

GIỚI THIỆU VỀ BAO BÌ SINH HỌC NANOCOMPOSITE VÀ HIỆU QUẢ BẢO QUẢN TRÊN MỘT SỐ LOẠI TRÁI CÂY TƯƠI

Quang Thị Ngọc Anh⁽¹⁾, Nguyễn Thị Bích Thảo⁽¹⁾

(1) Trường Đại học Thủ Dầu Một

Ngày nhận bài 19/4/2024; Chấp nhận đăng 10/8/2024

Liên hệ email: thaontb@tdmu.edu.vn

Tóm tắt

Bao bì bảo quản đóng một vai trò quan trọng trong ngành công nghiệp thực phẩm với mục đích đảm bảo cho thực phẩm vẫn giữ được chất lượng khi đến tay người tiêu dùng. Việc sử dụng các bao bì bảo quản từ nhựa tổng hợp như hiện nay đang gây ra nhiều tranh cãi vì tạo ra một lượng đáng kể rác thải nhựa, mang lại gánh nặng cho môi trường. Xu hướng sử dụng các bao bì bảo quản từ nguồn gốc sinh học được phát triển mạnh mẽ trong những năm gần đây nhằm tạo ra một sự thay thế bền vững và thân thiện với môi trường hơn. Tuy nhiên, việc sử dụng các bao bì sinh học đang đối mặt với một số thách thức như độ bền cơ học thấp, đặc tính rào cản kém và độ nhạy cảm cao với điều kiện bảo quản. Các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước về việc kết hợp công nghệ nano với bao bì sinh học trong lĩnh vực thực phẩm, đặc biệt trong bao bì bảo quản, cho thấy nhiều lợi ích vượt trội giúp đảm bảo được độ tươi và chất lượng thực phẩm, kéo dài thời hạn sử dụng, giảm đáng kể tỉ lệ thực phẩm hư hỏng trong quá trình bảo quản và vận chuyển trên một số loại trái cây tươi. Đây là một trong những cơ sở dữ liệu quan trọng cho các công trình nghiên cứu tiếp theo về đa dạng hóa bao bì sinh học tại Việt Nam.

Từ khóa: bao bì sinh học, nano kim loại, nano oxit kim loại, polymer sinh học, polysaccarit

Abstract

INTRODUCTION OF NANOCOMPOSITES AS BIOLOGICAL PACKAGING AND PRESERVATION EFFECT ON SOME FRESH FRUITS

Food packaging plays an important role in the food industry with the main purpose of ensuring food quality until consumption. Currently, using synthetic polymers as food packaging is leading to a lot of arguments because it generates a significant amount of plastic waste, causing a burden to the environment. Recently, the trend of using biodegradable packaging based on natural resources has grown strongly to create a more sustainable and eco-friendly alternative. However, using natural biopolymers as packaging materials is facing some challenges such as low mechanical strength, poor barrier properties, and high sensitivity to storage conditions. Domestic and foreign research projects on combining nanotechnology with biological packaging in the food field, especially preservation packaging, obtains many outstanding benefits in ensuring the freshness and quality of foods, extending shelf-life, and reducing spoiled food during storage and transportation of some types of fresh fruit. This is one of the important databases for further research on the diversification of biological packaging in Vietnam.

1. Đặt vấn đề

Theo báo cáo, trên toàn thế giới ghi nhận hơn 20 triệu ca tử vong nguyên nhân do các bệnh do vi khuẩn lây truyền qua thực phẩm mỗi năm (Samah và nnk., 2023). Vì vậy, việc đảm bảo cho người tiêu dùng không bị bất kỳ tổn hại nào tới sức khỏe trong quá trình bảo quản và tiêu thụ thực phẩm trở thành mục tiêu chính trong vấn đề an toàn thực phẩm. Ngoài ra, việc bảo quản đúng cách còn giúp thực phẩm hạn chế tổn thất do hư hỏng trong quá trình bảo quản và vận chuyển trước khi đến tay người tiêu dùng, đồng thời giảm thiểu gánh nặng cho môi trường.

Ngày nay, cùng với sự phát triển của xã hội và nhu cầu thiết yếu của cuộc sống, vấn đề an toàn thực phẩm luôn được lưu tâm, trong đó bao bì thực phẩm đóng một vai trò quan trọng trong việc bảo quản chất lượng và kéo dài thời hạn sử dụng của thực phẩm bằng cách bảo vệ chúng khỏi các tác động từ môi trường, hoá học và vi sinh vật trong quá trình bảo quản và vận chuyển. Hơn 25% sản lượng thực phẩm bị thất thoát do hư hỏng gây ra bởi vi sinh vật dẫn đến một lượng lãng phí đáng kể thực phẩm mỗi năm (Fatemeh và nnk., 2022). Do đó, vai trò của bao bì bảo quản là vô cùng cần thiết để ngăn ngừa và hạn chế sự hư hỏng thực phẩm xảy ra từ thời điểm đóng gói đến lúc tiêu thụ. Tuy nhiên, ngoài yêu cầu chất lượng thực phẩm bảo quản được đảm bảo, các loại bao bì thực phẩm đòi hỏi không gây độc hại cho cơ thể con người và huỷ hoại môi trường. Các loại bao bì thực phẩm truyền thống chủ yếu được sản xuất từ polyethylene (PE), polypropylene (PP), polystyrene (PS) hoặc polyethylene terephthalate (PET), chiếm hơn 90% tổng sản lượng nhựa dùng trong đóng gói và tạo ra 50-70% lượng rác thải nhựa ra môi trường (Roland và nnk., 2017; Hafiz và nnk., 2022). Đây là các polymer tổng hợp có tính chất cơ học và độ bền cao, mang lại hiệu quả bảo quản cao (Fatima và nnk., 2020; Maria và nnk., 2021). Tuy nhiên, các polymer này không có khả năng phân huỷ sinh học, thường được xử lý bằng cách chôn lấp hoặc đốt. Theo ước tính, ngành thực phẩm đóng góp khoảng 22% tổng lượng khí phát thải nhà kính, trong đó rác thải từ bao bì góp phần không nhỏ gây nên hiệu ứng nhà kính và ô nhiễm môi trường (Liuying và nnk., 2018). Ngoài ra, việc tiếp xúc trực tiếp với thực phẩm lâu dài theo thời gian có thể gây ra các tác động độc hại tiềm ẩn đến sức khỏe con người (Maria và nnk., 2021). Do đó, xu hướng sử dụng màng bao bì sinh học từ nguồn nguyên liệu thiên nhiên thay thế cho màng bọc truyền thống để an toàn sức khỏe và thân thiện với môi trường hơn ngày càng tăng và thu hút nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu cũng như các doanh nghiệp trong và ngoài nước. Tuy nhiên, nhược điểm chung của chúng là tính chất cơ học, độ bền nhiệt, đặc tính rào cản kém và chi phí sản xuất cao hơn so với các bao bì polymer truyền thống (Samah và nnk., 2023; Maria và nnk., 2021). Nhiều nghiên cứu chứng minh rằng việc kết hợp vật liệu nano để tạo ra bao bì sinh học nanocomposite có thể nâng cao hiệu quả bảo quản của bao bì thực phẩm, tăng thời hạn sử dụng mà không làm thay đổi mùi vị, giá trị dinh dưỡng cũng như đặc tính vật lý của thực phẩm (Vivek và nnk., 2018).

