

NGHIÊN CỨU, THỬ NGHIỆM PHƯƠNG PHÁP ĐỤC LỖ BẰNG CHÙM TIA LASER TRÊN MÀNG PE ỨNG DỤNG BẢO QUẢN NÔNG SẢN

Nguyễn Văn Bình^{1*}, Trần Thị Vân Anh¹, Đỗ Xuân Tiến¹, Trương Đức Toàn¹, Phạm Chí Hiếu¹, Nguyễn Đình Văn¹, Đoàn Hoàng Linh¹, Đặng Thảo Yến Linh¹

¹Viện Ứng dụng công nghệ, Bộ Khoa học và Công nghệ

*Tác giả liên hệ: vanbinh5286@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu và thử nghiệm một phương pháp đục vi lỗ trên màng mỏng Polyethylene (PE) bằng laser CO₂ nhằm ứng dụng trong công nghệ bao bì khí quyển điều chỉnh (MAP) để kéo dài thời hạn sử dụng của nông sản tươi và thực phẩm. Hệ thống sử dụng nguồn phát laser RF-CO₂ công suất > 30 W, bước sóng 10,6 μm, kết hợp bộ quét galvo chùm tia đường kính 20 mm và thấu kính hội tụ F-theta tiêu cự 150 mm, cho phép tạo ra các vi lỗ đường kính cỡ 100 μm trên vùng gia công rộng 110×110 mm. Nhờ được tích hợp thêm hệ trục quay và con lăn điều khiển bằng động cơ bước, hệ thống có khả năng tự động đục lỗ liên tục trên các cuộn màng PE có độ dày từ 30–80 μm. Kết quả thực nghiệm cho thấy đường kính các vi lỗ (trên màng PE) thu được dao động trong khoảng 80–150 μm, phụ thuộc vào thông số thiết lập và độ dày màng. Bài báo cũng trình bày một số kết quả bước đầu trong việc bảo quản thực tế đối với dâu tây và sầu riêng đã bóc vỏ bằng loại màng PE đục vi lỗ này.

Từ khóa: Bảo quản nông sản, đục vi lỗ, laser CO₂, màng PE

RESEARCH AND EXPERIMENT ON A LASER MICRO - PERFORATION METHOD FOR POLYETHYLENE (PE) FILMS USED IN AGRICULTURAL PRODUCT PRESERVATION**ABSTRACT**

This paper presents the results of research and experimentation on a CO₂ laser-based micro-perforation method for Polyethylene (PE) films. This technique is intended for application in Modified Atmosphere Packaging (MAP) technology to extend the shelf life of fresh produce and foodstuffs. The system utilizes an RF-CO₂ laser source with a power of approximately 30 W and a wavelength of 10.6 μm. This source is coupled with a 20 mm diameter galvo beam scanner and an F-theta focusing lens with a focal length of 150 mm, enabling the creation of micro-holes with diameters around 100 μm over a processing area of 110×110 mm. By integrating a rotary axis and a motor-driven roller system controlled by stepper motors, the system achieves continuous, automated perforation on PE film rolls ranging in thickness from 30 to 80 μm. Experimental results demonstrate that the diameter of the micro-holes produced on the PE film ranges from 80 to 150 μm, which is dependent on the set parameters and film thickness. The paper also provides some preliminary results regarding the practical storage preservation of strawberries and peeled durian using this micro-perforated PE film.

Keywords: CO₂ laser, micro-perforation, PE film, produce preservation

Ngày nhận bài: 23/10/2025 Ngày nhận bài sửa: 03/11/2025 Ngày duyệt đăng bài: 10/11/2025

1. GIỚI THIỆU

Bảo quản sau thu hoạch đóng vai trò quan trọng trong việc giảm thiểu tổn thất và duy trì chất lượng các loại rau, củ, quả. Hiện nay, sử dụng bao gói khí quyển điều chỉnh (MAP - Modified Atmosphere Packaging) là một giải pháp hữu hiệu làm tăng thời gian tươi của nông sản. Công nghệ này cho phép cân bằng nồng độ O_2/CO_2 qua đó phù hợp với hô hấp của nông sản cần bảo quản, nhằm giảm tốc độ lão hóa và ngăn ngừa hư hỏng. Vật liệu thường được sử dụng để chế tạo màng bao gói thực phẩm là các màng polymer có tính chất cơ học tốt để giúp quá trình vận chuyển sản phẩm an toàn hơn. Trong đó, màng Polyethylene (PE) được sử dụng rộng rãi nhờ tính linh hoạt, độ bền cơ học cao và chi phí thấp. Tuy nhiên, màng PE tiêu chuẩn thường có tốc độ truyền khí O_2/CO_2 (OTR - Oxygen Transmission Rate và CTR - Carbon Dioxide Transmission Rate) chưa lý tưởng cho việc thiết lập và duy trì khí quyển cân bằng tối ưu (EMA - Equilibrium Modified Atmosphere) với nhiều loại nông sản có tốc độ hô hấp khác nhau. Đặc biệt, đối với các loại thực phẩm, rau củ quả có tỷ lệ hô hấp cao, các vi lỗ sẽ được đục trên màng bảo quản để tăng khả năng điều chỉnh quá trình thông khí mà không làm giảm khả năng bảo vệ (Buthelezi & Mafeo, 2024; Kumari, Pakshirajan, & Pugazhenth, 2022; Sonawane và cộng sự, 2022; Winotapun và cộng sự, 2023; Winotapun và cộng sự, 2024).

