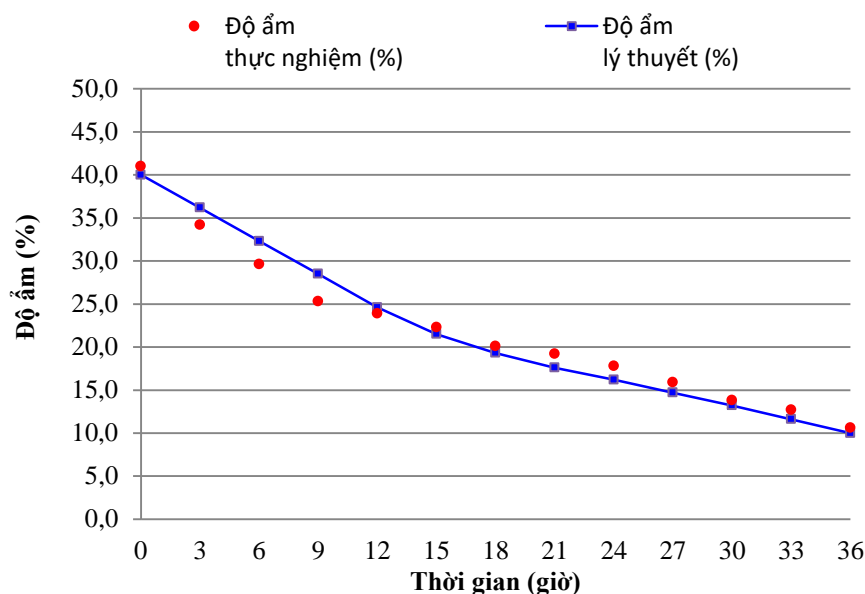
### 3.10.1.2 Đường cong sấy gỗ Căm xe 20 x 50 x 500 mm

**Bảng 3.3.** Kết quả thực nghiệm và lý thuyết quá trình giảm ẩm của gỗ Căm xe kích thước 20 x 50 x 500 mm sấy chân không

STT	Thời gian (giờ)	Độ ẩm thực nghiệm (%)	Độ ẩm lý thuyết (%)
1	0	41,0	40,0
2	3	34,2	36,2
3	6	29,6	32,3
4	9	25,3	28,5
5	12	23,9	24,6
6	15	22,3	21,5
7	18	20,1	19,3
8	21	19,2	17,6
9	24	17,8	16,2
10	27	15,9	14,7
11	30	13,8	13,2
12	33	12,7	11,6
13	36	10,6	10,0

Từ bảng 3.3 và hình 3.34 cho thấy sự biến đổi độ ẩm gỗ theo thời gian qua mô hình lý thuyết và thực nghiệm có sự đồng dạng và tương thích. Tại nhiệt độ sấy 50°C, sai lệch độ ẩm trung bình 1,16 giữa lý thuyết và thực nghiệm (sai số chuẩn của giá trị lý thuyết). Thông qua hình 3.36 thể hiện quá trình giảm ẩm lý thuyết và thực nghiệm của gỗ chia 2 giai đoạn, trên điểm bão hòa thứ gỗ ( $W > 20\%$ ) độ ẩm gỗ giảm rất nhanh từ 40% về 20% trong 15 giờ tương ứng mỗi giờ giảm 1,3% độ ẩm, giai đoạn sau dưới điểm bão hòa ( $W < 20\%$ ) trong 21 giờ sau giảm từ 20% về 10% tương ứng 0,47%/giờ. Điều này được giải thích thông qua đặc điểm cấu tạo gỗ, nước trong gỗ tồn tại hai dạng chính : nước tự do (trong ruột tế bào và khoảng không giữa các tế bào) và nước liên kết (trong vách tế bào). Khi độ ẩm gỗ trên điểm bão hòa thứ gỗ ( $W > 20\%$ ), nước tự do dễ dàng thoát ra, di chuyển ra bề mặt và khuếch tán ra môi trường nên quá trình giảm ẩm rất nhanh. Khi độ ẩm gỗ dưới điểm bão hòa thứ gỗ ( $W < 20\%$ ), nước liên kết bắt đầu thoát ra, tuy nhiên do nước liên kết nằm trong khoảng cách các vi sợi cấu tạo vách tế bào nên quá trình thoát ẩm cần nhiều năng lượng vì vậy quá trình giảm ẩm giai

đoạn sau diễn ra rất chậm, sự thoát ẩm cần nhiều thời gian để khuếch tán ra bề mặt gỗ và môi trường.



**Hình 3.34.** Đường giảm ẩm lý thuyết và thực nghiệm trong quá trình sấy chân không gỗ Căm xe 20 x 50 x 500 mm

### 3.10.2 Kết quả kiểm chứng gỗ Căm xe kích thước 50 x 50 x 500 mm

Để kiểm chứng sự phù hợp và tính chính xác của mô hình toán đã thiết lập trong sấy chân không gỗ Căm xe, kết quả mô phỏng mô hình toán được so sánh với kết quả sấy thực nghiệm sấy chân không gỗ Căm xe.

Thực nghiệm: sấy chân không thanh gỗ kích thước 50 x 50 x 500 mm, gỗ có độ ẩm ban đầu  $W_{woIN} = 40\%$ , nhiệt độ sấy  $50^{\circ}\text{C}$ , áp suất chân không 0,12 bar, gỗ giảm độ ẩm từ 40% về 10% sau thời gian 75 giờ, kết quả thể hiện trên hình 3.35, 3.36.

Lý thuyết: thông qua mô hình toán truyền ẩm sấy chân không gỗ Căm xe, tiến hành giải các mô hình toán và kết quả ghi nhận và thể hiện trên hình 3.35, 3.36.

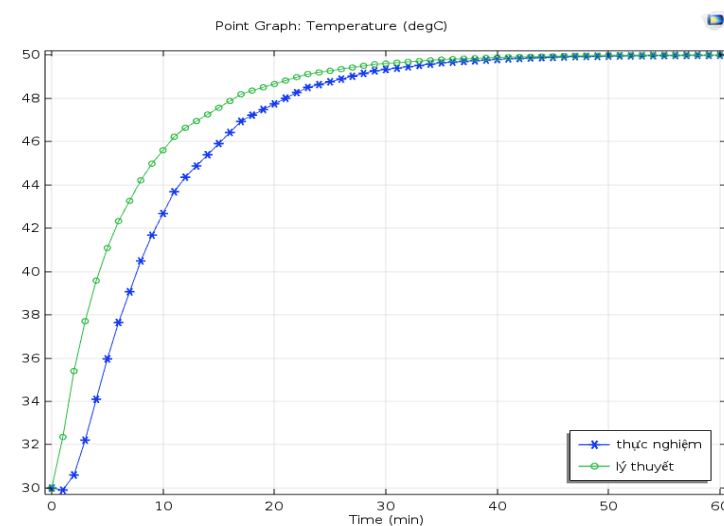
#### 3.10.2.1 Đường cong nhiệt độ sấy gỗ Căm xe 50 x 50 x 500 mm

Kết quả đường cong nhiệt lý thuyết và thực nghiệm cho thấy thay đổi nhiệt độ gỗ tại nhiệt độ sấy  $50^{\circ}\text{C}$  được biểu diễn trên hình 3.35. Hai đường cong nhiệt có xu hướng tăng biểu diễn nhiệt độ của gỗ trong quá trình sấy, trong quá trình thực nghiệm nhiệt bị tổn thất qua các thiết bị, vách buồng sấy, tuy nhiên trong quá trình tính toán các yếu tố này đã bỏ qua. Vì vậy, kết quả nhiệt thực nghiệm

có sự sai lệch so với lý thuyết nhưng vẫn theo xu hướng tăng theo thời gian đạt nhiệt độ sấy.

**Bảng 3.4.** Kết quả thực nghiệm và lý thuyết nhiệt độ tâm thanh gỗ Cắm xe kích thước 50 x 50 x 500 mm sấy chân không

STT	Thời gian (phút)	Nhiệt độ TN (°C)	Nhiệt độ LT (°C)	STT	Thời gian (phút)	Nhiệt độ TN (°C)	Nhiệt độ LT (°C)
1	0	29	30	16	15	45,9	47,5
2	1	29,9	32,3	17	16	46,4	47,8
3	2	30,6	35,4	18	17	46,9	48,1
4	3	32,2	37,7	19	18	47,2	48,3
5	4	34,1	39,6	20	19	47,5	48,6
6	5	35,9	41,1	21	20	47,8	48,9
7	6	37,6	42,3	22	21	48,0	49,1
8	7	39,1	43,2	23	22	48,2	49,3
9	8	40,5	44,3	24	23	48,5	49,5
10	9	41,7	45,1	25	24	48,6	49,7
11	10	42,8	45,5	26	25	48,7	49,8
12	11	43,6	46,2	27	26	48,9	49,9
13	12	44,3	46,6	28	27	49,3	50,0
14	13	44,8	46,9	29	28	49,9	50,0
15	14	45,3	47,2	30	29	50,0	50,0



**Hình 3.35.** Nhiệt độ lý thuyết và thực nghiệm tâm thanh gỗ Cắm xe 50 x 50 x 500 mm sấy chân không.

Trong quá trình sấy các phân tử nước trong gỗ sẽ được gia nhiệt bằng bức xạ hồng ngoại, do đó trong vùng chịu ảnh hưởng của bức xạ vật liệu sẽ nóng lên trên toàn bộ thể tích, góp phần tăng tốc độ thoát ẩm của gỗ. Khi kết hợp gia nhiệt

bức xạ và hạ áp suất sẽ đưa điểm sôi về nhiệt độ thấp trong khoảng 50<sup>0</sup>C nước trong gỗ sôi và bốc hơi nhanh hơn, khuếch tán ra môi trường, độ ẩm của gỗ theo đó giảm dần, về độ ẩm yêu cầu. Mặc dù giữa nhiệt lý thuyết và thực tế có sự khác biệt cách nhau 5 - 7<sup>0</sup>C nhưng xu hướng của sự phân bố nhiệt có sự tương đồng. Điều này cho thấy mô hình truyền nhiệt lý thuyết gần với thực tế và có khả năng dùng kết quả lý thuyết để dự đoán cho việc truyền nhiệt trong quá trình sấy chân không gỗ Căm xe.

### 3.10.2.2 Đường cong sấy gỗ Căm xe 50 x 50 x 500 mm

**Bảng 3.5.** Kết quả thực nghiệm và lý thuyết độ ẩm gỗ Căm xe kích thước 50 x 50 x 500 mm sấy chân không

STT	Thời gian (giờ)	Độ ẩm thực nghiệm (%)	Độ ẩm lý thuyết (%)	STT	Thời gian (giờ)	Độ ẩm thực nghiệm (%)	Độ ẩm lý thuyết (%)
1	0	40,4	40,0	14	39	16,8	16,2
2	3	35,5	37,1	15	42	16,5	15,7
3	6	32,3	34,2	16	45	15,9	15,2
4	9	28,7	31,1	17	48	15,2	14,8
5	12	26,4	28,2	18	51	14,9	14,3
6	15	23,5	25,1	19	54	13,9	13,8
7	18	21,1	22,2	20	57	13,8	13,3
8	21	19,7	20,1	21	60	13,5	12,9
9	24	19,1	19,0	22	63	12,9	12,3
10	27	18,9	18,2	23	66	12,3	11,7
11	30	18,6	17,7	24	69	11,7	11,1
12	33	17,7	17,3	25	72	11,1	10,5
13	36	17,0	16,7	26	75	10,3	10,0

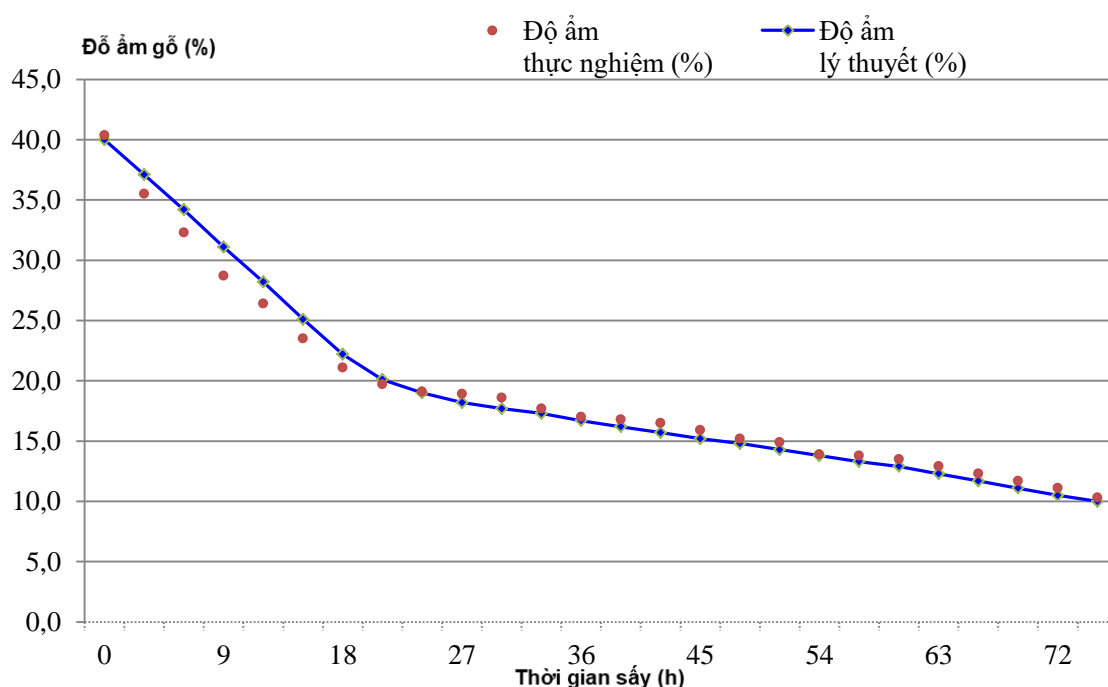
So sánh quá trình giảm ẩm của của gỗ lý thuyết và thực nghiệm được thể hiện hình 3.36, quá trình giảm ẩm của gỗ chia 2 giai đoạn, trong giai đoạn  $W > 20\%$  trên điểm bão hòa thứ gỗ cho thấy độ ẩm gỗ giảm nhanh, tốc độ thoát ẩm cao, trong giai đoạn  $W < 20\%$ , độ ẩm giảm chậm, tốc độ thoát ẩm chậm dần, giải thích điều này như sau:

Thứ nhất, do đặc điểm cấu tạo nguyên liệu gỗ, trên điểm bão hòa thứ gỗ nước tự do dễ dàng di chuyển ra bề mặt, tốc độ nhanh, ẩm theo đó giảm nhanh. Dưới bão hòa thứ gỗ nước liên kết nằm trong khoảng cách các vi sợi cấu tạo vách tế bào chủ yếu khuếch tán ra ngoài nên tốc độ chậm, độ ẩm giảm chậm. Vì vậy

đặc điểm sinh học của nguyên liệu ảnh hưởng đến quá trình thoát ẩm và giảm ẩm của nguyên liệu gỗ khi sấy.

Thứ hai, nguyên liệu gỗ không đồng chất, so sánh trên điểm bão hòa thứ gỗ giữa lý thuyết và thực nghiệm sai khác nhau trong 21 giờ đầu, điều này là do quá trình giảm ẩm lý thuyết xem gỗ là nguyên liệu đồng chất nên việc giảm ẩm theo sự thoát ẩm của gỗ trong quá trình sấy là ổn định và đồng đều theo thời gian, đường giảm ẩm lý thuyết giai đoạn này ổn định hơn đường thực nghiệm. Trong khi đó, tại thực nghiệm quá trình giảm ẩm phụ thuộc nhiều yếu tố truyền nhiệt, thoát ẩm, vì vậy quá trình giảm ẩm thực nghiệm bị ảnh hưởng nên diễn biến chậm hơn lý thuyết nên có biên dạng thấp hơn lý thuyết.

Thứ ba, vai trò của điểm bão hòa thứ gỗ, trong quá trình giảm ẩm chia hai giai đoạn, giai đoạn đầu  $W > 20\%$ , nước tự do trong ruột tế bào di chuyển nhanh ra bề mặt và khuếch tán môi trường, giai đoạn sau  $W < 20\%$ , dưới điểm bão hòa thứ gỗ nước liên kết trong vách tế bào di chuyển chậm nên ảnh hưởng quá trình thoát ẩm.



**Hình 3.36.** Đường giảm ẩm lý thuyết và thực nghiệm trong quá trình sấy chân không gỗ Cẩm xe

Qua hình 3.36 trên có thể thấy rằng các kết quả dự đoán từ mô hình lý thuyết mô tả phù hợp và khá tương thích với diễn biến của quá trình giảm ẩm

thực nghiệm. Sự sai lệch giữa kết quả lý thuyết và thực nghiệm là do thực tế khi tiến hành sấy, các giá trị về nhiệt, ẩm của vật liệu thay đổi, tất nhiên là không đồng đều các vị trí, do gỗ là nguyên liệu tự nhiên quá trình khuếch tán ẩm bị ảnh hưởng thêm bởi nhiều yếu tố. Trong phạm vi nghiên cứu lý thuyết bỏ qua do tính phức tạp của nguyên liệu và các hiện tượng. Chính vì thế, nên kết quả mô hình lý thuyết cho thấy có sự khác biệt với kết quả khảo nghiệm thực tế. Tuy nhiên, với những kết quả so sánh cho thấy các đường cong sấy được tính từ mô hình toán lý thuyết có biên dạng và xu hướng tương đồng với đường cong thực nghiệm. Do đó hoàn toàn có thể dùng mô hình toán lý thuyết đã xây dựng để dự đoán quá trình thoát ẩm khi sấy gỗ bằng phương pháp sấy chân không.

