

THIẾT KẾ HỆ THỐNG SẤY GỖ RỪNG TRỒNG QUY MÔ CÔNG NGHIỆP SỬ DỤNG NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI KẾT HỢP HƠI NƯỚC BẢO HÒA

Nguyễn Văn Giáp, Lê Thị Hưng, Hoàng Dương Nhi

Viện Nghiên cứu Công nghiệp rừng (RIFI)

TÓM TẮT

Sấy gỗ là công đoạn tiêu thụ năng lượng lớn nhất trong quá trình chế biến gỗ chiếm khoảng (60 - 70%), thường dựa vào lò hơi đốt sinh khối hoặc nhiên liệu hóa thạch, gây chi phí cao và phát thải lớn. Trong khi đó, các hệ thống sấy gỗ hoàn toàn bằng năng lượng mặt trời (NLMT) lại thiếu ổn định, phụ thuộc vào thời tiết và khó áp dụng ở quy mô công nghiệp. Nghiên cứu này trình bày quá trình tính toán, thiết kế và thử nghiệm hệ thống lò sấy gỗ kết hợp (NLMT - hơi nước bão hòa) quy mô công nghiệp 100 m³/mẻ cho gỗ keo lai (*Acacia hybrid*). Phương pháp nghiên cứu dựa trên cân bằng nhiệt, vật chất và khí động học để xác định thông số kỹ thuật, hướng tới duy trì nhiệt độ sấy ổn định (50 - 60°C) và tối ưu hóa cấu trúc vòm ba lớp xuyên sáng cách nhiệt - khí sấy - hấp thụ nhiệt. Kết quả tính toán tổng nhu cầu năng lượng cho một mẻ sấy ~ 98,1 GJ (tương đương 56,8 kW). Hệ thống được thiết kế với diện tích bề mặt hấp thụ NLMT ≥ 230 m², lò hơi có công suất tối thiểu 100 kg/h (ở áp suất 4 bar) và dàn trao đổi nhiệt ≥ 23 m², cùng 10 quạt tuần hoàn với tổng công suất ≥ 22 kW. Thử nghiệm thực tế chứng minh hệ thống vận hành ổn định, duy trì dải nhiệt mục tiêu và tiết kiệm 35 - 40% năng lượng so với lò sấy hơi nước truyền thống, khẳng định tính khả thi kỹ thuật và tiềm năng ứng dụng trong thực tế sản xuất.

Từ khóa: Cân bằng nhiệt, lò sấy gỗ kết hợp, năng lượng mặt trời, sấy gỗ keo lai, sấy gỗ tiết kiệm, thiết kế hệ thống sấy.

DESIGN OF AN INDUSTRIAL-SCALE WOOD DRYING SYSTEM USING SOLAR ENERGY INTEGRATED WITH SATURATED STEAM

Nguyen Van Giap, Le Thi Hung, Hoang Duong Nhi

Research institute of forest industry (RIFI)

ABSTRACT

Wood drying is the most energy-intensive stage in wood processing, accounting for approximately 60 - 70% of the total energy consumption. Conventional drying systems typically rely on biomass or fossil - fuel - fired boilers, leading to high operational costs and significant emissions. Meanwhile, fully solar - based wood drying systems often lack stability, are weather - dependent, and are difficult to implement on an industrial scale. This study presents the design, calculation, and experimental evaluation of an industrial - scale solar - steam hybrid wood drying system with a capacity of 100 m³ per batch for acacia hybrid lumber. The research methodology is based on thermal, mass, and aerodynamic balance analyses to determine key technical parameters, aiming to maintain a stable drying temperature of 50 - 60°C and to optimize a triple - layer dome structure comprising a transparent insulation layer, a hot - air channel, and a solar - absorbing surface. The total energy demand for one drying batch was estimated at approximately 98,1 GJ (equivalent to 56,8 kW). The system was designed with a solar collector area of ≥ 230 m², a steam boiler with a minimum capacity of 100 kg/h (at 4 bar), a heat exchanger area of ≥ 23 m², and ten circulation fans with a total power of ≥ 22 kW. Experimental results demonstrated that the system operated stably within the target temperature range, achieving a 35 - 40% energy saving compared with conventional steam drying kilns. These findings confirm the technical feasibility and practical potential of the proposed solar - steam hybrid system for industrial wood drying applications.

Keywords: Acacia hybrid wood drying, drying system design, energy - efficient drying, solar energy, solar - steam hybrid kiln, thermal balance.

I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Ngành công nghiệp chế biến gỗ toàn cầu hiện đang đối mặt với hai thách thức, đó là: nhu cầu ngày càng tăng về sản phẩm gỗ chất lượng cao và áp lực giảm thiểu tác động môi trường theo các cam kết quốc tế về biến đổi khí hậu và phát thải ròng bằng không (IPCC, 2006; IPCC, 2019). Trong chuỗi giá trị chế biến gỗ, sấy là công đoạn công nghệ thiết yếu, đồng thời là khâu tiêu thụ năng lượng lớn nhất, chiếm từ 60 - 70% tổng năng lượng của một nhà máy chế biến (Luna *et al.*, 2018).

Tại Việt Nam - một trong những quốc gia xuất khẩu gỗ và sản phẩm gỗ hàng đầu thế giới - phương pháp sấy công nghiệp phổ biến nhất vẫn là sấy hơi nước nóng, sử dụng nồi hơi đốt sinh khối (phế phẩm gỗ) hoặc nhiên liệu hóa thạch (than đá) (Nguyễn Xuân Trung, Đinh Vương Hùng, 2014). Mặc dù cho phép kiểm soát quá trình tốt và đảm bảo chất lượng gỗ sau sấy, các hệ thống này bộc lộ nhiều hạn chế: tiêu thụ lượng lớn nhiên liệu, chi phí vận hành cao, và cạnh tranh nguồn phế phẩm gỗ với ngành sản xuất viên nén năng lượng (Nguyễn Bảo Ngọc, 2022; Ndukwu *et al.*, 2020). Ngoài ra, việc đốt cháy nhiên liệu sinh khối hoặc than đá không hiệu quả còn gây phát thải đáng kể khí nhà kính (GHG) và bụi mịn (PM), làm gia tăng áp lực thực hiện các cam kết Net Zero vào năm 2050 (IPCC, 2006; ISO, 1992).

Trong bối cảnh đó, năng lượng mặt trời (NLMT) được xem là giải pháp thay thế tiềm năng, đặc biệt tại các quốc gia có bức xạ cao như Việt Nam (trung bình 4,5 - 5,0 kWh/m²/ngày) (World Bank and ESMAP, 2019). Tuy nhiên, các hệ thống sấy sử dụng hoàn toàn NLMT - dù là dạng thụ động hay chủ động - vẫn tồn tại hạn chế cố hữu: thời gian sấy kéo dài và phụ thuộc nhiều vào điều kiện thời tiết (Boone *et al.*, 1999). Sự gián đoạn do thiếu nắng, ban đêm hoặc thời tiết xấu khiến quá trình sấy không ổn định, gây khó khăn cho sản xuất hàng loạt và ảnh hưởng tiến độ giao hàng (Denig *et al.*, 2000; Duffie, Beckman, 2013).

