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

PHẠM QUANG PHÚ

NGHIÊN CỨU KỸ THUẬT SẤY ĐƯỜNG TINH LUYỆN RS BẰNG PHƯƠNG PHÁP TẦNG SÔI XUNG KHÍ

Chuyên ngành: **Kỹ thuật cơ khí**
Mã số: **9.52.01.03**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

TP. HCM – Năm 2024

Công trình được hoàn thành tại:

TRƯỜNG ĐẠI HỌC NÔNG LÂM TP. HỒ CHÍ MINH

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS. TS. Bùi Trung Thành
2. PGS. TS. Lê Anh Đức

Phản biện 1: .....

Phản biện 2: .....

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án họp tại Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh.

Vào hồi .... giờ .... ngày….. tháng ..... năm .....

Có thể tìm hiểu luận án tại:

1. Thư viện Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh

MỞ ĐẦU

1. Đặt vấn đề

Đường tinh luyện RS (Refined Standard sugar) được hình thành từ quá trình kết tinh, độ ẩm sau công đoạn ly tâm thường trong khoảng từ 0,5 – 1,5% và phải thực hiện sấy ngay nếu không chỉ sau một thời gian ngắn chúng sẽ bị kết dính khối và đóng thành bánh, đặc biệt khi có tác động nhiệt thì chúng càng dễ bị kết dính.

Kết dính và đóng bánh là hiện tượng trong đó các tinh thể đường giảm độ ẩm liên kết, dẫn đến sự quá bão hòa ở bề mặt tinh thể và kéo theo sự kết tinh. Tại các điểm tiếp xúc giữa các tinh thể, sự kết tinh bề mặt này tạo ra liên kết bắc cầu giữa các tinh thể. Khi đó, đường không còn chảy tự do và được gọi là "đóng bánh".

Các sản phẩm đường mía chủ yếu của các nhà máy đường gồm đường thô và đường tinh luyện, do vị trí địa lý và điều kiện tự nhiên tại mỗi vùng trồng mía khác nhau nên chữ đường (CCS) và hàm lượng các tạp chất phi đường cũng khác nhau dẫn đến các đặc điểm hình học và tính chất nhiệt vật lý của đường được sản xuất tại mỗi vùng cũng không đồng nhất. Theo tiêu chuẩn, độ ẩm yêu cầu của đường thô để bảo quản phải không lớn hơn 0,2% (TCVN 6961 : 2001) và đối với đường tinh luyện không lớn hơn 0,05% (TCVN 6958 : 2001) nên việc sấy đường và nghiên cứu các đặc tính của đường được sản xuất ở mỗi vùng miền cũng cần được làm sáng tỏ.

Để giải quyết vấn đề tiêu hao năng lượng trong quá trình sấy, phương pháp sấy tầng sôi kiểu xung khí (pulsed fluidized bed) đã được đề xuất trong thời gian gần đây. Phương pháp sấy tầng sôi xung khí cho phép giảm lưu lượng tác nhân sấy cấp vào trong cùng một năng suất sấy so với sấy tầng sôi thông thường. Một số nghiên cứu đã công bố cho thấy kết quả khả quan về mặt tiết kiệm năng lượng của phương pháp sấy này. Mặt khác, để xử lý cho các trường hợp khi sấy vật liệu dạng tinh thể, giữa các hạt có xu hướng dính, kết khối và đóng bánh thì kiểu sấy tầng sôi xung khí sẽ dễ dàng tách liên kết giữa các hạt bằng cách thay đổi trạng thái cấp khí đột ngột. Nhờ tác động bằng dòng tác nhân khí nên va đập cơ học giữa vật liệu sấy và ghi phân phối tác nhân sấy được giảm thiểu nên các hạt vật liệu ít bị bào mòn các cạnh, ít bị vỡ hạt dẫn đến tỷ lệ thu hồi sản phẩm và chất lượng sấy sẽ tốt hơn.

Các nghiên cứu về sấy tầng sôi xung khí trên thế giới cũng còn tồn tại nhiều vấn đề chưa được giải quyết đặc biệt trong quá trình sấy đường RS bao gồm đặc tính thủy khí và động học, quá trình truyền nhiệt – truyền ẩm và vấn đề tiết kiệm năng lượng.

Như vậy, việc nghiên cứu kỹ thuật đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí là cần thiết nhằm giải quyết bài toán sấy thực tiễn để đáp ứng

mục tiêu nâng cao chất lượng sản phẩm và tiết kiệm năng lượng trong bối cảnh hội nhập toàn cầu.

2. Mục tiêu nghiên cứu

- Nghiên cứu xác định được mô hình toán và hệ phương trình mô tả quá trình sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí.
- Xác định được các yếu tố công nghệ ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm sấy, tiêu hao năng lượng nhiệt, năng lượng điện trong quá trình sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí.
- Xây dựng được chế độ sấy đường tinh luyện RS hợp lý nhằm giảm chi phí của quá trình sấy, nâng cao chất lượng sản phẩm sấy.
- Xác định được các giá trị về tiết kiệm năng lượng trong quá trình sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí.

3. Phạm vi và đối tượng nghiên cứu

a. Phạm vi nghiên cứu

Nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm quá trình sấy đường tinh luyện RS trên mô hình sấy tầng sôi xung khí dạng mẻ, năng suất 5 kg/mẻ.

b. Đối tượng nghiên cứu

Đường tinh luyện RS (Refined Standard) sau công đoạn ly tâm, được sản xuất tại công ty mía đường Cần Thơ (CASUCO), phân bố kích thước hạt trong khoảng 400 – 1200 μm, độ ẩm ban đầu đạt 1,5% ± 0,05.

Độ ẩm và màu sắc sản phẩm sau khi sấy là các hàm mục tiêu khi đánh giá chất lượng sản phẩm sấy, tiêu hao điện năng riêng và nhiệt năng riêng là các yếu tố đánh giá chi phí của quá trình sấy.

4. Đóng góp mới của luận án

Luận án "Nghiên cứu kỹ thuật sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí" bao gồm các đóng góp mới sau đây:

1. Xây dựng được bộ thông số hình học và nhiệt vật lý của đường tinh luyện RS bao gồm: đường kính tương đương, cầu tính, khối lượng riêng, khối lượng thể tích, nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt, độ ẩm cân bằng và hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng.
2. Xác định được một số thông số thủy khí của quá trình sấy tầng sôi xung khí đối với đường tinh luyện RS bao gồm: độ rỗng của lớp hạt tĩnh và lớp hạt sôi tối thiểu, vận tốc sôi tối thiểu, tổn thất áp suất qua lớp hạt tĩnh và lớp hạt sôi tối thiểu.
3. Xác định và giải được mô hình toán học mô tả quá trình giả lỏng khối hạt khi sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp cấp khí kiểu xung.
4. Xác định được cơ chế giả lỏng, truyền nhiệt – truyền ẩm, các thông số thủy khí và động học của quá trình sấy.
5. Xác định được các thông số công nghệ chính và thiết lập được mối quan hệ tương quan về sự ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến chất

lượng sản phẩm sấy và tiêu hao năng lượng trong quá trình sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí.

6. Xây dựng được 3 phương trình toán hồi quy để xác định được tổng chênh lệch màu sản phẩm đường khi sấy, tiêu hao điện năng riêng và tiêu hao nhiệt năng riêng của quá trình sấy đường RS bằng phương pháp sấy tầng sôi xung khí:

Hàm tổng chênh lệch độ màu:

$$Y_1 = 87,73 - 2,77Z_1 + 27,72Z_2 - 15,21Z_3 - 0,17Z_1Z_2 + 0,14Z_1Z_3 + 0,02Z_1^2 - 4,43Z_2^2 + 2,59Z_3^2 \quad (1)$$

Hàm tiêu hao điện năng riêng:

$$Y_2 = -1610,4 - 48,79Z_1 - 134,27Z_2 + 35,25Z_3 - 4,45Z_1Z_2 - 0,248Z_1^2 \quad (2)$$

Hàm tiêu hao nhiệt năng riêng:

$$Y_3 = -929,5 + 41,06Z_1 - 414,12Z_2 + 1065,7Z_3 + 11,43Z_1Z_3 - 140,09Z_2^2 + 132,5Z_3^2 \quad (3)$$

7. Xây dựng được chế độ sấy đường tinh luyện RS hợp lý bằng phương pháp tầng sôi xung khí bao gồm nhiệt độ sấy 67,1°C, vận tốc tác nhân sấy 1,73 m/s, tần số xung khí 0,51 Hz.
8. Đánh giá được tiêu hao nhiệt năng riêng của quá trình sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí thấp hơn 30% so với phương pháp sấy tầng sôi thông thường.

5. Bố cục của luận án

Luận án chính thức gồm 150 trang, có 4 chương, 29 bảng số liệu và 68 hình ảnh, 06 phụ lục. Luận án đã tham khảo tổng cộng 167 tài liệu trong đó có 15 tài liệu tiếng Việt và 152 tài liệu tiếng Anh.

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN

1.1. Tổng quan về đường

Đường là một trong những loại gia vị phổ biến trong bữa ăn hàng ngày và là nguyên liệu quan trọng trong lĩnh vực bánh kẹo. Thông thường, đường là tên gọi chung của sucrose, chất làm ngọt kết tinh rắn cho thực phẩm và đồ uống. Sucrose được tìm thấy trong hầu hết các loại thực vật, nhưng ở nồng độ đủ để thu hồi thương mại chỉ ở cây mía và củ cải đường [1].

Theo tổ chức Đường Quốc tế (ISO) [2], sản lượng đường sản xuất trên thế giới trong năm 2022–2023 ước đạt 183 triệu tấn, với các nước có sản lượng sản xuất cao nhất là Brazil, Ấn Độ, Trung Quốc và Thái Lan. Tại Việt Nam, theo báo cáo của hiệp hội mía đường Việt Nam (VSSA) [3], diện tích trồng mía trong nước giảm một nửa, sản lượng đường sản xuất thấp nhất trong 20 năm và kể từ năm 2020 lượng đường sản xuất chỉ đáp ứng khoảng hơn 1/3 nhu cầu trong nước từ 2019 đến nay, phần còn lại phải nhập khẩu.

Chữ đường (Commercial Cane Sugar – viết tắt là CCS) là số đơn vị khối lượng đường sucrose theo lý thuyết có thể sản xuất từ 100 đơn vị khối lượng mía. Do điều kiện khí hậu có ảnh hưởng lớn đến độ chín và sự tích tụ đường trong cây mía nên quá trình sản xuất, thu hồi đường và chất lượng đường ở các vùng trên thế giới cũng khác nhau [6], [7].

