

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

PHẠM VĂN TOẢN

NGHIÊN CỨU KỸ THUẬT SẤY MỰC ÓNG

Chuyên ngành: Kỹ thuật cơ khí

Mã ngành: 9.52.01.03

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

TP. HỒ CHÍ MINH - NĂM 2019

Công trình được hoàn thành tại:

- Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh
- Trường Đại học Lạc Hồng

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS. Lê Anh Đức
2. GS.TS. Nguyễn Hay

Người phản biện:

1.
2.

Luận án được bảo vệ trước hội đồng đánh giá luận án cấp trường

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1.
2.
3.

MỞ ĐẦU

1. Đặt vấn đề

Với chiều dài bờ biển hơn 3200 km, Việt Nam là nước có nguồn thủy hải sản phong phú. Trong đó, mực ống là loại hải sản có sản lượng lớn và giá trị xuất khẩu cao. Theo số liệu điều tra của Viện nghiên cứu Hải sản (2014), Việt Nam có khoảng 25 loại mực ống khác nhau, với sản lượng đánh bắt hàng năm khoảng 24000 tấn. Mực khô là loại hải sản được ưa thích ở Việt Nam và một số nước Châu Á nhờ hương vị thơm ngon và giàu chất dinh dưỡng. Hiện nay, mực khô là một trong những mặt hàng xuất khẩu quan trọng sang Hàn Quốc, Nhật Bản, ASEAN của ngành thủy sản Việt Nam.

Để có sản phẩm mực khô, người ta làm giảm độ ẩm của mực từ độ ẩm ban đầu 80% xuống độ ẩm khoảng 25% (TCVN, 2014). Hiện nay, phơi nắng là phương pháp làm khô mực phổ biến nhất ở Việt Nam vì chi phí đầu tư thấp và không đòi hỏi trình độ kỹ thuật. Tuy nhiên, phương pháp này lại phụ thuộc vào thời tiết và không đảm bảo vệ sinh an toàn thực phẩm (Jain, 2007). Phương pháp sấy không khí nóng cũng đã được sử dụng rộng rãi để khắc phục nhược điểm của phương pháp phơi nắng, tuy nhiên nhược điểm của phương pháp này là do nhiệt độ tác nhân sấy cao nên không giữ được các chất dinh dưỡng trong mực dẫn đến làm giảm chất lượng sản phẩm. Theo các kết quả nghiên cứu về sấy mực (Deng và ctv, 2014; Wang, 2014; Chen, 2013), nhiệt độ để sấy mực thường không vượt quá 60°C. Khi nhiệt độ sấy cao hơn 60°C, các chất dinh dưỡng có trong mực sẽ bị phân hủy mạnh trong quá trình sấy. Cùng với sự phát triển của công nghệ, nhiều phương pháp sấy có ưu điểm tốt để sấy sản phẩm ở mức nhiệt độ thấp hơn 60°C như sấy bơm nhiệt, sấy chân không, sấy thăng hoa, hoặc sấy kết hợp một vài phương pháp với nhau,... Trong các phương pháp trên thì phương pháp sấy bơm nhiệt rất thích hợp để sấy sản phẩm mực ống do giá thành máy phù hợp, chi phí sấy thấp và đảm bảo được chất lượng của mực sau khi sấy như giữ được hàm lượng chất dinh dưỡng, màu sắc, mùi vị của sản phẩm (Mujumdar, 2014). Bên cạnh những ưu điểm vượt trội so với các phương pháp sấy khác thì phương pháp sấy bơm nhiệt cũng tồn tại nhược điểm nhất định, một trong những nhược điểm của phương pháp sấy này là chênh lệch nhiệt độ thấp do sấy ở nhiệt độ thấp. Điều này dẫn đến việc kéo dài thời gian sấy và hệ quả là làm tăng chi phí năng lượng cho quá trình sấy (QTS). Để khắc phục nhược điểm này, các máy sấy bơm nhiệt thường được trang bị thêm các thiết bị hỗ trợ gia nhiệt như dùng sóng hồng ngoại, sóng vi sóng, sóng siêu âm.

Đã có một số tác giả tiến hành nghiên cứu về sấy mực sử dụng phương pháp sấy bơm nhiệt cũng như sấy bơm nhiệt kết hợp với sóng hồng ngoại (Chen và ctv, 2013; Deng và ctv, 2013; Nathakaranakule và ctv, 2010). Tuy nhiên cho đến nay các tác giả chỉ chủ yếu tập trung vào nghiên cứu thực nghiệm, chưa có công trình nào tiến hành nghiên cứu lý thuyết, xây dựng mô hình toán để mô phỏng sự truyền nhiệt và truyền ẩm trong quá trình sấy mực bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại. Việc nghiên cứu xây dựng và giải thành công mô hình toán mô phỏng quá trình sấy mực bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại sẽ góp phần làm rõ bản chất của hiện tượng trao đổi nhiệt - ẩm trong quá trình sấy. Kết quả đó sẽ giúp dự đoán được tốc độ sấy, phân bố nhiệt độ và độ ẩm của vật liệu trong suốt quá trình sấy. Với mục tiêu xây dựng mô hình lý thuyết nhằm mô phỏng QTS mực từ đó tìm ra chế độ sấy hợp lý để giảm thời gian, chi phí trong toàn bộ QTS và nâng cao chất lượng sản phẩm sau khi sấy chúng tôi tiến hành thực hiện đề

tài “Nghiên cứu kỹ thuật sấy mực ống”.

2. Mục tiêu của đề tài

Nghiên cứu ảnh hưởng của bức xạ hồng ngoại đến quá trình sấy cũng như chất lượng của mực ống khi sấy bằng phương pháp sấy bom nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại, thông qua việc xây dựng mô hình toán để mô phỏng truyền nhiệt truyền ẩm và thực nghiệm xác định chế độ sấy cho mực ống.

3. Nội dung nghiên cứu

Đề đạt được mục tiêu của đề tài luận án tập trung giải quyết các nội dung chính sau:

- Tìm hiểu tổng quan về kỹ thuật sấy mực ống trong và ngoài nước, các công trình nghiên cứu đã công bố, từ đó phân tích đánh giá đề xuất phương pháp sấy mực ống phù hợp với điều kiện tại Việt Nam.
- Nghiên cứu thực nghiệm xác định các tính chất nhiệt vật lý của mực ống tại Việt Nam.
- Xây dựng mô hình toán lý thuyết để mô tả quá trình truyền nhiệt truyền ẩm của QTS mực ống bằng bom nhiệt có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại.
- Nghiên cứu thực nghiệm nhằm kiểm chứng mô hình toán lý thuyết.
- Sử dụng kết quả mô phỏng và phương pháp quy hoạch thực nghiệm để xác định các thông số công nghệ phù hợp cho QTS, nhằm đảm bảo chất lượng với thực tế sản xuất mực ống tại Việt Nam.

4. Điểm mới của đề tài

- Xác định các thông số nhiệt vật lý của mực ống Việt Nam phụ thuộc theo độ ẩm của vật liệu sấy, các thông số này gồm: nhiệt dung riêng, khối lượng riêng, độ ẩm cân bằng, hệ số khuếch tán ẩm và nhiệt ẩn hóa hơi.
- Xây dựng mô hình toán mô tả quá trình truyền nhiệt truyền ẩm của mực ống trong QTS bằng phương pháp bom nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại và giải hệ phương trình TNTA có xét đến ảnh hưởng của dòng dịch chuyển ẩm đến dòng nhiệt.
- Xác định chế độ sấy phù hợp cho mực ống nhằm đảm bảo chất lượng với điều kiện thực tế sản xuất tại Việt Nam.

Chương 1. TỔNG QUAN

1.1. Tổng quan về mực ống

1.1.1. Nguồn lợi và đặc điểm hình thái

Mực là loại động vật nhạy cảm với biến đổi của điều kiện thủy văn, thời tiết và ánh sáng nên sự di chuyển theo mùa, ngày và đêm. Vào ban ngày lớp nước bề mặt bị ánh sáng mặt trời nung nóng, làm nhiệt độ nước tăng lên, mực ống thường lặn xuống dưới đáy hoặc lớp nước tầng dưới. Ban đêm, khi nhiệt độ nước bề mặt giảm đi, các quần thể mực lại di chuyển từ lớp nước tầng đáy lên bề mặt.

Sản lượng mực ở Việt Nam cho đến nay chưa thống kê được đầy đủ vào khoảng 15 đến 24 ngàn tấn năm. Mực có khắp trong vùng biển ở Việt Nam. Mực có rất nhiều thịt và tổ chức của cơ thịt rất chặt chẽ.

1.1.2. Thành phần hóa học của mực

Thành phần hóa học của động vật thủy sản nói chung và mực nói riêng gồm: Nước, protein, lipid, glucit, vitamin, khoáng... Gluxits của mực tồn tại chủ yếu là glycogen.

Theo Trần Đại Tiến (2007) hàm lượng và thành phần axit amin của mực ống Trung Hoa (*Loligo chinensis*) tại Khánh Hòa-Việt Nam cho thấy thành phần các axit amin rất

phong phú. Mực ống tại Việt Nam có đầy đủ các axit amin không thay thế và nhiều axit amin có giá trị dinh dưỡng cao với hàm lượng lớn như: Valin, loxin, izoloxin, methionin, prolin, lyzin, acginin.

1.1.3. Tiêu chuẩn chất lượng mực ống

Theo tiêu chuẩn Việt Nam năm 2014 về yêu cầu kỹ thuật thủy hải sản khô. Trong đó hải sản mực khô có tiêu chí đánh giá về cảm quan và các chỉ tiêu hóa lý như sau:

❖ Cảm quan

- Màu sắc: Trắng, hồng nhạt.
- Mùi, vị: Có mùi đặc trưng của mực khô, không tanh, vị hơi ngọt, đắng.
- Trạng thái: Khô, bề mặt không dính ướt tay, thân mực thẳng và mình dày, dẻo, dai, không vụn.
- Tạp chất khác: Không có độc tố, vi khuẩn gây bệnh, nấm mốc, sâu bọ, côn trùng...

❖ Chỉ tiêu hóa lý

- Hàm lượng nước: Dưới 25%.
- Hàm lượng Tro không tan trong axit: Dưới 1,5%.
- Hoạt độ nước ở 250C: Dưới 0,75.
- Protein: Trên 15,6%.
- Hàm lượng NaCl: Dưới 2,5%.
- Hàm lượng nitơ bazơ bay hơi: Dưới 350mg/kg.

1.2. Tình hình nghiên cứu trong, ngoài nước về sấy hải sản và hệ thống sấy hồng ngoại

1.2.1. Tình hình nghiên cứu ngoài nước

▪ Sấy bơm nhiệt

Theo Braun (2002), Dirk và ctv (2004), Wang và ctv (2001) sấy bơm nhiệt là một phương pháp tốt để cải thiện chất lượng sản phẩm thủy sản khô sau khi sấy bởi công nghệ sấy ở nhiệt độ thấp và không phụ thuộc vào điều kiện môi trường không khí bên ngoài, có hiệu quả kinh tế cao.

Arason (2003) đã so sánh giá thành về chi phí năng lượng để sấy cá bò khô bằng các phương pháp sấy khác nhau, kết quả được tác giả chỉ ra là phương pháp sấy bơm nhiệt cho chi phí giá thành thấp nhất.

Chua (2000a) báo cáo rằng khi sấy bằng bơm nhiệt tác giả có thể điều chỉnh được thời gian và nhiệt độ sấy để hạn chế sự biến màu của sản phẩm do tác dụng của các phản ứng tạo màu phi enzyme. Qua nghiên cứu thực nghiệm, cường độ biến màu giảm đi 87% khi sấy khoai tây, 75% khi sấy ôi và 67% khi sấy chuối so với sấy bằng không khí nóng. Do giảm được thời gian sấy nên hàm lượng axit ascorbic đã tăng lên 20% khi sấy ôi bằng bơm nhiệt so với sấy truyền thống bằng không khí nóng ở cùng nhiệt độ sấy (Chua, 2000b).