Trong số các phương pháp tạo vi lỗ trên polymer, công nghệ sử dụng nguồn laser CO_2 (bước sóng 10,2 – 10,6 μm) được quan tâm bởi đặc tính không tiếp xúc, kiểm soát vị trí chính xác và khả năng gia nhiệt cục bộ phù hợp với nhiều loại polymer dùng trong bao bì. Các nghiên cứu cho thấy laser CO_2 phát chế độ xung có thể tạo ra các lỗ có kích thước và hình dạng được kiểm soát tốt bằng cách điều chỉnh các thông số như năng lượng xung, tần số, thời gian phơi sáng và vị trí hội tụ, đồng thời giảm thiểu vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ – Heat

Affected Zone) nếu tối ưu hóa đúng cách (Hussein, Caleb, & Opara, 2015; Mushtaq và cộng sự, 2020; Winotapun và cộng sự, 2021). Cơ chế đục vi lỗ bằng laser sẽ khác nhau tùy thuộc vào đường kính của lỗ, độ dày của lớp được đục lỗ, loại vật liệu và hình dạng lỗ mong muốn. Có 2 cơ chế phổ biến (Führa và cộng sự, 2017; Sobri và cộng sự, 2020), đó là:

- Dùng xung đơn: Khi độ dày của lớp cần đục lỗ nhỏ, một tia laser có công suất và đường kính điểm thích hợp có thể được sử dụng để xuyên thủng vật liệu chỉ với một xung laser.
- Dùng đa xung liên tiếp: Khi vật liệu có độ dày lớn, vật liệu hấp thụ ít năng lượng hoặc tia laser không có đủ công suất để đục thủng trong chỉ một xung. Theo đó, nhiều xung laser được phóng vào cùng một điểm để loại bỏ dần vật liệu khỏi bề mặt cho đến khi nó được đục lỗ.

Nhiều kết quả nghiên cứu thực nghiệm đã chứng minh rằng đục lỗ bằng laser có thể tăng hệ số truyền oxy (OTR) hoặc điều chỉnh truyền khí C_2H_4/CO_2 phù hợp với yêu cầu bảo quản các sản phẩm khác nhau. Tuy nhiên, ảnh hưởng của kích thước lỗ, mật độ lỗ và hướng chiếu laser (đặc biệt với các màng đa lớp vật liệu) đến tính đồng đều, tính cơ học của màng và hiệu quả trao đổi khí vẫn cần được nghiên cứu sâu hơn trong ứng dụng thực tế (Sonawane và cộng sự, 2022). Một số công trình gần đây còn khảo sát các khía cạnh phụ liên quan đến quy trình công nghiệp hoá: sinh khói/hạt bụi khi đục laser, ảnh hưởng nhiệt lên màng đa lớp, và khả năng mở rộng công nghệ sang các vật liệu polymer phân huỷ sinh học. Những kết quả này chỉ ra cả tiềm năng ứng dụng lẫn thách thức về kiểm soát chất lượng lỗ, an toàn lao động và tích hợp vào dây chuyền sản xuất (Buthelezi & Mafeo, 2024; Munoz và cộng sự, 2023).