Xét riêng về mặt hàng trái cây, Việt Nam nằm trong đới khí hậu gió mùa nên chủng loại và sản lượng trái cây rất phong phú và đa dạng. Tuy nhiên, việc đảm bảo chất lượng trái trong quá trình bảo quản và vận chuyển là một trong những thách thức lớn do hiệu quả bảo quản sau thu hoạch chưa cao. Trái rất dễ bị hư hỏng do sự va đập vật lý trong quá trình thu hoạch, vận chuyển cũng như chịu các tác động từ bên ngoài như vi sinh vật, nhiệt độ, độ ẩm... trong quá trình bảo quản làm giảm chất lượng trái khi đến tay người tiêu dùng. Hiện nay, các chế phẩm màng bao trên thị trường phần lớn có nguồn gốc từ nước ngoài và trong thành phần của chúng đều chứa sáp, với mục đích chủ yếu kiểm soát được sự mất nước, biến đổi màu sắc và tăng độ sáng bóng cho trái cây (Hoàng Quang Bình và nnk., 2022). Vì vậy, trong bài viết này nhóm tác giả sẽ giới thiệu về đặc điểm của các loại bao bì sinh học có nguồn gốc từ thiên nhiên, tính năng và hiệu quả bảo quản của các loại bao bì này trên một số loại trái cây tươi khi kết hợp với vật liệu nano đã được nghiên cứu, góp phần cho cơ sở dữ liệu của các công trình nghiên cứu tiếp theo về đa dạng hóa và phát triển bao bì sinh học tại Việt Nam.

2. Phương pháp nghiên cứu

Bài viết được thực hiện dựa trên việc phân tích tổng hợp từ các nghiên cứu tổng quan, nghiên cứu thực nghiệm về polymer sinh học, vật liệu nano và sự kết hợp giữa hai loại vật liệu này trong ứng dụng làm bao bì bảo quản thực phẩm. Ngoài ra, bằng phương pháp quy nạp từ các công trình nghiên cứu có liên quan, đặc tính và hiệu quả bảo quản của bao bì sinh học khi kết hợp với vật liệu nano khảo sát trên một số loại trái cây tươi đã được đề cập trong bài viết này.

3. Kết quả nghiên cứu

3.1. Tổng quan về polymer sinh học ứng dụng trong màng bọc bảo quản thực phẩm

Tương tự như bao bì bảo quản từ polymer tổng hợp, bao bì bảo quản từ polymer sinh học gọi tắt là bao bì sinh học là lớp vật liệu bao phủ bên ngoài thực phẩm với mục đích bảo vệ thực phẩm

tránh bị hư hỏng trong quá trình bảo quản và vẫn giữ được chất lượng khi đến tay người tiêu dùng. Xu hướng ứng dụng bao bì bảo quản thực phẩm đi từ các polymer sinh học tự nhiên như polysaccharite, protein, lipid đang phát triển mạnh mẽ trong những năm gần đây. Đặc điểm chung của các polymer sinh học này là khả năng phân huỷ sinh học và tính tương thích sinh học cao, không gây độc hại và thân thiện với môi trường.

Polysaccharite

Polysaccharite là nguồn nguyên liệu dồi dào trong tự nhiên, có tính rào cản oxy, dầu và mùi tốt cùng với đặc tính chịu lực tuyệt vời nhờ vào cấu trúc liên kết hydro chặt chẽ của chúng. Các polysaccharites là nguồn nguyên liệu thân thiện với môi trường, không độc hại, có khả năng phân huỷ sinh học và tương thích sinh học tốt. Tuy nhiên, phần lớn các polysaccharite có tính ưa nước nên ứng dụng của chúng sẽ bị hạn chế trong điều kiện có độ ẩm cao (Pooja và nnk., 2019). Dựa trên nguồn gốc, polysaccharite được phân thành bốn loại chính là polysaccharite từ thực vật, động vật, tảo biển và vi sinh vật (Lokesh và nnk., 2021).

Pectin là một polysaccharite có nguồn gốc từ thực vật, được chiết xuất chủ yếu từ vỏ cam quýt và bã táo. Ngoài khả năng phân huỷ sinh học và tương thích sinh học tốt, pectin là nguyên liệu có thể ăn được và có các đặc tính lý hoá linh hoạt như sự tạo gel, tính thấm khí có chọn lọc...(Paula và nnk., 2013). Cellulose cũng là một polysaccharite được sử dụng phổ biến trong màng bọc thực phẩm. Chúng được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng thực phẩm như chất làm đặc và tạo gel, chất ổn định và vật liệu đóng gói (Fatemeh và nnk., 2022). Cellulose và các dẫn xuất có tính chất cơ lý và khả năng chịu nhiệt cao, tuy nhiên nhược điểm của chúng là độ hấp thụ nước cao và đặc tính bám dính bề mặt thấp. Tinh bột cũng là một trong những polysaccharites nguồn gốc thực vật được nghiên cứu sử dụng nhiều trong lĩnh vực bao bì thực phẩm. Tương tự như các polysaccharites khác, tinh bột là nguồn nguyên liệu sẵn có với chi phí sản xuất thấp, ăn được, không độc, không mùi vị và có đặc tính tạo màng tốt. Tuy nhiên, một số hạn chế khi sử dụng tinh bột làm vật liệu đóng gói là tính nhạy cảm với nước, đặc tính rào cản kém và tính bền nhiệt không cao (Fatemeh và nnk., 2022).

Đại diện cho polysaccharites từ nguồn gốc động vật được sử dụng phổ biến trong lĩnh vực bao bì thực phẩm có thể kể đến chitosan. Chitosan là sản phẩm của quá trình deacetyl hoá chitin, là nguồn nguyên liệu không độc hại với đặc tính tạo màng tuyệt vời. Ngoài ra, chitosan là polysaccharite tự nhiên duy nhất có được hoạt tính kháng khuẩn chống lại vi khuẩn, nấm và nấm men (Ruchir và nnk., 2020). Nhờ vào đặc tính kháng khuẩn và kháng nấm vốn có, chitosan trở thành vật liệu tiềm năng trong lĩnh vực bao bì đóng gói nhằm kéo dài hơn thời gian bảo quản thực phẩm. Tuy nhiên, độ ổn định của chitosan ảnh hưởng nhiều bởi pH và dễ bị oxy hoá bởi các gốc tự do cũng như tính chất cơ học, độ bền nhiệt và đặc tính rào cản kém của chitosan làm cho chúng bị hạn chế sử dụng trong nhiều ứng dụng.

Alginate cũng là một trong những polysaccharite được nghiên cứu nhiều trong lĩnh vực thực phẩm, bao gồm các monomer D-mannuronic và L-guluronic được chiết xuất từ tảo nâu. Alginate không độc, ăn được, ưa nước và có đặc tính tạo màng tốt. Tuy nhiên, việc ứng dụng alginate làm vật liệu đóng gói thực phẩm còn hạn chế do đặc tính kháng khuẩn, chống tia cực tím và tính chống thấm kém của chúng (Fatemeh và nnk., 2022).

