

TỔNG QUAN CÁC PHƯƠNG PHÁP SẤY THĂNG HOA HIỆN ĐẠI TRONG CÔNG NGHỆ THỰC PHẨM

Nguyễn Hoàng Thảo Ly⁽¹⁾, Bùi Phạm Thanh Hương⁽¹⁾

(1) Trường Đại học Nông Lâm Thành phố Hồ Chí Minh

Ngày nhận bài 24/5/2024; Chấp nhận đăng 15/7/2024

Liên hệ email: ly.nguyenhoangthao@hcmuaf.edu.vn

Tóm tắt

Ngành công nghệ thực phẩm đã chứng kiến sự phát triển đáng chú ý của các phương pháp sấy thăng hoa hiện đại, đặc biệt là trong việc áp dụng sấy thăng hoa kiểu phun, sấy thăng hoa chân không và sấy thăng hoa vi sóng. Một số nghiên cứu gần đây đã tập trung vào khả năng của từng phương pháp sấy trong việc bảo toàn và nâng cao chất lượng thực phẩm. Các kết quả cho thấy sấy thăng hoa kiểu phun mang lại sản phẩm với chất lượng cao và nâng cao hiệu quả vi bao các chất nhạy cảm với nhiệt, góp phần đáng kể vào sự ổn định oxy hóa, trong khi sấy thăng hoa chân không cũng được đánh giá cao với khả năng duy trì màu sắc, hương vị và dinh dưỡng. Và sấy thăng hoa bằng vi sóng được biết đến là phương pháp giúp tiết kiệm thời gian sấy và năng lượng tiêu thụ. Mặc dù có những thách thức, như chi phí và thời gian xử lý, nhưng tiềm năng của các phương pháp sấy thăng hoa hiện đại trong việc cải thiện chất lượng sản phẩm và giảm tác động môi trường là rất lớn.

Từ khóa: chất lượng sản phẩm, công nghiệp thực phẩm, đông lạnh, sấy phun, sấy thăng hoa

Abstract

AN OVERVIEW OF THE MODERN FREEZE-DRYING METHODS IN FOOD INDUSTRY

The food industry has witnessed remarkable developments in modern freeze drying methods, especially in the application of spray freeze drying, vacuum freeze drying and microwave freeze drying. Recent studies have focused on the ability of each of these methods to preserve and improve food quality. The results show that spray freeze drying provides high quality products and enhances the encapsulation efficiency of heat-sensitive substances, significantly contributing to oxidative stability, while vacuum sublimation drying is also appreciated for its ability to maintain color, flavor and nutrition. And microwave freeze drying is known to be a method that saves drying time and energy consumption. Although there are challenges, such as cost and processing time, the potential of modern freeze drying methods to improve product quality and reduce environmental impact is huge.

1. Giới thiệu

Sấy thăng hoa (FD) là một trong những kỹ thuật sấy quan trọng đã dẫn đến sự phát triển nhanh chóng của sản phẩm trong công nghiệp thực phẩm ở các nước Tây Âu, sau đó được phổ biến khắp Hoa Kỳ, Anh, Pháp, Nhật Bản... (Liu và cs., 2022). Kỹ thuật này bao gồm việc đông lạnh sản phẩm, sau đó là thăng hoa nước ở áp suất thấp. Trong các kỹ thuật sấy, FD được đánh giá là tốt nhất vì không ảnh hưởng đến cấu trúc vi mô của sản phẩm, tốc độ bù nước nhanh, khả năng bù nước cao và bảo toàn tốt các tính chất hóa lý (Prosapio và cs., 2020). Bên cạnh đó hương vị, màu sắc, trạng thái ban đầu của thực phẩm cũng như thành phần dinh dưỡng được duy trì ở mức độ cao nhất. Đây cũng là phương pháp được ưa chuộng để sấy thực phẩm có chứa các hợp chất dễ bị oxy hóa, các sản phẩm nhạy cảm với nhiệt (Berk, 2013; Bhatta và cs., 2020). Trước đây, với thời gian sấy dài, tiêu thụ nhiều năng lượng, chi phí cao đã hạn chế ứng dụng vào công nghiệp thực phẩm. Nhưng những năm gần đây, với sự tiên bộ của khoa học đã cải tiến, đa dạng hóa và cho ra đời các phương pháp sấy khác nhau như FD kiểu phun, FD chân không, FD vi sóng với nhiều ưu điểm hơn như thời gian sấy, mức tiêu thụ năng lượng giảm, độ ổn định oxy hóa được nâng cao hơn, thời hạn sử dụng sản phẩm lâu hơn.

