

# NGHIÊN CỨU, THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN SẤY VI SÓNG CHÂN KHÔNG RESEARCH AND DESIGN OF VACUUM MICROWAVE DRYING CONTROLLER

VŨ NGỌC MINH\*, PHẠM THỊ HỒNG ANH

Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

\*Email liên hệ: minhvn.ddt@vimaru.edu.vn

## Tóm tắt

Sấy sản phẩm nông nghiệp bằng vi sóng trong môi trường chân không là một kỹ thuật sấy được nghiên cứu và ứng dụng nhiều trong thời gian gần đây. Trong quá trình sấy, điều khiển phối hợp giữa các tham số áp suất chân không, thời gian cấp nhiệt vi sóng, biến thiên nhiệt độ sản phẩm sẽ cho các chỉ tiêu chất lượng, thời gian sấy và năng lượng tiêu hao khác nhau. Bài báo đề xuất một thuật toán điều khiển quá trình sấy vi sóng trong môi trường chân không với cấu trúc điều khiển phối hợp liên tục theo thời gian. Từ thuật toán điều khiển, bài báo cũng trình bày cấu trúc bộ điều khiển, phần mềm và các thiết bị thực nghiệm quá trình sấy. Các kết quả thực nghiệm cho thấy khả năng sấy nhanh, tiết kiệm năng lượng, tính hiệu quả của thiết bị được xây dựng.

**Từ khóa:** Sấy vi sóng, sấy chân không, sấy chân không vi sóng.

## Abstract

Microwave drying of agricultural products in a vacuum environment is a drying technique that has been researched and applied a lot recently. During the drying process, controlling the combination of vacuum pressure parameters, microwave heating time, and product temperature variation will give different quality indicators, drying time, and energy consumption. This article proposes an algorithm to control the microwave drying process in a vacuum environment with a control structure coordinated continuously over time. From the control algorithm, the article also presents the controller structure, software and experimental equipment for the drying process. Experimental results show the built equipment's fast drying ability, energy saving, and effectiveness.

**Keywords:** Microwave drying, vacuum drying, microwave vacuum drying.

## 1. Đặt vấn đề

Sản phẩm nông nghiệp có độ ẩm lớn sẽ không thể bảo quản lâu dài do dễ bị nấm mốc, biến chất. Sấy là một quá trình làm giảm lượng nước có trong nguyên liệu bằng hiệu ứng bay hơi nước do chênh lệch áp

suất riêng [1]. Phương pháp sấy truyền nhiệt đối lưu hoặc truyền nhiệt bức xạ sẽ làm nóng nguyên liệu từ ngoài vào trong. Quá trình gia nhiệt phải diễn ra chậm để nhiệt độ giữa các vị trí trong nguyên liệu không chênh lệch quá nhiều gây biến chất sản phẩm. Với nguyên liệu cần sấy có kích thước lớn, quá trình gia nhiệt kéo dài sẽ gây lãng phí về thời gian và năng lượng. Gia nhiệt bằng vi sóng làm cho các phân tử nước trong nguyên liệu dao động, hấp thụ năng lượng vi sóng và dễ dàng thoát ra khỏi nguyên liệu dưới hình thức hóa hơi trong khi các thành phần hóa học khác của nguyên liệu hầu như không bị ảnh hưởng. Trong môi trường chân không, chênh lệch áp suất hơi riêng phần của nước trên bề mặt nguyên liệu và môi trường xung quanh sẽ lớn hơn, nên sự hóa hơi diễn ra nhanh và nguyên liệu sẽ khô nhanh hơn so với môi trường không khí. So với sấy bằng nhiệt truyền thống, kết hợp gia nhiệt bằng vi sóng trong môi trường chân không sẽ cho phép quá trình sấy diễn ra ở nhiệt độ thấp với thời gian sấy ngắn. Bên cạnh đó, các nhà khoa học còn chứng minh rằng phương pháp sấy này có khả năng bảo quản về hình dáng, màu sắc, hương vị và giá trị dinh dưỡng tốt [3], [4]. Như vậy sấy vi sóng trong môi trường chân không là một phương pháp thay thế sấy nhiệt truyền thống để tạo ra sản phẩm sấy có chất lượng cao, thời gian sấy ngắn và tiết kiệm năng lượng.