1.2. Đặc điểm của đường tinh luyện RS

Đường tinh luyện RS (Refined standard) là vật liệu được hình thành từ quá trình kết tinh, độ ẩm sau công đoạn sau ly tâm khoảng từ 0,5 – 1,5% [4], [5], [9] và phải được sấy ngay, nếu không sau một thời gian ngắn chúng sẽ bị kết dính và đóng bánh, đặc biệt khi có tác động nhiệt thì càng dễ bị kết dính [10], [11].

Thông thường, độ ẩm của đường yêu cầu để bảo quản phải không lớn hơn 0,2% [14] đối với đường thô và không lớn hơn 0,05% [13] đối với đường tinh luyện nên cần thiết phải sấy đường trước khi bảo quản.

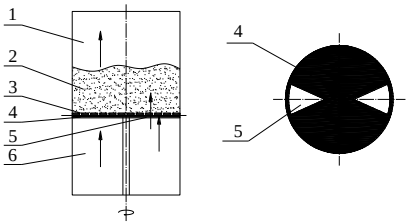
Việc sấy đường sau khi ly tâm là cần thiết để bảo quản lâu dài và đảm bảo độ ẩm theo tiêu chuẩn. Để đảm bảo việc xuất khẩu đường ra các nước trên thế giới, tiêu chuẩn về đường tinh luyện của Việt Nam cũng phù hợp với tiêu chuẩn của tổ chức Đường Quốc tế (ISO) về các chỉ tiêu cảm quan và lý – hóa [15]–[17]. Tuy nhiên, do sự khác nhau về vị trí địa lý và điều kiện khí hậu nên các thông số về hình học, thủy khí và tính chất nhiệt vật lý của đường tinh luyện RS cũng khác nhau. Để đảm bảo mô hình mô phỏng quá trình sấy đường RS được chính xác thì các thông số này cần được phân tích và xác định.

1.3. Tầng sôi xung khí

Trong kỹ thuật tầng sôi xung khí, lưu lượng khí cấp vào thay đổi theo thời gian dẫn đến vận tốc dòng khí ở giai đoạn sôi của lớp hạt cũng thay đổi theo, điều này dẫn đến sự biến đổi của tầng sôi bọt, sự ổn định của lớp hạt và ảnh hưởng đến đặc tính thủy động lực học của lớp hạt khi sôi [31].

So với các tầng sôi thông thường, tầng sôi xung khí có thể hoạt động với phạm vi kích thước hạt rộng hơn. Sự tiếp xúc giữa hạt rắn và khí được tăng cường cũng giúp cải thiện tốc độ truyền nhiệt và truyền khối giữa pha rắn với nhau và giữa pha rắn với pha khí. Nhiều tác giả cũng đã công bố về hiệu quả của tầng sôi xung khí trong kỹ thuật sấy, bao gồm các sản phẩm nông nghiệp như bông cải xanh [34] và hạt củ cải [35]; mùn cưa [35]; bột giấy và bùn giấy [36]; các hóa chất như natri acetate [37] và biopolymer [38] cũng như than nâu [39] và quặng uranium [40]. Ngoài ra, kỹ thuật tầng sôi cũng đã được sử dụng để tăng cường sinh khối [41]–[44]; nhiệt phân [45] và khí hóa [46]–[48].

Nguyên lý làm việc của máy sấy tầng sôi kiểu xung khí với đĩa quay được mô tả trong Hình 1.1 đã được thiết kế phù hợp với quá trình sấy theo mẻ dựa trên bằng sáng chế của Kudra và cộng sự [60].



Hình 1.1 *Nguyên lý sấy cấp xung khí dạng mẻ [59]*
1- Buồng sấy; 2- lớp hạt sôi; 3- ghi đỡ hạt; 4- đĩa phân phối khí quay;
5- cửa thoát khí; 6- buồng chứa tác nhân sấy

Sự khác nhau chính giữa máy sấy tầng sôi xung khí kiểu quay với máy sấy tầng sôi thông thường là hệ thống phân phối khí. Bộ phân phối khí là một đĩa được lắp đặt dưới ghi phân phối khí (trong buồng chứa tác nhân). Đĩa này có một khe hở hình tròn góc mở 60^0 – cho phép định hướng dòng khí sẽ đi xuyên qua. Khi đĩa này quay, khí sẽ lần lượt được phân phối giữa các phần của buồng sấy, gây nên hiệu ứng xung động. Bộ phân phối khí dạng phẳng vừa có chức năng đỡ hạt và vừa có chức năng phân phối khí đều khắp ghi đỡ hạt. Đĩa phân phối khí quay nhờ nối với trục của motor để phân phối khí một cách định kì lên toàn bộ diện tích mặt cắt ngang của ghi.

1.4. Tình hình nghiên cứu trong nước

Theo Phạm Công Dũng [74], phương pháp sấy tầng sôi với máy sấy dạng buồng trụ phù hợp để bảo quản hạt nông sản và thời gian sấy phụ thuộc vào nhiệt độ tác nhân và độ ẩm của hạt trong khi vận tốc tác nhân sấy nên gấp từ 2 – 2,5 lần vận tốc hóa sôi tối thiểu. Trong khi đó, với sản phẩm là viên thức ăn thủy sản và muối tinh thì các tác giả Lê Đức Trung [75] và Bùi Trung Thành [10] đã sử dụng máy sấy tầng sôi dòng trộn với tiết diện máy hình chữ nhật cho kết quả sấy tốt hơn. Theo [10] máy sấy tầng sôi thích hợp để sấy muối tinh với chi phí nhiệt năng thấp hơn 20% so với máy sấy thùng quay và thấp hơn 25% so với máy sấy tĩnh nhưng tiêu hao điện năng cao hơn 20 – 25% so với các loại máy này.

Đối với sản phẩm sấy là đường tinh luyện, theo [20], phân tích cho thấy các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình sấy gồm chiều dày lớp hạt, đường kính hạt, độ ẩm ban đầu, độ ẩm tương đối của không khí và loại máy sấy. Các loại máy sấy phù hợp để sấy đường tinh luyện là máy sấy thùng quay, máy sấy sàng rung và máy sấy tầng sôi.

Hiện nay, các công trình nghiên cứu về kỹ thuật sấy tầng sôi áp dụng để sấy đường tinh luyện nhằm giảm chi phí năng lượng cho quá trình sấy còn rất hạn chế, do vậy cần tiến hành nghiên cứu kỹ thuật sấy tầng sôi kiểu xung khí có tiêu hao năng lượng thấp hơn mà vẫn đảm bảo chất lượng sản phẩm đạt yêu cầu.

1.5. Tình hình nghiên cứu trên thế giới

Các nghiên cứu đã được công bố trên thế giới về phương pháp sấy tầng sôi xung khí tập trung vào 6 vấn đề cơ bản như sau:

(1) Đăng kí các bằng sáng chế về máy sấy tầng sôi xung khí.
(2) Nghiên cứu đặc tính thủy động và động học của quá trình sấy tầng sôi xung khí.
(3) Nghiên cứu thực nghiệm xác định ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến quá trình sấy tầng sôi xung khí.
(4) Chế tạo máy sấy tầng sôi xung khí ở quy mô công nghiệp.
(5) So sánh chi phí năng lượng giữa máy sấy tầng sôi xung khí với máy sấy tầng sôi thông thường.
(6) Mô phỏng quá trình sấy tầng sôi xung khí nhờ quan sát bằng máy ảnh tốc độ cao kết hợp với phần mềm máy tính.

Gawrzynski Z. và cộng sự [60], [62], [78], [79] là những tác giả đầu tiên ứng dụng kỹ thuật xung khí vào mô hình sấy và lần lượt đăng kí các bằng sáng chế về máy sấy tầng sôi xung khí dạng mẻ ở Ba Lan (năm 1979 – số 103840, năm 1999 – số 331025), Mỹ (năm 1999 – số 5918569), Châu Âu (năm 2003 – số EP0979140) . Các nghiên cứu sau này về máy sấy tầng sôi xung khí dạng mẻ cũng áp dụng theo sơ đồ nguyên lý của các sáng chế này (Hình 1.15).

Nghiên cứu đặc tính thủy động và động học của quá trình sấy tầng sôi xung khí tập trung vào việc xây dựng mối quan hệ giữa vận tốc khí và tổn thất áp suất ở các tần số cấp xung khí khác nhau và đã chứng minh được ảnh hưởng của tần số xung khí đến tổn thất áp suất qua lớp hạt [36], [80]–[82]. Theo [36], [38], [83], [84] thì dải tần số xung khí phù hợp để sấy dạng mẻ là từ 5 – 15 Hz nhưng theo [54], [71] thì tần số xung khí thấp hơn 1 Hz sẽ tạo được chế độ sôi tốt hơn. Như vậy, đối với mỗi loại vật liệu khác nhau cần nghiên cứu xác định dải tần số xung khí hoạt động hợp lý.

Thông qua kết quả nghiên cứu thực nghiệm, các tác giả đã chứng minh được quá trình sấy tầng sôi xung khí dạng mẻ phù hợp để sấy các vật liệu có độ ẩm cao và có đặc tính kết dính do nhiệt [38], [59], [84].

Kết quả nghiên cứu thực nghiệm để xác định hệ số khuếch tán ẩm trong quá trình sấy cho thấy hệ số khuếch tán ẩm tỷ lệ thuận với nhiệt độ và vận tốc tác

nhân sấy [70], phù hợp với công bố [83]. Tuy nhiên, theo [70] hệ số khuếch tán ẩm đạt giá trị cao khi sấy ở phạm vi tần số xung khí 0,75 đến 1,5 Hz trong khi Gawrzynski Z. và cộng sự lại cho thấy phạm vi tần số xung khí là từ 5 đến 15 Hz. Ưu điểm của hướng nghiên cứu thực nghiệm này là xác định và đánh giá được ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến quá trình sấy tầng sôi xung khí, nhờ đó tìm ra được các thông số hợp lý cho từng loại vật liệu khác nhau. Tuy nhiên, hạn chế của các công bố này là chưa đối chiếu được với nghiên cứu lý thuyết nên tính thuyết phục chưa cao.

Về vấn đề so sánh tiêu hao nhiệt năng giữa máy sấy tầng sôi xung khí với máy sấy tầng sôi thông thường, các nghiên cứu cho thấy khi sấy vật liệu bằng máy sấy tầng sôi xung khí cho phép tiết kiệm năng lượng được từ 40 – 50% so với sấy bằng máy sấy tầng sôi thông thường [87], [89]. Chi phí năng lượng đối với tầng sôi thông thường cao hơn 2,5 lần so với tầng sôi xung khí ở nhiệt độ sấy là 80°C. Với nghiên cứu được tiến hành trên quá trình sấy lúa tầng sôi xung khí năng suất 20 tấn/giờ, cho thấy chi phí năng lượng giảm còn 6,3 – 7,8 MJ/kg ẩm so với máy sấy tầng sôi thông thường là 14 MJ/kg ẩm thì giảm được khoảng 50% [87]. Nhờ vào các công bố này, có thể thấy phương pháp sấy tầng sôi xung khí có khả năng tiết kiệm năng lượng mà vẫn đảm bảo chất lượng sản phẩm sấy và giảm được thời gian sấy.