**Thảo luận:** Kết quả kiểm chứng lý thuyết bằng thực nghiệm cho thấy sai lệch giữa hai mô hình < 5% quá trình truyền nhiệt và ẩm, sự tương thích khá lớn giữa lý thuyết và thực nghiệm. Điều này cho thấy mô hình lý thuyết được xây dựng rất gần với thực nghiệm, ứng dụng kết quả để dự đoán quá trình truyền nhiệt và ẩm trong quá trình sấy gỗ Căm xe là rất khả thi và có ý nghĩa quan trọng, nhằm góp phần là cơ sở khoa học vững chắc để áp dụng trên thực tiễn và sản xuất, đặc biệt là trong công nghệ sấy chân không gỗ Căm xe. Theo kết quả nghiên cứu cho thấy quá trình truyền nhiệt trong thanh gỗ phụ thuộc vào kích thước chiều dày của gỗ, điển hình với gỗ kích thước 20 x 50 x 500 mm đạt nhiệt độ sấy sau khoảng 10 phút trong khi đó gỗ kích thước 50 x 50 x 500 mm thì phải mất khoảng 30 phút, nhiệt truyền theo kích thước chiều dày từ ngoài vào trong đánh dấu sự thoát ẩm từ trong ra ngoài. Thực nghiệm kiểm chứng cũng cho thấy quá trình giảm ẩm phụ thuộc vào chiều dày thanh gỗ, khi sấy gỗ có kích thước 50 x 50 x 500 mm thì cần 72 giờ để gỗ độ ẩm từ 40% giảm còn 10%, trong khi đó với kích thước tương tự chỉ nhỏ hơn chiều dày 30 mm mà thời gian sấy còn 36 giờ. Điều này cho thấy, kích thước chiều dày giảm hơn  $\frac{1}{2}$  thì thời gian sấy giảm một nửa. Mối quan hệ này cho thấy việc lựa chọn kích thước nguyên liệu có ảnh hưởng quan trọng đến thời gian sấy chân không của gỗ.

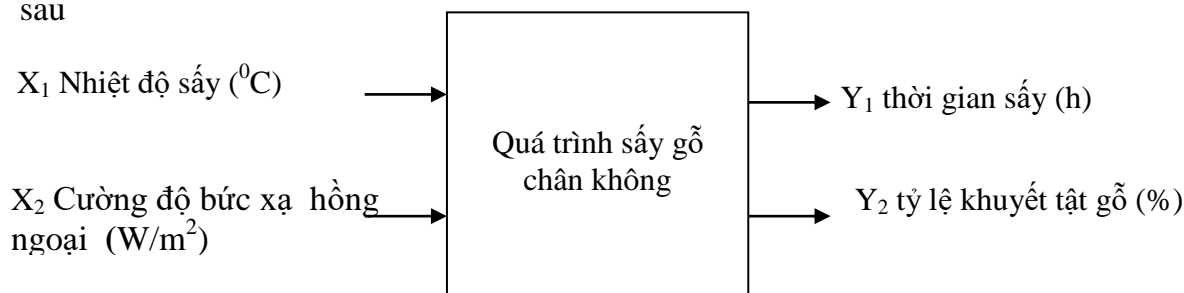
### **3.11 Xác định các thông số công nghệ sấy chân không gỗ Căm xe**

Các thông số công nghệ sấy chân không gỗ Căm xe ảnh hưởng đến thời gian sấy, tỷ lệ khuyết tật gỗ sau sấy đó là nhiệt độ sấy ( $X_1$ ), Cường độ bức xạ

hồng ngoại ( $X_2$ ) cần phải được xác định trước khi đi xác lập qui trình công nghệ sấy chân không gỗ Căm xe.

### Bài toán hộp đen

Thông qua các phân tích mục 2.12 chương 2 cho thấy các thông số đầu vào như nhiệt độ sấy ( $X_1$ ), Cường độ bức xạ hồng ngoại ( $X_2$ ) khi sấy sẽ ảnh hưởng đồng thời lên các chỉ tiêu chất lượng và kỹ thuật của sản phẩm sau khi sấy là thời gian sấy, tỷ lệ khuyết tật gỗ sau sấy. Mô hình bài toán hộp đen được thể hiện như sau



**Hình 3.37.** Mối quan hệ thông số đầu vào và đầu ra

### Vùng thí nghiệm

**Phương án thực hiện thí nghiệm bậc 1:** miền thực nghiệm giới hạn trong khoảng giữa điểm trên (giá trị mã hóa là +1), điểm dưới (giá trị mã hóa là -1).

**Phương án thực hiện thí nghiệm bậc 2:** miền thực nghiệm giới hạn trong khoảng giữa điểm sao trên (giá trị mã hóa là  $+\alpha$ ), điểm sao dưới (giá trị mã hóa là  $-\alpha$ ). Kết quả được thể hiện bằng bảng các mức thí nghiệm như sau

**Bảng 3.6.** Mức và khoảng biến thiên của các yếu tố nghiên cứu mô hình thí nghiệm bậc nhất (I) và bậc hai (II)

	Stt	Các thông số	Nhiệt độ sấy $X_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Cường độ bức xạ hồng ngoại $X_2$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
	<b>I</b>	1	Mức trên +1	57
2		Mức cơ sở 0	52	600
3		Mức dưới -1	47	500
4		Khoảng biến thiên $\Delta l$	5	100
<b>II</b>	Stt	Các thông số	Nhiệt độ sấy $X_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Cường độ bức xạ hồng ngoại $X_2$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
	1	Mức sao trên $+\alpha$	59	741

2	Mức trên +1	57	700
3	Mức cơ sở 0	52	600
4	Mức dưới -1	47	500
5	Mức sao dưới $-\alpha$	45	459
6	Khoảng biến thiên $\Delta l$	5	100

**Bảng 3.7.** Nhiệt độ sấy và áp suất chân không tương ứng

Stt	Nhiệt độ sấy ( $^{\circ}\text{C}$ )	Áp suất chân không (bar)
1	59	0,217
2	57	0,180
3	52	0,140
4	47	0,105
5	45	0,100
6	50	0,120

### 3.11.1 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Cắm xe 20 x 50 x 500 mm - thông số đầu ra thời gian sấy ( $Y_{25tg1}$ )

#### 3.11.1.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{25tg1}$

Tiến hành sấy chân không gỗ Cắm xe thực nghiệm để xác định các thông số tối ưu – thông số đầu ra thời gian sấy  $Y_{25tg1}$

Ma trận thí nghiệm và kết quả thí nghiệm bậc nhất được thể hiện phụ lục 15. Tiến hành phân tích phương sai và hồi quy cho hàm toán dạng đa thức bậc nhất cho kết quả trình bày phụ lục 16:

Mô hình bậc nhất có thể được viết theo dạng như phương trình sau:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2.$$

Phương trình hồi quy thời gian sấy  $Y_{25tg1}$  (h) với hệ số tương quan R-squared = 0.9 có dạng mã hóa là:

$$Y_{25tg1} = 38,2857 - 9,75.X_1 - 5,75.X_2 + 3,75.X_1.X_2 \quad (3.46)$$

Qua phụ lục 16, 17 cho thấy các hệ số hồi quy đều đảm bảo độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ).. Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi qui với thực nghiệm cần thiết phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0,05$ .

$$F_t = 60,04 > F_b = 18,513 \Rightarrow \text{mô hình không tương thích.}$$



Vậy phương trình hồi qui (3.46) tìm được không tương thích với thực nghiệm. Do phương trình hồi qui  $Y_{25tg1}$  không tương thích thực nghiệm do đó cần thiết phải tiến hành cải tiến mô hình mở rộng vùng nghiên cứu, nâng bậc của phương trình thực nghiệm từ bậc nhất lên bậc hai và miền thí nghiệm lúc này được mở rộng ra với cánh tay đòn  $\pm\alpha$ .

### 3.11.1.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{25tg2}$

Khi nâng bậc phương trình từ bậc nhất lên bậc hai phương án thực nghiệm tiến hành theo phương pháp bất biến quay bậc II của Box Hunter. Ma trận và kết quả thí nghiệm dạng mã hoá thể hiện phụ lục 20. Từ ma trận thí nghiệm tiến hành phân tích phương sai và hồi qui với kết quả đạt được thể hiện phụ lục 21, 22.

Mô hình bậc hai được chọn như sau

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2$$

Hệ số tương quan  $R = 0,9$

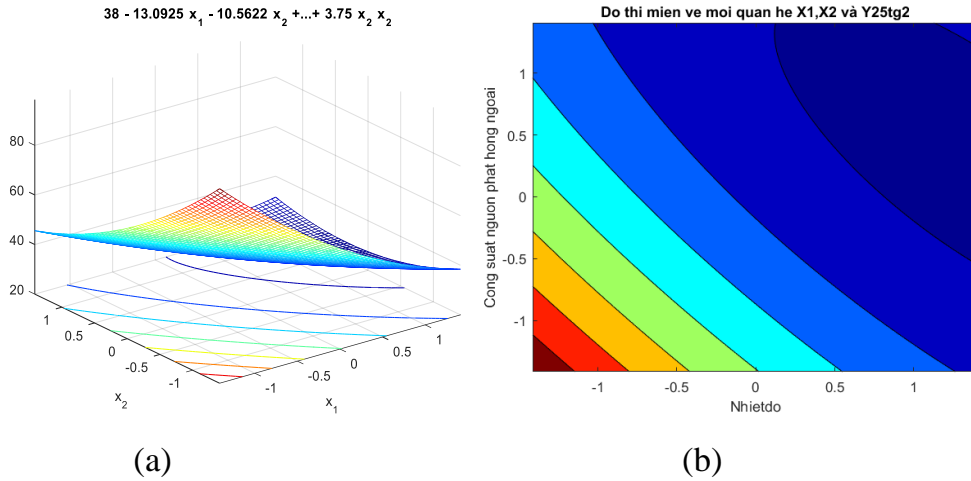
Phương trình hồi qui dạng mã hoá bậc hai thể hiện thời gian sấy  $Y_{25tg2}$  sau khi sấy chân không gỗ Căm xe như sau

$$Y_{25tg2} = 38 - 13,0925.X_1 - 10,5622.X_2 + 5,75.X_1.X_2 + 4.X_1^2 + 3,75.X_2^2 \quad (3.47)$$

Từ phụ lục 21, 22 thể hiện kết quả phân tích Anova và các hệ số hồi qui được kiểm tra độ tin cậy theo tiêu chuẩn Student, các hệ số hồi quy của thông số đủ độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi qui với thực nghiệm cần thiết ta phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0.05$ .

Ta có  $F = 2,88 < F_{1-p} = 6,5914 \Rightarrow$  Mô hình đảm bảo tương thích, mô hình hồi qui  $Y_{25tg2}$  là phù hợp. Vậy phương trình hồi qui (3.47) tìm được thông số đầu ra  $Y_{25tg2}$  tương thích với thực nghiệm.

Phương trình hồi qui thể hiện mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào  $X_1$  (nhiệt độ sấy),  $X_2$  (cường độ bức xạ hồng ngoại), với thông số đầu ra  $Y_{25tg2}$  (thời gian sấy).



**Hình 3.38.** Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b) mối quan hệ  $X_1$ ,  $X_2$  và  $Y_{25tg2}$

Mối quan hệ giữa các thông số  $X_1$ ,  $X_2$  với  $Y_{25tg2}$ , thể hiện chi tiết qua đồ thị hình 3.38. Đồ thị 3D biểu diễn phương trình tương quan mối quan hệ  $X_1$ ,  $X_2$  và  $Y_{25tg2}$  bằng miền lưới trong không gian, miền lưới biểu diễn các giá trị thỏa mãn điều kiện ràng buộc của  $X_1$ ,  $X_2$ .

Để quan sát và xác định miền tối ưu cụ thể hơn chiều đồ thị 3D lên hệ mặt phẳng 2D thể hiện qua đồ thị miền (contour) mối quan hệ giữa  $X_1$ ,  $X_2$  và  $Y_{25tg2}$  trong mặt phẳng 2D, quan sát thấy đồ thị chia thành các vùng có màu sắc khác nhau tương ứng các vùng giá trị khác nhau. Vùng màu đỏ là vùng giá trị lớn nhất (max value) và trải dài về phía màu xanh dương đậm là vùng giá trị nhỏ nhất (min value). Hàm thời gian sấy  $Y_{25tg2} \rightarrow \min$  nên giá trị tối ưu  $Y_{25tg2}$  thuộc vùng màu xanh dương đậm.

### 3.11.1.3 Thông số tối ưu đối với hàm thời gian - $Y_{25tg2}$

Bài toán tối ưu được giải trên máy tính nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Matlab kết quả thể hiện phụ lục 55. Hàm thời gian được tối ưu hóa theo phương trình (3.47). Hàm mục tiêu:  $Y_{25tg2} \rightarrow \min$ .

Các điều kiện ràng buộc:  $-1,414 \leq x_i \leq +1,414$ ;  $i = 1 \div 2$ .

**Bảng 3.8.** Giá trị tối ưu - hàm thời gian  $Y_{25tg2}$  (giờ)

STT	Thông số đầu vào	Giá trị		Thông số đầu ra	Giá trị tối ưu
1	$X_1$	1,3907	58,9 °C	$Y_{25tg2}$	27,09 (giờ)
2	$X_2$	0,3421	634,2 W/m <sup>2</sup>		

Qua bảng 3.8 cho thấy hàm thời gian  $Y_{25tg2}$  (giờ) đạt giá trị tối ưu nhất là 27,09 (giờ) với  $X_1 = 1,3907$  ( $T_s = 58,9$  °C)  $X_2 = 0,3421$  ( $P = 634,2$  W/m<sup>2</sup>). Với kết quả tối ưu đạt được cho thấy nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại ảnh hưởng thời gian sấy cả hai yếu tố này đều đạt giá trị trong vùng nghiên cứu. Thông qua kết quả cho thấy để đạt thời gian tối ưu nhiệt độ sấy ở mức cao 58,9°C và cường độ bức xạ hồng ngoại 634,2 W/m<sup>2</sup> để nước trong gỗ sẽ di chuyển nhanh ra bề mặt và khuếch tán ra môi trường. Kết quả trên cho thấy để rút ngắn thời gian sấy cho gỗ Cẩm xe cần thiết phải đạt giá trị tối ưu của hai thông số công nghệ trên.

### **3.11.2 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Cẩm xe kích thước gỗ 20x50x500 mm - thông số đầu ra tỷ lệ khuyết tật gỗ ( $Y_{25kt}$ )**

#### **3.11.2.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{25kt1}$**

Tiến hành sấy chân không gỗ Cẩm xe thực nghiệm để xác định các thông số tối ưu – thông số đầu ra tỷ lệ khuyết tật gỗ  $Y_{25kt1}$

Ma trận thí nghiệm và kết quả thí nghiệm bậc nhất được thể hiện phụ lục 15. Tiến hành phân tích phương sai và hồi quy cho hàm toán dạng đa thức bậc nhất cho kết quả trình bày phụ lục 18, 19:

Mô hình bậc nhất có thể được viết theo dạng như phương trình sau:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2.$$

Phương trình hồi quy tỷ lệ khuyết tật  $Y_{25kt1}$  (%) với hệ số tương quan R-squared = 0,9 có dạng mã hóa là:

$$Y_{25kt1} = 4,15571 + 1,77.X_1 + 0,85.X_2 + 0,555.X_1.X_2 \quad (3.48)$$

Qua phụ lục 18, 19 cho thấy các hệ số hồi quy đều đảm bảo độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P$ -value > 0,05). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi qui với thực nghiệm cần thiết phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0.05$ .

$$F_t = 244,55 > F_b = 18,513 \Rightarrow \text{mô hình không tương thích.}$$

Vậy phương trình hồi qui (3.48) tìm được không tương thích với thực nghiệm. Do phương trình hồi qui  $Y_{25kt1}$  không tương thích thực nghiệm, do đó cần thiết phải tiến hành cải tiến mô hình mở rộng vùng nghiên cứu, nâng bậc của phương trình thực nghiệm từ bậc nhất lên bậc hai và miền thí nghiệm lúc này được mở rộng ra với cánh tay đòn  $\pm\alpha$ .

### 3.11.2.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{25kt2}$

Khi nâng bậc phương trình từ bậc nhất lên bậc hai phương án thực nghiệm tiến hành theo phương pháp bất biến quay bậc II của Box Hunter. Ma trận và kết quả thí nghiệm dạng mã hoá thể hiện phụ lục 20. Từ ma trận thí nghiệm tiến hành phân tích phương sai và hồi qui với kết quả đạt được thể hiện phụ lục 23, 24.

Mô hình bậc hai được chọn như sau

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2$$

Hệ số tương quan  $R = 0,9$

Phương trình hồi qui dạng mã hoá bậc hai thể hiện tỷ lệ khuyết tật  $Y_{25kt2}$  sau khi sấy chân không gỗ Căm xe như sau

$$Y_{25kt2} = 4,214 + 2,7818.X_1 + 2,29485.X_2 + 1,6125.X_1.X_2 + 1,00238.X_1^2 - 0,827375.X_2^2 \quad (3.49)$$

Từ phụ lục 23, 24 thể hiện kết quả phân tích Anova và các hệ số hồi qui được kiểm tra độ tin cậy theo tiêu chuẩn Student, các hệ số hồi quy của thông số đủ độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi qui với thực nghiệm cần thiết ta phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0.05$ .