Các sản phẩm như gỗ, nông sản, ngũ cốc bên cạnh nhu cầu chủ đạo là sấy khô còn cần phải đạt nhiều tiêu chí khác như sản phẩm sấy đẹp, thời gian sấy ngắn, năng lượng tiêu tốn ít [5],... Đến thời điểm hiện nay, trên thị trường đã có nhiều thiết bị sấy chân không vi sóng. Hầu hết thiết bị sấy có cấu trúc đơn giản, vận hành thủ công theo kiểu on/off dựa trên thực nghiệm nhiều lần để tìm ra các tham số vận hành. Các bộ điều khiển không phối hợp điều chỉnh được các tham số độ ẩm, nhiệt độ theo thời gian và tốc độ. Vì vậy chế tạo bộ thiết bị sấy tự động là một hướng đi hiện nay.

Trong bài báo này, tác giả trình bày giải pháp sử dụng các cảm biến thông minh kết hợp với thuật toán điều khiển ổn định nhiệt độ và áp suất theo thời gian nhằm tối ưu năng lượng và thời gian sấy sản phẩm.

**2. Thuật toán điều khiển quá trình sấy**

**2.1. Quy trình xác định độ ẩm theo phương pháp tử sấy**

Theo tiêu chuẩn quốc gia TCVN 9706:2023; ISO 711:1985 về xác định độ ẩm ngũ cốc, nhiệt độ duy trì sấy là 45°C-50°C. Với các hạt lớn hơn 1,7mm cần nghiền nhỏ trước khi đo, đơn vị tính g:

$$w = \left[ (m_o - m_1) \frac{m_3}{m_o} + m_2 - m_3 \right] \frac{100}{m_2} \tag{1}$$

$$= 100 \left( 1 - \frac{m_1 m_3}{m_o m_2} \right)$$

Trong đó:

- w: Là độ ẩm của mẫu thử;
- m<sub>0</sub>: Khối lượng của mẫu trước khi sấy;
- m<sub>1</sub>: Khối lượng của mẫu thử sau khi sấy;
- m<sub>2</sub>: Khối lượng của mẫu trước khi xử lý sơ bộ;
- m<sub>3</sub>: Khối lượng của mẫu xử lý sơ bộ.

Với các tử sấy công nghiệp, để xác định nhanh độ ẩm, phương pháp xác định độ ẩm [4] được tiến hành như sau:

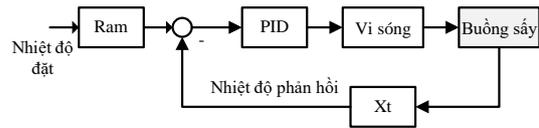
Các mẫu thử được cân để xác định khối lượng sau đó được đưa vào tử sấy có nhiệt độ 103 ± 2°C. Sau khoảng thời gian sấy từ 1-6 giờ sẽ được lấy ra khỏi tử sấy, để nguội đến nhiệt độ phòng trong 20 - 30 phút rồi cân lại. Tiếp tục cho mẫu thử vào sấy từ 30 đến 60 phút rồi cân lại. Lập lại các kết quả cho đến khi khối lượng mẫu không đổi. Độ ẩm của mẫu thử được xác định theo công thức:

$$w = 100 \left( \frac{m - m_1}{m} \right) \tag{2}$$

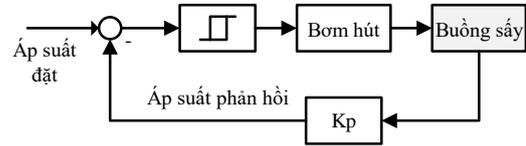
Trong bài báo này tác giả thiết kế bộ điều khiển sẽ giám sát liên tục độ ẩm của vật liệu trong quá trình sấy làm cơ sở quyết định thời điểm dừng sấy.