2. Sấy thăng hoa kiểu phun (Spray freeze-drying)

Sấy thăng hoa kiểu phun (SFD) là phương pháp sấy khắc phục được những hạn chế và hấp thu những ưu điểm nổi bật của kỹ thuật sấy phun và FD. SFD là một quá trình bao gồm ba bước: chất lỏng hoặc dung dịch được nguyên tử hóa để tăng diện tích bề mặt nhằm tăng cường sự truyền nhiệt và truyền khối tạo thành giọt. Sau đó, các giọt nguyên tử hóa trải qua quá trình đóng băng nhanh chóng trong sự hiện diện của khí lạnh hoặc chất lỏng đông lạnh ở nhiệt độ cực thấp để tạo thành các hạt rắn. Cuối cùng, được thăng hoa ở nhiệt độ và áp suất thấp (Dutta và cs., 2018). SFD có ưu điểm hơn so với các kỹ thuật sấy thông thường như thời gian sấy ngắn, kích thước hạt đồng nhất, có độ tái lập, đặc tính dòng chảy vượt trội, hoàn nguyên ngay lập tức và độ ổn định oxy hóa cao (Ishwarya, 2022). SFD đã được ứng dụng trong sản xuất các sản phẩm sữa, cà phê, vanillin, nấm Shiitake, *Lactobacillus casei*, axit docohexanoic, vitamin E và enzyme được trình bày trong bảng 1.

Bảng 1. Các ứng dụng của sấy thăng hoa kiểu phun trong thực phẩm

Loại thực phẩm	Kết quả
Sản phẩm sữa (Anandharamakrishnan và Ishwarya, 2015)	Bảo toàn cấu trúc protein tốt hơn, cải thiện độ hòa tan và kết cấu trong các sản phẩm sữa.
Cà phê (Anandharamakrishnan và Ishwarya, 2015)	Giảm thời gian sấy so với sấy phun và sấy thăng hoa: vì hạt có khả năng chảy tốt, giữ màu và mùi thơm. Giữ lại hương vị và chất dinh dưỡng, cho cà phê hòa tan.
Vanillin (Hundre và cs., 2015)	Giữ lại mùi thơm dễ bay hơi. Hiệu suất vi bao cao (70%), độ ổn định nhiệt tăng gần gấp đôi.
Nấm Shiitake (García-Segovia và cs., 2011)	Hiệu suất vi bao cao (80%) cho hương thơm, bột có cấu trúc đồng nhất, khả năng bù nước tốt.
<i>Lactobacillus casei</i> (Dolly và cs., 2011)	Tỷ lệ sống sót của vi khuẩn 97%.
Axit docohexanoic (Karthik và Anandharamakrishnan, 2012)	Cấu trúc vi mô bề mặt thuận lợi cho khả năng bù nước, hiệu quả cao (71%). Giảm oxy hóa khi bảo quản, dễ dàng ứng dụng hơn so với sấy phun và sấy thăng hoa.
Vitamin E (Rogers và cs., 2016)	Hình thái bề mặt mong muốn, hiệu quả cao (89,6%), sinh khả dụng tốt hơn so với đông lạnh và sấy phun.
Enzyme (Zhang và cs., 2018)	Bảo toàn hoạt động enzyme trypsin. Trehalose (lớp phủ) và trypsin (1: 1) cung cấp sự bảo vệ cho 97% hoạt động của enzyme bằng cách cố định, tốt hơn so với sấy phun.

SFD có thể ứng dụng trong sản xuất bột thực phẩm (sữa bột, cà phê hòa tan). Trong đó độ ẩm, độ phân tán, độ hòa tan được quan tâm nhiều nhất vì ảnh hưởng đến khả năng hoàn nguyên bột sản phẩm (Ding và cs., 2020). Bột SFD được kết tụ thành hạt mịn. Sự kết tụ làm mở rộng các lỗ xốp làm tăng khả năng thấm ướt, phân tán và hòa tan. Bột SFD có tỷ lệ diện tích bề mặt trên khối lượng riêng 80 m²/gram bột (Yu và cs., 2006) với kích thước hạt lớn hơn, quá trình SFD diễn ra nhanh nên hạn chế sự di chuyển của thành phần bên trong hạt và ngăn ngừa sự co ngót hạt. SFD sử dụng buồng phun lạnh nitơ lỏng, nitơ lỏng được sử dụng là chất làm lạnh do nhiệt độ sôi thấp, tốc độ làm lạnh nhanh (Rogers và cs., 2008). Thêm vào đó, việc phân phối chất béo và các chất hòa tan khác trong các hạt đồng đều hơn do hiện tượng tái phân phối chất tan trong quá trình đóng băng nhanh không phụ thuộc vào nồng độ chất tan và chỉ phụ thuộc vào tốc độ đóng băng (Hindmarsh và cs., 2003). Tốc độ đóng băng nhanh có xu hướng làm giảm kích thước tinh thể băng, cấu trúc tinh thể băng mịn, ngăn chặn sự tập trung của các chất tan trên bề mặt. Các hạt có lớp bề mặt dày đặc chứa chất béo và đường sẽ khó hoàn nguyên hơn các hạt tạo ra từ một giọt đông lạnh có cấu trúc băng mịn. Do đó, các hạt của sữa bột SFD sẽ ưa nước hơn (Hindmarsh và cs., 2007). Năm 2015, Ishwarya và cộng sự cũng đã so sánh SFD với FD và sấy phun (SD) trong sản phẩm cà phê hòa tan. Kết quả cho thấy SFD vượt trội hơn trên cơ sở khả năng hòa tan bột tốt hơn, các hạt có dạng hình cầu với hình thái bề mặt xốp giúp hỗ trợ quá trình hòa tan trong nước dễ dàng hơn, hiệu suất lưu giữ các chất dễ bay hơi có mùi thơm khoảng 93%. SFD cho phép giảm đáng kể thời gian sấy (30%) cũng như giảm thời gian hòa tan của chất bao nang (11 giây so với 20 giây ở SD và 22 giây ở FD). Ngoài ra, còn có sự khác biệt về giá trị màu sắc (ΔE) SFD ít nhất ($3,57 \pm 0,32$), FD ($4,82 \pm 0,35$) và cao nhất là SD ($5,89 \pm 0,06$). Điều này giải thích khả năng duy trì màu sắc tự nhiên trong bột SFD do thời gian xử lý ngắn khi tiếp xúc với nhiệt độ cao.

