RESEARCH ON ENCAPSULATION EFFICIENCY AND ANTIOXIDANT CAPACITY OF VITAMIN E AND C LOADED SOLID LIPID NANOPARTICLES

Nguyen Minh Thu[1,2,3*], Le Thi Hong Nhan[1,2], Ngo Nguyen Tra My[3]
[1]*Ho Chi Minh City University of Technology,* [2]*Vietnam National University Ho Chi Minh City*
[3]*Vinh Long University of Technology Education*

ARTICLE INFO

Received: 11/7/2025
Revised: 26/11/2025
Published: 26/11/2025

KEYWORDS

Solid lipid nanoparticles
Vitamin E
Vitamin C
Microencapsulation system
Antioxidant capacity

ABSTRACT

This research aims to develop a microencapsulation system containing a mixture of antioxidants including olive oil, vitamin E, and vitamin C (in a ratio of 6:3:1), using solid lipid carriers composed of different lipids (Emulgade, Naterol, Sabowax) in combination with 1% Tween 80 as an emulsifier. The microcapsules were prepared using a high-speed homogenization method, and their encapsulation efficiency and antioxidant activity were evaluated using the ABTS free radical scavenging assay. The results showed that the highest loading efficiency of active ingredients was achieved with Emulgade (96.08% ± 0.30), while the highest encapsulation efficiency was observed with Sabowax (83.13% ± 0.53). Additionally, the Emulgade-based system demonstrated the best stability after 10 days of storage, with a median particle size of 0.38261 µm, as determined by laser diffraction spectroscopy. This study provides a scientific foundation for the application of solid lipid-based microencapsulation systems in protecting sensitive vitamins from environmental factors, paving the way for potential applications in cosmetics, pharmaceuticals, and textiles.

NGHIÊN CỨU HIỆU QUẢ BAO BỌC VÀ KHẢ NĂNG KHÁNG OXY HÓA CỦA HỆ HẠT NANO BÉO RẮN BAO BỌC VITAMIN E VÀ C

Nguyễn Minh Thu[1,2,3*], Lê Thị Hồng Nhan[1,2], Ngô Nguyễn Trà My[3]
[1]*Trường Đại học Bách khoa - Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh,*
[2]*Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh,* [3]*Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long*

THÔNG TIN BÀI BÁO

Ngày nhận bài: 11/7/2025
Ngày hoàn thiện: 26/11/2025
Ngày đăng: 26/11/2025

TỪ KHÓA

Hạt chất béo rắn
Vitamin E
Vitamin C
Hệ vi nang
Hoạt tính kháng oxy hóa

TÓM TẮT

Nghiên cứu này nhằm phát triển hệ vi nang chứa hỗn hợp chất kháng oxy hóa gồm dầu olive, vitamin E và vitamin C (tỷ lệ 6:3:1) bằng hệ chất béo rắn sử dụng các loại lipid khác nhau (Emulgade, Naterol, Sabowax) kết hợp với chất nhũ hóa Tween 80 (1%). Hệ vi nang được tạo ra bằng phương pháp đồng hóa tốc độ cao, sau đó đánh giá hiệu quả bao bọc và hoạt tính kháng oxy hóa bằng phương pháp bắt gốc tự do ABTS. Kết quả cho thấy, hiệu quả sử dụng hoạt chất cao nhất đạt 96,08% ± 0,30 khi sử dụng chất béo rắn Emulgade, trong khi hiệu quả bao bọc cao nhất đạt 83,13% ± 0,53 với Sabowax. Ngoài ra, hệ vi nang chứa Emulgade thể hiện tính ổn định tốt nhất sau 10 ngày bảo quản, với kích thước trung vị hạt (median size) là 0,38261 µm, được xác định bằng phương pháp nhiễu xạ laser. Nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng hệ vi nang chất béo rắn trong việc bảo vệ các vitamin nhạy cảm với điều kiện môi trường, mở ra hướng ứng dụng tiềm năng trong các lĩnh vực mỹ phẩm, dược phẩm, may mặc.

DOI: https://doi.org/10.34238/tnu-jst.13212

* Corresponding author. *Email: nguyenminhthu1810@gmail.com*

1. Giới thiệu

Vitamin E (tocopherol) và vitamin C (acid ascorbic) là hai chất chống oxy hóa mạnh, đóng vai trò quan trọng trong việc trung hòa các gốc tự do và bảo vệ tế bào khỏi tổn thương do quá trình oxy hóa gây ra. Nhờ đặc tính sinh học vượt trội, chúng được ứng dụng rộng rãi trong các sản phẩm dược phẩm, mỹ phẩm và thực phẩm chức năng [1], [2]. Tuy nhiên, nhược điểm lớn của cả hai loại vitamin này là tính kém ổn định: dễ bị phân hủy dưới tác động của ánh sáng, nhiệt độ và oxy, dẫn đến suy giảm hiệu quả sinh học và giảm độ bền sản phẩm [3].