**2.2. Cấu trúc bộ điều khiển sấy**

Cấu trúc bộ điều khiển ổn định nhiệt độ sấy vi sóng sử dụng cấu trúc điều khiển PID được trình bày trên Hình 1. Các tham số P, I, D được cài đặt trong phần mềm điều khiển trên máy tính dựa vào phương pháp Ziegler-Nichols. Với nguyên liệu sấy là các loại nông sản, quá trình gia nhiệt quá nhanh có thể làm chín hoặc biến dạng chúng. Vì vậy, một khâu Ram được đặt ở đầu vào để hạn chế tốc độ biến thiên nhiệt độ. Khâu Ram là đường đặc tính gia tăng nhiệt độ đặt có dạng phương trình bậc 1 với độ dốc phụ thuộc vào loại sản phẩm cần sấy. Để tối ưu hiệu quả sấy của vi sóng, tần số vi sóng được chọn không đổi là 2450Mhz. Công suất vi sóng được hiệu chỉnh theo chu kỳ cấp điện với thời gian của một chu kỳ là 20s.



Hình 1. Bộ điều chỉnh nhiệt độ



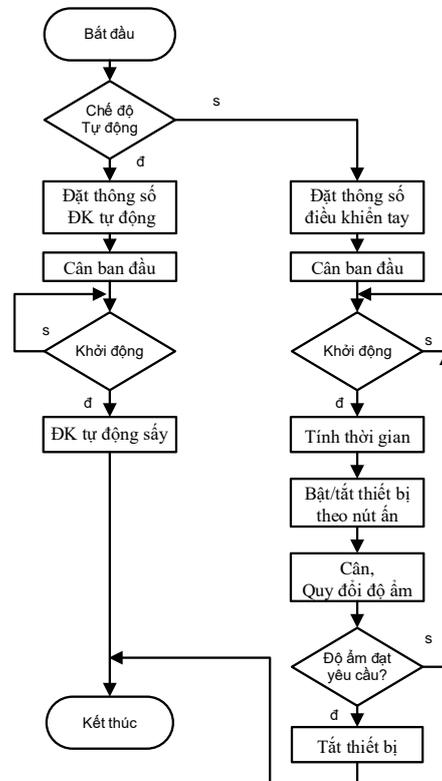
Hình 2. Bộ điều chỉnh áp suất chân không

Áp suất chân không được điều khiển như trên Hình 2. Bộ điều khiển có dạng hysteresis. Tham số độ trễ chuyển mạch phụ thuộc vào công suất bơm hút chân không và được cài đặt bằng phần mềm.

Phối hợp giữa bộ điều chỉnh nhiệt độ và bộ điều khiển áp suất chân không tuân theo thuật toán trên Hình 4 và theo nguyên tắc khi có áp suất chân không mới bắt đầu quá trình gia nhiệt bằng vi sóng.

**2.3. Thuật toán đo và điều khiển quá trình sấy**

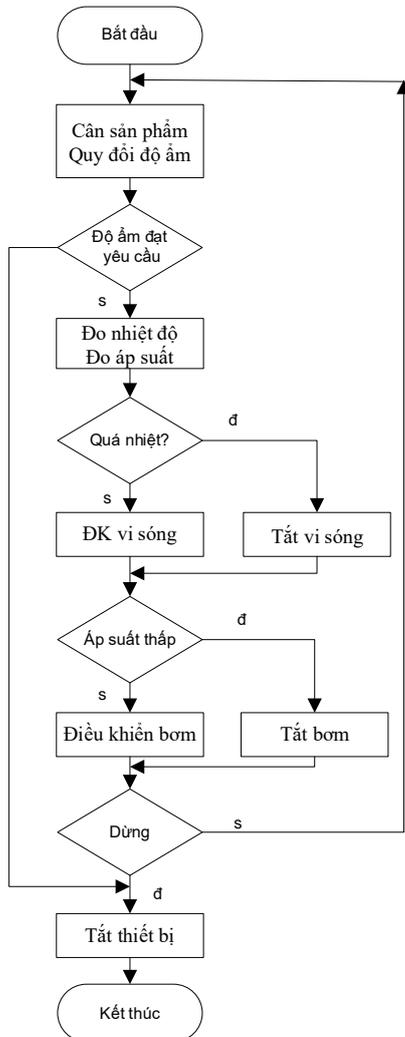
Hình 3 trình bày thuật toán đo và điều khiển quá trình sấy chân không vi sóng trên máy tính. Phần mềm điều khiển được thiết kế có 2 chế độ vận hành.



