

# ĐÁNH GIÁ HIỆU QUẢ CỦA HỆ THỐNG GIA NHIỆT BẰNG NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI CHO QUY TRÌNH XỬ LÝ TRÁI CÂY XUẤT KHẨU BẰNG HƠI NƯỚC NÓNG (VHT) TẠI VIỆT NAM

## PERFORMANCE ASSESSMENT OF A SOLAR THERMAL HEATING SYSTEM FOR THE VAPOR HEAT TREATMENT (VHT) PROCESS OF EXPORT FRUITS IN VIETNAM

VĂNG MINH KHOA<sup>1,a</sup>, TS. TRẦN HỮU DANH<sup>2</sup>, TS. ĐỖ CHÍ PHI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Trường Cao Đẳng Nghề An Giang

<sup>2</sup>Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

<sup>3</sup>Trường Cao đẳng kỹ thuật Cao Thắng

<sup>a</sup>Tác giả liên hệ: [avangminhkhoea@agvc.edu.vn](mailto:avangminhkhoea@agvc.edu.vn)

**Nhận bài(Received): 3/10/2025; Phản biện (Reviewed): 24/10/2025; Chấp nhận (Accepted): 5/11/2025**

### TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày một đánh giá toàn diện về hiệu quả kỹ thuật, kinh tế và môi trường của việc ứng dụng hệ thống gia nhiệt nước bằng năng lượng mặt trời (sử dụng bộ thu tấm phẳng) cho quy trình xử lý hơi nước nóng (VHT) trái cây xuất khẩu. Hệ thống với diện tích thu nhiệt 155 m<sup>2</sup> được thiết kế, lắp đặt và vận hành thực tế tại Việt Nam. Kết quả cho thấy hệ thống đáp ứng đủ nhu cầu nhiệt 53.34 kWh cho mỗi mẻ xử lý 10 tấn trái cây, với sản lượng nhiệt trung bình đạt 473.1 kWh/ngày. Phân tích hồi quy từ dữ liệu thực nghiệm xác định cường độ bức xạ mặt trời là yếu tố ảnh hưởng chính đến hiệu suất, với hệ số xác định  $R^2 = 94.92\%$ . Về kinh tế, thời gian hoàn vốn đầu tư được tính toán là 3.8 năm. Về môi trường, hệ thống góp phần giảm phát thải 320 kg CO<sub>2</sub>/ngày. Kết quả nghiên cứu khẳng định đây là một giải pháp khả thi và bền vững, góp phần nâng cao năng lực cạnh tranh cho ngành trái cây xuất khẩu của Việt Nam.

**Từ khóa:** Năng lượng nhiệt mặt trời, Xử lý hơi nước nóng, Gia nhiệt nước bằng năng lượng mặt trời.

### ABSTRACT

*This study presents a comprehensive assessment of the technical, economic, and environmental performance of applying a solar water heating system (using flat plate collectors) for the Vapor Heat Treatment (VHT) process of export fruits. A system with a collector area of 155 m<sup>2</sup> was designed, installed, and operated under real conditions in Vietnam. Results demonstrate that the system sufficiently meets the thermal energy demand of 53.34 kWh per batch for processing 10 tons of fruit, with an average daily heat yield of 473.1 kWh. Regression analysis of experimental data identified solar irradiance as the predominant factor affecting system performance, with a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 94.92%. Economically, the calculated payback period is 3.8 years. Environmentally, the system contributes to a reduction of 320 kg of CO<sub>2</sub> emissions per day. The findings confirm that this integrated solution is technically feasible, economically viable, and environmentally sustainable, offering significant potential to enhance the competitiveness of Vietnam's fruit export industry.*

**Keywords:** Solar thermal energy, Vapor heat treatment (VHT), Solar water heating, Agricultural processing, Sustainable technology.

## 1. GIỚI THIỆU

Ngành sản xuất và chế biến trái cây đóng vai trò quan trọng trong nền kinh tế Việt Nam, với kim ngạch xuất khẩu không ngừng tăng trưởng. Để đáp ứng các tiêu chuẩn kiểm dịch thực vật khắt khe của các thị trường nhập khẩu như Hoa Kỳ, EU hay Nhật Bản, việc ứng dụng các công nghệ sau thu hoạch tiên tiến là yếu tố then chốt [1]. Trong đó, công nghệ xử lý bằng hơi nước nóng (Vapor Heat Treatment - VHT) nổi lên như một giải pháp hiệu quả để kiểm soát côn trùng gây hại mà vẫn đảm bảo chất lượng sản phẩm [2].

Tuy nhiên, một thách thức lớn của quy trình VHT là mức tiêu thụ năng lượng đáng kể, chủ yếu dựa vào các nguồn nhiên liệu hóa thạch hoặc điện lưới [3]. Điều này không chỉ làm gia tăng chi phí sản xuất, ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng cạnh tranh, mà còn góp phần vào lượng phát thải khí nhà kính, trái với xu hướng phát triển nông nghiệp xanh và bền vững [4]. Trong bối cảnh đó, việc tìm kiếm các nguồn năng lượng tái tạo để thay thế một phần hoặc toàn bộ năng lượng cho quá trình gia nhiệt trở nên cấp thiết.