Deng và cộng sự (2013) nghiên cứu sự phân bố độ ẩm và khả năng hồi ẩm của mực cắt lát trên phương pháp sấy bơm nhiệt, thăng hoa và sấy không khí nóng. Kết quả cho thấy sấy khô dẫn đến biến tính và suy thoái protein trong cơ thịt theo thứ tự sấy không khí nóng, sấy bơm nhiệt, sấy thăng hoa. Nhìn chung các mẫu sấy thăng hoa cho chất lượng tốt nhất trong ba phương pháp sấy, mặc dù thời gian sấy của bơm nhiệt dài hơn các mẫu sấy bằng phương pháp không khí nóng, tuy nhiên cấu trúc và protein ít thiệt hại hơn so với phương pháp sấy không khí nóng. Khi so sánh về chi phí sản xuất và chất

lượng sản phẩm, phương pháp sấy bơm nhiệt có khả năng ứng dụng với quy mô công nghiệp hơn các phương pháp sấy khác.

Nghiên cứu của Deng và cộng sự (2014) đã tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của các phương pháp sấy lên cấu trúc myosin, thành phần axit amin và khả năng phân giải protein của mực cắt lát. Nghiên cứu được tiến hành thực nghiệm trên 3 phương pháp là sấy thăng hoa, sấy không khí nóng và sấy bơm nhiệt. Kết quả cho thấy sấy thăng hoa có thành phần axit amin tương tự như các mẫu mực tươi và đạt khả năng tiêu hóa protein trong ống nghiệm cao nhất. Kết quả phân tích các mẫu cũng cho thấy cấu trúc myosin của mực sau khi sấy bằng phương pháp không khí nóng bị phá hủy nhiều hơn so với sấy bơm nhiệt, trong khi các mẫu sấy bằng phương pháp thăng hoa giữ lại gần như cấu trúc myosin ban đầu.

▪ Sấy bức xạ

Theo Pan và các cộng sự (2008) nếu loại bớt nước trong chuỗi cắt lát bằng phương pháp sấy bức xạ hồng ngoại thì độ ẩm giảm đáng kể so với sấy bằng không khí nóng, tốc độ thoát ẩm này sẽ tăng theo sự gia tăng cường độ bức xạ.

Kết quả nghiên cứu của Swasdisevi cùng các cộng sự (2007) đã chỉ ra quá trình làm khô lát chuối sử dụng sóng hồng ngoại trong môi trường chân không có tốc độ làm khô sản phẩm tốt hơn các phương pháp khác.

Ježek và cộng sự (2008) đã nghiên cứu quá trình mất nước của cần tây khi sấy bằng bức xạ hồng ngoại ở nhiệt độ 50°C và 75°C. Kết quả đã chỉ ra rằng: thời gian mất nước phụ thuộc vào hàm lượng của các thành phần dễ bay hơi trong các mẫu cần tây, tức là hàm lượng các thành phần này càng cao thì thời gian loại bỏ chúng càng dài.

Kubota cùng các cộng sự (2003) đã so sánh hiệu quả của sấy bức xạ hồng ngoại so với sấy đối lưu bằng không khí nóng và phơi tự nhiên. Kết quả đã chứng minh: Sấy bằng bức xạ cho chất lượng tốt hơn nhiều so với hai phương pháp còn lại về màu sắc, giữ lại được hàm lượng nucleotide cao, làm giảm được hoạt động không có lợi của acid phosphatase.

Kang và các cộng sự (2011) đã nghiên cứu sấy mực bằng phương pháp sấy không khí nóng và sấy bức xạ hồng ngoại. Nhóm tác giả tiến hành thực nghiệm tại các mức nhiệt độ TNS 40°C, 50°C, 60°C ở các vận tốc TNS 0,6, 0,8, 1,2 m/s. Kết quả cho thấy khi sấy bức xạ hồng ngoại, tốc độ sấy nhanh và tiết kiệm năng lượng hơn. Tại nhiệt độ TNS 40°C và vận tốc TNS 0,8 m/s, phương pháp sấy bức xạ hồng ngoại tiết kiệm 37,4% năng lượng so với phương pháp sấy không khí nóng. Bên cạnh đó, khi sấy bức xạ hồng ngoại cho thấy số lượng vi khuẩn hiếu khí giảm, màu sắc ít thay đổi và độ cứng của mực thấp hơn so với các phương pháp sấy khác.

Meeso (2007) khi nghiên cứu lý thuyết bằng việc giải mô hình toán của QTS lúa có bức xạ hồng ngoại cho thấy mô hình có bức xạ hiệu quả hơn trong việc giảm ẩm và nhiệt độ bên trong hạt lúa.

▪ Sấy bức xạ hồng ngoại kết hợp với một số phương pháp sấy khác

Nathakaranakule và cộng sự (2010), đã nghiên cứu thực nghiệm sấy nhãn sử dụng bức xạ hồng ngoại kết hợp bơm nhiệt. Nhóm tác giả đã nhận xét bức xạ hồng ngoại giúp tăng tốc độ sấy, do đó thời gian sấy giảm, cấu trúc của lòng nhãn xốp hơn, ít tổn hao về sản lượng khi sấy khô và tỷ lệ hồi ẩm cao hơn, giảm độ cứng và trở nên mềm dẻo, màu sắc nhãn khô đỏ và sẫm hơn các mẫu thử không sử dụng bức xạ hồng ngoại. Kết quả cũng cho thấy năng lượng khi sấy có sự hỗ trợ của hồng ngoại thấp hơn khi sấy bơm nhiệt thông thường.

Theo nghiên cứu của Deng và cộng sự (2012) mực ống cắt lát sấy bằng phương pháp bơm nhiệt và sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại ở công suất 500 W và 1000 W, tại nhiệt độ 50°C và vận tốc tác nhân sấy khi sấy 0,8 m/s. Kết quả cho thấy nồng độ acid amin trong tất cả các sản phẩm khô thấp hơn so với mực tươi. Các phương pháp làm khô đã làm giảm chỉ số axit amin cần thiết và cấu trúc protein đã bị phá hủy nhẹ. Nghiên cứu cũng cho thấy phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại có giá trị dinh dưỡng tốt hơn phương pháp sấy bơm nhiệt thông thường.

Chen và cộng sự (2013) nghiên cứu ảnh hưởng của các phương pháp sấy (không khí nóng, vi sóng, hồng ngoại - đối lưu) lên chất lượng của mực. Các thí nghiệm được thực hiện tại ba mức nhiệt độ 50°C, 60°C và 70°C, đối với phương pháp sấy vi sóng thực nghiệm tại mức nhiệt độ là 50°C. Kết quả cho thấy, phương pháp sấy bức xạ hồng ngoại – đối lưu và phương pháp sấy vi sóng cho ra sản phẩm có màu sắc và độ co rút tốt hơn phương pháp sấy không khí nóng. Tuy nhiên, mẫu sấy bằng vi sóng có độ cứng cao nhất.

Wang và các cộng sự (2014) nghiên cứu so sánh chất lượng mực khô tại mức nhiệt độ 50°C. Nghiên cứu được tiến hành bằng thực nghiệm sấy với ba phương pháp (không khí nóng, hồng ngoại – đối lưu và sấy vi sóng) để so sánh chất lượng của mực sau khi sấy. Kết quả cho thấy sản phẩm sau khi sấy bức xạ hồng ngoại – đối lưu có độ co rút thấp, có màu trắng sáng, chất lượng cảm quan tốt hơn so với sấy không khí nóng và vi sóng.

Nghiên cứu của Deng và các cộng sự (2014) nghiên cứu ảnh hưởng của phương pháp sấy bơm nhiệt, bơm nhiệt kết hợp với bức xạ hồng ngoại xa tại các mức công suất 100 W, 500 W và 800 W đến cấu trúc và hàm lượng protein của mực cắt lát. Kết quả cho thấy những thay đổi của các thành phần axit amin không đồng nhất nhưng phụ thuộc vào loại axit amin và phương pháp sấy. Sấy bơm nhiệt hoặc bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại không ảnh hưởng mức độ axit amin thiết yếu và axit amin không thiết yếu, thông qua kết quả phân tích SDS-PAGE cho thấy protein trong mực khô bị hư hại nhẹ. Thông qua việc phân tích các chỉ tiêu về chất lượng và hiệu quả sấy cho thấy sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại tại mức công suất 100 W phù hợp để sấy mực.

Mesery và Mwithiga (2014) nghiên cứu đánh giá các thông số trong QTS sấy hành bằng các phương pháp sấy không khí nóng, sấy bức xạ hồng ngoại, sấy hồng ngoại kết hợp không khí nóng ở nhiều điều kiện khác nhau. Kết quả cho thấy sử dụng sấy bức xạ hồng ngoại kết hợp không khí nóng để sấy lát hành cho mức tiêu thụ năng lượng là thấp nhất.

Vega-Gálvez và cộng sự (2011) tiến hành nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ sấy đến động học QTS, màu sắc, khả năng hồi ẩm của mực khi sấy bằng phương pháp không khí nóng tại các mức 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C. Kết quả cho thấy mô hình toán thực nghiệm Logarithmic và Two-term là phù hợp để dự đoán độ chứa ẩm của mực.

1.2.2. Tình hình nghiên cứu trong nước

Việt Nam là nước có nền nông nghiệp phát triển, sản lượng các loại sản phẩm nông nghiệp chiếm tỷ trọng xuất khẩu rất lớn. Vì vậy, nhu cầu nghiên cứu ứng dụng các kỹ thuật, công nghệ vào trong chế biến và bảo quản sản phẩm nông nghiệp là rất lớn. Trong các nghiên cứu và ứng dụng kỹ thuật sấy để bảo quản sản phẩm, ngoài các phương pháp truyền thống như phơi nắng, sấy đối lưu không khí nóng mà gần đây là sấy sử dụng bơm nhiệt thì phương pháp sấy dùng bơm nhiệt có kết hợp bức xạ hồng ngoại đang dần trở nên phổ biến nhờ tính ưu việt về chất lượng sản phẩm cũng như chi phí cho QTS.

Trần Đại Tiến (2007) thực hiện nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng của một số

chế độ sấy bức xạ hồng ngoại kết hợp với sấy bơm nhiệt đến chất lượng mực ống khô lột da. Kết quả nghiên cứu cho thấy chất lượng mực ống khô được sấy bức xạ hồng ngoại kết hợp với bơm nhiệt tốt hơn so với phương pháp sấy bức xạ - đối lưu. Chế độ sấy bức xạ hồng ngoại kết hợp với sấy lạnh thích hợp nhất: Nhiệt độ sấy $35^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, vận tốc TNS $2 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$, khoảng cách từ đèn bức xạ tới bề mặt mực là 40 cm.

Bùi Ngọc Hùng và ctv (2017), nghiên cứu sấy rong nho bằng các phương pháp sấy: không khí nóng, không khí nóng kết hợp hồng ngoại, bơm nhiệt, bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại nhằm xác định phương pháp sấy và chế độ sấy phù hợp. Kết quả cho thấy thời gian khi sấy rong nho bằng phương pháp không khí nóng là dài nhất (80 phút); phương pháp bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại có thời gian sấy ngắn nhất (35 phút). Độ hồi nguyên của mẫu rong sấy bằng không khí nóng kết hợp bức xạ hồng ngoại và bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại thì đạt 85,20% và 89,46%. Mẫu rong sấy bằng phương pháp bơm nhiệt có độ lệch màu thấp nhất ($\Delta E^* = 4,9$), trong khi mẫu rong nho sấy bằng phương pháp sấy không khí nóng có độ lệch màu lớn nhất ($\Delta E^* = 6,5$).