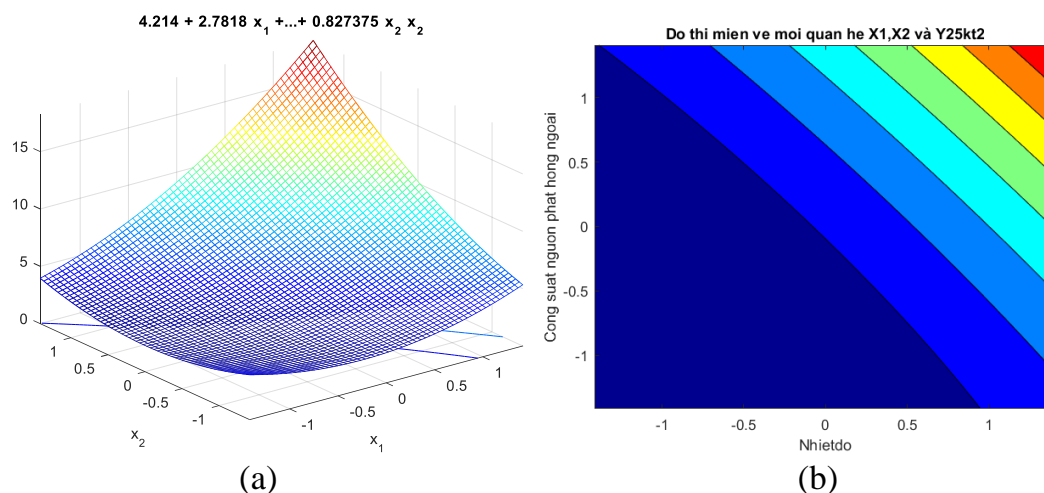
Ta có  $F_t = 4,46 < F_{1-p} = 6,5914 \Rightarrow$  Mô hình đảm bảo tương thích, mô hình hồi qui  $Y_{25kt2}$  là phù hợp. Vậy phương trình hồi qui (3.49) tìm được thông số đầu ra  $Y_{25kt2}$  tương thích với thực nghiệm.

Phương trình hồi qui thể hiện mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào  $X_1$  (nhiệt độ sấy),  $X_2$  (cường độ bức xạ hồng ngoại), với thông số đầu ra  $Y_{25kt2}$  (tỷ lệ khuyết tật).

Mối quan hệ giữa các thông số  $X_1$ ,  $X_2$  với  $Y_{25kt2}$  thể hiện chi tiết qua đồ thị hình 3.39. Đồ thị 3D biểu diễn phương trình tương quan mối quan hệ  $X_1X_2$ ; và  $Y_{25kt2}$  bằng miền lưới trong không gian, miền lưới biểu diễn các giá trị thỏa mãn điều kiện ràng buộc của  $X_1$ ,  $X_2$ .

Để quan sát và xác định miền tối ưu cụ thể hơn chiều đồ thị 3D lên hệ mặt phẳng 2D thể hiện qua đồ thị miền (contour) mối quan hệ giữa  $X_1; X_2$  và  $Y_{25kt2}$  trong mặt phẳng 2D, trên đồ thị chia thành các vùng có màu sắc khác nhau tương ứng các vùng giá trị khác nhau. Vùng màu đỏ là vùng giá trị lớn nhất và trải dài

về phía màu xanh dương đậm là vùng giá trị nhỏ nhất. Hàm tỷ lệ khuyết tật  $Y_{25kt2}$   
 → min nên giá trị tối ưu  $Y_{25kt2}$  thuộc vùng màu xanh dương đậm.



**Hình 3.39.** Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b) mối quan hệ  $X_1$ ,  $X_2$  và  $Y_{25kt2}$

### 3.11.2.3 Xác định các thông số tối ưu hàm tỷ lệ khuyết tật $Y_{25kt2}$

Bài toán tối ưu được giải trên máy tính nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Matlab kết quả thể hiện phụ lục 56. Hàm tỷ lệ khuyết tật được tối ưu hóa theo phương trình (3.49).

Hàm mục tiêu:  $Y_{25kt2} \rightarrow \min$ .

Các điều kiện ràng buộc:  $-1,414 \leq x_i \leq +1,414$  ;  $i = 1 \div 2$ .

**Bảng 3.9.** Giá trị tối ưu - hàm tỷ lệ khuyết tật  $Y_{25kt2}$  (%)

STT	Thông số đầu vào	Giá trị		Thông số đầu ra	Giá trị tối ưu
1	$X_1$	-1,2587	45,7 <sup>0</sup> C	$Y_{25kt2}$	2,28 (%)
2	$X_2$	-0,1603	583,97 W/m <sup>2</sup>		

Qua bảng 3.9 cho thấy hàm tỷ lệ khuyết tật  $Y_{25kt2}$ (%) đạt giá trị tối ưu là 2,28 (%) với  $X_1 = -1,2587$  ( $T_s = 45,7^{\circ}\text{C}$ )  $X_2 = -0,1603$  ( 583,97 W/m<sup>2</sup>). Với kết quả tối ưu đạt được cho thấy nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại ảnh hưởng tỷ lệ khuyết tật theo hướng tỷ lệ thuận cả hai yếu tố này điều đạt giá trị trong vùng nghiên cứu. Với kết quả trên cho thấy để giảm tỷ lệ khuyết tật cho gỗ Cắm xe cần thiết phải giảm nhiệt độ sấy 45,7<sup>0</sup>C và cường độ bức xạ hồng ngoại 538,97 W/m<sup>2</sup>

### 3.11.3 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Cẩm xe kích thước 50 x 50 x 500 mm - thông số thời gian sấy ( $Y_{55tg1}$ )

#### 3.11.3.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{55tg1}$

Tiến hành sấy chân không gỗ Cẩm xe thực nghiệm để xác định các thông số tối ưu – thông số đầu ra thời gian sấy  $Y_{55tg1}$

Ma trận thí nghiệm và kết quả thí nghiệm bậc nhất được thể hiện phụ lục 25. Tiến hành phân tích phương sai và hồi quy cho hàm toán dạng đa thức bậc nhất cho kết quả trình bày phụ lục 26:

Mô hình bậc nhất có thể được viết theo dạng như phương trình sau:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2.$$

Phương trình hồi quy thời gian sấy  $Y_{55tg1}$  (giờ) với hệ số tương quan R-squared = 0,9 có dạng mã hóa là:

$$Y_{55tg1} = 76,1429 - 10,75.X_1 - 6,25.X_2 + 5,25.X_1.X_2 \quad (3.50)$$

Qua phụ lục 26, 27 cho thấy các hệ số hồi quy đều đảm bảo độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi quy với thực nghiệm cần thiết phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0,05$ .

$$F_t = 23,32 > F_b = 18,513 \Rightarrow \text{mô hình không tương thích.}$$

Vậy phương trình hồi quy (3.50) tìm được không tương thích với thực nghiệm. Do phương trình hồi quy  $Y_{55tg1}$  không tương thích thực nghiệm do đó cần thiết phải tiến hành cải tiến mô hình mở rộng vùng nghiên cứu, nâng bậc của phương trình thực nghiệm từ bậc nhất lên bậc hai và miền thí nghiệm lúc này được mở rộng ra với cánh tay đòn  $\pm\alpha$ .

#### 3.11.3.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{55tg2}$

Khi nâng bậc phương trình từ bậc nhất lên bậc hai phương án thực nghiệm tiến hành theo phương pháp bất biến quay bậc II của Box Hunter. Ma trận và kết quả thí nghiệm dạng mã hoá thể hiện phụ lục 30 . Từ ma trận thí nghiệm tiến hành phân tích phương sai và hồi quy với kết quả đạt được thể hiện phụ lục 31, 32. Mô hình bậc hai được chọn như sau

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2$$

$$\text{Hệ số tương quan } R = 0,9$$

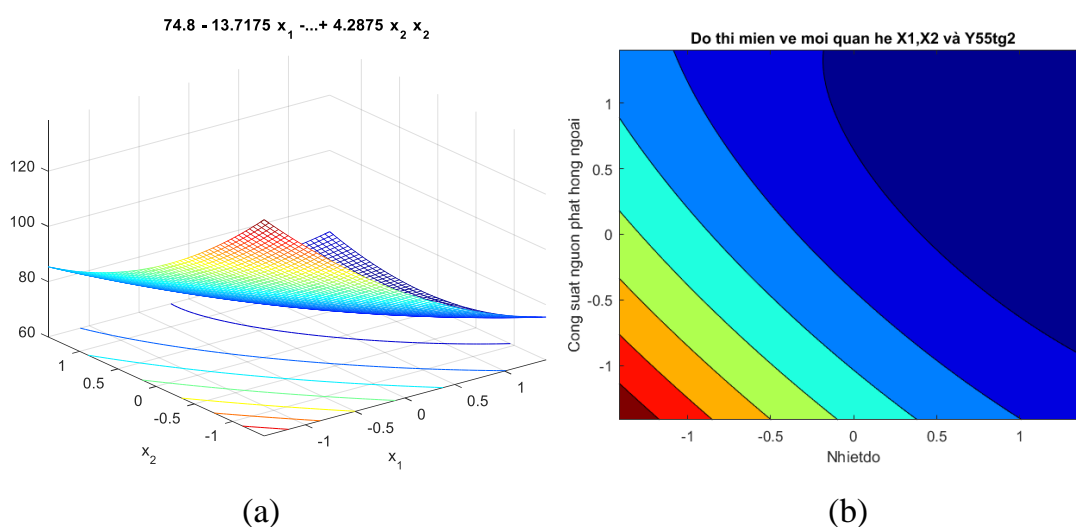
Phương trình hồi qui dạng mã hoá bậc hai thể hiện thời gian sấy  $Y_{55tg2}$  sau khi sấy chân không gỗ Căm xe như sau

$$Y_{55tg2} = 74,8 - 13,7175.X_1 - 10,2301.X_2 + 6.X_1.X_2 + 4,5375.X_1^2 + 4,2875.X_2^2 \quad (3.51)$$

Từ phụ lục 31, 32 thể hiện kết quả phân tích Anova và các hệ số hồi qui được kiểm tra độ tin cậy theo tiêu chuẩn Student, các hệ số hồi quy của thông số đủ độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi qui với thực nghiệm cần thiết ta phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0.05$ .

Ta có  $F = 2,4 < F_{1-p} = 6,5914 \Rightarrow$  Mô hình đảm bảo tương thích, mô hình hồi qui  $Y_{55tg2}$  là phù hợp. Vậy phương trình hồi qui (3.51) tìm được thông số đầu ra  $Y_{55tg2}$  tương thích với thực nghiệm.

Phương trình hồi qui thể hiện mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào  $X_1$  (nhiệt độ sấy),  $X_2$  (cường độ bức xạ hồng ngoại), với thông số đầu ra  $Y_{55tg2}$  (thời gian sấy).



**Hình 3.40.** Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b) mối quan hệ  $X_1$ ,  $X_2$  và  $Y_{55tg2}$

Mối quan hệ giữa các thông số  $X_1$ ,  $X_2$  với  $Y_{55tg2}$ , thể hiện chi tiết qua đồ thị hình 3.40. Đồ thị 3D biểu diễn phương trình tương quan mối quan hệ  $X_1X_2$ ; và  $Y_{55tg2}$  bằng miền lưới trong không gian, miền lưới biểu diễn các giá trị thỏa mãn điều kiện ràng buộc của  $X_1$ ,  $X_2$ .

Để quan sát và xác định miền tối ưu cụ thể hơn chiều đồ thị 3D lên hệ mặt phẳng 2D, qua đồ thị miền (contour) mối quan hệ giữa  $X_1X_2$ ; và  $Y_{55tg2}$  trong mặt

phẳng 2D, quan sát thấy đồ thị miền chia thành các vùng có màu sắc khác nhau tương ứng các vùng giá trị khác nhau. Vùng màu đỏ là vùng giá trị lớn nhất và trải dài về phía màu xanh dương là vùng giá trị nhỏ nhất. Hàm thời gian  $Y_{55tg2} \rightarrow \min$  nên giá trị tối ưu  $Y_{55tg2}$  thuộc vùng màu xanh dương đậm.

### 3.11.3.3 Xác định các thông số tối ưu đối với hàm thời gian $Y_{55tg2}$

Bài toán tối ưu được giải trên máy tính nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Matlab kết quả thể hiện phụ lục 58. Hàm thời gian được tối ưu hóa theo phương trình (3.51).

Hàm mục tiêu:  $Y_{55tg2} \rightarrow \min$ .

Các điều kiện ràng buộc:  $-1,414 \leq x_i \leq +1,414 ; i = 1 \div 2$ .

**Bảng 3.10.** Giá trị tối ưu- hàm thời gian  $Y_{55tg2}$  (giờ)

STT	Thông số đầu vào	Giá trị		Thông số đầu ra	Giá trị tối ưu
1	$X_1$	1,345	58,7 °C	$Y_{55tg2}$	64,29 (giờ)
2	$X_2$	0,2519	625,19 W/m <sup>2</sup>		

Qua bảng 3.10 cho thấy hàm thời gian  $Y_{55tg2}$  (h) đạt giá trị tối ưu là 64,29 (giờ) với  $X_1 = 1,345$  ( $T_s = 58,7$  °C)  $X_2 = 0,2519$  ( $X_2 = 625,19$  W/m<sup>2</sup>). Với kết quả tối ưu đạt được cho thấy nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại ảnh hưởng thời gian sấy cả hai yếu tố này đều đạt giá trị trong vùng nghiên cứu. Với kết quả trên cho thấy để rút ngắn thời gian sấy cho gỗ Cắm xe cần thiết phải tăng nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại sẽ góp phần thúc đẩy quá trình thoát ẩm từ trong thanh gỗ và khuếch tán hơi ẩm ra môi trường.

### 3.11.4 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Cắm xe kích thước 50 x 50 x 500 mm - thông số tỷ lệ khuyết tật ( $Y_{55kt}$ )

#### 3.11.4.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{55kt1}$

Tiến hành sấy chân không gỗ Cắm xe thực nghiệm để xác định các thông số tối ưu – thông số đầu ra tỷ lệ khuyết tật gỗ  $Y_{55kt1}$

Ma trận thí nghiệm và kết quả thí nghiệm bậc nhất được thể hiện phụ lục 25. Tiến hành phân tích phương sai và hồi quy cho hàm toán dạng đa thức bậc nhất cho kết quả trình bày phụ lục 28:

Mô hình bậc nhất có thể được viết theo dạng như phương trình sau:



$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2.$$

Phương trình hồi quy tỷ lệ khuyết tật  $Y_{55kt1}$  (%) với hệ số tương quan R-squared = 0,9 có dạng mã hóa là:

$$Y_{55kt1} = 3,99286 + 1,5.X_1 + 1,22.X_2 + 0,82.X_1.X_2 \quad (3.52)$$

Qua phụ lục 28, 29 cho thấy các hệ số hồi quy đều đảm bảo độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi qui với thực nghiệm cần thiết phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0,05$ .

$$F_t = 346,74 > F_b = 18,513 \Rightarrow \text{mô hình không tương thích.}$$

Vậy phương trình hồi qui (3.52) tìm được không tương thích với thực nghiệm. Do phương trình hồi qui  $Y_{55kt1}$  không tương thích thực nghiệm do đó cần thiết phải tiến hành cải tiến mô hình mở rộng vùng nghiên cứu, nâng bậc của phương trình thực nghiệm từ bậc nhất lên bậc hai và miền thí nghiệm lúc này được mở rộng ra với cánh tay đòn  $\pm\alpha$ .

#### 3.11.4.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{55kt2}$

Khi nâng bậc phương trình từ bậc nhất lên bậc hai phương án thực nghiệm tiến hành theo phương pháp bất biến quay bậc II của Box Hunter. Ma trận và kết quả thí nghiệm dạng mã hoá thể hiện phụ lục 30. Từ ma trận thí nghiệm tiến hành phân tích phương sai và hồi qui với kết quả đạt được thể hiện phụ lục 33, 34.

Mô hình bậc hai được chọn như sau:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2$$

$$\text{Hệ số tương quan } R = 0,9$$

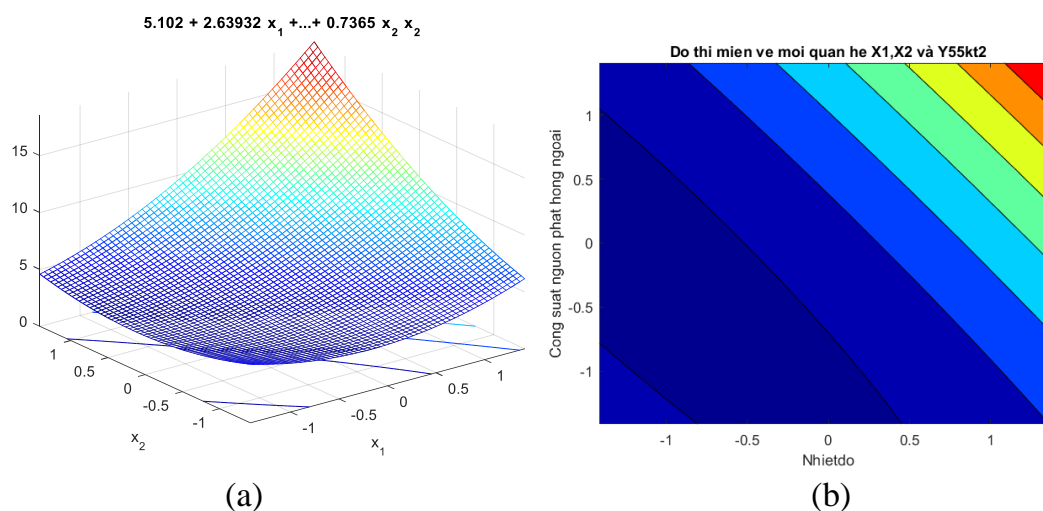
Phương trình hồi qui dạng mã hoá bậc hai thể hiện tỷ lệ khuyết tật  $Y_{55kt2}$  sau khi sấy chân không gỗ Căm xe như sau:

$$Y_{55kt2} = 5,102 + 2,63932.X_1 + 2,083.X_2 + 1,6125.X_1.X_2 + 1,014.X_1^2 + 0,7365.X_2^2 \quad (3.53)$$

Từ phụ lục 33, 34 thể hiện kết quả phân tích Anova và các hệ số hồi qui được kiểm tra độ tin cậy theo tiêu chuẩn Student, các hệ số hồi quy của thông số đủ độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi qui với thực nghiệm cần thiết ta phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0.05$ .