1.6. Kết luận chương 1

Các nghiên cứu về tầng sôi xung khí đã công bố chỉ ra rằng khả năng áp dụng kỹ thuật sấy này cho các vật liệu sấy dạng hạt, có kích thước đa phân tán thuộc các nhóm hạt A, B theo phân bố Geldart [94] là phù hợp để tăng cường hiệu quả truyền nhiệt–truyền ẩm và các tính chất thủy khí của lớp hạt sôi.

Đường tinh luyện RS là loại vật liệu rời có đặc tính kết dính khi tác động nhiệt, rất khó sấy ở các loại máy sấy tĩnh nên trong thực tế thường áp dụng máy sấy thùng quay hoặc máy sấy sàng rung. Tuy nhiên, các máy sấy đường truyền thống này thường có nhược điểm ở cơ cấu cơ khí đi kèm trong vận hành, bảo dưỡng và chi phí năng lượng cao hơn. Do vậy, nghiên cứu ứng dụng kỹ thuật tầng sôi xung khí đối với đường tinh luyện RS cần chứng minh được tính ưu việt hoặc khả năng tiết kiệm năng lượng của hệ thống sấy mới.

Mặc khác, trong các nghiên cứu đã công bố chưa đề cập về việc áp dụng phương pháp sấy tầng sôi xung khí cho sản phẩm đường tinh luyện RS ở Việt Nam nên các tính chất nhiệt vật lý, các thông số thủy khí của đường RS cũng cần được nghiên cứu kĩ hơn bằng cả lý thuyết kết hợp với thực nghiệm.

Tóm lại, nhận thấy việc nghiên cứu về kỹ thuật sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí là hướng đi mới cần tiến hành sớm do yêu cầu về mặt chất lượng sản phẩm ngày càng cao và trong tình hình cả thế giới đang hướng đến vấn đề tiết kiệm năng lượng.

CHƯƠNG 2 VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Vật liệu đường tinh luyện RS sử dụng trong nghiên cứu thực nghiệm là đường sau ly tâm được sản xuất tại công ty mía đường Cần Thơ (CASUCO) với nguồn mía tại khu vực Đồng bằng sông Cửu Long. Đường được phân kích cỡ hạt bằng bộ rây tiêu chuẩn, độ ẩm ban đầu xác định bằng máy phân tích ẩm Kern DAB 100-3 cho kết quả trung bình đạt 1,5 ± 0,05%.

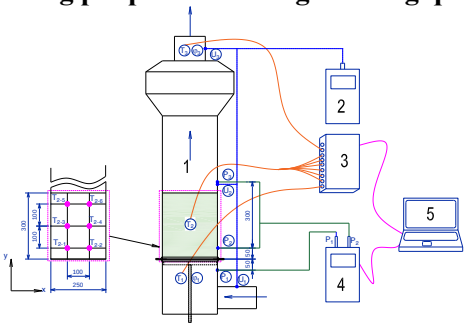
2.2. Phương pháp nghiên cứu lý thuyết

- Tính toán xác định các thông số thủy khí của đường tinh luyện RS như cầu tính, vận tốc sôi tối thiểu, tổn thất áp suất của dòng khí qua lớp hạt theo các mô hình toán khác nhau.
- Tính toán xác định đường cong sấy theo các mô hình toán khác nhau từ đó xác định hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng.
- Xác định mô hình và hệ phương trình mô phỏng cơ chế giả lỏng và truyền nhiệt – truyền ẩm xảy ra trong quá trình sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí.
- Hệ phương trình mô phỏng số được giải theo phương pháp thể tích hữu hạn bằng thuật toán SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Đây là một thủ tục số phân chia toán tử được sử dụng rộng rãi trong CFD để giải các phương trình Navier-Stokes rời rạc cho các hệ thống không nén được.
- Kết quả của nghiên cứu lý thuyết là cơ sở để lựa chọn phạm vi nghiên cứu thực nghiệm, giúp xác định miền thí nghiệm phù hợp đồng thời là cơ sở để so sánh và đánh giá các vấn đề liên quan đến thủy khí, động học của quá trình sấy như sự thay đổi độ rỗng, tổn thất áp suất, ảnh hưởng của nhiệt độ, vận tốc và tần số xung khí đến độ ẩm và thời gian sấy.

2.3. Phương pháp nghiên cứu thực nghiệm

- Thực nghiệm xác định các thông số thủy khí của đường tinh luyện RS như độ rỗng, vận tốc sôi tối thiểu, tổn thất áp suất qua lớp hạt tĩnh và sôi tối thiểu.
- Thực nghiệm xác định các thông số nhiệt vật lý của đường tinh luyện RS như đường kính tương đương, khối lượng riêng, khối lượng thể tích, nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt.
- Thực nghiệm xác định độ ẩm cân bằng của đường tinh luyện RS.
- Thực nghiệm kiểm chứng kết quả lý thuyết các thông số như vận tốc dòng khí qua bề mặt lớp hạt, độ rỗng, tổn thất áp suất qua lớp hạt.
- Xác định các thông số công nghệ phù hợp đối với quá trình sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí thông qua kết quả quy hoạch thực nghiệm trực giao cấp 2 và tối ưu hóa đa mục tiêu theo bề mặt đáp ứng.

2.4. Phương pháp đo các thông số trong quá trình thực nghiệm



1- Buồng sấy;
2- Bộ đo và ghi dữ liệu vận tốc;
3- Bộ đo và ghi dữ liệu nhiệt độ;
4- Bộ đo chênh áp;
5- Máy tính

Hình 2.1 *Thiết lập vị trí đo trong quá trình sấy*

2.4.1. Phương pháp đo nhiệt độ lớp vật liệu trong quá trình sấy

Nhiệt độ của lớp vật liệu trong quá trình sấy T_2 được đo bằng 6 cảm biến nhiệt độ loại J (cặp nhiệt điện Iron / Constantan), các tín hiệu nhiệt độ được tiếp nhận bởi bộ ghi dữ liệu (3) và được kết nối với máy tính (5) để ghi dữ liệu theo thời gian thực thông qua phần mềm chuyên dụng. Khi đó nhiệt độ vật liệu trong quá trình sấy được xác định bằng giá trị trung bình của 6 nhiệt độ này.

2.4.2. Phương pháp xác định vận tốc của không khí

Vận tốc khí cấp vào buồng sấy và vận tốc khí qua bề mặt lớp hạt được đo bằng cảm biến dây nhiệt (hot wire sensor) được lắp tại các vị trí đo U_1, U_2, U_3 (Hình 2.1) kết nối với bộ ghi dữ liệu (2). Mỗi vị trí đo sẽ thay đổi vị trí cảm biến 03 lần và lấy giá trị trung bình. Dữ liệu vận tốc được ghi tối thiểu 1s/lần và được lưu trữ vào thẻ nhớ để truy xuất sau khi đo.

2.4.3. Phương pháp đo tổn thất áp suất

Ba vị trí dưới ghi, trên ghi và trên bề mặt lớp hạt được lắp ba ống đo áp suất P_1, P_2, P_3 kết nối với bộ đo chênh lệch áp suất (4) nhằm xác định tổn thất áp suất qua ghi và qua lớp hạt (Hình 2.1).

2.4.4. Phương pháp xác định độ ẩm vật liệu sấy

Độ ẩm của đường tinh luyện RS được đo bằng phương pháp cân – sấy kết hợp. Mỗi thí nghiệm lấy từ 3 – 5 mẫu theo các khoảng thời gian nhất định. Các mẫu này sau đó được đo bằng máy theo ICUMSA GS 1-9 (1994).

2.5. Quy hoạch thực nghiệm

Hàm hồi quy thực nghiệm xây dựng từ quy hoạch trực giao cấp hai có dạng:

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^{k} b_j X_j + \sum_{\substack{j,l=1 \\ j \neq l}}^{k} b_{jl} X_j X_l + \sum_{j=1}^{k} b_{jj} X_j^2 + \varepsilon \qquad (2.1)$$

Nội dung bài toán quy hoạch thực nghiệm thực hiện theo các bước:

- Lập ma trận thí nghiệm theo quy hoạch trực giao cấp 2.
- Tiến hành phân tích phương sai để loại bỏ các hệ số hồi quy không đảm bảo độ tin cậy với mức ý nghĩa $p > 0,05$.
- Thực hiện phân tích phương sai trên hàm toán mới.

- Xác định giá trị các hệ số hồi quy theo hàm toán mới sau khi đã loại các hệ số hồi quy không đủ độ tin cậy.
- Kiểm tra sự phù hợp của mô hình theo tiêu chuẩn Fisher.

2.6. Xác định các thông số nghiên cứu

2.6.1. Xác định các thông số nghiên cứu đầu vào

Z_1 – Nhiệt độ sấy

Nhiệt độ là thông số công nghệ quan trọng của quá trình sấy, quyết định đến tốc độ sấy và là thông số có thể điều khiển được nên được chọn là thông số đầu vào đầu tiên và được mã hóa thành biến X_1.

Z_2 – Vận tốc tác nhân sấy

Vận tốc tác nhân sấy không chỉ quyết định đến quá trình sôi của hạt đường tinh luyện RS mà còn quyết định đến khả năng trao đổi nhiệt - ẩm giữa tác nhân sấy với hạt vật liệu và cũng là thông số có thể điều khiển được nên được chọn làm thông số đầu vào thứ hai, được mã hóa thành biến X_2.

Z_3 – Tần số xung khí

Đối với quá trình sấy tầng sôi xung khí, theo Ireland và cộng sự [115] việc cấp khí với tần số cao hay thấp sẽ ảnh hưởng đến khoảng cách giữa các hạt, do đó ảnh hưởng đến quá trình trao đổi nhiệt-ẩm và tổn thất áp suất, tức là ảnh hưởng đến chất lượng và chi phí sấy nên tần số xung khí được chọn làm thông số đầu vào thứ ba, được mã hóa thành biến X_3.

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

Độ ẩm là thông số được yêu cầu nghiêm ngặt trong quá trình sấy và bảo quản vật liệu. Theo TCVN 6958:2001 [13], độ ẩm của đường tinh luyện RS sau sấy không lớn hơn 0,05% nên trong các thí nghiệm của luận án, độ ẩm sản phẩm đạt 0,05% là cơ sở để dừng quá trình sấy và xác định các hàm mục tiêu khác. Do vậy, độ ẩm sản phẩm không được chọn làm hàm mục tiêu đầu ra.