SFD còn được ứng dụng để vi bao các thành phần thực phẩm có hoạt tính sinh học hiệu quả hơn các kỹ thuật sấy khác. Vi bao là một quá trình bao bọc các hợp chất hoạt động bên trong một chất bảo vệ. Thành phần được bao bọc gọi là lõi, vật liệu mang được gọi là tường. Phần lõi có thể là thực phẩm thành phần (hương vị, lipid đặc biệt, vitamin và thành phần có hoạt tính sinh học). Vật liệu làm tường có thể là các đại phân tử sinh học như carbohydrate (tinh bột, dẫn xuất cellulose, gum), protein (whey protein, casein, gelatin, gluten) hoặc lipid (axit béo, glycerol, sáp, phospholipid). Sản phẩm cuối cùng có kích thước, diện tích bề mặt lớn hơn chất đóng gói giúp cải thiện độ hòa tan, duy trì giải phóng và tăng cường sự hấp thu ở ruột của chất có hoạt tính sinh học được đóng gói (Anandharamakrishnan và Ishwarya, 2015). So với FD ưu điểm của SFD là nhiệt độ sấy cực thấp -196°C , thấp hơn nhiều so với điểm thủy tinh hóa của nước để tạo điều kiện thuận lợi tăng nồng độ chất rắn hòa tan sau khi thăng hoa. Việc vi bao bằng SFD thường liên quan đến thành phần của nhũ tương. Do đó, tiêu chí hàng đầu để lựa chọn vật liệu làm tường là khả năng hòa tan trong nước (Gouin, 2004) và maltodextrin là vật liệu làm tường được ưa chuộng. Khả năng nhũ hóa của vật liệu làm tường là lượng lõi tối đa mà nó có thể chứa trên một đơn vị trọng lượng để tạo thành nhũ tương ổn định. Đặc tính này của vật liệu tường trở nên quan trọng khi lõi là một chất kỵ nước như tinh dầu hoặc lipid đặc biệt, trong đó vật liệu tường có chức năng ổn định lõi trước khi vi bao (Hogan và cs., 2001). Ngoài ra, chất nhũ hóa thúc đẩy việc đạt được kích thước giọt nhỏ hơn trong bước nhũ hóa, giúp tăng cường độ ổn định nhũ tương, hiệu quả vi bao và cuối cùng là độ ổn định cấu trúc của vi bao. Vì vậy, khả năng nhũ hóa vượt trội của whey protein trở thành sự lựa chọn lý tưởng của vật liệu tường để đóng gói lõi kỵ nước như lipid, vitamin tan trong chất béo và hương liệu (Anandharamakrishnan và Ishwarya, 2015) khi whey protein đã được sử dụng làm vật liệu bao bọc cho việc vi bao SFD của axit docosahexaenoic (DHA) (Karthik và Anandharamakrishnan, 2012) và vanillin (Hundre và cs., 2015). Do hoạt động ở nhiệt độ thấp và các sản phẩm có cấu trúc độc đáo, SFD được coi là có lợi hơn so với SD trong việc bảo tồn khả năng tồn tại và tính ổn định của chế phẩm sinh học như probiotic trong quá trình vận chuyển qua các vùng phía trên của đường tiêu hóa, trước khi đến được vị trí hoạt động mục tiêu. *Lactobacillus plantarum* được đóng gói và chuyển thành dạng bột bằng SFD, sử dụng whey protein làm vật liệu tường ở hai tỷ lệ lõi và tường khác nhau (1:1 và 1:1,5). Các đặc tính của vi nang SFD-probiotic (độ ẩm, hình thái, khả năng sống của tế bào, độ ổn định bảo quản và khả năng sống sót của vi khuẩn được vi bao trong điều kiện dạ dày mô phỏng) là tốt hơn so với các loại vi nang SD và FD (Dolly và cs., 2011).