1.3. Thảo luận

Qua kết quả nghiên cứu đã công bố của các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước ở trên cho thấy phương pháp sấy bằng vi sóng có thời gian sấy ngắn, nhưng sản phẩm mực có độ cứng cao nên không phù hợp để sấy mực (Chen, 2013; Wang, 2014). Phương pháp sấy thăng hoa mặc dù cho chất lượng sản phẩm tốt nhưng chi phí đầu tư máy thiết bị và chi phí sấy quá cao nên không phù hợp để sấy mực. Phương pháp sấy bơm nhiệt có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại có ưu điểm là chi phí đầu tư hệ thống hồng ngoại thấp (Mujumda, 2014), an toàn trong sử dụng (Ning và ctv, 2015) và chi phí tiêu thụ năng lượng giảm (Nathakaranakule, 2010). Đặc biệt, chất lượng của sản phẩm được cải thiện rõ rệt do bức xạ sóng hồng ngoại có khả năng thâm thấu vào bên trong VLS giúp gia nhiệt đều nên giảm được gradient nhiệt độ trên toàn bộ thể tích vật liệu. Bên cạnh đó bức xạ hồng ngoại có tính diệt khuẩn nên giữ cho sản phẩm đảm bảo chất lượng vệ sinh an toàn thực phẩm. Hiện nay, các nghiên cứu chỉ tập trung vào việc so sánh chất lượng giữa các phương pháp với nhau hoặc xác định chế độ sấy phù hợp mà chưa có nhiều nghiên cứu về bản chất truyền nhiệt truyền âm (TNTA) khi sấy có bổ sung năng lượng từ bức xạ hồng ngoại. Đã có một số tác giả (Meeso, 2007; Swadisevi, 2007) tiến hành nghiên cứu lý thuyết về mô hình toán của quá trình TNTA khi sử dụng phương pháp sấy bơm nhiệt hoặc không khí nóng kết hợp bức xạ hồng ngoại, tuy nhiên các mô hình toán này chưa xét đến ảnh hưởng của dòng dịch chuyển âm đến quá trình dẫn nhiệt.

Đã có nhiều mô hình toán thực nghiệm được xây dựng để mô tả sự biến thiên độ chứa ẩm theo thời gian. Tuy nhiên các mô hình này cũng chưa mô tả được đầy đủ ảnh hưởng của bức xạ nhiệt từ sóng hồng ngoại lên trường nhiệt độ của VLS (Vega-Gálvez, 2011; Deng, 2011). Cho đến nay, theo tìm hiểu của tác giả hầu như chưa có mô hình toán lý thuyết nào được đưa ra nhằm mô tả quá trình TNTA khi sấy mực ống với đầy đủ các ảnh hưởng nêu trên.

Căn cứ vào các kết quả phân tích trên và từ thực trạng sấy mực ống tại các cơ sở ở Việt Nam. Chúng tôi lựa chọn phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại để làm cơ sở nghiên cứu quá trình sấy khô mực ống. Luận án tiến hành xây dựng mô hình toán nhằm mô phỏng quá trình TNTA khi xét đến ảnh hưởng của dòng dịch chuyển âm lên dẫn nhiệt trong QTS. Sau khi nghiên cứu lý thuyết, tiến hành nghiên cứu thực nghiệm để kiểm chứng lý thuyết và xác định chế độ sấy thích hợp cho mực ống với mục tiêu nâng cao chất lượng sản phẩm.

Chương 2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Vật liệu nghiên cứu là mực ống Trung Hoa có tên tiếng anh *Loligo chinensis*, đây là loại có sản lượng lớn và có giá trị xuất khẩu cao tại Việt Nam, với sản lượng đánh bắt hàng năm khoảng 24000 tấn. Chính vì vậy luận án tập trung nghiên cứu vào loại mực ống, có trọng lượng của mỗi con từ $300 \div 350$ g và có chiều dài 250 ± 10 mm, chiều rộng 140 ± 10 mm, chiều dày thân mực $6 \pm 0,5$ mm.

2.2 Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

- Hệ phương trình TNTA chúng tôi có xét đến hiện tượng khuếch tán âm ảnh hưởng đến truyền nhiệt thông qua nhiệt lượng cần thiết cấp cho âm biến đổi pha từ lỏng thành hơi trong VLS và dòng nhiệt do nguồn bức xạ hồng ngoại bổ sung trong quá trình sấy.

- Hệ phương trình TNTA được giải bằng phương pháp sai phân hữu hạn. Đây là một công cụ được nhiều tác giả sử dụng để giải hệ phương trình vi phân bằng cách chuyển các hệ phương trình này về dạng sai phân.

- Nghiệm của hệ phương trình TNTA là cơ sở để đánh giá, so sánh và phân tích các vấn đề liên quan đến động học QTS như ảnh hưởng của nhiệt độ TNS, vận tốc TNS, công suất phát hồng ngoại ... đến thay đổi độ ẩm trong VLS.

2.3. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm

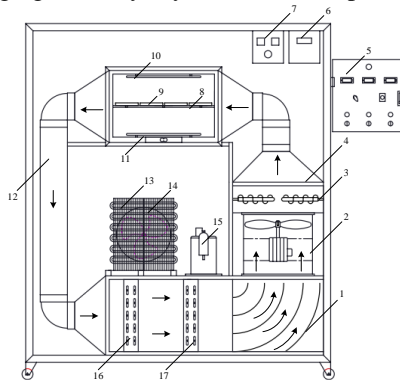
- Thực nghiệm xác định các thông số nhiệt vật lý của mực ống.

- Thực nghiệm kiểm chứng lý thuyết.

- Quy hoạch thực nghiệm xác định các thông số làm việc phù hợp.

2.4 Thiết bị thực nghiệm

Thiết bị sấy mực ống dùng trong thực nghiệm là máy sấy bơm nhiệt của khoa Cơ khí công nghệ, trường Đại học Nông Lâm thành phố Hồ Chí Minh (Nguyễn Hay và ctv, 2014). Để phù hợp với các nội dung nghiên cứu lý thuyết thiết bị được sửa chữa và lắp đặt thêm hai thanh đèn hồng ngoại, 2 bộ điều khiển nhiệt độ để đo nhiệt độ VLS, bộ điều khiển công suất phát hồng ngoại, khay sấy và các thiết bị phụ trợ kèm theo (hình 2.3).



Hình 2.1. Sơ đồ nguyên lý của thiết bị sấy mực ống

1. Cánh hướng dòng; 2. Quạt; 3. Điện trở phụ; 4. Ống gió; 5,6,7 Bộ điều khiển; 8. Khay; 9. Vật liệu sấy; 10,11. Đèn hồng ngoại; 12. Ống hồi TN; 13. Dàn ngưng tụ phụ; 14. Quạt dàn ngưng tụ phụ; 15. Máy nén; 16. Dàn bay hơi; 17. Dàn ngưng tụ chính.

Chương 3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU LÝ THUYẾT TRUYỀN NHIỆT TRUYỀN ẤM TRONG MỤC SẤY

3.1. Kết quả xác định các thông số nhiệt vật lý của mục

Thông số nhiệt vật lý của VLS là một trong những yếu tố ảnh hưởng rất lớn đến kết quả tính toán lý thuyết cũng như thực nghiệm. Do đó, việc xác định chính xác giá trị của các thông số này là rất cần thiết cho quá trình giải hệ phương trình TNTA được đề cập trong mục xây dựng và giải mô hình lý thuyết hoặc nghiên cứu ứng dụng về các quá trình chế biến mục ống ở Việt Nam.

a) Xác định khối lượng riêng của mục

Khối lượng riêng của mục được xác định theo phương pháp thể tích thể chỗ với dung môi là toluene. Dựa trên các số liệu thí nghiệm, thực hiện phân tích hồi quy chúng tôi thu được phương trình hồi qui mô tả mối quan hệ giữa khối lượng riêng và độ ẩm của mục như sau.

$$\rho_p = 2059 - 71 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) - 736 \exp \left(0,247 \frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad (R^2 = 0,976) \quad (3.1)$$

b) Xác định nhiệt dung riêng của mục

Nhiệt dung riêng của vật liệu được xác định bằng thực nghiệm trên cơ sở cân bằng nhiệt lượng trong điều kiện đoạn nhiệt. Trong đó phương pháp hỗn hợp được sử dụng để xác định nhiệt dung riêng của mục ống.

Phương trình hồi qui mô tả mối quan hệ giữa nhiệt dung riêng của mục và độ ẩm (3.2) được dùng để tính toán trong các phần tiếp theo của luận án.

$$C_p = 3,113 + 0,006 \cdot \omega \quad (R^2 = 0,976) \quad (3.2)$$

3.2. Kết quả xác định độ ẩm cân bằng của mục

Độ ẩm cân bằng được xác định thông qua việc xây dựng đường đẳng nhiệt của mục ống. Sử dụng dung dịch muối bão hòa đặt trong môi trường khép kín để tạo ra môi trường có độ ẩm ổn định theo nhiệt độ.

Kết quả phân tích cho thấy phương trình Modified Halsey là phù hợp nhất để dự đoán độ ẩm cân bằng của mục ống, biểu thức (3.4) được chúng tôi sử dụng để xác định độ ẩm cân bằng của mục ống trong các phần tiếp theo của luận án.

$$\varphi = \exp[-\exp(-0,870 - 0,040 \cdot T) \omega_e^{-1,920}] \quad (3.3)$$

$$\omega_e = [\exp(-1,383 - 0,029 \cdot T)]^{1/1,267} (-\ln \varphi)^{-1/1,267} \quad (3.4)$$

3.3. Kết quả xác định nhiệt ẩn hóa hơi của mục

Nhiệt ẩn hóa hơi được xác định thông qua độ ẩm cân bằng của vật liệu, khi xác định bỏ qua ảnh hưởng của yếu tố nhiệt độ. Nhiệt ẩn hóa hơi của mục ống được xác định theo phương trình (3.5).

$$\frac{h_{fg}}{h_{fgo}} = 1 + 0,5549 \cdot \exp(-2,3115 \cdot \omega) \quad (3.5)$$

3.4 Kết quả xác định hệ số khuếch tán ẩm

Hệ số khuếch tán hiệu quả D_m (m^2/s), là hệ số có ảnh hưởng rất lớn đến quá trình khuếch tán ẩm trong VLS, đây là hệ số thường được xác định từ thực nghiệm.

Từ số liệu thực nghiệm, xây dựng đồ thị $\ln(MR)$ và thời gian sấy t sẽ tìm được hệ số k chính là hệ số góc của đường thẳng trên đồ thị $\ln(MR)-t$. Từ đây suy ra được giá trị của D_m .

$$D_m = -k \frac{4\delta^2}{\pi^2} \quad (3.6)$$

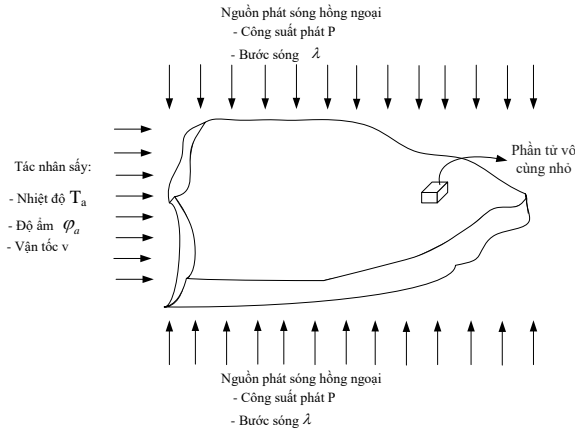
Trong đó, δ là nửa chiều dày vật liệu sấy.

Từ các giá trị thực nghiệm tại các nhiệt độ khác nhau chúng tôi tìm được hệ số khuếch tán ẩm D_m phụ thuộc vào nhiệt độ có dạng (3.7).

$$D_m(T) = 2,521.10^{-3} \exp \left[-\frac{42810.909}{8,314.(T + 273,15)} \right] \quad (3.7)$$

3.5. Kết quả xây dựng mô hình toán truyền nhiệt truyền ẩm

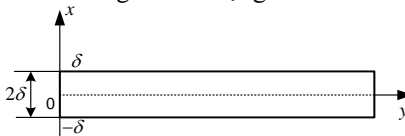
Mô hình quá trình truyền nhiệt truyền ẩm bên trong buồng sấy bằng phương pháp sấy bơm nhiệt có sự hỗ trợ của sóng hồng ngoại được trình bày trong hình 3.1. Mực ống ở dạng tấm phẳng có bề dày 2δ , được đặt trên khay làm bằng lưới Inox. TNS có nhiệt độ T_a , độ ẩm ϕ_a và vận tốc v . Sóng hồng ngoại có bước sóng là λ , nguồn phát hồng ngoại có công suất P được đặt ở phía trên và phía dưới của lớp VLS.



