

PHÂN TÍCH ỨNG SUẤT, BIẾN DẠNG VÀ ĐỘ ỔN ĐỊNH CỦA BỒN SẤY CHÂN KHÔNG TIẾT DIỆN TRÒN BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

STRESS, DISPLACEMENT, AND STABILITY ANALYSIS OF CIRCULAR VACUUM DRYING TANK USING FINITE ELEMENT METHOD

Bành Quốc Nguyên^{1,2,*}, Cao Xuân Hiếu^{1,2}, Dương Thị Trúc Giang³

¹Bộ môn Chế tạo máy, Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách Khoa,

Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

²Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

³Công ty Cổ phần Thực phẩm HG, Xã Mỹ An, Tỉnh Tây Ninh

*Email: bqnguyen@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này trình bày việc phân tích độ bền và độ ổn định kết cấu của bồn sấy chân không tiết diện tròn chịu áp suất ngoài thông qua phương pháp mô phỏng số (FEA). Đối tượng nghiên cứu là thân bồn hình trụ đường kính 990 mm, dài 1500 mm, chế tạo từ thép SS400. Ba phương án chiều dày vỏ (3mm, 5mm, 8mm) được khảo sát dưới tải trọng chênh lệch áp suất 74 cmHg. Kết quả mô phỏng trên phần mềm COMSOL Multiphysics cho thấy, mặc dù tất cả các phương án đều thỏa mãn điều kiện bền dẻo theo tiêu chuẩn Von Mises ($\sigma_{max} < \sigma_{yield}$), nhưng phương án vỏ mỏng 3mm tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định (buckling) cao với hệ số tải trọng tới hạn thấp ($\lambda \approx 3.56$). Phân tích tổng hợp dựa trên cả ba tiêu chí: ứng suất, chuyển vị và ổn định đã xác định chiều dày 5mm là lựa chọn tối ưu, đảm bảo an toàn kỹ thuật với hệ số ổn định $\lambda \approx 9.86$ mà vẫn đảm bảo hiệu quả kinh tế.

Từ khóa: Bồn sấy chân không; Phân tích phần tử hữu hạn (FEA); Ổn định vỏ (Buckling); Tối ưu hóa thiết kế; Ứng suất Von Mises.

ABSTRACT

This study presents a structural strength and stability analysis of a circular cross-section vacuum drying tank subjected to external pressure using Finite Element Analysis (FEA). The subject of the study is a cylindrical shell with a diameter of 990 mm and a length of 1500 mm, made of SS400 steel. Three shell thickness scenarios (3mm, 5mm, 8mm) were investigated under a pressure differential load of 74 cmHg. Simulation results using COMSOL Multiphysics software indicate that while all scenarios satisfy the ductile strength condition according to the Von Mises criterion ($\sigma_{max} < \sigma_{yield}$), the 3mm thin shell option poses a high risk of buckling instability with a low critical load factor ($\lambda \approx 3.56$). A comprehensive analysis based on three criteria: stress, displacement, and stability identified the 5mm thickness as the optimal choice, ensuring technical safety with a stability factor of $\lambda \approx 9.86$ while maintaining economic efficiency.

Keywords: Vacuum drying tank; Finite Element Analysis (FEA); Buckling Stability; Mechanism Design Optimization; Von Mises Stress.

1. TỔNG QUAN

Việt Nam là quốc gia có lợi thế lớn về sản xuất nông sản nhiệt đới với sản lượng dồi dào và đa dạng chủng loại. Tuy nhiên, đặc điểm dễ hư hỏng và thời gian bảo quản ngắn của các loại nông sản như xoài, thanh long, mít đặt ra yêu cầu cấp thiết về các giải pháp chế biến và bảo quản sau thu hoạch nhằm giảm tổn thất và nâng cao giá trị gia tăng. Trong bối cảnh đó, công nghệ sấy chân không được xem là một trong những phương pháp tiên tiến, cho phép loại bỏ ẩm ở nhiệt độ thấp, giúp bảo toàn màu sắc, hương vị và các hợp chất sinh học quan trọng của sản phẩm. Đồng thời, sản phẩm sau sấy thường có cấu trúc xốp giòn, đáp ứng nhu cầu ngày càng cao của thị trường tiêu dùng.