Tại Việt Nam, nhu cầu về bảo quản và tăng thời gian sử dụng của sản phẩm tươi sống là rất lớn. Việc kết hợp giữa công nghệ đục vi lỗ bằng chùm tia laser và kỹ thuật bao gói khí

quyền điều chỉnh (MAP) trên màng PE sẽ đem đến một giải pháp mới cho các doanh nghiệp về bảo quản thực phẩm, nông sản trong nước. Hiện tại trong nước chưa sản xuất, chế tạo được thiết bị này, vì vậy chúng tôi đặt mục tiêu nghiên cứu thiết kế, chế tạo một hệ thiết bị laser cho phép đục vi lỗ trên màng mỏng PE và thử nghiệm sử dụng màng này để bảo quản một số loại trái cây như dâu tây, sầu riêng đã bóc vỏ.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

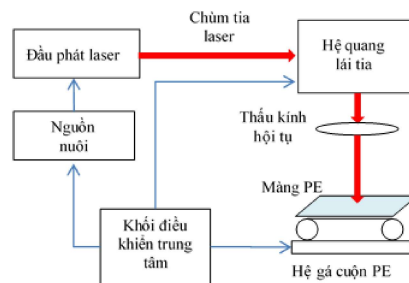
Trong bài báo này, chúng tôi trình bày kết quả thiết kế, chế tạo và đo kiểm các thông số của một hệ thiết bị laser cho phép đục vi lỗ trên màng mỏng PE. Nội dung nghiên cứu tập trung vào ba vấn đề chính: (i) kỹ thuật chế tạo và tích hợp hệ thiết bị laser đục lỗ dựa trên các khối bộ phận gồm nguồn phát laser, hệ quang học

hội tụ và các khối điều khiển; (ii) thực nghiệm đánh giá ảnh hưởng của các tham số laser và hệ thống đến quá trình tạo vi lỗ trên màng PE nhằm xác định thông số đục lỗ tối ưu; (iii) nghiên cứu và thử nghiệm công nghệ bảo quản thực phẩm MAP sử dụng màng PE đục vi lỗ tạo ra.

Nghiên cứu này không chỉ giúp chủ động về công nghệ chế tạo và tích hợp thiết bị laser, mà còn đáp ứng được yêu cầu đục vi lỗ trên màng PE, góp phần đa dạng hóa ứng dụng laser trong nông nghiệp, đặc biệt trong bảo quản nông sản và thực phẩm tại Việt Nam.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Thiết kế và chế tạo thiết bị laser đục vi lỗ



Hình 1. Sơ đồ khối và hệ thiết bị laser đục vi lỗ trên màng PE chế tạo

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Trong quá trình xây dựng sơ đồ khối, thiết kế và lựa chọn vật tư, linh kiện, nhóm đã tiến hành tìm hiểu, giải mã một số cấu hình thiết bị và mô đun thương mại có sẵn trên thị trường. Các mô đun và linh kiện cấu thành được lựa chọn từ những nhà sản xuất uy tín nhằm đảm bảo chất lượng và độ ổn định của hệ thống. Cách tiếp cận này là cần thiết bởi hiện nay trong nước chưa thể tự chế tạo hoàn toàn tất cả các bộ phận của hệ thống laser tích hợp.

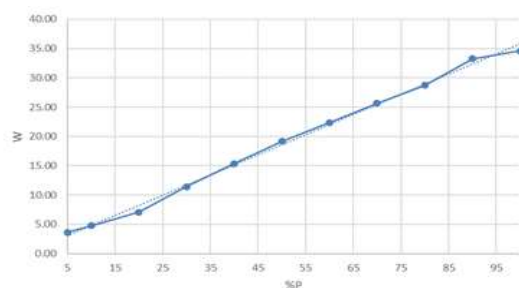
Sơ đồ khối hệ thiết bị đục vi lỗ trên màng PE bằng chùm tia laser được thể hiện ở Hình 1. Cấu hình tổng thể của hệ thiết bị laser đục vi lỗ gồm bốn khối chính: (i) nguồn phát laser khí

RF-CO₂ bước sóng 10,6 μm , công suất 30 W (hãng DAVI Laser) kết hợp thấu kính mở rộng chùm tia 8X; (ii) hệ quét chùm tia Galvo RC2808 (Sino-Galvo) với đường kính chùm tia lối vào tối đa 20 mm; (iii) thấu kính hội tụ F-theta tiêu cự 150 mm; (iv) mạch điều khiển trung tâm LMCV4-DIGIT (BJJCZ). Toàn bộ hệ thống được điều khiển bằng phần mềm khắc laser EzCAD2. Các khối bộ phận được kết nối đồng bộ và lắp đặt trên khung giá đỡ chắc chắn.