Để khắc phục những hạn chế này, công nghệ sấy kết hợp (hybrid drying), kết hợp NLMT làm nguồn nhiệt chính với nguồn nhiệt phụ trợ chủ động (hơi nước, điện trở hoặc bơm nhiệt), đã được chứng minh là hướng đi hiệu quả (Bektas, Bektas, 2005; Bureau International des Poids et Mesures, 2019; Chen *et al.*, 2022). Các hệ thống sấy kết hợp cho phép tận dụng tối đa nguồn NLMT khi có sẵn, đồng thời tự động kích hoạt nguồn cấp bù để duy trì nhiệt độ sấy ổn định trong khoảng 50 - 60°C (Çengel, Boles, 2019; IPCC, 2019). Nhiều nghiên cứu quốc tế đã ghi nhận khả năng tiết kiệm năng lượng từ 30 đến 60% khi áp dụng cấu hình kết hợp, đồng thời cải thiện chất lượng gỗ sấy và giảm phát thải (El-Sebaili, Shalaby, 2021; Lamrani *et al.*, 2021a; Lamrani *et al.*, 2021b).

Mặc dù vậy, phần lớn các nghiên cứu hiện có mới dừng ở quy mô phòng thí nghiệm hoặc pilot (Ndukwu *et al.*, 2020; Ngọc, 2022), trong khi việc triển khai hệ thống sấy kết hợp ở quy mô công nghiệp (≥ 100 m³/m²) vẫn còn rất hạn chế, đặc biệt đối với các điều kiện khí hậu nhiệt đới và nhóm gỗ rừng trồng chủ lực như keo lai (*Acacia hybrid*) tại Đông Nam Á. Ngoài ra, lò sấy dạng vòm được đánh giá có hiệu suất thu nhiệt cao (Denig *et al.*, 2000; Luna *et al.*, 2018), song chúng thường gặp khó khăn trong cơ giới hóa khâu xếp - dỡ, làm tăng chi phí nhân công và giảm hiệu quả vận hành.

Bài viết này trình bày kết quả tính toán, thiết kế và thử nghiệm hệ thống sấy gỗ kết hợp (NLMT - hơi nước bão hòa) quy mô công nghiệp 100 m³/m² trong điều kiện sản xuất chế biến gỗ thực tế ở Việt Nam.

II. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Yêu cầu nhiệm vụ thiết kế

Hệ thống sấy gỗ kết hợp được thiết kế dựa trên các thông số kỹ thuật và điều kiện vận hành cụ thể tại khu vực Nam Trung Bộ, Việt Nam. Các yêu cầu được lựa chọn và giả thiết dưới đây đóng vai trò là dữ liệu đầu vào cho quá trình tính toán và mô phỏng thiết kế:

- Công suất sấy: 100 m³ gỗ xẻ/mẻ.
- Vật liệu sấy (đối tượng tính toán): Gỗ keo lai (Acacia hybrid).
- Độ ẩm gỗ sấy: Độ ẩm đầu vào (W_a) = 50 ± 3%; Độ ẩm mục tiêu (W_s) = 12 ± 2%.
- Điều kiện môi trường (Nam Trung Bộ): Cường độ bức xạ NLMT trung bình: 4,6 kWh/m²/ngày tương đương 3.956 kcal/m²/ngày (với 1 kWh = 3,6 × 10⁶ J = 860 kcal) (Ferrari, S. *et al.*, 2024; Ministry of Natural Resources and Environment (MONRE), 2022; TCVN 8930:2013). Nhiệt độ môi trường trung bình trong năm (T_{mt}): 28°C; Độ ẩm môi trường trung bình (ϕ_a): 80 %.
- Chế độ vận hành: Nhiệt độ buồng sấy mục tiêu: 50 - 60°C.
- Thời gian sấy tính toán: ~ 20 ngày/mẻ (tương đương với lò sấy hơi nước truyền thống).

2.2. Phương pháp nghiên cứu thiết kế

Phương pháp luận thiết kế được thực hiện theo quy trình kết hợp theo trình tự cụ thể sau:

(Yêu cầu thiết kế) → (Nghiên cứu tổng quan và Kế thừa) → (Tính toán lý thuyết: Cân bằng nhiệt, Khí động học) → (Thiết kế mô phỏng 2D/3D và Phân tích kết cấu) → (Xây dựng bản vẽ kỹ thuật) → (Chế tạo và Lắp đặt) → (Thử nghiệm, Phân tích kinh tế và Môi trường).

2.2.1. Phương pháp kế thừa và cải tiến

Nghiên cứu kế thừa nguyên lý của mô hình lò sấy NLMT dạng vòm quy mô 40 m³/mẻ của Viện Nghiên cứu Công nghiệp rừng. Trên cơ sở đó, thiết kế mới tập trung vào 3 cải tiến chính:

- (1) Lựa chọn vật liệu hấp thụ nhiệt có hiệu suất hấp thụ/tỏa nhiệt tốt hơn và đồng thời kết hợp thêm hệ thống cấp bù nhiệt bằng hơi nước bão hòa để chủ động kiểm soát các thông số kỹ thuật sấy.
- (2) Tối ưu hóa kết cấu khung vòm, hệ thống cấp khí/thoát ẩm và cơ cấu bên trong buồng sấy (hệ thống điều tiết hướng gió và giảm áp) để tăng hệ số sử dụng không gian xếp gỗ sấy cũng như tối ưu hóa quá trình tuần hoàn khí sấy và độ bền sử dụng của hệ thống thiết bị.

- (3) Thiết kế mới hệ thống cửa nâng thể mới đặt dọc bên hông lò sấy để cho phép cơ giới hóa hoàn toàn khâu ra vào gỗ sấy và tiết kiệm không gian lắp đặt/sử dụng.

2.2.2. Phương pháp tính toán lý thuyết

Phương pháp nghiên cứu chính là tính toán lý thuyết dựa trên các nguyên lý cơ bản về cân bằng vật chất, cân bằng năng lượng và truyền nhiệt - truyền chất trong kỹ thuật sấy.

a. Xác định lượng ẩm cần bay hơi:

- Tính khối lượng gỗ khô tuyệt đối (M_0):

$$M_0 = V_{g\ddot{o}} \times \rho_0$$

Trong đó: M_0 : Khối lượng gỗ khô (kg); $V_{g\ddot{o}}$: Thể tích gỗ trong lò (100 m³); ρ_0 : Khối lượng riêng cơ bản (630 kg/m³).

- Tính khối lượng nước cần bay hơi (M_n):

$$M_n = M_0 \times (W_v - W_r)$$

Trong đó: M_n : Tổng lượng nước cần tách ra khỏi gỗ (kg); W_v : Độ ẩm ban đầu (0,5). W_r : Độ ẩm cuối (0,12).

b. Xác định tổng nhiệt yêu cầu:

Tổng nhiệt lượng yêu cầu cho một mẻ sấy ($Q_{t\ddot{o}ng}$) được xác định bằng tổng các thành phần nhiệt:

$$Q_{t\ddot{o}ng} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

- Nhiệt làm nóng gỗ (Q_1):

$$Q_1 = M_0 \times C_{g\ddot{o}} \times (T_s - T_a)$$

Trong đó: $C_{g\ddot{o}}$: Nhiệt dung riêng của gỗ khô ($C_{g\ddot{o}} \approx 1,26$ kJ/kg. K); T_s, T_a : Nhiệt độ sấy và nhiệt độ môi trường (°C).

- Nhiệt làm nóng nước trong gỗ (Q_2):

$$Q_2 = (M_0 \times W_v) \times C_n \times (T_s - T_a)$$

Trong đó: C_n : Nhiệt dung riêng của nước ($C_n = 4,186$ kJ/kg. K).