Y_1 – Tổng chênh lệch độ màu

Màu sắc của đường tinh luyện sau khi sấy cũng là một trong những chỉ tiêu đánh giá chất lượng sản phẩm.

$$Y_1 = \Delta E^* = \sqrt{\left(\Delta L^*\right)^2 + \left(\Delta a^*\right)^2 + \left(\Delta b^*\right)^2} \tag{2.2}$$

Y_2 – Tiêu hao điện năng riêng

Tiêu hao điện năng riêng là tiêu hao điện năng tiêu hao để sấy được 1 kg sản phẩm trong quá trình sấy (Wh/kg SP), được xác định bằng công thức (2.59):

$$Y_2 = \frac{N}{G_2} = \frac{U.I.\cos\varphi.\tau}{G_2}, \text{ Wh/kgSP} \tag{2.3}$$

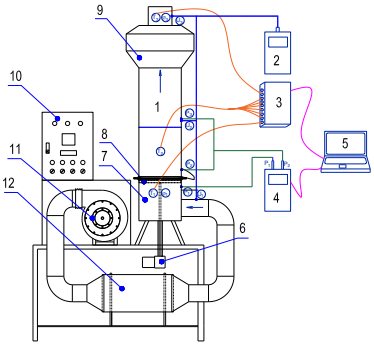
Y_3 - Tiêu hao nhiệt năng riêng

Tiêu hao nhiệt năng riêng là lượng nhiệt cần thiết để sấy được 1 kg sản phẩm trong quá trình sấy, được xác định theo công thức (2.60):

$$Y_3 = \frac{Q}{G_2}, \text{kJ/kgSP} \tag{2.4}$$

2.7. Phương tiện thí nghiệm

Mô hình thí nghiệm là máy sấy tầng sôi xung khí dạng mẻ được thiết kế, chế tạo và lắp đặt tại phòng X6.16, Khoa Công nghệ Nhiệt Lạnh, trường Đại học Công nghiệp Tp.HCM. Không khí được gia nhiệt bằng điện trở và nhiệt độ sấy được điều khiển bởi bộ điều khiển nhiệt độ Autonics TZN4M. Quạt được lắp biến tần Hitachi NES1-015HB để điều khiển tốc độ, từ đó điều chỉnh được lưu lượng không khí cấp vào buồng sấy. Động cơ tạo xung được lắp biến tần Schneider để điều khiển tốc độ quay, giúp điều chỉnh được tần số xung khí.





Hình 2.2 *Mô hình máy sấy tầng sôi xung khí*

1- Buồng sấy; 2- Bộ đo và ghi dữ liệu vận tốc; 3- Bộ đo và ghi dữ liệu nhiệt độ; 4- Bộ đo chênh áp; 5- Máy tính; 6- Động cơ tạo xung; 7- Buồng phân phối TNS; 8- Đĩa tạo xung khí; 9- Buồng lắng; 10- Tủ điện điều khiển; 11- Quạt cấp không khí; 12- Bộ gia nhiệt; T_1, T_2, T_3: các vị trí cảm biến nhiệt độ; P_1, P_2, P_3: các vị trí đo áp suất; U_1, U_2, U_3: các vị trí đo vận tốc khí

2.8. Kết luận chương 2

Phương pháp thực nghiệm được sử dụng để xác định các thông số thủy khí và tính chất nhiệt vật lý của đường tinh luyện RS, làm cơ sở tính toán và mô phỏng số quá trình sấy trên máy sấy tầng sôi xung khí.

Độ ẩm cân bằng và hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng cũng là những thông số quan trọng trong mô phỏng số động học của quá trình sấy. Trong nghiên cứu này, các thông số này được xác định theo các mô hình toán dựa trên dữ liệu thực nghiệm bằng phương pháp hồi quy phi tuyến.

Trong chương này, phương pháp xác định các thông số mô phỏng và phương pháp đo các thông số thủy khí và động học của quá trình sấy bằng thực nghiệm để kiểm chứng các kết quả nghiên cứu lý thuyết cũng được trình bày một cách rõ ràng. Đồng thời, phương án quy hoạch thực nghiệm trực giao cấp 2 cũng được thiết lập để nghiên cứu thực nghiệm quá trình sấy nhằm xác định các thông số công nghệ phù hợp.

CHƯƠNG 3 KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

3.1. Kết quả xác định các thông số thủy khí và nhiệt vật lý của đường tinh luyện RS

3.1.1. Xác định đường kính tương đương của đường tinh luyện RS

Lấy ngẫu nhiên một khối hạt đường tinh luyện RS trong bao thành phẩm và đem cân lượng mẫu có khối lượng là 100 gam. Sử dụng bộ rây có dãy kích thước lỗ rây thứ tự từ 0,3 – 1,5 mm và thực hiện rây phân loại các kích thước sau đó tiến hành cân từng khối hạt còn nằm trên rây. Sử dụng phương trình để tính kích thước hạt trung bình d_m sau 03 lần thí nghiệm thì xác định đường kính hạt đường tinh luyện RS có mức giá trị trung bình là 892 µm và đối chiếu kết quả sai số giữa các lần đều < 3%.

3.1.2. Xác định khối lượng riêng

Sử dụng ống nghiệm có chứa dung dịch ethylene glycol để xác định được thể tích của một mẫu đường nhất định đã được cân trước dựa vào chênh lệch thể tích trước và sau. Kết quả đạt được là ρ_h = 1598 kg/m^3.

3.1.3. Xác định khối lượng thể tích và độ rỗng

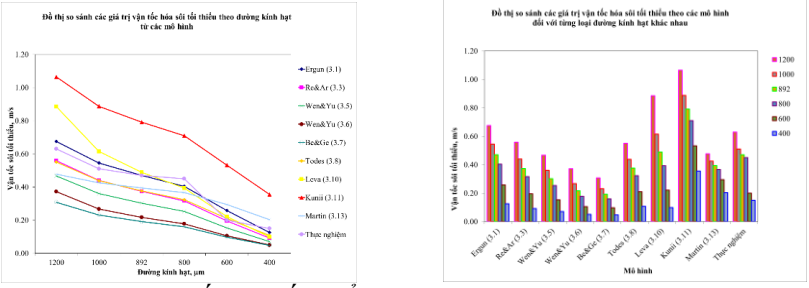
Đường tinh luyện RS nguyên liệu lấy ngẫu nhiên được đưa thẳng vào ống nghiệm dưới trạng thái tĩnh tự nhiên. Thí nghiệm được thực hiện trên 06 loại ống nghiệm khác nhau với dải thể tích thay đổi từ 9 – 2000 ml. Kết quả đạt được là ρ_b = 889 kg/m^3. Với kết quả này, độ rỗng của khối hạt ở trạng thái tĩnh được xác định đạt ε_s = 0,444 và độ rỗng của lớp hạt ở trạng thái sôi tối đạt ε_s = 0,488.

3.1.4. Xác định cầu tính của hạt

Với hạt đường tinh luyện RS có kích thước trung bình d_m = 892µm, độ rỗng ở trạng thái sôi tối thiểu ε_{mf} = 0,488, khối lượng riêng hạt ρ_p là 1598 kg/m^3, vận tốc sôi tối thiểu được xác định bằng thí nghiệm là 0,47 m/s. Cầu tính của hạt được xác định có giá trị là ϕ = 0,85.

3.1.5. Tính toán và thực nghiệm xác định vận tốc sôi tối thiểu

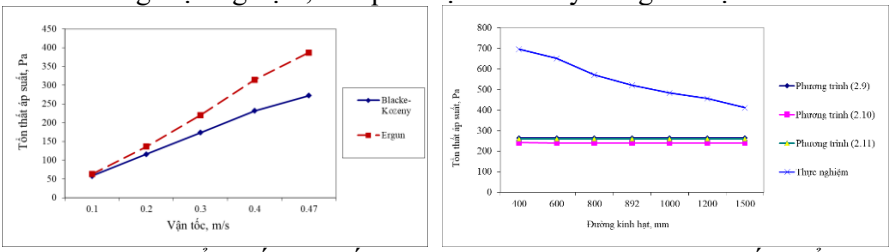
Vận tốc sôi tối thiểu được tính toán theo 8 mô hình: Ergun, Reynolds – Archimedes, Wen – Yu, Beayens – Geldart, Todes – Goroshko, Leva, Kunii – Levenspiel, Martin.



Hình 3.1 *Vận tốc sôi tối thiểu tính toán từ các mô hình khác nhau*

3.1.6. Tính toán và thực nghiệm xác định tổn thất áp suất qua lớp hạt

Từ các số liệu thực nghiệm của vận tốc dòng khí qua lớp hạt tĩnh ta đưa vào các phương trình tính toán để xác định được tổn áp qua lớp hạt tĩnh. Tương tự, tổn thất áp suất qua lớp hạt sôi tối thiểu cũng được tính toán theo các phương trình và đo bằng thực nghiệm, kết quả được trình bày trong đồ thị Hình 3.2.



Hình 3.2 *Tổn thất áp suất qua lớp hạt tĩnh và lớp hạt sôi tối thiểu*

3.1.7. Xác định nhiệt dung riêng của đường tinh luyện RS

Nhiệt dung riêng của đường tinh luyện RS được xác định bằng phương pháp hỗn hợp. Ở đây, chất lỏng sử dụng là Ethylene glycol với đặc điểm không hòa tan với đường [100] và nhiệt dung riêng đã biết theo [125]. Phương trình hồi quy thực nghiệm đối với nhiệt dung riêng của đường tinh luyện RS được xây dựng như sau (với R^2 = 0,898):

$$C = 1{,}0464 + 0{,}0085.t \qquad \text{(kJ/kg.K)} \qquad (3.1)$$

3.1.8. Xác định hệ số dẫn nhiệt của đường tinh luyện RS

Hệ số dẫn nhiệt của đường tinh luyện RS được xác định bằng phương pháp qua thăm kép, sử dụng dòng điện một chiều 5 V và điện trở 12 Ω để gia nhiệt. Hệ số dẫn nhiệt của đường tinh luyện RS khi đo bằng phương pháp que thăm kép đạt giá trị ổn định từ giây thứ 12 trở đi và đạt giá trị trung bình là 0,2716. Theo [127], hệ số dẫn nhiệt của tinh thể đường nằm trong khoảng 0,2 – 0,3 W/(m.K) nên giá trị này chấp nhận được trong tính toán khi mà thực tế không có thiết bị đo hệ số dẫn nhiệt của đường một cách chính xác nhất.