3. Sấy thăng hoa chân không (Vacuum freeze drying)

Bảng 2. Các ứng dụng của sấy thăng hoa chân không trong thực phẩm

Loại thực phẩm	Kết quả
Protein thịt (Ma và cs., 2018)	Bảo tồn tốc độ bù nước, duy trì chất lượng sản phẩm, trọng lượng nhẹ, vận chuyển dễ dàng và bảo quản lâu dài.
Protein lòng trắng trứng (Su và cs., 2023)	Với công suất vi sóng ở 300W có thể cải thiện hiệu quả đặc tính nhũ hóa và độ ổn định.
Dâu tằm (Wang và cs., 2023)	Giữ được chất lượng như ban đầu. Các đặc tính lý hoá như độ ẩm, khả năng giữ nước, protein hòa tan, axit ascorbic, polyphenol, resveratrol, chlorogen axit, anthocyanin, cùng các hoạt tính chống oxy hóa như khả năng bắt gốc tự do DPPH và khả năng bắt gốc tự do ABTS đều vượt trội hơn so với sấy khô bằng không khí nóng.
Dâu tây (Xu và cs., 2021)	Thời gian sấy giảm 15,25% -50,00%, đặc tính chất lượng của lát dâu tây tốt hơn đáng kể bao gồm khả năng bù nước, độ cứng, màu sắc, hương vị, tổng anthocyanin, tổng sô phenol và hoạt tính chống oxy hóa.
Hợp chất dễ bay hơi (Yuan và cs., 2021)	Khi sấy thăng hoa chân không kết hợp xử lý áp suất cao ở mức 400 MPa đã giữ lại nhiều hợp chất dễ bay hơi (ví dụ: β -ionone) hơn, duy trì hương vị và kéo dài thời hạn sử dụng, đồng thời thuận tiện cho việc vận chuyển.

Sấy thăng hoa chân không (VFD) đã được áp dụng trên nhiều loại sản phẩm thực phẩm như thịt, trái cây, rau quả, đồ uống (Li và cs., 2023). Các nghiên cứu tập trung vào khả năng lưu giữ dinh dưỡng, đặc điểm cấu trúc, hoạt tính chống oxy hóa và được trình bày trong bảng 2.

Ma và cộng sự (2018) đã nghiên cứu ảnh hưởng của VFD đến chất lượng của protein thịt trong thịt thăn và dăm bông. Kết quả cho thấy rằng kích thước vật liệu được coi là yếu tố quan trọng nhất ảnh hưởng đến tốc độ bù nước, kể đến là thời gian sấy, độ dày vật liệu và nhiệt độ sấy. Với giảm bông, sự kết hợp giữa độ dày vật liệu 1mm và kích thước vật liệu 3mm là tốt nhất cho tốc độ bù nước, trong khi với thịt thăn độ dày vật liệu là 3mm và kích thước vật liệu là nguyên mảnh (một lớp). VFD có khả năng giữ protein cao hơn, cải thiện kết cấu, đồng thời thịt khô có độ mềm hơn, ít dai hơn. Ngược lại, thịt được sấy khô bằng không khí cho thấy sự biến tính protein đáng kể và kết cấu cứng hơn, dẫn đến mức độ chấp nhận của người tiêu dùng thấp hơn (Huan và cs., 2005). Đối với protein lòng trắng trứng, việc kết hợp vi sóng với VFD giúp tăng cường đáng kể độ dai và độ nhớt của protein lòng trắng trứng, và đạt được độ nhũ hóa tối đa ở 300W (Su và cs., 2023) do VFD làm thay đổi cấu trúc thứ cấp của protein lòng trắng trứng mà không thay đổi cấu trúc peptit của nó. Wang và cộng sự (2023) nghiên cứu đầu tằm cho thấy VFD có các đặc tính vật lý vượt trội so với sấy khô bằng đối lưu bao gồm khả năng thấm ướt, đặc tính hút ẩm và giữ nước. Ngoài ra, VFD giúp bảo tồn hàm lượng chất dinh dưỡng cao hơn (protein hòa tan, axit ascobic), polyphenol, resveratrol, axit chlorogenic, anthocyanin. Hoạt tính chống oxy hóa của VFD cao hơn bao gồm khả năng loại bỏ gốc tự do DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) và khả năng bắt gốc tự do ABTS (2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid)). Khi kết hợp tiền xử lý bằng sóng siêu âm tần số kép 20 kHz và 40 kHz kết quả cho thấy thời gian sấy giảm (15,25% - 50%), cải thiện đáng kể các thuộc tính chất lượng của các lát dâu tây trong quá trình VFD như khả năng bù nước, độ cứng, hương vị, màu sắc, tổng anthocyanin, tổng phenol và hoạt tính chống oxy hóa. Điều này là do ảnh hưởng của hiện tượng “cộng hưởng kết hợp”, tạo ra năng lượng cao hơn, cải thiện tốc độ sấy và hệ số sấy, qua đó rút ngắn thời gian sấy. Khi VFD kết hợp áp suất thủy tĩnh cao ở mức 400 Mpa trong hỗn hợp nước ép táo tàu, bí ngô, xoài đã giữ lại nhiều hợp chất dễ bay hơi hơn, đồng thời cải thiện cảm nhận về mùi và hương vị tự nhiên của sản phẩm như mùi thơm của trái cây tươi, cường độ mùi này càng tăng khi áp suất tăng (Yuan và cs., 2021). Đối với hương thơm ngọt ngào và sở thích tổng thể, hỗn hợp ép nước trái cây được xử lý bằng áp suất thủy tĩnh cao kết hợp VFD đạt điểm cảm quan rất gần với nước trái cây tươi. Những phát hiện này tương tự với kết quả của nghiên cứu về kẹo mận xanh cũng cho thấy rằng sản phẩm vẫn giữ được hương vị của mẫu tươi (Luo và cs., 2018).