Hình 3. Lưu đồ điều khiển tổng quát

+ **Chế độ vận hành thủ công:** Việc điều khiển bật tắt bơm hút chân không, phát công suất vi sóng, đóng cắt van và điều khiển một số thiết bị ngoại vi được thao tác bởi người vận hành trên nút ấn điều khiển. Máy tính giám sát các tham số nhiệt độ, độ ẩm, áp suất từ cảm biến đưa về và đưa ra cảnh báo khi các tham số này đạt giá trị giới hạn. Độ ẩm của sản phẩm được tính toán liên tục theo phương trình (2). Khi độ ẩm đạt tới giới hạn đặt, các thiết bị gia nhiệt vi sóng và bơm hút chân không được khởi động trước, người vận hành chỉ có thể cưỡng ép bật bằng các nút ấn vật lý.

+ **Chế độ điều khiển tự động:** Quá trình phối hợp phát công suất vi sóng, điều khiển bơm hút chân không được điều khiển tự động theo lưu đồ Hình 4. Các tham số ban đầu như P, I, D, ngưỡng nhiệt độ, tốc độ gia tăng nhiệt, ngưỡng áp suất,... cần được cài đặt trước khi vận hành. Sau khi nhập tham số, quá trình cân sẽ được thực hiện để xác định khối lượng ban đầu.

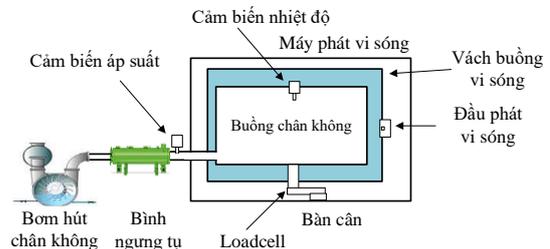


Hình 4. Lưu đồ điều khiển tự động sấy

Khi vận hành chế độ tự động, khối lượng nguyên liệu được cân theo nhịp 1s. Sau khi lọc nhiễu sẽ được quy đổi sang độ ẩm, nếu độ ẩm đạt yêu cầu, quá trình điều khiển sấy kết thúc. Trong quá trình vận hành, nhiệt độ và áp suất được đo ở đầu chu kỳ điều khiển. Để nâng cao an toàn, nếu áp suất quá thấp, bơm hút sẽ được tắt. Nếu nhiệt độ cao hơn ngưỡng cho phép, bộ phát vi sóng sẽ được cưỡng ép dừng hoạt động. Bơm hút chân không được khởi động trước, bộ phát công suất vi sóng sẽ khởi động sau khi có áp suất chân không. Ngưỡng áp suất được chọn là -10kPa.

### 3. Mô hình thiết bị sấy vi sóng chân không

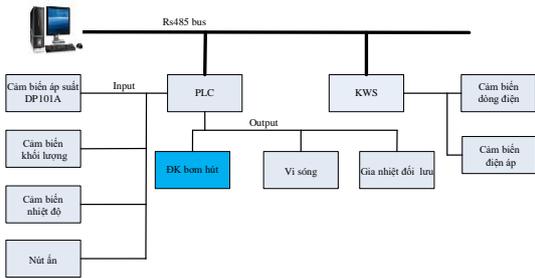
Mô hình thiết bị sấy vi sóng chân không được trình bày trên Hình 5 bao gồm một buồng vi sóng dung tích 8 lít. Buồng chân không đặt trong buồng vi sóng có khả năng chịu mức chân không tới -90kPa. Máy bơm áp suất âm 150W với lưu lượng bơm 51-57 (lít/phút). Kết nối giữa bơm chân không với buồng sấy là bình ngưng tụ được giải nhiệt bằng nước để bảo vệ bơm. Bộ tạo vi sóng 1400W với tần số phát 2450MHz. Bộ cân YZC-133 có dải cân 10kg, độ chính xác 1g. Cảm biến đo áp suất âm ZSE30A. Kích thước lò nhỏ nên mô hình sử dụng một cảm biến nhiệt độ loại PT 100 với dải đo 0 - 150°C được đặt chính giữa buồng chân không.