3.1.9. Xác định độ ẩm cân bằng của đường tinh luyện RS

Dựa trên kết quả phân tích hồi quy, có thể thấy hàm hồi quy đa thức có kết quả tương quan lớn nhất và sai số nhỏ nhất so với kết quả thực nghiệm. Dạng toán học của mô hình hồi quy đa thức theo phương trình (3.2):

$$M_{dbe} = 0{,}0069 + 0{,}0012.\varphi + 1{,}2.10^{-6}.t - 3{,}45.10^{-5}.\varphi^2 - 7{,}6.10^{-6}.\varphi t + 4{,}0.10^{-7}.\varphi^3 + 1{,}0.10^{-7}.\varphi^2 t \qquad (3.2)$$

3.1.10. Kết quả xây dựng động học quá trình sấy

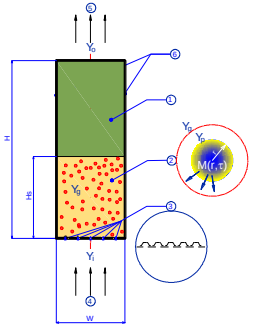
Dựa trên kết quả phân tích trên có thể thấy 03 mô hình toán: Newton, Henderson và Pabis, mô hình hàm mũ có kết quả phù hợp với hệ số tương quan lớn và hệ số RMSE tương đối thấp, trong đó mô hình Henderson và Pabis có hệ số tương quan lớn nhất nên thích hợp để áp dụng trong trường hợp sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí.

Kết quả tính toán cho thấy hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng tăng từ $1{,}402.10^{-10}$ đến $2{,}057.10^{-10}$ m^2/s khi nhiệt độ sấy tăng từ 50°C đến 80°C. Các hệ số D_0 và E_a

cũng được xác định lần lượt là $8{,}33.10^{-9}$ m^2/s và 10,9765 MJ/mol bằng phép giải hồi quy phi tuyến.

3.2. Xây dựng mô hình mô phỏng tầng sôi xung khí

Một mô hình sấy dựa trên lý thuyết hai pha [129] liên kết giữa thủy động lực học tầng sôi với động học sấy được sử dụng trong nghiên cứu này.



1- Vùng khí;
2- Vùng hạt;
3- Ghi phân phối khí;
4- Tác nhân sấy vào;
5- Tác nhân sấy ra;
6- Vách buồng sấy

Hình 3.3 *Mô hình tầng sôi sử dụng trong mô phỏng số*

Các giả thiết sau đây được thực hiện đối với mô hình sấy tầng sôi bọt:

(1) Các hạt được giả lỏng hoàn toàn và quá trình tầng sôi hoạt động ở chế độ sôi bọt (2 pha) [131].

(2) Hạt có dạng hình cầu, đẳng hướng, kích thước đồng đều và đồng chất. Do đường tinh luyện RS có cấu trúc tinh thể rắn nên độ co rút của hạt khi sấy xem như không đáng kể.

(3) Ẩm phân bố đồng nhất trong phần bọt khí xen giữa các hạt [131].

(4) Pha bọt ở dạng dòng chảy không xáo trộn, với nồng độ ẩm thay đổi theo hướng dòng khí, và ảnh hưởng của sự kết tụ bọt khí đến sự phân bố và thể tích bọt khí là không đáng kể [132].

(5) Không có hạt rắn nào tồn tại trong pha bọt; ảnh hưởng của sự vỡ bọt là không đáng kể [131].

(6) Sự thay đổi hướng tâm về nồng độ ẩm trong cả hai pha là không đáng kể [131].

(7) Trong quá trình sấy, ẩm khuếch tán xuyên tâm từ bên trong hạt ra bề mặt, quá trình bay hơi diễn ra ở bề mặt và ẩm khuếch tán vào khí bằng đối lưu [133].

(8) Buồng sấy được cách nhiệt để đảm bảo hạn chế tổn thất nhiệt ra môi trường và xem như tổn thất nhỏ không đáng kể.

3.3. Xây dựng hệ phương trình mô phỏng

3.3.1. Mô hình toán học về thủy động học tầng sôi

Phương pháp tiếp cận Euler-Euler được sử dụng cho cả pha khí và hạt rắn trong tầng sôi, có tính đến tất cả các tương tác có thể xảy ra giữa các pha. Trong luận án này, pha khí là tác nhân sấy và pha rắn là hạt đường tinh luyện RS.

Khi xem xét quá trình sấy tầng sôi xung khí dưới dạng mô hình hai pha, bao gồm pha khí và pha rắn thì tổng độ rỗng của hai pha luôn luôn bằng 1,0:

$$\varepsilon_g = 1 - \varepsilon_p \tag{3.3}$$

Với giả thiết khối hạt rắn được giả lỏng hoàn toàn trong quá trình sấy tầng sôi xung khí nên phương trình liên tục viết cho hai pha có dạng [58], [134]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}\left(\varepsilon_{\mathrm{g}}\rho_{\mathrm{g}}\right)+\nabla\cdot\left(\varepsilon_{\mathrm{g}}\rho_{\mathrm{g}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{g}}\right)=\dot{m} \tag{3.4}$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}\left(\varepsilon_{\mathrm{p}}\rho_{\mathrm{p}}\right)+\nabla\cdot\left(\varepsilon_{\mathrm{p}}\rho_{\mathrm{p}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{p}}\right)=-\dot{m} \tag{3.5}$$

Và các phương trình động lượng lần lượt là [67]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}\left(\varepsilon_{\mathrm{g}}\rho_{\mathrm{g}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{g}}\right)+\nabla\cdot\left(\varepsilon_{\mathrm{g}}\rho_{\mathrm{g}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{g}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{g}}\right)=-\varepsilon_g\nabla p_g+\bar{\bar{F}}_{\tau g}+\varepsilon_g\rho_{\mathrm{g}}g+\beta\left(\boldsymbol{U}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{U}_{\mathrm{g}}\right)+\dot{m}\boldsymbol{U}_{\mathrm{g}} \tag{3.6}$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau}\left(\varepsilon_{\mathrm{p}}\rho_{\mathrm{p}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{p}}\right)+\nabla\cdot\left(\varepsilon_{\mathrm{p}}\rho_{\mathrm{p}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{p}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{p}}\right)=-\nabla p_p-\varepsilon_p\nabla p_g+\bar{\bar{F}}_{\tau p}+\varepsilon_p\rho_{\mathrm{p}}g-\beta\left(\boldsymbol{U}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{U}_{\mathrm{g}}\right)-\dot{m}\boldsymbol{U}_{\mathrm{p}} \tag{3.7}$$

Phương trình năng lượng viết cho hai pha [134]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial \tau}\left(\varepsilon_g\rho_g h_g\right)+\nabla\cdot\left(\varepsilon_g\rho_g\boldsymbol{U}_{\mathrm{g}}h_g\right)&=-\nabla\cdot\varepsilon_g\lambda_g\nabla T_g+h\left(T_g-T_p\right)\\&+\varepsilon_g\left[\frac{\partial}{\partial \tau}p+\boldsymbol{U}_{\mathrm{g}}\nabla p\right]+\beta\left(\boldsymbol{U}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{U}_{\mathrm{g}}\right)\boldsymbol{U}_{\mathrm{g}}+h_{fg}\dot{m}\end{aligned} \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial \tau}\left(\varepsilon_p\rho_p h_p\right)+\nabla\cdot\left(\varepsilon_p\rho_p\boldsymbol{U}_{\mathrm{p}}h_p\right)&=-\nabla\cdot\varepsilon_p\lambda_p\nabla T_p+h\left(T_g-T_p\right)\\&+\varepsilon_p\left[\frac{\partial}{\partial \tau}p+\boldsymbol{U}_{\mathrm{p}}\nabla p\right]-\beta\left(\boldsymbol{U}_{\mathrm{p}}-\boldsymbol{U}_{\mathrm{g}}\right)\boldsymbol{U}_{\mathrm{p}}-h_{fg}\dot{m}\end{aligned} \tag{3.9}$$

3.3.2. Động học quá trình sấy tầng sôi

Trong trường hợp này, cả pha hạt và pha khí đều được giả định là hỗn hợp hoàn hảo. Cân bằng khối lượng cho độ ẩm được đưa ra là:

$$-G_p\frac{d\overline{M}}{d\tau}=L_g\left(Y_o-Y_i\right) \tag{3.10}$$

Đối với một hạt đơn lẻ trong tầng sôi, sự di chuyển độ ẩm bên trong một hạt hình cầu là:

$$\frac{\partial M}{\partial \tau}=-D_{eff}\left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2}+\frac{2}{r}\frac{\partial M}{\partial r}\right) \tag{3.11}$$

Đối với các hạt trong pha rắn, phương trình cân bằng khối lượng của ẩm:

$$-\rho_p\left(1-\varepsilon_{mf}\right)\left(1-\varepsilon_g\right)\frac{dG_p}{d\tau}=\omega \tag{3.12}$$

Đối với các hoạt động ở trạng thái ổn định, cân bằng khối lượng đối với khí ở kẽ hở là:

$$L_p\rho_g\left(Y_p-Y_i\right)=\omega+\frac{6K_c\rho_g\varepsilon_g}{d_b}\left(Y_g-Y_p\right) \tag{3.13}$$

Tương tự, cân bằng khối lượng của ẩm trong pha khí như sau,

$$\rho_g\varepsilon_g\frac{dY_g}{d\tau}+\rho_g L_g\left(Y_g-Y_i\right)=\frac{6K_c\varepsilon_g}{d_b}\left(Y_p-Y_g\right) \tag{3.14}$$

Các điều kiện ban đầu, điều kiện biên phù hợp với phương pháp sấy đường tinh luyện RS kiểu tầng sôi xung khí cụ thể như sau:

Điều kiện ban đầu:

1. Ở cửa vào ($y = 0$), dòng khí nóng được thổi thẳng đứng từ buồng phân phối khí thông qua ghi phân phối và tác động vào lớp hạt rắn phía trên. Tại thời điểm ban đầu, nhiệt độ và độ ẩm của đường tinh luyện RS đồng đều và bằng nhiệt độ và độ ẩm đưa vào buồng sấy, vận tốc khối hạt rắn ban đầu bằng 0 [60], [91]:

$$\tau = 0, \quad 0 \le r \le R_p: \quad T = T_0; M = M_0 \tag{3.15}$$

$$U_{xp} = U_{yp} = 0 \tag{3.16}$$

$$U_{xg} = U_0 / (1-\varepsilon); \; U_{yg} = 0; \tag{3.17}$$

$$\partial p / \partial x = 0, p = p_a + \left(H_0 - y\right)\left(\varepsilon_0 \rho_p + \left(1-\varepsilon_0\right)\rho_g\right) g \tag{3.18}$$

2. Ở cửa ra ($y = L_y$), áp suất khí bằng với áp suất khí quyển [60], [91]:

$$\varepsilon = 0, \quad U_{xg} = U_0, \quad U_{xp} = U_{yp} = U_{xg} = 0, \quad p = p_a \tag{3.19}$$

3. Dọc theo vách buồng sấy, áp dụng theo điều kiện không trượt đối với các pha khí và hạt [143]:

$$U_p(i, j+1/2) + U_p(i-1, j+1/2) = 0 \tag{3.20}$$

Điều kiện biên:

Với mô hình hai pha Euler – Euler, hai chiều (không xét đến trục z), trục ngang và trục đứng mặt cắt buồng sấy lần lượt là x và y với kích thước $L_x = W =$ 0,25 m và $L_y = H =$ 0,65 m. Điều kiện biên cho các biến (U_{xg}, U_{xp}, U_{yg}, U_{yp}, p và ε) được thiết lập như sau [60]:

$$x = 0, L_x: \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial U_{xg}}{\partial x} = \frac{\partial U_{xp}}{\partial x} = 0, \quad U_{yg} = U_{yp} = 0 \tag{3.21}$$

$$y = 0: U_{yg} = U_{yp} = U_{xp} = 0, \quad p = p_0, \quad \varepsilon = \varepsilon_0, \quad U_{xg} = U_0 / (1-\varepsilon) \tag{3.22}$$

$$y = L_y: \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial U_{xg}}{\partial y} = \frac{\partial U_{yg}}{\partial y} = 0, \quad U_{xp} = U_{yp} = 0 \tag{3.23}$$

Tại tâm của một hạt không có dòng nhiệt và dòng ẩm, điều này có nghĩa là:

$$\tau > 0, \quad r = 0: \quad \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=0} = 0; \left.\frac{\partial M}{\partial r}\right|_{r=0} = 0 \tag{3.24}$$

Bề mặt hạt được cho là ở trạng thái cân bằng với không khí xung quanh. Ngoài ra, sự chuyển khối đối lưu của hơi ẩm từ bề mặt hạt sang khí cũng diễn ra:

$$\text{Tại } \tau > 0, \quad r = R_p: \quad -D_{eff} \left.\frac{\partial M}{\partial r}\right|_{r=R_p} = K_i \left(Y_s - Y_p\right) \tag{3.25}$$

$$\text{và} \quad -\lambda \left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=R_p} = h\left(T_g - T_s\right) - K_i \rho_p \left(M - M_e\right) h_{fg} \tag{3.26}$$

3.3.3. Thuật toán giải hệ phương trình mô phỏng số

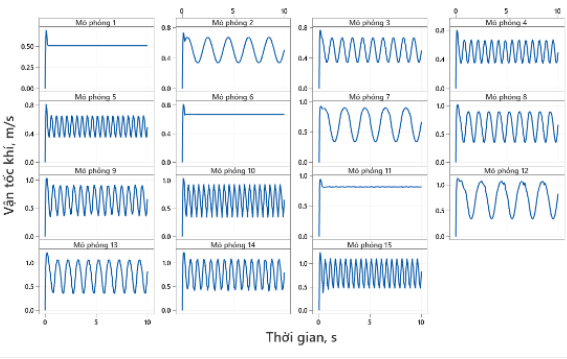
Phương pháp thể tích hữu hạn (FVM) được áp dụng với lưới so le để rời rạc hóa các phương trình cân bằng khối lượng, động lượng và năng lượng. Sử dụng phương pháp này, các giá trị vô hướng (tức là áp suất chất khí) được tính toán ở tâm của thể tích kiểm soát trong khi các thành phần vận tốc được tính dọc theo các mặt của thể tích kiểm soát.

Thuật toán SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) là một thủ tục số phân chia toán tử được sử dụng rộng rãi trong CFD để giải các phương trình Navier-Stokes rời rạc cho các hệ thống không nén được. MFiX sử dụng phiên bản mở rộng của thuật toán SIMPLE do Patankar [145] phát triển để giải thích cho các hệ thống nhiều pha. Thuật toán này có thể được tóm tắt thành 10 bước giải [67].

3.4. Kết quả mô phỏng thủy khí quá trình hóa sôi đường tinh luyện RS

3.4.1. Kết quả mô phỏng vận tốc khí qua bề mặt lớp hạt

Kết quả mô phỏng cho thấy vận tốc trung bình qua bề mặt lớp hạt khi không cấp xung khí là lớn nhất (0,512; 0,675; 0,818 lần lượt cho các mô phỏng 1, 6, 11), thấp hơn giá trị trung bình của dòng cấp vào từ 27,4% đến 30,4%.



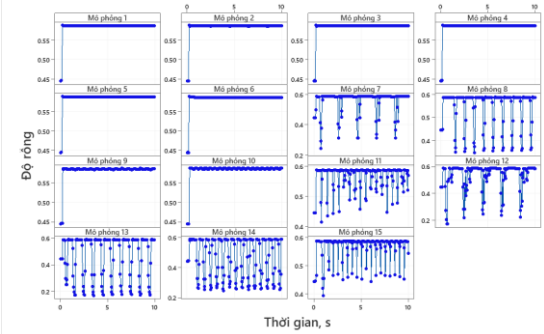
Hình 3.4 *Đồ thị phân bố vận tốc trung bình trên bề mặt lớp hạt*

Trong trường hợp có xung khí, vận tốc trung bình qua bề mặt lớp hạt thấp hơn 27,9 – 27,8% (mô phỏng 2–5), thấp hơn 30,9 – 29,5% (mô phỏng 7–10), thấp hơn 35,8 – 32,6% (mô phỏng 12–15) so với giá trị trung bình của dòng cấp vào. Tuy nhiên, do có những thời điểm vận tốc khí nhỏ hơn vận tốc sôi tối thiểu nên lớp hạt dừng sôi. Điều này tạo điều kiện cho quá trình vận chuyển ẩm từ tâm vật liệu ra ngoài bề mặt do sự chênh lệch nhiệt độ.

3.4.2. Kết quả mô phỏng độ rỗng của lớp hạt

Xét về độ rỗng của lớp hạt khi sôi, dao động vận tốc càng lớn thì mức độ dao động của độ rỗng cũng lớn hơn. Với các trường hợp vận tốc khí cấp vào nhỏ hơn 0,94 m/s thì độ rỗng lớp hạt ít thay đổi, dao động trong khoảng 0,55 – 0,587, ngược lại khi cấp xung khí với vận tốc lớn hơn (từ mô phỏng 7 – 15), độ rỗng lớp hạt có sự thay đổi lớn từ 0,2 đến 0,587. Với mô phỏng 13, độ rỗng lớp hạt thay đổi lớn nhất, từ 0,171 đến 0,587. Để đạt hiệu quả cao nhất về sự thay đổi độ

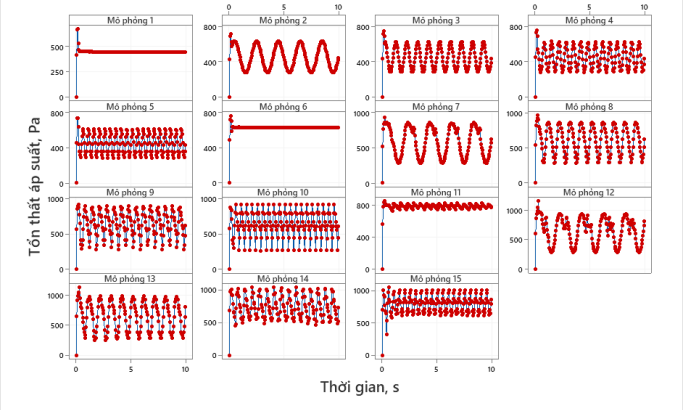
rỗng của lớp hạt khi sôi, các trường hợp mô phỏng với vận tốc trung bình >1,0 m/s (trên 2 lần so với vận tốc sôi tối thiểu) nên cần xem xét khi tiến hành thực nghiệm để tăng cường quá trình trao đổi nhiệt – ẩm giữa hạt với khí.



Hình 3.5 *Đồ thị phân bố độ rỗng của lớp hạt khi mô phỏng*

3.4.3. Kết quả mô phỏng tổn thất áp suất qua lớp hạt

Đối với tổn thất áp suất qua lớp hạt (Hình 3.6), kết quả mô phỏng cũng cho thấy có sự dao động lớn khi cấp dòng xung khí vào lớp hạt. Đối với tầng sôi thông thường, tổn thất áp suất qua lớp hạt ít thay đổi khi sôi, nhưng tổn thất áp suất tại vị trí sôi tối thiểu lớn và giữ ổn định trong khoảng 450 – 800 Pa.

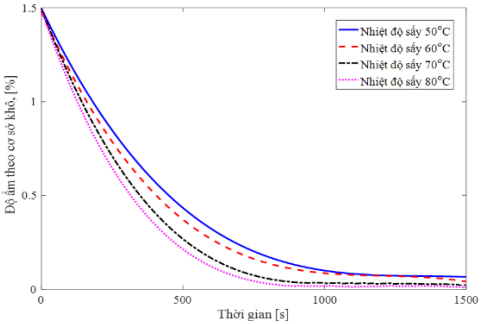


Hình 3.6 *Đồ thị phân bố tổn thất áp suất qua lớp hạt khi mô phỏng số*

Giá trị tổn thất áp suất dao động lớn khi cấp xung khí với tần số lớn hơn, cụ thể là thay đổi trong khoảng 300 – 350 Pa đối với các tần số 0,5 Hz và 1,0 Hz và lên đến 450 – 500 Pa đối với các tần số 1,5 Hz và 2,0 Hz. Trong cùng điều kiện vận tốc trung bình của dòng khí cấp vào, giá trị tổn thất áp suất trung bình qua lớp hạt tương đối bằng nhau, chỉ thay đổi về biên độ do ảnh hưởng của tần số xung khí, lần lượt đạt 450 Pa, 622 Pa và 712 Pa với vận tốc trung bình thay đổi từ 0,705 m/s, 0,94 m/s và 1,175 m/s. Các kết quả này phần nào phản ánh được bản chất của tầng sôi xung khí, đó là lớp hạt chuyển động lên xuống liên tục khi cấp khí theo biên dạng sóng sin.

3.5. Kết quả mô phỏng động học quá trình sấy đường tinh luyện RS

Kết quả mô phỏng đường cong sấy tầng sôi xung khí đối với hạt đường tinh luyện RS được trình bày trên Hình 3.7 ở các nhiệt độ sấy khác nhau: 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, vận tốc trung bình của dòng khí qua ghi 1,175 m/s và tần số xung khí 0,5 Hz.



Hình 3.7 *Đường cong sấy đường RS ở nhiệt độ sấy 50℃ – 80℃*

- Theo nhiệt độ sấy 50°C, 60°C, 70°C, 80°C thời gian cần thiết để độ ẩm đường tinh luyện RS giảm từ 1,5% đến 0,05% lần lượt là 1650s (27,5 phút), 1458s (24,3 phút), 1122s (18,7 phút), 828s (13,8 phút). Tốc độ giảm ẩm trung bình đạt lần lượt 0,053 %/phút, 0,06 %/phút, 0,078 %/phút, 0,105 %/phút.
- Nhiệt độ vật liệu đạt ổn định sau 50 – 90 s đầu tiên và duy trì ở mức trung bình là 45,3°C – 77,6°C. Do ảnh hưởng của xung khí nên nhiệt độ của vật liệu dao động trong khoảng 0,2°C – 0,1°C.