Sau khi thiết kế, tích hợp và chế tạo hoàn thiện, hệ thiết bị laser đục lỗ được tiến hành khảo sát một số thông số kỹ thuật của chùm laser đầu ra tại phòng thí nghiệm. Đặc tuyến

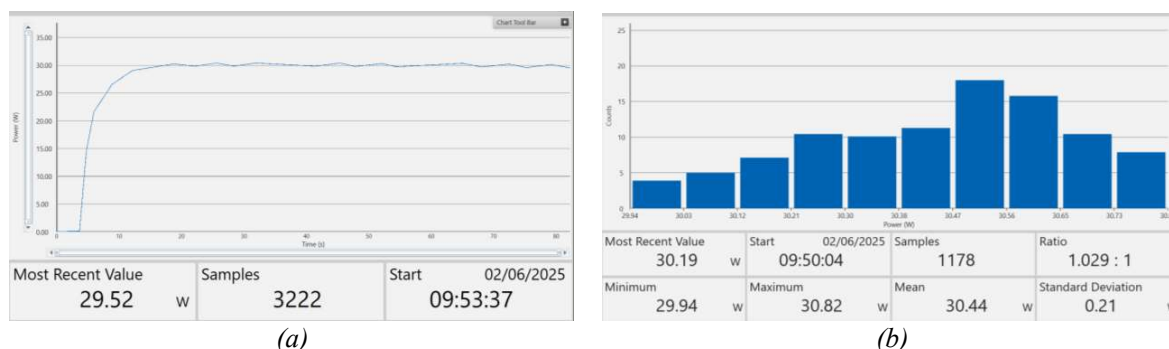
công suất của laser được thể hiện trong Hình 2. Phép đo được thực hiện bằng cách đo trực tiếp công suất chùm tia laser CO₂ sau hệ quang học lõi ra của đầu phát. Hệ laser hoạt động ở chế độ xung với tần số lặp lại 50 kHz. Công suất

trung bình của chùm tia ghi nhận bằng đầu đo công suất nhiệt S322C và hiển thị trên bộ điều khiển PM100D. Độ ổn định công suất của chùm tia laser lõi ra được mô tả trong Hình 3.



Hình 2. Đặc tuyến công suất lõi ra laser CO₂

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả



Hình 3. (a) Công suất laser theo thời gian (a) và (b) độ ổn định công suất laser

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Kết quả đo kiểm cho thấy công suất cực đại của laser có thể đạt ~ 35 W. Về độ ổn định, sau khi cấp nguồn, công suất laser CO₂ tăng dần và đạt trạng thái ổn định sau khoảng 10 giây. Với thiết lập công suất P = 90% trong khoảng thời gian 30 giây, giá trị công suất đo được dao động từ 29,94 W đến 30,82 W, giá trị trung bình 30,44 W, độ lệch 0,21 W. Như vậy, độ ổn định công suất đầu ra của hệ laser trong phép đo này đạt 0,69%. Khi thiết lập công suất P > 90%, mức dao động công suất lớn hơn. Các phép đo tương tự cho thấy độ ổn định công suất của hệ laser luôn ≤ 2%. Kết quả này đảm bảo khả năng đục vi lỗ đồng đều trên màng mỏng PE.

