

THIẾT KẾ BỘ ĐIỀU KHIỂN MỜ CHO HỆ THỐNG SẤY VI SÓNG CHÂN KHÔNG

DESIGNING A FUZZY CONTROLLER FOR A VACUUM MICROWAVE DRYING SYSTEM

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

Chất lượng sản phẩm sấy vi sóng chân không phụ thuộc vào các tham số khối lượng nguyên liệu, công suất sấy, nhiệt độ và áp suất chân không. 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. Một bộ điều khiển mờ hai biến đầu vào để điều khiển ổn định nhiệt độ sấy có tiềm năng lớn trong việc tăng cường quá trình sấy và cải thiện chất lượng và hiệu quả. Các kết quả thực nghiệm cho thấy khả năng sấy nhanh, ổn định nhiệt độ và tốc độ gia nhiệt.

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

Abstract

The quality of vacuum microwave dried products depends on the parameters of raw material mass, drying power, temperature and vacuum pressure. This paper proposes a control algorithm for the microwave drying process in a vacuum environment with a time-continuous coordinated control structure. A two-input fuzzy controller for stable control of drying temperature has great potential in enhancing the drying process and improving the quality and efficiency. The experimental results show the ability of fast drying, stable temperature and heating rate.

Keywords: Microwave drying, Microwave Vacuum Drying.

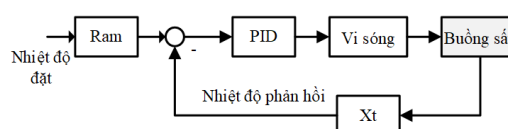
1. Đặt vấn đề

Các phương pháp sấy truyền thống như phơi nắng, sấy bức xạ, sấy truyền nhiệt đều dựa trên nguyên tắc làm nóng vật liệu từ ngoài vào trong. Quá trình gia nhiệt quá nhanh sẽ làm chênh lệch nhiệt độ lớn giữa các phần trong vật liệu dẫn tới giảm chất lượng sản phẩm. Vì vậy, quá trình sấy thường diễn ra chậm, tốn nhiều năng lượng [1].

Sấy vi sóng chân không có đặc điểm các chùm tia

vi sóng kích thích các phân tử nước trong vật liệu dao động và hấp thụ năng lượng vi sóng làm cho nhiệt độ của chúng tăng lên. Vi sóng có khả năng đâm xuyên cao nên nhiệt độ của các phân tử nước trong nguyên liệu sẽ được gia tăng khá đồng đều, kết hợp với áp suất thấp làm cho phân tử nước dễ hóa hơi và thoát ra khỏi vật liệu sấy nên nhiệt độ buồng sấy sẽ không cần quá cao. Những phần còn lại của vật liệu hầu như không hấp thụ năng lượng vi sóng, không chịu nhiệt độ cao nên gần như không có sự biến đổi về vật lý, hóa học tới sản phẩm sấy [2], [3].

Các thiết bị sấy vi sóng chân không trên thị trường hiện nay được thiết kế để vận hành ổn định nhiệt độ sấy theo kiểu on/ off hoặc PID như Hình 1. Để có sản phẩm sấy tốt cần tiến hành thử nghiệm nhiều mẻ sản phẩm để tìm ra các tham số vận hành. Mặt khác, các nguyên liệu khác nhau về chủng loại và khối lượng cần những bộ tham số khác nhau. Những thiết bị sấy này thường không có khả năng điều khiển quá trình sấy dựa trên tốc độ gia nhiệt hay tốc độ thoát ẩm.



Hình 1. Bộ điều chỉnh nhiệt độ

Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày về bộ điều khiển mờ để điều khiển ổn định nhiệt độ và tốc độ sấy dựa trên tín hiệu nhiệt độ, áp suất và khối lượng được đo liên tục theo thời gian.