3.6. Kết quả thực nghiệm kiểm chứng lý thuyết

3.6.1. Vận tốc khí qua bề mặt lớp hạt

Khi xét ở cùng tần số xung khí, thời gian ổn định dòng khí qua lớp hạt ở tầng sôi xung khí dài hơn, chênh lệch về giá trị trung bình của vận tốc qua bề mặt lớp hạt cũng lớn hơn kết quả mô phỏng. Tại các thời điểm 20 s, 30 s, 40 s,… sau khi dòng khí đã ổn định, chênh lệch giá trị vận tốc khí qua bề mặt lớp hạt giữa thực nghiệm và mô phỏng trong các trường hợp lớn nhất lần lượt là 14%, 11%, 8% và thấp nhất lần lượt là 9%, 10%, 6%.

3.6.2. Tổn thất áp suất qua bề mặt lớp hạt

Đối với tầng sôi không có xung khí, chênh lệch giữa kết quả thực nghiệm và mô phỏng ở các vận tốc cao lên đến 25%, chẳng hạn trường hợp mô phỏng 11, giá trị trung bình mô phỏng được là 781 Pa trong khi thực nghiệm đo được chỉ là 584 Pa. Sự dao động lớn về vận tốc khí qua bề mặt lớp hạt khi mô phỏng cũng phản ánh được kết quả này. Tổn thất áp suất đo được tại các thời điểm 10, 20, 30 s… là tương đối ổn định hơn so với kết quả mô phỏng.

Đối với tầng sôi xung khí, tổn thất áp suất qua lớp hạt trong thực tế đo được ổn định sau khoảng 10 s và có sự chênh lệch lớn hơn so với kết quả mô phỏng khi tăng tần số xung khí. Trong các trường hợp tần số xung khí thấp (0,5 và 1,0

Hz), giá trị tổn thất đo được xét cùng thời điểm là tương đồng với kết quả mô phỏng, tần số tăng đến 2,0 Hz thì chênh lệch này tăng lên 16 – 33%.

Xét cùng nhóm trường hợp vận tốc khí cấp vào như nhau thì chênh lệch giá trị tổn thất áp suất giữa mô phỏng và thực tế lần lượt là 6% (27 Pa), 21% (129 Pa) và 20% (144 Pa) ở các trường hợp mô phỏng 1–5 ($\bar{U}$ = 0,705 m/s), 6–10 ($\bar{U}$ = 0,940 m/s), 11–15 ($\bar{U}$ = 1,175 m/s).

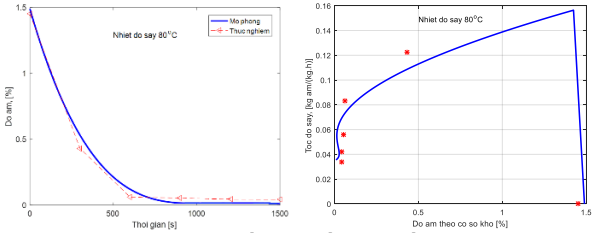
3.6.3. Nhiệt độ vật liệu trong quá trình sấy

Trong thực nghiệm này, nhiệt độ sấy được thay đổi ở các giá trị khác nhau: 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, vận tốc trung bình của dòng khí qua ghi 1,175 m/s và tần số xung khí 0,5 Hz nhằm so sánh với kết quả mô phỏng số.

Nhiệt độ của đường tinh luyện RS trong buồng sấy được đo bởi 6 cảm biến nhiệt độ bố trí trong lớp hạt như đã trình bày ở mục 2.6, kết quả trung bình của 6 giá trị này được dùng để vẽ đồ thị so sánh với mô phỏng và được biểu diễn trên Hình 3.31. Dựa trên kết quả này có thể thấy, nhiệt độ thực tế của vật liệu có sự thay đổi theo biên dạng của dòng xung khí cấp vào, trong khi kết quả mô phỏng cho thấy nhiệt độ tương đối ổn định. Tuy nhiên, khi xét giá trị trung bình của nhiệt độ vật liệu trong toàn bộ thời gian sấy thì chênh lệch không quá 2%. Ở các trường hợp nhiệt độ sấy thấp (50 – 60°C), nhiệt độ vật liệu có sự dao động lớn hơn, từ 3 – 6°C, trong khi với nhiệt độ sấy cao hơn (70 – 80°C), dao động này chỉ còn từ 1 – 3°C.

3.6.4. Đường cong sấy

Đường cong sấy giữa mô phỏng và thực tế tương thích với nhau, với mức độ tương quan R>0,95, thời gian sấy giữa thực tế và mô phỏng chênh lệch 8 – 12%. Ở các nhiệt độ sấy 50, 60°C kết quả mô phỏng và thực nghiệm tương đồng với nhau, trong khi nhiệt độ sấy 70, 80°C, kết quả mô phỏng thấp hơn so với thực nghiệm, do nhiệt độ vật liệu trong mô phỏng cao hơn thực nghiệm. Tuy nhiên, do độ ẩm của đường tinh luyện RS yêu cầu rất thấp (≤ 0,05%) nên khoảng sai lệch này có thể chấp nhận được giữa mô phỏng và thực tế.



Hình 3.8 *Đường cong sấy và tốc độ sấy ở nhiệt độ sấy 80℃*

3.7. Thực nghiệm xác định ảnh hưởng của các thông số công nghệ

Dựa trên kết quả thực nghiệm và phân tích hồi quy đa yếu tố, sau khi loại trừ các hệ số có mức ý nghĩa $P > 0,05$, phương trình hồi quy mô tả mối quan hệ giữa các thông số công nghệ (X_1, X_2, X_3) đến các hàm mục tiêu như sau:

Ảnh hưởng đến tổng chênh lệch độ màu (Y_1):

$$Y_1 = 87,73 - 2,77Z_1 + 27,72Z_2 - 15,21Z_3 - 0,17Z_1Z_2 + 0,14Z_1Z_3 + 0,02Z_1^2 - 4,43Z_2^2 + 2,59Z_3^2 \quad (3.27)$$

Ảnh hưởng đến tiêu hao điện năng riêng (Y_2):

$$Y_2 = -1610,4 - 48,79Z_1 - 134,27Z_2 + 35,25Z_3 - 4,45Z_1Z_2 - 0,248Z_1^2 \quad (3.28)$$

Ảnh hưởng đến tiêu hao nhiệt năng riêng (Y_3):

$$Y_3 = -929,5 + 41,06Z_1 - 414,12Z_2 + 1065,7Z_3 + 11,43Z_1Z_3 - 140,09Z_2^2 + 132,5Z_3^2 \quad (3.29)$$

Nhận xét:

Nhiệt độ và vận tốc tác nhân sấy có ảnh hưởng lớn nhất đến tổng chênh lệch độ màu. Khi sấy ở nhiệt độ cao dễ làm đường tinh luyện RS ngả sang vàng (tăng giá trị b*, giảm giá trị L*), ngược lại ở vận tốc cao, vật liệu nhanh khô hơn nên màu sáng giữ được tốt hơn.

Đối với hàm tiêu hao điện năng riêng, vận tốc tác nhân sấy là yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất đến hàm mục tiêu này. Việc tăng vận tốc tác nhân sấy sẽ giúp tăng cường truyền nhiệt và truyền ẩm trong tầng sôi nhưng điều này làm tăng tiêu hao điện năng. Ngược lại, giảm vận tốc tác nhân sấy sẽ ảnh hưởng đến chế độ sôi làm tăng thời gian sấy.

Tần số xung khí là yếu tố không gây ảnh hưởng đến tổng lượng nhiệt năng tiêu thụ, nhưng lại có ảnh hưởng đến lượng sản phẩm thu được của quá trình sấy. Do đó, khi kết hợp với biến vận tốc tác nhân sấy thì hai đại lượng này lại có ảnh hưởng nghịch đến tiêu hao nhiệt năng, nghĩa là khi tăng biến này và giảm biến còn lại đều không có lợi về mặt tiêu hao nhiệt năng riêng.

Xây dựng chế độ sấy đường tinh luyện RS

Dựa trên đồ thị bề mặt đáp ứng của 3 thông số công nghệ có thể thấy phạm vi phù hợp của các thông số nhiệt độ sấy, tác nhân sấy và tần số xung khí lần lượt là [-0,5 0,5], [-0,75 0], [-1,0 -0,5] tương ứng với giá trị thực từ 65 – 75°C, 1,5 – 2 m/s, 0,5 – 0,75 Hz. Đây là phạm vi của các thông số công nghệ có thể áp dụng trong quá trình sấy đường RS bằng kỹ thuật tầng sôi xung khí trong thực tế. Kết quả phân tích theo thuật toán tối ưu hóa đã xác định được giá trị các biến tối ưu như sau:

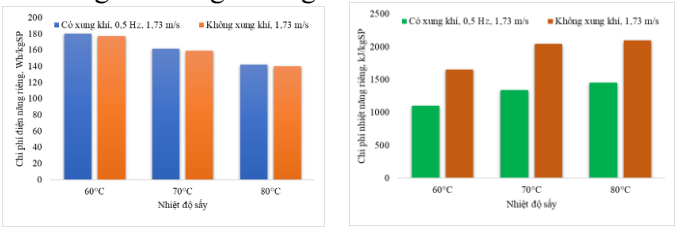
$X_1^{opt} = -0,286$; $X_2^{opt} = -0,534$; $X_3^{opt} = -0,974$;, tương ứng với giá trị các hàm mục tiêu: $Y_1^{\min} = 20,34$ $Y_2^{\min} = 195$ Wh/kgSP; $Y_3^{\min} = 979$ kJ/kgSP. Chuyển đổi thành giá trị các biến thực: $Z_1^{opt} = 67,1^{o}$C; $Z_2^{opt} = 1,73$ m/s; $Z_3^{opt} = 0,51$ Hz;

3.8. Đánh giá kết quả nghiên cứu thực nghiệm

Kết quả so sánh màu sắc giữa đường tinh luyện RS trước và sau khi sấy cho thấy đường tinh luyện RS sản phẩm có màu trắng hơn so với đường trước khi sấy, độ sáng trung bình đạt L* = 67,14 (tăng 43%), tổng chênh lệch độ màu của đường tinh luyện RS trước và sau khi sấy đạt ΔE^* = 29,1. Nguyên nhân là do đường trước khi sấy có chứa nhiều nước ở bề mặt.