Protein

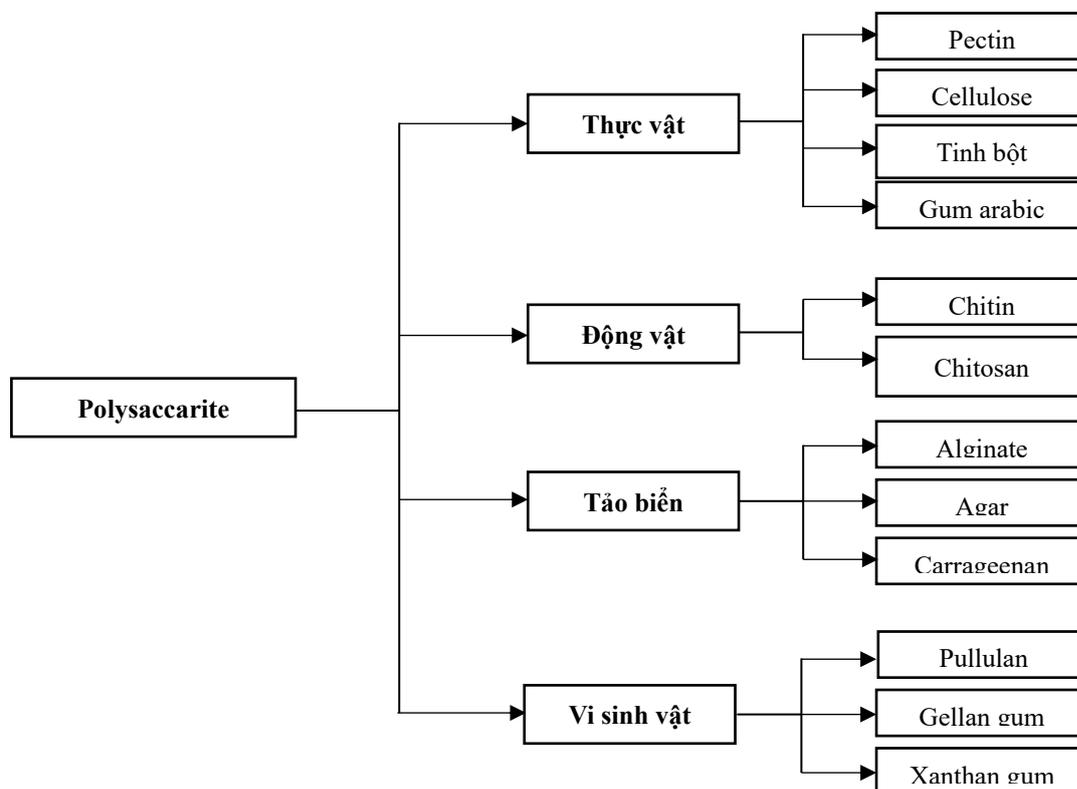
Protein là một trong những polymer sinh học quan trọng, được phân loại theo nguồn gốc từ thực vật và động vật. Protein có nguồn gốc thực vật có thể kể đến như wheat gluten, soy protein, zein protein... được sử dụng nhiều hơn do đặc tính sẵn có và chi phí sản xuất thấp. Protein có nguồn gốc động vật như gelatin, collagen, casein và whey protein. Trong đó, gelatin là protein thu được từ quá trình thủy phân collagen được sử dụng phổ biến do nguồn nguyên liệu sẵn có, không mùi, chi phí sản xuất thấp, tính linh hoạt và khả năng tạo màng tốt. Màng từ gelatin không chỉ đóng vai trò là rào cản tốt đối với oxy, khí carbon dioxide và các hợp chất dễ bay hơi mà còn có khả năng hoạt động như một chất mang tốt (Adilah và nnk., 2021).

Nhờ vào đặc tính cơ học tốt, không độc hại và nguồn nguyên liệu phong phú, protein trở thành vật liệu đóng gói đầy hứa hẹn trong lĩnh vực thực phẩm, mang lại độ an toàn cao và hiệu quả về kinh

tế. Tuy nhiên, hạn chế chung của các protein là tính ưa nước dẫn đến độ nhạy cao với hơi ẩm và đặc tính cản hơi nước kém (Fatemeh và nnk., 2022; Fatima và nnk., 2020).

Lipid

Lipid được chiết xuất từ nhiều nguồn khác nhau như thực vật, động vật hoặc côn trùng, trong đó các hợp chất glyceride và sáp được sử dụng chủ yếu trong chế tạo màng bao thực phẩm. Các chất này có đặc tính chống ẩm tuyệt vời do cấu trúc phân tử không phân cực dẫn đến tính kỵ nước cao, đồng thời tạo nên độ bóng cho màng, tuy nhiên các màng chỉ từ lipid thường quá giòn (Fatemeh và nnk., 2022; Furkan và nnk., 2017).



Hình 1. Phân loại polysaccharite theo nguồn gốc

Nhìn chung, việc sử dụng những polymer sinh học từ nguồn gốc thiên nhiên là một giải pháp đầy hứa hẹn để tạo ra lớp màng bao bảo quản thực phẩm không độc hại và có thể ăn được. Tuy nhiên, chỉ sử dụng riêng lẻ từng loại polysaccharit, protein hay lipid là không đủ để tạo ra lớp màng phủ có thể đáp ứng được đồng thời tính chất cơ học, đặc tính rào cản và các tính năng khác của màng.

3.2 Đặc tính của màng bọc sinh học nanocomposite

Mặc dù bao bì sinh học có nguồn gốc từ thiên nhiên thân thiện với môi trường và không gây độc hại tới sức khỏe con người, tuy nhiên chúng chưa được sử dụng rộng rãi trong đóng gói thực phẩm do hạn chế về đặc tính của màng dẫn đến hiệu quả bảo quản không cao. Để tăng hiệu quả bảo quản của bao bì sinh học cũng như tính cạnh tranh so với bao bì polymer truyền thống, công nghệ nano được kết hợp mạnh mẽ trong những năm gần đây với mục tiêu tạo ra bao bì sinh học nanocomposite với các đặc tính được cải thiện, đồng thời tận dụng được các đặc tính sẵn có của vật liệu nano. Nhiều nghiên cứu đã thành công kết hợp hạt nano kim loại và nano oxit kim loại trong chế tạo bao bì sinh học để tăng cơ tính của màng, từ đó giúp cải thiện được hiệu quả bảo quản (Aisha và nnk., 2023).