- Nhiệt hóa hơi ẩm (Q_3):

$$Q_3 = M_n \times r_{s\ddot{a}y}$$

Trong đó: $r_{s\ddot{a}y}$ là ẩn nhiệt hóa hơi của nước trong gỗ (kJ/kg), bao gồm cả nhiệt liên kết do nước bị

hấp phụ trong mao quản gỗ. Giá trị này thường lớn hơn ẩn nhiệt hóa hơi của nước tự do và có thể xác định bằng thực nghiệm hoặc tính theo công thức của Siau. Ở 60°C, ẩn nhiệt hóa hơi của nước tự do ~2.357 kJ/kg và cộng thêm nhiệt liên kết (400 - 700 kJ/kg), ta có giá trị trung bình $r_{sáy} \approx 2.800 - 3.000$ kJ/kg (TCVN 8929:2013; World Bank, Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), 2019).

- Tồn thất nhiệt qua vỏ lò Q_4 :

$$Q_4 = U \times A_v \times (T_s - T_a) \times t_{sáy} \times 3.600$$

Trong đó: $t_{sáy}$ là thời gian sấy (giờ); A_v : Tổng diện tích bề mặt vỏ lò (m²). (Dự kiến thiết kế kết cấu hình vòm với lò 100 m³ có kích thước: 12,6 m dài × 12,0 m rộng × 5,1 m cao → $A_v \approx 336$ m²). U : Hệ số truyền nhiệt tổng thể của vỏ lò (W/m².K).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum \frac{d_j}{k_i} + \frac{1}{h_o}}$$

- Tồn thất nhiệt do thông gió (xả ẩm) Q_5 :

+ Lượng không khí khô cần cấp vào (L_{kk}) để mang M_n hơi nước đi:

$$L_{kk} = \frac{M_n}{x_2 - x_1}$$

(Với x_1, x_2 là hàm lượng ẩm của không khí môi trường và không khí thải ra từ lò, tính bằng kg nước/kg kk khô, xác định qua đồ thị không khí ẩm).

+ Nhiệt lượng tồn thất Q_5 :

$$Q_5 = L_{kk} \times C_{p, kk} \times (T_s - T_a)$$

(Với $C_{p, kk}$ là nhiệt dung riêng của không khí ẩm, $C_{p, kk} \approx 1,005 + 1,88 \times x_1$ kJ/kg.K)

- Nhiệt trung bình (P_{tb}):

$$P_1 = \frac{Q_{tổng}}{t_{sáy} \times 3.600} \text{ (kW)}$$

(Đây là công suất yêu cầu trung bình trong suốt thời gian sấy).

c. Tính toán kích thước hệ thống hấp thụ năng lượng mặt trời:

NLMT cung cấp phần lớn nhiệt lượng vào ban ngày, giảm tải cho lò hơi. Do đó, tính toán diện tích collector (bộ thu nhiệt) NLMT, cụ thể như sau: Năng lượng mặt trời hữu ích (Q_{NLMT}) thu được mỗi ngày:

$$Q_{NLMT/ngày} = I_T \times A_{coll} \times \eta_{coll}$$

Trong đó: $Q_{NLMT/ngày}$: Năng lượng thu được (kWh/ngày); I_T : Bức xạ mặt trời trung bình (4,6 kWh/m²/ngày); η_{coll} : Hiệu suất trung bình của tấm hấp thụ (theo datasheet của nhà sản xuất công bố, hiệu suất hấp thụ nhiệt của tấm hấp thụ nhiệt đạt $95 \pm 2\%$, để tính toán và do một phần năng lượng mặt trời giảm đi khi qua tấm polycarbonate, trong tính toán này chúng tôi lựa chọn hiệu suất hấp thụ thực tế đạt ~ 65% cho loại tấm phẳng); A_{coll} : Diện tích tấm hấp thụ (m²) → Đây là ẩn số cần xác định.

Xác định A_{coll} : Giả định NLMT cung cấp 100% công suất trung bình P_{tb} trong tối thiểu 8 giờ nắng hiệu dụng:

$$A_{coll} = \frac{P_{tb} \times 8 \text{ giờ}}{I_T \times \eta_{coll}}$$

(với hệ số f_{solar} - tỷ lệ NLMT đóng góp để tối ưu A_{coll}).

d. Tính toán thông số kỹ thuật của hệ thống hơi nước (nguồn nhiệt cấp bù):

Lò hơi phải đủ công suất để: (1) Bù đắp phần NLMT thiếu hụt; (2) Vận hành 100% công suất vào ban đêm hoặc ngày mưa; (3) Giai đoạn gia nhiệt ban đầu nhanh; (4) Đáp ứng yêu cầu phun ẩm cho lò sấy.

- Yêu cầu công suất ($P_{hơi}$): Thiết kế $P_{hơi}$ phải có khả năng đáp ứng ít nhất bằng công suất nhiệt trung bình P_{tb} ($P_{hơi} \geq P_{tb}$ (kW)).

- Xác định diện tích dàn nhiệt (Calorifer) (A_{cal}):

$$Q_{cal} = U_{cal} \times A_{cal} \times \Delta T_{ln}$$

Trong đó: Q_{cal} : Công suất trao đổi nhiệt, $Q_{cal} = P_{hơi}$ (kW); U_{cal} : Hệ số truyền nhiệt tổng thể của calorifer (tra cứu theo loại calorifer ống cánh);

ΔT_{ln} : Độ chênh lệch nhiệt độ trung bình logarit:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{hoi} - T_{kk,ra}) - (T_{hoi} - T_{kk,vào})}{\ln \left(\frac{T_{hoi} - T_{kk,ra}}{T_{hoi} - T_{kk,vào}} \right)}$$

(Với nhiệt độ hơi bão hòa ở 4 bar $\approx 143,6^{\circ}\text{C}$, và nhiệt độ không khí vào/ra dàn nhiệt).

- Công suất lò hơi (lưu lượng hơi M_{hoi}):

$$M_{hoi} = \frac{P_{hoi} \times 3600}{r_{hoi}}$$

Trong đó: M_{hoi} : Lưu lượng hơi (kg/giờ); r_{hoi} : Ẩn nhiệt ngưng tụ của hơi nước tại áp suất làm việc (kJ/kg).

e. *Tính toán khí động học và kết cấu:*

- Tính lưu lượng gió tuần hoàn (L):

+ Chọn tốc độ gió trung bình qua đống gỗ (v):

$$v \approx 1,5 - 2,5 \text{ m/s.}$$

+ Xác định diện tích tiết diện tự do cho gió đi qua (A_{free}) (dựa trên cách xếp gỗ và kích thước lò):

$$L = v \times A_{free} \text{ (m}^3\text{/s).}$$

- Tính toán và chọn quạt:

+ Tính tổng trở lực của lò ($\Delta P_{tổng}$):

$$\Delta P_{tổng} = \Delta P_{gỗ} + \Delta P_{calorifer} + \Delta P_{công}$$

(với $\Delta P_{gỗ}$ trở lực qua đống gỗ, $\Delta P_{calorifer}$ qua dàn nhiệt, và $\Delta P_{công}$ trở lực cục bộ).

+ Công suất quạt yêu cầu ($N_{quạt}$):

$$N_{quạt} = \frac{L \times \Delta P_{tổng}}{\eta_{quạt}}$$

(Với $\eta_{quạt}$ là hiệu suất quạt = 0,7 - 0,8).

2.2.3. Phương pháp thiết kế và mô phỏng kết cấu

- Phần mềm AutoCAD 2022 và SolidWorks 2015 được sử dụng để vẽ thiết kế, dựng mô

hình 2D/3D, mô phỏng lắp ghép và kiểm tra bền kết cấu.

- Điều kiện biên mô phỏng (FEA): Kết cấu khung chịu lực được phân tích dưới các tải trọng bất lợi nhất, bao gồm: (1) Tải trọng tĩnh (trọng lượng bản thân kết cấu, hệ thống thiết bị); và (2) Tải trọng gió (theo TCVN 2737: 2023) tại khu vực lắp đặt (Nam Trung Bộ).