Công nghệ vi bao là một công nghệ phổ biến giúp bao bọc hoạt chất trong vi nang với lớp vỏ là polymer hoặc nền béo rắn nhằm tăng độ ổn định và kiểm soát được khả năng phóng thích hoạt chất [4], [5]. Trong đó, việc sử dụng nền chất béo rắn như Emulgade SE-PF, Sabowax, Naterol kết hợp với Tween 80 cho thấy nhiều ưu điểm vượt trội như tính tương thích sinh học cao, thân thiện môi trường, khả năng tự nhũ hoá và dễ dàng tạo cấu trúc nano [6].

Gần đây, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng hệ hạt nano chất béo rắn (Solid Lipid Nanoparticles – SLNs) có khả năng cải thiện độ bền của các hoạt chất nhạy cảm như vitamin E và C, đồng thời nâng cao khả năng hấp thu và bảo vệ khỏi tác nhân môi trường [7], [8]. Đặc biệt, nghiên cứu của Romano và cộng sự [8] đã cho thấy vitamin C khi được bao bằng kỹ thuật microfluidization có độ ổn định vượt trội so với dạng tự do. Trong khi đó, Subroto và cộng sự [7] cũng đã tổng hợp các kỹ thuật tạo SLNs để bao vitamin chống oxy hóa, cho kết quả là hiệu suất bao bọc cao và khả năng phóng thích kéo dài.

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu phát triển SLNs bao bọc vitamin, nhưng vẫn còn thiếu các đánh giá cụ thể về khả năng bảo vệ và hiệu quả chống oxy hóa thực sự của các vitamin khi được bao bọc trong hệ này. Đặc biệt, việc nghiên cứu tổng hợp một hệ vi nang bao bọc đồng thời vitamin E vs C có thể tạo hiệu ứng cộng hưởng và hỗ trợ ổn định lẫn nhau, nhưng hiện vẫn còn ít nghiên cứu chuyên sâu về hiệu quả này [9], [10]. Điểm mới của nghiên cứu là ứng dụng phương pháp gốc tự do ABTS – một kỹ thuật phân tích nhạy, chính xác để đánh giá trực tiếp hoạt tính kháng oxy hóa của vitamin E và C sau khi được bao bọc trong hệ nano béo rắn [11]. Nhiều nghiên cứu gần đây cũng đã báo cáo về hiệu quả trong đánh giá khả năng bắt gốc tự do của các hệ nano chứa hợp chất chống oxy hóa, bao gồm cả SLNs và liposome [12] - [14].

Bài báo này tập trung nghiên cứu tạo hệ bao bọc vitamin E, vitamin C và dầu olive bằng SLNs và chất nhũ hoá Tween 80 thông qua một cách tiếp cận nhanh chóng, hiệu quả mà chưa từng được công bố trước đây. Đồng thời, khả năng bao bọc và hiệu quả sử dụng của hệ SLNs cũng sẽ được đánh giá thông qua phương pháp bắt gốc tự do ABTS. Ngoài ra, tính ổn định và kích thước hạt cũng được phân tích bằng phương pháp nhiễu xạ laser (LDS). Kết quả nghiên cứu sẽ cung cấp thêm cơ sở khoa học cho việc ứng dụng hệ SLNs trong các sản phẩm chức năng và dược phẩm chứa vitamin oxy hoá ở dạng bền và hiệu quả cao.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Nguyên liệu, hóa chất

Emulgade SE-PF (glyceryl stearate, ceteareth-20, ceteareth-12, cetearyl, cetearyl alcohol, cetyl palmitate), Naterol 165 (Glyceryl stearate, PEG-100 stearate), Sabowax FL65K được mua từ Công ty TNHH Hóa chất mỹ phẩm Á Châu, Tween 80 (Polysorbate 80, ≥ 99%), Vitamin C (STAR-VCE), Vitamin E Acetate Care, Dầu olive, ABTS, Methanol (≥ 99,8%) được mua từ công ty TNHH Hóa chất Trần Tiến.

2.2. Quy trình điều chế hệ bao bọc hoạt chất bằng béo rắn

Hệ nhũ O/W chứa hỗn hợp dầu (Olive:Vitamin E:Vitamin C = 6:3:1) được bao bởi béo rắn (Emulgade SE-PF, Naterol, Sabowax) có sử dụng Tween 80. Quy trình điều chế hệ gồm 3 bước sau:

- Chuẩn bị pha A: Tween 80 phân tán trong nước bằng máy đồng hoá FSH 2A (High-Speed Homogenizer, xuất xứ Trung Quốc, có công suất 180W) với tốc độ 13.000 vòng/phút ở 25 °C trong 5 phút đến khi tạo thành một dung dịch đồng nhất, sẵn sàng cho giai đoạn nhũ hóa.

- Chuẩn bị pha B và nhũ hoá nóng: Chất béo rắn và hỗn hợp dầu được đun chảy ở 65 °C, sau đó thêm pha A vào, tiếp tục đồng hoá (13.000 vòng/phút, 65 °C, 10 phút) để tạo hệ nhũ chứa béo rắn nóng chảy, đồng thời đảm bảo quá trình nhũ hóa diễn ra hoàn toàn và đạt được sự đồng nhất cao nhất. Nhiệt độ 65 °C được lựa chọn cho quá trình tạo nhũ nóng nhằm đảm bảo chất béo rắn được nóng chảy hoàn toàn, tạo điều kiện thuận lợi cho việc phân tán pha dầu vào pha nước và hình thành một hệ nhũ bền vững. Đồng thời, đây là nhiệt độ vừa phải để không gây ảnh hưởng đến tính toàn vẹn của các hoạt chất nhạy cảm với nhiệt như Vitamin C và Vitamin E, giúp bảo toàn hoạt tính sinh học của chúng trong suốt quá trình điều chế.