Việt Nam được đánh giá là quốc gia có tiềm năng năng lượng mặt trời dồi dào, đặc biệt là các khu vực phía Nam - nơi tập trung nhiều vùng trồng trái cây trọng điểm, với cường độ bức xạ mặt trời trung bình năm dao động từ 4.3 đến 4.9 kWh/m<sup>2</sup>/ngày [5]. Tiềm năng này tạo cơ hội lớn cho việc ứng dụng năng lượng mặt trời vào các quy trình công nghiệp, đặc biệt là gia nhiệt. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về hệ thống nước nóng năng lượng mặt trời cho mục đích sinh hoạt [6], [7], hay các nghiên cứu [8], [9] Các nghiên cứu này đã cung cấp một nền tảng lý thuyết và thực nghiệm

vững chắc về hiệu quả và khả thi trong việc ứng dụng sử dụng nước nóng NLMT, đồng thời có thể cải thiện hiệu suất hệ thống nước nóng NLMT cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu suất của bộ thu. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chủ yếu dừng lại ở việc đánh giá hiệu suất trong phòng thí nghiệm hoặc cho mục đích sinh hoạt, mà chưa xem xét đến việc tích hợp chúng vào một quy trình công nghiệp cụ thể với các yêu cầu đặc thù về nhiệt độ, lưu lượng và tính ổn định. Các nghiên cứu chuyên sâu đánh giá tính khả thi của việc tích hợp hệ thống này vào một dây chuyền công nghệ cao, đòi hỏi nhiệt độ ổn định và độ tin cậy như VHT vẫn còn rất hạn chế, đặc biệt là các đánh giá định lượng toàn diện về hiệu quả kỹ thuật, kinh tế và môi trường.

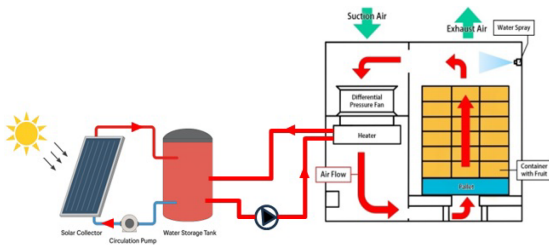
Nhằm lấp đầy khoảng trống nghiên cứu nêu trên, bài báo này thực hiện một nghiên cứu thực nghiệm để đánh giá toàn diện hiệu quả của hệ thống gia nhiệt bằng năng lượng mặt trời sử dụng bộ thu tấm phẳng cho quy trình VHT trái cây xuất khẩu tại Việt Nam. Các mục tiêu cụ thể bao gồm: (1) Thiết kế, xây dựng và vận hành thử nghiệm một hệ thống tích hợp; (2) Phân tích hiệu suất kỹ thuật và xác định các yếu tố ảnh hưởng chính thông qua mô hình hồi quy; (3) Đánh giá hiệu quả kinh tế thông qua chỉ tiêu thời gian hoàn vốn; (4) Lượng hóa lợi ích môi trường thông qua chỉ số giảm phát thải CO<sub>2</sub>.

## 2. MÔ HÌNH VÀ PHƯƠNG PHÁP TÍNH

### 2.1. Nguyên lý hệ thống và quy trình xử lý hơi nước nóng trái cây bằng hệ thống VHT [3]

Hệ thống VHT sử dụng hơi nước nóng bão hòa để diệt trứng và ấu trùng ruồi đục quả mà không làm ảnh hưởng đến chất lượng trái cây. Hơi nước ngưng tụ trên bề

mặt trái cây, truyền nhiệt ẩn hóa hơi và làm nóng trái cây gần như tức thời đến nhiệt độ điểm sương của hơi nước. Để quá trình này diễn ra liên tục, hơi nước phải được bổ sung liên tục vào không khí. Trong hệ thống xử lý này, trái cây đựng trong các thùng nhựa đục lỗ được xếp chồng lên nhau trên một pallet theo nhiều lớp, các quạt hướng trục tạo áp, không khí sẽ chuyển động theo một luồng áp suất chênh lệch.



Hình 1. Sơ đồ mô tả nguyên lý hệ thống [10]

Hệ thống VHT sử dụng hơi nước nóng bão hòa để diệt trùng và ấu trùng ruồi đục quả mà không làm ảnh hưởng đến chất lượng trái cây. Hơi nước ngưng tụ trên bề mặt trái cây, truyền nhiệt ẩn hóa hơi và làm nóng trái cây gần như tức thời đến nhiệt độ điểm sương của hơi nước. Để quá trình này diễn ra liên tục, hơi nước phải được bổ sung liên tục vào không khí. Trong hệ thống xử lý này, trái cây đựng trong các thùng nhựa đục lỗ được xếp chồng lên nhau trên một pallet theo nhiều lớp, các quạt hướng trục tạo áp, không khí sẽ chuyển động theo một luồng áp suất chênh lệch.