3.2.1. Nano kim loại

Hạt nano kim loại kết hợp với các polymer sinh học tạo ra vật liệu màng nanocomposite đã được chứng minh có thể cải thiện được tính chất và độ bền của màng polymer, đồng thời phát huy được các đặc tính của hạt nano, đóng vai trò then chốt trong việc bảo vệ, bảo quản và kéo dài thời hạn sử dụng của thực phẩm. Một số loại hạt nano kim loại đã được nghiên cứu và kết hợp thành công trong chế tạo

màng bọc sinh học có thể kể đến như nano bạc (AgNPs), nano đồng (CuNPs) hoặc hợp kim của chúng. Nano bạc từ lâu được biết đến với tính chất quang và có đặc tính kháng khuẩn mạnh nhất trong số các cation kim loại, trong khi nano đồng thể hiện hoạt tính kháng khuẩn, kháng nấm cao và được ưu tiên sử dụng do giá thành rẻ hơn. Việc kết hợp các hạt nano kim loại trong màng bao polymer sinh học thể hiện những tính năng vượt trội so với màng polymer nguyên chất, cùng với hoạt tính kháng khuẩn, kháng nấm của bản thân các hạt nano giúp tăng hiệu quả bảo quản như thể hiện ở Bảng 1. Hơn nữa, hình dạng và kích thước khác nhau các hạt nano được chứng minh có ảnh hưởng đến tính chất cơ lý, đặc tính cản tia UV cũng như hoạt tính kháng khuẩn của chúng (Yage và nnk., 2019).

Bảng 1. Đặc tính của màng polymer sinh học kết hợp hạt nano kim loại

Nano kim loại	Polymer sinh học	Hàm lượng NPs (%)	Đặc tính của màng	Hoạt tính kháng khuẩn	Trích dẫn
AgNPs	Natri alginate	1,0 - 5,0	- Tăng độ bền kéo - Cải thiện tính thấm hơi nước, đặc tính cản tia UV - Tăng cường đặc tính chống oxy hoá	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i>	<i>Xinyu và nnk., 2021</i> ; <i>Nusrat và nnk., 2021</i>
AgNPs	Pectin	-	- Tăng độ bền kéo - Cải thiện tính thấm hơi nước	<i>Escherichia coli</i> , <i>Salmonella Typhimurium</i>	<i>Nadjat và nnk., 2021</i>
AgNPs	Carboxymethyl cellulose	2,0	- Tăng độ bền kéo - Cải thiện đặc tính cản tia UV - Giảm độ hấp thụ ẩm	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i>	<i>Yadollah và nnk., 2019</i>
CuNPs	Hydroxypropyl methylcellulose (HPMC)	0,5 - 5,0	- Tăng độ bền kéo và độ giãn dài khi đứt - Cải thiện độ bền của màng - Cải thiện tính thấm hơi nước	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Enterococcus faecalis</i> , <i>Salmonella</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	<i>Saeideh và nnk., 2014</i>
CuNPs	Chitosan/Soy protein isolate	-	- Tăng độ bền kéo (118,78%) và độ giãn dài khi đứt (74,93%) - Tăng độ bền nhiệt - Cải thiện tính thấm hơi nước	-	<i>Kuang và nnk., 2017</i>
Ag-Cu alloy NPs	Guar gum	0,5 - 2,0	- Tăng độ dày màng - Tăng độ bền kéo (23,7 MPa), giảm độ giãn dài khi đứt (23,5%) - Tăng độ bền nhiệt - Cải thiện đặc tính cản tia UV - Cải thiện đặc tính rào cản oxy	<i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Salmonella typhimurium</i>	<i>Yasir và nnk., 2017</i>
Ag-Cu alloy NPs	Gelatin	2,0	- Tăng độ dày màng - Tăng độ bền kéo, giảm độ giãn dài khi đứt - Cải thiện đặc tính cản tia UV - Tăng độ bền nhiệt	<i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Salmonella enterica sv typhimurium</i>	<i>Yasir và nnk., 2017</i>

3.2.2 Nano oxit kim loại

Tương tự như hạt nano kim loại, một số loại nano oxit kim loại cũng được nghiên cứu và kết hợp với các polymer sinh học nhằm tạo ra lớp màng bọc nanocomposite với các đặc tính được cải thiện. Trong các nano oxit kim loại, nano đồng (II) oxit (CuO), kẽm oxit (ZnO) và titan dioxit (TiO₂) được sử dụng phổ biến như chất độn gia cường cho màng bọc polymer sinh học nhờ vào tính ổn định nhiệt cao và hoạt tính kháng khuẩn, kháng nấm tự nhiên của chúng. Nano CuO được biết đến với đặc tính kháng khuẩn, kháng nấm phổ rộng và khả năng oxy hoá khử mạnh, trở thành vật liệu diệt khuẩn hấp dẫn ứng dụng trong các bao bì hoạt tính vì có hiệu quả cao chống lại các loại vi khuẩn gây bệnh khác nhau (Aisha và nnk., 2023). Nano ZnO với diện tích bề mặt lớn, độ dẫn nhiệt cao, độ kết tinh và khả năng hấp thụ quang học cao ở vùng UV có lợi cho tương tác với vi khuẩn. Ngoài ra, nano ZnO được Cục quản lý Thực phẩm và Dược phẩm Hoa Kỳ (FDA) đánh giá là vật liệu an toàn có thể ứng

dụng trong lĩnh vực thực phẩm và dược phẩm (Maria và nnk., 2021). Nano TiO₂ là oxit kim loại có giá thành rẻ với độ ổn định hoá học cao, thể hiện hoạt tính xúc tác quang và khả năng tương thích sinh học (Maria và nnk., 2021; Xiaodong và nnk., 2017).

Ngoài ra, một số loại hạt nano oxit kim loại khác ít phổ biến hơn như nano MgO (Silva và nnk., 2017), nano graphene oxit (GO) (Adilah và nnk., 2021) hay nano silicon dioxit (SiO₂) (Dattatreya và nnk., 2017; Nasser và nnk., 2020) cũng được kết hợp trong màng bọc sinh học vì thể hiện được nhiều tính năng thú vị như tính chất quang và điện, đặc tính rào cản UV, hơi ẩm và khí tốt cùng với khả năng tương thích sinh học cao.