4. Sấy thăng hoa vi sóng (Microwave freeze drying)

Bảng 3. Các ứng dụng gần đây của sấy thăng hoa vi sóng trong thực phẩm

Loại thực phẩm	Kết quả
Hải sâm (Duan và cs., 2010)	MFD có khả năng khắc phục những hạn chế của các phương pháp sấy truyền thống, như thời gian xử lý lâu và mất mát các thành phần có hoạt tính sinh học, góp phần tạo ra sản phẩm chất lượng tốt hơn.
Quả mâm xôi (Sun và cs., 2021)	Quá trình sấy đồng đều, mất nước cả bên trong và bên ngoài quả mâm xôi. Tốc độ sấy tăng lên khi công suất vi sóng tăng lên.
Hạt nano Chitosan (Zhao và cs., 2021)	MFD có thời gian sấy ngắn nhất và hiệu quả sấy cao nhất trong số ba phương pháp. Hoạt tính chống oxy hóa của các hạt nano được làm khô bởi MFD và FD cao hơn so với SD
Bột khoai từ (Li và cs., 2022)	Rút ngắn thời gian sấy từ 14,29 - 35,71% so, với hiệu suất sấy cao hơn ở mật độ công suất vi sóng cao (1,5 W/g).
Quả dứa (Chen và cs., 2023)	Điều kiện tối ưu cho MFD: độ ẩm chuyển tiếp là 20%, nhiệt độ sấy 40°C, tốc độ quay của bàn xoay 8 vòng/ phút, công suất vi sóng 6 W/g thì hiệu suất sấy hiệu quả, tiết kiệm 34,5% năng lượng tiêu thụ và 33,3% thời gian sấy so với VFD.

Sấy thăng hoa vi sóng (MFD) là sự kết hợp của sấy chân không vi sóng và FD, sử dụng lò vi sóng thay vì tắm gia nhiệt truyền thống, nguyên lý cơ bản tương tự như FD. So với các thiết bị gia nhiệt thông thường, gia nhiệt bằng vi sóng không yêu cầu gradient nhiệt độ từ bên ngoài để gia nhiệt từng lớp. Nước trong thực phẩm hoạt động như một lưỡng cực và năng lượng từ lò vi sóng được hấp thụ vào các phân tử nước. Hơn nữa, vi sóng có thể xuyên qua phạm vi độ sâu của mẫu để đạt được sự chuyển đổi năng lượng và đạt được hiệu ứng gia nhiệt thể tích, gây ra sự thăng hoa trong toàn bộ mẫu (Fan và cs., 2019). Nhược điểm của phương pháp gia nhiệt truyền thống là tốc độ sấy chậm đã được

giải quyết, quá trình truyền ẩm nhanh hơn và chất lượng sản phẩm sấy cao hơn (Yao và cs., 2023). Gần đây, các nghiên cứu đã tập trung so sánh lợi ích như tiết kiệm thời gian sấy và năng lượng tiêu thụ khi áp dụng MFD so với các phương pháp sấy thông thường được trình bày trong bảng 3.