Bộ thu (collector) năng lượng mặt trời

Bảng 1. Giá trị ban đầu của trái cây (trong trường hợp này là xoài)

Đại lượng	Giá trị	Diễn giải
$T_{\infty}$	52 °C	Nhiệt độ nước
$T_i$	27 °C	Nhiệt độ trái cây ban đầu bằng nhiệt độ môi trường
$h$	500 W/m <sup>2</sup> K	Hệ số truyền nhiệt đối lưu nước – bề mặt quả
$A$	0,0314 m <sup>2</sup>	Diện tích bề mặt quả (lấy trung bình $d = 0,1m$ )
$\rho$	1000 kg/m <sup>3</sup>	Khối lượng riêng
$c_p$	3800 J/kg.K	Nhiệt dung riêng

(NLMT) thu nhiệt làm nóng nước, nước sau khi làm nóng được đưa vào bình chứa được bọc cách nhiệt (Bình chứa có điện trở sẵn có của hệ thống). Nước từ bình chứa được bơm vào bộ Heater của hệ thống xử lý VHT. Quá trình đưa nước nóng này kết thúc khi kết thúc giai đoạn xử lý trái cây đến giai đoạn làm mát trái cây. Trong quá trình này có sự trao đổi nhiệt giữa dòng chất lỏng là nước trong bộ Heater và dòng không khí được quạt thổi cưỡng bức qua bộ Heater. Để truyền nhiệt được, nước trong coil của Heater phải cao hơn nhiệt độ không khí ra, thường cao hơn 10 – 20 K để có chênh nhiệt trao đổi.

## 2.2. Tính toán nhu cầu nhiệt

Theo quy trình công nghệ xử lý hơi nước nóng trái cây [1], trước khi đưa trái cây vào hệ thống VHT được nhúng nước nóng 52°C trong 3 phút, khi đó nhiệt độ trái cây (trong trường hợp xoài) được xác định bằng mô hình dung lượng nhiệt tập trung (Lumped Capacitance Model) dụng để ước tính sơ bộ sự biến thiên nhiệt độ trong trái cây dựa trên số Biot (Bi)

$$T(t) = T_{\infty} - (T_{\infty} - T_i) \exp\left(-\frac{hA}{\rho V c_p} t\right) \quad (1)$$

Trong đó  $m$ : khối lượng vật thể (kg),  $c_p$ : nhiệt dung riêng (J/kg.K),  $T(t)$ : nhiệt độ tức thời của vật thể (°C),  $T_{\infty}$ : nhiệt độ môi trường xung quanh (°C),  $T_i$ : nhiệt độ ban đầu của vật thể (°C).

Thế các giá trị ban đầu từ bảng 1 vào (1):

$$T(180) = 52 - (52 - 27) \exp\left(-\frac{180}{127}\right) = 45,95^{\circ}\text{C}$$

Nhiệt độ sau 180s nhúng trong nước  $52^{\circ}\text{C}$ , nhiệt độ trung bình của quả xoài đạt khoảng  $46^{\circ}\text{C}$ . Do Biot (Biot number – Bi) lớn, lõi quả chắc chắn chưa đạt  $46^{\circ}\text{C}$ , lõi thường thấp hơn  $\sim 2 - 3^{\circ}\text{C}$ , tức khoảng  $43 - 44^{\circ}\text{C}$  sau 3 phút.

Trước tiên buồng xử lý được nâng nhiệt độ và độ ẩm trước ( $t_{\text{room}} = 48^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi_{\text{room}} = 93\%$ ), sau đó đưa trái cây vào (nhiệt độ bề mặt  $t_{\text{to}} = 46^{\circ}\text{C}$ , nhiệt độ lõi  $t_{\text{fi}} = 43^{\circ}\text{C}$ ) tiến hành nâng nhiệt độ lõi lên  $47^{\circ}\text{C}$  và tiến hành giữ nhiệt độ này trong 20 phút.

Nhiệt lượng làm nóng buồng

$$Q_{\text{room}} = m_{\text{da}}(h_2 - h_1) \quad (2)$$

Với Enthanpy

$$h = c_{p,\text{da}}T + w[L_v + c_{p,v}T] \quad (3)$$

Trong đó

$c_{p,\text{da}}$  Nhiệt dung riêng không khí khô (kJ/kg.K)

$L_v$  Nhiệt ẩn hóa hơi của nước (kJ/kg)

$w$  Độ chứa hơi của không khí (kg<sub>hơi nước</sub>/kg<sub>không khí khô</sub>)

$c_{p,v}$  Nhiệt dung riêng đẳng áp của hơi nước (kJ/kg.K) ( $c_{p,v} \approx 1,86$  kJ/kg.K)

Đây là lượng nhiệt cần làm nóng buồng nó bao gồm: nhiệt hiện làm tăng nhiệt độ của không khí khô và hơi nước, nhiệt ẩn hóa hơi nước để đạt độ ẩm mong muốn.