- Làm lạnh và tạo vi cấu trúc: Hệ nhũ được làm lạnh (0-5 °C) dưới sự đồng hoá (13.000 vòng/phút, 5 phút) để hình thành lớp màng béo rắn bao hỗn hợp dầu. Quá trình này giúp đông đặc lớp màng chất béo rắn bao bọc quanh các giọt dầu, giúp bao bọc hoạt chất bên trong và tạo ra cấu trúc ổn định cho hệ nhũ. Cuối cùng, hỗn hợp được siêu âm khử bọt và bảo quản đông nhằm bảo toàn tính toàn vẹn của cấu trúc và hoạt tính của các thành phần bên trong và chuẩn bị cho các đánh giá tiếp theo.

2.3. Phương pháp đánh giá hệ bao bọc hoạt chất bằng béo rắn

Hiệu quả bao bọc và hiệu quả sử dụng là hai chỉ số quan trọng phản ánh mức độ thành công của phương pháp điều chế hệ bao. Các thông số này được đánh giá thông qua phản ứng bắt gốc tự do với ABTS và phân tích định lượng hàm lượng hoạt chất trong, trên bề mặt và ngoài hạt vi nang sau khi siêu âm khử bọt.

Hiệu quả ức chế gốc tự do Q(%) của hệ bao bọc sau khi điều chế được tính theo công thức (1):

$$Q(\%) = \left(1 - \frac{A - A_t}{A_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

Trong đó: A: độ hấp thu của dung dịch mẫu khảo sát; A_t: độ hấp thu của dung dịch mẫu trắng; A_0: độ hấp thu của dung dịch mẫu đối chứng âm.

Mức độ hao hụt nguyên liệu (hiệu quả sử dụng) (E_{SD}) được tính bằng công thức (2):

$$E_{SD} = \frac{Q_1}{Q_0} \times 100\% \quad (2)$$

Trong đó: Q_0: Hoạt tính tổng của hoạt chất ban đầu đưa vào quá trình điều chế; Q_1: Hoạt tính tổng của hệ bao bọc chứa các hạt vi nang.

Hiệu quả bao bọc (EE) được tính bằng công thức (3):

$$EE = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% \quad (3)$$

Trong đó: Q_1: Hoạt tính tổng của hệ bao bọc chứa các hạt vi nang; Q_2: Hoạt tính tổng của các thành phần tự do bên ngoài hệ bao bọc.

Để đảm bảo tính chính xác và độ tin cậy của dữ liệu, các phép đo được thực hiện lặp lại ba lần. Ngoài ra, phân bố kích thước hạt hệ phạt tán được thực hiện bằng thiết bị Horiba LA-950V2 (Nhật Bản).

3. Kết quả và bàn luận

3.1. Ngoại quan

Khi sử dụng các loại sáp nhũ khác nhau, hỗn hợp sau khi đồng hoá đều tạo thành hệ phân tán có ngoại quan tương tự nhau, với đặc điểm là đục, ánh mờ và đồng nhất, cho thấy khả năng hình thành các vi nang có kích thước nhỏ. Mặc dù bản thân các loại sáp nhũ có màu vàng nhạt khác nhau, nhưng sự khác biệt về màu sắc giữa các hệ phân tán sau khi điều chế là không rõ rệt, cho thấy các yếu tố này ít ảnh hưởng đến màu tổng thể của hệ. Kết quả ngoại quan được thể hiện rõ ở Hình 1.

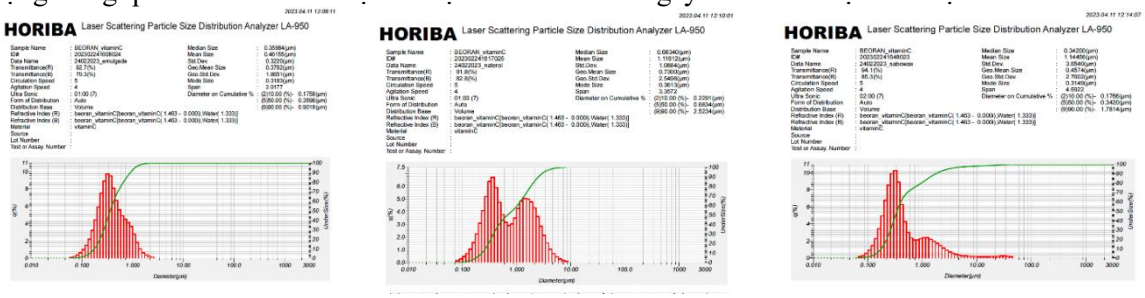
(a) (b) (c)

Hình 1. *Ngoại quan của hệ bao bọc vitamin bằng các chất béo rắn khác nhau: (a) Naterol, (b) Sabowax và (c) Emulgade*

Các hệ bao bọc sau đồng hoá đều xuất hiện bọt với chiều cao khác nhau, nhưng do tốc độ xẹp bọt không đồng nhất nên không được dùng làm tiêu chí so sánh. Riêng mẫu chứa Sabowax cho thấy lớp bọt xẹp hoàn toàn sau 16 giờ ủ lạnh mà không cần siêu âm, đồng thời có độ đặc cao hơn so với hai mẫu còn lại.