Hình 3.1. Sơ đồ mô tả mô hình vật lý quá trình sấy mực

Các giả thuyết khi xây dựng mô hình toán học

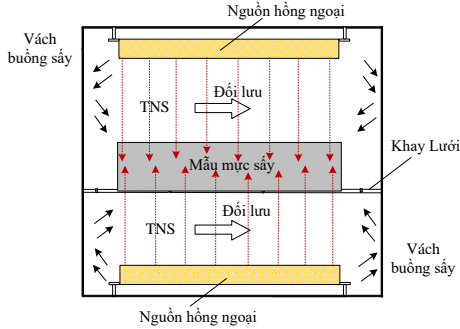
- Vật liệu sấy là đồng chất và đẳng hướng, không có phản ứng hóa học trong QTS, không có nguồn sinh nhiệt bên trong.
- Truyền nhiệt và truyền ẩm bên trong VLS được xem là một chiều theo phương x (hình 3.1).
- Sự phân bố nhiệt độ và độ ẩm ban đầu của VLS là đồng nhất.
- Mực ống được xem là những vật liệu xám
- Thất thoát nhiệt ra môi trường bên ngoài là không đáng kể.
- Thể tích và hình dáng của mực sau khi sấy thay đổi là không đáng kể.
- Dòng dịch chuyển ẩm bên trong VLS ở dạng hơi có ảnh hưởng đến dòng nhiệt.



Hình 3.2. Mô hình tấm phẳng của VLS

Khi nghiên cứu quá trình TNTA cần phải xem xét đến các yếu tố ảnh hưởng của dẫn

hiệu ứng khuếch tán ẩm và ngược lại. Trong QTS, mục tiêu là cấp nhiệt để tạo ra dòng dịch chuyển ẩm nên cần xét đến ảnh hưởng của dòng dịch chuyển ẩm đến dòng nhiệt.



Hình 3.3. Sơ đồ truyền nhiệt khi sấy mực

Sơ đồ truyền nhiệt khi sấy mực ống bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại được trình bày như trong sơ đồ hình 3.3.

a) Thành lập phương trình truyền nhiệt

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

Dựa trên định luật bảo toàn năng lượng ta có phương trình cân bằng nhiệt được viết như (3.8).

$$\sum E_{gen} = \sum E_{in} - \sum E_{out} \quad (3.8)$$

$$Q_u = Q_x + Q_e + Q_{IFR} - Q_{x+dx} \quad (3.9)$$

Trong đó:

- Q_x và Q_{x+dx} là nhiệt lượng vào và ra của phân tử tại vị trí x và $x+dx$, được tính theo định luật Fourier như sau.

$$Q_x = -k_p \frac{\partial T}{\partial x} dydz \quad (3.10)$$

$$Q_{x+dx} = Q_x + dQ_x = [-k_p \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-k_p \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx] dydz \quad (3.11)$$

- Q_e là nhiệt lượng cần thiết cấp cho ẩm biến đổi pha từ lỏng thành hơi trong VLS.

Trong luận án này, VLS là mực ống có độ ẩm ban đầu khoảng 84% nên ảnh hưởng của dòng ẩm đến hiện tượng dẫn nhiệt là lớn và cần được xem xét, do đó trong phương trình truyền nhiệt chúng tôi xét đến hiện tượng khuếch tán ẩm ảnh hưởng đến trường nhiệt độ thông qua nhiệt lượng cần thiết cấp cho ẩm biến đổi pha từ lỏng thành hơi trong VLS Q_e và được tính theo biểu thức (3.12).

$$Q_e = h_{fg} \rho_k \frac{\partial M}{\partial t} dx dy dz \quad (3.12)$$

Trong phương trình (3.12) có h_{fg} (kJ/kg), ρ_k (kg/m³), M (kg ẩm/kg VLK) lần lượt là nhiệt ẩn hóa hơi của nước, khối lượng riêng của vật liệu khô và ẩm độ của vật liệu.

- Q_{IFR} là năng lượng hấp thụ từ bức xạ hồng ngoại, W

$$Q_{IFR} = q_{IFR} dx dy dz \quad (3.13)$$

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

$$Q_u = C_p \rho_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.14)$$

Thay thế các phương trình từ (3.10) ÷ (3.14) vào (3.9), ta có phương trình truyền nhiệt được viết như sau.

$$\rho_p C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k_p \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial M}{\partial t} h_{fg} \rho_k + q_{IFR} \quad (3.15)$$

Năng lượng hấp thụ trên một đơn vị thể tích (q_{IFR}) trong công thức (3.15) được tính như sau:

$$q_{IFR} = \frac{Q_{IFR,i}^a}{V} \quad (3.16)$$

Với nhiệt năng hấp thụ từ bức xạ sóng hồng ngoại được tính theo công thức (3.16)

$$Q_{IFR,i}^a = Q_r e^{-\alpha x} \quad (3.17)$$

Trong đó: α - Hệ số hấp thụ, Q_r^a - Năng lượng hấp thụ từ bức xạ hồng ngoại tại lớp thứ i của vật liệu sấy, Q_r - Năng lượng bức xạ từ bề mặt nguồn đến bề mặt VLS (W) và được xác định bằng biểu thức (3.18).

$$Q_r = \frac{\sigma(T_{FIR}^4 - T_s^4)}{\frac{1-\epsilon_H}{A_H \epsilon_H} + \left[A_H F_{H,SQ} + \frac{1}{(1/A_H F_{H-C}) + (1/A_{sq} F_{SQ-C})} \right]^{-1} + \frac{1-\epsilon_{sq}}{A_{sq} \epsilon_{sq}}} \quad (3.18)$$

Hệ số hấp thụ được tính thông qua mối quan hệ giữa hệ số độ phát xạ của vật liệu buồng sấy, hệ số độ phát xạ của VLS và hệ số hình dáng giữa bộ phát hồng ngoại và vật VLS.

$$\alpha = \epsilon_H \cdot \epsilon_{sq} \cdot F_{H-SQ} \cdot F_{SQ-H} \quad (3.19)$$

b) Thành lập phương trình truyền âm

Theo A.V LuiKov thì gradient nhiệt độ sẽ gây nên sự khuếch tán âm trong vật thể. Tuy nhiên, với VLS là mực ống nhạy nhiệt do đó phải sấy ở nhiệt độ thấp để đảm bảo được thành phần chất dinh dưỡng và màu sắc của sản phẩm. Trong luận án chúng tôi lựa chọn ba mức nhiệt độ sấy thực nghiệm là 40°C, 45°C và 50°C để kiểm chứng, phân tích và chọn ra chế độ nhiệt độ sấy thích hợp nhất. Vì vậy ảnh hưởng của dòng nhiệt đến quá trình khuếch tán âm là không đáng kể, do đó trong phương trình truyền âm chúng tôi bỏ qua ảnh hưởng của dòng nhiệt đến khuếch tán âm (Trần Văn Phú, 2002). Phương trình này có dạng (3.20).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \quad (3.20)$$

c) Điều kiện đơn trị để giải bài toán TNTA

Để giải được hệ phương trình TNTA (3.15, 3.20) cần phải xác định được điều kiện ban đầu, điều kiện biên phù hợp với từng phương pháp sấy và từng điều kiện cụ thể của bài toán ứng dụng.

❖ Điều kiện ban đầu

Nhiệt độ và độ chứa ẩm đồng nhất, tại thời điểm ban đầu ($t=0$) nhiệt độ và độ chứa ẩm của VLS là đồng nhất.

$$T(x,0) = T_0; \quad M(x,0) = M_0 \quad (3.21)$$

❖ **Điều kiện đối xứng**

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \quad (3.22)$$

❖ **Điều kiện biên về truyền nhiệt**

Quá trình trao đổi nhiệt tại bề mặt của VLS theo phương x bao gồm các quá trình dẫn nhiệt, trao đổi nhiệt đối lưu giữa các phân tử bề mặt và TNS, trao đổi nhiệt do quá trình nước trong vật liệu bốc hơi ra môi trường. Áp dụng phương trình bảo toàn năng lượng tại mặt biên của VLS, ta có phương trình (3.23).

$$q_{IFR}^s + h_c (T_a - T_s) \Big|_{x=\delta} - h_{fg} \rho_k h_m (M_s - M_e) \Big|_{x=\delta} = -k_p \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\delta} \quad (3.23)$$

Trong đó: M_e là độ chứa ẩm cân bằng của VLS (kg ẩm/kg VLK), M_s là độ chứa ẩm lớp bề mặt của VLS (kg ẩm/kg VLK), h_c là hệ số trao đổi nhiệt đối lưu (W/m^2K), h_m là hệ số trao đổi chất đối lưu (m/s), h_{fg} là hệ số ẩn nhiệt hóa hơi của nước trong vật liệu (kJ/kg), T_a là nhiệt độ của TNS ($^{\circ}C$) T_s là nhiệt độ bề mặt của VLS ($^{\circ}C$).

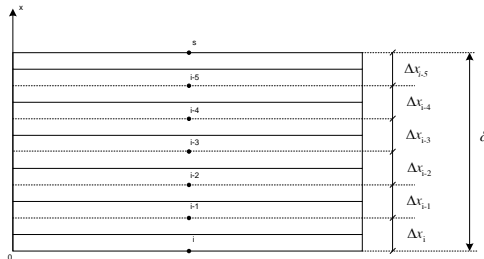
❖ **Điều kiện biên về truyền ẩm**

Quá trình trao đổi chất tại bề mặt của VLS theo phương x bao gồm các quá trình trao đổi chất giữa VLS và môi trường. Áp dụng bảo toàn ẩm tại bề mặt của VLS ta có phương trình (3.24)

$$-D_m \left. \frac{\partial M}{\partial x} \right|_{x=\delta} = h_m (M_e - M_s) \Big|_{x=\delta} \quad (3.24)$$

3.6. Kết quả giải hệ phương trình truyền nhiệt truyền ẩm

Trong luận án này chúng tôi sử dụng phương pháp số (sai phân hữu hạn) để giải hệ phương trình TNTA.



Hình 3.4. Bước chia sai phân cho nửa bề dày lớp VLS

Để giải các phương trình TNTA, tác giả chia nửa bề dày δ VLS dạng tấm phẳng ra thành N_i ($i = 6$) khoảng cách đều Δx , các phần tử tính toán bên trong VLS được lấy bằng Δx , các phần tử tại biên và tâm có chiều dày bằng $\frac{\Delta x}{2}$.

3.6.1. Thiết lập hệ phương trình sai phân và thuật toán giải

3.6.1.1. Phương trình sai phân truyền nhiệt

a) Phương trình sai phân cho các phần tử bên trong VLS: $in = 1 \div (c - 1)$

$$\rho_{p(M_m)}^m C_{p(M_m)} \frac{T_{in}^{m+1} - T_{in}^m}{\Delta t} = k_p^m \frac{(T_{in-1}^{m+1} - 2T_{in}^{m+1} + T_{in+1}^{m+1})}{(\Delta x^m)^2} + h_{fg}^m \rho_k \frac{M_{in}^{m+1} - M_{in}^m}{\Delta t} + q_{IFR} \quad (3.25)$$

Nhân hai vế của phương trình trên cho $\frac{1}{\rho_{p(M_m)}^m C_{p(M_m)}}$ ta được:

$$\frac{T_{in}^{m+1} - T_{in}^m}{\Delta t} = \frac{k_p^m}{\rho_{p(M_m)}^m C_{p(M_m)} (\Delta x^m)^2} (T_{in-1}^{m+1} - 2T_{in}^{m+1} + T_{in+1}^{m+1}) + \frac{h_{fg}^m \rho_k}{\rho_{p(M_m)}^m C_{p(M_m)} \Delta t} (M_{in}^{m+1} - M_{in}^m) + \frac{q_{IFR}}{\rho_{p(M_m)}^m C_{p(M_m)}} \quad (3.26)$$

$$\text{Đặt: } F_r^m = \frac{1}{\rho_{p(M)}^m C_{p(M)}}, \quad a_t^m = \frac{k_p^m}{C_{p(M)} \rho_{p(M)}^m}, \quad a_e^m = \frac{h_{fg}^m \rho_k}{C_{p(M)} \rho_{p(M)}^m}$$