Nguyên lý của quá trình sấy chân không dựa trên việc giảm áp suất môi trường xuống thấp hơn áp suất khí quyển, từ đó làm giảm nhiệt độ sôi của nước. Nhờ vậy, quá trình bay hơi ẩm có thể diễn ra ở nhiệt độ thấp (thường dưới 60°C), giúp hạn chế sự phân hủy nhiệt của vật liệu sinh học. Tuy nhiên, chính điều kiện làm việc dưới áp suất thấp lại tạo ra một thách thức lớn về mặt cơ học đối với thiết bị, đặc biệt là kết cấu bồn sấy. Khác với các bình chịu áp lực bên trong, bồn sấy chân không phải chịu áp suất ngoài, dẫn đến nguy cơ mất ổn định hình học (buckling) xảy ra trước khi vật liệu đạt tới giới hạn bền chảy.

Trong các kết cấu chịu áp suất ngoài, hiện tượng mất ổn định là dạng phá hủy nguy hiểm và khó dự đoán, do phụ thuộc mạnh vào các sai lệch hình học ban đầu như độ oval, khuyết tật chế tạo hoặc ứng suất dư. Chỉ cần một biến dạng nhỏ ban đầu cũng có thể làm giảm đáng kể khả năng chịu tải của kết cấu. Do đó, việc thiết kế bồn sấy chân không không thể chỉ dựa trên tiêu chí bền vật liệu (stress-based design), mà cần phải đánh giá đồng thời cả độ

cứng và độ ổn định tổng thể của kết cấu.

Trong thực tế, dạng hình học phổ biến của bồn sấy là hình trụ tròn, do đây là cấu trúc có khả năng phân bố ứng suất màng hiệu quả nhất khi chịu tải đối xứng. Tuy nhiên, đối với vỏ mỏng, khi tỷ số đường kính trên chiều dày (D/t) lớn, kết cấu trở nên rất nhạy cảm với hiện tượng buckling. Điều này dẫn đến một bài toán thiết kế mang tính tối ưu: lựa chọn chiều dày vỏ sao cho vừa đảm bảo độ an toàn ổn định, vừa tối thiểu hóa khối lượng và chi phí vật liệu.

Hiện nay, các tiêu chuẩn thiết kế bình chịu áp lực (như ASME) đã đưa ra các phương pháp đánh giá ổn định, tuy nhiên các công thức kinh nghiệm thường mang tính bảo thủ và khó áp dụng chính xác cho các cấu hình cụ thể có điều kiện biên phức tạp. Do đó, phương pháp mô phỏng số bằng phần tử hữu hạn (FEA) ngày càng được sử dụng rộng rãi để phân tích chi tiết ứng suất, biến dạng và đặc biệt là tải trọng tới hạn gây mất ổn định của kết cấu vỏ mỏng.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về ổn định của vỏ trụ chịu áp suất ngoài, phần lớn các công trình tập trung vào các mô hình lý tưởng hoặc điều kiện tải đơn giản. Trong khi đó, các nghiên cứu ứng dụng trực tiếp cho thiết bị công nghiệp như bồn sấy chân không, có xét đến điều kiện làm việc thực tế và yêu cầu tối ưu hóa thiết kế, vẫn còn hạn chế. Đặc biệt, việc kết hợp đồng thời ba tiêu chí quan trọng gồm: ứng suất (strength), chuyển vị (stiffness) và độ ổn định (stability) trong một bài toán thiết kế tổng hợp vẫn chưa được khai thác đầy đủ.

Xuất phát từ các vấn đề trên, nghiên cứu này tập trung phân tích kết cấu bồn sấy chân không dạng trụ tròn bằng phương pháp phần tử hữu hạn nhằm đánh giá toàn diện các đặc trưng cơ học dưới tác dụng của áp suất ngoài. Thông qua việc khảo sát các phương án chiều

dày khác nhau, nghiên cứu hướng đến xác định cấu hình tối ưu đảm bảo an toàn vận hành, hạn chế nguy cơ mất ổn định và đồng thời nâng cao hiệu quả kinh tế trong thiết kế và chế tạo thiết bị.