2. Thuật toán điều khiển mờ

2.1. Xác định độ ẩm của nguyên liệu

Độ ẩm của vật liệu sấy w được tính toán theo công thức [5]:

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

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

Với các tham số w , m_o , m_1 : Lần lượt là độ ẩm, khối lượng của mẫu thử trước và sau khi sấy; m_2 , m_3 :

Là khối lượng của sản phẩm mẫu trước và sau khi sử lý sơ bộ; độ ẩm được tính theo % của khối lượng.

Các mẫu thử được cân để xác định khối lượng sau đó được đưa vào tủ sấy có nhiệt độ $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Sau khoảng thời gian sấy từ 1-6 giờ sẽ được lấy ra khỏi tủ sấy, để nguội đến nhiệt độ phòng trong 20 - 30 phút rồi cân lại. Lặp lại các kết quả cho đến khi khối lượng mẫu không đổi.

Trong sấy công nghiệp, độ ẩm của sản phẩm được tính nhanh như sau:

$$w = \frac{m - m_1}{m} \quad (2)$$

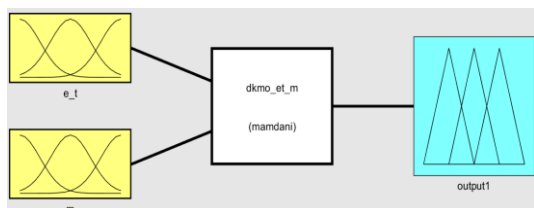
2.2. Cấu trúc bộ điều khiển sấy

Sấy vi sóng chân không bao gồm điều khiển nhiệt độ sấy kết hợp điều khiển ổn định áp suất chân không. Trong bài báo này, tác giả tập chung vào thiết kế điều khiển mờ cho phần ổn định sấy. Điều khiển ổn định áp suất chân không được nhóm tác giả dùng cấu trúc điều khiển đơn giản có dạng hysteresis được trình bày trên Hình 7. Độ trễ chuyển mạch được cài đặt bằng phần mềm với giá trị trễ nhỏ nhất 2kPa.

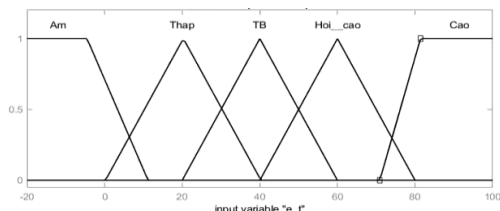
Quá trình gia nhiệt nguyên liệu sấy phụ thuộc vào công suất vi sóng, khối lượng nguyên liệu, áp suất chân không và đặc điểm cấu tạo của nguyên liệu. Bộ điều khiển mờ ổn định nhiệt độ sấy được các tác giả thiết kế và trình bày trên Hình 2. Hai đầu vào bộ điều khiển mờ là độ sai lệch nhiệt độ và khối lượng nguyên liệu. Biến ngôn ngữ được lựa chọn như sau:

$e-t = \{\text{Am, Thap, TB, Hoi_cao, Cao}\};$

$m = \{\text{Nho, Hoi_nho, TB, Hoi_lon, Lon}\}.$



Hình 2. Bộ điều khiển mờ nhiệt độ sấy



Hình 3. Biến đầu vào sai lệch nhiệt độ

Để tránh nguyên liệu sấy là nông sản bị biến đổi hóa học (bị chín) dải giá trị nhiệt độ được chọn từ 0-100°C. Khối lượng nguyên liệu được tính theo đơn

vị % với dải giá trị từ 0-100%. Độ lớn của các biến đầu vào tối đa là 1. Hình 2 và 3 trình bày các luật hợp thành cho biến đầu vào.

Đầu ra của bộ điều khiển mờ là công suất vi sóng có biến ngôn ngữ được chọn như sau:

Output1 = {Không, Thap, TB, Lon, Max}.