Nhiệt nâng nhiệt độ lõi trái cây

$$Q_{\text{fruit}} = m_f c_{pf} \Delta T \quad (4)$$

Nhiệt duy trì nhiệt độ buồng cũng chính là lượng nhiệt tổn thất của buồng, với A là diện tích vách buồng ( $\text{m}^2$ )

$$Q_{\text{loss}} = k.A.\Delta t \quad (5)$$

Tổng lượng nhiệt

$$Q = Q_{\text{room}} + Q_{\text{fruit}} + Q_{\text{loss}}$$

### 2.3. Tính bộ thu nhiệt mặt trời

Nước được gia nhiệt từ bộ thu nhiệt NLMT[11] sau đó đi vào heater, cần phải xác định độ chênh nhiệt có nằm trong khoảng đáp ứng của bộ thu nhiệt NLMT.

Chênh nhiệt trung bình logarit – LMTD (Log Mean Temperature Difference)

$$LMTD = \frac{(T_{w,\text{in}} - T_{a,\text{out}}) - (T_{w,\text{out}} - T_{a,\text{in}})}{\ln\left(\frac{T_{w,\text{in}} - T_{a,\text{out}}}{T_{w,\text{out}} - T_{a,\text{in}}}\right)} \quad (6)$$

Với  $T_{w,\text{in}}$ ,  $T_{w,\text{out}}$  lần lượt là nhiệt độ nước vào và ra heater,  $T_{a,\text{in}}$ ,  $T_{a,\text{out}}$  là nhiệt độ không khí đi qua heater. Từ điều kiện ban đầu có thể tính  $LMTD \approx 20\text{K}$ , vì vậy chọn nước cấp coil  $\sim 60 - 70^{\circ}\text{C}$  là hợp lý và khả thi với hệ năng lượng mặt trời. Qua tổng hợp các nghiên cứu đánh giá cho thấy với bộ thu tấm phẳng được sử dụng ở thị trường Châu Á [12], với các ưu điểm cấu tạo đơn giản nên có độ bền cao đối với môi trường công nghiệp và phù hợp với điều kiện bức xạ ở Việt Nam[8], [13].

Bộ thu được sử dụng trong nghiên cứu này là bộ thu tấm phẳng SOLAHART với các tham số hiệu suất tức thời như bảng 1.

Bảng 2. tham số hiệu suất tức thời

$\eta_0$	0,801
$a_1$	3,858W/m <sup>2</sup> K
$a_2$	0,001W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup>

Hiệu suất tức thời của bộ thu:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \left(\frac{T_m - T_a}{G}\right) - a_2 \left(\frac{T_m - T_a}{G}\right)^2 \quad (7)$$

Với

$T_m$  Nhiệt độ nước tại bồn chứa sau khi qua bộ thu NLMT

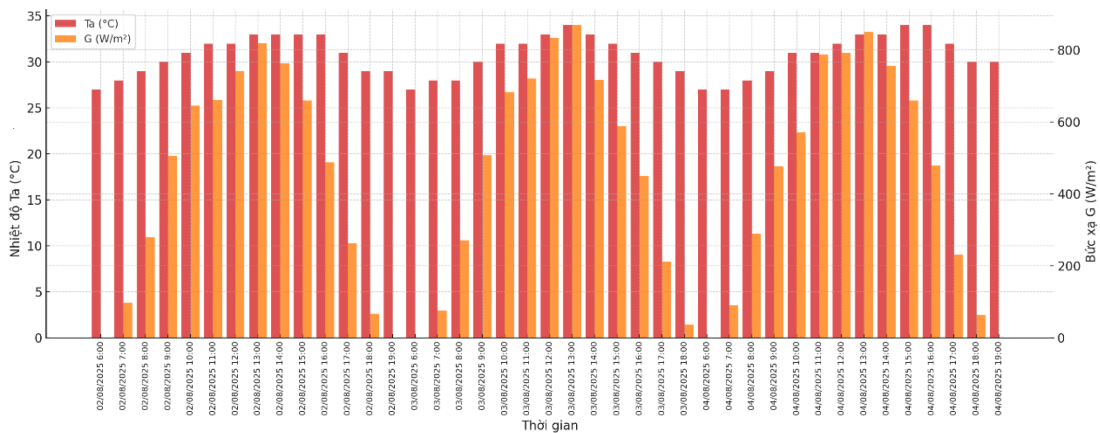
- Ta Nhiệt độ môi trường
- G Bức xạ mặt trời tới bộ thu ( $W/m^2$ )
- $\eta_0$  Hiệu suất quang học (hay hiệu suất cực đại của bộ thu)
- $a_1$  Hệ số tổn thất nhiệt tuyến tính ( $W/m^2K$ )
- $a_2$  Hệ số tổn thất nhiệt bậc 2 ( $W/m^2K^2$ )

Kết quả tính toán cho thấy tổng nhu cầu nhiệt năng cho một mẻ xử lý 10 tấn trái cây là 53.34kWh, với công suất heater yêu cầu khoảng 50kW. Việc tính toán lựa chọn bộ thu năng lượng mặt trời kiểu tấm phẳng

(với diện tích yêu cầu ~155 m<sup>2</sup>) dựa trên dữ liệu bức xạ đặc trưng của miền Nam Việt Nam cho thấy hệ thống có khả năng cung cấp trung bình 473.1kWh/ngày.