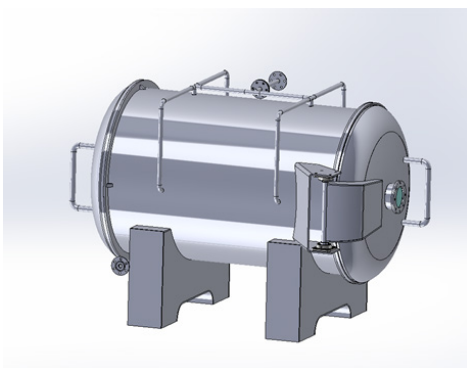
2. PHƯƠNG PHÁP

2.1. Thông số hình học và Vật liệu

Đối tượng nghiên cứu là thân bồn sấy dạng trụ tròn nằm ngang (Hình 1). Các thông số kích thước cơ bản và vật liệu (SS400) được trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thông số đầu vào cho mô hình mô phỏng

Đại lượng	Giá trị	Đơn vị
Đường kính ngoài (D)	990	mm
Chiều dài thân (L)	1500	mm
Chiều dày khảo sát (t)	3, 5, 8	mm
Mô-đun đàn hồi (E)	2.06×10^{11}	Pa
Hệ số Poisson (ν)	0.3	-
Giới hạn chảy (σ_{yield})	245	MPa
Khối lượng riêng (ρ)	7850	kg/m ³



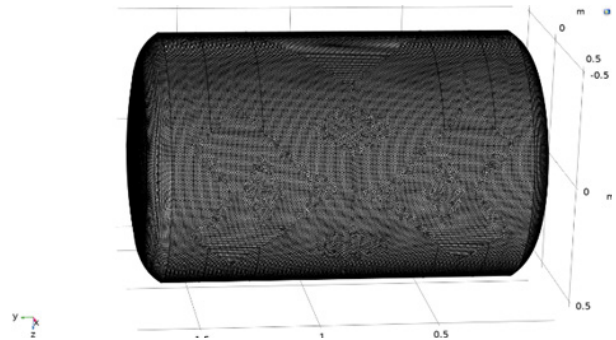
Hình 1. Mô hình bồn sấy tiết diện tròn

2.2. Thiết lập mô hình Phần tử hữu hạn (FEA)

Quá trình mô phỏng được thực hiện trên phần mềm COMSOL Multiphysics, sử dụng mô đun Cơ học vật rắn.

2.2.1. Mô hình hóa và Chia lưới (Meshing)

Do tỷ số $D/t \geq 20$ (với $t = 5\text{mm}$, $D/t = 198$), vỏ bồn được mô hình hóa bằng phần tử vỏ trên mặt trung bình Hình 2. Điều này giúp giảm thiểu chi phí tính toán nhưng vẫn đảm bảo độ chính xác cho các bài toán uốn vỏ mỏng.



Hình 2. Mô hình lưới phần tử hữu hạn cho bồn tiết diện tròn, tập trung lưới tại vùng thân chịu nén.

Nghiên cứu hội tụ lưới đã được thực hiện để đảm bảo kết quả không phụ thuộc vào kích thước phần tử với tiêu chí hội tụ: sai số tương đối của ứng suất Von Mises cực đại $\epsilon \leq 5\%$. Mô hình đạt độ hội tụ tin cậy tại mật độ lưới khoảng 166,142 phần tử (đối với vỏ 5mm) và 654,090 phần tử (đối với vỏ 3mm/8mm).

2.2.2. Tải trọng và Điều kiện biên

Tải trọng: Áp suất ngoài tác dụng đều lên bề mặt vỏ hướng vào tâm (1). Điều kiện biên: Ngàm cố định ($u = v = w = 0$) được áp dụng tại các diện tích tiếp xúc của chân đế, mô phỏng liên kết hàn cứng với sàn.

$$\Delta P = P_{\text{atm}} - P_{\text{in}} = 76\text{cmHg} - 2\text{cmHg} = 74\text{cmHg} \approx 0.09\text{MPa} \quad (1)$$

2.2.3. Quy trình giải

Quy trình giải trải qua hai bước:

- Giải bài toán tĩnh để xác định trường ứng suất và chuyển vị.

- Giải bài toán trị riêng tìm hệ số tải trọng tới hạn (λ), ngưỡng mất ổn định đàn hồi: $(K - \lambda K_G)\psi = 0$.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Phân tích ứng suất Von Mises và độ biến dạng

Kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn cho thấy phân bố ứng suất Von Mises trên thân bồn có xu hướng tương đối đồng đều dọc theo vùng thân trụ, với giá trị cực đại tập trung tại các vị trí chuyển tiếp hình học và vùng liên kết với các chi tiết phụ trợ. Giá trị ứng suất cực đại tương ứng với ba phương án chiều dày được tổng hợp trong Bảng 2, cho thấy ngay cả trong trường hợp bất lợi nhất (vỏ dày 3 mm), ứng suất lớn nhất chỉ đạt khoảng 88.1 MPa, tương đương 35.9% giới hạn chảy của vật liệu SS400 (245 MPa). Điều này khẳng định rằng, dưới tác dụng của áp suất ngoài, kết cấu vỏ trụ tròn làm việc chủ yếu theo cơ chế ứng suất màng nén, cho phép phân bố tải trọng một cách hiệu quả và hạn chế sự tập trung ứng suất cục bộ.