Hình 5. Mô hình thiết bị sấy vi sóng chân không

Bộ phát vi sóng có công suất đầu ra không đổi, công suất trung bình được hiệu chỉnh theo nguyên tắc thời gian theo thiết kế của nhà sản xuất với chu kỳ đóng cắt là 20s, bước thời gian 0,2s. Hiệu chỉnh công suất vi sóng bằng nhịp đóng cắt từ 1s-20s tương đương với công suất trung bình từ 70W-1400W. Để an toàn cho bộ phát vi sóng, khi áp dụng bộ điều khiển PID, các giá trị điều khiển nhỏ hơn 1s sẽ được coi bằng không.

Cấu trúc mạch điều khiển được trình bày trên Hình 6. Thiết bị lập trình PLC và thiết bị đo công suất KMS được kết nối mạng truyền thông với máy tính theo chuẩn RS485 sử dụng giao thức Modbus. PLC thu thập và xử lý tín hiệu đầu vào bao gồm: Tín hiệu về áp suất, nhiệt độ, khối lượng và các nút ấn trên bảng điều khiển. Tín hiệu đầu ra điều khiển bao gồm điều khiển bơm hút chân không, điều khiển công suất lò vi sóng, điều khiển điện trở sấy gia nhiệt. Bộ biến đổi



Hình 6. Cấu trúc mạch điều khiển



Hình 7. Giao diện điều khiển trên máy tính

Bảng 1. Thông số thiết bị máy sấy

Stt	Tham số kỹ thuật	Giá trị
1	Thể tích buồng sấy	8 lit
2	Bơm hút	51-57 l/p
3	Áp suất âm	-90kPa
4	Nhiệt độ giới hạn	150°C
5	Công suất vi sóng	1400W
6	Công suất sợi đốt	1200W
7	Điện áp hoạt động	220V

KWS đo dòng điện và điện áp cấp cho hệ thống sấy từ đó tính toán ra công suất, năng lượng tiêu thụ và hệ số công suất. Toàn bộ quá trình sấy được điều khiển và giám sát trên máy tính như trên Hình 7. Các thông số công suất, năng lượng, nhiệt độ, áp suất được đo và biểu diễn bằng đồ thị. Bộ phận gia nhiệt bằng đối lưu được thiết kế cho trường hợp không sử dụng gia nhiệt vi sóng. Bảng 1 trình bày thông số kỹ thuật các thiết bị trong hệ thống sấy.

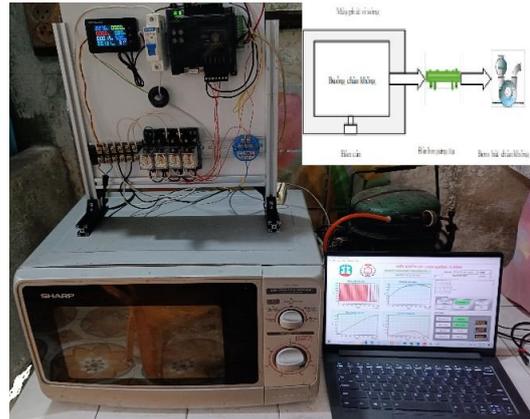
#### 4. Kết quả thực nghiệm

Quá trình thử nghiệm được áp dụng cho 2 loại nông sản là khoai lang tím và khoai tây. Các mẫu thí nghiệm được áp dụng với cùng khối lượng như nhau là 150g được cắt thành các lát đều nhau có độ dày 0,5 cm. Nhiệt độ môi trường là 28°C. Mô hình thực nghiệm được thể hiện trên Hình 8.