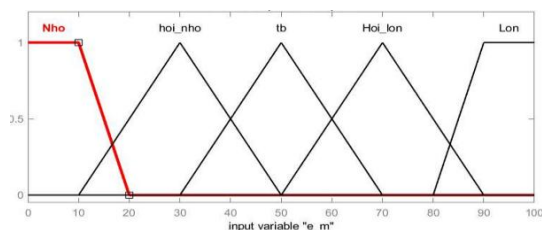
Giá trị của biến đầu ra trong khoảng 0 -100 tương ứng với công suất vi sóng từ 0 đến 100%.

Việc chọn 5 biến ngôn ngữ cho 2 đầu vào nhằm cân bằng giữa tốc độ tính toán của hệ thống điều khiển và độ ổn định của đầu ra. Phương pháp giải mờ trọng tâm với luật hợp thành là MAX-MIN, luật điều khiển được chọn theo Bảng 1.

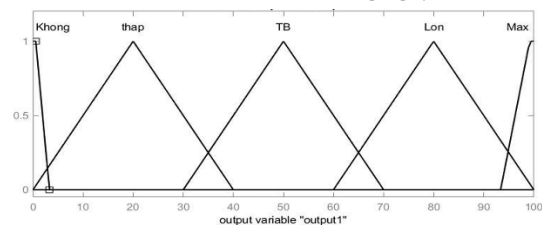
Bảng 1. Luật điều khiển mờ

M \ e-t	Am	Thap	TB	Hoicao	Cao
Nho	Khong	Khong	Thap	TB	TB
Hoinho	Khong	Thap	Thap	TB	Lon
TB	Khong	TB	TB	Lon	Max
Hoilon	Khong	TB	TB	Lon	Max
Lon	Khong	Lon	Lon	Max	Max

Lưu đồ điều khiển sấy vi sóng chân không được trình bày trên Hình 8. Quá trình cân nguyên liệu, đo nhiệt độ, độ ẩm được thực hiện liên tục theo vòng quét với chu kỳ 0,05s.



Hình 4. Biến đầu vào khối lượng nguyên liệu



Hình 5. Biến đầu ra công suất vi sóng

2.3. Xây dựng mô hình trên Matlab Simulink

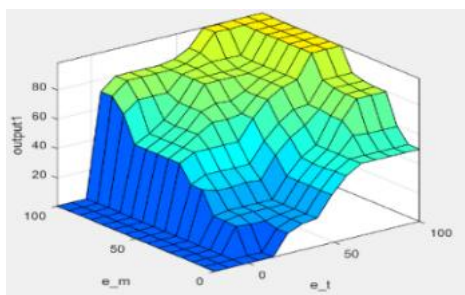
Trong bài báo này nhóm tác giả xây dựng mô hình điều khiển và thu thập dữ liệu bằng phần mềm matlab kết hợp với vi điều khiển STM32F411 vận hành ở chế độ External mode. Mô hình hệ thống điều khiển được thể hiện trên Hình 10. Tham số điều khiển được lấy từ

Bảng 2. Khu vực quanh lò vi sóng có rất nhiều nhiễu điện từ vì vậy cần sử dụng khối thông thấp để loại bỏ nhiễu. Khối chuẩn hóa nhiệt độ để chuyển đơn vị đo nhiệt độ về °C, Chuẩn hóa khối lượng về hệ đơn vị tương đối với 2kg tương ứng 100%. Chuẩn hóa áp suất về hệ đơn vị Kpa. Tính toán độ ẩm theo công thức (2) được đặt trong khối chuẩn hóa khối lượng,

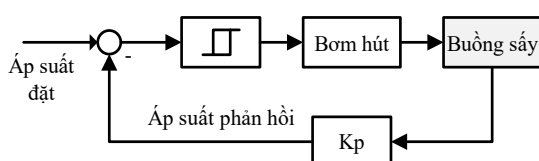
Bảng 2. Thông số máy sấy vi sóng chân không