Ta có  $F_t = 5,45 < F_{1-p} = 6,5914 \Rightarrow$  Mô hình đảm bảo tương thích, mô hình hồi qui  $Y_{55kt2}$  là phù hợp. Vậy phương trình hồi qui (3.53) tìm được thông số đầu ra  $Y_{55kt2}$  tương thích với thực nghiệm.

Phương trình hồi qui thể hiện mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào  $X_1$  (nhiệt độ sấy),  $X_2$  (cường độ bức xạ hồng ngoại), với thông số đầu ra  $Y_{55kt2}$  (tỷ lệ khuyết tật)



**Hình 3.41.** Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b) mối quan hệ  $X_1$ ,  $X_2$  và  $Y_{55kt2}$

Mối quan hệ giữa các thông số  $X_1$ ,  $X_2$  với  $Y_{55kt2}$ , thể hiện chi tiết qua đồ thị hình 3.41. Đồ thị 3D biểu diễn phương trình tương quan mối quan hệ  $X_1 X_2$ ; và  $Y_{55kt2}$  bằng miền lưới trong không gian, miền lưới biểu diễn các giá trị thỏa mãn điều kiện ràng buộc của  $X_1$ ,  $X_2$ .

Để quan sát và xác định miền tối ưu cụ thể hơn chiều đồ thị 3D lên hệ mặt phẳng 2D, qua đồ thị miền mối quan hệ giữa  $X_1$ ,  $X_2$  và  $Y_{55kt2}$  trong mặt phẳng 2D, quan sát thấy đồ thị chia thành các vùng có màu sắc khác nhau tương ứng các vùng giá trị khác nhau. Vùng màu đỏ là vùng giá trị lớn nhất và trải dài về phía màu xanh dương là vùng giá trị nhỏ nhất. Hàm tỷ lệ khuyết tật  $Y_{55kt2} \rightarrow \min$  nên giá trị tối ưu  $Y_{55kt2}$  thuộc vùng màu xanh dương đậm.

### 3.11.4.3 Xác định các thông số tối ưu hàm tỷ lệ khuyết tật $Y_{55kt2}$

Bài toán tối ưu được giải trên máy tính nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Matlab kết quả thể hiện phụ lục 59. Hàm tỷ lệ khuyết tật được tối ưu hóa theo phương trình (3.53).

Hàm mục tiêu:  $Y_{55kt2} \rightarrow \min$ .

Các điều kiện ràng buộc:  $-1,414 \leq x_i \leq +1,414$  ;  $i = 1 \div 2$ .

**Bảng 3.11.** Giá trị tối ưu - tỷ lệ khuyết tật  $Y_{55kt2}$  (%)

STT	Thông số đầu vào	Giá trị		Thông số đầu ra	Giá trị tối ưu
1	$X_1$	-1,3662	$45,2^{\circ}\text{C}$	$Y_{55kt2}$	3,38 (%)
2	$X_2$	0,0815	$608,15 \text{ W/m}^2$		

Qua bảng 3.11 cho thấy hàm tỷ lệ khuyết tật  $Y_{55kt2}$  (%) đạt giá trị tối ưu là 3,39 (%) với  $X_1 = 0,0815$  ( $T_s = 45,2^{\circ}\text{C}$ )  $X_2 = 0,0815$  ( $X_2 = 608,15 \text{ W/m}^2$ ). Với kết quả tối ưu đạt được cho thấy nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại ảnh hưởng tỷ lệ khuyết tật theo hướng tỷ lệ thuận, cả hai yếu tố này đều đạt giá trị trong vùng nghiên cứu. Với kết quả trên cho thấy để giảm tỷ lệ khuyết tật cho gỗ Cắm xe cần thiết phải giảm nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại.

### 3.11.5 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Cắm xe kích thước 20 x 150 x 500 mm - thông số đầu ra thời gian sấy ( $Y_{215tg}$ )

#### 3.11.5.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{215tg1}$

Tiến hành sấy chân không gỗ Cắm xe thực nghiệm để xác định các thông số tối ưu – thông số đầu ra thời gian sấy  $Y_{215tg1}$

Ma trận thí nghiệm và kết quả thí nghiệm bậc nhất được thể hiện phụ lục 35. Tiến hành phân tích phương sai và hồi quy cho hàm toán dạng đa thức bậc nhất cho kết quả trình bày phụ lục 36:

Mô hình bậc nhất có thể được viết theo dạng như phương trình sau:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2.$$

Phương trình hồi quy thời gian sấy  $Y_{215tg1}$  (giờ) với hệ số tương quan R-squared = 0.9 có dạng mã hóa là:

$$Y_{215tg1} = 55 - 9,75.X_1 - 4,25.X_2 + 1,75.X_1.X_2 \quad (3.54)$$

Qua phụ lục 36, 37 cho thấy các hệ số hồi quy đều đảm bảo độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi quy với thực nghiệm cần thiết phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0,05$ .

$$F_t = 43,75 > F_b = 18,513 \Rightarrow \text{mô hình không tương thích.}$$

Vậy phương trình hồi quy (3.54) tìm được không tương thích với thực nghiệm. Do phương trình hồi quy  $Y_{215tg1}$  không tương thích thực nghiệm do đó

cần thiết phải tiến hành cải tiến mô hình mở rộng vùng nghiên cứu, nâng bậc của phương trình thực nghiệm từ bậc nhất lên bậc hai và miền thí nghiệm lúc này được mở rộng ra với cánh tay đòn  $\pm\alpha$ .

### 3.11.5.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{215tg2}$

Khi nâng bậc phương trình từ bậc nhất lên bậc hai phương án thực nghiệm tiến hành theo phương pháp bất biến quay bậc II của Box Hunter. Ma trận và kết quả thí nghiệm dạng mã hoá thể hiện phụ lục 40. Từ ma trận thí nghiệm tiến hành phân tích phương sai và hồi qui với kết quả đạt được thể hiện phụ lục 41, 42.

Mô hình bậc hai được chọn như sau

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2$$

Hệ số tương quan  $R = 0,9$

Phương trình hồi qui dạng mã hoá bậc hai thể hiện thời gian sấy  $Y_{215tg2}$  sau khi sấy chân không gỗ Căm xe như sau

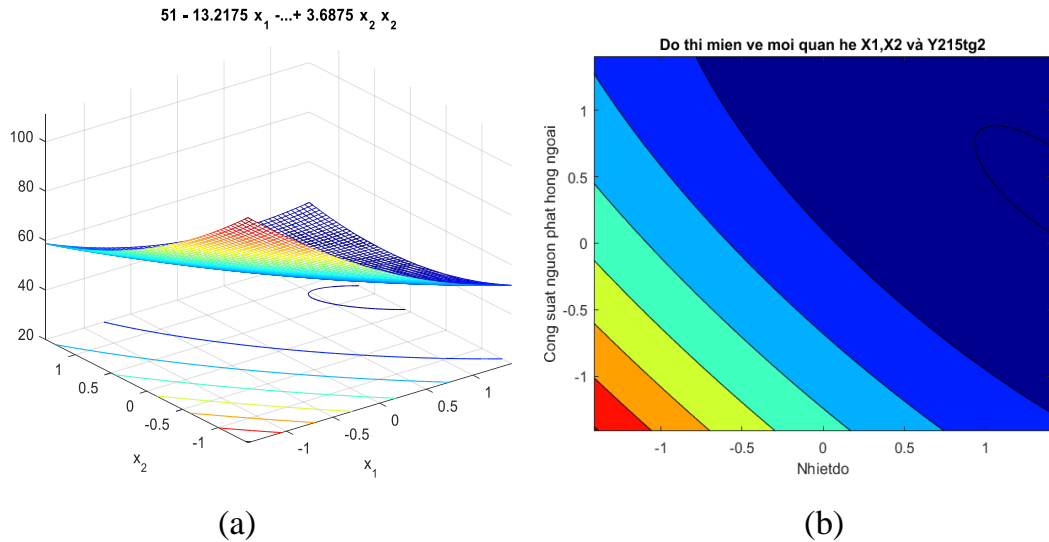
$$Y_{215tg2} = 51 - 13,2175.X_1 - 10,6872.X_2 + 5,5.X_1.X_2 + 3,9375.X_1^2 + 3,6875.X_2^2 \quad (3.55)$$

Từ phụ lục 41, 42 thể hiện kết quả phân tích Anova và các hệ số hồi qui được kiểm tra độ tin cậy theo tiêu chuẩn Student, các hệ số hồi qui của thông số đủ độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi qui với thực nghiệm cần thiết ta phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0.05$ .

Ta có  $F = 2,94 < F_{1-p} = 6,5914 \Rightarrow$  Mô hình đảm bảo tương thích. mô hình hồi qui  $Y_{215tg2}$  là phù hợp. Vậy phương trình hồi qui (3.55) tìm được thông số đầu ra  $Y_{215tg2}$  tương thích với thực nghiệm.

Phương trình hồi qui thể hiện mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào  $X_1$  (nhiệt độ sấy),  $X_2$  (cường độ bức xạ hồng ngoại), với thông số đầu ra  $Y_{215tg2}$  (thời gian sấy).

Mối quan hệ giữa các thông số  $X_1$   $X_2$  với  $Y_{215tg2}$ , thể hiện chi tiết qua đồ thị hình 3.42. Đồ thị 3D biểu diễn phương trình tương quan mối quan hệ  $X_1X_2$ ; và  $Y_{215tg2}$  bằng miền lưới trong không gian, miền lưới biểu diễn các giá trị thỏa mãn điều kiện ràng buộc của  $X_1$ ,  $X_2$ .



**Hình 3.42.** Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b) quan hệ  $X_1$ ,  $X_2$  và  $Y_{215tg2}$

Để quan sát và xác định miền tối ưu cụ thể hơn chiều đồ thị 3D lên hệ mặt phẳng 2D, qua đồ thị miền mối quan hệ giữa  $X_1, X_2$ ; và  $Y_{215tg2}$  trong mặt phẳng 2D (đồ thị contour), quan sát thấy đồ thị chia thành các vùng có màu sắc khác nhau tương ứng các vùng giá trị khác nhau. Vùng màu đỏ là vùng giá trị lớn nhất và trải dài về phía màu xanh dương là vùng giá trị nhỏ nhất. Hàm thời gian  $Y_{215tg2} \rightarrow \min$  nên giá trị tối ưu  $Y_{215tg2}$  thuộc vùng màu xanh dương đậm.

### 3.11.5.3 Xác định các thông số tối ưu hàm thời gian $Y_{215tg2}$

Bài toán tối ưu được giải trên máy tính nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Matlab kết quả thể hiện phụ lục 61. Hàm thời gian được tối ưu hóa theo phương trình (3.55). Hàm mục tiêu:  $Y_{215tg2} \rightarrow \min$ .

Các điều kiện ràng buộc:  $-1,414 \leq x_i \leq +1,414$  ;  $i = 1 \div 2$ .

**Bảng 3.12.** Giá trị tối ưu hàm thời gian  $Y_{215tg2}$  (giờ)

STT	Thông số đầu vào	Giá trị		Thông số đầu ra	Giá trị tối ưu
1	$X_1$	1,3907	$58,9^{\circ}\text{C}$	$Y_{215tg2}$	39,61 (giờ)
2	$X_2$	0,412	$641,2 \text{ W/m}^2$		

Qua bảng 3.12 cho thấy hàm thời gian  $Y_{215tg2}$  (giờ) đạt giá trị tối ưu nhất là 39,61 (giờ) với  $X_1=1,3907$  ( $T_s = 58,9^{\circ}\text{C}$ )  $X_2 = 0,412$  ( $X_2=641,2 \text{ W/m}^2$ ). Với kết quả tối ưu đạt được cho thấy nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại ảnh hưởng thời gian sấy cả hai yếu tố này đều đạt giá trị trong vùng nghiên cứu. Với

kết quả trên cho thấy để rút ngắn thời gian sấy cho gỗ Cắm xe cần thiết phải tăng nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại.

### **3.11.6 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Cắm xe kích thước 20 x 150 x 500 mm - thông số đầu ra tỷ lệ khuyết tật ( $Y_{215kt}$ )**

#### **3.11.6.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{215kt1}$**

Tiến hành sấy chân không gỗ Cắm xe thực nghiệm để xác định các thông số tối ưu – thông số đầu ra tỷ lệ khuyết tật gỗ  $Y_{215kt1}$

Ma trận thí nghiệm và kết quả thí nghiệm bậc nhất được thể hiện phụ lục 35. Tiến hành phân tích phương sai và hồi quy cho hàm toán dạng đa thức bậc nhất cho kết quả trình bày phụ lục 38, 39:

Mô hình bậc nhất có thể được viết theo dạng như phương trình sau:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2.$$

Phương trình hồi quy tỷ lệ khuyết tật  $Y_{215kt1}$  (%) với hệ số tương quan R-squared = 0.9 có dạng mã hóa là:

$$Y_{215kt1} = 3,65286 + 1,5425.X_1 + 0,5475.X_2 + 0,6775.X_1.X_2 \quad (3.56)$$

Qua phụ lục 38, 39 cho thấy các hệ số hồi quy đều đảm bảo độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi quy với thực nghiệm cần thiết phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0,05$ .

$$F_t = 286,97 > F_b = 18,513 \Rightarrow \text{mô hình không tương thích.}$$

Vậy phương trình hồi quy (3.56) tìm được không tương thích với thực nghiệm. Do phương trình hồi quy  $Y_{215kt1}$  không tương thích thực nghiệm do đó cần thiết phải tiến hành cải tiến mô hình mở rộng vùng nghiên cứu, nâng bậc của phương trình thực nghiệm từ bậc nhất lên bậc hai và miền thí nghiệm lúc này được mở rộng ra với cánh tay đòn  $\pm\alpha$ .

#### **3.11.6.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{215kt2}$**

Khi nâng bậc phương trình từ bậc nhất lên bậc hai phương án thực nghiệm tiến hành theo phương pháp bất biến quay bậc II của Box Hunter. Ma trận và kết quả thí nghiệm dạng mã hoá thể hiện phụ lục 40 . Từ ma trận thí nghiệm tiến hành phân tích phương sai và hồi quy với kết quả đạt được thể hiện phụ lục 43, 44.

Mô hình bậc hai được chọn như sau

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$$

Hệ số tương quan  $R = 0,9$

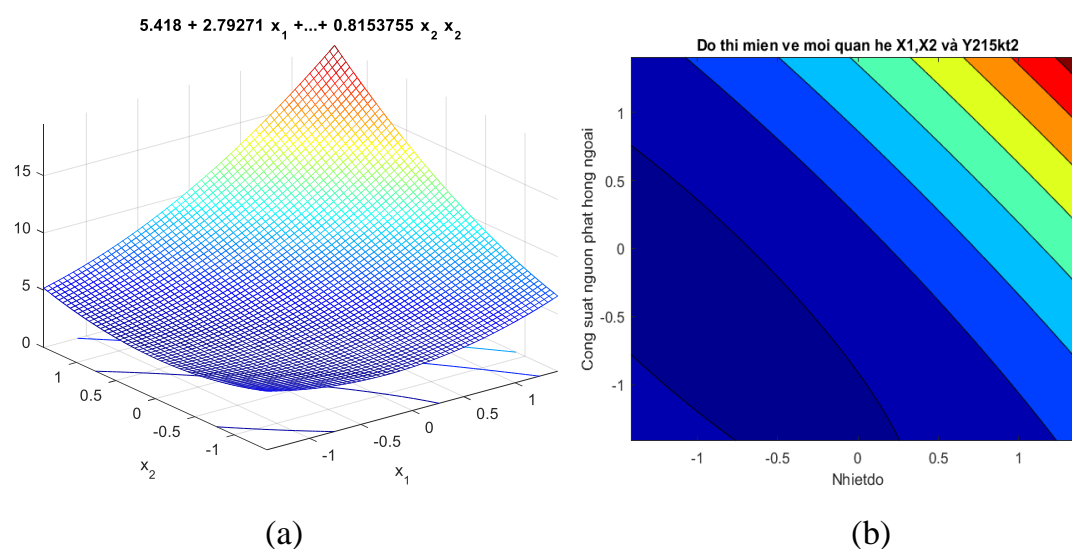
Phương trình hồi qui dạng mã hoá bậc hai thể hiện tỷ lệ khuyết tật gỗ  $Y_{215kt2}$  sau khi sấy chân không gỗ Cẩm xe như sau

$$Y_{215kt2} = 5,418 + 2,79271.X_1 + 2,29869.X_2 + 1,6125.X_1.X_2 + 1,02538.X_1^2 - 0,815375.X_2^2 \quad (3.57)$$

Từ phụ lục 43, 44 thể hiện kết quả phân tích Anova và các hệ số hồi qui được kiểm tra độ tin cậy theo tiêu chuẩn Student, các hệ số hồi quy của thông số đủ độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi qui với thực nghiệm cần thiết ta phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0.05$ .

Ta có  $F = 4,7 < F_{1-p} = 6,5914 \Rightarrow$  Mô hình đảm bảo tương thích, mô hình hồi qui  $Y_{215kt2}$  là phù hợp. Vậy phương trình hồi qui (3.57) tìm được thông số đầu ra  $Y_{215kt2}$  tương thích với thực nghiệm.