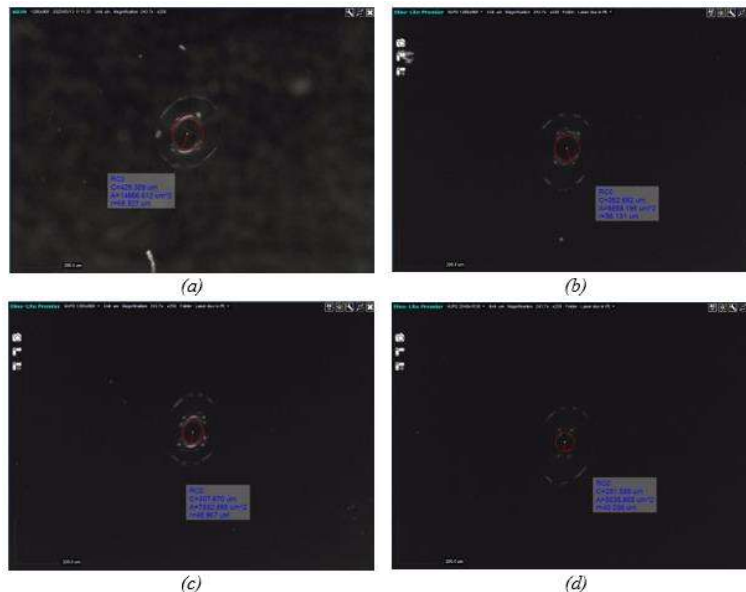
3.2. Thực nghiệm đục vi lỗ trên màng PE

Quá trình đục lỗ sử dụng chùm tia laser CO₂ bước sóng 10,6 μm với công suất và đường kính điểm hội tụ thích hợp để chiếu lên vật liệu màng PE bằng một hoặc nhiều xung laser. Các thông số lõi ra của laser có thể điều chỉnh linh hoạt, cho phép tạo các lỗ thủng với đặc tính mong muốn, đồng thời đạt năng suất và tốc độ cao. Kích thước và mật độ lỗ được thiết kế trên máy tính và điều khiển đồng bộ giữa chuyển động của đầu quét Galvo và chùm tia laser thông qua mạch điều khiển trung tâm. Toàn bộ quá trình được thao tác trên phần mềm EzCAD2, trong đó người sử dụng có thể thiết lập trực tiếp các thông số như công suất, tần số lặp xung, tốc độ quét... Khối cơ khí gá và luân chuyển màng được tích hợp từ 06 con lăn đường kính ngoài 50 mm, chiều dài 520 mm

với đường kính trục quay 12 mm, phù hợp cho các cuộn màng PE có bề ngang nhỏ hơn 500 mm. Một động cơ bước có mô men xoắn giữ ~ 1,8 N.m được sử dụng để kéo màng nhằm hỗ trợ đục vi lỗ tự động, góp phần nâng cao tốc độ, tối ưu hóa quy trình và tăng hiệu quả ứng dụng của hệ thiết bị laser trong sản xuất màng PE đục lỗ.

Chúng tôi đã tiến hành khảo sát đường kính lỗ tạo trên màng PE ứng với các thông số phát laser khác nhau. Quy trình thực hiện như sau: (i) thiết lập các thông số thí nghiệm trong

phần mềm EzCAD, bao gồm công suất laser, tần số lặp xung, tốc độ quét, mật độ và khoảng cách giữa các đường tia; (ii) tiến hành tạo lỗ thử nghiệm trên màng PE; (iii) đo đường kính và hình dạng lỗ bằng kính hiển vi kỹ thuật số Dino-Lite AD-7013MZT với độ phóng đại tối đa 200x; (iv) ghi nhận và phân tích số liệu. Một số kết quả thử nghiệm trên màng DOWLEX® 2049 LLDPE làm từ nhựa PE tinh khiết > 95%, độ dày 40 μm , độ dẫn dài khi đứt ~ 670%, độ bền kéo ~ 34 Mpa (phổ biến trên thị trường) được trình bày dưới đây.



Hình 4. Vi lỗ đục trên màng DOWLEX® 2049 LLDPE với thông số gia công khác nhau

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Bảng 1. Kết quả đo đường kính lỗ đục bằng laser với các thông số khác nhau

TT lỗ	Công suất laser (W)	Tần số lặp lại xung laser (kHz)	Tốc độ quét tia (mm/s)	Đường kính lỗ đục (μm)
a	17,0	25	10	136,6
b	28,8	80	300	112,2
c	27,0	80	300	97,9
d	30,5	10	300	80,0

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Các kết quả đo kiểm thực nghiệm cho thấy đường kính nhỏ nhất của lỗ đục trên màng PE đạt khoảng 80 μm khi thiết lập công suất laser 80% (~ 27W), tần số xung 10 kHz và tốc độ

quét 300 mm/s. Đường kính lỗ không đồng đều chủ yếu bắt nguồn từ độ ổn định công suất laser chưa tuyệt đối, đặc tính phát xung, cũng như việc bề mặt màng PE không được căng phẳng

hoàn toàn trong quá trình thí nghiệm. Giới hạn hoạt động của thiết bị cũng được nhóm nghiên cứu xác định bằng phương pháp thực nghiệm trong phòng thí nghiệm của Viện Ứng dụng công nghệ (Bảng 2). Màng đục vi lỗ thu được

có thể ứng dụng để bảo quản thực phẩm theo phương pháp bao gói khí quyển điều chỉnh (MAP) và phù hợp với nhiều kết quả nghiên cứu tương tự.

Bảng 2. Thông số kỹ thuật chính của hệ thiết bị laser đục lỗ chế tạo

Loại laser	Laser khí RF- CO ₂
Bước sóng:	10,6 μm
Công suất laser lõi ra tối đa:	> 30 W
Kích thước vùng đục lỗ cho phép:	110 x 110 mm
Tốc độ đục lỗ lớn nhất:	1000 lỗ/ giây
Mật độ đục lỗ lớn nhất:	400 lỗ/ cm ²
Đường kính lỗ đục nhỏ nhất:	< 100 μm