Stt	Thông số	Đơn vị
1	Thể tích	8 dm ³
2	Cảm biến áp suất	±100kPa
3	Lưu lượng bơm	65 lit/phút
4	Nhiệt độ làm việc	-10 °C đến 120°C
5	Công suất bơm	250W
6	Bộ phát vi sóng	1400W

Thiết bị phát vi sóng có công suất cố định 1400W. Vì vậy một khâu PWM được thêm vào để tạo ra công suất trung bình theo thời gian với chu kỳ đóng cắt 5s, độ phân giải thời gian là 0,05s. Hệ số khuếch đại đầu ra được chọn là 1,8.



Hình 6. Mối quan hệ giữa đầu vào và đầu ra mờ



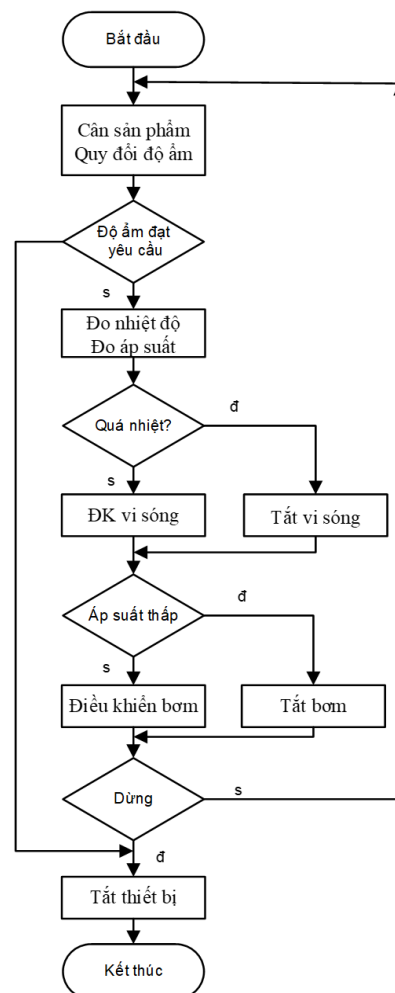
Hình 7. Bộ điều chỉnh áp suất chân không

2.4. Thuật toán điều khiển

Thuật toán điều khiển phối hợp giữa ổn định áp suất chân không và điều khiển gia nhiệt, ổn định nhiệt độ sấy được trình bày trên lưu đồ Hình 8.

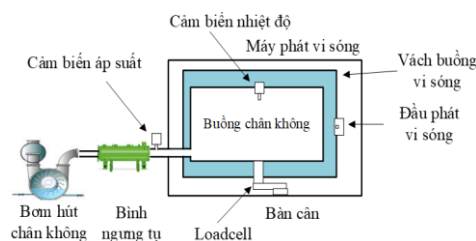
Điều khiển phát vi sóng và bơm hút chân không được tiến hành tự động. Khi bắt đầu khởi động, quá trình cân sẽ xác định khối lượng ban đầu của nguyên liệu. Khối lượng nguyên liệu được cân liên tục theo nhịp của chu kỳ điều khiển là 0,05s. Sử dụng công thức (2) để tính toán độ ẩm nguyên liệu. Điều khiển nhiệt độ được tiến hành đồng thời với điều khiển áp

suất chân không. Để nâng cao độ an toàn và tiết kiệm năng lượng trong quá trình vận hành, khi nhiệt độ cao hơn giới hạn 100°C, bộ phát vi sóng sẽ được cường ép dừng hoạt động. Khi áp suất thấp hơn -99kPa, bơm sẽ bị ép tắt.