Phương trình hồi qui thể hiện mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào  $X_1$  (nhiệt độ sấy),  $X_2$  (cường độ bức xạ hồng ngoại) với thông số đầu ra  $Y_{215kt2}$  (tỷ lệ khuyết tật)



**Hình 3.43.** Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b) mối quan hệ  $X_1$ ,  $X_2$  và  $Y_{215kt2}$

Mối quan hệ giữa các thông số  $X_1$ ,  $X_2$  với  $Y_{215kt2}$ , thể hiện chi tiết qua đồ thị hình 3.43. Đồ thị 3D biểu diễn phương trình tương quan mối quan hệ  $X_1X_2$ ;

và  $Y_{215kt2}$  bằng miền lưới trong không gian, miền lưới biểu diễn các giá trị thỏa mãn điều kiện ràng buộc của  $X_1, X_2$ .

Để quan sát và xác định miền tối ưu cụ thể hơn chiều đồ thị 3D lên hệ mặt phẳng 2D, qua đồ thị miền mối quan hệ giữa  $X_1, X_2$ ; và  $Y_{215kt2}$  trong mặt phẳng 2D, quan sát thấy đồ thị chia thành các vùng có màu sắc khác nhau tương ứng các vùng giá trị khác nhau. Vùng màu đỏ là vùng giá trị lớn nhất và trải dài về phía màu xanh dương là vùng giá trị nhỏ nhất. Hàm tối ưu  $Y_{215kt2} \rightarrow \min$  nên giá trị tối ưu  $Y_{215kt2}$  thuộc vùng màu xanh dương đậm.

### 3.11.6.3 Xác định các thông số tối ưu hàm tỷ lệ khuyết tật $Y_{215kt2}$

Bài toán tối ưu được giải trên máy tính nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Matlab kết quả thể hiện phụ lục 62 . Hàm tỷ lệ khuyết tật được tối ưu hóa theo phương trình (3.57).

Hàm mục tiêu:  $Y_{215kt2} \rightarrow \min$ .

Các điều kiện ràng buộc:  $-1,414 \leq x_i \leq +1,414 ; i = 1 \div 2$ .

**Bảng 3.13.** Giá trị tối ưu - hàm tỷ lệ khuyết tật  $Y_{215kt2}$  (%)

STT	Thông số đầu vào	Giá trị		Thông số đầu ra	Giá trị tối ưu
1	$X_1$	-1,139	$46,3^{\circ}\text{C}$	$Y_{215kt2}$	3,5 (%)
2	$X_2$	-0,2833	$571,67 \text{ W/m}^2$		

Qua bảng 3.13 cho thấy hàm khuyết tật  $Y_{215kt2}$  (%) đạt giá trị tối ưu nhất là 3,5 (%) với  $X_1 = -1,139$  ( $T_s = 46,3^{\circ}\text{C}$ )  $X_2 = -0,2833$  ( $X_2 = 571,67 \text{ W/m}^2$ ). Với kết quả tối ưu đạt được cho thấy nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại ảnh hưởng thời gian sấy theo hướng tỷ lệ thuận, cả hai yếu tố này đều đạt giá trị trong vùng nghiên cứu.

### 3.11.7 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Cắm xe kích thước 50x150mm - thông số thời gian sấy $Y_{515 \text{ tg}}$

#### 3.11.7.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{515 \text{ tg1}}$

Tiến hành sấy chân không gỗ Cắm xe thực nghiệm để xác định các thông số tối ưu – thông số đầu ra thời gian sấy  $Y_{515 \text{ tg1}}$



Ma trận thí nghiệm và kết quả thí nghiệm bậc nhất được thể hiện phụ lục 45. Tiến hành phân tích phương sai và hồi quy cho hàm toán dạng đa thức bậc nhất cho kết quả trình bày phụ lục 46:

Mô hình bậc nhất có thể được viết theo dạng như phương trình sau:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2.$$

Phương trình hồi quy thời gian sấy  $Y_{515\text{tg1}}$  (giờ) với hệ số tương quan R-squared = 0.9 có dạng mã hóa là:

$$Y_{515\text{tg1}} = 158,714 - 16,25.X_1 - 3,75.X_2 + 2,25.X_1.X_2 \quad (3.58)$$

Qua phụ lục 46, 47 cho thấy các hệ số hồi quy đều đảm bảo độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi quy với thực nghiệm cần thiết phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0,05$ .

$$F_t = 38,68 > F_b = 18,513 \Rightarrow \text{mô hình không tương thích.}$$

Vậy phương trình hồi quy (3.58) tìm được không tương thích với thực nghiệm. Do phương trình hồi quy  $Y_{515\text{tg1}}$  không tương thích thực nghiệm do đó cần thiết phải tiến hành cải tiến mô hình mở rộng vùng nghiên cứu, nâng bậc của phương trình thực nghiệm từ bậc nhất lên bậc hai và miền thí nghiệm lúc này được mở rộng ra với cánh tay đòn  $\pm\alpha$ .

### 3.11.7.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{515\text{tg2}}$

Khi nâng bậc phương trình từ bậc nhất lên bậc hai phương án thực nghiệm tiến hành theo phương pháp bất biến quay bậc II của Box Hunter. Ma trận và kết quả thí nghiệm dạng mã hoá thể hiện phụ lục 50 . Từ ma trận thí nghiệm tiến hành phân tích phương sai và hồi quy với kết quả đạt được thể hiện phụ lục 51, 52.

Mô hình bậc hai được chọn như sau

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2$$

$$\text{Hệ số tương quan } R = 0,9$$

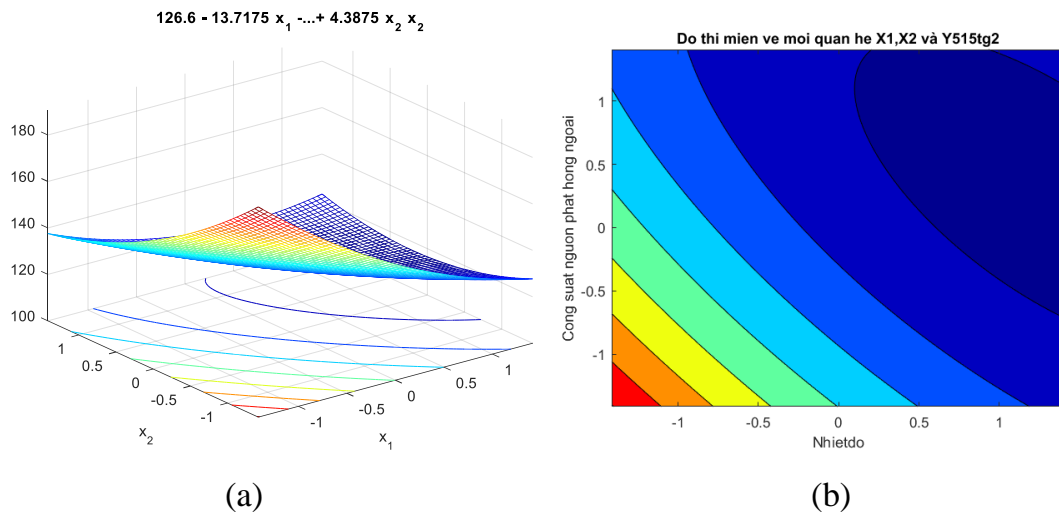
Phương trình hồi quy dạng mã hoá bậc hai thể hiện thời gian sấy  $Y_{515\text{tg2}}$  sau khi sấy chân không gỗ Căm xe như sau

$$Y_{515\text{tg2}} = 126,6 - 13,7175.X_1 - 10,2301.X_2 + 6.X_1.X_2 + 4,6375.X_1^2 + 4,3875.X_2^2 \quad (3.59)$$

Từ phụ lục 51, 52 thể hiện kết quả phân tích Anova và các hệ số hồi qui được kiểm tra độ tin cậy theo tiêu chuẩn Student, các hệ số hồi quy của thông số đủ độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi qui với thực nghiệm cần thiết ta phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0.05$ .

Ta có  $F = 1,87 < F_{1-p} = 6,5914 \Rightarrow$  Mô hình đảm bảo tương thích, mô hình hồi qui  $Y_{515tg2}$  là phù hợp. Vậy phương trình hồi qui (3.59) tìm được thông số đầu ra  $Y_{515tg2}$  tương thích với thực nghiệm.

Phương trình hồi qui thể hiện mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào  $X_1$  (nhiệt độ sấy),  $X_2$  (cường độ bức xạ hồng ngoại), với thông số đầu ra  $Y_{515tg2}$  (thời gian sấy).



**Hình 3.44.** Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b) mối quan hệ  $X_1$ ,  $X_2$  và  $Y_{515tg2}$

Mối quan hệ giữa các thông số  $X_1$ ,  $X_2$  với  $Y_{515tg2}$ , thể hiện chi tiết qua đồ thị hình 3.44. Đồ thị 3D biểu diễn phương trình tương quan mối quan hệ  $X_1 X_2$ ; và  $Y_{515tg2}$  bằng miền lưới trong không gian, miền lưới biểu diễn các giá trị thỏa mãn điều kiện ràng buộc của  $X_1$ ,  $X_2$ .

Để quan sát và xác định miền tối ưu cụ thể hơn chiếu đồ thị 3D lên hệ mặt phẳng 2D, qua đồ thị miền mối quan hệ giữa  $X_1 X_2$ ; và  $Y_{515tg2}$  trong mặt phẳng 2D, quan sát thấy đồ thị chia thành các vùng có màu sắc khác nhau tương ứng các vùng giá trị khác nhau. Vùng màu đỏ là vùng giá trị lớn nhất và trải dài về phía màu xanh dương là vùng giá trị nhỏ nhất. Hàm thời gian  $Y_{515tg2} \rightarrow$  min nên giá trị tối ưu  $Y_{515tg2}$  thuộc vùng màu xanh dương đậm.

### 3.11.7.3 Xác định các thông số tối ưu đối với hàm thời gian $Y_{515tg2}$

Bài toán tối ưu được giải trên máy tính nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Matlab kết quả thể hiện phụ lục 64. Hàm thời gian được tối ưu hóa theo phương trình (3.59).

Hàm mục tiêu:  $Y_{515tg2} \rightarrow \min$ .

Các điều kiện ràng buộc:  $-1,414 \leq x_i \leq +1,414 ; i = 1 \div 2$ .

**Bảng 3.14.** Giá trị tối ưu - hàm thời gian  $Y_{515tg2}$  (giờ)

STT	Thông số đầu vào	Giá trị		Thông số đầu ra	Giá trị tối ưu
1	$X_1$	1,2987	58,5 °C	$Y_{515tg2}$	116,28 (giờ)
2	$X_2$	0,2778	627,8 W/m <sup>2</sup>		

Qua bảng 3.14 cho thấy hàm thời gian  $Y_{515tg2}$  (h) đạt giá trị tối ưu là 116,28 (giờ) với  $X_1 = 1,2987$  ( $T_s = 58,5^\circ\text{C}$ )  $X_2 = 0,2778$  ( $X_2 = 627,8 \text{ W/m}^2$ ). Với kết quả tối ưu đạt được cho thấy nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại ảnh hưởng thời gian sấy cả hai yếu tố này đều đạt giá trị trong vùng nghiên cứu.

### 3.11.8 Kết quả thực nghiệm sấy chân không gỗ Cẩm xe kích thước 50x150mm - thông số tỷ lệ khuyết tật $Y_{515kt1}$

#### 3.11.8.1 Mô hình bậc nhất (bậc 1) $Y_{515kt1}$

Tiến hành sấy chân không gỗ Cẩm xe thực nghiệm để xác định các thông số tối ưu – thông số đầu ra tỷ lệ khuyết tật  $Y_{515kt1}$

Ma trận thí nghiệm và kết quả thí nghiệm bậc nhất được thể hiện phụ lục 45. Tiến hành phân tích phương sai và hồi quy cho hàm toán dạng đa thức bậc nhất cho kết quả trình bày phụ lục 48:

Mô hình bậc nhất có thể được viết theo dạng như phương trình sau:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2.$$

Phương trình hồi quy tỷ lệ khuyết tật  $Y_{515kt1}$  (%) với hệ số tương quan R-squared = 0.9 có dạng mã hóa là:

$$Y_{515kt1} = 4,31143 + 1,4575.X_1 + 1,0075.X_2 + 0,6275.X_1.X_2 \quad (3.60)$$

Qua phụ lục 48, 49 cho thấy các hệ số hồi quy đều đảm bảo độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi quy với thực nghiệm cần thiết phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0.05$ .

$F_t = 182,97 > F_b = 18,513 \Rightarrow$  mô hình không tương thích.

Vậy phương trình hồi qui (3.60) tìm được không tương thích với thực nghiệm. Do phương trình hồi qui  $Y_{515kt1}$  không tương thích thực nghiệm do đó cần thiết phải tiến hành cải tiến mô hình mở rộng vùng nghiên cứu, nâng bậc của phương trình thực nghiệm từ bậc nhất lên bậc hai và miền thí nghiệm lúc này được mở rộng ra với cánh tay đòn  $\pm\alpha$ .

### 3.11.8.2 Mô hình bậc hai (bậc 2) $Y_{515kt2}$

Khi nâng bậc phương trình từ bậc nhất lên bậc hai phương án thực nghiệm tiến hành theo phương pháp bất biến quay bậc II của Box Hunter. Ma trận và kết quả thí nghiệm dạng mã hoá thể hiện phụ lục 50. Từ ma trận thí nghiệm tiến hành phân tích phương sai và hồi qui với kết quả đạt được thể hiện phụ lục 53, 54.

Mô hình bậc hai được chọn như sau

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2$$

Hệ số tương quan  $R = 0,9$

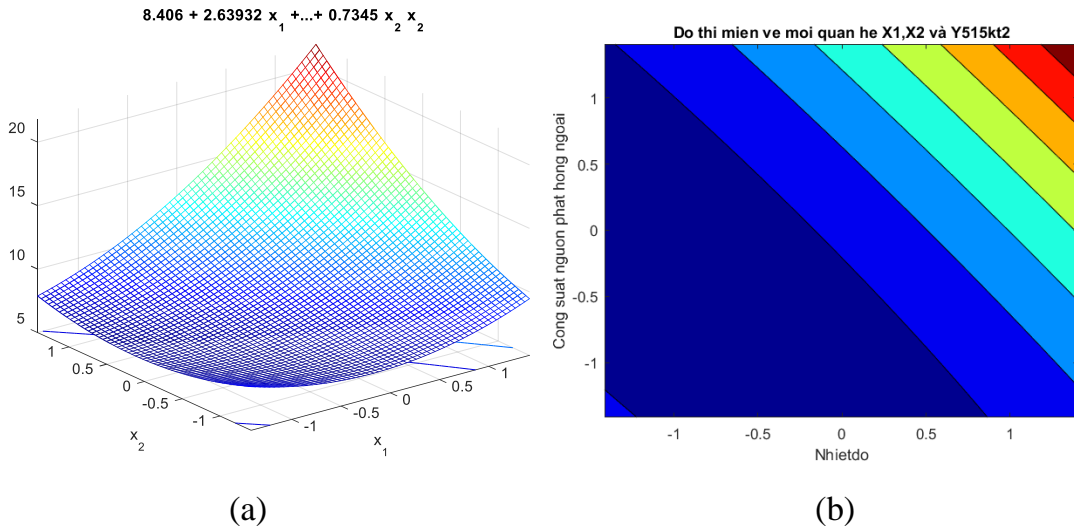
Phương trình hồi qui dạng mã hoá bậc hai thể hiện thời gian sấy  $Y_{515kt2}$  sau khi sấy chân không gỗ Căm xe như sau

$$Y_{515kt2} = 8,406 + 2,63932.X_1 + 2,083.X_2 + 1,6125.X_1.X_2 + 1,012.X_1^2 - 0,7345.X_2^2 \quad (3.61)$$

Từ phụ lục 53, 54 thể hiện kết quả phân tích Anova và các hệ số hồi qui được kiểm tra độ tin cậy theo tiêu chuẩn Student, các hệ số hồi quy của thông số đủ độ tin cậy với mức ý nghĩa ( $P\text{-value} > 0,05$ ). Để kiểm định sự tương thích của phương trình hồi qui với thực nghiệm cần thiết ta phải kiểm định theo tiêu chuẩn Fisher với  $\alpha = 0.05$ .

Ta có  $F = 5,69 < F_{1-p} = 6,5914 \Rightarrow$  Mô hình đảm bảo tương thích, mô hình hồi qui  $Y_{515kt2}$  là phù hợp. Vậy phương trình hồi qui (3.61) tìm được thông số đầu ra  $Y_{515kt2}$  tương thích với thực nghiệm.

Phương trình hồi qui thể hiện mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào  $X_1$  (nhiệt độ sấy),  $X_2$  (cường độ bức xạ hồng ngoại), với thông số đầu ra  $Y_{515kt2}$  (tỷ lệ khuyết tật)



**Hình 3.45.** Đồ thị 3D (a) và miền (contour) (b) mối quan hệ  $X_1$ ,  $X_2$  và  $Y_{515kt2}$

Mối quan hệ giữa các thông số  $X_1$ ,  $X_2$  với  $Y_{515kt2}$ , thể hiện chi tiết qua đồ thị hình 3.45. Đồ thị 3D biểu diễn phương trình tương quan mối quan hệ  $X_1 X_2$ ; và  $Y_{515kt2}$  bằng miền lưới trong không gian, miền lưới biểu diễn các giá trị thỏa mãn điều kiện ràng buộc của  $X_1$ ,  $X_2$ .