2.2.4. Phương pháp thử nghiệm

Sau khi hệ thống được chế tạo và lắp đặt theo đúng bản vẽ thiết kế, một quy trình thử nghiệm thực tế được tiến hành để xác nhận tính đúng đắn của các giải pháp thiết kế và đánh giá hiệu suất vận hành.

- Vận hành thử nghiệm 01 mẻ sấy trên hệ thống sấy gỗ kết hợp NLMT - hơi nước.

- Ghi lại liên tục các thông số vận hành (nhiệt độ, độ ẩm buồng sấy, thời gian sấy).

- Đo lường và so sánh tổng tiêu thụ năng lượng (tiêu thụ sinh khối, điện) của hai hệ thống.

- Đánh giá chất lượng gỗ sau sấy (phân bố độ ẩm, tỷ lệ khuyết tật) theo các Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 13706: 2023 (Độ ẩm), TCVN 8929: 2013 và TCVN 8930: 2013 (Khuyết tật).

III. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả tính toán các thông số kỹ thuật

Dựa trên phương pháp luận tính toán cân bằng vật chất, cân bằng năng lượng và các giả thiết thiết kế, các thông số kỹ thuật cơ bản của lò sấy kết hợp công nghiệp công suất 100 m³/mẻ sử dụng năng lượng mặt trời kết hợp nguồn nhiệt bổ sung từ hơi nước bão hòa đã được xác định. Các thông số đầu vào chính được tổng hợp trong bảng 1.

Bảng 1. Các thông số vật liệu và lựa chọn thiết kế

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ghi chú
Vật liệu sấy		Gỗ keo		Acacia hybrid
Công suất tính toán thiết kế	$V_{gỗ}$	100	m ³	
Khối lượng riêng cơ bản	ρ_0	~630	kg/m ³	Gỗ khô tuyệt đối/Thể tích tươi
Độ ẩm vào	W_v	~50	%	0,5 kg nước/kg gỗ khô

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ghi chú
Độ ẩm ra	W_r	~12	%	0,12 kg nước/kg gỗ khô
Điều kiện sấy				
Thời gian sấy dự kiến	$t_{sấy}$	~20	ngày	Tương đương 480 giờ
Nhiệt độ sấy trung bình	T_s	60	°C	
Nhiệt độ môi trường	T_a	28	°C	
Độ ẩm môi trường	ϕ_a	~80	%	
Hằng số vật liệu				Tra cứu - lựa chọn
Nhiệt dung riêng gỗ khô	$C_{gỗ}$	1,26	kJ/kg.K	
Nhiệt dung riêng nước	C_n	4,186	kJ/kg.K	
Ẩn nhiệt hóa hơi	$r_{sấy}$	2.900	kJ/kg	

3.1.1. Kết quả tính toán cân bằng vật chất

- Khối lượng gỗ khô tuyệt đối (M_0):

$$M_0 = V_{gỗ} \times \rho_0 = 100 \text{ m}^3 \times 630 \text{ kg/m}^3 = 63.000 \text{ kg}$$

- Khối lượng nước cần bay hơi (M_n): Là tổng lượng ẩm cần tách ra khỏi 100 m³ gỗ trong suốt quá trình sấy.

$$M_n = M_0 \times (W_v - W_r) = 63.000 \text{ kg} \times (0,5 - 0,12) = 23.940 \text{ kg}$$

Một mẻ sấy 100 m³ gỗ keo từ độ ẩm 50% xuống 12% cần phải tách ra 23.940 kg nước.

3.1.2. Kết quả tính toán cân bằng năng lượng và công suất nhiệt

Tổng nhiệt lượng yêu cầu ($Q_{\text{tổng}}$) là tổng của các thành phần nhiệt hữu ích (làm nóng vật gỗ và hóa hơi nước) và các tổn thất (qua vỏ lò, thông gió).

- Nhiệt làm nóng gỗ:

$$Q_1 = M_0 \times C_{gỗ} \times (T_s - T_a) = 63.000 \times 1,26 \times (60 - 28) = 2.540.160 \text{ kJ}$$

- Nhiệt làm nóng nước có sẵn trong gỗ (Q_2):

$$Q_2 = (M_0 \times W_v) \times C_n \times (T_s - T_a) = (63.000 \times 0,5) \times 4,186 \times (60 - 28) = 4.219.488 \text{ kJ}$$

- Nhiệt hóa hơi ẩm (Q_3): Đây là thành phần tiêu tốn năng lượng lớn nhất.

$$Q_3 = M_n \times r_{sấy} = 23.940 \text{ kg} \times 2.900 \text{ kJ/kg} = 69.426.000 \text{ kJ}$$

- Tổn thất nhiệt qua vỏ lò (Q_4): Lò có kích thước (12,6 × 12 × 5,1 m) với tổng diện tích vỏ $A_v = 336 \text{ m}^2$ và hệ số truyền nhiệt $U \approx 0,546 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

$$Q_4 = U \times A_v \times (T_s - T_a) \times t_{sấy} = 0,546 \times 336 \times (60 - 28) \times (480 \times 3.600) \approx 10.144.383 \text{ kJ}$$

- Tổn thất nhiệt do thông gió xả ẩm (Q_5):

Tính toán dựa trên lượng không khí khô cần cấp $L_{kk} = 355.736 \text{ kg}$ (xác định từ đồ thị không khí ẩm với điều kiện T_a, ϕ_a và $T_s, \phi_s = 90 \%$).

$$Q_5 = L_{kk} \times C_{p, kk} \times (T_s - T_a) = 355.736 \times 1,0417 \times (60 - 28) = 11.852.727 \text{ kJ}$$

Tổng hợp các kết quả được trình bày trong bảng 2.

Bảng 2. Tổng hợp các thành phần năng lượng cho mẻ sấy 100 m³ (thời gian 480 giờ)

Thành phần nhiệt	Ký hiệu	Giá trị (kJ)	Tỷ trọng (%)
Nhiệt làm nóng gỗ	Q_1	2.540.160	2,59
Nhiệt làm nóng nước	Q_2	4.219.488	4,30
Nhiệt hóa hơi ẩm	Q_3	69.426.000	70,71
Tổn thất qua vỏ lò	Q_4	10.144.383	10,34
Tổn thất do thông gió	Q_5	11.852.727	12,07
Tổng năng lượng yêu cầu	$Q_{\text{tổng}}$	98.182.758	100 %

Công suất nhiệt trung bình (P_{tb}): Từ tổng năng lượng yêu cầu, công suất nhiệt trung bình cần cung cấp liên tục trong 480 giờ là:

$$P_{tb} = \frac{Q_{\text{tổng}}}{t_{\text{sấy}} \times 3.600} = \frac{98.182.758 \text{ kJ}}{480 \text{ h} \times 3.600 \text{ s/h}} \approx 56,8 \text{ kW}$$

3.1.3. Kết quả tính toán thiết kế hệ thống năng lượng mặt trời (Collector)

Hệ thống NLMT được thiết kế để cung cấp một phần đáng kể tổng nhiệt lượng, giảm tải cho lò hơi. Giả thiết tỷ lệ đóng góp của NLMT (f_{solar}) là ~50% tổng nhu cầu năng lượng.

- Năng lượng yêu cầu (1 ngày): $56,8 \text{ kW} \times 24 \text{ h} = 1.363,2 \text{ kWh}$.

- Năng lượng NLMT cần cung cấp: $1.363,2 \text{ kWh} \times 50\% = 681,6 \text{ kWh/ngày}$.

- Giả thiết bức xạ trung bình tại khu vực đặt lò sấy $I_T = 4,6 \text{ kWh/m}^2/\text{ngày}$ và hiệu suất collector $\eta_{\text{coll}} = 65\%$.