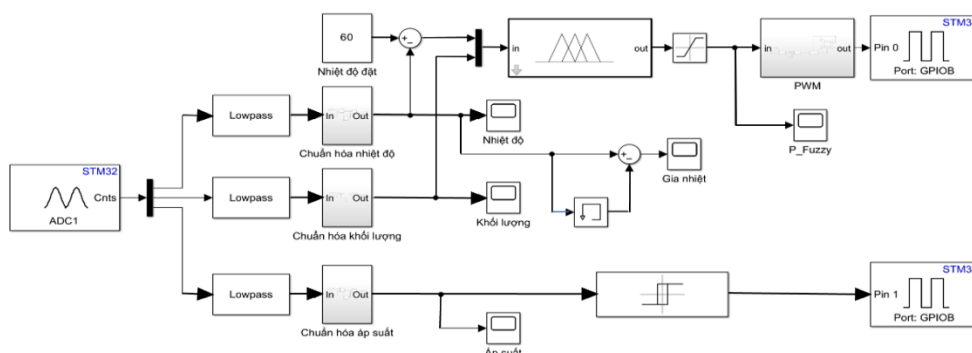
Hình 8. Lưu đồ điều khiển tự động sấy

3. Mô hình thiết bị sấy vi sóng chân không

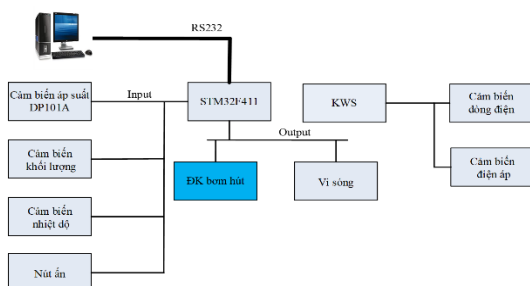


Hình 9. Máy sấy vi sóng chân không

Máy sấy vi sóng chân không được chế tạo thử nghiệm như Hình 9. Thiết bị sấy có thể tích buồng vi sóng là 8dm³, buồng chân không hoạt động ổn định với



Hình 10. Mô hình điều khiển mờ trên Simulink



Hình 11. Cấu trúc bộ điều khiển



Hình 12. Thiết bị sấy thực nghiệm

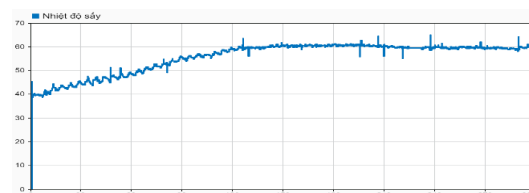
áp suất chân không tới -95kPa ở nhiệt độ 120°C. Máy bơm hút áp suất âm có công suất trung bình 250W với lưu lượng bơm 60 lít/ phút. Bình ngưng tụ nằm trung gian giữa buồng sấy và bơm được giải nhiệt bằng nước lạnh để hóa lỏng hơi nước và chứa nước ngưng tụ. Thiết bị phát vi sóng có công suất định mức 1400w; tần số vi sóng 2450MHz. Cảm biến nhiệt độ loại PT100 kết hợp bộ chuyển đổi RTD 0-200°C. Cảm biến tải trọng dùng để cân liên tục nguyên liệu là loại Loadcell 5kg. Cảm biến đo áp suất âm ZSE30A có dải đo ± 100 kPa.

Cấu trúc bộ điều khiển thực nghiệm (Hình 11). Vi điều khiển 32bit STM32F411 dùng để tính toán giá trị điều khiển mờ đồng thời với điều khiển ổn định áp suất bơm. Modul đo công suất KWS dùng để đo các tham số điện áp, dòng điện công suất, để so sánh, đánh giá hiệu suất năng lượng. Vi điều khiển STM32F411 được kết nối với máy tính qua đường truyền RS232 để thu thập và vẽ đồ thị các tham số vận hành bao gồm: Khối lượng nguyên liệu, nhiệt độ, áp suất, độ ẩm và công suất vi sóng. Thiết bị thực nghiệm được trình bày trên Hình 12 bao gồm lò vi sóng, buồng chân không bằng thủy tinh đặt bên trong lò, bộ điều khiển phía trên lò và máy tính giám sát, Bơm chân không được kết nối với buồng sấy chân không bằng ống nhựa mềm.