Để quan sát và xác định miền tối ưu cụ thể hơn chiếu đồ thị 3D lên hệ mặt phẳng 2D, qua đồ thị mối quan hệ giữa  $X_1 X_2$ ; và  $Y_{515kt2}$  trong mặt phẳng 2D quan sát thấy đồ thị miền chia thành các vùng có màu sắc khác nhau tương ứng các vùng giá trị khác nhau. Vùng màu đỏ là vùng giá trị lớn nhất và trải dài về phía màu xanh dương là vùng giá trị nhỏ nhất. Hàm tỷ lệ khuyết tật  $Y_{515kt2} \rightarrow \min$  nên giá trị tối ưu  $Y_{515kt2}$  thuộc vùng màu xanh dương đậm.

Qua đồ thị hình 3.45 thể hiện mối quan hệ giữa hai yếu tố  $X_1$ ,  $X_2$  với thông số  $Y_{515kt2}$  (%):

- Nhìn chung đồ thị có xu hướng tăng khi giá trị  $X_1$ ,  $X_2 \rightarrow$  cực đại (max) và có xu hướng giảm khi giá trị  $X_1$ ,  $X_2 \rightarrow$  cực tiểu (min), điều này khẳng định chúng có mối quan hệ tỷ lệ thuận.
- Khi giá trị  $X_1$ ,  $X_2 \rightarrow$  cực đại (max) thì nhiệt độ sấy càng cao, áp suất càng lớn, với tác động của nhiệt (tương ứng áp suất nhất định) hình thành mặt sôi di chuyển từ bề mặt thanh gỗ vào sâu trong tâm gỗ, thúc đẩy quá trình hóa hơi và dẫn nước thoát ra ngoài, khi đó độ ẩm gỗ giảm. Tuy nhiên giảm ẩm quá nhanh và chênh lệch nhiệt độ bề mặt và tâm thanh gỗ nên dẫn đến hình thành khuyết tật.

- Đề tỷ lệ khuyết tật  $Y_{515kt2}$  (%)  $\rightarrow$  min đạt giá trị tối ưu (thuộc vùng màu xanh dương đậm đồ thị hình 3.47 b).

### 3.11.8.3 Xác định các thông số tối ưu hàm tỷ lệ khuyết tật gỗ $Y_{515kt2}$

Bài toán tối ưu được giải trên máy tính nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Matlab kết quả thể hiện phụ lục 65. Hàm tỷ lệ khuyết tật được tối ưu hóa theo phương trình 3.61. Hàm mục tiêu:  $Y_{515kt2} \rightarrow \min$ .

Các điều kiện ràng buộc:  $-1.414 \leq x_i \leq +1.414$  ;  $i = 1 \div 2$ .

**Bảng 3.15.** Giá trị tối ưu - hàm tỷ lệ khuyết tật  $Y_{50 \times 150kt2}$  (%)

STT	Thông số đầu vào	Giá trị		Thông số đầu ra	Giá trị tối ưu
1	$X_1$	-1,139	46,3 °C	$Y_{515kt2}$	3,5 (%)
2	$X_2$	-0,2833	571,7 W/m <sup>2</sup>		

Qua bảng 3.15 cho thấy hàm tỷ lệ khuyết tật  $Y_{515kt2}$  (%) đạt giá trị tối ưu là 3,5 (%) với  $X_1 = -1,139$  ( $T_s = 46,3$  °C)  $X_2 = -0,2833$  ( $X_2 = 571,7$  W/m<sup>2</sup>). Với kết quả tối ưu đạt được cho thấy nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ hồng ngoại ảnh hưởng tỷ lệ khuyết tật theo hướng tỷ lệ thuận, cả hai yếu tố này đều đạt giá trị trong vùng nghiên cứu.

### 3.11.9 Xác định các thông số và chỉ tiêu phù hợp cho máy sấy chân không gỗ Cắm xe

Xuất phát từ các mục tiêu nghiên cứu, bài toán được thiết lập trên cơ sở hai hàm chỉ tiêu thời gian sấy (tg), và tỷ lệ khuyết tật gỗ sau sấy (kt) đặc trưng cho các chỉ tiêu nghiên cứu là chất lượng và kỹ thuật.

- Chỉ tiêu tối ưu về hàm thời gian sấy tg là đại lượng đặc trưng cho chỉ tiêu kỹ thuật của thiết bị sấy, trong đó thời gian sấy ngắn thì mức tiêu thụ điện năng riêng càng thấp, mang lại lợi ích và hiệu quả tiết kiệm chi phí sản xuất.

- Chỉ tiêu tối ưu về tỷ lệ khuyết tật đặc trưng cho chỉ tiêu về chất lượng của gỗ sau sấy, yếu tố này rất quan trọng trong công nghiệp sản xuất, giảm tỷ lệ khuyết tật sẽ góp phần nâng cao giá trị nguyên liệu gỗ trong sản xuất và sử dụng

- Chỉ tiêu tối ưu chung hay còn gọi là đa mục tiêu là bài toán thương lượng giữa chỉ tiêu chất lượng và kỹ thuật của thiết bị sấy gỗ Cầm xe để sao cho đồng thời thời gian sấy là ngắn nhất, tỷ lệ khuyết tật gỗ sau khi sấy là thấp nhất.

- Thông số tối ưu là giá trị các thông số đảm bảo trị số chỉ tiêu tối ưu. Các bài toán tối ưu được giải trên máy tính bằng phần mềm Matlab.

Như vậy từ mục đích nghiên cứu, chúng tôi xét 4 bài toán tối ưu như sau:

### 3.11.9.1 Kích thước gỗ 20 x 50 x 500 mm $Y_{sum25}$

Bài toán tối ưu được giải trên máy tính nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Matlab kết quả thể hiện phụ lục 57

Hàm thời gian và tỷ lệ khuyết tật được tối ưu hóa theo 2 phương trình .

Hàm mục tiêu:

$$Y_{25tg2} \text{ và } Y_{25kt2} \rightarrow \min.$$

$$Y_{25tg2} = 38 - 13,0925.X_1 - 10,5622.X_2 + 5,75.X_1.X_2 + 4.X_1^2 + 3,75.X_2^2$$

$$Y_{25kt2} = 4,214 + 2,7818.X_1 + 2,29485.X_2 + 1,6125.X_1.X_2 + 1,00238.X_1^2 - 0,827375.X_2^2$$

Các điều kiện ràng buộc:  $-1,414 \leq x_i \leq +1,414$  ;  $i = 1 \div 2$ .

**Bảng 3.16** Giá trị tối ưu hàm đa mục tiêu  $Y_{sum25}$

STT	Thông số đầu vào	Giá trị		Thông số đầu ra	Giá trị tối ưu
1	$X_1$	1,3907	58,9 <sup>0</sup> C	$Y_{25tg2}$	27,09 (giờ)
2	$X_2$	0,3421	634,21 W/m <sup>2</sup>	$Y_{25kt2}$	11,67 (%)

### 3.11.9.2 Kích thước gỗ 50 x 50 x 500 mm $Y_{sum55}$

Bài toán tối ưu được giải trên máy tính nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Matlab kết quả thể hiện phụ lục 60

Hàm thời gian và tỷ lệ khuyết tật được tối ưu hóa theo 2 phương trình

Hàm đa mục tiêu:

$$Y_{55tg2} \text{ và } Y_{55kt2} \rightarrow \min.$$

$$Y_{55tg2} = 74,8 - 13,7175.X_1 - 10,2301.X_2 + 6.X_1.X_2 + 4,5375.X_1^2 + 4,2875.X_2^2$$

$$Y_{55kt2} = 5,102 + 2,63932.X_1 + 2,083.X_2 + 1,6125.X_1.X_2 + 1,014.X_1^2 + 0,7365.X_2^2$$

Các điều kiện ràng buộc:  $-1,414 \leq x_i \leq +1,414$  ;  $i = 1 \div 2$ .

**Bảng 3.17** Giá trị tối ưu hàm đa mục tiêu  $Y_{sum55}$ 

STT	Thông số đầu vào	Giá trị		Thông số đầu ra	Giá trị tối ưu
1	$X_1$	1,3450	58,7 °C	$Y_{55tg2}$	64,29 (giờ)
2	$X_2$	0,2519	625,2 W/m <sup>2</sup>	$Y_{55kt2}$	11,60 (%)

**3.11.9.3 Kích thước gỗ 20 x 150 x 500 mm  $Y_{sum215}$** 

Bài toán tối ưu được giải trên máy tính nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Matlab kết quả thể hiện phụ lục 63.

Hàm thời gian và tỷ lệ khuyết tật được tối ưu hóa theo 2 phương trình.

Hàm mục tiêu:

$$Y_{215tg2} \text{ và } Y_{215kt2} \rightarrow \min.$$

$$Y_{215tg2} = 51 - 13,2175.X_1 - 10,6872.X_2 + 5,5.X_1.X_2 + 3,9375.X_1^2 + 3,6875.X_2^2$$

$$Y_{215kt2} = 5,418 + 2,79271.X_1 + 2,29869.X_2 + 1,6125.X_1.X_2 + 1,02538.X_1^2 - 0,815375.X_2^2$$

Các điều kiện ràng buộc:  $-1,414 \leq x_i \leq +1,414$  ;  $i = 1 \div 2$ .

**Bảng 3.18** Giá trị tối ưu hàm đa mục tiêu  $Y_{sum215}$ 

STT	Thông số đầu vào	Giá trị		Thông số đầu ra	Giá trị tối ưu
1	$X_1$	1,3907	58,9 °C	$Y_{215tg2}$	39,61 (giờ)
2	$X_2$	0,4120	641,2 W/m <sup>2</sup>	$Y_{215kt2}$	13,30 (%)

**3.11.9.4 Kích thước 50 x 150 x 500 mm  $Y_{sum515}$** 

Bài toán tối ưu được giải trên máy tính nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Matlab kết quả thể hiện phụ lục 66

Hàm thời gian và tỷ lệ khuyết tật được tối ưu hóa theo 2 phương trình.

Hàm đa mục tiêu:

$$Y_{515tg2} \text{ và } Y_{515kt2} \rightarrow \min.$$

$$Y_{515tg2} = 126,6 - 13,7175.X_1 - 10,2301.X_2 + 6.X_1.X_2 + 4,6375.X_1^2 + 4,3875.X_2^2$$

$$Y_{515kt2} = 8,406 + 2,63932.X_1 + 2,083.X_2 + 1,6125.X_1.X_2 + 1,012.X_1^2 - 0,7345.X_2^2$$

Các điều kiện ràng buộc:  $-1,414 \leq x_i \leq +1,414$  ;  $i = 1 \div 2$ .



**Bảng 3.19** Giá trị tối ưu hàm đa mục tiêu  $Y_{sum515}$ 

STT	Thông số đầu vào	Giá trị		Thông số đầu ra	Giá trị tối ưu
1	$X_1$	1,2987	58,5 °C	$Y_{515tg2}$	116,28 (giờ)
2	$X_2$	0,2778	627,8 W/m <sup>2</sup>	$Y_{515kt2}$	14,76 (%)

Trong quá trình nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết sấy chân không gỗ Cẩm xe đã mang lại những kết quả có ý nghĩa. Mặc dù nghiên cứu theo qui mô phòng thí nghiệm nhưng những kết quả sẽ là tiền đề quan trọng góp phần vào trong lĩnh vực sấy gỗ. Bên cạnh đó, chúng tôi cũng tiến hành nghiên cứu sấy gỗ Cẩm xe cùng qui cách dày 20 mm bằng phương pháp sấy đối lưu bằng hơi nước hay còn gọi sấy gián tiếp môi trường không khí, kết quả ghi nhận thời gian từ lúc ( $W = 40\%$ ) thì thời gian sấy gỗ đạt ( $21 - 5 = 16$  ngày), tỷ lệ khuyết tật ( $15 - 20\%$ ) (**chi tiết trình bày phụ lục B**). Từ kết quả trên cho thấy, phương pháp sấy chân không có nhiều thuận lợi về mặt rút ngắn thời gian sấy và giảm tỷ lệ khuyết tật gỗ sau sấy so với phương pháp sấy đối lưu bằng hơi nước. Điều này mang lại lợi ích trong công nghệ sấy gỗ, gia công và chế biến gỗ, nâng cao giá trị nguyên liệu gỗ, góp phần mang lại hiệu quả trong quá trình sản xuất sản phẩm gỗ. Hiện nay, với công nghệ và kỹ thuật ngày càng hiện đại, việc ứng dụng kỹ thuật sấy gỗ chân không rất cần thiết và hữu ích.

### 3.12 Các bước quy trình công nghệ sấy chân không gỗ Cẩm xe

Dựa trên kết quả thực nghiệm cho thấy những nhân tố ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình sấy chân không gỗ Cẩm xe. Căn cứ vào kết quả đạt được nghiên cứu trình bày các bước trong quy trình sấy chân không kết hợp hồng ngoại gỗ Cẩm xe như sau.

Bước 1: Chuẩn bị nguyên liệu gỗ

Bước 2: Xếp gỗ vào buồng sấy theo từng lớp, so le với nhau

Bước 3: Đóng cửa buồng sấy

Bước 4: Cài đặt chế độ sấy với các thông số nhiệt độ sấy ( $T^0C$ ), cường độ bức xạ hồng ngoại  $P_{hm}$  W/m<sup>2</sup>, áp suất tương ứng nhiệt độ sấy (bar)

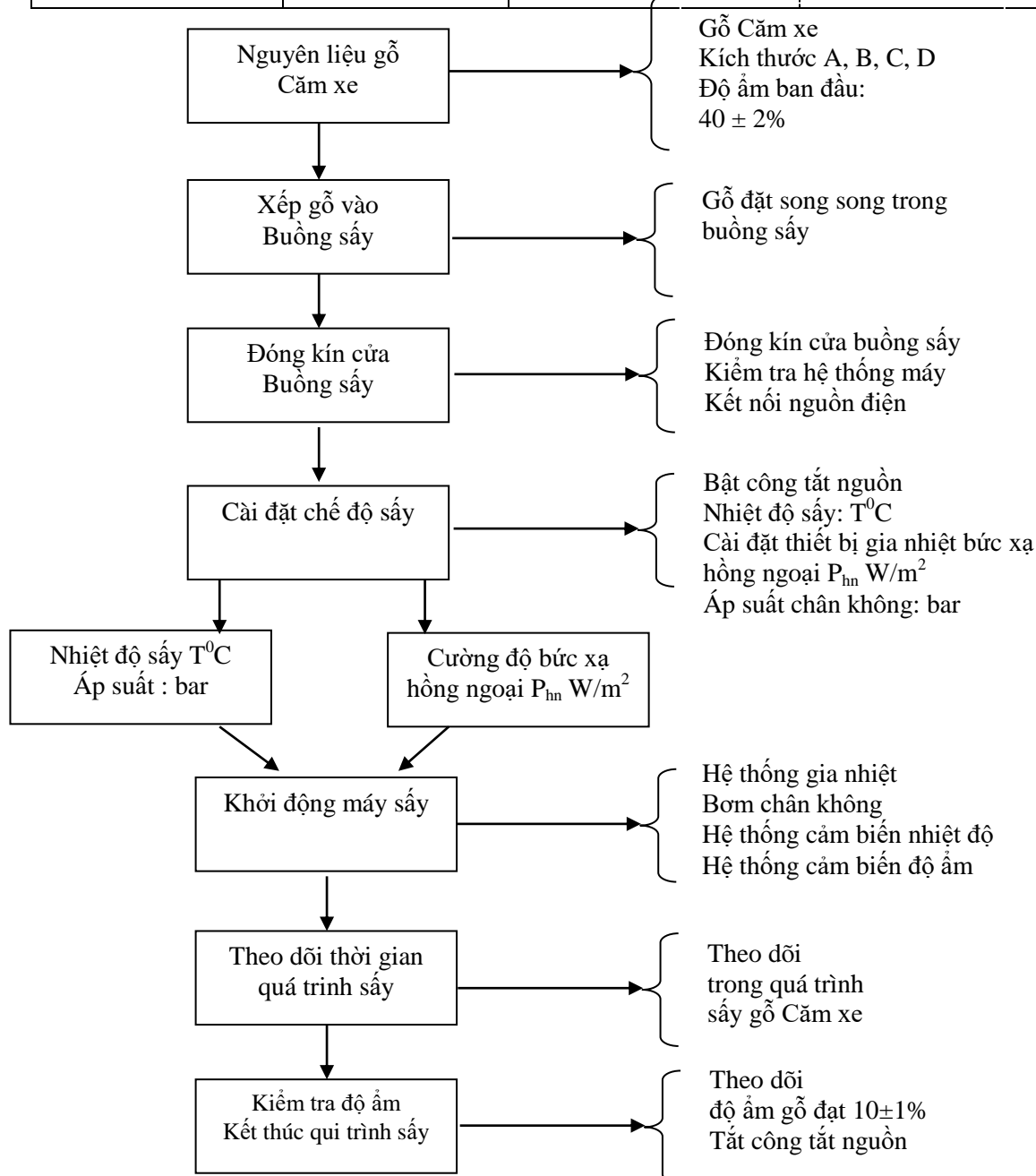
Bước 5: Khởi động máy sấy

Bước 6: Theo dõi quá trình sấy liên tục đến khi gỗ đạt độ ẩm  $10 \pm 1\%$

Bước 7: Kiểm tra độ ẩm gỗ, đạt  $10 \pm 1\%$ , kết thúc qui trình sấy

**Bảng 3.20.** Giá trị thông số công nghệ sấy phù hợp cho từng dạng kích thước

Kích thước (mm)	Nhiệt độ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Áp suất chân không (bar)	Cường độ bức xạ hồng ngoại $P_{\text{hn}}$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
A: 20 x 50 x 500	58,9	0,2	634,2
B: 50 x 50 x 500	58,7	0,2	625,2
C: 20 x 150 x 500	58,9	0,2	641,2
D: 50 x 150 x 500	58,5	0,2	627,8



**Hình 3.46.** Sơ đồ các bước qui trình công nghệ sấy gỗ Cắm xe phù hợp

Thông qua sơ đồ hình 3.46 trình bày các bước công nghệ trong quá trình sấy chân không gỗ Căm xe, gỗ được đặt song song buồng sấy theo vị trí kiểu so le để nhận được sóng hồng ngoại một cách đồng đều nhất, tiến hành đóng kín cửa buồng sấy, cài đặt các thông số công nghệ sấy : nhiệt độ, áp suất, cường độ bức xạ hồng ngoại. Sau khi cài đặt các thông số công nghệ tiến hành khởi động hệ thống gia nhiệt, bơm chân không, các hệ thống cảm biến nhiệt độ và ẩm độ. Tiến hành theo dõi quá trình sấy thông qua hệ thống cảm biến, khi độ ẩm đạt theo yêu cầu kết thúc quá trình sấy, tắt hệ thống máy, chờ thời gian ổn định nhiệt độ đưa nguyên liệu gỗ ra ngoài.