- Năng lượng thu được trên 1 m²: $4,6 \text{ kWh/m}^2/\text{ngày} \times 0,65 = 2,99 \text{ kWh/m}^2/\text{ngày}$.

- Diện tích collector (A_{coll}):

$$A_{\text{coll}} = \frac{\text{Năng lượng NLMT cần}}{\text{Năng lượng thu/m}^2} = \frac{681,6 \text{ kWh/ngày}}{2,99 \text{ kWh/m}^2/\text{ngày}} \approx 230 \text{ m}^2$$

Bảng 3. Thông số kỹ thuật tính toán của hệ thống sấy gỗ kết hợp NLMT

Thông số	Giá trị	Đơn vị	Ghi chú
Loại collector	Tấm phẳng		Tối ưu cho nhiệt độ sấy (50 - 60°C)
Tổng diện tích collector yêu cầu	A_{coll}	≥ 230	m ²
Tỷ lệ đóng góp năng lượng dự kiến	f_{solar}	~ 50	%
Bức xạ trung bình	I_T	~ 4,6	kWh/m ² /ngày
Hiệu suất collector	η_{coll}	~ 65	%

3.1.4. Kết quả tính toán thiết kế hệ thống hơi nước (Bù nhiệt)

Hệ thống hơi nước được thiết kế để bù đắp phần năng lượng NLMT không cung cấp đủ, đặc biệt là vào ban đêm, ngày mưa và giai đoạn gia nhiệt, phun ẩm.

- Công suất dàn nhiệt ($P_{\text{hơi}}$): Phải đảm bảo cung cấp đủ công suất nhiệt trung bình P_{tb} . Chọn $P_{\text{hơi}} = 56,8 \text{ kW}$.

- Diện tích dàn nhiệt (A_{cal}): Tính toán với hơi

bão hòa ở 4 bar ($T_{\text{hơi}} = 143,6 \text{ °C}$), $\Delta T_{\text{ln}} \approx 83,5 \text{ °C}$ và $U_{\text{cal}} \approx 30 \text{ W/m}^2.\text{K}$.

$$A_{\text{Cal}} = \frac{P_{\text{hơi}}}{U_{\text{cal}} \times \Delta T_{\text{ln}}} = \frac{56.800 \text{ W}}{30 \times 83,5} \approx 23 \text{ m}^2$$

- Công suất lò hơi ($M_{\text{hơi}}$): Tính toán lưu lượng hơi yêu cầu, với $r_{\text{hơi}} \approx 2.133 \text{ kJ/kg}$ (tại 4 bar).

$$M_{\text{hơi}} = \frac{P_{\text{hơi}} \times 3600}{r_{\text{hơi}}} = \frac{56,8 \times 3.600}{2.133} \approx 96 \text{ kg/giờ}$$

Bảng 4. Thông số kỹ thuật yêu cầu hệ thống hơi nước bão hòa cấp bù nhiệt

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ghi chú
Công suất dàn nhiệt	$P_{\text{hơi}}$	~ 56,8	kW	Tối thiểu bằng P_{tb}
Diện tích trao đổi nhiệt	A_{cal}	≥ 23	m ²	Dàn nhiệt (calorifer) ống cánh
Công suất lò hơi	$M_{\text{hơi}}$	≥ 100	kg/giờ	Chọn làm tròn lên 100 kg/giờ
Áp suất hơi làm việc		~ 4	bar	

3.1.5. Kết quả thiết kế hệ thống tuần hoàn không khí

Hệ thống tuần hoàn không khí (quạt) có vai trò then chốt trong việc vận chuyển nhiệt

lượng (từ collector và dàn hơi) đến bề mặt gỗ và mang hơi ẩm thoát ra ngoài. Thiết kế được thực hiện dựa trên phương pháp tính toán khí động học.

a. *Xác định lưu lượng tác nhân sấy (L):* Với yêu cầu thiết kế lò sấy là loại đảo chiều gió, thổi ngang qua đồng gỗ.

- Kích thước mặt đồng gỗ (tiết diện): $A_{\text{face}} = (12 \text{ m dài} \times 3,6 \text{ m cao}) \times 2 \text{ chõng} \approx 86 \text{ m}^2$.

- Chọn tốc độ gió trung bình qua mặt đồng gỗ: $v = 1,5 \text{ m/s}$ (đảm bảo sấy đồng đều).

- Lưu lượng gió yêu cầu: $L = v \times A_{\text{face}} = 1,5 \text{ m/s} \times 86 \text{ m}^2 = 129 \text{ m}^3/\text{s}$

$$L = 129 \times 3.600 = 464.400 \text{ m}^3/\text{h}$$

b. *Xác định trở lực khí động ($\Delta P_{\text{tổng}}$):* Tổn thất áp suất được ước tính dựa trên dữ liệu thực nghiệm cho các lò sấy tương tự, chọn:

- Tổn thất qua đồng gỗ $\Delta P_{\text{gỗ}} \approx 100 \text{ Pa}$ (thực nghiệm cho lò sấy gỗ công nghiệp $\Delta P_{\text{gỗ}} \approx 100 - 300 \text{ Pa}$ ở vận tốc thiết kế $v = 1 - 3 \text{ m/s}$).

- Tổn thất qua dàn nhiệt (calorifer): $\Delta P_{\text{calorifer}} \approx 10 \text{ Pa}$

- Tổn thất cục bộ (đảo chiều): $\Delta P_{\text{công}} \approx 20 \text{ Pa}$ (Tra bảng hệ số cục bộ (ξ) cho từng phụ kiện (co, cút, van) và tính $\sum \xi \frac{\rho v^2}{2}$ thường $\approx 20 - 100 \text{ Pa}$).

Tổng trở lực:

$$\Delta P_{\text{tổng}} = \Delta P_{\text{gỗ}} + \Delta P_{\text{calorifer}} + \Delta P_{\text{công}} = 130 \text{ Pa}$$

c. *Tính toán và lựa chọn quạt:*

Công suất động cơ quạt yêu cầu (Chọn $\eta_{\text{quạt}} = 75\%$):

$$N_{\text{quạt}} = \frac{L \times \Delta P_{\text{tổng}}}{\eta_{\text{quạt}}} = \frac{129 \text{ m}^3/\text{s} \times 130 \text{ Pa}}{0,75} = 22.360 \text{ W} = 22,3 \text{ kW}$$

Để đảm bảo độ đồng đều trên chiều dài 12 m, ta chọn 10 quạt hướng trục, có khả năng đảo chiều. Thông số kỹ thuật của hệ thống quạt được trình bày trong bảng 5.

Bảng 5. Thông số kỹ thuật dự kiến hệ thống quạt tuần hoàn

Thông số	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị	Ghi chú
Loại quạt		Hướng trục, đảo chiều		Chịu nhiệt độ cao, chịu ẩm, đường kính cánh D800
Số lượng		10	cái	Bố trí dọc theo trần lò
Tổng lưu lượng	L	464.400	m^3/h	
Lưu lượng (mỗi quạt)	L_{fan}	46.440	m^3/h	
Cột áp tĩnh	$\Delta P_{\text{tổng}}$	≥ 130	Pa	
Công suất điện mỗi quạt	N_{fan}	$\geq 2,2$	kW	Chọn động cơ 2,2 kW (tiết kiệm năng lượng)
Tổng công suất điện quạt	$N_{\text{tổng}}$	≥ 22	kW	

3.2. Kết quả thiết kế kết cấu lò sấy

Dựa trên các thông số kỹ thuật đã tính toán tại mục 3.1, kết cấu tổng thể của hệ thống lò sấy 100 m^3 được thiết kế.