3.2. Kích thước

Sự phân bố kích thước hệ bao bọc của ba chất béo rắn Naterol, Sabowax, Emulgade được sử dụng trong quá trình điều chế hệ bao bọc vitamin sau 1 ngày khảo sát được thể hiện ở Hình 2.

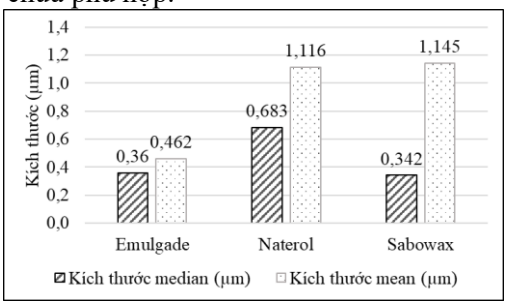


(a) (b) (c)

Hình 2. *Phân bố kích thước hạt vi nang hệ béo rắn: (a) Emulgade, (b) Naterol, (c) Sabowax sau 1 ngày khảo sát*

Kích thước và phân bố kích thước của các hệ thay đổi rõ rệt khi thay đổi nguyên liệu sáp. Phổ phân bố kích thước hệ đều có vùng tập trung thành một cụm, tuy nhiên phạm vi trải dài tuỳ theo nguyên liệu khác nhau. Trong đó, hệ bao bọc rắn Emulgade (Hình 2a) có phân bố hẹp, tập trung và có hình dạng chuông. Trong khi đó hệ bao bọc Naterol tuy cùng vùng phân bố nhưng có hai đỉnh chuông (Hình 2b) và hệ sử dụng sáp Sabowax (Hình 2c) thì có vùng phân bố trải dài chân peak. Sự trải dài, đa đỉnh có thể do điều kiện đồng hoá chưa phù hợp.

Kích thước mean và median của các hệ vi nang được thể hiện ở Hình 3. Hệ được tạo thành từ chất béo rắn Sabowax và Emulgade có kích thước trung bình nhỏ, chỉ khoảng 0,342 – 0,360 µm, nhỏ hơn nhiều so với hệ sử dụng Naterol, lên đến 0,683 µm. Bên cạnh đó, sự khác biệt giữa giá trị median và mean thường được sử dụng để đánh giá độ tập trung của phân bố kích thước. Ở hệ béo rắn Emulgade, sự tập trung của phân bố kích thước của hệ thể hiện rõ qua giá trị median và mean tương đương nhau, là 0,360 và 0,462 µm.

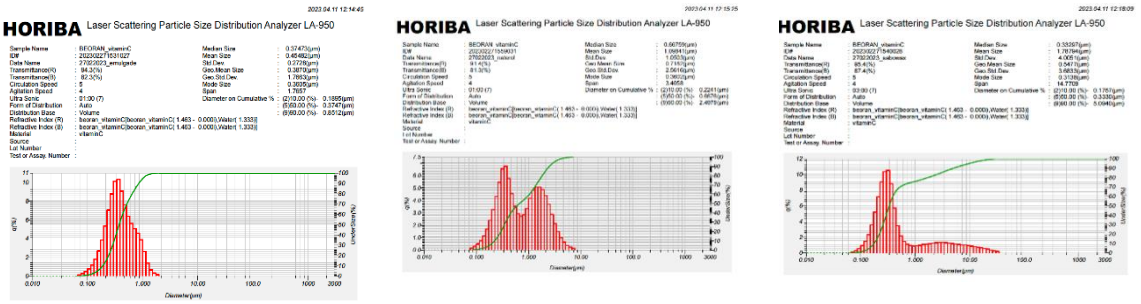


Hình 3. *Kích thước mean và median của các hệ vi nang sử dụng Emulgade, Naterol, Sabowax*

Còn ở hệ dùng Naterol và Sabowax các giá trị kích thước mean đều lớn hơn 1 µm, khác biệt rõ so với giá trị median, thể hiện độ trải rộng và không tập trung của vùng phân bố kích thước, phù hợp với các kết quả trên Hình 3.