Khi chiều dày vỏ tăng từ 3 mm lên 5 mm và 8 mm, ứng suất cực đại giảm đáng kể, lần lượt xuống 33.6 MPa và 21.3 MPa. Xu hướng này phản ánh rõ vai trò của chiều dày trong việc gia tăng độ cứng uốn và khả năng phân tán tải của kết cấu. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng trong cả ba trường hợp, điều kiện bền dẻo đều được thỏa mãn với hệ số an toàn cao, cho thấy tiêu chí ứng suất không phải là yếu tố chi phối trong thiết kế bồn sây chân không.

Bên cạnh ứng suất, chuyển vị của kết cấu là một chỉ tiêu quan trọng phản ánh độ cứng tổng thể của bồn. Kết quả mô phỏng cho

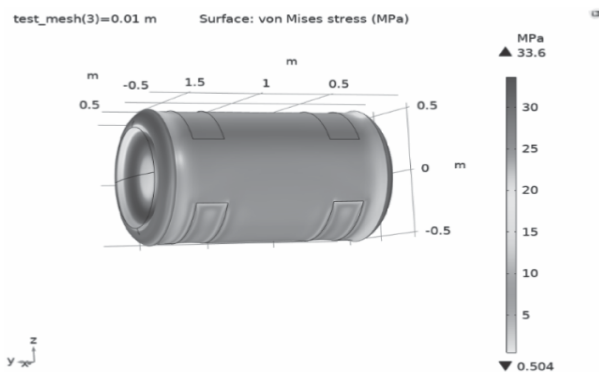
thấy chuyển vị cực đại của vỏ 3 mm đạt khoảng 0.96 mm, cao gần gấp đôi so với phương án 5 mm (0.54 mm) và gần gấp ba so với phương án 8 mm (0.33 mm). Sự gia tăng đáng kể của biến dạng trong trường hợp vỏ mỏng cho thấy độ cứng thấp, làm tăng nguy cơ xuất hiện các sai lệch hình học ban đầu như độ oval, vốn là yếu tố kích hoạt quá trình mất ổn định.

Hình 3 minh họa rõ sự phân bố ứng suất trên vỏ bồn với chiều dày 5 mm, trong đó vùng ứng suất cao chủ yếu tập trung tại hai đầu bồn do ảnh hưởng của điều kiện biên và liên kết ngàm. Tuy nhiên, giá trị ứng suất vẫn nằm trong giới hạn an toàn, đồng thời biến dạng được kiểm soát ở mức thấp, cho thấy đây là phương án có sự cân bằng tốt giữa độ bền và độ cứng.

Tổng hợp các kết quả phân tích cho thấy rằng mặc dù tất cả các phương án đều đáp ứng yêu cầu về bền, nhưng sự khác biệt về độ biến dạng đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá khả năng làm việc ổn định của kết cấu. Đặc biệt, phương án vỏ mỏng 3 mm, dù đạt tiêu chuẩn bền, lại thể hiện độ cứng thấp và biến dạng lớn, tiềm ẩn nguy cơ bất lợi trong vận hành thực tế. Do đó, việc đánh giá kết cấu không thể chỉ dựa trên tiêu chí ứng suất mà cần xem xét đồng thời yếu tố biến dạng và ổn định tổng thể.

Bảng 2. Tổng hợp kết quả Ứng suất Von Mises và Chuyển vị

Chiều dày vỏ (t)	Ứng suất Max ($\sigma_{vM,max}$)	Tỷ lệ bền ($\frac{\sigma}{\sigma_{yield}}$)	Chuyển vị Max (δ_{max})
3 mm	88.1 MPa	35.90%	0.96 mm
5 mm	33.6 MPa	13.70%	0.54 mm
8 mm	21.3 MPa	8.70%	0.33 mm



Hình 3. Phân bố ứng suất Von Mises trên vỏ bồn dày 5mm

3.2. Phân tích Độ ổn định

Đối với các kết cấu chịu áp suất ngoài như bồn sây chân không, phân tích độ ổn định (buckling) đóng vai trò quyết định trong đánh giá khả năng làm việc an toàn. Khác với tiêu chí bền, nơi vật liệu chỉ bị phá hủy khi ứng suất vượt quá giới hạn chảy, hiện tượng mất ổn định có thể xảy ra đột ngột ở mức ứng suất thấp hơn nhiều, đặc biệt đối với các kết cấu vỏ mỏng. Do đó, việc xác định hệ số tải trọng tới hạn (λ) thông qua bài toán trị riêng trong phân tích phần tử hữu hạn là bước quan trọng nhằm đánh giá ngưỡng mất ổn định đàn hồi của kết cấu.