Bảng 2. Đặc tính của màng polymer sinh học kết hợp hạt nano oxit kim loại

Nano oxit kim loại	Polymer sinh học	Hàm lượng NPs (%)	Đặc tính của màng	Hoạt tính kháng khuẩn	Trích dẫn
Montmorillonite/CuO (MMT/CuO NPs)	Chitosan	1,0 – 5,0	- Cải thiện độ bền kéo (tăng 58,5%) và độ giãn dài khi đứt (tăng 52,4%) - Cải thiện độ thấm hơi nước (giảm 55%) và oxy (giảm 32%)	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Afsaneh và nnk., 2017
ZnO NPs	Chitosan	0,5 – 2,0	- Tăng độ dẻo màng - Tăng độ giãn dài khi đứt, giảm độ bền kéo và modulus - Duy trì đặc tính rào cản oxy và hơi nước - Độ truyền qua không thay đổi, duy trì được đặc tính cản tia UV	-	Victor và nnk., 2021
ZnO NPs	Gelatin	-	- Độ dày màng tăng, độ cứng giảm - Độ bền kéo và modulus giảm nhẹ, độ giãn dài khi đứt tăng - Cải thiện đặc tính cản tia UV - Tăng độ bền nhiệt	<i>Listeria monocytogenes</i> , <i>Escherichia coli</i>	Shiv và nnk., 2015
ZnO NPs	Chitosan/Gelatin	2,0 – 4,0	- Tăng độ giãn dài khi đứt - Cải thiện độ bền nhiệt - Cải thiện hình thái bề mặt và tính đồng nhất của màng	<i>Escherichia coli</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Santosh và nnk., 2020
ZnO NPs	Pectin/Alginate	0,5 – 5,0	- Tăng độ bền kéo (191,4%), độ giãn dài khi đứt (169,8%) - Cải thiện độ thấm hơi nước và oxy - Cải thiện đặc tính cản tia UV	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Colletotrichum gloeosporioides</i> , <i>Escherichia coli</i> , <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Thi Minh Phuong Ngo và nnk., 2020
Cellulose nanocrystal/ZnO (CNC/ZnO NPs)	Chitosan/PVA	0,5 – 5,0	- Cải thiện độ bền kéo (tăng 178%) và modulus (tăng 135%) - Tăng độ bền nhiệt - Tăng đặc tính cản tia UV	<i>Salmonella choleraesuis</i> , <i>Staphylococcus aureus</i>	Susan và nnk., 2014
Ag/CuO/ZnO	Carboxyl methyl cellulose	1,3/0,3/0,3	- Tăng độ bền kéo - Cải thiện đặc tính cản tia UV - Giảm độ hấp thụ ẩm	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i>	Yadollah và nnk., 2022
TiO ₂ NPs	Chitosan	0,01-0,05	- Cải thiện độ bền nhiệt	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i> ,	Xiaodong và nnk., 2017; Yage

			- Tăng độ bền kéo (89,64%) và độ giãn dài khi đứt (69,21%) - Tăng cường tính ưa nước của màng	<i>Candida albicans</i> , <i>Aspergillus niger</i>	và nnk., 2020
TiO ₂ NPs	Tinh bột	1,0 – 5,0	- Giảm độ dày màng - Giảm độ bền kéo và modulus, tăng độ giãn dài khi đứt - Giảm độ thấm hơi nước	-	Vahid và nnk., 2017
TiO ₂ @SiO ₂ core-shell NPs	Zein protein	1,5	- Tăng độ dày màng - Tăng độ bền kéo, độ giãn dài khi đứt giảm - Giảm độ thấm hơi nước - Cải thiện độ bền nhiệt	-	Dattatreya và nnk., 2017
ZnO@SiO ₂ NPs	Chitosan/PVA	0,5 – 5,0	- Tăng độ bền kéo và độ giãn dài khi đứt - Giảm độ thấm hơi nước và khí	<i>Staphylococcus aureus</i> , <i>Escherichia coli</i>	Nasser và nnk., 2020
MgO NPs	Chitosan	0,5 – 10,0	- Tăng độ bền kéo (86%) và modulus (38%) - Cải thiện đặc tính cản tia cực tím - Giảm độ thấm hơi nước (27 – 32%) - Cải thiện tính chống cháy (V0 theo UL-94)	-	Silva và nnk., 2017
Graphene oxit (GO)	Gelatin	2,0	- Giảm độ dày và độ hoà tan của màng - Tăng độ bền kéo (34%) và modulus (76%) - Giảm độ thấm hơi nước - Cải thiện đặc tính cản tia UV và ánh sáng	-	Adilah và nnk., 2021

3.2.3. Hiệu quả bảo quản của màng bọc sinh học nanocomposite trên một số loại trái cây tươi

Trong những năm gần đây, đối với việc bảo quản trái cây tươi, nhiều công trình nghiên cứu đã sử dụng màng bọc sinh học có nguồn gốc chủ yếu từ polysaccharite và protein, trong đó thường kết hợp thêm một số loại hạt nano kim loại và oxit kim loại từ Ag, Cu, Zn để khảo sát khả năng tăng cường hiệu quả bảo quản của trái.

Sun và cộng sự (Xinyu và nnk., 2021) tổng hợp hạt nano bạc (Ag) bằng phương pháp khử hoá học với chất khử là chiết xuất từ vỏ trái kiwi và được kết hợp với natri alginate (SA) để chế tạo màng bọc bảo quản quả cherry tươi. Màng bao thể hiện độ bền kéo cao, có khả năng chống hơi nước và đặc tính cản tia cực tím tốt. Ngoài cải thiện được đặc tính cơ học của màng, việc thêm nano bạc vào màng thể hiện đặc tính kháng khuẩn rõ rệt trên hai chủng khuẩn *Staphylococcus aureus* và *Escherichia coli*. Kết quả khảo sát ở điều kiện bảo quản 25°C và độ ẩm 50% cho thấy quả cherry bọc bằng màng SA@Ag vẫn giữ được độ tươi sau 8 ngày, tỉ lệ trái hư ít hơn so với trường hợp không sử dụng màng bảo quản.

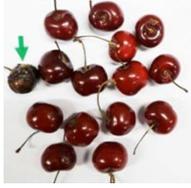
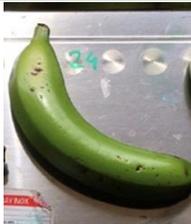
Hạt nano oxit kẽm (ZnO) được kết hợp trong màng chitosan/gum arabic (CH/GA) để khảo sát hoạt tính kháng khuẩn và hiệu quả bảo quản trên quả chuối. Kết quả cho thấy ở điều kiện bảo quản khảo sát (35°C, độ ẩm 54%), quả chuối được phủ bằng màng CH/GA@ZnO vẫn giữ được bề mặt tương đối mịn, độ cứng và trọng lượng quả vẫn được giữ lại sau 17 ngày bảo quản, chứng tỏ lớp phủ màng CH/GA@ZnO làm chậm đáng kể quá trình chín của quả (Duc và nnk., 2021). Nghiên cứu của Kanika và nnk., 2022 so sánh hiệu quả bảo quản giữa hai loại màng chitosan và natri alginate có gia cường nano ZnO với hàm lượng như nhau trên trái cam. Kết quả cho thấy cả hai loại màng đều kéo dài thời hạn sử dụng quả lên tới 20 ngày ở 4°C, trong đó quả được xử lý bằng màng CH@ZnO cho

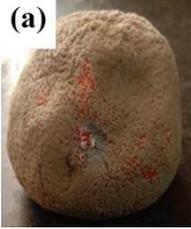
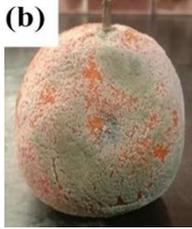
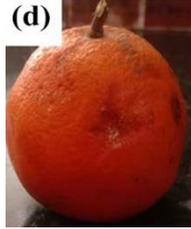
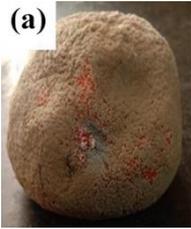
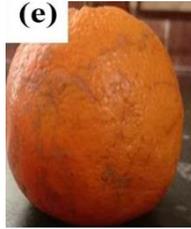
hiệu quả bảo quản tốt nhất. Nano ZnO cũng được chứng minh hiệu quả bảo quản trên một số loại trái cây nhiệt đới phổ biến khác như xoài (Bayu và nnk., 2018), thơm (Indra và nnk., 2021).