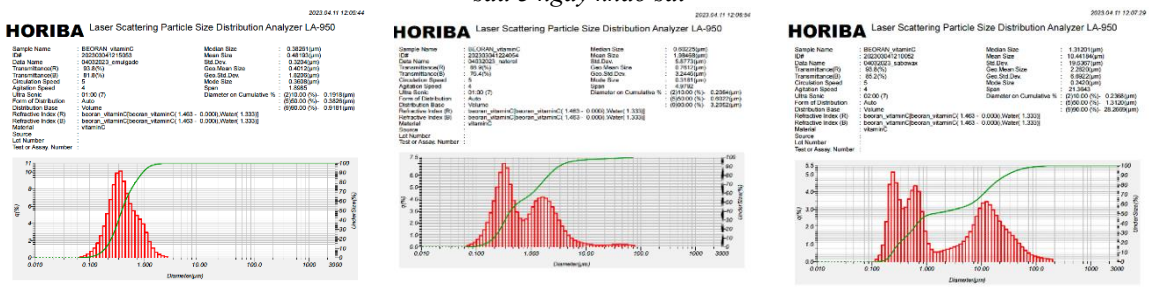
Các hệ được đánh giá trong 10 ngày tồn trữ trong điều kiện 10 °C. Nhìn chung, ngoại quan không thay đổi đáng kể và nhưng phân bố kích thước có khác biệt, trong đó hệ sử dụng Emulgade có độ ổn định cao nhất. Kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Muller và cộng sự [15], trong đó chỉ ra rằng các hệ sử dụng chất béo rắn có nhiệt độ nóng chảy cao và cấu trúc tinh thể ổn định (như Emulgade) thường tạo ra hệ vi nang với kích thước hạt nhỏ và phân bố hẹp. Ngoài ra, theo Jenning và cộng sự [16], tính ổn định của vi nang cũng phụ thuộc nhiều vào độ đồng nhất trong phân bố kích thước, yếu tố mà Emulgade thể hiện tốt hơn so với Naterol.

Sự phân bố kích thước hệ bao bọc của ba chất béo rắn Naterol, Sabowax, Emulgade được sử dụng trong quá trình điều chế hệ bao bọc vitamin sau 3 và 10 ngày khảo sát được thể hiện ở Hình 4 và Hình 5.



(a) *(b)* *(c)*

Hình 4. *Phân bố kích thước hạt vi nang hệ béo rắn (a) Emulgade, (b) Naterol, (c) Sabowax sau 3 ngày khảo sát*

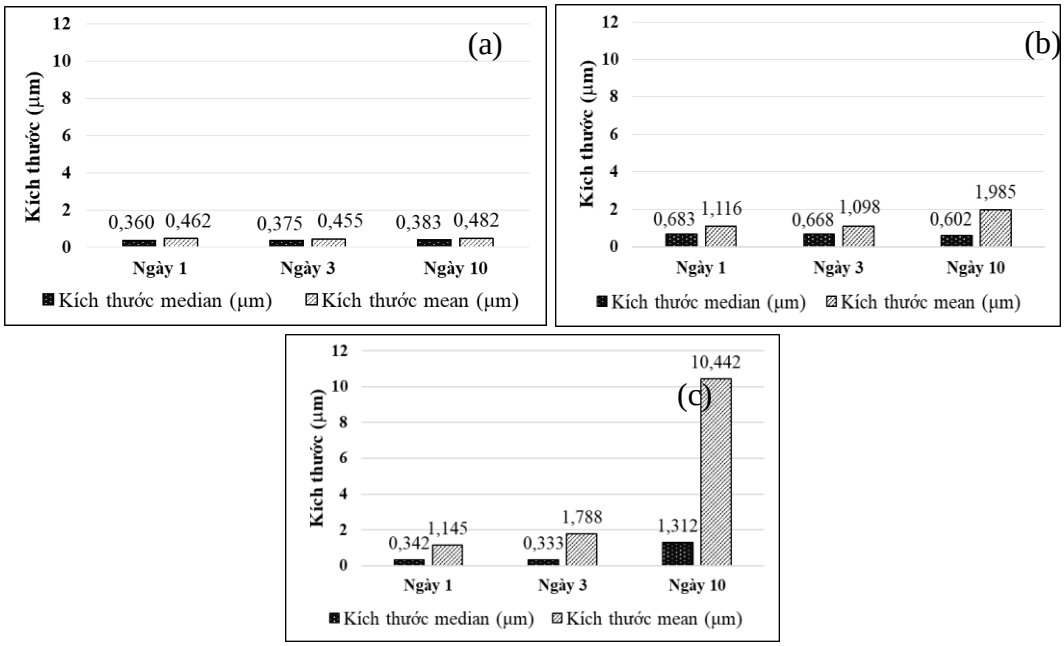


(a) (b) (c)

Hình 5. *Phân bố kích thước hạt vi nang hệ béo rắn (a) Emulgade, (b) Naterol, (c) Sabowax sau 10 ngày khảo sát*

Hình 6a cho thấy kích thước hạt trung bình và phân bố kích thước thay đổi rất nhỏ, thể hiện hệ sử dụng Emulgade có độ bền kích thước tốt, duy trì trong khoảng 0,36 – 0,383 µm đối với kích thước median là 0,462 – 0,482 µm đối với kích thước trung bình mean. Hệ sử dụng Naterol có kích thước trung bình median duy trì trong khoảng 0,683 µm nhưng giảm xuống 0,602 µm vào ngày cuối cùng khảo sát, giá trị mean tăng từ 1,116 lên đến 1,985 µm, thể hiện vùng phân bố xu hướng trải rộng, có thể do hiện tượng kết chùm của một số hạt gây nên sự mất ổn định của hệ trong thời gian tồn trữ Hình 6b. Hệ vi nang béo rắn Sabowax cho các kết quả không ổn định nhất so sánh với hai hệ béo rắn còn lại. Kích thước trung bình median tăng mạnh từ 0,342 lên đến 1,312 µm sau 10 ngày tồn trữ. Bên cạnh đó, giá trị mean cũng tăng khác biệt so với giá trị median, thể hiện vùng phân bố càng trải rộng hơn Hình 6c. Trong trường hợp này, sự kết tụ của các hạt làm cho hệ to hơn, thể hiện sự không ổn định của hệ phân tán.