Kết quả mô phỏng cho thấy hệ số tải trọng tới hạn lý thuyết tăng mạnh theo chiều dày vỏ. Cụ thể, với phương án vỏ 3 mm, hệ số λ chỉ đạt khoảng 3.56, trong khi đó giá trị này tăng lên 9.86 và 27.33 tương ứng với các phương án 5 mm và 8 mm. Tuy nhiên, trong thực tế thiết kế, các giá trị lý thuyết này cần được hiệu chỉnh thông qua hệ số suy giảm ($C \approx 0.5$) nhằm xét đến các yếu tố bất lợi như sai lệch hình học, độ oval, ứng suất dư sau chế tạo và các khuyết tật không tránh khỏi.

Sau khi hiệu chỉnh, hệ số an toàn ổn định thực tế của vỏ 3 mm chỉ đạt khoảng 1.78, thấp hơn đáng kể so với giá trị khuyến nghị tối

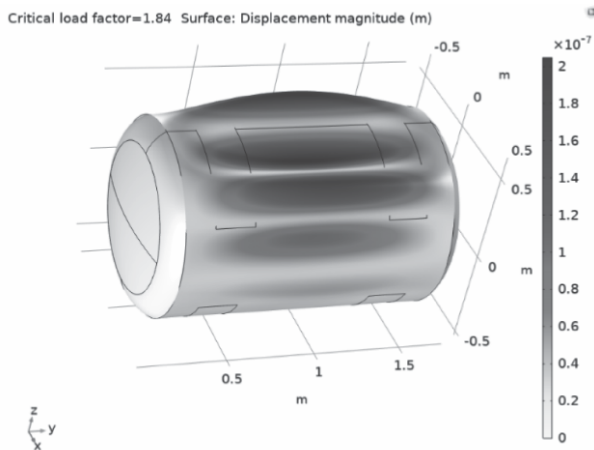
thiểu ($SF \geq 3.0$). Điều này cho thấy phương án này tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định cao, đặc biệt trong điều kiện vận hành thực tế khi có thể xuất hiện các tác động ngẫu nhiên như rung động, va chạm hoặc sai số lắp đặt. Hình 4 cho thấy dạng mất ổn định đặc trưng của vỏ mỏng với các vùng lõm cục bộ xuất hiện dọc theo thân bồn, minh chứng cho cơ chế “bẹp” đột ngột của kết cấu khi đạt đến tải trọng tới hạn.

Ngược lại, phương án vỏ 5 mm cho hệ số an toàn ổn định khoảng 4.93, nằm trong vùng làm việc an toàn và phù hợp với yêu cầu thiết kế công nghiệp. Kết cấu đủ cứng để hạn chế biến dạng ban đầu, đồng thời có khả năng chịu được các sai lệch hình học trong quá trình chế tạo mà không cần các biện pháp gia cường bổ sung. Trong khi đó, phương án vỏ 8 mm tuy đạt hệ số an toàn rất cao (khoảng 13.67), nhưng vượt xa yêu cầu thực tế, dẫn đến gia tăng không cần thiết về khối lượng và chi phí vật liệu.

Như vậy, kết quả phân tích cho thấy chiều dày vỏ là tham số chi phối trực tiếp đến khả năng ổn định của kết cấu. Khác với phân tích ứng suất, nơi tất cả các phương án đều đạt yêu cầu, tiêu chí ổn định đã phân loại rõ ràng các phương án thiết kế. Điều này khẳng định rằng đối với bồn sây chân không, mất ổn định vỏ là dạng phá hủy chi phối và cần được ưu tiên trong quá trình thiết kế, đặc biệt đối với các kết cấu có tỷ số D/t lớn.