### **Kết luận chương 3**

Trên cơ sở các phương pháp nghiên cứu được đề cập ở chương 2, chương này triển khai các kết quả đạt được như sau:

- Nghiên cứu thực nghiệm xác định các giá trị thông số nhiệt vật lý và độ ẩm của gỗ Căm xe, vì các thông số này vì liên quan trực tiếp đến phương trình toán và các điều kiện ban đầu và điều kiện biên. Giá trị của các thông số được sử dụng trong việc giải tìm nghiệm cho phương trình truyền nhiệt và truyền ẩm trong quá trình sấy chân không hồng ngoại gỗ Căm xe
- Xây dựng mô hình vật lý quá trình sấy gỗ Căm xe gia nhiệt bằng bức xạ hồng ngoại dưới điều kiện áp suất chân không để từ đó tiến hành xây dựng và xác định mô hình toán mô tả quá trình phân bố nhiệt và ẩm trong quá trình sấy chân không gỗ Căm xe.
- Phân tích quá trình cân bằng năng lượng xảy ra trong nguyên liệu gỗ khi sấy chân không hồng ngoại; từ đó xây dựng phương trình toán truyền nhiệt, truyền ẩm, bên cạnh đó xác định các biên của thanh gỗ sát thực tế để xây dựng điều kiện biên phù hợp với phương trình truyền nhiệt, truyền ẩm.
- Giải phương trình truyền nhiệt, truyền ẩm bằng phương pháp số (phần tử hữu hạn, Galerkin kết hợp phần mềm mô phỏng Comsol Multiphysics), nghiệm bài toán là mô tả diễn biến quá trình tăng nhiệt độ và giảm độ ẩm bên trong vật liệu; tất cả diễn biến này thay đổi theo thời gian được mô phỏng thông qua hình ảnh, biểu đồ, đồ thị dưới dạng đường cong nhiệt và đường cong sấy trong quá trình sấy chân không gỗ Căm xe.

- Xác định mức độ phù hợp phương trình toán tiến hành so sánh giữa kết quả từ quá trình mô phỏng lý thuyết với kết quả từ thực nghiệm, từ đó nhận định về mức độ phù hợp của phương trình đã được xây dựng có thể mô tả hiện tượng sát thực tế hay không và làm cơ sở để dự đoán kết quả cho những hiện tượng vật lý tương tự mà không cần thực nghiệm.

- Nghiên cứu thực nghiệm sấy chân không hồng ngoại gỗ Căm xe ở nhiều chế độ sấy khác nhau sử dụng phương pháp qui hoạch thực nghiệm (đề cập ở chương 2) xác định các thông số công nghệ sấy đầu vào và đầu ra và mối quan hệ giữa các thông số. Với điều kiện nhiệt độ TNS 45 - 59 °C, áp suất chân không tương ứng 0,1 - 0,217 bar và cường độ bức xạ hồng ngoại 459 - 741 W/m<sup>2</sup> thì thời gian sấy từ 27 - 116 giờ, tỷ lệ khuyết tật 10 - 13%, tùy theo dạng kích thước gỗ Căm xe nhất định. Kết quả nghiên cứu cho thấy thời gian sấy và tỷ lệ khuyết tật gỗ phụ thuộc và nhiệt độ sấy và cường độ bức xạ, đồng thời ảnh hưởng trực tiếp trên từng dạng qui cách kích thước khác nhau của gỗ Căm xe. Các số liệu này có độ tin cậy chấp nhận được (kết quả nghiên cứu và thảo luận được trình bày ở phần 3.5).

- Nghiên cứu đã xác định và khuyến nghị chế độ sấy phù hợp cho gỗ Căm xe là nhiệt độ TNS là 58,5 – 58,9°C, áp suất 0,2 bar, cường độ bức xạ hồng ngoại 625,2 – 641,2 W/m<sup>2</sup> cho kích thước gỗ Căm xe từ chiều dày 20, 50 mm và chiều rộng 50, 150 mm.

- Thông qua kết quả nghiên cứu thực nghiệm xác định các thông số công nghệ phù hợp cho chế độ sấy chân không gỗ Căm xe từ đó làm cơ sở xây dựng các bước công nghệ cho quá trình sấy.

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### Kết luận

Từ những kết quả nghiên cứu đề tài đạt được và rút ra một số kết luận chính như sau:

- Thực nghiệm xác định các thông số nhiệt vật lý của gỗ Căm xe: độ ẩm bão hòa thớ gỗ, độ ẩm thăng bằng (cân bằng), độ ẩm ban đầu, khối lượng riêng, nhiệt dung riêng và hệ số dẫn nhiệt đều phụ thuộc vào độ ẩm của gỗ và sự biến thiên độ ẩm sẽ ảnh hưởng đến giá trị của các thông số, mối quan hệ thể hiện qua phương trình tương quan bậc 1 và bậc 2 theo hướng tỷ lệ thuận giữa độ ẩm và các thông số.
- Xây dựng mô hình vật lý quá trình sấy gỗ chân không kết hợp hồng ngoại qua thí nghiệm, mô hình này mô tả cụ thể chi tiết diễn biến thực hiện quá trình sấy từ mô hình này là cơ sở xác định mô hình toán quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm trong sấy chân không gỗ Căm xe.
- Mô phỏng diễn biến quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm bằng phương pháp số, sử dụng phần mềm Comsol Multiphysics và giải mô hình toán, kết quả mô phỏng quá trình truyền nhiệt và truyền ẩm bằng hình ảnh 3D và bằng đồ thị 2D, thông qua đó giải thích phân bố nhiệt độ và ẩm độ. Các kết quả từ mô phỏng góp phần dự đoán diễn biến quá trình sấy
- Kiểm chứng mối quan hệ giữa lý thuyết và thực nghiệm thông qua thực nghiệm kiểm chứng quá trình truyền nhiệt sấy gỗ Căm xe kích thước 20 x 50 x 500 mm, 50 x 50 x 500 mm với kết quả như sau cho thấy lý thuyết và thực nghiệm có mối quan hệ tương đồng nhau trong quá trình truyền nhiệt, truyền ẩm.
- Mối quan hệ giữa các thông số công nghệ đầu vào nhiệt độ sấy ( $X_1$ ), cường độ bức xạ hồng ngoại ( $X_2$ ) với các thông số công nghệ đầu ra thời gian sấy ( $Y_1$ ) và tỷ lệ khuyết tật ( $Y_2$ ) trong quá trình sấy chân không hồng ngoại gỗ Căm xe thể hiện qua các phương trình tương quan bậc 2.
- Các thông số công nghệ phù hợp tiến hành giải các phương trình tương quan thông qua bài toán tối ưu các thông số công nghệ một mục tiêu và đa

mục tiêu cho thông số đầu vào nhiệt độ sấy ( $X_1$ ), cường độ bức xạ hồng ngoại ( $X_2$ ) với các thông số công nghệ đầu ra thời gian sấy ( $Y_1$ ) và tỷ lệ khuyết tật ( $Y_2$ ) trong quá trình sấy chân không gỗ Căm xe. Các thông số tối ưu sẽ được chọn là thông số phù hợp với từng qui cách gỗ Căm xe khác nhau

- Xây dựng các bước công nghệ sấy gỗ Căm xe bằng phương pháp chân không hồng ngoại dựa trên kết quả các thông số phù hợp cho các qui cách kích thước khác nhau của gỗ Căm xe.

### **Kiến nghị**

Nghiên cứu công nghệ sấy gỗ Căm xe (*Xylia Xyclocarpa*) bằng phương pháp sấy chân không đã đạt mục tiêu đã đề ra, kết quả phù hợp về và nội dung nghiên cứu đạt được. Về khía cạnh khoa học, luận án tập trung nghiên cứu diễn biến mô tả quá trình truyền nhiệt, truyền ẩm trong quá trình sấy chân không kết hợp hồng ngoại là cơ sở khoa học cho quá trình nghiên cứu thực nghiệm, đặc biệt việc xây dựng mô hình toán góp phần dự đoán phân bố nhiệt độ và ẩm độ diễn ra quá trình sấy gỗ Căm xe. Bên cạnh đó, xác định các thông số công nghệ sấy phù hợp nhằm đề xuất các bước trong qui trình sấy chân không hồng ngoại gỗ Căm xe là cơ sở cho việc ứng dụng sấy gỗ chân không vào thực tế sản xuất. Mặc dù kết quả đạt được trên máy sấy qui mô dạng thí nghiệm cho một số dạng kích thước gỗ Căm xe, kết quả ghi nhận được là cơ sở khoa học cho việc áp dụng qui trình sấy, là tiền đề cho mô hình sấy gỗ Căm xe trong sản xuất công nghiệp.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### Tài liệu tiếng Việt

1. Bộ Nông Nghiệp và Phát Triển Nông Thôn, 2021. Báo cáo kết quả thực hiện năm 2021 và triển khai nhiệm vụ trọng tâm năm 2022 lĩnh vực nông nghiệp. Hội nghị tổng kết năm 2021 ngành Nông nghiệp và Phát triển nông thôn.
2. Cao Thị Cẩm, Trần Lê Huy, Tô Xuân Phúc, 2021. Báo cáo cập nhật thị trường Việt Nam nhập khẩu gỗ nguyên liệu hết 8 tháng đầu năm 2021.
3. Đặng Hữu Tiếp, 2010. Nghiên cứu chế tạo máy sấy hơi nước kết hợp chân không, Công ty CP Thương mại Công nghiệp và Chế biến gỗ (INWO).
4. Hồ Xuân Các, Nguyễn Hữu Quang, 2006. Công nghệ sấy gỗ, Nhà xuất bản Nông Nghiệp.
5. Hoàng Đình Tín, 2002. Cơ sở truyền nhiệt, Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Tp. Hồ Chí Minh.
6. Hoàng Đình Tín, Lê Chí Hiệp, 1997. Nhiệt động lực học kỹ thuật, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
7. Hoàng Thị Thanh Hương, 2014. Nghiên cứu ứng dụng năng lượng mặt trời trong công nghệ sấy gỗ. Đề tài nghiên cứu khoa học cấp Sở Khoa học Công nghệ Bình Dương, Việt Nam.
8. Hoàng Thị Thanh Hương, Đặng Thế Chiêu, 2013. Nghiên cứu Sấy gỗ vi sóng. Đề tài nghiên cứu khoa học, Trường Đại học Nông Lâm TpHCM, Việt Nam.
9. Hoàng Văn Chúc, 1999. Kỹ thuật sấy, Nhà xuất bản khoa học kỹ thuật.
10. Lê Xuân Tình, 1998. Khoa học gỗ. Nhà xuất bản Nông nghiệp, Hà Nội, Việt Nam.
11. Nguyễn Cảnh, 1993. Quy hoạch thực nghiệm. Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh, Việt Nam.
12. Nguyễn Đình Hưng, Lê Thu Hiền, Đỗ Văn Bản, 2008. Át – lát cấu tạo, tính chất gỗ và tre Việt Nam tập 1, Nhà xuất bản Nông Nghiệp.
13. Nguyễn Hay, 2007. Giáo trình truyền nhiệt, Nhà xuất bản Nông nghiệp 12
14. Nguyễn Hay, Lê Anh Đức, Lê Quang Giảng, 2015. Công nghệ và thiết bị sấy một số loại nông sản thực phẩm, Nhà xuất bản nông nghiệp.
15. Nguyễn Tấn Dũng, 2011. Ứng dụng sấy thăng hoa trong bảo quản sản phẩm thủy hải sản nhóm giáp xác có giá trị kinh tế, Luận án tiến sĩ, Trường đại học Bách Khoa Tp. Hồ Chí Minh.
16. Nguyễn Văn Công Chính, 2008. Nghiên cứu thiết kế chế tạo, khảo nghiệm mô hình máy sấy gỗ chân không. Đề tài nghiên cứu khoa học, Đại học Nông Lâm Tp. Hồ Chí Minh.
17. Phạm Ngọc Nam, 2014. Nghiên cứu ứng dụng xây dựng công nghệ sấy gỗ Bạch Đàn bằng phương pháp sấy chân không. Đề tài nghiên cứu khoa học cấp tỉnh.
18. Phạm Ngọc Nam, Nguyễn Thị Ánh Nguyệt, 2005. Khoa học gỗ. Nhà xuất bản Nông nghiệp Việt Nam.

19. Phạm Văn Toàn, 2019. Nghiên cứu kỹ thuật sấy mực ồng. Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Trường đại học Nông Lâm Tp. Hồ Chí Minh.
20. Tạ Thị Phương Hoa, 2015. Độ ẩm bão hòa thứ gỗ của gỗ Trám Trắng (*Canarium album* (Lour.) Raeusch). Tạp chí khoa học và công nghệ Lâm Nghiệp số 4 – 2015.
21. Tiêu chuẩn quốc gia TCVN 8048 : 2009, Các tiêu chuẩn xác định tính chất cơ lý gỗ tự nhiên. Nhà xuất bản Hà Nội.
22. Trần Hữu Việt, 2006. Tính toán, thiết kế, khảo nghiệm mô hình sấy gỗ chân không. Luận văn tốt nghiệp, Đại học Nông Lâm Tp. Hồ Chí Minh.
23. Trần Văn Phú, 2002. Tính toán và thiết kế hệ thống sấy, Nhà xuất bản Giáo dục.
24. Trịnh Văn Quang, 2009. Phương pháp sai phân hữu hạn và phần tử hữu hạn trong truyền nhiệt. Trường đại học Giao Thông Vận Tải Hà Nội.
25. Trịnh Văn Quang, 2013. Cơ sở phương pháp phần tử hữu hạn trong truyền nhiệt. Nhà xuất bản Thế Giới, Hà Nội.
26. Vũ Huy Đại, Tạ Thị Phương Hoa, Vũ Mạnh Tường, Đỗ Văn Bản, Nguyễn Tử Kim, 2016. Giáo trình Khoa học gỗ, Nhà xuất bản Nông Nghiệp.

### **Tài liệu tiếng Anh**

27. Ahmet Kaya, 2015. Numerical Analysis Of A Radio Frequency-Assisted Convective Drying. International Journal Of Scientific & Technology Research Volume 4, Issue 06, ISSN 2277-8616.
28. Altun S., Yapici F., Korkmaz Z., 2011. Effects of Vacuum Drying with Infrared Heating on Some Properties of wood. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Forestry and Wood Technology No 73, 2011: 16-22.
29. Anusha S., Samarasekara L, Ramal V., Coorey, 2011. Thermal capacity as a function of moisture content of Sri Lankan wood species: Wheatstone bridge method. Proceedings of the Technical Sessions. Institute of Physics – Sri Lanka, Vol 17, 9 -16.
30. Assouad A., Jomaa W., 2003. Description Of The Passive Regime During The Discontinuous Vacuum Drying Of Oak. 8th International IUFRO Wood Drying Conference.
31. Avramidis S., Koumoutsakos A., Hatzikiriakos Savvas G., 2001. Radio frequency vacuum drying of wood mathematical model. Drying technology, Vol 19, No.1, 65 – 84.
32. Bijan Adl-Zarrabi, Lars Boström, 2004. Determination of thermal properties of wood and wood based products by using transient plane source. Conference: 8th World conference on timber engineering, Finland, Vol 2.
33. Campean M., 2010. Timber Drying Methods – Passing Through History Into The Future. 11th International IUFRO Wood Drying Conference,



University of Brasov, Faculty of Wood Industry. B-dul Eroilor 29, 500036 Brasov, Romania.