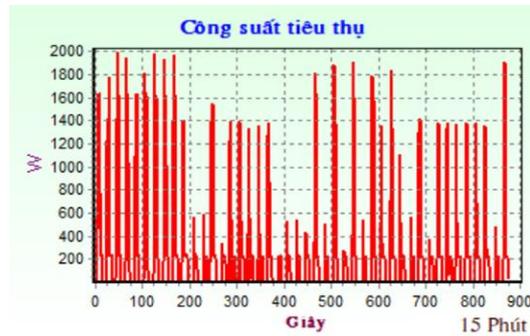
##### 4.1. Thực nghiệm điều khiển PID

Hình 9-12 là kết quả vận hành sấy chân không vi

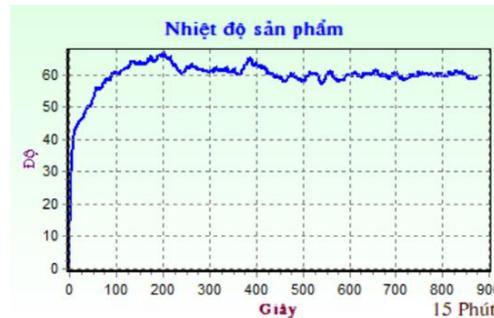
sóng cho sản phẩm khoai lang tím. Bộ điều khiển có cấu trúc PID, nhiệt độ sấy đặt ở 60°C, áp suất chân không ổn định ở -50kPa. Khi hoạt động sai lệch nhiệt độ lớn nhất là 5°C, từ phút thứ 10 nhiệt độ rất ổn định. Sai lệch áp suất là 5kPa. Sản phẩm sấy trong 15 phút, năng lượng tiêu tốn là 80Wh. Lượng nước thoát ra khỏi sản phẩm 26g. Giai đoạn cuối nhiệt độ ổn định quanh điểm 60°C. Năng lượng cần thiết để thoát 1g nước là 3,07W.



Hình 8. Bộ thiết bị thử nghiệm sấy vi sóng chân không



Hình 9. Công suất tiêu thụ theo PID

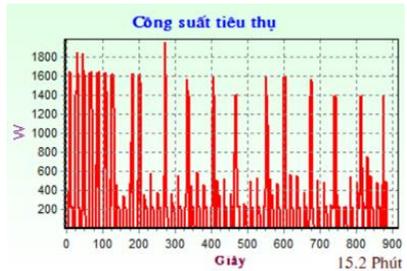


Hình 10. Nhiệt độ sản phẩm theo PID

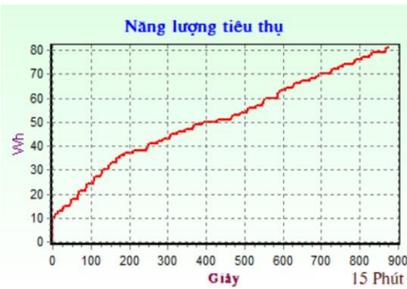
Hình 13-16 là kết quả vận hành sấy chân không điều khiển nhiệt độ theo kiểu on/off, các tham số khác tương tự thử nghiệm theo PID. Nhiệt độ sấy đặt ở 60°C, áp suất chân không ổn định ở -50kPa. Khi hoạt động sai lệch nhiệt độ lớn nhất là 3°C. Sai lệch áp suất



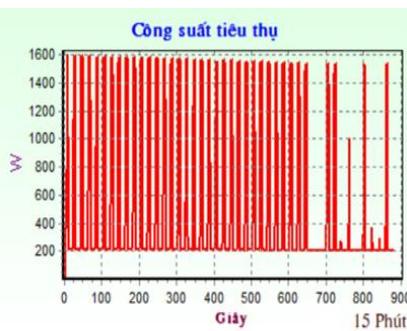
Hình 11. Năng lượng tiêu thụ theo PID



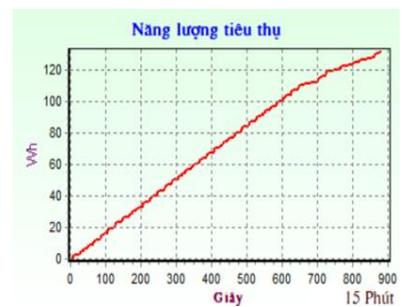
Hình 13. Công suất tiêu thụ theo on/off



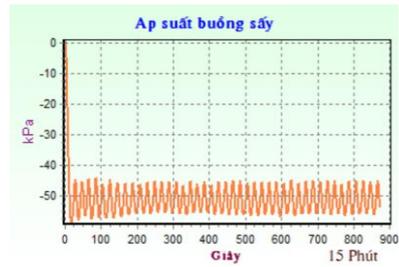
Hình 15. Năng lượng tiêu thụ theo on/off