3.2.1. Thiết kế vỏ lò (buồng sấy)

- Vỏ lò là yếu tố then chốt để duy trì nhiệt độ và giảm tổn thất Q_4 .

Kích thước: 12,6 m (dài) \times 12,0 m (rộng) \times 5,1 m (cao).

Kết cấu: Dạng modul panel lắp ghép công nghiệp.

- Vật liệu:

Khung vách trong: thép mạ kẽm sơn chống gỉ, tôn sóng tạo độ cứng cho khung dạng vòm (chịu được môi trường axit yếu từ gỗ và độ ẩm cao).

Lớp cách nhiệt: Rockwool (bông khoáng) tỷ trọng cao, độ dày 50 mm, đảm bảo hệ số truyền nhiệt thấp như đã tính toán.

Vỏ ngoài: Toàn bộ mái vòm cong dùng vật liệu polycarbonate dày 10 mm chịu nhiệt, cách nhiệt và xuyên sáng tốt, tiếp giáp giữa các tấm poly

được kết nối nẹp nhôm phù hợp và làm kín khí bằng gioăng cao su và silicon.

Cửa lò: Sử dụng cửa chính dạng cửa nâng trợ lực, được thiết kế theo nguyên lý cửa mở cốp xe ô tô, với hệ thống gioăng cao su chịu nhiệt, đảm bảo độ kín khí.

3.2.2. Bố trí tổng thể hệ thống

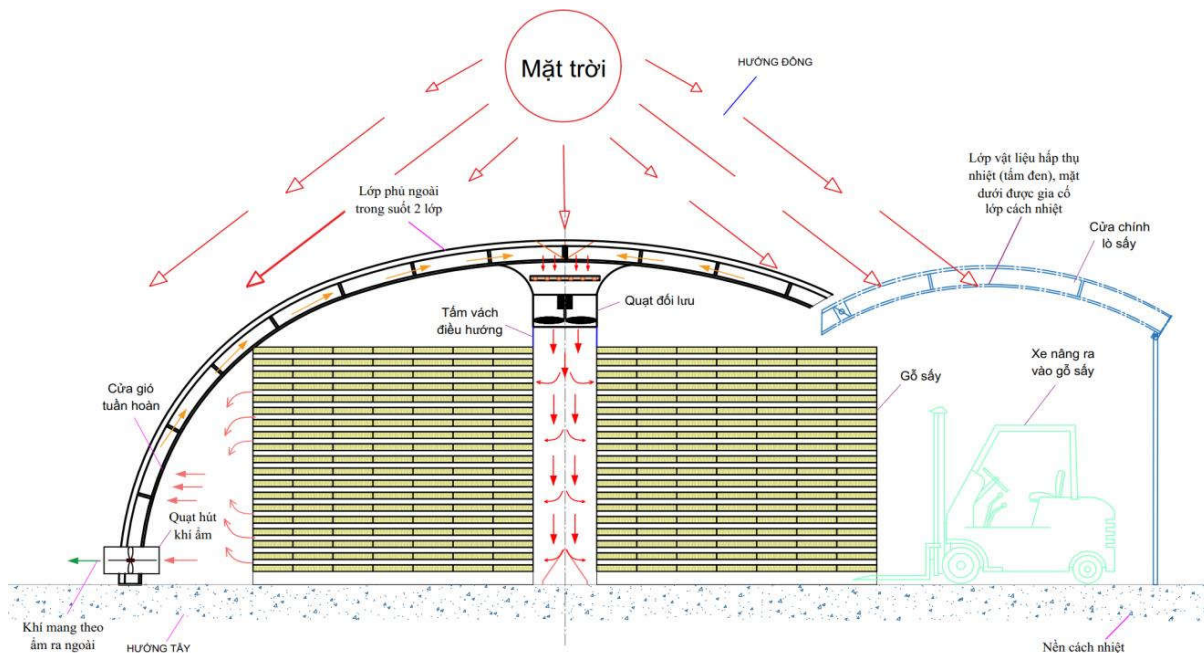
Sơ đồ nguyên lý tổng thể của hệ thống sấy hybrid được trình bày tại hình 1, và bản vẽ mô phỏng 3D hệ thống thiết bị sấy kết hợp được thể hiện tại hình 2.

- Hệ thống collector $\geq 230 \text{ m}^2$ (bảng 3) gia nhiệt trực tiếp khí sấy.
- Hệ thống bù nhiệt hơi nước bão hòa: Lò hơi tối thiểu công suất cấp hơi $\geq 100 \text{ kg/giờ}$ (bảng 4) cung cấp hơi 4 bar.

- Vòng khí lò sấy: Không khí trong lò được 10 quạt (bảng 5) đẩy tuần hoàn qua dàn nhiệt hơi ($\geq 23 \text{ m}^2$) và đóng gỗ.

- Hệ thống NLMT cung cấp nhiệt chính và trực tiếp cho khí bên trong lò sấy và khi nhiệt độ trong buồng sấy giảm thấp hơn nhiệt độ cài đặt 5°C trong thời gian 20 phút liên tục thì hệ thống hơi sẽ được kích hoạt cấp nhiệt bổ sung để đảm bảo nhiệt độ sấy luôn được duy trì ổn định theo cài đặt.

- Hệ thống điều khiển tự động sử dụng bộ điều khiển trung tâm PID/Helios-2 được thiết kế mạch động lực thông minh kết hợp có khả năng điều khiển và sử dụng đồng thời hai nguồn nhiệt NLMT - hơi nước bão hòa trong suốt quá trình sấy.

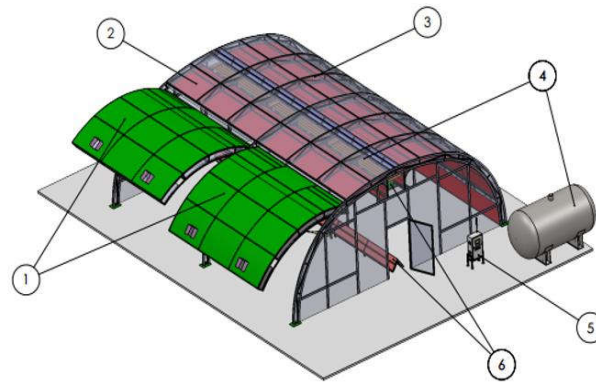


Hình 1. Sơ đồ nguyên lý cấu tạo của hệ thống sấy kết hợp công nghiệp

- Hệ thống phun ẩm (sử dụng hơi nước bão hòa) và hệ thống xả ẩm (cửa vent) được bố trí để kiểm soát độ ẩm trong lò.
- Quạt đối lưu: 10 quạt (từ bảng 5) được lắp phía trên trần buồng sấy, hút và đẩy khí sấy tạo thành hai vòng tuần hoàn nhiệt qua 2 chong gỗ.
- Dàn nhiệt (Calorifer): Dàn calorifer hơi $\geq 23 \text{ m}^2$ (từ bảng 4) được bố trí dọc theo chiều dài và

phía trên dàn quạt để không khí đi qua trước/sau khi vào đóng gỗ.

- Cánh hướng gió: Được bố trí ở phía trên và dưới để hướng luồng khí sấy đi liên tục, không bị đổi hướng đột ngột làm giảm áp suất tĩnh trong lò và tác động ngược lại cánh quạt giúp tăng tuổi thọ sử dụng.