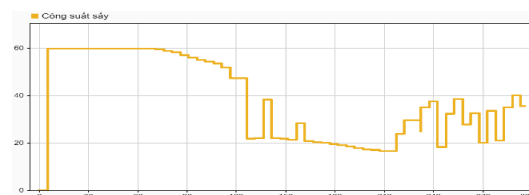
4. Kết quả thực nghiệm

Nhóm tác giả tiến hành thực nghiệm bộ điều khiển

trên 2 loại nông sản là khoai tây và khoai lang. Nguyên liệu được cắt lát với độ dày 0,5cm xếp đều trong buồng chân không.



Hình 13. Nhiệt độ sấy thực nghiệm 1



Hình 14. Công suất sấy thực nghiệm 1

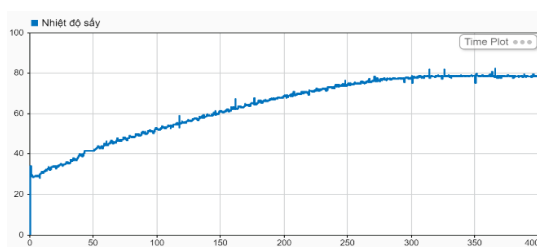


Hình 15. Áp suất buồng sấy thực nghiệm 1

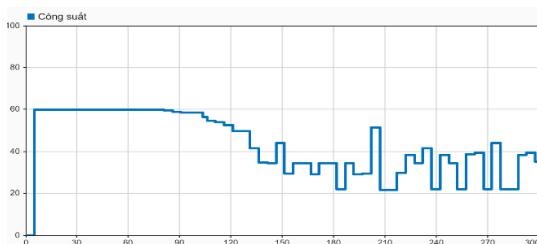
Thực nghiệm 1: Vận hành với nhiệt độ sấy đặt ở ngưỡng 60°C. Áp suất chân không -90kPa. Khối lượng sấy 25% định mức, thời gian thử nghiệm 300s. Hình 13 cho thấy hệ thống sấy có nhiệt độ sấy ổn định, không có quá trình quá độ nhiệt độ sấy, thời gian gia nhiệt khoảng 120s cho nhiệt độ nguyên liệu tăng 20°C. Hình 14 biểu diễn công suất vi sóng trong quá trình sấy, với khối lượng nguyên liệu nhỏ, công suất sấy được giảm xuống để quá trình gia nhiệt không bị quá nhanh gây biến chất sản phẩm.

Hình 15 là kết quả điều khiển ổn định áp suất buồng sấy. Áp suất được duy trì trong khoảng -88kPa tới 92kPa. Phối hợp giữa bộ tạo áp suất chân không và bộ phận phát vi sóng thể hiện trên Hình 14, khoảng 7s đầu tiên áp suất buồng sấy vẫn lớn hơn -30kPa thiết bị phát vi sóng chưa hoạt động.

Thực nghiệm 2: Tiếp tục thử nghiệm với khối lượng sấy 50% định mức, nhiệt độ đặt sấy ở 60°C. Hình 16 cho thấy hệ thống sấy có nhiệt độ sấy ổn định, không có hiện tượng quá độ nhiệt độ sấy, thời gian gia nhiệt trong khoảng 60s cho nhiệt độ nguyên liệu tăng 10°C. Hình 17, công suất vi sóng lớn hơn trường hợp đầu một chút. Trong cả 2 trường hợp, công suất sấy được huy động lớn nhất là 60% định mức.