Phương trình (3.26) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} -T_{in-1}^m \left[\frac{a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_{in}^m \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_{in+1}^m \left[\frac{a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_{in}^{m+1} \left[\frac{a_e^m}{\Delta t} \right] \\ = T_{in}^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_{in}^m \left[\frac{a_e^m}{\Delta t} \right] + F_r^m q_{IFR} \end{aligned} \quad (3.27)$$

b) Phương trình sai phân cho phần tử tại bề mặt VLS: $in = s$

Tại bề mặt VLS, ta có $in = s$, phương trình (3.27) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} -T_{s-1}^m \left[\frac{a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_s^m \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_{s+1}^m \left[\frac{a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_s^{m+1} \left[\frac{a_e^m}{\Delta t} \right] \\ = T_s^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_s^m \left[\frac{a_e^m}{\Delta t} \right] + F_r^m q_{IFR} \end{aligned} \quad (3.28)$$

Trong phương trình (3.28), T_{s-1}^{m+1} được lấy từ phương trình điều kiện biên tại bề mặt VLS viết dưới dạng sai phân:

$$q_{IFR}^s + h_c^m (T_a^{m+1} - T_s^{m+1}) - h_{fg}^m h_m^m \rho_k (M_s^{m+1} - M_e^{m+1}) = -k_p \frac{(T_{s+1}^{m+1} - T_{s-1}^{m+1})}{2\Delta x^m} \quad (3.29)$$

Suy ra:

$$T_{s-1}^{m+1} = \frac{2\Delta x}{k_p} q_{IFR}^s + \frac{2\Delta x}{k_p} h_c^m (T_a^{m+1} - T_s^{m+1}) - \frac{2\Delta x}{k_p} h_{fg}^m h_m^m \rho_k (M_s^{m+1} - M_e^{m+1}) + T_{s+1}^{m+1} \quad (3.30)$$

Thay phương trình (3.30) vào phương trình (3.28), sau khi rút gọn ta được:

$$\begin{aligned} -T_s^{m+1} \left[\frac{h_c^m}{k_p} + \frac{1}{\Delta x^m} + \frac{1}{2F^m} \right] + T_1^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta x^m} \right] + M_s^{m+1} [a_s^m - a_m^m] = -T_a^{m+1} \left[\frac{h_c^m}{k_p} \right] \\ - T_s^m \left[\frac{1}{2F^m} \right] - M_e^{m+1} [a_m^m] + M_s^m [a_s^m] - q_{IFR} \Delta x - q_{IFR}^s \left[\frac{1}{2k_p} \right] \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\text{Trong đó: } a_m^m = \frac{h_{fg}^m h_m^m \rho_k}{k_p}, \quad a_s^m = \frac{\Delta x^m h_{fg}^m \rho_k}{2k_p \Delta t}, \quad F^m = \frac{k_p \Delta t}{C_{p(M)} \rho_{p(M)}^m \Delta x^m}$$

c) Phương trình sai phân cho phần tử ở tâm: $in = c$

Tại bề tâm VLS, ta có $in = c$, phương trình (3.27) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned}
& -T_{c-1}^{m+1} \left[\frac{a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_c^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_{c+1}^{m+1} \left[\frac{a_t^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_c^{m+1} \left[\frac{a_e^m}{\Delta t} \right] \\
& = T_c^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_c^m \left[\frac{a_e^m}{\Delta t} \right] + F_r^m q_{IFR}
\end{aligned} \tag{3.32}$$

Trong phương trình (3.32), T_{c+1}^{m+1} được lấy từ phương trình điều kiện biên tại tâm VLS viết dưới dạng sai phân:

$$\frac{(T_{i+1}^{m+1} - T_{i-1}^{m+1})}{2\Delta x} = 0 \Rightarrow T_{c-1}^{m+1} = T_{c+1}^{m+1} \tag{3.33}$$

Thay phương trình (3.33) vào phương trình (3.32), sau khi rút gọn ta được:

$$\begin{aligned}
& -T_{c-1}^{m+1} \left[\frac{2}{\Delta x^m} \right] + T_c^{m+1} \left[\frac{2}{\Delta x^m} + \frac{1}{F^m} \right] - M_c^{m+1} \left[\frac{h_{fg}^m}{F_k^m C_{\rho(M_c)}} \right] = T_c^m \left[\frac{1}{F^m} \right] \\
& - M_c^m \left[\frac{h_{fg}^m}{F_k^m C_{\rho(M_c)}} \right] + q_{IFR} \frac{\Delta x}{k_p}
\end{aligned} \tag{3.34}$$

$$\text{Trong đó: } F_k^m = \frac{k_p \Delta t}{C_{\rho(M_c)}^m \rho_k \Delta x^m}$$

3.6.1.2. Hệ phương trình sai phân truyền âm

a) Phương trình sai phân cho các phần tử bên trong VLS: $in = 1 \div (c-1)$

Phương trình truyền âm (3.20) được viết dưới dạng sai phân như sau:

$$\frac{(M_{in}^{m+1} - M_{in}^m)}{\Delta t} = D_{in}^m \frac{M_{in-1}^{m+1} - 2M_{in}^{m+1} + M_{in+1}^{m+1}}{(\Delta x^m)^2} \tag{3.35}$$

Sau khi rút gọn ta được:

$$-M_{in-1}^m \left[\frac{D_{in}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_{in}^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{in}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_{in+1}^{m+1} \left[\frac{D_{in}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] = M_{in}^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \tag{3.36}$$

b) Phương trình sai phân cho phần tử tại bề mặt VLS: $in = s$

Tại bề mặt VLS, ta có $in = s$, phương trình (3.36) được viết lại như sau:

$$-M_{s-1}^{m+1} \left[\frac{D_{in}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_s^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{in}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_{s+1}^{m+1} \left[\frac{D_{in}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] = M_s^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \tag{3.37}$$

Trong phương trình (3.37), M_{s-1}^{m+1} được lấy từ phương trình điều kiện biên tại bề mặt VLS viết dưới dạng sai phân:

$$-D_m \frac{(M_{s+1}^{m+1} - M_{s-1}^{m+1})}{2\Delta x^m} = h_m^m (M_c^{m+1} - M_s^{m+1}) \tag{3.38}$$

$$\text{Suy ra: } M_{s-1}^{m+1} = \frac{2h_m^m \Delta x^m}{D_m} (M_c^{m+1} - M_s^{m+1}) + M_{s+1}^{m+1} \tag{3.39}$$

Thay phương trình (3.39) vào phương trình (3.37), sau khi rút gọn ta được:

$$-M_s^{m+1} \left[h_m^m + \frac{D_{in}^m}{\Delta x^m} + \frac{\Delta x^m}{2\Delta t} \right] + M_1^{m+1} \left[\frac{D_{in}^m}{\Delta x^m} \right] = -M_s^m \left[\frac{\Delta x^m}{2\Delta t} \right] - M_c^{m+1} (h_m^m) \tag{3.40}$$

c) Phương trình sai phân cho phần tử ở tâm: $in = c$

Tại bề tâm VLS, ta có $in = c$, phương trình (3.36) được viết lại như sau:

$$-M_{c-1}^{m+1} \left[\frac{D_{m_n}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_c^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{m_n}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_{c+1}^{m+1} \left[\frac{D_{m_n}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] = M_c^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \quad (3.41)$$

Trong phương trình (3.41), M_{c+1}^{m+1} được lấy từ phương trình điều kiện biên tại tâm VLS viết dưới dạng sai phân:

$$\frac{(M_{i+1}^{m+1} - M_{i-1}^{m+1})}{2\Delta x} = 0 \Rightarrow M_{c-1}^{m+1} = M_{c+1}^{m+1} \quad (3.42)$$

Thay phương trình (3.42) vào phương trình (3.41), sau khi rút gọn ta được:

$$-M_{c-1}^{m+1} \left[\frac{2D_{m_n}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_c^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_{m_n}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] = M_c^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \quad (3.43)$$

Như vậy, ta sẽ thiết lập được hệ phương trình sai phân gồm 14 phương trình, tương ứng với 7 phân tử cần xác định nhiệt độ và độ chứa ẩm tại một thời điểm bất kỳ. Từ đó viết lại hệ gồm 14 phương trình dưới dạng ma trận có dạng như sau:

$$\begin{bmatrix} a_{T(1,0)} & \dots & a_{T(1,n+1)} & a_{M(1,0)} & \dots & a_{M(1,n+1)} \\ a_{T(2,0)} & \dots & a_{T(2,n+1)} & a_{M(2,0)} & \dots & a_{M(2,n+1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{T(n+1,0)} & \dots & a_{T(n+1,n+1)} & a_{M(n+1,0)} & \dots & a_{M(n+1,n+1)} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} T_1 \\ \dots \\ \dots \\ M_{(n+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ \dots \\ \dots \\ C_{(n+1)} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Giải hệ phương trình 3.44 bằng phương pháp ma trận nghịch đảo sẽ cho nghiệm là các giá trị nhiệt độ và độ ẩm tại từng thời điểm bất kỳ.

Hệ phương trình TNTA với 7 phân tử cho nửa bề dày tấm mực có dạng như sau:

$$\begin{aligned} -T_s^{m+1} \left[\frac{h_c^m}{k_p} + \frac{1}{\Delta x^m} + \frac{1}{2F^m} \right] + T_1^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta x^m} \right] + M_s^{m+1} [a_s^m - a_m^m] &= -T_a^{m+1} \left[\frac{h_c^m}{k_p} \right] - T_s^m \left[\frac{1}{2F^m} \right] \\ &\quad - M_e^{m+1} [a_m^m] + M_s^m a_s^m - q_{IFR} \Delta x - q_{IFR}^* \left[\frac{1}{2k_p} \right] \\ -T_s^{m+1} \left[\frac{a_{t_1}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_1^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_{t_1}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_2^{m+1} \left[\frac{a_{t_1}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_1^{m+1} \left[\frac{a_{e_1}^m}{\Delta t} \right] &= T_1^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_1^m \left[\frac{a_{e_1}^m}{\Delta t} \right] + F_{t_1}^m q_{IFR,1} \\ -T_1^{m+1} \left[\frac{a_{t_2}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_2^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_{t_2}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_3^{m+1} \left[\frac{a_{t_2}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_2^{m+1} \left[\frac{a_{e_2}^m}{\Delta t} \right] &= T_2^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_2^m \left[\frac{a_{e_2}^m}{\Delta t} \right] + F_{t_2}^m q_{IFR,2} \\ -T_2^{m+1} \left[\frac{a_{t_3}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_3^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_{t_3}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_4^{m+1} \left[\frac{a_{t_3}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_3^{m+1} \left[\frac{a_{e_3}^m}{\Delta t} \right] &= T_3^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_3^m \left[\frac{a_{e_3}^m}{\Delta t} \right] + F_{t_3}^m q_{IFR,3} \\ -T_3^{m+1} \left[\frac{a_{t_4}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_4^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_{t_4}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_5^{m+1} \left[\frac{a_{t_4}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_4^{m+1} \left[\frac{a_{e_4}^m}{\Delta t} \right] &= T_4^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_4^m \left[\frac{a_{e_4}^m}{\Delta t} \right] + F_{t_4}^m q_{IFR,4} \\ -T_4^{m+1} \left[\frac{a_{t_5}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + T_5^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2a_{t_5}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - T_c^{m+1} \left[\frac{a_{t_5}^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_5^{m+1} \left[\frac{a_{e_5}^m}{\Delta t} \right] &= T_5^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] - M_5^m \left[\frac{a_{e_5}^m}{\Delta t} \right] + F_{t_5}^m q_{IFR,5} \\ -T_5^{m+1} \left[\frac{2}{\Delta x^m} \right] + T_c^{m+1} \left[\frac{2}{\Delta x^m} + \frac{1}{F^m} \right] - M_c^{m+1} \left[\frac{h_{fg}^m}{F_k C_{p(M_c)}} \right] &= T_c^m \left[\frac{1}{F^m} \right] - M_c^m \left[\frac{h_{fg}^m}{F_k C_{p(M_c)}} \right] + q_{IFR,c} \frac{\Delta x}{k_p} \\ -M_s^{m+1} \left[h_m^m + \frac{D_{m_s}^m}{\Delta x^m} + \frac{\Delta x^m}{2\Delta t} \right] + M_1^{m+1} \left(\frac{D_{m_s}^m}{\Delta x^m} \right) &= -M_s^m \left(\frac{\Delta x^m}{2\Delta t} \right) - M_e^{m+1} (h_m^m) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
-M_s^{m+1} \left[\frac{D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_1^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_2^{m+1} \left[\frac{D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] &= M_1^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \\
-M_1^{m+1} \left[\frac{D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_2^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_3^{m+1} \left[\frac{D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] &= M_2^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \\
-M_2^{m+1} \left[\frac{D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_3^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_4^{m+1} \left[\frac{D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] &= M_3^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \\
-M_3^{m+1} \left[\frac{D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_4^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_5^{m+1} \left[\frac{D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] &= M_4^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \\
-M_4^{m+1} \left[\frac{D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] + M_5^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] - M_c^{m+1} \left[\frac{D_m^m}{(\Delta x^m)^2} \right] &= M_5^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right] \\
-M_5^{m+1} \left[\frac{2D_m^m}{(\Delta x)^2} \right] + M_c^{m+1} \left[\frac{1}{\Delta t} + \frac{2D_m^m}{(\Delta x)^2} \right] &= M_c^m \left[\frac{1}{\Delta t} \right]
\end{aligned}$$