Duan và cộng sự (2010) đã chứng minh tính hiệu quả của MFD trong việc giảm thời gian sấy và tiêu thụ năng lượng nhưng vẫn bảo toàn chất lượng của hải sâm, với các thành phần có hoạt tính có giá trị như collagen, axit mucopolysaccharide và triterpene glycoside. Kết quả cho thấy MFD giảm thời gian sấy khoảng 40% và giảm mức tiêu thụ năng lượng khoảng 32% so với FD thông thường nhưng vẫn mang lại chất lượng sản phẩm tốt tương tự. Để tiết kiệm năng lượng và thu được chất lượng tốt hơn, nên áp dụng công suất vi sóng cao hơn trong giai đoạn thăng hoa, nhưng nên áp dụng công suất vi sóng thấp hơn trong giai đoạn giải hấp. Chất lượng sản phẩm tốt nhất thu ở mức công suất vi sóng ở mức 2 W/g mặc dù ở mức công suất vi sóng là 2,3 W/g cho thời gian xử lý ngắn hơn, tuy nhiên khả năng bù nước giảm do mức năng lượng vi sóng cao làm cứng thành cơ thể hải sâm, gây ra hao hụt. Kết quả tương tự khi áp dụng MFD với quả mâm xôi cho thấy tốc độ sấy tăng lên khi công suất vi sóng tăng lên, do công suất vi sóng đầu vào cao hơn sẽ cung cấp nhiều năng lượng hơn cho quá trình thăng hoa, do đó đẩy nhanh quá trình sấy (Sun và cs., 2021). Khi so sánh tác động của 3 phương pháp FD, MFD và SD đối với thành phần có hoạt tính sinh học của nano chitosan cho thấy nano chitosan tạo bởi MFD và FD có hoạt tính chống oxy hóa cao, khả năng hòa tan và tốc độ hòa tan cao hơn so với SD. Tuy nhiên nếu xét thêm yếu tố về thời gian sấy và hiệu quả sấy thì MFD có thời gian sấy ngắn nhất và hiệu quả sấy cao nhất trong số ba phương pháp, cho thấy tiềm năng ứng dụng ở quy mô công nghiệp (Zhao và cs., 2021). Nghiên cứu gần đây của Li và cộng sự (2022) đã so sánh hiệu quả của MFD với sấy không khí nóng thông thường (HAD). So với HAD, thời gian sấy của MFD được rút ngắn từ 14,29% đến 35,71%, hiệu suất sấy cao hơn ở mức năng lượng vi sóng cao (1,5 W/g), với các đặc tính vượt trội về màu sắc, khả năng hấp thụ nước/dầu và độ hòa tan, độ nhớt cao nhưng hàm lượng tinh bột kháng thấp, giúp tăng khả năng tiêu hoá và góp phần tạo ra sản phẩm có chất lượng như mong muốn. Một nghiên cứu của Chen và cộng sự (2023) về sản phẩm dưa lát đã so sánh MFD và VFD. Năng lượng vi sóng càng cao thì tốc độ sấy càng nhanh. Việc sử dụng bàn xoay và hệ thống kiểm soát nhiệt độ sẽ giúp làm nóng vật liệu đồng đều và cải thiện chất lượng sản phẩm. Hơn nữa, độ ẩm chuyển tiếp càng thấp thì chất lượng sản phẩm sấy khô càng tốt. Để duy trì hình thức bên ngoài của sản phẩm, độ ẩm chuyển tiếp trong quá trình sấy khô phải nằm trong khoảng 10–30%. Kết quả cho thấy yếu tố ảnh hưởng đến MFD là độ ẩm chuyển tiếp, nhiệt độ sấy và tốc độ quay của bàn xoay. Thông số ít ảnh hưởng nhất là năng lượng vi sóng. Nghiên cứu cho thấy rằng quy trình MFD với độ ẩm chuyển tiếp là 20%, nhiệt độ sấy là 40°C, tốc độ quay của bàn xoay là 8 vòng/phút và công suất vi sóng là 6 W/g có hiệu suất sấy hiệu quả, tiết kiệm 34,5% năng lượng tiêu thụ và 33,3% thời gian sấy so với VFD. Những phát hiện này nêu bật tiềm năng của MFD như một giải pháp thay thế hiệu quả về mặt chi phí cho các phương pháp sấy thăng hoa truyền thống.

5. Kết luận

Những tiến bộ gần đây trong SFD, VFD và MFD đã góp phần đáng kể vào việc nâng cao hiệu quả, tính bền vững và chất lượng sản phẩm trong ngành công nghiệp thực phẩm. Những kỹ thuật hiện đại này cung cấp các giải pháp đầy hứa hẹn để giải quyết nhu cầu ngày càng tăng của ngành công nghiệp thực phẩm, từ bảo quản nguyên liệu đến chế biến các sản phẩm tinh tế, góp phần cải thiện hiệu quả quy trình và giảm tác động đến môi trường. Những nỗ lực nghiên cứu liên tục trong các lĩnh vực này là rất quan trọng để tiếp tục khai thác tiềm năng của công nghệ sấy thăng hoa hiện đại và đáp ứng nhu cầu ngày càng tăng về các sản phẩm thực phẩm có chất lượng cao.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Anandharamakrishnan, C. & Padma Ishwarya, S. (2015) Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation. *John Wiley & Sons, Ltd.*, Hoboken.
- [2] Berk, Z. (2013). Freeze Drying (Lyophilization) and Freeze Concentration. *Food Process Engineering and Technology*, 567-581.