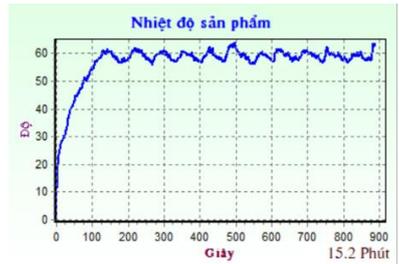
Hình 17. Công suất tiêu thụ theo PID



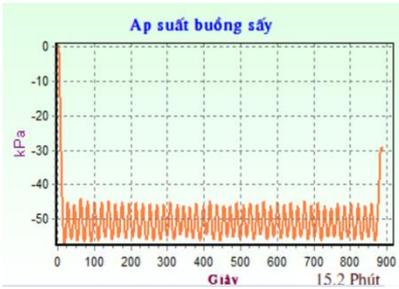
Hình 19. Năng lượng tiêu thụ theo PID



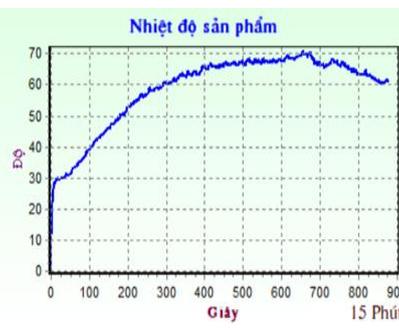
Hình 12. Áp suất buồng sấy



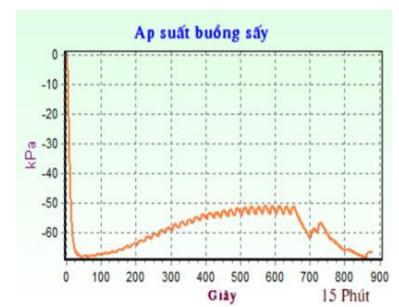
Hình 14. Nhiệt độ sản phẩm theo on/off



Hình 16. Áp suất buồng sấy



Hình 18. Nhiệt độ sản phẩm theo PID



Hình 20. Áp suất buồng sấy

là 5kPa. Sản phẩm sấy trong 15 phút, năng lượng tiêu tốn là 83Wh. Lượng nước thoát ra khỏi sản phẩm 24g. Nhiệt độ dao động nhiều hơn phương pháp điều khiển

PID. Năng lượng cần thiết để thoát 1g nước là 3,45W, tốn nhiều hơn so với phương án PID ở cùng một điều kiện làm việc.

Nhằm kiểm nghiệm tính ổn định của bộ điều khiển trong các điều kiện làm việc khác [2], nhiệt độ sấy được đặt ở 65°C, áp suất chân không đặt giá trị -70kPa. Hình 17-20 là kết quả vận hành sấy điều khiển nhiệt độ theo PID kết hợp với bộ điều khiển bơm. Khi hoạt động, sai lệch nhiệt độ lớn nhất là 4°C. Sản phẩm sấy trong 15 phút, năng lượng tiêu tốn là 129Wh. Lượng nước thoát ra khỏi sản phẩm 45g. Mặc dù giữa thời gian thử nghiệm, áp suất chân không không duy trì được giá trị đặt do lượng hơi nước thoát ra lớn hơn lưu lượng của bơm nhưng nhiệt độ sấy vẫn được duy trì ổn định.

Khoảng cuối thời gian thử nghiệm, tốc độ thoát hơi nước chậm lại, bộ điều khiển đã đưa áp suất buồng chân không về giá trị đặt. Như vậy bộ điều khiển hoạt động ổn định trong điều kiện áp suất, nhiệt độ đặt thay đổi.