Tương tự như chitosan, gelatin cũng là một vật liệu tiềm năng trong chế tạo màng bao bảo quản. Gvozdenko và nnk., 2022 điều chế màng gelatin (GE) có chứa hạt nano CuO và khảo sát khả năng bảo quản trên dâu tây và cà chua. Dung dịch GE@CuO có độ ổn định cao, ở nồng độ $2,5 \times 10^{-3}$ mol/L cho hoạt tính diệt nấm cao được thử nghiệm trên ba chủng nấm *Mucor racemosus*, *Geotrichum candidum* và *Penicillium digitatum*. Đối với các mẫu dâu tây và cà chua đối chứng, quả bị hư hỏng sau 4 ngày, trong khi đó các mẫu trái được xử lý với dung dịch GE@CuO bằng phương pháp nhúng vẫn đạt được độ tươi sau 7 ngày bảo quản, chứng tỏ sự có mặt của hạt nano CuO góp phần ức chế quá trình sinh sản của vi khuẩn và nấm, từ đó giúp kéo dài thời gian bảo quản. Ngoài ra, với sự có mặt của hạt nano Titan, màng GE@CuO gia tăng được hoạt tính kháng khuẩn nhằm kéo dài hơn thời gian bảo quản của cà chua (Balwinder và nnk., 2021).

Ngoài ra, một số loại hạt nano oxit kim loại khác như TiO₂ (Xiaodong và nnk., 2017), SiO₂ (Hazem và nnk., 2022; Shengyou và nnk., 2013) cũng cho thấy hiệu quả bảo quản tốt khi kết hợp với chitosan làm màng bọc bảo quản cho các loại trái cây khác nhau như nho đỏ, xoài, nhãn.

Bảng 3. Hiệu quả bảo quản của màng bọc sinh học nanocomposite trên một số loại trái cây tươi

Nano	Hàm lượng	Polymer sinh học	Điều kiện lưu trữ		Mẫu đối chứng (không sử dụng màng bọc)	Màng bọc polymer nguyên chất	Màng bọc nanocomposite	Trích dẫn
			Nhiệt độ (°C)	Độ ẩm (%)				
Ag NPs	4,0 mg	Natri alginate	25	50	 0 ngày	 0 ngày	 0 ngày	<i>Xinyu và nnk., 2021</i>
					 Sau 8 ngày	 Sau 8 ngày	 Sau 8 ngày	
ZnO NPs	0,5%	Chitosan/ Gum arabic	35	54	 0 ngày	 0 ngày	 0 ngày	<i>Duc D. La và nnk., 2021</i>
					 Sau 17 ngày	 Sau 17 ngày	 Sau 17 ngày	

ZnO NPs	1,0%	Chitosan	25	65	 <p>0 ngày</p>	 <p>0 ngày</p>	 <p>0 ngày</p>	<i>Indra và nnk., 2021</i>
					 <p>Sau 15 ngày</p>	 <p>Sau 15 ngày</p>	 <p>Sau 15 ngày</p>	
					 <p>Sau 15 ngày</p>	 <p>Sau 15 ngày</p>	 <p>Sau 15 ngày</p>	
ZnO NPs	0,5 g/L	Natri alginate	4	70	 <p>(a) Sau 20 ngày</p>	 <p>(b) Sau 20 ngày</p>	 <p>(d) Sau 20 ngày</p>	<i>Kanika và nnk., 2022</i>
ZnO NPs	0,5 g/L	Chitosan	4	70	 <p>(a) Sau 20 ngày</p>	 <p>(c) Sau 20 ngày</p>	 <p>(e) Sau 20 ngày</p>	<i>Kanika và nnk., 2022</i>
ZnO NPs	1,0%	Carrageenan	20	61	 <p>0 ngày</p>	 <p>0 ngày</p>	 <p>0 ngày</p>	<i>Bayu và nnk., 2018</i>
					 <p>Sau 33 ngày</p>	 <p>Sau 33 ngày</p>	 <p>Sau 33 ngày</p>	
CuO NPs	$2,5 \times 10^{-3}$ mol/L	Gelatin	nhiệt độ phòng	-	 <p>Sau 1 ngày</p>	-	 <p>Sau 1 ngày</p>	<i>Gvozenko và nnk., 2022</i>

						-		
					Sau 7 ngày		Sau 7 ngày	
CuO NPs	2,5x10 ⁻³ mol/L	Gelatin	nhiệt độ phòng	-		-		Gvozdenko và ntk., 2022
					Sau 1 ngày		Sau 1 ngày	
						-		
					Sau 7 ngày		Sau 7 ngày	
Ti/CuO NPs	-	Gelatin	40	-				Balwinder và ntk., 2021
					0 ngày	0 ngày	0 ngày	
								
					Sau 4 ngày	Sau 10 ngày	Sau 18 ngày	
TiO ₂ NPs	0,05g	Chitosan	37	-				Xiaodong và ntk., 2017
					Sau 6 ngày	Sau 6 ngày	Sau 6 ngày	

4. Bàn luận

Mỗi nghiên cứu về hạt nano kết hợp với các polymer sinh học trong điều kiện tối ưu đã giúp cho một số loại trái cây được khảo sát kéo dài được thời gian bảo quản. Tuy nhiên, để chọn được vật liệu nano và loại polymer sinh học nào thích hợp để tạo ra được bao bì nanocomposite có thể bảo quản được nhiều loại trái cây khác nhau, đồng thời chi phí tạo ra loại bao bì này có thể cạnh tranh được với các dòng sản phẩm hiện tại rất cần các công trình nghiên cứu trong tương lai về lĩnh vực này. Ngoài ra, mối lo ngại về hàm lượng nano cho phép và sự di hành của các hạt nano từ bao bì bảo quản sang thực phẩm cũng được quan tâm và cần những nghiên cứu chuyên sâu hơn.

Nhìn chung, với những đặc tính tối ưu của bao bì sinh học nanocomposite giúp giảm thiểu tỉ lệ trái hư hỏng trước khi tới tay người tiêu dùng cũng như giảm thiểu tác động đến môi trường sẽ là một trong những cơ sở quan trọng cho các hướng nghiên cứu và phát triển các loại bao bì bảo quản trái cây từ nguồn gốc sinh học nhằm tối ưu hóa chi phí cho hoạt động công nghệ bảo quản sau thu hoạch, nâng cao chất lượng trái cây nói chung và nông sản Việt nói riêng, tăng tính cạnh tranh trên thị trường quốc tế.