**2.4. Kết quả thực nghiệm**

Thiết bị đo sử dụng Tenmars TM-207. Tiến hành đo tại điểm đặt bộ thu ở Thành Phố Hồ Chí Minh, trong ba ngày 02/08/2025 đến 04/08/2025, thời gian đo từ 06h00 đến 19h00, mỗi lần đo cách nhau 1h, có được dữ liệu bức xạ và nhiệt độ môi trường như đồ thị



Hình 2. Đồ thị bức xạ mặt trời và nhiệt độ môi trường theo giờ trong ba ngày 02, 03, 04/08/2025

Sử dụng nhiệt kế tự ghi Sato Keiryoki bồn chứa sau khi ra khỏi bộ thu. Mfg SK-L751, đầu dò lấy nhiệt độ nước

Bảng 3. Nhiệt độ nước bồn chứa sau khi ra khỏi bộ thu

Thời gian		Tm (°C)	Thời gian		Tm (°C)	Thời gian		Tm (°C)
02/08/2025	6:00	60,19	03/08/2025	6:00	61,22	04/08/2025	6:00	62,03
	7:00	60,23		7:00	61,39		7:00	62,13
	8:00	61,31		8:00	61,51		8:00	62,19
	9:00	61,59		9:00	62,05		9:00	62,63
	10:00	62,34		10:00	62,33		10:00	62,89
	11:00	63,15		11:00	63,62		11:00	63,85
	12:00	65,05		12:00	63,84		12:00	65,55
	13:00	66,62		13:00	65,05		13:00	66,71

Thời gian	Tm (°C)	Thời gian	Tm (°C)	Thời gian	Tm (°C)
14:00	68,16	14:00	66,62	14:00	68,27
15:00	69,53	15:00	68,16	15:00	69,41
16:00	68,62	16:00	69,53	16:00	68,62
17:00	67,56	17:00	68,62	17:00	67,56
18:00	65,56	18:00	67,56	18:00	65,56
19:00	64,23	19:00	64,32	19:00	64,23

## 2.5. Phương trình hồi quy thực nghiệm

### Các biến đầu vào (Factors):

- X1: Bức xạ mặt trời đo được G (Wh/m<sup>2</sup>): Yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến nhiệt độ nước qua bộ thu.

- X2: Nhiệt độ môi trường ta (°C): Yếu tố ảnh hưởng đến bề mặt bộ thu.

- X3: Nhiệt độ nước trong bồn trữ nhiệt tm (°C).

### Hàm mục tiêu (Response):

- Y1 (η): Hiệu suất tức thời của bộ thu.

- Y2 (Qu): Nhiệt hiệu dụng của bộ thu (kWh/m<sup>2</sup>)

Sử dụng chương trình Minitab cho các biến đầu vào và hàm mục tiêu, phương trình hồi quy của thực nghiệm:

$$Y2 = -0,0407 + 0,000054X1 + 0,000270X2 + 0,000530X3$$

Hệ số hồi quy:

### Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-0,0407	0,0161	-2,53	0,016	
X1 (G(Wh/m <sup>2</sup> ))	0,000054	0,000005	11,54	0,000	4,57
X2 (Ta(°C))	0,000270	0,000841	0,32	0,750	7,67
X3 (Tm(°C))	0,000530	0,000379	1,40	0,171	2,78

Hình 3. Hệ số hồi quy

- Hệ số chặn (Constant = -0.0407): Giá trị của Qu khi tất cả các biến độc lập bằng

0. Trong bối cảnh vật lý, giá trị âm này có thể được hiểu là lượng nhiệt tổn thất khi không có bức xạ mặt trời.

- Hệ số của X1 (0.000054): Khi cường độ bức xạ mặt trời (G) tăng 1 Wh/m<sup>2</sup>, lượng nhiệt hữu ích Qu sẽ tăng 0.000054 kWh/m<sup>2</sup>. Đây là hệ số có giá trị lớn nhất, cho thấy G là yếu tố ảnh hưởng chính.

- Hệ số của X2 và X3: Thể hiện mức độ tác động của nhiệt độ môi trường và nhiệt độ nước đầu vào đến Qu. Tuy nhiên, cần kiểm định ý nghĩa thống kê thông qua giá trị p-Value