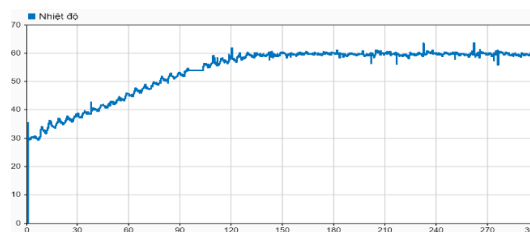


Hình 16. Nhiệt độ sấy thực nghiệm 2

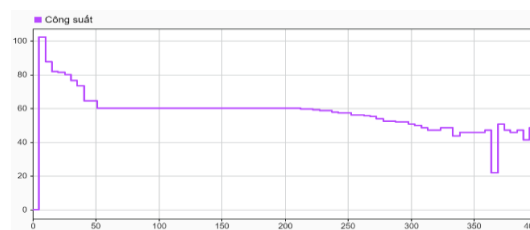


Hình 17. Công suất sấy thực nghiệm 2

Thực nghiệm 3: Thử nghiệm với khối lượng sấy 50% định mức, nhiệt độ đặt sấy ở 80°C, thời gian sấy 400s. Hình 18 cho thấy hệ thống sấy có nhiệt độ sấy ổn định, không có hiện tượng quá độ nhiệt độ sấy, có một chút sai lệch tĩnh (-1,3°C) ở vùng nhiệt độ này. thời gian gia nhiệt vẫn tương đương các trường hợp trước. Công suất vi sóng đạt 100% trong khoảng 6s sau đó giảm dần.

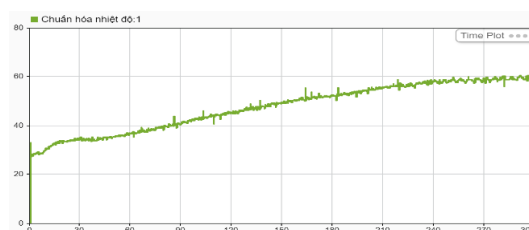


Hình 18. Nhiệt độ sấy thực nghiệm 3

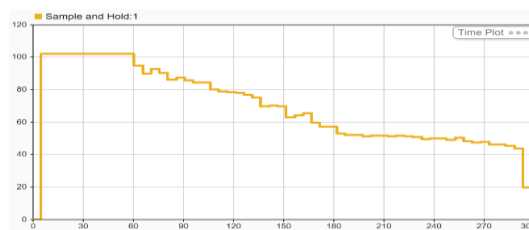


Hình 19. Công suất sấy thực nghiệm 3

Thực nghiệm 4: Thử nghiệm với khối lượng sấy 100% định mức, nhiệt độ đặt sấy ở 60°C, thời gian sấy 300s. Tương tự các trường hợp trước, nhiệt độ sấy được tăng đều và ổn định, Hình 20 cho thấy hệ thống sấy có nhiệt độ sấy ổn định, không có hiện tượng quá độ nhiệt độ sấy, thời gian gia nhiệt vẫn tương đương các trường hợp trước ~9°C/60s, sai lệch tĩnh khoảng -0,9°C. Công suất vi sóng đạt 100% trong khoảng 56s sau đó giảm dần.



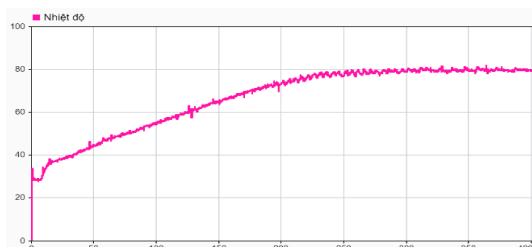
Hình 20. Nhiệt độ sấy thực nghiệm 4



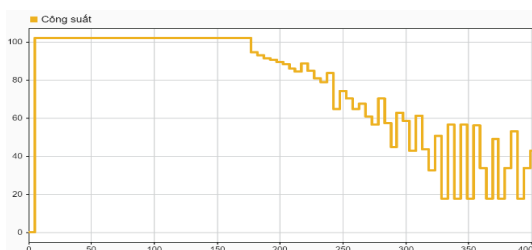
Hình 21. Công suất sấy thực nghiệm 4

Thực nghiệm 5: Thử nghiệm với khối lượng sấy 99% định mức, nhiệt độ đặt sấy ở 80°C, thời gian sấy 400s. Hình 22 cho thấy nhiệt độ được điều khiển ổn định, không có hiện tượng quá điều chỉnh nhiệt, độ gia nhiệt trong giai đoạn đầu cao hơn các trường hợp trước một chút, đạt giá trị 10°C/55s. Công suất ra đầu