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

3.3. Thử nghiệm bảo quản nông sản bằng màng PE đục vi lỗ

Nhóm nghiên cứu lựa chọn hai loại nông sản có hàm lượng dinh dưỡng và giá trị kinh tế cao là dâu tây và sầu riêng cho thử nghiệm bảo quản. Thử nghiệm bảo quản được thiết kế trong 15 ngày ở điều kiện $0\pm 2^\circ\text{C}$ cho dâu tây và $10\pm 2^\circ\text{C}$ cho sầu riêng, độ ẩm 90-95%, nông sản được đựng trong khay nhựa PET không nắp kích thước 170x118x55mm, bọc bằng hai loại bao bì khác nhau là màng bọc thực phẩm phổ biến trên thị trường và màng bọc thực phẩm chế tạo dựa trên nhựa LLDPE bổ sung

20% chất kháng khuẩn được đục vi lỗ bằng laser, mẫu đối chứng được giữ nguyên trong bao bì từ cửa hàng. Kích thước lỗ đục trên màng bảo quản thử nghiệm được chọn trung bình $\sim 150 \mu\text{m}$, mật độ 100 lỗ/cm². Các chỉ tiêu đánh giá chất lượng của quá trình bảo quản như sau: (i) cho điểm cảm quan theo TCVN 3215-79, bao gồm chỉ tiêu về màu sắc, trạng thái và mùi; (ii) tỷ lệ hao hụt khối lượng; (iii) tỷ lệ hư hỏng sau bảo; (iv) quản hàm lượng chất dinh dưỡng gồm hàm lượng chất khô hòa tan tổng số; hàm lượng vitamin C đối với dâu tây và tổng polyphenol đối với sầu riêng. Kết quả thử nghiệm được trình bày dưới đây:

Bảng 3. Một số tính chất của nông sản sau bảo quản

	Loại bao bì	Nhiệt độ bảo quản (°C)	Ngày bảo quản	Điểm cảm quan	Hao hụt khối lượng (%)	Tỷ lệ thối hỏng (%)
Dâu tây	Nguyên liệu	-	0	18,9	0	0
	Màng bọc thực phẩm thường	0°C	15	14,05	5,9	13,04
	Màng PE kháng khuẩn đục vi lỗ		15	15,30	3,9	11,11
Sầu riêng	Nguyên liệu	-	0	18,9	0	0
	Màng bọc thực phẩm thường	10	15	15,35	6,3	0
	Màng PE kháng khuẩn đục vi lỗ		15	15,65	4,4	0

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Sau 15 ngày bảo quản, cả hai loại nông sản đều ghi nhận sự giảm sút về điểm cảm quan so

với nguyên liệu ban đầu. Tuy nhiên, mẫu được đóng gói bằng màng kháng khuẩn đục vi lỗ cho

thấy hao hụt khối lượng thấp hơn và tỷ lệ thối hỏng không cao hơn so với màng thực phẩm thông thường. Điều này cho thấy việc tạo vi lỗ giúp cải thiện khả năng trao đổi khí và độ ẩm trong bao, góp phần kéo dài chất lượng cảm quan của sản phẩm.

Đối với dâu tây bảo quản ở 0°C, sau 15 ngày, mẫu sử dụng màng kháng khuẩn đục vi lỗ có hao hụt khối lượng chỉ 3,9%, thấp hơn gần 2 điểm phần trăm so với màng thường (5,9%). Tỷ lệ thối hỏng cũng giảm nhẹ từ 13,04% xuống 11,11%. Điểm cảm quan giữa hai loại bao bì lần lượt là: 14,05 và 15,30, xu hướng này cho thấy việc đục vi lỗ giúp hạn chế tích tụ hơi nước và CO₂ bên trong bao, giảm ngưng tụ và nấm mốc bề mặt.

Đối với sầu riêng com bảo quản ở 10°C, sự khác biệt tích cực rõ ràng hơn. Mẫu dùng màng đục vi lỗ có điểm cảm quan cao hơn (15,65 so với 15,35) và hao hụt khối lượng thấp hơn (4,4% so với 6,3%), trong khi cả hai mẫu đều không xuất hiện hư hỏng. Với sản phẩm có độ khô chất cao và mùi đặc trưng như sầu riêng, việc có các vi lỗ nhỏ giúp thoát bớt hơi và khí bay hơi, hạn chế hiện tượng “bí khí” trong bao, nhờ đó cải thiện cảm giác mùi vị và độ tươi.