- [3] Bhatta, S., Stevanovic Janezic, T. & Ratti, C. (2020). Freeze-Drying of Plant-Based Foods. *Foods*, 9(1).
- [4] Chen, B. L., Lin, G. S., Amani, M. & Yan, W.M. (2023). Microwave-assisted freeze drying of pineapple: Kinetic, product quality, and energy consumption. *Case Studies in Thermal Engineering*, 41.
- [5] Ding, H., Yu, W., Boiarkina, I., Depree, N. & Young, B. R. (2020). Effects of morphology on the dispersibility of instant whole milk powder. *Journal of Food Engineering*, 276.
- [6] Dolly, P., Anishaparvin, A., Joseph, G. S. & Anandharamakrishnan, C. (2011). Microencapsulation of *Lactobacillus plantarum* (mtcc 5422) by spray freeze drying method and evaluation of survival in simulated gastrointestinal conditions. *Journal of Microencapsulation*, 28(6), 568-574.
- [7] Duan, X., Zhang, M., Mujumdar, A. S. & Wang, S. (2010). Microwave freeze drying of sea cucumber (*Stichopus japonicus*). *Journal of Food Engineering*, 96(4), 491-497.
- [8] Dutta, S., Moses, J. A. & Anandharamakrishnan, C. (2018). Modern frontiers and applications of spray-freeze-drying in design of food and biological supplements. *Journal of Food Process Engineering*, 41(8).
- [9] Fan, K., Zhang, M. & Mujumdar, A. S. (2019). Recent developments in high efficient freeze-drying of fruits and vegetables assisted by microwave: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(8), 1357-1366.
- [10] García-Segovia, P., Andrés-Bello, A. & Martínez-Monzó, J. (2011). Rehydration of air-dried Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) caps: Comparison of conventional and vacuum water immersion processes. *Food Science and Technology*, 44(2), 480-488.
- [11] Gouin, S. (2004). Microencapsulation: industrial appraisal of existing technologies and trends. *Food Science and Technology*, 15(7), 330-347.
- [12] Hasan, M. U., Malik, A. U., Ali, S., Imtiaz, A., Munir, A., Amjad, W. & Anwar, R. (2019). Modern drying techniques in fruits and vegetables to overcome postharvest losses: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(12).
- [13] Hindmarsh, J. P., Russell, A. B. & Chen, X. D. (2003). Experimental and numerical analysis of the temperature transition of a suspended freezing water droplet. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(7), 1199-1213.
- [14] Hindmarsh, J. P., Russell, A. B. & Chen, X. D. (2007). Fundamentals of the spray freezing of foods—microstructure of frozen droplets. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 136-150.
- [15] Hogan, S. A., Mcnamee, B. F., O'riordan, E. D. & O'sullivan, M. (2001). Microencapsulating Properties of Whey Protein Concentrate 75. *Food Engineering and Physical Properties*, 66(5), 675-680.
- [16] Huan, Y., Zhou, G., Zhao, G., Xu, X. & Peng, Z. (2005). Changes in flavor compounds of dry-cured Chinese Jinhua ham during processing. *Meat Science*, 71(2), 291-299.
- [17] Hundre, S. Y., Karthik, P. & Anandharamakrishnan, C. (2015). Effect of whey protein isolate and beta-cyclodextrin wall systems on stability of microencapsulated vanillin by spray-freeze drying method. *Food Chemistry*, 174, 16-24.
- [18] Ishwarya, S. P. (2022). *Spray-Freeze-Drying of Foods and Bioproducts: Theory, Applications and Perspectives*. Taylor & Francis Group.
- [19] Isleroglu, H. & I. Turker (2020). Evaluation of Process Conditions for Ultrasonic Spray Freeze Drying of Transglutaminase. *Food Technology and Biotechnology*, 58(1) 38-48.
- [20] Karthik, P. & Anandharamakrishnan, C. (2012). Microencapsulation of Docosahexaenoic Acid by Spray-Freeze-Drying Method and Comparison of its Stability with Spray-Drying and Freeze-Drying Methods. *Food and Bioprocess Technology*, 6(10), 2780-2790.
- [21] Khwanpruk, K., Anandharamakrishnan, C., Rielly, C. D. & Stapley, A. G. F. (2008). Volatiles retention during the sub-atmospheric spray freeze drying of coffee and maltodextrin. *IN: 16th International Drying Symposium IDS 2008, 9-12th November 2008, Hyderabad, India, Vol C*, 1697-1704.
- [22] Li, G., Qi Wang, Q., & Zhou, H. (2023). Research on the Application of Vacuum Freeze-drying Technology for Food. *E3S Web of Conferences* 370.
- [23] Li, L., Chen, J., Bai, D., Xu, M., Cao, W., Ren, G., Ren, A. & Duan, X. (2022). Physicochemical, Pasting Properties and In Vitro Starch Digestion of Chinese Yam Flours as Affected by Microwave Freeze-Drying. *Foods*, 11(15).