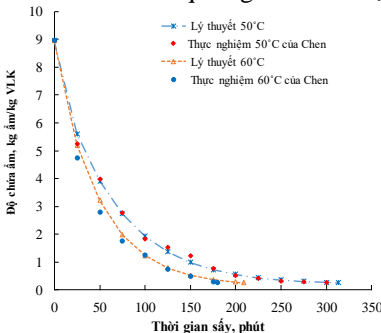
3.6.2. Kiểm chứng mô hình lý thuyết với các nghiên cứu về sấy mực đã công bố

Mô hình toán của QTS mực bằng bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại do chúng tôi xây dựng khi sử dụng để mô phỏng các QTS mực bằng không khí nóng và hồng ngoại – đối lưu, được điều chỉnh như sau: giá trị của nguồn phát hồng ngoại sẽ được gán giá trị bằng không đối với phương pháp sấy không khí nóng và gán giá trị bằng giá trị thực nghiệm đối với phương pháp sấy hồng ngoại – đối lưu; nhiệt độ (T_a), vận tốc và độ ẩm ban đầu (φ_a) của TNS (v) sẽ được gán bằng chính giá trị thực nghiệm và giữ nguyên trong quá trình mô phỏng;

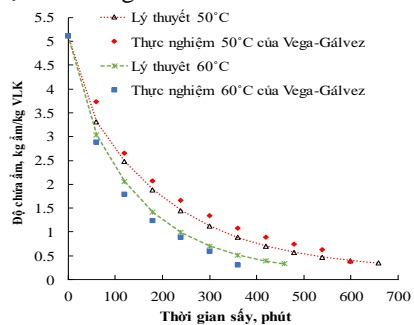
❖ So sánh với kết quả nghiên cứu thực nghiệm của Chen

Hình 3.5 so sánh các giá trị dự đoán độ chứa ẩm trung bình của mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm của Chen. Tại mức nhiệt độ là 50°C, sai lệch lớn nhất là 6,6%, nếu tính cho toàn bộ QTS ta có RMSE = 0,28 và P_{tb} = 8,9%, sai lệch về thời gian sấy 4,3%. Ở mức nhiệt độ 60°C sai lệch về độ chứa ẩm trung bình lớn nhất bằng 9,1% và trong toàn bộ QTS có giá trị là RMSE = 0,24 và P_{tb} = 10,9%, sai lệch 13,8% so với kết quả thực nghiệm.

❖ So sánh với kết quả nghiên cứu thực nghiệm của Vega-Gálvez



Hình 3.5. So sánh kết quả của mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm của Chen



Hình 3.6. So sánh kết quả của mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm của Vega-Gálvez

Đường cong sấy so sánh kết quả của mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm của

Vega-Gálvez được biểu diễn trên hình 3.6. Sai lệch độ chứa ẩm trung bình giữa kết quả dự đoán và thực nghiệm trong QTS tại các mức nhiệt độ 50°C và 60°C lần lượt là 17,9% và 15,6%. Sai lệch về thời gian sấy và tốc độ sấy giữa kết quả thực nghiệm và dự đoán là 11,2%, 25% (kg ẩm/kgVLK.phút) ở mức nhiệt độ 50°C và 19,3%, 18,5 (kg ẩm/kgVLK.phút) ở mức nhiệt độ 60°C.

Kết quả so sánh nêu trên cho thấy các đường cong sấy được tính từ mô hình toán lý thuyết có biên dạng và xu hướng là khá tương đồng với các đường cong thực nghiệm. Do đó hoàn toàn có thể dùng mô hình toán do chúng tôi xây dựng để nghiên cứu quá trình TNTA khi sấy mực ống bằng bơm nhiệt có sự hỗ trợ của sóng hồng ngoại.

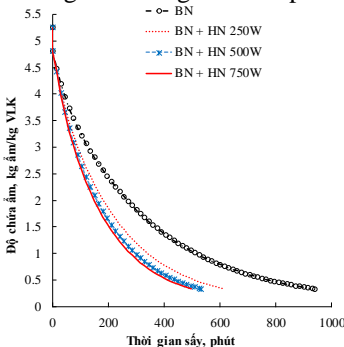
3.6.3. Động lực học quá trình sấy

Động học QTS là nói đến quan hệ về sự thay đổi độ chứa ẩm của VLS theo thời gian. Để nghiên cứu quá trình này bằng lý thuyết, chúng tôi thực hiện giải đồng thời hệ phương trình truyền nhiệt (3.15) và truyền ẩm (3.20) ứng với các thông số TNS và VLS đã lựa chọn.

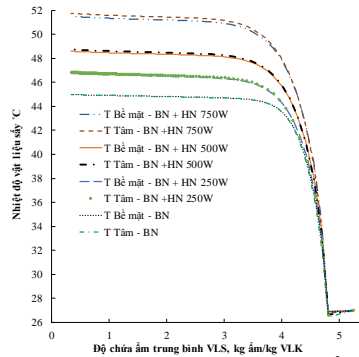
3.6.3.1. Đường cong sấy

Đường cong sấy là đồ thị biểu diễn mối quan hệ giữa sự biến thiên độ chứa ẩm trung bình của VLS theo TGS. Dựa trên các kết quả tính toán, đường cong sấy ứng với thông số của TNS bao gồm: nhiệt độ 45°C, vận tốc 1,4 m/s và độ ẩm tương đối 15%, được biểu diễn trên đồ thị hình 3.7 ở các trường hợp chỉ sử dụng bơm nhiệt; bơm nhiệt kết hợp với bức xạ hồng ngoại tại 3 mức công suất là 250 W, 500 W và 750 W.

Kết quả trên hình 3.7 cho thấy ở các chế độ sấy khác nhau, xu hướng giảm ẩm của mực tương đối giống nhau. Trong giai đoạn đầu (0 ÷ 200 phút) độ ẩm của mực giảm nhanh sau đó giảm dần cho đến khi đạt ẩm độ yêu cầu. Kết quả cũng cho thấy khi có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại, thời gian sấy giảm đi rõ ràng: khi sấy bằng bơm nhiệt không có sự hỗ trợ của hồng ngoại, TGS cần thiết để vật liệu đạt độ ẩm cuối 25% là 938 phút. Khi có sự hỗ trợ của dòng bức xạ ở công suất 250 W thì TGS giảm còn 615 phút, giảm 34,4 % so với sấy bơm nhiệt. Nếu tiếp tục tăng công suất bức xạ lên 500 W hay 750 W thì TGS giảm xuống còn 532 phút và 497 phút.



Hình 3.7. Đường cong sấy ở chế độ $T_a = 45^\circ\text{C}$, $v = 1,4 \text{ m/s}$; $\varphi_a = 15\%$



Hình 3.8. Đường cong nhiệt độ sấy của mực ống

Kết quả trên hình 3.7 cũng cho thấy khi tăng công suất bức xạ hồng ngoại trong khoảng từ 250 W đến 750 W thì TGS giảm dần. Tuy nhiên, khả năng rút ngắn thời gian sấy không tỉ lệ thuận với mức tăng công suất. Điều này là do quá trình thoát ẩm của VLS ra bên ngoài cần có thời gian nhất định. Hơn nữa, nếu công suất tăng lên quá cao sẽ làm

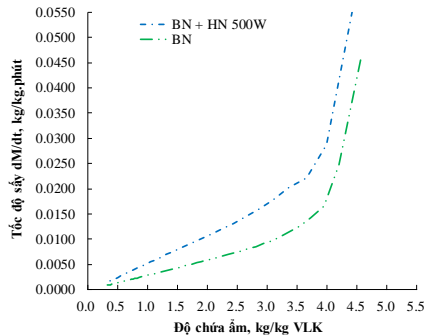
cho nhiệt độ của VLS tăng theo dẫn đến việc phá hủy các tính chất lý hóa của VLS và do đó làm giảm chất lượng VLS.

3.6.3.2. Đường cong nhiệt độ sấy

Kết quả trên đồ thị hình 3.8 cho thấy trong giai đoạn đầu của QTS khi ẩm độ của mực còn cao và nhiệt độ của mực thấp xuất hiện sự giảm nhiệt độ cả ở tâm và bề mặt của VLS. Tuy nhiên, hiện tượng này chỉ xảy ra trong khoảng thời gian rất ngắn, sau đó nhiệt độ của cả bề mặt và tâm VLS đều tăng nhanh và ổn định ở mức nhiệt độ nhất định tương ứng với từng chế độ sấy. Theo phân tích sự thay đổi nhiệt độ trong QTS (Trần Văn Phú, 2002) việc tăng nhiệt độ cả tâm và bề mặt VLS chứng tỏ sự bắt đầu của giai đoạn tốc độ sấy giảm dần. Kết quả cũng cho thấy, khi đạt được mức nhiệt độ ổn định, nhiệt độ ở tâm có xu hướng cao hơn nhiệt độ tại bề mặt khi sấy có sự hỗ trợ của sóng hồng ngoại (Wang, 2014). Trong khi đó, đối với phương pháp sấy bơm nhiệt thì hầu như không có sự khác biệt giữa nhiệt độ tâm và nhiệt độ bề mặt của mực sấy. Khi công suất phát của hồng ngoại càng tăng thì mức độ chênh lệch giữa nhiệt độ tại tâm và tại bề mặt càng lớn. Sự chênh lệch này chính là một trong những ưu điểm của phương pháp sấy có sự hỗ trợ của sóng hồng ngoại, nó làm cho gradient nhiệt độ và ẩm độ trong VLS cùng chiều và kết quả làm tăng cường khả năng truyền ẩm bên trong vật liệu ra ngoài lớp biên nên rút ngắn được thời gian sấy. Nhiệt độ trung bình của VLS ở các mức 250 W, 500 W và 750 W lần lượt bằng 45,9°C, 47,6°C và 50,3°C. Như vậy, ở mức công suất hồng ngoại là 750 W thì nhiệt độ trung bình của VLS tăng cao làm ảnh hưởng đến chất lượng VLS. Đây cũng là cơ sở để chúng tôi lựa chọn mức công suất 500 W cho nghiên cứu thực nghiệm.

3.6.3.3. Đường cong tốc độ sấy

Đường cong tốc độ sấy cho hai phương pháp sấy bơm nhiệt và bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại ở chế độ $T_a = 45^\circ\text{C}$, $v = 1,4 \text{ m/s}$; $\varphi_a = 15\%$ được biểu diễn trên hình 3.9. Kết quả thể hiện rõ ràng đường cong tốc độ sấy cũng chỉ xác định một chế độ tốc độ giảm dần và hầu như không tồn tại giai đoạn tốc độ sấy không đổi và giai đoạn đốt nóng.



Hình 3.9. Đường cong tốc độ sấy ở chế độ $T_a = 45^\circ\text{C}$, $v = 1,4 \text{ m/s}$, $\varphi_a = 15\%$

Nhận xét

Kết quả nghiên cứu lý thuyết động học QTS dựa trên kết quả giải hệ phương trình truyền nhiệt truyền ẩm (3.14) và (3.19) cho thấy:

- Các QTS mực ứng với các thông số của TNS đã lựa chọn đều nằm trong giai đoạn tốc độ sấy giảm dần, giai đoạn đốt nóng và giai đoạn tốc độ sấy không đổi là rất ngắn.
- Việc bổ sung nguồn phát bức xạ hồng ngoại vào hệ thống sấy bơm nhiệt đã cho kết quả rõ ràng về khả năng rút ngắn TGS so với trường hợp chỉ có bơm nhiệt.