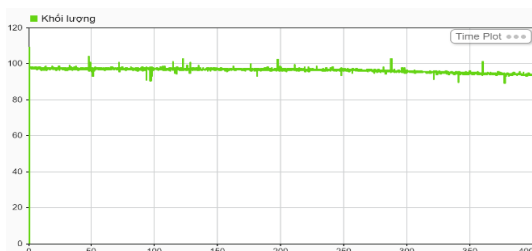
ra của bộ điều khiển mờ đạt 100% trong khoảng 174s sau đó giảm dần. Hình 24 thể hiện khối lượng sản phẩm giảm khoảng 4,5% sau khi kết thúc quá trình sấy, độ ẩm giảm khoảng 2,3% sau quá trình sấy.



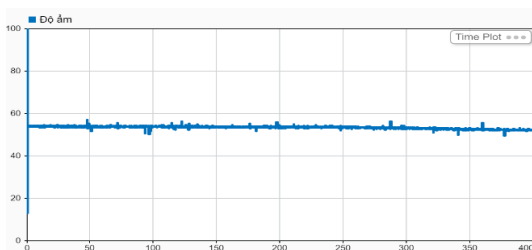
Hình 22. Nhiệt độ sấy thực nghiệm 5



Hình 23. Công suất sấy thực nghiệm 5



Hình 24. Khối lượng nguyên liệu sấy 5



Hình 25. Độ ẩm khi sấy thực nghiệm 5

5. Kết luận

Từ các kết quả thực nghiệm, bộ điều khiển sấy vi sóng chân không sử dụng thuật toán điều khiển mờ với 2 biến đầu vào là sai lệch nhiệt độ và khối lượng nguyên liệu để điều khiển ổn định nhiệt độ sấy có sai lệch tĩnh lớn nhất là $-1,3^{\circ}\text{C}$ và không có quá độ nhiệt độ. So với phương án sấy theo kiểu điều khiển PID [4] có sai lệch tới 4°C , quá nhiệt tới 6°C thì bộ điều khiển mờ có chất lượng tốt hơn hẳn. Không chỉ ổn định nhiệt độ sấy, tốc độ gia nhiệt đã được hiệu chỉnh theo khối lượng của nguyên liệu, đây là yếu tố quan trọng mà bản thân các

bộ điều khiển on/off hay PID không thể làm được.

Thử nghiệm với công suất vi sóng lớn hơn và phân tích ảnh hưởng của nhiễu điện từ đến sai số phép đo là những định hướng phát triển của nhóm tác giả trong thời gian tới để công trình nghiên cứu có thể áp dụng tốt hơn vào thực tiễn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT24-25.62**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Nguyễn Văn May (2004), *Kỹ thuật sấy nông sản thực phẩm*, NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- [2] 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, tr.115-119.
- [3] Yongsawatdigul J, Gunasekaran S (1996), *Microwave-vacuum drying of cranberries: Part II. Quality evaluation*, J. Food Process, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-4549.1996.tb00851.x>
- [4] Vũ Ngọc Minh, Phạm Thị Hồng Anh (2024), *Nghiên cứu thiết kế bộ điều khiển sấy vi sóng chân không*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 79, tr.41-46.
- [5] [https:// FoSciTech/](https://FoSciTech/) Quy trình xác định độ ẩm chi tiết nhất.

Ngày nhận bài:	04/04/2025
Ngày nhận bản sửa:	14/04/2025
Ngày duyệt đăng:	15/04/2025