Từ kết quả trên có thể kết luận rằng trong ba loại chất béo rắn khảo sát, Emulgade cho thấy khả năng tạo hệ huyền phù ổn định với kích thước hạt nano đồng đều và bền vững. Ngược lại, Naterol và Sabowax tuy cũng tạo được hệ có kích thước nano nhưng có hiện tượng kết tụ hạt và giảm ổn định phân tán theo thời gian. Trong đó, hệ sử dụng Sabowax thể hiện độ ổn định kém nhất. Do đó, cần thực hiện thêm các nghiên cứu nhằm cải thiện độ bền hệ đối với Naterol và Sabowax.



Hình 6. *Kích thước các hệ bao (a) Emulgade, (b) Naterol, (c) Sabowax trong 10 ngày khảo sát*

3.3. Hiệu quả bao bọc

Mẫu hoà tan hỗn hợp dầu (tỷ lệ khối lượng giữa dầu olive, vitamin E và vitamin C lần lượt là 6:3:1) với nồng độ tương tự như trong mẫu béo rắn bao bọc vào dung môi methanol. Mẫu thu được là mẫu đo hàm lượng hoạt tính tổng của hệ bao bọc (Q_0). Mẫu huyền phù được trích ly nóng ở nhiệt độ từ 60-70 °C bằng metanol để hoà tan hoàn toàn hỗn hợp hoạt chất có trong hệ. Dung dịch thu được phản ứng với ABTS để đánh giá hoạt tính tổng của toàn bộ lượng chất có trong hệ (Q_1). Mẫu béo rắn bao bọc được lọc bởi màng lọc 0,22 micromet, phần dịch sau lọc cho bay hơi nước, thu được hỗn hợp. Hoà tan hỗn hợp với methanol và cho phản ứng với ABTS để đánh giá hoạt tính của lượng hoạt chất tự do bên ngoài hạt (Q_2).

Dữ liệu từ ba lần lặp lại thí nghiệm độc lập, các giá trị Q_0, Q_1, Q_2 được xác định và trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. *Kết quả đo độ hấp thu của các mẫu béo rắn*

Mẫu	Q_0 (%)	Q_1 (%)	Q_2 (%)
Naterol	$94,33 \pm 0,38^b$	$86,42 \pm 0,63^c$	$20,57 \pm 0,38^a$
Emulgade	$95,67 \pm 0,38^a$	$91,92 \pm 0,52^a$	$19,57 \pm 0,60^a$
Sabowax	$96,08 \pm 0,14^a$	$88,92 \pm 0,38^b$	$15,00 \pm 0,66^b$

Ghi chú: Các ký tự $^{a-b-c}$ trong cùng một cột thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa với $p < 0,05$.

Từ kết quả của Bảng 1 cho thấy quá trình bao bọc tạo vi nang có làm suy giảm hoạt tính, thể hiện qua các giá trị Q_1 đều nhỏ hơn Q_0, tuy nhiên sự suy giảm không nhiều. Mức độ khác nhau giữa các mẫu ứng với giá trị Q_0 cho thấy việc sử dụng các chất béo rắn khác nhau có ảnh hưởng lớn đến hoạt tính của hệ vi nang và sự khác biệt có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$). Hệ vi nang sử dụng chất béo rắn Emulgade cho thấy sự suy giảm hoạt tính ít hơn từ 95,67% ± 0,38 xuống 91,92% ± 0,52. Nhìn chung, sự suy giảm này không đáng kể và ít hơn so với sự giảm hoạt tính của hệ vi nang từ Naterol và Sabowax, chứng tỏ khả năng bảo vệ hoạt chất tốt hơn các mẫu còn lại. Điều này phù hợp với nghiên cứu của Souto và Muller [17], trong đó chỉ ra rằng hệ vi nang sử dụng lipid có cấu trúc bán tinh thể ổn định sẽ giúp giảm thiểu hiện tượng giải phóng sớm hoạt chất, đồng thời bảo vệ được hoạt tính sinh học tốt hơn trong môi trường lưu trữ.

Với thí nghiệm đo hoạt tính tổng có trong hệ bao bọc (Q_1), các mẫu sử dụng béo rắn khác nhau có phần trăm ức chế gốc tự do khá cao, đều trên 85%, điều này chứng tỏ khả năng sử dụng chúng để điều chế hệ bao bọc tốt, ít ảnh hưởng hoạt chất trong quá trình điều chế. Phần trăm hoạt tính Q_1 của hệ dùng Emulgade là cao nhất 91,92% ± 0,52 ($p < 0,05$) cho thấy tiềm năng của việc sử dụng nguyên liệu này cao. Khi dùng Naterol, hệ bao bọc có phần trăm Q_1 thấp nhất, cho thấy tính bảo vệ hoạt chất chưa cao so với hai hệ còn lại.