34. Charuwan Rojanathavorn, Chariya Paveenchana, Siriwatwechakul W., Siriwatwechakul W., 2014. Wood Plastic Composites (WPC) from Ironwood (*Xylia xylocarpa*) for Wood Floor Applications. *Materials Science*.
35. Chen Z., 1997. Primary Driving Force in Wood Vacuum Drying. Doctor of Philosophy in Wood Science and Forest Products, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
36. Chen Z., Lamb F. M., 1995. The internal conditions in vacuum drying of wood. *Vacuum Drying of Wood '95*. Slovakia, 45 - 53.
37. Chen Z., Lamb F. M., 2001. Vacuum drying of small wood components at room temperature. *Forest Products Journal*; Oct 2001; 51, 10; ProQuest Central, 55.
38. Chen Z., Lamb F. M., 2001. Investigation of boiling front during vacuum drying of wood. *Wood and fiber Science*, vol 33, no. 4, 639-647
39. Cserta, E., 2012. Drying process of wood using infrared radiation, PhD dissertation. The József Cziráki Doctoral School of Wood Sciences and Technologies, University of West Hungary, pp. 37-41.
40. Defo M., Fortin Y., Cloutier A., 2007. Modeling Superheated Steam Vacuum Drying of Wood. Département des sciences du bois et de la forêt, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec, Qc, Canada, Version of record first published.
41. Defo M., Cloutier A., Fortin Y., 2000. Modeling vacuum contact drying of wood the water potential approach. *Drying technology, International journal*, Vol 18, no. 8, 1737 - 1778. 81.
42. Deliiski N., Syuleymanov I. A., 2006. Influence of molar transfer coefficient on pressure distribution in beech lumber during its convective-vacuum drying. Original scientific paper, UDK: 630\*847.31; 630\*847.8.
43. Dilek, B., 2019. Some physical and mechanical properties of dried lumber in vacuum with high frequency heating. Master's Thesis, Duzce University, Duzce, Turkey.
44. Erriguible A., Bernada P., Couture F., Roques M.A., 2004. Modelling and numerical simulation of heat and mass transfer during vacuum drying of a porous medium, *Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, São Paulo, Brazil, vol. A, 726-732.
45. Erriguible A., Bernada P., Couture F., Roques M.-A., 2006. Simulation of vacuum drying by coupling models. *Chemical Engineering and Processing* 46 (2007) 1274–1285.
46. Espinoza, O., Bond, B., 2016. Vacuum drying of wood—state of the art. *Current Forestry Reports*. Vol 2, No 4, 223 – 235.
47. Fang F., John N. R. Ruddick, Avramidis S., 2001. Application of radio frequency heating to utility poles. Part 1: radio frequency/ vacuum drying of roundwood. *Forest product Journal*; 51, 7/8, ProQuest Central.

48. Forest Products Laboratory, 2021. Wood handbook – wood as an engineering material. United States Department of Agriculture Forest Service, Madison, Wisconsin, 543p.
49. Fu, Z., Avramidis, S., Weng, X., Cai, Y., and Zhou, Y., 2019. Influence mechanism of radio frequency heating on moisture transfer and drying stress in larch boxed-heart square timber. *Drying Technology*, 1625 – 1632.
50. Guler, C., and Dilek, B., 2020. Investigation of high-frequency vacuum drying on physical and mechanical properties of common oak (*Quercus robur*) and common walnut (*Juglans regia*) lumber. *Bio Research*. Vol 15, No 4, 7861 - 7871.
51. Haghi A. K., Amanifard N., 2008. Analysis of heat and mass transfer during microwave drying of food products. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*.
52. He Z., Yao X., Chen L., Yi S., 2010. Theoretic discussion on the way and driving forces of moisture migration in wood during vacuum drying. The international research group on wood protection.
53. He, Z.B, Yang, F., Yi, S.L., Gao. J.M, 2012. Effect of ultrasound pretreatment on vacuum drying of chinese catalpa wood. *Drying Technology* 2012, 30(15), 1750–1755.
54. Honghai Liu, Lin Yang, Wei Xu, Zhihui Wu, Kazuo Hayashi, Qiongtao Huang, 2015. Equilibrium moisture content under vacuum conditions. *Wood and fiber science*, 47(4), 1-10.
55. Iman Golpour, Mohammad Kaveh, Reza Amiri Chayjan, Raquel P., Guiné F. 2020. Optimization of infrared-convective drying of white Mulberry fruit using response surface methodology and development of a predictive model through artificial neural network. *International Journal of Fruit Science*, Vol 20, 1015 - 1035 , DOI: 10.1080/15538362.2020.1774474
56. Jie Zhang, Ping Miao, Di Zhong, Lin Liu, 2014. Mathematical modeling of drying of Masson pine lumber and its asymmetrical moisture content Profile. Nanjing Forestry University, Jiangsu Province, 210037, China.
57. Jinfeng Bi, Qinqin Chen, Yuhan Zhou, Xuan Liu, Xinye Wu, Ruijuan Chen, 2014. Optimization of short- and medium-wave infrared drying and quality evaluation of jujube powder. *Food and Bioprocess Technology* 7(8), 2375 – 2387.
58. Josue J., 2004. Some wood properties of *Xylia xylocarpa* planted in Sabah, *Materials Science*.
59. Jung H.S, Jae Hoon Lee, Lee N. H., 2000. Vacuum press drying of thick softwood lumbers, *Drying technology*, vol 18, no. 8, 1921 – 1933.
60. Jung H.S., Kang W., Eom C.D., So B.J., 2003. Comparison of vacuum drying characteristics of red pine square timber using different heating methods, 8<sup>th</sup> International IUFRO Wood Drying Conference.
61. Jurendic T., 2012. Determination of the controlling resistance to moisture transfer during drying. *Croat. J. Food Sci. Technol.* vol 4, no 1, 34 - 45.

62. Kampong Chhnang, 2012. A picture guide of forest trees in Cambodia I. Center for Asian Conservation Ecology, Kyushu University.
63. Ken Ogara, Tomoyyuki Fujii, Hishachi Abe, Pieter Baas, 2008. Identification of the timbers of Southeast Asia and the Western Pacific, Forestry and Forest products research Intititude.
64. Koumoutsakos A., 2001. Modelling radio frequency vacuum drying of wood. Doctor of Philosophy, University of British Columbia.
65. Koumoutsakos A., Avramidis S., Hatzikiriakos Savvas G., 2001. Radio frequency vacuum drying of wood. I. Mathematical model. Drying technology, Vol 19, No. 1, 65–84.
66. Koumoutsakos A., Avramidis S., Hatzikiriakos Savvas G., 2001. Radio frequency vacuum drying of wood. ii. Experimental model evaluation. Drying technology, vol 19, no.1, 85 - 98.
67. Koumoutsakos A., Avramidis S., Hatzikiriakos Savvas G., 2003. Radio Frequency Vacuum Drying of Wood. III. Two-Dimensional Model, Optimization, and Validation. Drying technology, vol 21, no 8, 1399 - 1410.
68. Krabbenhøft K., 2003. A Study of Physical Mathematical Models and their Numerical Implementation. Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering Technical University of Denmark.
69. Krišťák L., Igaz R. and Ružiak I., 2019. Applying the EDPS Method to the research into thermophysical properties of solid wood of coniferous trees. Advanted mater science engineering, ID-2303720, 1–9.
70. Kutovoy, L. Nikolaichuk and V. Slyesov, 2004. Theory of vacuum drying. Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004) São Paulo, Brazil, vol. A, 266 - 271.
71. Ledig S. F., Militzer K.E., 2000. Measured gas velocity and moisture content distribution in a convective vacuum kiln. Drying technology, vol 18, no 8, 1817-1832.
72. Lee Kok Onn, 2007. Studies of convective drying using numerical analysis on local hardwood. University Sains Malaysia.
73. Lee N. H., Hayashi K., Jung H. S., 1998. Effect of radio frequency/ vacumm drying and mechanical press drying on shrinkage and checking of walnut log cross sections. Forest Products Journal; Vol 48, No. 5; ProQuest Central
74. Li C., Lee N. H., 2008. The effect of compressive load on the moisture content of oak blocks during radio frequency/ vacumm drying. Forest Products Journal, vol 58, no. 4, ProQuest Central.
75. Lin Zhang, Stavros Avramidis, Savvas G. Hatzikiriakos, 1997. Moisture flow characteristics during radio frequency vacuum drying of thick lumber. Wood Science and Technology, vol 31, no 4, 265 - 277.
76. Luikov A.V., 1975. Phương pháp xác định hệ số dẫn nhiệt của vật liệu ẩm (*Người dịch: Ngô Tấn Anh*), Nhà xuất bản Năng lượng Moscow, Tr. 158-186.

77. Luikov A.V., 1975. Phương pháp xác định khối lượng riêng của vật liệu ẩm (*Người dịch: Ngô Tấn Anh*), Nhà xuất bản Năng lượng Moscow, Tr. 56-72.
78. Luikov A.V., 1975. Phương pháp xác định nhiệt dung riêng của vật liệu ẩm (*Người dịch: Ngô Tấn Anh*), Nhà xuất bản Năng lượng Moscow, Tr. 123-146.
79. Luikov, A.V., 1975. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. *International Journal of Heat and mass transfer*, 1–14.
80. Monika Božiková, Petr Kotoulek, Matúš Bilčík, Lubomír Kubík, Peter Hlaváč, 2021. Thermal properties of wood and wood composites made from wood waste. *Institute of Agrophysics. Polish Academy of Science, Vol.35, No.3, 251–256.*
81. Nakaya T., Yamasaky M., Fukuta S., and Sasaki Y, 2016. Thermal conductivity and volumetric specific heat of lowdensity wooden mats. *Forest Products Journal, Vol.66, No.5, 300–307.*
82. Norn Narong, Kim Sobon, 2014. Review of biological and silvicultural characteristics of timber trees planted in Cambodia, 69-73.
83. Omar Espinoza, Brian Bond, 2016. Vacuum Drying of Wood—State of the Art Current Forestry Reports, Vol 2, 223-235.
84. Perre P., Mosnier S., Turner I. W., 2004. Vacuum drying of Wood with Radiative heating:I. Experimental Procedure, Vol.50, No.1, *AIChE Journal*.
85. Perre P., 2006. Multiscale aspects of heat and mass transfer during drying, Springer Science Business Media B.V.
86. Perre P., Mosnier S., Turner I. W., 2004. Vacuum drying of Wood with Radiative heating:II. Comparison between theory and experiment, Vol. 50, No. 1, *AIChE Journal*, 108 – 118.
87. Remki B. , Abahri K. , Tahlaiti M. , Belarbi R., 2012. Hygrothermal transfer in wood drying under the atmospheric pressure gradient, *International Journal of Thermal Sciences, International Journal of Thermal Sciences 57 (2012) 135 - 141.*
88. Ressel J. B., 2003. Developments in vacuum drying and press drying of timber, University of Hamburg.
89. Sachin Gupta1, V. S. Kishan Kumar, 2017. An easy drying schedule for *Tectona grandis* through vacuum press drying, *Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*.
90. Safary M., Amiri Chayjan R., 2016. Optimization of Almond Kernels Drying under Infrared-vacuum Condition with Microwave Pretreatment using Response Surface Method and Genetic Algorithm, *Journal of Agricultural Science and Technology 18(6):1543-1556.*
91. Sahri M. H. , Josue J. , Chun S. , 2008. Some Physical Properties of 9-Year-Old *Xylia xylocarpa* Planted in Malaysia, *Environmental Science*.
92. Satho T., Yamsaengsung R., 2005. Vacuum drying of rubberwood. PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment - ICEE-

- 2005, Novi Sad 19-21, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences Trg D. Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Serbia & Montenegro.
93. Scott Lyon, Scott Bowe, Michael Wiemann, 2021. Comparing Vacuum Drying and Conventional Drying Effects on the Coloration of Hard Maple Lumber. Research Paper FPL-RP-708. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
  94. Siau, J.F., 1984. Transport Processes in Wood. Springer-Verlag: Berlin, Heidelberg, New York.
  95. Slye C. A. ,1999. Characteristics of Heat Transfer in a Vacuum: A Demonstration Experiment. John L. Vossen Memorial Award Recipient October .
  96. Souhila Kadem, Ramdane Younsi, Azziz Lamchemet, Duygu Kocafe, 2015. Transient analysis of heat and mass transfer during heat treatment of wood including pressure equatio, Thermal Science, Vol 19, No 2, 693 – 702.
  97. Stanish, M.A., Schajer, G.S., Kayihan, F. A, 1986. Mathematical model of drying for hygroscopic porous media. AICHE Journal 1986, 32(8), 1301–1311.
  98. Suvarnakuta P., Devahastin S., Soponronnarit S., and Mujumdar A. S., 2005. Drying Kinetics and Inversion Temperature in a Low-Pressure Superheated Steam-Drying System, IE049675R.
  99. Time B., 1998. Hygroscopic moisture transport in wood. Doctor thesis, Department of building and construction engineering. Norwegian university of Science and Technology.
  100. Torres S. S. , Jomaa W., Puiggali J. R., 2012. Solving a Two-Scale Model for Vacuum Drying by Using COMSOL Multiphysics. Excerpt from the Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Milan. 106
  101. Torres S. S., Jomaa W. , Puiggali J. R. , Avramidis S., 2011. Multiphysics modeling of vacuum drying of wood. Applied Mathematical Modelling, Vol 35 (2011) 5006–5016.
  102. Turner I. W., Perre P., 2004. Vacuum Drying of Wood with Radiative Heating:II. Comparison between Theory and Experiment, AICHE Journal, Vol. 50, No. 1.
  103. Turner I. W., Perre P., 2004. A new two-scale model describing drying kiln dynamics andcoupled heat and mass transfer in a porous medium: application to the combined vacuum drying and radiative heating of wood. Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004) São Paulo, Brazil, 22-25 August 2004, vol. A, 436 - 443.
  104. Turner I. W., Perre P., 2004. Vacuum Drying of Wood with Radiative Heating: I. Experimental procedure. AICHE Journal, Vol. 50, No. 1, 108 – 118.
  105. Vongpradubchai S., Rattanadecho P., 2010. Microwave and hot air drying of wood using a rectangular waveguide. Research Center of Microwave Utilization in Engineering (R.C.M.E.), Faculty of Engineering,

Department of Mechanical Engineering, Thammasat University (Rangsit Campus), Pathum Thani, Thailand.

106. Welling J., Aleon D., Cont S., Bemett G., Esping B., Forsen H., Tronstad S., Gard W., Militz H., Alvarez Noves H., Sorensen C.B., Boye Chr., Ressel J., 1988-1994, The EDG Recommendation on Assessment of drying quality of Timber. 30p.
107. Xian-Jun Li, Bi-Guang Zhang, Wen-Jun Li, 2008. Microwave-Vacuum Drying of Wood: Model Formulation and Verification. Material Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing, China.
108. Xiaoran Jia, Jingyao Zhao, Yingchun Cai, 2015. Radio frequency vacuum drying of timber: Mathematical Model and Numerical analysis. Bio Resources.
109. Yan Yang, Jianxiong Lu, Chunlei Dong, Tianyi Zhan, Jinghui Jiang and Bei Luo, 2016. Mathematical model of heat and moisture transfer in Alder Birch wood during the thermo-vacuum treatment and its application in the quantitative control of the wood color. *Drying Technology*, Vol 34, No.13, 1567-1582.
110. Younsi R., Kocafe D., Kocafe Y., 2005. Three-dimensional simulation of heat and moisture transfer in wood. *Applied Thermal Engineering*, Vol 26, 1274–1285.
111. Zhangjing Chen, Fred M. Lamb, 2001. Investigation of boiling front during vacuum drying of wood. *Wood and fiber science*, Vol. 33, No.4. 116
112. Zhengbin He, Fe Yang, Yiqing Peng, Songlin Yi, 2013. Ultrasound assiste, vacuum drying of Wood effects on drying time and product quality. College of material Science and Technology, Beijing forestry University.
113. Zhengbin He, Jing Qian, Lijie Qu, Zhenyu Wang, Songlin Yi, 2019. Simulation of moisture transfer during wood vacuum drying. *Results in Physics*, Vol 12, 1299 – 1303.
114. Zhengbin He, Zijian Zhao, Yu Zhang, Huan Lv, Songlin Yi, 2015. Convective heat and mass transfer during vacuum drying process. *Wood Research*, Vol 60, No. 6, 929 – 938.
115. Zhengbin He, Yu Zhang, Zhenyu Wang, Zijian Zhao, and Songlin Yi, 2016. Reducing wood drying time by application of ultrasound pretreatment. *Drying technology*, Vol. 34, No.10, 1141 - 1146.
116. Zhihua Geng, Mehdi Torki, Mohammad Kaveh, Mohsen Beigi, Xuhai Yang, 2022. Characteristics and multi-objective optimization of carrot dehydration in a hybrid infrared /hot air dryer. *Food Science and Technology*, Vol. 172, No.10, 114229.

## DANH MỤC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU CỦA TÁC GIẢ

1. Bùi Thị Thiên Kim, 2015. So sánh quá trình sấy gỗ Căm xe (*Xylia xylocarpa*) bằng phương pháp sấy đối lưu và phương pháp chân không. Kỹ yếu hội nghị khoa học và công nghệ toàn quốc về cơ khí - Lần thứ IV, ISBN: 978-604-73-3690-6, trang 823 – 831.
2. Bui Thi Thien Kim, Hoang Thi Thanh Huong, Ho Xuan Cac, 2019. Analysis of transient heat conduction in Pyinkado (*Xylia xylocarpa*), *AGU International Journal of Sciences – 2019*, ISSN: 0866-8086, vol 7, no 4, 91 – 99.
3. Bùi Thị Thiên Kim, Hoàng Thị Thanh Hương, Lê Anh Đức, 2022. Nghiên cứu thực nghiệm xác định các thông số công nghệ sấy gỗ căm xe (*Xylia xylocarpa*) trên máy sấy chân không hồng ngoại (Experimental research for determination of main parameters of pyinkado (*Xylia xylocarpa*) on vacuum infrared drier), *Tạp chí Khoa học Đại học Huế: Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn* :pISSN: 2588-1191; eISSN: 2615-9708, Tập 131, Số 3D, 2022.
4. Bùi Thị Thiên Kim, Hoàng Thị Thanh Hương, Lê Anh Đức, 2022. Nghiên cứu xác định một số tính chất nhiệt chủ yếu của gỗ căm xe (*Xylia xylocarpa*), *Tạp chí nông nghiệp và phát triển nông thôn*, ISSN: 1859 – 4581.
5. Bui Thi Thien Kim, Le Anh Duc, Hoang Thi Thanh Huong, 2022. Research on optimizing the drying process of Pyinkado (*Xylia Xylocarpa*) by vacuum infrared radiation drying method, *The 4<sup>th</sup> International Conference on Sustainable Agriculture and Environment*.