- Việc tăng công suất nguồn phát bức xạ hồng ngoại sẽ giảm TGS, nhưng sẽ đạt tới trạng thái mà ở đó nếu tiếp tục tăng công suất cũng không thể giảm nhanh thời TGS. Bên cạnh đó việc tăng công suất hồng ngoại sẽ làm tăng nhiệt độ VLS lên cao điều này có thể làm giảm chất lượng của sản phẩm sấy.

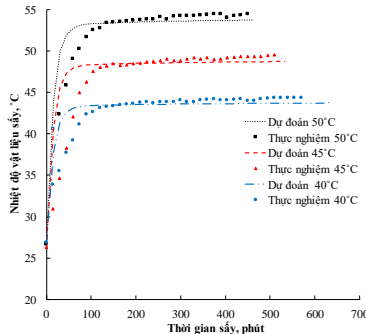
Chương 4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM KIỂM CHỨNG LÝ THUYẾT VÀ XÁC ĐỊNH CHẾ ĐỘ SẤY

4.1 Kiểm chứng mô hình lý thuyết với thực nghiệm tại các mức nhiệt độ khác nhau

Hệ phương trình TNTA được giải với các thông số nhiệt vật lý đã được xác định như trong mục 3.1 ÷ 3.4. Mặt khác các thông số như: chiều dày, nhiệt độ ban đầu, công suất nguồn phát hồng ngoại, vận tốc, nhiệt độ và độ ẩm TNS được xác định bằng dụng cụ đo trong quá trình thực nghiệm sẽ được sử dụng làm các giá trị đầu vào của quá trình tính toán lý thuyết.

4.1.1. Kiểm chứng mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm theo nhiệt độ vật liệu sấy

Kết quả tính toán và thực nghiệm cho thấy thay đổi nhiệt độ VLS tại các mức nhiệt độ 40°C, 45°C và 50°C được biểu diễn trên hình 4.1. Qua các đường cong phân bố nhiệt độ cho thấy sự tương đồng giữa kết quả dự đoán và thực nghiệm, với hệ số tương quan R^2 tại ba chế độ sấy ở các mức nhiệt độ 40°C, 45°C và 50°C lần lượt là 0,92, 0,91 và 0,936.



Hình 4.1. Thay đổi nhiệt độ VLS giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại các mức nhiệt độ 40°C, 45°C và 50°C

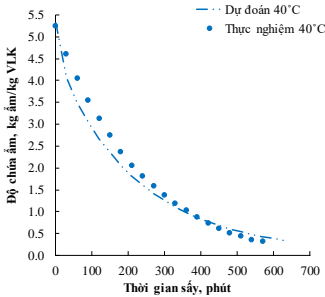
Như vậy nhiệt độ VLS cao hơn nhiệt độ TNS là do ngoài lượng nhiệt được truyền bằng đối lưu từ TNS đến VLS còn có sự hỗ trợ của bức xạ hồng ngoại. Các phân tử nước trong vật liệu sẽ được gia nhiệt từ bức xạ hồng ngoại, do đó trong vùng chịu ảnh hưởng của sóng hồng ngoại vật liệu sẽ nóng lên trên toàn bộ thể tích, điều này khác hơn nhiều với QTS BN thông thường là nhiệt độ của VLS chỉ đạt tối đa bằng nhiệt độ TNS. Vì vậy, khi kết hợp với sóng hồng ngoại việc tăng thể sấy giúp QTS nhanh hơn, giảm thời gian sấy là rất rõ ràng. Kết quả này tương đồng về xu hướng thay đổi nhiệt độ khi so sánh với kết quả nghiên cứu thực nghiệm của Wang (2014).

4.1.2. Kiểm chứng mô hình lý thuyết với thực nghiệm theo quá trình giảm ẩm

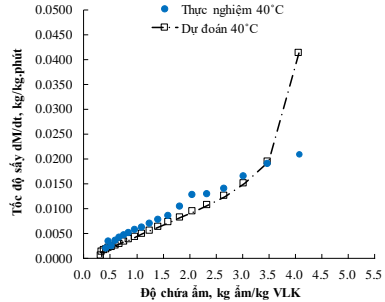
a) Tại mức nhiệt độ 40°C

Hình 4.2 cho thấy sự biến đổi độ chứa ẩm theo thời gian từ mô hình lý thuyết và thực nghiệm là khá tương đồng nhau. Sai lệch chuẩn trung bình P_b là 11,35%. Khi so sánh về thời gian sấy, kết quả dự đoán để đạt được độ chứa ẩm trung bình 0,333 kg ẩm/kgVLK

(25% độ ẩm tương đối) cần 639 phút, trong khi kết quả thực nghiệm giá trị này 570 phút, sai lệch về thời gian sấy giữa kết quả lý thuyết với thực nghiệm là 10,7%. Sai lệch về tốc độ sấy giữa lý thuyết và thực nghiệm là 15,7% (hình 4.3). Đồ thị hình 4.3 cũng cho thấy ở giai đoạn đầu của quá trình sấy, kết quả dự đoán và thực nghiệm có sự sai lệch lớn, nguyên nhân là do trong quá trình tính toán nhiệt độ TNS được gán là 40°C, tuy nhiên trong quá trình thực nghiệm thì tiến hành từ nhiệt độ môi trường do đó sau một khoảng thời gian nhiệt độ TNS trong buồng sấy mới đạt đến nhiệt độ 40°C (hình 4.3), điều này dẫn đến động lực của quá trình sấy ở giai đoạn đầu (từ 0 ÷ 30 phút) chậm hơn so với kết quả tính toán.



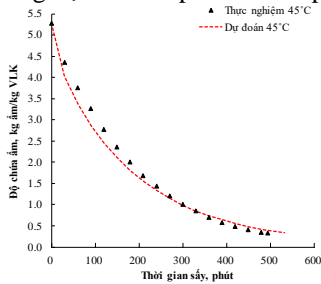
Hình 4.2. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ 40°C



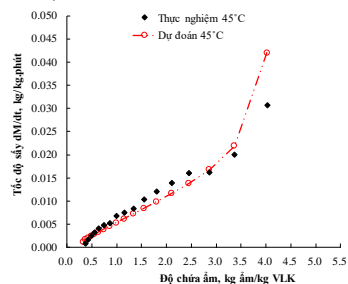
Hình 4.3. Đường cong tốc độ sấy của kết quả dự đoán và thực nghiệm tại mức nhiệt độ 40°C

b) Tại mức nhiệt độ 45°C

Kết quả dự đoán và thực nghiệm tại mức nhiệt độ 45°C được trình bày trong hình 4.4 và hình 4.5. Sai lệch về độ chứa ẩm giữa kết quả dự đoán và thực nghiệm P_{tb} là 9,7%, sai số RMSE là 0,21. Thời gian sấy cần thiết để đạt độ chứa ẩm yêu cầu của kết quả lý thuyết và thực nghiệm là 533 phút và 495 phút, sai lệch là 7,1%.



Hình 4.4. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ 45°C

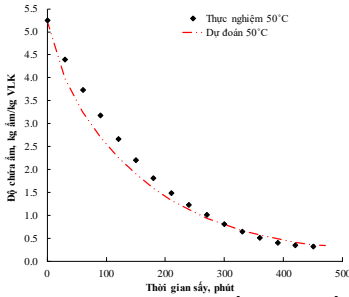


Hình 4.5. Đường cong tốc độ sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ 45°C

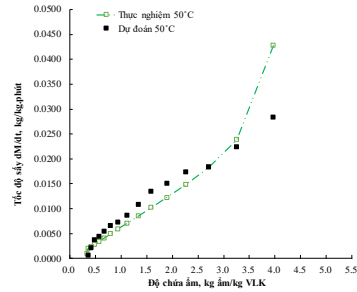
Qua kết quả tính toán và thực nghiệm cho thấy giá trị tốc độ sấy ở giai đoạn 30 phút đầu của quá trình tính toán luôn cao hơn so với thực nghiệm (hình 4.5), nguyên nhân là do thiết bị sấy bị tổn thất nhiệt qua các vách, trong khi tính toán giả thiết là không có tổn thất. Sai lệch về tốc độ sấy trung bình giữa kết quả lý thuyết và thực nghiệm là 6,1%.

c) Tại mức nhiệt độ 50°C

Đường cong sấy dự đoán và thực nghiệm tại mức nhiệt độ 50°C được biểu diễn trên hình 4.6. Xét trong toàn bộ QTS ta có sai lệch về độ chứa ẩm P_{tb} là 11,1% và sai số RMSE là 0,24. Thời gian sấy cần thiết để đạt độ chứa ẩm yêu cầu của kết quả dự đoán và thực nghiệm là 471 phút và 450 phút, sai lệch về thời gian sấy giữa kết quả dự đoán và thực nghiệm là 4,5%.



Hình 4.6. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ 50°C

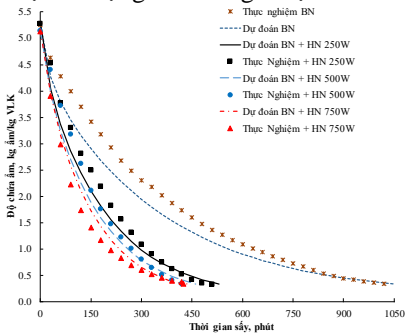


Hình 4.7. Đường cong tốc độ sấy của kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ 50°C

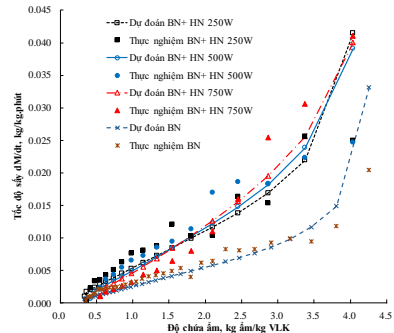
Từ các đường cong sấy (hình 4.2, hình 4.4 và hình 4.6) cho thấy tại ba mức nhiệt độ 40°C, 45°C và 50°C quá trình giảm ẩm khi thực nghiệm ở giai đoạn từ lúc bắt đầu sấy đến khi VLS đạt đến độ chứa ẩm khoảng 0,6 kg ẩm/kg VLK diễn ra chậm hơn so với kết quả tính toán, tuy nhiên ở giai đoạn sấy sau đó quá trình giảm ẩm ở kết quả thực nghiệm diễn ra nhanh hơn. Nguyên nhân là do chiều dày lớp vật liệu khi thực nghiệm giảm cùng với độ chứa ẩm, trong khi quá trình tính toán chiều dày này được giả định là không thay đổi. Vì vậy quá trình thoát ẩm từ tâm VLS ra bề mặt khi thực nghiệm diễn ra nhanh hơn so với quá trình tính toán.

4.2. Kiểm chứng mô hình lý thuyết với kết quả thực nghiệm tại các mức công suất khác nhau

Các thông số như chiều dày, nhiệt độ ban đầu, công suất nguồn phát hồng ngoại, vận tốc, nhiệt độ và độ ẩm TNS được xác định bằng dụng cụ đo trong quá trình thực nghiệm sẽ được sử dụng làm các giá trị đầu vào của quá trình tính toán.



Hình 4.8. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại các chế độ sấy BN + HN 250 W, BN + HN 500 W, BN + HN 750 W và BN



Hình 4.9. Đường cong tốc độ sấy của kết quả dự đoán với thực nghiệm tại các chế độ sấy BN + HN 250 W, BN + HN 500 W, BN + HN 750 W và BN

Qua phân tích các kết quả cho thấy sai lệch về độ chứa ẩm giữa kết quả dự đoán và thực nghiệm ở các chế độ sấy BN + HN 250 W, BN + HN 500 W, BN + HN 750 W và BN lần lượt là 12,3%, 11,1%, 10,2% và 15,1%; sai số RMSE tại các chế độ sấy lần lượt là 0,26, 0,24, 0,20 và 0,29. Kết quả này một lần nữa chứng minh mô hình toán lý thuyết có thể mô tả bản chất quá trình TNTA trong cả hai trường hợp sấy BN + HN và BN thông thường.