Bên cạnh đó, khi lượng hoạt chất tự do bên ngoài hạt vi nang (được thể hiện qua giá trị Q_2) càng thấp, chứng tỏ hoạt chất được bảo vệ và lưu giữ bên trong hạt càng hiệu quả. Hệ sử dụng Sabowax cho giá trị Q_2 nhỏ nhất 15,00% ± 0,66, so với Naterol (20,57%) và Emulgade (19,57 ± 0,60) ($p < 0,05$), thể hiện vai trò bao bọc hệ vi nang tốt nhất. Mặc dù Q_2 thấp nghĩa là Sabowax giữ hoạt chất bên trong tốt, nhưng các dữ liệu khác cho thấy hệ Sabowax không ổn định. Kích thước hạt (Hình 6c) tăng rất mạnh từ 1,145 µm đến 10,442 µm cho thấy hệ có hiện tượng kết tụ, vón cục, đồng thời kích thước median tăng mạnh chứng tỏ phân bố kích thước lệch hẳn, cho thấy hệ không đồng nhất. Do đó, hoạt chất không thoát ra ngoài (Q_2 thấp) trong trường hợp của Sabowax không phải do hệ ổn định tốt mà là do hệ bị đóng vón, làm giảm khả năng giải phóng hoạt chất. Do đó, có thể kết luận rằng, chất béo rắn Emulgade thích hợp để duy trì hoạt tính trong quá trình bao bọc, trong khi Sabowax có ưu thế trong việc giảm hàm lượng hoạt chất tồn tại bên ngoài vi nang.

Từ kết quả thực nghiệm trên, có thể xác định được hiệu quả bao bọc (E_{SD}) và hiệu quả sử dụng (EE%) tương ứng với từng mẫu theo công thức (2), (3) thu được kết quả được trình bày ở Bảng 2.

Bảng 2. *Ảnh hưởng của loại béo rắn đến hiệu quả sử dụng và hiệu quả bao bọc*

	E_{SD} (%)	EE (%)
Naterol	$91,61 \pm 0,83^b$	$76,20 \pm 0,55^c$
Emulgade	$96,08 \pm 0,30^a$	$78,71 \pm 0,79^b$
Sabowax	$92,54 \pm 0,52^b$	$83,13 \pm 0,53^a$

Ghi chú: Các ký tự $^{a-b-c}$ trong cùng một cột thể hiện sự khác biệt có ý nghĩa với $p < 0,05$.

Từ những nghiên cứu trên cho thấy hiệu quả sử dụng và hiệu quả bao bọc của hệ khá cao, thay đổi theo từng loại béo rắn khác nhau và sự khác biệt này có ý nghĩa thống kê ($p < 0,05$). Hiệu quả sử dụng của ba mẫu khá cao, đều trên 90% chứng tỏ hoạt tính có bị suy giảm trong quá trình đồng hóa. Hiệu quả sử dụng tăng từ hệ dùng Naterol đến Sabowax rồi đến Emulgade với giá trị tương ứng là 91,61% ± 0,83, 96,08% ± 0,30 và 92,54% ± 0,52 ($p < 0,05$). Hiệu quả bao bọc thể hiện khả năng giữ các hoạt chất trên hạt và khả năng này của cả ba hệ đều cao (trên 75%) ($p < 0,05$), trong đó hiệu quả bao bọc của Sabowax là lớn nhất (83,13% ± 0,53). Hiệu quả bao bọc của Naterol và Emulgade gần như tương đồng nhau, với giá trị 76,20% ± 0,55 và 78,71% ± 0,79. Kết quả này tương đồng với nghiên cứu của Mai Huỳnh Cang và cộng sự [18] đã chỉ ra rằng việc sử dụng chất béo rắn Emulgade SE-PF trong quá trình tạo SLNs giúp đạt hiệu quả sử dụng cao trên 90%, hiệu quả bao bọc có tỷ lệ cao hơn 75%. Điều này chứng tỏ Emulgade SE-PF không chỉ giúp duy trì hoạt tính của hợp chất mà còn hỗ trợ tốt trong việc giữ hoạt chất trên bề mặt hạt.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã đánh giá thành công khả năng bao bọc và bảo vệ hoạt chất chống oxy hóa vitamin E và C trong hệ nano béo rắn sử dụng ba loại sáp nhũ khác nhau (Naterol, Sabowax, Emulgade). Kết quả cho thấy hệ sử dụng Emulgade cho kích thước hạt nhỏ nhất (0,067-2,599 µm), độ ổn định cao sau 10 ngày tồn trữ và hiệu suất kháng oxy hóa vượt trội (96,08% ± 0,30), đồng thời đạt hiệu quả bao bọc đáng kể (78,71% ± 0,79). Ưu tiên ứng dụng hệ nhũ sử dụng Emulgade để phát triển công thức trong các sản phẩm vải mỹ phẩm (cosmetotextiles) – một hướng nghiên cứu mới có tiềm năng kết hợp giữa công nghệ dệt và mỹ phẩm nhằm cung cấp dưỡng chất qua da trong quá trình mặc. Đồng thời tiến

hành thêm các nghiên cứu về khả năng gắn kết hệ nano béo rắn với vật liệu dệt, tính ổn định sau khi giặt và hiệu quả phóng thích hoạt chất trên da.