Bảng 3. Kết quả phân tích ổn định

Chiều dày	Hệ số tới hạn lý thuyết	Hệ số an toàn thực tế ước lượng	Đánh giá
3 mm	3.56	1.78	Nguy hiểm
5 mm	9.86	4.93	An toàn [7]
8 mm	27.33	13.67	Dư thừa



Hình 4. Dạng mất ổn định của vỏ bồn 3mm.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã thực hiện phân tích toàn diện ứng suất, biến dạng và độ ổn định của bồn sấy chân không tiết diện tròn dưới tác dụng của áp suất ngoài bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Kết quả cho thấy, mặc dù tất cả các phương án chiều dày khảo sát đều thỏa mãn điều kiện bền theo tiêu chuẩn Von Mises, nhưng tiêu chí này không phải là yếu tố chi phối trong thiết kế. Thay vào đó, hiện tượng mất ổn định vỏ (buckling) mới là cơ chế phá hủy nguy hiểm và quyết định đến mức độ an toàn của kết cấu.

Phân tích độ ổn định đã chỉ ra sự khác biệt rõ rệt giữa các phương án. Cụ thể, vỏ dày 3 mm tuy đạt yêu cầu về bền nhưng có hệ số an toàn ổn định thấp, tiềm ẩn nguy cơ mất ổn định cao trong điều kiện làm việc thực tế. Ngược lại, phương án vỏ 8 mm cho mức độ an toàn rất lớn nhưng không hiệu quả về mặt kinh tế do gia tăng khối lượng và chi phí vật liệu. Trong khi đó, phương án vỏ 5 mm được xác định là tối ưu, khi vừa đảm bảo hệ số an toàn ổn định ở mức hợp lý, vừa kiểm soát tốt biến dạng và tối ưu hóa hiệu quả sử dụng vật liệu.

Kết quả nghiên cứu khẳng định rằng

trong thiết kế bồn sấy chân không, cần ưu tiên đánh giá đồng thời ba tiêu chí: ứng suất, độ cứng và đặc biệt là độ ổn định. Ngoài ra, các yếu tố thực tế như sai lệch hình học, độ oval và chất lượng chế tạo cần được kiểm soát chặt chẽ để đảm bảo khả năng chịu lực đúng như dự báo mô phỏng.

Nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học và thực tiễn quan trọng cho việc thiết kế tối ưu các thiết bị chịu áp suất ngoài dạng vỏ mỏng, góp phần nâng cao độ an toàn và hiệu quả kinh tế trong ứng dụng công nghiệp.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu được tài trợ bởi Sở Khoa học và Công nghệ Tỉnh Tây Ninh trong khuôn khổ đề tài mã số: KCLA.05.24.

Chúng tôi xin cảm ơn Trường Đại học Bách khoa, ĐHQG-HCM đã hỗ trợ cho nghiên cứu này. ❖

Ngày nhận bài: 12/01/2026

Ngày phản biện: 22/01/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. V.R. Sagar, P. Suresh Kumar, "Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review". J Food Sci Technol 47 (2010) 15-26.
- [2]. M. Radojčin, I. Pavkov, D. Bursać Kovačević, P. Putnik, A. Wiktor, Z. Stamenković, K. Kešelj, A. Gere, "Effect of Selected Drying Methods and Emerging Drying Intensification Technologies on the Quality of Dried Fruit: A Review". Processes 9 (2021) 132.
- [3]. Q.N. Banh, L.H. Sam, A.S. Tran, "Optimization of the Novel Vacuum Drying Process's Parameters on the Dragon Fruit Chips". Key Eng Mater 923 (2022) 171-176. <https://doi.org/10.4028/p-8975e2>.



- [4]. Z. Šumić, A. Tepić Horecki, L. Pezo, B. Pavlić, N. Nastić, A. Milić, “*Comprehensive Analysis and Optimization of Peach (*Prunus persica*) Vacuum Drying: Employing Principal Component Analysis, Artificial Neural Networks and the Standard Score Approach*”. Processes 12 (2024) 2643.
- [5]. H. Ma, P. Jiao, H. Li, Z. Cheng, Z. Chen, “*Buckling analyses of thin-walled cylindrical shells subjected to multi-region localized axial compression: Experimental and numerical study*”. Thin-Walled Structures 183 (2023) 110330.
- [6]. D.E. Slovenec, Matthew Kaiser, “*Buckling Evaluation of Pressure Equipment and Plant Structures*” (2023). <https://e2g.com/industry-insights-ar/buckling-evaluation-of-pressure-equipment-and-plant-structures/> (accessed February 28, 2023).
- [7]. ASME, BPVC Section VIII-Rules for Construction of Pressure Vessels Division 2-Alternative Rules, in: ASME, 2025.