5. Kết luận

Vật liệu màng bọc nanocomposite từ các polymer sinh học được chứng minh có khả năng gia cường tính chất cơ học của màng polymer nguyên chất, cải thiện độ bền nhiệt, đặc tính rào cản và một số đặc tính khác của màng, giúp tăng cường hiệu quả bảo quản và kéo dài thời gian sử dụng mà không làm ảnh hưởng đến mùi vị và chất lượng thực phẩm. Nhờ vào tính chất quang, tính chất nhiệt đặc trưng cùng với hoạt tính kháng và diệt khuẩn, diệt nấm tuyệt vời của các hạt nano, việc kết hợp chúng cùng với các hợp chất thiên nhiên có khả năng phân hủy sinh học mang lại nhiều lợi ích vượt trội, góp phần giảm phát thải rác thực phẩm và rác nhựa, giảm gánh nặng cho môi trường. Việc ứng dụng công nghệ nano trong lĩnh vực đóng gói thực phẩm tạo ra vật liệu bao bì kháng khuẩn mới, đáp ứng được mong đợi của người tiêu dùng về một ngành thực phẩm xanh, sạch, bền vững và lành mạnh hơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Gvozdenko, S. A. Siddiqui, A. V. Blinov, A. B. Golik, A. A. Nagdalian, D. G. Maglakelidze, E. N. Statsenko, M. A. Pirogov, A. A. Blinova, M. N. Sizonenko, A. N. Simonov, R. B. Zhukov, R. O. Kolesnikov, S. A. Ibrahim (2022). Synthesis of CuO nanoparticles stabilized with gelatin for potential use in food packaging applications. *Scientific Reports*, 12, 12843.
- [2] Nor Adilah, C. Gun Hean, Z.A. Nur Hanani (2021). Incorporation of graphene oxide to enhance fish gelatin as bio-packaging material. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100679.
- [3] Afsaneh Nouri, Mohammad Tavakkoli Yarak, Mohammad Ghorbanpour, Shilpi Agarwal, Vinod Kumar Gupta (2017). Enhanced Antibacterial effect of chitosan film using Montmorillonite/CuO nanocomposite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 109, 1219-1231.
- [4] Aisha Idris Ali, Munir Abba Dandago, Fatima Idris Ali, Genitha Immanue, Jishnu Naskar. (2023). Oxide-Based Nanocomposites for Food Packaging Application: A Review. *Food Sciencetech Journal*, 4(2), 145-174.
- [5] Balwinder Singh Sooch, Manpreet Kaur Mann (2021). Nanoreinforced biodegradable gelatin based active food packaging film for the enhancement of shelf life of tomatoes (*Solanum lycopersicum L.*). *Food Control*, 130, 108322.
- [6] Bayu Meindrawan, Nugraha Edhi Suyatma, Ata Aditya Wardana, Vega Yoesepa Pamela (2018). Nanocomposite coating based on carrageenan and ZnO nanoparticles to maintain the storage quality of mango. *Food Packaging and Shelf Life*, 18, 140-146.
- [7] Dattatreya M. Kadam, Mahendra Thunga, Gowrishanker Srinivasan, Sheng Wang, Michael R. Kessler, David Grewell, Chenxu Yu, Buddhi Lamsal. (2017). Effect of TiO₂ nanoparticles on thermo-mechanical properties of cast zein protein films. *Food Packaging and Shelf Life*, 13, 35-43.
- [8] Duc D. La, Phuong Nguyen-Tri, Khoa. H. Le, Phuong T.M. Nguyen, M. Dac-Binh Nguyen, Anh T.K. Vo, Minh T.H. Nguyen, S. Woong Chang, Lam D. Tran, W. Jin Chung, D. Duc Nguyen (2021). Effects of antibacterial ZnO nanoparticles on the performance of a chitosan/gum arabic edible coating for post-harvest banana preservation. *Progress in Organic Coatings*, 151, 106057.
- [9] Fatemeh Baghi, Adem Gharsallaoui, Emilie Dumas, Sami Ghnimi. (2022). Advancements in Biodegradable Active Films for Food Packaging: Effects of Nano/Microcapsule Incorporation. *Foods*, 11, 760.
- [10] Fatima Mustafa, Silvana Andreescu. (2020). Nanotechnology-based approaches for food sensing and packaging applications. *RSC Advances*, 10, 19309-19336.
- [11] Furkan Aydin, Halil Ibrahim Kahve, Mustafa Ardic (2017). Lipid Based Edible Films. *Journal of Scientific and Engineering Research*, 4(9):86-92.
- [12] Hafiz Alojaly, Khaled Ybenyounis (2022). Packaging With Plastics and Polymeric Materials. *Encyclopedia of Materials: Plastics and Polymers*, 3, 485-501.

- [13] Hazem S. Kassem, Mohamed E. Tarabih, Hamed Ismail, Eman E. Eleryan (2022). Influence of Nano-Silica/Chitosan Film Coating on the Quality of ‘Tommy Atkins’ Mango. *Processes*, 10, 279.
- [14] Hoàng Quang Bình, Nguyễn Quang Trà, Trịnh Ngọc Thảo Ngân, Lê Trung Thiên (2022). Ứng dụng công nghệ bao màng trong bảo quản trái cây nhiệt đới. *Tap chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ*, 3B(58), 132-148.
- [15] Indra Bhusan Basumatary, Avik Mukherjee, Vimal Katiyar, Santosh Kumar, Joydeep Dutta (2021). Chitosan-Based Antimicrobial Coating for Improving Postharvest Shelf Life of Pineapple. *Coatings*, 11, 1366.
- [16] Kanika Dulta, Gözde Koşarsoy Ağçeli, Arti Thakur, Somvir Singh, Parveen Chauhan, P. K. Chauhan (2022). Development of Alginate-Chitosan Based Coating Enriched with ZnO Nanoparticles for Increasing the Shelf Life of Orange Fruits (*Citrus sinensis* L.). *Journal of Polymers and the Environment*, 30, 3293-3306.
- [17] Kuang Li, Shicun Jin, Xiaorong Liu, Hui Chen, Jing He, Jianzhang Li (2017). Preparation and Characterization of Chitosan/Soy Protein Isolate Nanocomposite Film Reinforced by Cu Nanoclusters. *Polymers*, 9, 247.
- [18] Liuying He, Feiyang Wang, Ying Chen, Yueying Liu (2018). Rapid and sensitive colorimetric detection of ascorbic acid in food based on the intrinsic oxidase-like activity of MnO₂ nanosheets. *Luminescence*, 33(1), 145-152.
- [19] Lokesh Kumar, Dakuri Ramakanth, Konala Akhila, Kirtiraj K. Gaikwad (2021). Edible films and coatings for food packaging applications: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20, 875-900.
- [20] Maria Vesna Nikolic, Zorka Z. Vasiljevic, Sandrine Auger, Jasmina Vidic (2021). Metal oxide nanoparticles for safe active and intelligent food packaging. *Trends in Food Science & Technology* 116, 655-668.
- [21] Nadjat Ardjoum, Shiv Shankar, Nacera Chibani, Stephane Salmieri, Monique Lacroix (2021). In situ synthesis of silver nanoparticles in pectin matrix using gamma irradiation for the preparation of antibacterial pectin/silver nanoparticles composite films. *Food Hydrocolloids*, 121, 107000.
- [22] Nasser A. Al-Tayyar, Ahmed M. Youssef, Rashad R. Al-Hindi (2020). Antimicrobial packaging efficiency of ZnO-SiO₂ nanocomposites infused into PVA/CS film for enhancing the shelf life of food products. *Food Packaging and Shelf Life*, 25, 100523.
- [23] Nusrat Sharmin, Chengheng Pang, Izumi Sone, James Leon Walsh, Cecilia Górriz Fernández, Morten Sivertsvik, Estefanía Noriega Fernández (2021). Synthesis of Sodium Alginate–Silver Nanocomposites Using Plasma Activated Water and Cold Atmospheric Plasma Treatment. *Nanomaterials*, 11, 2306.
- [24] Paula Judith Pérez Espitia, Wen-Xian Du, Roberto de Jesús Avena-Bustillos, Nilda de Fátima Ferreira Soares, Tara H. McHugh (2013). Edible films from pectin: Physical-mechanical and antimicrobial properties - A review. *Food Hydrocolloids*, 35, 287-296.
- [25] Pooja Saklani, Siddhnath, Sambit Kishor Das, Shiv Mohan Singh (2019). A Review of Edible Packaging for Foods. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(7), 2885-2895.
- [26] R.T. De Silva, M.M.M.G.P.G. Mantilaka, S.P. Ratnayake, G.A.J. Amaratunga, K.M. Nalin de Silva (2017). Nano-MgO reinforced chitosan nanocomposites for high performance packaging applications with improved mechanical, thermal and barrier properties. *Carbohydrate Polymers*, 157, 739-747.
- [27] Roland Geyer, Jenna R. Jambeck, Kara Lavender Law (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3, e1700782.
- [28] Ruchir Priyadarshi, Jong-Whan Rhim (2020). Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 62, 102346.
- [29] Saeideh Ebrahimiasl, Ataollah Rajabpour (2014). Synthesis and characterization of novel bactericidal Cu/HPMC BNCs using chemical reduction method for food packaging. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 5982-5988.
- [30] Samah M. El-Sayed, Ahmed M. Youssef (2023). Eco-friendly biodegradable nanocomposite materials and their recent use in food packaging applications: a review. *Sustainable Food Technology*, 1, 215-227.