Thời gian sấy của phương pháp sấy BN + HN 500 W nhanh hơn so với phương pháp sấy BN là 592 phút khi dự đoán và 450 phút khi thực nghiệm.

Kết quả cho thấy các đường cong tốc độ sấy giữa kết quả tính toán và thực nghiệm là khá tương đồng. Sai lệch về tốc độ sấy giữa kết quả tính toán và thực nghiệm tại các chế độ sấy lần lượt là 5,8%, 14%, 6,3% và 6,4%.

4.3. Nhận xét

Qua các kết quả thực nghiệm và dự đoán cho thấy nếu trong QTS, nhiệt độ trung bình của VLS lớn hơn nhiệt độ trung bình của TNS có nghĩa là đã khắc phục được hiện tượng cản trở dịch chuyển của dòng nhiệt đến dòng ẩm như ở trường hợp sấy BN thông thường. Do nhiệt độ của vật VLS lớn hơn nhiệt độ TNS nên dòng nhiệt và dòng ẩm cùng chiều do đó tốc độ sấy được cải thiện đáng kể. Đây là lý do chính về việc giảm thời gian sấy khi sấy BN+HN khi so sánh với phương pháp sấy BN.

Qua kết quả so sánh cho thấy sự sai lệch giữa kết quả dự đoán bằng mô hình lý thuyết và thực nghiệm có thể do một số nguyên nhân sau:

- Trong QTS thực nghiệm các giá trị về nhiệt, ẩm của vật liệu thay đổi, các giá trị hệ số khuếch tán ẩm bị ảnh hưởng thêm bởi các yếu tố khác như hiện tượng cong vênh mà trong phạm vi nghiên cứu lý thuyết bỏ qua do tính phức tạp của hiện tượng.
- Các yếu tố như hệ số phát xạ, khoảng cách đặt nguồn phát hồng ngoại cũng ảnh hưởng đến QTS.

- Sự đối xứng hoàn toàn giữa hai mặt trên và dưới của VLS trên thực tế còn chưa hợp lý do sự che khuất của khay, lưới đỡ vật liệu phía dưới đáy.

Tuy nhiên, với những kết quả như đã trình bày ở trên cho thấy mô hình lý thuyết cho kết quả dự đoán QTS phù hợp với diễn biến trên thực tế khi tiến hành thực nghiệm. Do đó có thể dùng mô hình toán để dự đoán tốc độ sấy, thay đổi nhiệt độ và độ chứa ẩm của VLS trong QTS.

4.4. Quy hoạch thực nghiệm

4.4.1 Phát biểu bài toán hộp đen

❖ Xác định các hàm mục tiêu (các thông số đầu ra)

- Thời gian sấy t (phút), được ký hiệu là Y_1
- Phần trăm hàm lượng NH_3 (%mg), ký hiệu hóa là Y_2
- Ứng suất cắt UsC (N/cm^2), được ký hiệu là Y_3

❖ Xác định các thông số vào

- Vận tốc của TNS v (m/s)
- Nhiệt độ của TNS T_a ($^{\circ}C$)
- Công suất hồng ngoại P (W)

4.4.2 Kế hoạch thực nghiệm bậc 2

Ma trận thực nghiệm bậc II được thực hiện theo phương án bất biến quay không có tính trục giao. Số lượng thí nghiệm được xác định theo công thức sau:

$$N = 2^k + 2k + n_0 = 2^3 + 2.3 + 6 = 20 \quad (4.1)$$

Trong đó: k – số yếu tố nghiên cứu đầu vào của bài toán, $k = 3$; 2^k – số lượng thí nghiệm ở mức trên và mức dưới, $2^3 = 8$; $2k$ – số lượng thí nghiệm ở mức điểm sao $\pm \alpha$, $2k = 6$; n_0 – số lượng thí nghiệm lặp lại ở mức cơ sở, chọn $n_0 = 6$.

❖ **Kết quả thí nghiệm**

Thực nghiệm theo ma trận đã lập ta tiến hành phân tích phương sai và kiểm tra sự tương thích của mô hình cho cả ba hàm toán đa thức bậc 2. Đã xây dựng được mô hình toán biểu diễn mối quan hệ giữa thời gian sấy, hàm lượng NH_3 và ứng suất cắt với nhiệt độ, vận tốc và công suất nguồn phát hồng ngoại như sau:

$$t = 3633,95 - 102,19.T_a - 29,3557.v - 1,25957.P + 0,83059.T_a^2 + 0,0189.T_a.P + 0,000166155.P^2$$

$$NH_3 = 109,302 - 3,71507.T_a + 2,25535.v - 0,00689514.P + 0,0347654.T_a^2 - 0,143125.T_a.v + 1,70914.v^2 + 0,00000352689.P^2$$

$$UsC = -22,9757 + 1,08907.T_a - 5,41366.v - 0,00485686.P - 0,00976297.T_a^2 + 0,128125.T_a.v + 0,000155.T_a.P$$

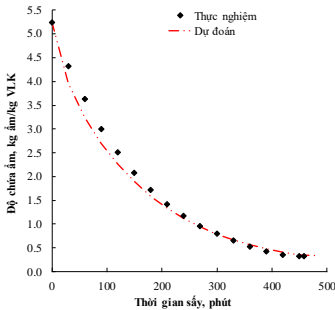
❖ **Xác định được các thông số phù hợp**

- Nhiệt độ TNS phù hợp: $T_a = 46,5^\circ C$
- Vận tốc TNS phù hợp: $v = 1,1 \text{ m/s}$
- Công suất hồng ngoại phù hợp: $P = 528 \text{ W}$

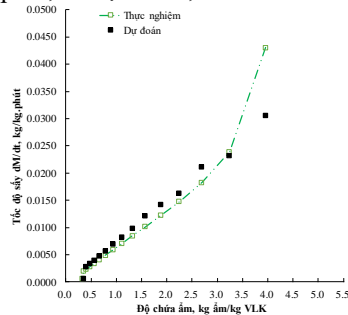
4.4.3 Thực nghiệm so sánh đường cong chế độ sấy phù hợp

Thông qua phương pháp quy hoạch đa yếu tố xác định được các thông số tối ưu (phù hợp) của thiết bị sấy với các giá trị cụ thể như sau: Nhiệt độ TNS $T_a = 46,5^\circ C$, vận tốc TNS $v = 1,1 \text{ m/s}$ và công suất hồng ngoại $P = 528 \text{ W}$.

Kết quả dự đoán và thực nghiệm tại chế độ sấy phù hợp được trình bày trong hình 4.10 và hình 4.11. Sai lệch về độ chứa ẩm giữa kết quả dự đoán và thực nghiệm P_{tb} là 7,3%, sai số RMSE là 0,19. Thời gian sấy cần thiết để đạt độ chứa ẩm yêu cầu của kết quả lý thuyết và thực nghiệm là 480 phút và 459 phút, sai lệch là 4,3%.



Hình 4.10. Đường cong sấy giữa kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ $50^\circ C$



Hình 4.11. Đường cong tốc độ sấy của kết quả dự đoán với thực nghiệm tại mức nhiệt độ $50^\circ C$

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

KẾT LUẬN

Các kết quả nghiên cứu của luận án đã đạt được mục tiêu và các nội dung cần nghiên cứu của luận án. Từ những kết quả nghiên cứu trong luận án, chúng tôi rút ra một số kết luận chính sau đây:

1. Bảng thực nghiệm đã xây dựng được các phương trình xác định tính chất nhiệt vật lý của mực ống tại Việt Nam như sau:

- Nhiệt dung riêng của mực ống;

$$C_p = 3,113 + 0,006 \cdot \omega \quad (R^2 = 0,968)$$

- Khối lượng riêng của mực ống;

$$\rho_p = 2059 - 71 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) - 736 \exp \left(0,247 \frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad (R^2 = 0,976)$$

- Độ ẩm cân bằng của mực ống;

$$\omega_e = [\exp(-1,383 - 0,029 \cdot T)]^{1/1,267} (-\ln \varphi)^{-1/1,267}$$

- Hệ số khuếch tán ẩm.

$$D_m(T) = 2,521 \cdot 10^{-3} \exp \left[-\frac{42810,909}{8,314 \cdot (T + 273,15)} \right]$$

- Thông số nhiệt ẩn hóa hơi của mực ống.

$$\frac{h_{fg}}{h_{fso}} = 1 + 0,5549 \exp(-2,3115 \cdot \omega)$$

2. Xác định được phương pháp sấy mực ống bằng thiết bị sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại. Xây dựng được mô hình toán biểu diễn quá trình TNTA trong QTS mực ống bằng phương pháp sấy bơm nhiệt kết hợp bức xạ hồng ngoại khi xét đến ảnh hưởng độ ẩm đến hiện tượng dẫn nhiệt.

3. Hệ phương trình TNTA được giải đồng thời bằng phương pháp sai phân hữu hạn, kết quả đã được kiểm chứng với kết quả đã được công bố của các tác giả khác khi nghiên cứu về sấy mực. Mặt khác kết quả này cũng được kiểm chứng sự phù hợp thông qua thực nghiệm.

4. Bảng phương pháp quy hoạch thực nghiệm luận án đã xác định được mô hình hồi qui biểu diễn sự phụ thuộc giữa thời gian sấy, hàm lượng NH₃ và ứng suất cắt với nhiệt độ TNS, vận tốc TNS và công suất nguồn phát hồng ngoại như sau:

$$t = 3633,95 - 102,19 \cdot T_a - 29,3557 \cdot v - 1,25957 \cdot P + 0,83059 \cdot T_a^2 + 0,0189 \cdot T_a \cdot P + 0,000166155 \cdot P^2$$

$$NH_3 = 109,302 - 3,71507 \cdot T_a + 2,25535 \cdot v - 0,00689514 \cdot P + 0,0347654 \cdot T_a^2 - 0,143125 \cdot T_a \cdot v + 1,70914 \cdot v^2 + 0,00000352689 \cdot P^2$$

$$U_{SC} = -22,9757 + 1,08907 \cdot T_a - 5,41366 \cdot v - 0,00485686 \cdot P - 0,00976297 \cdot T_a^2 + 0,128125 \cdot T_a \cdot v + 0,000155 \cdot T_a \cdot P$$

5. Trên cơ sở các phương trình hồi qui, sử dụng phương pháp tối ưu để xác định chế độ sấy phù hợp của thiết bị sấy. Nhiệt độ TNS phù hợp: T_a = 46,5°C; Vận tốc TNS phù hợp: v = 1,1 m/s; Công suất hồng ngoại phù hợp: P = 528 W

KIỂM NGHỊ

Với kết quả nghiên cứu của luận án, chúng tôi thấy cần tiếp tục nghiên cứu sâu hơn một số nội dung sau:

Mặc dù nội dung nghiên cứu của luận án đã đạt được một số kết quả lý thuyết và thực nghiệm, tuy nhiên cần triển khai thí nghiệm ở quy mô lớn hơn để đánh giá hiệu quả kinh tế của kỹ thuật sấy mà luận án đề xuất.

**DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ ĐÃ CÔNG BỐ
LIÊN QUAN ĐẾN ĐỀ TÀI LUẬN ÁN**

1. Phạm Văn Toàn, Nguyễn Hay, Lê Anh Đức. Nghiên cứu xác định tính chất nhiệt vật lý của mực ống. *Tạp chí nông nghiệp và phát triển nông thôn* số 21/2018, trang 53-57.
2. Phạm Văn Toàn, Lê Anh Đức. "Moisture Desorption Isotherms of squids". *Asia Pacific Journal of Sustainable Agriculture, Food*. Vol. 6 (1) 2018 7-12.
3. Phạm Văn Toàn, Lê Anh Đức. Nghiên cứu xác định phương pháp sấy mực ống. *Tạp chí nông nghiệp và phát triển nông thôn* số 16/2016, trang 63-68.
4. Phạm Văn Toàn, Lê Anh Đức. Thiết kế chế tạo và thử nghiệm sấy mực ống theo nguyên lý sấy bơm nhiệt kết hợp hồng ngoại. *Tạp chí cơ khí Việt Nam* số 5/2016, trang 119-124.