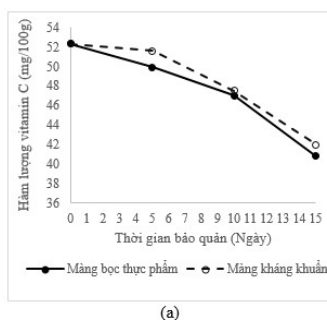
Khi so sánh chéo giữa hai loại quả, có thể thấy hiệu quả giảm hao hụt khối lượng là nhất quán ở cả dâu tây và sầu riêng (giảm khoảng 1,9–2,0%). Tuy nhiên, tác động lên cảm quan phụ thuộc vào đặc tính hô hấp của từng loại. Với dâu tây – quả có tốc độ hô hấp rất cao – vi lỗ giúp giảm ẩm và thối nhưng chưa cải thiện điểm cảm quan. Ngược lại, với sầu riêng – sản

phẩm dễ tích khí và nhạy cảm với mùi – vi lỗ giúp duy trì mùi vị tự nhiên và nâng cao đánh giá cảm quan.

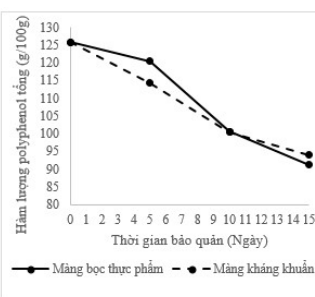
Bên cạnh sự khác biệt về cảm quan và tỷ lệ hao hụt khối lượng, sự biến đổi các chỉ tiêu dinh dưỡng trong quá trình bảo quản cũng phản ánh rõ vai trò của loại bao bì sử dụng. Hình 5 trình bày sự thay đổi hàm lượng vitamin C, polyphenol tổng số, chất khô hòa tan tổng số (°Brix) của dâu tây và sầu riêng trong suốt 15 ngày bảo quản đối với hai loại màng: màng bọc thực phẩm thông thường và màng kháng khuẩn đục vi lỗ.

Quan sát Hình 5a cho thấy hàm lượng vitamin C trong dâu tây giảm dần theo thời gian bảo quản, song mẫu sử dụng màng kháng khuẩn đục vi lỗ luôn duy trì giá trị cao hơn so với màng thường ở mọi thời điểm. Sau 15 ngày, vitamin C của mẫu này vẫn còn khoảng 41 mg/100 g, trong khi mẫu màng thường chỉ đạt 38 mg/100 g. Điều đó chứng tỏ điều kiện vi khí hậu trong bao bì đục vi lỗ có thể đã giảm tốc độ oxy hóa và phân hủy acid ascorbic, giúp bảo toàn giá trị dinh dưỡng tốt hơn.

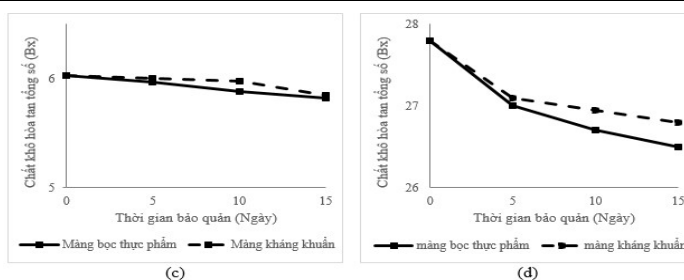
Tương tự, ở Hình 5b, hàm lượng polyphenol tổng số cũng giảm theo thời gian, nhưng mức suy giảm của mẫu màng kháng khuẩn thấp hơn. Polyphenol là nhóm hợp chất nhạy cảm với oxy và nhiệt độ; do đó, môi trường trong bao bì vi lỗ với độ ẩm và nồng độ O₂/CO₂ cân bằng hơn đã hạn chế phản ứng oxy hóa và mất hoạt tính sinh học. Kết quả này phù hợp với xu hướng đã quan sát ở chỉ tiêu cảm quan – nơi mà màng đục vi lỗ giúp duy trì màu sắc và độ tươi tự nhiên của quả tốt hơn.



(a)



(b)



(a) Biến đổi vitamin C của dâu tây trong quá trình bảo quản; (b) Biến đổi polyphenol tổng số của sầu riêng trong quá trình bảo quản; (c) Biến đổi chất khô hòa tan tổng số của dâu tây trong quá trình bảo quản; (d) Biến đổi chất khô hòa tan tổng số của sầu riêng trong quá trình bảo quản

Hình 5. Sự thay đổi chất lượng dinh dưỡng của quả trong quá trình bảo quản

Nguồn: Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả

Đối với chất khô hòa tan tổng số (Hình 5c, 5d), sự biến động ít rõ rệt hơn nhưng vẫn cho thấy xu hướng bảo toàn tốt hơn ở mẫu đục lỗ. Sau 15 ngày, độ Brix của dâu tây và sầu riêng trong màng kháng khuẩn chỉ giảm nhẹ, trong khi mẫu thường có mức giảm lớn hơn. Điều này cho thấy sự hô hấp và thoát nước trong bao bì đục lỗ diễn ra ổn định, hạn chế mất dịch bào và sự thoái hóa chất hòa tan.