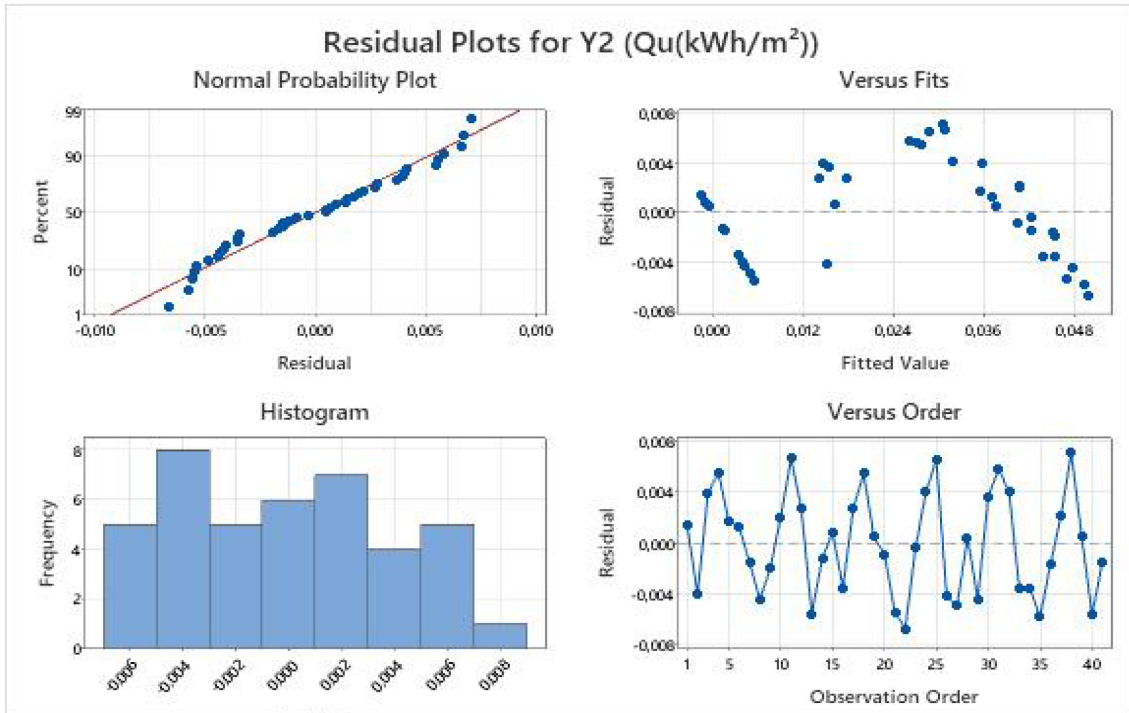
- X1 (G): p-value = 0.000 < 0.05. Điều này khẳng định cường độ bức xạ mặt trời có ảnh hưởng có ý nghĩa thống kê đến lượng nhiệt hữu ích Qu ở độ tin cậy 95%.

- X2 (Ta) và X3 (Tm): Lần lượt có p-value = 0.750 và 0.171 > 0.05. Điều này cho thấy ảnh hưởng của nhiệt độ môi trường và nhiệt độ nước đầu vào là KHÔNG có ý nghĩa thống kê trong mô hình hiện tại. Nguyên nhân có thể do các biến này có tương quan với biến G hoặc độ biến thiên của chúng không đủ lớn để tác động rõ rệt lên Qu.

Để đánh giá mức độ phù hợp của mô hình hồi quy và kiểm tra các giả định cơ bản, các biểu đồ phân dư (Residual Plots) đã được phân tích.

Các kiểm định phần dư khẳng định mô hình hồi quy tuyến tính đã xây dựng là đáng tin cậy và phù hợp với dữ liệu thực nghiệm, với hệ số xác định  $R^2 > 94\%$ . Tuy nhiên, để nâng cao độ chính xác, trong các

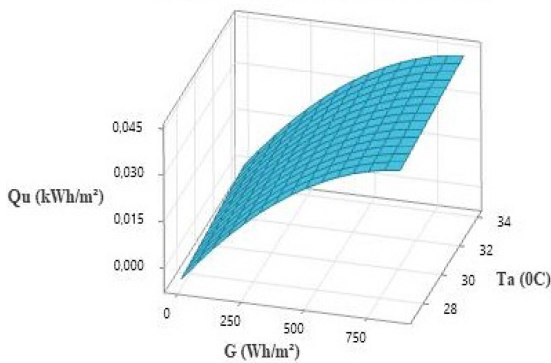
nghiên cứu tiếp theo có thể xem xét mở rộng mô hình theo hướng phi tuyến hoặc bổ sung thêm biến giải thích liên quan đến thời gian và điều kiện khí tượng.



Hình 4. Đồ thị phân tích phần dư

Biểu đồ bề mặt đáp ứng

Qu (kWh/m<sup>2</sup>) vs Ta (0C) . G (Wh/m<sup>2</sup>)



Hình 5. Biểu đồ bề mặt đáp ứng

Ảnh hưởng của Cường độ Bức xạ (X1 - G): Mặt cong có xu hướng dốc lên rõ rệt theo chiều tăng của trục X1 (G). Điều này cho thấy cường độ bức xạ mặt trời là yếu tố ảnh hưởng chính và tích cực đến

lượng nhiệt hữu ích Qu. Khi bức xạ mặt trời càng mạnh, hiệu suất thu nhiệt của hệ thống càng cao, dẫn đến lượng nhiệt thu được (Qu) tăng lên đáng kể. Đây là kết quả phù hợp hoàn toàn với nguyên lý vật lý của hệ thống gia nhiệt bằng năng lượng mặt trời.