Hình 2. Bản vẽ mô phỏng tổng thể lò sấy gỗ kết hợp quy mô công nghiệp công suất 100 m³/mê

Ghi chú: 1- Cửa nâng trọng lực thể hệ mới thuận tiện cho việc cơ giới hóa khâu ra/vào gỗ sấy; 2- Bộ phận hấp thụ và vỏ lò cách nhiệt; 3- Khung chính lò sấy và cấp nhiệt bù hơi nước bão hòa; 4- Hệ thống cấp bù nhiệt hơi nước; 5- Hệ thống điều khiển sấy hai nguồn nhiệt; 6- Bộ phận điều hướng gió tuần hoàn trên/dưới.

- Hệ thống xả ẩm: Bố trí các cửa xả ẩm chủ động được thiết kế cân bằng dọc hai bên hông lò và cửa hút khí tươi ở hai mặt bên.

3.3. Thử nghiệm hoạt động của hệ thống thiết bị sấy gỗ kết hợp

Sau khi hệ thống sấy được chế tạo và lắp đặt tại Công ty CP Chế biến Gỗ nội thất Thành Tâm

(hình 3), toàn bộ hệ thống thiết bị được kiểm tra an toàn, vận hành không tải và hiệu chỉnh tự động hóa trước khi tiến hành thử nghiệm. Một mẻ sấy thực nghiệm đã được thực hiện nhằm đánh giá hiệu suất vận hành, tính ổn định và chất lượng sản phẩm đầu ra. Thông số kỹ thuật chung của hệ thống thiết bị sấy kết hợp sau khi chế tạo lắp đặt được thể hiện trong bảng 6:

Bảng 6. Thông số kỹ thuật chung của hệ thống thiết bị sấy sau lắp đặt

Đặc tính kỹ thuật	Công suất sấy/mê (m ³)	Kích thước lò sấy (m)	Tổng công suất hệ thống (kW)	Số lượng quạt đối lưu (quạt)	Số lượng quạt hút (quạt)	Hệ thống cấp bù nhiệt	Diện tích hấp thụ thực tế (m ²)
Thông số	≥ 100	12,6 × 12 × 5,1	23	10	7	Hơi nước bão hòa	> 230

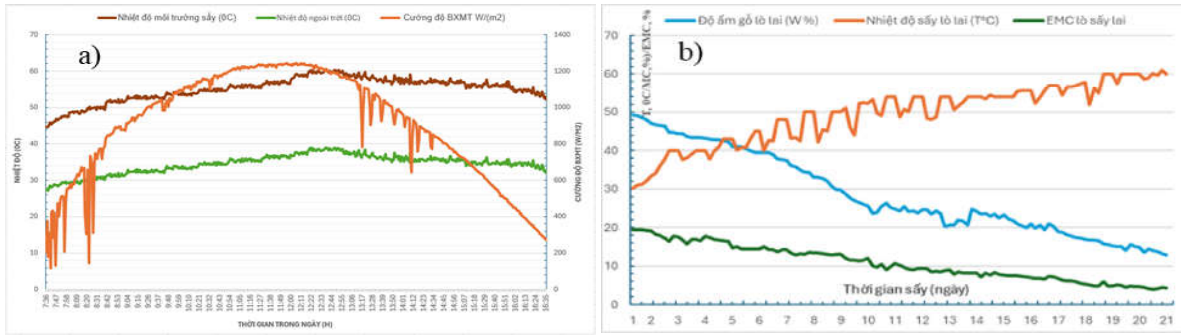


Hình 3. Mô hình hệ thống thiết bị sấy được lắp đặt tại Công ty CP Chế biến gỗ nội thất Thành Tâm

Mẻ sấy thử nghiệm sử dụng 90 m³ gỗ keo lai (Acacia hybrid) có chiều dày 13 mm, độ ẩm ban đầu trung bình ~ 50%.

3.3.1. Đánh giá hiệu năng của hệ thống thu nhiệt NLMT

Hiệu suất của hệ thống gia nhiệt NLMT là yếu tố then chốt quyết định khả năng tiết kiệm năng lượng của mô hình sấy kết hợp.



Hình 4. Biểu đồ thể hiện mối quan hệ giữa Cường độ bức xạ mặt trời (W/m^2), Nhiệt độ môi trường ($^{\circ}C$) và Nhiệt độ không khí sấy tại đầu ra bộ thu nhiệt ($^{\circ}C$) theo thời gian trong ngày.

a: biểu đồ môi trường sấy; b: đường cong sấy mẻ sấy thử nghiệm

Kết quả đo trong một ngày nắng điển hình (ngày thứ hai của mẻ sấy, hình 4a) cho thấy:

Cường độ bức xạ mặt trời (BXMT) đạt cực đại $1.245 W/m^2$ vào lúc 11:55.

Nhiệt độ buồng sấy tăng tỷ lệ thuận với BXMT, đạt $60,26^{\circ}C$ tại thời điểm cực đại, cao hơn nhiệt độ môi trường ngoài trời $21,35^{\circ}C$.

Trong suốt giai đoạn từ 8:00 đến 16:30, nhiệt độ trong buồng sấy duy trì ổn định trong dải $50 - 60^{\circ}C$, không cần kích hoạt nguồn nhiệt hơi nước bổ sung.

Phân tích dữ liệu năng lượng cho thấy, với diện tích collector $> 230 m^2$, hệ thống thu nhiệt hoạt động ổn định, đạt hiệu suất trung bình ngày khoảng $60 - 65\%$ (tính trong thời gian có nắng), tương đương với các bộ thu nhiệt phẳng hiệu suất cao được công bố trong các nghiên cứu trước đây (Bektas, I., Bektas, C., 2005; Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 2019). Kết quả này chứng minh khả năng khai thác bức xạ mặt trời hiệu quả tại khu vực miền Trung Việt Nam (trung bình $4,8 - 5,2 kWh/m^2 \cdot \text{ngày}$) để phục vụ sấy gỗ công nghiệp quy mô lớn.

3.3.2. Đánh giá quá trình sấy và chất lượng gỗ sấy

Trong quá trình thử nghiệm, hệ thống hoạt động ổn định và đảm bảo duy trì nhiệt độ sấy theo chương trình cài đặt ($50 - 60^{\circ}C$). Hệ thống điều khiển kết hợp vận hành theo chế độ ưu tiên sử dụng nguồn NLMT, chỉ tự động kích hoạt cấp bù hơi nước khi nhiệt độ buồng sấy giảm hơn $5^{\circ}C$ so với ngưỡng cài đặt trong thời gian trên 20 phút. Nhờ đó, quá trình sấy được duy trì liên tục nhưng vẫn tối ưu hóa tiêu thụ năng lượng.

Thời gian sấy thực tế của mẻ thử nghiệm là ≈ 20 ngày, phù hợp với chu kỳ thiết kế dự kiến và tính toán lý thuyết. Quá trình sấy không xảy ra dao động nhiệt độ lớn, chứng tỏ khả năng phối hợp giữa nguồn NLMT và hơi nước bão hòa được điều khiển hiệu quả.

Kết quả kiểm tra chất lượng sau sấy (bảng 7) cho thấy:

- Gỗ đạt độ ẩm trung bình cuối cùng $12 \pm 0,5\%$;
- Tỷ lệ nứt bề mặt $2,8\%$, nứt tâm $1,0\%$, biến dạng cong vênh $< 2\%$.

Các chỉ tiêu này đạt yêu cầu kỹ thuật cho gỗ xẻ dùng trong sản xuất đồ gỗ xuất khẩu, chứng minh rằng hệ thống kết hợp đảm bảo chất lượng sản phẩm và tính ổn định trong vận hành.