#### 4.2. Thực nghiệm sấy trong thời gian dài

Các trường hợp thực nghiệm với thời gian dài hơn được tổng kết trong Bảng 2. Áp suất chân không và nhiệt độ sấy ảnh hưởng nhiều tới khả năng thoát ẩm của nguyên liệu đầu vào.

Bảng 2. Thực nghiệm sấy sản phẩm

Stt	Sản phẩm	Điều kiện	Thoát nước	Độ ẩm
1	Khoai tây	60°C, -50kPa 25 phút	46g	0,69
2	Khoai tây	60°C, -60kPa 25 phút	55g	0.63
3	Khoai tây	60°C, -60kPa 30 phút	65g	0.57
4	Khoai lang	60°C, -50kPa 25 phút	48g	0.68
5	Khoai lang	60°C, -60kPa 25 phút	56g	0.62
6	Khoai lang	60°C, -60kPa 30 phút	69g	0.54

#### 4.3. Đánh giá về cảm quan

Đánh giá về cảm quan sản phẩm sau quá trình sấy vi sóng chân không trong điều kiện thực nghiệm bộ điều khiển PID cho bộ phận phát vi sóng được thể hiện trên Hình 21. Đánh giá cảm quan về màu sắc, hình dạng và cấu trúc của thành phẩm được giữ tương đối tốt so với nguyên liệu đầu vào. Sản phẩm có độ xốp, rỗng lớn hơn so với phương án sấy bằng gia nhiệt đối lưu.



Hình 21. Hình ảnh sản phẩm trước và sau khi sấy

## 5. Kết luận

Các kết quả thực nghiệm cho thấy, bộ điều khiển sấy vi sóng chân không sử dụng thuật toán điều khiển PID ổn định nhiệt độ kết hợp với bơm hút chân không cho chất lượng sấy tốt hơn phương án điều khiển độc lập bộ tạo vi sóng và máy hút chân không theo kiểu điều khiển on/off. Giải pháp do nhóm tác giả đề xuất có ưu điểm là đơn giản, có thể sử dụng để nâng cao chất lượng các hệ thống sấy vi sóng chân không hiện có trên thị trường.

Do một số khó khăn về cơ sở vật chất, phần đánh giá các chỉ tiêu chất lượng như hàm lượng đường, hàm lượng protein chưa được đề cập, trong thời gian tới nhóm tác giả hoàn thiện thêm để áp dụng vào sản xuất.

### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT23-24.50.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trần Văn Phú (2008), *Kỹ thuật sấy*, Nhà Xuất bản Giáo dục, Hà Nội.
- [2] Phan Thế Duy, Nguyễn Thành Văn, Võ Thị Dâng, Đỗ Văn Thanh (2022), *Đánh giá khả năng ứng dụng thiết bị sấy vi sóng chân không dựa trên sự biến đổi các thành phần dinh dưỡng ở khoai lang tím*, Tạp chí khoa học công nghệ và thực phẩm, Tập 22 - Số 02, tr.75-82.
- [3] Yongsawatdigul J., Gunasekaran S (1996), *Microwave-vacuum drying of cranberries: Part II. Quality evaluation*, J. Food Process. Preserv Vol. 20, Issue 2, pp.145-156.  
DOI:10.1111/j.1745-4549.1996.tb00851.x
- [4] [https:// FoSciTech/](https://FoSciTech/) Quy trình xác định độ ẩm chỉ tiết nhất.
- [5] Trần Tấn Hậu, Nguyễn Ngọc Hoàng, Đặng Minh Tâm, Dương Thị Tú Anh (2018), *Nghiên cứu quá trình sấy tôm bằng phương pháp sấy chân không vi sóng*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Nông nghiệp Việt Nam, Số 4(89).

Ngày nhận bài:	06/04/2024
Ngày nhận bản sửa lần 01:	15/04/2024
Ngày nhận bản sửa lần 02:	20/04/2024
Ngày duyệt đăng:	25/04/2024