Ảnh hưởng của Nhiệt độ Môi trường (X2 - Ta): Mặt cong có xu hướng dốc nhẹ theo chiều tăng của trục Y (X2 - Ta). Điều này cho thấy nhiệt độ môi trường có tác động tích cực nhưng yếu hơn đáng kể so với bức xạ mặt trời. Khi nhiệt độ môi trường tăng, sự chênh lệch nhiệt độ giữa bộ thu và môi trường giảm, dẫn đến giảm tổn thất nhiệt, từ đó cải thiện một phần hiệu suất hệ thống. Tuy nhiên, mức độ ảnh hưởng này là không lớn, phù hợp với kết

qua kiểm định ý nghĩa thống kê trước đó ( $p$ -value của  $X2 = 0.750 > 0.05$ ).

Tương tác giữa Hai Yếu tố ( $X1$  và  $X2$ ): Mặt cong không phải là một mặt phẳng hoàn toàn mà có độ cong nhẹ, phản ánh sự tương tác không quá mạnh giữa hai biến  $X1$  và  $X2$ . Tuy nhiên, có thể thấy rằng tại các vùng có cường độ bức xạ ( $X1$ ) cao, sự thay đổi của nhiệt độ môi trường ( $X2$ ) gây ra biến thiên về  $Qu$  rõ rệt hơn so với khi cường độ bức xạ ở mức thấp.

## 2.6. Hiệu quả kinh tế và môi trường

### a. Thời gian thu hồi vốn

Với tổng diện tích bộ thu gần  $155m^2$ , tổng chi phí đầu tư khoảng  $1.073.267.280VNĐ$ .

Tổng công suất thu được trong ngày  $5,7 \times 83 = 473,1 \text{ kWh}$ .

Theo giá điện hóa đơn điện sản xuất dưới  $22kV$  là  $1.899VNĐ/kWh$

Mỗi tháng sẽ giảm được  $473,1 \times 1899 \times 26 = 23.358.839VNĐ$

Thời gian thu hồi vốn là khoảng **3,8 năm**.

### b. Giảm phát thải $CO_2$

Lượng giảm phát thải  $CO_2$  của hệ thống:

$$G_{CO_2} = P_e \times EF_{CO_2,e}$$

Với:

-  $G_{CO_2}$  là khối lượng  $CO_2$  (kg/ngày)

-  $EF_{CO_2,e}$ : Hệ số phát thải điện lưới, theo[14] có hệ số phát thải điện lưới là  $0,6766$  tấn  $CO_2/kWh$

Như vậy, lượng phát thải  $CO_2$  của hệ thống:

$$G_{CO_2} = 473,1 \times 0,6766 = 320 \text{ kgCO}_2/\text{ngày}$$

## 3. KẾT LUẬN

Về mặt khoa học và kỹ thuật: nghiên cứu đã xây dựng được mô hình tích hợp giữa hệ thống gia nhiệt nước bằng năng

lượng mặt trời (sử dụng bộ thu tấm phẳng) và hệ thống xử lý trái cây bằng hơi nước nóng (VHT). Mô hình này không chỉ khả thi về mặt lý thuyết mà còn được kiểm chứng qua vận hành thực tế. Phương trình hồi quy thực nghiệm giữa lượng nhiệt hữu ích ( $Qu$ ) với các thông số vận hành đã được thiết lập với độ tin cậy rất cao ( $R^2 = 94.92\%$ ).

Về mặt kinh tế: Việc ứng dụng năng lượng mặt trời giúp giảm thiểu đáng kể chi phí năng lượng cho công đoạn gia nhiệt. Với tổng vốn đầu tư khoảng  $1.07$  tỷ VNĐ cho hệ thống công suất  $\sim 155 m^2$ , thời gian hoàn vốn dự kiến là  $3.8$  năm là một chỉ số có tính khả thi cao, đặc biệt trong bối cảnh giá năng lượng truyền thống có xu hướng ngày càng tăng. Về mặt môi trường và thực tiễn: Hệ thống góp phần giảm phát thải khoảng  $320 \text{ kg CO}_2/\text{ngày}$ , phù hợp với xu hướng phát triển nông nghiệp xanh và bền vững.

Dựa trên những kết quả đạt được, hướng phát triển chính của đề tài là tối ưu hóa hệ thống và mở rộng phạm vi ứng dụng. Cụ thể, nghiên cứu có thể được phát triển theo hướng tích hợp trí tuệ nhân tạo (AI) và Internet vạn vật (IoT) để tối ưu hóa vận hành tự động, dự báo sản lượng nhiệt và cảnh báo bảo trì. Đồng thời, mô hình này có thể được nhân rộng và điều chỉnh để ứng dụng cho các công đoạn gia nhiệt khác trong chế biến nông sản (như sấy, thanh trùng) hoặc trong các ngành công nghiệp thực phẩm khác, góp phần hiện thực hóa mục tiêu giảm phát thải carbon trên quy mô rộng hơn.