Bảng 7. Đánh giá chất lượng gỗ sau sấy khảo của hệ thống

Loại khuyết	Đơn vị	Hệ thống kết hợp (Thực nghiệm)
Nứt bề mặt	% số thanh bị lỗi	2,8 %
Nứt tâm	% số thanh bị lỗi	1,0 %
Cong vênh (độ võng trung bình)	mm	2,2

Nhìn chung, quá trình thử nghiệm khẳng định độ tin cậy của thiết kế và tính khả thi ứng dụng công nghiệp của lò sấy gỗ kết hợp NLMT - hơi nước, đồng thời cung cấp dữ liệu thực tế để hoàn thiện mô hình và tính toán hiệu suất năng lượng tổng thể trong các nghiên cứu tiếp theo.

IV. KẾT LUẬN

Từ kết quả tính toán, thiết kế, chế tạo và thử nghiệm hệ thống lò sấy gỗ kết hợp NLMT - hơi nước bão hòa quy mô công nghiệp 100 m³/mẻ có thể rút ra một số kết luận sau:

- *Nhu cầu và cân bằng năng lượng:* Tổng nhu cầu năng lượng cho một mẻ sấy 100 m³ gỗ keo lai (chu kỳ ≤ 21 ngày) được tính toán ~98,1 GJ, tương đương ~56,8 kW công suất nhiệt trung bình liên tục. Các thành phần năng lượng chính bao gồm: năng lượng hóa hơi ẩm chiếm khoảng 70%, năng lượng gia nhiệt vật liệu ~7%, tổn thất qua vỏ lò và thông gió chiếm ~23%.

- *Thiết kế hệ thống cấp nhiệt hybrid:* Hệ thống thu năng lượng mặt trời được thiết kế với diện tích tấm hấp thụ ≥ 230 m², hiệu suất hấp thụ trung bình ban ngày đạt hơn 60%, đảm bảo cung cấp cơ bản đủ nhu cầu nhiệt cho mẻ sấy trong thời gian có nắng. Hệ thống hơi nước bão hòa được tính toán để cấp bù năng lượng khi không có nắng, ban đêm,... yêu cầu lò hơi công suất tối

thiểu 100 kg/h tại 4 bar và dàn trao đổi nhiệt diện tích ≥ 23 m².

- *Thiết kế khí động học và quạt tuần hoàn:* Hệ thống tuần hoàn khí nóng sử dụng 10 quạt hướng trục tổng công suất ≥ 22 kW, tạo lưu lượng 464.400 m³/h tại cột áp 130 Pa, đảm bảo vận tốc không khí trung bình 1,5 m/s xuyên qua đồng gỗ, phù hợp với yêu cầu sấy gỗ dày trung bình.

- *Kết quả thử nghiệm vận hành:* Hệ thống được lắp đặt, vận hành thử nghiệm ổn định; nhiệt độ sấy duy trì trong dải 50 - 60°C, độ ẩm cuối đạt 12 ± 0,5%, tỷ lệ khuyết tật dưới 5%. Thiết bị và công nghệ sấy gỗ kết hợp có khả năng vận hành ổn định, tự động hóa tốt và tiết kiệm 35 - 40% nhu cầu năng lượng so với lò sấy hơi nước truyền thống, trong khi đó vẫn bảo đảm chất lượng gỗ đầu ra đạt tiêu chuẩn sản xuất công nghiệp.

Kết quả nghiên cứu đã chứng minh rằng hệ thống sấy gỗ kết hợp NLMT - hơi nước có thể cân bằng tối ưu giữa hiệu quả năng lượng và tính ổn định của quá trình sấy, góp phần giảm chi phí vận hành, tận dụng nguồn năng lượng tái tạo, và phù hợp định hướng phát triển kinh tế tuần hoàn và công nghiệp carbon thấp trong lĩnh vực chế biến gỗ Việt Nam.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Bektas, I., Bektas, C., 2005. Fundamental aspects of kiln drying lumber (FAPC-151). Oklahoma State University Extension.
2. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 2019. The International System of Units (SI Brochure) (9th ed.). Paris: BIPM.
3. Boone, R. S., Wengert, E. M., & Denig, J., 1999. Drying hardwood lumber (Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-118). USDA Forest Products Laboratory.
4. Çengel, Y. A., & Boles, M. A., 2019. Thermodynamics: An engineering approach (9th ed.). McGraw-Hill Education.
5. Chen, Q., Zhou, X., & Xu, Z., 2022. Techno-economic analysis of a solar-assisted heat pump drying system for industrial applications. Applied Thermal Engineering, 205, 118015.
6. Denig, J., Wengert, E. M., & Simpson, W. T., 2000. Drying hardwood lumber (FPL-GTR-118). U.S. Department of Agriculture, Forest Service. DOI: 10.2737/FPL-GTR-118
7. Duffie, J. A., & Beckman, W. A., 2013. Solar engineering of thermal processes (4th ed.). John Wiley & Sons. DOI: 10.1002/9781118671603
8. El-Sebaei, A. A., & Shalaby, S. M., 2021. Thermal performance of a solar dryer with a thermal energy storage system: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 149, 111394.

9. Ferrari, S., Cuccui, I., Cerutti, P., Allegretti, O. 2024. A hybrid solar/biomass active indirect kiln dryer for timber in the Democratic Republic of Congo. *International Journal of Ambient Energy*, 45(1), Article 2367109. DOI: 10.1080/01430750.2024.2367109
10. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)., 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
11. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)., 2019. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
12. ISO., 1992. ISO 31-4:1992 - Quantities and units - Part 4: Heat. Geneva: ISO.
13. Lamrani, B., Draoui, A., Kuznik, F., 2021a. Thermal performance and environmental assessment of a hybrid solar-electrical wood dryer integrated with photovoltaic/thermal air collector and heat recovery. *Solar Energy*, 221, 60 - 74.
14. Lamrani, B., Kuznik, F., Ajbar, A., Boumaza, M., 2021b. Energy analysis and economic feasibility of wood dryers integrated with heat recovery unit and solar air heaters. *Energy*, 228, 120598.
15. Luna, L. M., Allegretti, O., Cerutti, P., Cuccui, I., 2018. Performance evaluation of a solar timber kiln: A case study. *Energy for Sustainable Development*, 44, 58 - 66.
16. Ministry of Natural Resources and Environment (MONRE)., 2022. National GHG inventory and emission factors of Vietnam. Hanoi: MONRE.
17. Ndukwu, M. C., Abesinghe, A., Uzoejinwa, B. B., 2020. Solar drying of food and agricultural products: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109787.
18. Ngọc, B. D., 2022. Thiết kế chế tạo hệ thống thiết bị sấy gỗ xẻ rừng trồng bằng năng lượng mặt trời. *Tạp chí Khoa học Lâm nghiệp*, (1), 112 - 119.
19. Nguyễn Xuân Trung, Đinh Vương Hùng, 2014. Thiết bị sấy nông sản bằng năng lượng mặt trời tại Việt Nam. *Tạp chí Khoa học và Phát triển*, 12(8), 1148 - 156.
20. TCVN 13706:2023. Gỗ sấy - Phân hạng theo mức chênh lệch độ ẩm.
21. TCVN 2737:2023. Tải trọng và tác động - Tiêu chuẩn thiết kế.
22. TCVN 8929:2013 (ISO 4474:1989). Gỗ khúc cây lá kim và cây lá rộng để xẻ - Khuyết tật nhìn thấy được - Thuật ngữ và định nghĩa.
23. TCVN 8930:2013 (ISO 4473:1988). Gỗ khúc cây lá kim và cây lá rộng để xẻ - Khuyết tật nhìn thấy được - Phân loại.
24. World Bank, Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP), 2019. Global Solar Atlas 2.0: Technical report. Washington, DC: World Bank.

Email tác giả liên hệ: giaptn85@gmail.com

Ngày nhận bài: 26/10/2025

Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 31/10/2025; 09/11/2025

Ngày duyệt đăng: 17/11/2025