- [24] Liu, Y., Zhang, Z. & Hu, L. (2022). High efficient freeze-drying technology in food industry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(12), 3370-3388.
- [25] Luo, W., Tappi, S., Wang, C., Yu, Y., Zhu, S. & Rocculi, P. (2018). Study and optimization of high hydrostatic pressure (HHP) to improve mass transfer and quality characteristics of candied green plums (*Prunus mume*). *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(11).
- [26] Ma, Y., Wu, X., Zhang, Q., Giovanni, V. & Meng, X. (2018). Key composition optimization of meat processed protein source by vacuum freeze-drying technology. *Saudi Journal of Biological Science*, 25(4), 724-732.
- [27] Padma Ishwarya, S. & Anandharamakrishnan, C. (2015). Spray-Freeze-Drying approach for soluble coffee processing and its effect on quality characteristics. *Journal of Food Engineering*, 149, 171-180.
- [28] Prosapio, V. & Lopez-Quiroga, E. (2020). Freeze-Drying Technology in Foods. *Foods*, 9(7).
- [29] Rogers, S., Wu, W. D., Saunders, J. & Chen, X. D. (2008). Characteristics of Milk Powders Produced by Spray Freeze Drying. *Drying Technology*, 26(4), 404-412.
- [30] S, P. and C. Anandharamakrishnan (2016). Enhancement of oral bioavailability of vitamin E by spray-freeze drying of whey protein microcapsules. *Food and Bioprocess Technology*, 100, 469-476.
- [31] Su, K., Liu, L., Pan, X., Chen, S., Zhang, X., Cheng, W. & Xu, B. (2023). Effect of Microwave Vacuum Freeze-Drying Power on Emulsifying and Structure Properties of Egg White Protein. *Foods*, 12(9).
- [32] Sun, Y., Zhang, M., Mujumdar, A. S. & Yu, D. (2021). Pulse-spouted microwave freeze drying of raspberry: Control of moisture using ANN model aided by LF-NMR. *Journal of Food Engineering*, 292.
- [33] Wang, L., Wen, H., Yang, N. & Li, H. (2023). Effect of vacuum freeze drying and hot air drying on dried mulberry fruit quality. *Plos One*, 18(6).
- [34] Xu, B., Chen, J., Sylvain Tiliwa, E., Yan, W., Roknul Azam, S. M., Yuan, J., Wei, B., Zhou, C. & Ma, H. (2021). Effect of multi-mode dual-frequency ultrasound pretreatment on the vacuum freeze-drying process and quality attributes of the strawberry slices. *Ultrasonics Sonochemistry*, 78, 105714.
- [35] Yaman, D. M., Kocak Yanik, D., Elik Demir, A., Uzun Karka, H., Guclu, G., Selli, S., Kelebek, H. & Gogus, F. (2023). Effect of Encapsulation Techniques on Aroma Retention of Pistacia terebinthus L. Fruit Oil: Spray Drying, Spray Freeze Drying, and Freeze Drying. *Foods*, 12(17).
- [36] Yao, J., Chen, W. & Fan, K. (2023). Novel Efficient Physical Technologies for Enhancing Freeze Drying of Fruits and Vegetables: A Review. *Foods*, 12(23).
- [37] Yu, Z., Johnston, K. P. & Williams, R. (2006). Spray freezing into liquid versus spray-freeze drying: influence of atomization on protein aggregation and biological activity. *European Journal of Pharmaceutical Science*, 27(1), 9-18.
- [38] Yuan, L., Liang, X., Pan, X., Lao, F., Shi, Y. & Wu, J. (2021). Effects of High Hydrostatic Pressure Combined with Vacuum-Freeze Drying on the Aroma-Active Compounds in Blended Pumpkin, Mango, and Jujube Juice. *Foods*, 10(12).
- [39] Zhang, S., Lei, H., Gao, X., Xiong, X., Wu, W. D., Wu, Z. & Chen, X. D. (2018). Fabrication of uniform enzyme-immobilized carbohydrate microparticles with high enzymatic activity and stability via spray drying and spray freeze drying. *Powder Technology*, 330, 40-49.
- [40] Zhao, L., Duan, X., Cao, W., Ren, X., Ren, G., Liu, P. & Chen, J. (2021). Effects of Different Drying Methods on the Characterization, Dissolution Rate and Antioxidant Activity of Ursolic Acid-Loaded Chitosan Nanoparticles. *Foods*, 10(10).