Tóm lại, nghiên cứu đã cung cấp một giải pháp tổng thể, có cơ sở khoa học vững chắc và tính ứng dụng thực tiễn cao cho bài toán năng lượng trong chế biến nông sản, mở ra hướng đi mới trong việc hiện đại hóa và xanh hóa ngành nông nghiệp.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trung tâm Nghiên cứu và Phát triển Nông nghiệp Công nghệ cao, “Xử lý bảo quản xoài, thanh long bằng hơi nước nóng,” <https://cesti.gov.vn>. Accessed: Sep. 03, 2025. [Online]. Available: <https://cesti.gov.vn/bai-viet/mo-hinh-cong-nghe-ung-dung-vao-san-xuat/xu-ly-bao-quan-xoai-thanh-long-bang-hoi-nuoc-nong-01011047-0000-0000-0000-000000000000>
- [2] J. J. Gaffney, G. J. Hallman, and A. L. Sharp, “Vapor Heat Research Unit for Insect Quarantine Treatments,” 1990.
- [3] A. Pongener, S. Sharma, and S. K. Purbey, “Heat Treatment of Fruits and Vegetables,” in *Postharvest Disinfection of Fruits and Vegetables*, Elsevier, 2018, pp. 179–196. doi: 10.1016/B978-0-12-812698-1.00009-1.
- [4] M. A. Ullah, A. Khanal, P. Joyce, N. White, A. Macnish, and D. Joyce, “Susceptibility of vapour heat-treated ‘B74’ mango fruit to internal disorders and mineral nutrient composition,” *Sci Horti*, vol. 341, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.scienta.2025.114013.
- [5] Bộ Tài Nguyên & Môi Trường, “BÁO CÁO ĐÁNH GIÁ TIỀM NĂNG NĂNG LƯỢNG BỨC XẠ, GIÓ VÀ SÓNG TẠI VIỆT NAM,” Hà Nội, Sep. 2022. Accessed: Sep. 11, 2025. [Online]. Available: <http://www.donre.hochiminhcity.gov.vn/hinhanhposttin/2022-10/3baocaotomtattiemnangnangluongtaitaovietnamdone.pdf>
- [6] Tạ Văn Chương and Nguyễn Nguyên An, “Đánh giá hiệu quả hệ thống cung cấp nước nóng dùng bộ thu năng lượng mặt trời kết hợp với bơm nhiệt,” p. 6, Mar. 2015.
- [7] L. Minh Nhut, “Theoretical and Experimental Investigation on Performance Improvement of Solar Hot Water System Under Real Weather Conditions at Ho Chi Minh City, Vietnam,” *American Journal of Engineering and Technology Management*, vol. 3, no. 1, p. 29, 2018, doi: 10.11648/j.ajetm.20180301.13.
- [8] P. Ma *et al.*, “NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM VỀ BỘ THU NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI DẠNG ĐỘNG GIA NHIỆT NƯỚC NÓNG AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE TRACKING SOLAR HOT WATER COLLECTOR,” *TẠP CHÍ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG*, Sep. 2019.
- [9] L. Minh Nhut, “THỰC NGHIỆM XÁC ĐỊNH LƯU LƯỢNG NƯỚC QUA BỘ THU TẮM PHẪNG CỦA HỆ THỐNG NƯỚC NÓNG NĂNG LƯỢNG MẶT TRỜI EXPERIMENTAL VERIFICATION OF WATER FLOW RATE THROUGH THE FLAT PLATE COLLECTOR LOOP OF SOLAR HOT WATER SYSTEM,” *TẠP CHÍ KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ - ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG*, p. 6, Aug. 2020.
- [10] Ltd. Sanshu Sangyo Co., “VAPOR HEAT TREATMENT SYSTEM,” Kagoshima.
- [11] BOB RAMLOW and BENAMIN NUSZ, *SOLAR WATER HEATING*. New Society, 2010.
- [12] W. Weiss and M. Spörk-Dür, “Solar Heat Worldwide 2018 (Global Market Development and Trends in 2017),” 2018.

- [13] E. Zambolin and D. Del Col, “Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions,” *Solar Energy*, vol. 84, no. 8, pp. 1382–1396, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.solener.2010.04.020.
- [14] Trung tâm Phát triển các-bon thấp, “NGHIÊN CỨU, XÂY DỰNG HỆ SỐ PHÁT THẢI CỦA LƯỚI ĐIỆN VIỆT NAM NĂM 2023,” Oct. 2024. Accessed: Sep. 21, 2025. [Online]. Available: [http://dcc.gov.vn/van-ban-phap-luat/1125/Nghien-cuu,-xay-dung-he-so-phat-thai-\(EF\)-cua-luoi-dien-Viet-Nam-nam-2023-\(k%C3%A8m-CV-1726/BDKH-PTCBBT\).html](http://dcc.gov.vn/van-ban-phap-luat/1125/Nghien-cuu,-xay-dung-he-so-phat-thai-(EF)-cua-luoi-dien-Viet-Nam-nam-2023-(k%C3%A8m-CV-1726/BDKH-PTCBBT).html)