- [31] Santosh Kumar, Abhinab Mudai, Barnali Roy, Indra Bhusan Basumatary, Avik Mukherjee, Joydeep Dutta (2020). Biodegradable Hybrid Nanocomposite of Chitosan/Gelatin and Green Synthesized Zinc Oxide Nanoparticles for Food Packaging. *Foods*, 9, 1143.
- [32] Shiv Shankar, Xinnan Teng, Gaobin Li, Jong-Whan Rhim (2015). Preparation, characterization, and antimicrobial activity of gelatin/ZnO nanocomposite films. *Food Hydrocolloids*, 45, 264-271.
- [33] Shengyou Shi, Wei Wang, Liqin Liu, Shijia Wu, Yongzan Wei, Weicai Li (2013). Effect of chitosan/nano-silica coating on the physicochemical characteristics of longan fruit under ambient temperature. *Journal of Food Engineering*, 118, 125-131.
- [34] Susan Azizi, Mansor B. Ahmad, Nor Azowa Ibrahim, Mohd Zobir Hussein, Farideh Namvar (2014). Cellulose Nanocrystals/ZnO as a Bifunctional Reinforcing Nanocomposite for Poly(vinyl alcohol)/Chitosan Blend Films: Fabrication, Characterization and Properties. *International Journal of Molecular Sciences*, 15, 11040-11053.
- [35] Thi Minh Phuong Ngo, Thi Mong Quyen Dang, Thi Xo Tran, Pornchai Rachtanapun (2018). Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on the Properties of Pectin/Alginate Edible Films. *International Journal of Polymer Science*, 5645797.
- [36] Vahid Goudarzi, Iman Shahabi-Ghahfarrokhi, Amin Babaei-Ghazvini (2017). Preparation of ecofriendly UV-protective food packaging material by starch/TiO₂ bio-nanocomposite: Characterization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 95, 306-313.
- [37] Victor Gomes Lauriano Souza, Marta M. Alves, Catarina F. Santos, Isabel A. C. Ribeiro, Carolina Rodrigues, Isabel Coelho, Ana Luisa Fernando (2021). Biodegradable Chitosan Films with ZnO Nanoparticles Synthesized Using Food Industry By-Products—Production and Characterization. *Coatings*, 11, 646.
- [38] Vivek K. Bajpai, Madhu Kamle, Shruti Shukla, Dipendra Kumar Mahato, Pranjal Chandra, Seung Kyu Hwang, Pradeep Kumar, Yun Suk Huh, Young-Kyu Han (2018). Prospects of using nanotechnology for food preservation, safety, and security. *Journal of Food and Drug Analysis*, 26(4), 1201-1214.
- [39] Xiaodong Zhang, Gang Xiao, Yaoqiang Wang, Yan Zhao, Haijia Su, Tianwei Tan (2017). Preparation of Chitosan-TiO₂ Composite Film with Efficient Antimicrobial Activities under Visible Light for Food Packaging Applications. *Carbohydrate Polymers*, 169, 101-107.
- [40] Xinyu Sun, Hui Zhang, Jiao Wang, Mengna Dong, Pei Jia, Tong Bu, Qinzhi Wang, Li Wang (2021). Sodium alginate-based nanocomposite films with strong antioxidant and antibacterial properties enhanced by polyphenol-rich kiwi peel extracts bio-reduced silver nanoparticles. *Food Packaging and Shelf Life*, 29, 100741.
- [41] Yadollah Ebrahimi, Seyed Jamaledin Peighambaroust, Seyed Hadi Peighambaroust, Sirous Zahed Karkaj (2019). Development of Antibacterial Carboxymethyl Cellulose-Based Nanobiocomposite Films Containing Various Metallic Nanoparticles for Food Packaging Applications. *Journal of Food Science*, 84(9), 2537-2548.
- [42] Yage Xing, Xuanlin Li, Xunlian Guo, Wenxiu Li, Jianwen Chen, Qian Liu, Qinglian Xu, Qin Wang, Hua Yang, Yuru Shui, Xiufang Bi (2020). Effects of Different TiO₂ Nanoparticles Concentrations on the Physical and Antibacterial Activities of Chitosan-Based Coating Film. *Nanomaterials*, 10, 1365.
- [43] Yage Xing, Wenxiu Li, Qin Wang, Xuanlin Li, Qinglian Xu, Xunlian Guo, Xiufang Bi, Xiaocui Liu, Yuru Shui, Hongbin Lin, Hua Yang (2019). Antimicrobial Nanoparticles Incorporated in Edible Coatings and Films for the Preservation of Fruits and Vegetables. *Molecules*, 24, 1695.
- [44] Yasir Ali Arfat, Mohammed Ejaz, Harsha Jacob, Jasim Ahmed (2017). Deciphering the potential of guar gum/Ag-Cu nanocomposite films as an active food packaging material. *Carbohydrate Polymers*, 157, 65-71.
- [45] Yasir Ali Arfat, Jasim Ahmed, Nikhil Hiremath, Rafael Auras, Antony Joseph (2017). Thermo-mechanical, rheological, structural and antimicrobial properties of bionanocomposite films based on fish skin gelatin and silver-copper nanoparticles. *Food Hydrocolloids*, 62, 191-202.