Nhìn chung, các chỉ tiêu dinh dưỡng đều giảm theo thời gian bảo quản, song tốc độ suy giảm của mẫu màng kháng khuẩn đục vi lỗ chậm hơn so với màng thực phẩm thường. Sự khác biệt này củng cố nhận định rằng vi lỗ giúp duy trì cân bằng khí – ẩm, giảm quá trình oxy hóa và hô hấp của mô quả, nhờ đó giữ lại hàm lượng vitamin C, polyphenol và các chất hòa tan tốt hơn.

4. KẾT LUẬN

Chúng tôi đã thiết kế, chế tạo thành công một hệ thiết bị laser đục lỗ trên màng nhựa PE sử dụng nguồn phát laser RF-CO₂ (bước sóng 10,6 μm , công suất tối đa > 30 W). Thiết bị có khả năng đục vi lỗ đường kính < 100 μm , mật độ lỗ lớn nhất 400 lỗ/cm² trên màng nhựa PE. Màng được đục vi lỗ bằng thiết bị đã chế tạo, đáp ứng yêu cầu ứng dụng bảo quản nông sản và thực phẩm bằng công nghệ MAP. Kết quả thử nghiệm cho thấy, màng LLDPE chứa 20% chất kháng khuẩn đục vi lỗ có khả năng

kéo dài thời hạn sử dụng cũng như chất lượng của hai loại nông sản dâu tây và sầu riêng bóc vỏ so với sử dụng màng bọc thực phẩm thông thường.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài cấp Bộ Khoa học và Công nghệ năm 2024-2025: “Nghiên cứu, chế tạo hệ thiết bị đục vi lỗ trên màng PE bằng chùm tia laser ứng dụng trong bao gói thực phẩm”, do Trung tâm Công nghệ Laser - Viện Ứng dụng Công nghệ chủ trì. Các tác giả xin trân trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Buthelezi, N. M. D., & Mafeo, T. P. (2024). Effect of perforated low-density polyethylene films on postharvest quality of avocado fruit. *Heliyon*, 10(5).
- Führa, B., Russ, S., Hammers-Weber, P., Diego-Vallejo, D., Kahmann, M., Andreev, A., & Hesse, T. (2017). *High precision drilling with ultra-short laser pulses*. Paper presented at the Proceedings of the Lasers in Manufacturing Conference.
- Hussein, Z., Caleb, O. J., & Opara, U. L. (2015). Perforation-mediated modified atmosphere packaging of fresh and minimally processed produce A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 6, 7-20.

- Kumari, S. V. G., Pakshirajan, K., & Pugazhenth, G. (2022). Recent advances and future prospects of cellulose, starch, chitosan, polylactic acid and polyhydroxyalkanoates for sustainable food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 221, 163-182.
- Munoz, A., Schmidt, J., Suffet, I. M., & Tsai, C. S.-J. (2023). Characterization of emissions from carbon dioxide laser cutting acrylic plastics. *ACS Chemical Health & Safety*, 30(4), 182-192.
- Mushtaq, R. T., Wang, Y., Rehman, M., Khan, A. M., & Mia, M. (2020). State-of-the-art and trends in CO₂ laser cutting of polymeric materials a review. *Materials*, 13(17), 3839.
- Sobri, S. A., Heinemann, R., Whitehead, D., Amini, M. H. M., & Mohamed, M. (2020). Damage to carbon fiber reinforced polymer composites (CFRP) by laser machining: An overview. *Machining and Machinability of Fiber Reinforced Polymer Composites*, 281-297.
- Sonawane, A., Pathak, N., Weltzien, C., & Mahajan, P. (2022). Role of laser micro-perforations on ethylene transmission rate in packaging materials used for fresh produce. *Packaging Technology and Science*, 35(8), 621-627.
- Winotapun, C., Aontee, A., Inyai, J., Pinsuwan, B., & Daud, W. (2021). Laser perforation of polyethylene terephthalate/polyethylene laminated film for fresh produce packaging application. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100677.
- Winotapun, C., Issaraseree, Y., Sirirutbunkajal, P., & Leelaphiwat, P. (2023). CO₂ laser perforated biodegradable films for modified atmosphere packaging of baby corn. *Journal of Food Engineering*, 341.
- Winotapun, C., Tameesrisuk, M., Sirirutbunkajal, P., Sungdech, P., & Leelaphiwat, P. (2024). Enhancing gas transmission rate of PBS/PBAT composite films: a study on microperforated film solutions for mango storage. *ACS omega*, 9(3), 3469-3479.