Đánh giá chi phí năng lượng:

Tiến hành so sánh chi phí năng lượng riêng (điện và nhiệt) giữa tầng sôi xung khí và tầng sôi thông thường ở cùng vận tốc tác nhân 1,73 m/s, nhiệt độ sấy từ 60 – 80°C trên cùng mô hình sấy (Hình 3.9). Kết quả đo được cho thấy tiêu hao điện năng riêng của tầng sôi xung khí cao hơn tầng sôi thông thường khoảng 2%, là do tiêu hao điện năng cho động cơ tạo xung khí. Trong khi tiêu hao nhiệt năng riêng của tầng sôi xung khí lại thấp hơn từ 30% đến 34% so với tầng sôi thông thường. Như vậy, xét về chi phí năng lượng thì tầng sôi xung khí tiết kiệm năng lượng hơn so với tầng sôi thông thường.



a) Tiêu hao điện năng riêng b) Tiêu hao nhiệt năng riêng

Hình 3.9 *Tiêu hao năng lượng riêng giữa tầng sôi xung khí và thông thường*

Để so sánh trong quy mô lớn hơn, có thể đối chiếu với chi phí năng lượng của quá trình sấy đường được công bố trên thế giới. Từ kết quả thực nghiệm được trình bày ở Bảng 3.17, tiêu hao nhiệt năng trung bình trong thực nghiệm sấy đường RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí là 1064,2 kJ/kgSP. Trong khi đó, theo Taner và Sivrioglu [166], tiêu hao nhiệt năng cho quá trình sấy đường ở Thổ Nhĩ Kỳ là 1459,4 kJ/kgSP, nghĩa là chi phí nhiệt năng khi sấy tầng sôi xung khí thấp hơn khoảng 27%.

3.9. Kết luận chương 3

Kết quả thực nghiệm đã xác định được các thông số của đường tinh luyện RS như đường kính tương đương, khối lượng riêng, khối lượng thể tích, độ rỗng ở trạng thái tĩnh, độ ẩm cân bằng, vận tốc sôi tối thiểu, nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt, hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng. Luận án cũng đã xây dựng được mô hình mô phỏng mô tả quá trình sấy, trên cơ sở đó xác định hệ phương trình mô phỏng phù hợp với sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí.

Kết quả mô phỏng số đã xác định được sự thay đổi về mặt thủy động và động học, từ đó thiết lập được các đường cong sấy lý thuyết ở các nhiệt độ sấy khác nhau và xác định được nhiệt độ phù hợp để sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí là 70 đến 80°C, thời gian sấy dao động từ 18,7 phút đến 13,8 phút, tốc độ giảm ẩm trung bình đạt từ 0,078 %/phút đến 0,105 %/phút.

Kết quả nghiên cứu thực nghiệm đã xây dựng được các phương trình tương quan giữa các yếu tố này và tối ưu hóa được các thông số công nghệ của quá trình sấy. Kết quả sấy kiểm chứng ở điều kiện tối ưu cho thấy hệ thống hoạt động tốt, độ ẩm đạt thấp hơn yêu cầu của TCVN, chi phí năng lượng thấp hơn so với tầng sôi thông thường. Kết quả này cũng chứng minh được ưu điểm của tầng sôi xung khí về mặt tiết kiệm năng lượng.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết luận

Kết quả nghiên cứu đã xác định được các thông số thủy khí và nhiệt vật lý của đường tinh luyện RS như đường kính tương đương, khối lượng riêng, khối lượng thể tích, độ rỗng ở trạng thái tĩnh, độ ẩm cân bằng, vận tốc sôi tối thiểu, nhiệt dung riêng, hệ số dẫn nhiệt, hệ số khuếch tán ẩm hiệu dụng.

Luận án cũng đã xây dựng được mô hình mô phỏng mô tả quá trình sấy, trên cơ sở đó xác định hệ phương trình mô phỏng phù hợp với sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí.

Kết quả mô phỏng số đã xác định được sự thay đổi về mặt thủy động (vận tốc bề mặt hạt, tổn thất áp suất, độ rỗng của khối hạt) và động học (nhiệt độ và độ ẩm vật liệu), từ đó xác định được thời gian sấy khi thay đổi nhiệt độ sấy. Kết quả này cũng xác định được phạm vi vận tốc trung bình của dòng khí cấp vào (qua ghi phân phối) cần lớn hơn 0,94 m/s và tần số xung khí nên thay đổi trong khoảng 0,5 Hz đến 1,5 Hz là phù hợp với tầng sôi xung khí đối với sản phẩm đường tinh luyện RS. Vận tốc trung bình càng cao thì khả năng hóa sôi càng tốt nhưng làm tăng chi phí năng lượng, ngược lại tần số xung khí càng cao thì thời gian "nghỉ" giữa các chu kì ngắn nên độ ẩm hạt giảm chậm hơn, dẫn đến thời gian sấy dài hơn. Trong phạm vi này, vận tốc bề mặt hạt đạt giá trị trung bình 0,7 m/s, dao động trong khoảng 0,35 m/s đến 1,1 m/s, độ rỗng của khối hạt thay đổi trong phạm vi 0,3 – 0,59 và tổn thất áp suất qua lớp hạt dao động trong khoảng 300 – 1100 Pa. Từ đó, kết quả nghiên cứu lý thuyết cũng đã phản ánh về vấn đề lựa chọn quạt cấp khí nóng cho máy sấy giữa tầng sôi xung khí

Kết quả nghiên cứu thông qua mô phỏng số cũng đã thiết lập được các đường cong sấy lý thuyết ở các nhiệt độ sấy khác nhau, đồng thời xác định được nhiệt độ phù hợp để sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí là 70 đến 80°C, thời gian sấy dao động từ 18,7 phút đến 13,8 phút, tốc độ giảm ẩm trung bình dao động từ 0,078 %/phút đến 0,105 %/phút.

Ảnh hưởng của 03 thông số công nghệ chính đến quá trình sấy đã được nghiên cứu thông qua quy hoạch thực nghiệm trực giao cấp 2. Kết quả đã xác định được phạm vi phù hợp của các thông số nhiệt độ sấy, tác nhân sấy và tần số xung khí lần lượt là từ 65 – 75°C, 1,5 – 2 m/s, 0,5 – 0,75 Hz. Tiến hành tối ưu hóa 03 hàm mục tiêu cũng đã xác định được chế độ sấy tầng sôi xung khí hợp lý đối với đường tinh luyện RS là nhiệt độ sấy 67,1°C, vận tốc tác nhân sấy 1,73 m/s, tần số xung khí 0,51 Hz.

Để kiểm chứng và so sánh chi phí năng lượng giữa máy sấy tầng sôi xung khí và máy sấy tầng sôi thông thường, các thực nghiệm cũng đã được thực hiện trong cùng điều kiện về năng suất, nhiệt độ, vận tốc, chỉ khác là tầng sôi thông thường không có thiết bị tạo xung khí. Đồng thời, các giá trị về chi phí năng lượng cũng được đối chiếu với các nghiên cứu trên thế giới về chi phí cho quá trình sấy

đường, chi phí cho máy sấy tầng sôi. Kết quả cho thấy kỹ thuật sấy tầng sôi xung khí giúp giảm đến 30% chi phí năng lượng cho quá trình sấy, mặc dù tiêu hao điện năng cao hơn khoảng 2% do sử dụng điện năng cho thiết bị tạo xung khí.

Kiến nghị

Nghiên cứu kỹ thuật sấy tầng sôi xung khí đối với đường tinh luyện RS đã đạt được mục tiêu đề ra về cả lý thuyết lẫn thực nghiệm.

Kết quả nghiên cứu lý thuyết đã làm rõ được truyền nhiệt và truyền ẩm trong quá trình sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí, làm cơ sở khoa học cho nghiên cứu thực nghiệm, góp phần dự đoán và xác định được các thông số về thủy khí, động học của quá trình sấy đường tinh luyện RS bằng phương pháp tầng sôi xung khí.

Nghiên cứu thực nghiệm giúp kiểm chứng các kết quả của nghiên cứu lý thuyết và chứng minh khả năng áp dụng kỹ thuật sấy tầng sôi xung khí đối với đường tinh luyện RS vào thực tiễn để nâng cao chất lượng sản phẩm sấy và tiết kiệm năng lượng. Đồng thời, nghiên cứu thực nghiệm đa yếu tố cũng giúp thiết lập được các thông số công nghệ phù hợp của quá trình sấy, làm nền tảng cho việc thiết kế và vận hành máy sấy quy mô công nghiệp trong thực tế.

Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy phương pháp sấy tầng sôi xung khí mang lại hiệu quả trong việc giảm chi phí năng lượng của quá trình sấy cũng như nâng cao chất lượng sản phẩm. Tuy nhiên, luận án mới chỉ tập trung vào nghiên cứu về cơ chế giả lỏng, truyền nhiệt và truyền ẩm trong quá trình sấy tầng sôi xung khí và cũng mới chỉ thực hiện thực nghiệm trên mô hình quy mô năng suất 5 kg/mẻ.

Để có thể đánh giá toàn diện hơn về mặt công nghệ sấy cùng như khả năng phát triển công nghệ sấy đường RS quy mô công nghiệp ứng dụng cho các nhà máy mía đường tại khu vực đồng bằng sông Cửu Long nói riêng và cả nước nói chung, hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án là tiếp tục nghiên cứu và phát triển máy sấy tầng sôi xung khí với quy mô năng suất sấy cao 500 kg/mẻ, 1000 kg/mẻ và 3000 kg/mẻ để từ đó có thể đánh giá đầy đủ tính hiệu quả kinh tế của sấy tầng sôi xung khí cho sấy đường quy mô công nghiệp trong tương lai.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ CỦA TÁC GIẢ

1. Phạm Quang Phú, Bùi Trung Thành, Lê Anh Đức. "Xác định các thông số vật lý cơ bản của hạt mía đường RS để ứng dụng trong tính toán sấy tầng sôi xung khí". *Tạp Chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, vol 21, số p.h 7, tháng Bảy 2023, tr 58-62.
2. Phạm Quang Phú, Bùi Trung Thành, Lê Anh Đức. "Nghiên cứu thực nghiệm xác định thông số hình học của hạt đường RS ứng dụng trong thiết kế máy sấy tầng sôi xung khí". *Tạp Chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, vol 20, số p.h 10.2, tháng Mười 2022, tr 44-47.
3. Pham Quang Phu, Bui Trung Thanh, "A Review on Pulsed Fluidized Bed Dryer", Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, ISSN 2195-4356 (SCOPUS), pp. 721-730, 2021.
4. Lê Hồng Long, Phạm Quang Phú, Bùi Trung Thành, "Nghiên cứu thực nghiệm xác định ảnh hưởng của miền nhiệt độ tác nhân sấy đến quá trình sấy đường RS trên máy sấy tầng sôi liên tục cấp khí kiểu xung", *Tạp Chí Khoa Học Giáo Dục Kỹ Thuật*, ISSN 1859-1272, tập số 57 (04/2020), trang 100-108, 2020.