Lời cảm ơn

Chúng tôi xin cảm ơn sự hỗ trợ của Trường Đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

[1] M. G. Traber and J. Atkinson, "Vitamin E, antioxidant and nothing more," *Free Radical Biology and Medicine*, vol. 43, no. 1, pp. 4-15, 2007.

[2] M. Podda, C. Weber, M. G. Traber, and L. Packer, "Simultaneous determination of tissue tocopherols, tocotrienols ubiquinols, and ubiquinones," *Journal of Lipid Research*, vol. 37, no. 4, pp. 893-901, 1996.

[3] E. Niki, "Action of ascorbic acid as a scavenger of active and stable oxygen radicals," *The American journal of clinical nutrition*, vol. 54, no. 6, pp. 1119S-1124S, 1991.

[4] S. Gouin, "Microencapsulation: industrial appraisal of existing technologies and trends," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 15, no. 7, pp. 330-347, 2004.

[5] N. V. N. Jyothi, P. M. Prasanna, S. N. Sakarkar, K. S. Prabha, P. S. Ramaiah, and G. Y. Srawan, "Microencapsulation techniques, factors influencing encapsulation efficiency," *Journal of microencapsulation*, vol. 27, no. 3, pp. 187-197, 2010.

[6] V. Jenning, A. Gysler, M. Schäfer-Korting, and S. H. Gohla, "Vitamin A-loaded solid lipid nanoparticles for topical use: occlusive properties and drug targeting to the upper skin," *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, vol. 49, no. 3, pp. 211-218, 2000.

[7] E. Subroto, R. Andoyo, and R. Indiarto, "Solid lipid nanoparticles: review of the current research on encapsulation and delivery systems for active and antioxidant compounds," *Antioxidants*, vol. 12, no. 3, 2023, Art. no. 633.

[8] E. Romano, R. Palladino, M. Cannavale, E. P. Lamparelli, and B. Maglione, "Enhanced stability of oral vitamin C delivery: a novel large-scale method for liposomes production and encapsulation through dynamic high-pressure microfluidization," *Nanomaterials*, vol. 14, no. 6, 2024, Art. no. 516.

[9] Z. Zazuli, R. Hartati, C. R. Rowa, S. Asyarie, and S. Satrialdi, "The potential application of nanocarriers in delivering topical antioxidants," *Pharmaceuticals*, vol. 18, no. 1, 2025, Art. no. 56.

[10] P. Detchewa, C. Aphibanthammakit, A. Moongngarm, S. Avallone, P. Prasajak, and C. Boonpan, "Microencapsulation techniques and co-encapsulation of vitamin E and isoflavones in freeze-dried W/O/W systems," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, 2025, Art. no. 10627.

[11] R. Re, N. Pellegrini, A. Proteggente, A. Pannala, M. Yang, and C. Rice-Evans, "Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay," *Free Radical Biology and Medicine*, vol. 26, no. 9-10, pp. 1231-1237, 1999.

[12] R. Favas, H. Almeida, A. F. Peixoto, D. Ferreira, and A. C. Silva, "Advances in encapsulating marine bioactive compounds using nanostructured lipid carriers (NLCs) and solid lipid nanoparticles (SLNs) for health applications," *Pharmaceutics*, vol. 16, no. 12, 2024, Art. no. 1517.

[13] S. S. Hallan, F. Ferrara, R. Cortesi, and M. Sguizzato, "Potential of the nano-encapsulation of antioxidant molecules in wound healing applications: an innovative strategy to enhance the bio-profile," *Molecules*, vol. 30, no. 3, 2025, Art. no. 641.

[14] C. Martinelli, C. Pucci, M. Battaglini, A. Marino, and G. Ciofani, "Antioxidants and nanotechnology: Promises and limits of potentially disruptive approaches in the treatment of central nervous system diseases," *Advanced Healthcare Materials*, vol. 9, no. 3, 2020, Art. no. 1901589.

[15] R. H. Muller, M. Radtke, and S. A. Wissing, "Solid lipid nanoparticles (SLN) and nanostructured lipid carriers (NLC) in cosmetic and dermatological preparations," *Advanced Drug Delivery Reviews*, vol. 54, pp. pp. S131-S155, 2002.

[16] V. Jenning, A. F. Thünemann, and S. H. Gohla, "Characterisation of a novel solid lipid nanoparticle carrier system based on binary mixtures of liquid and solid lipids," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 199, no. 2, pp. 167-177, 2000.

[17] E. B. Souto, and R. H. Muller, "Lipid nanoparticles: effect on bioavailability and pharmacokinetic changes," *Handbook of Functional Nanomaterials*, vol. 2, pp. 115-141, 2008.

[18] H. C. Mai, L. M. H. Nguyen, and T. H. N. Le, "Effect of homogenization conditions of formation of Gac (*Momordica cochinchinensis Spreng*) oil-loaded solid lipid nanoparticles (SLNs-Gac)," *The Journal of Agriculture and Development*, vol. 17, no. 2, pp. 80-86, 2018.