



ฟิล์มอัลจินตเชิงหน้าที่เสริมโพรไบโอติกและสารต้านอนุมูลอิสระเพื่อการประยุกต์ ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร

Functional alginate-based films incorporated with probiotics and antioxidants for food packaging applications

ปวีณรัตน์ สิงห์วี¹ ปรียาภัทร หัตถัง¹ กิตติภณ รูปิยะเวช² มกานนท์ บุตรสิทธิ์² และ วนิดา ปานอุทัย^{3*}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่ 50200

²ภาควิชาผลิตภัณฑ์ประมง คณะประมง มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

³ฝ่ายจุลชีววิทยาประยุกต์ สถาบันคั้นคว่ำและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

Paweenrat Singwee¹, Pariyapat Hadrtung¹, Kittipon Rupiyaweth², Makanon Bhudsit²
and Wanida Pan-utai³

¹Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Chiang Mai University, Chiang Mai 50200

²Department of Fisheries products, Faculty of Fisheries, Kasetsart University, Bangkok 10900

³Department of Applied Microbiology, Institute of Food Research and Product Development,
Kasetsart University, Bangkok 10900

*Corresponding author: ifrwdp@ku.ac.th

Received: 9 June 2026/ Revised: 5 September 2026/ Accepted: 6 September 2026

บทคัดย่อ

บรรจุภัณฑ์อาหารเชิงหน้าที่เป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์สมัยใหม่ที่สามารถปกป้องผลิตภัณฑ์อาหาร ควบคู่กับการยืดอายุการเก็บรักษา รักษาคุณภาพ และเพิ่มคุณค่าเชิงสุขภาพ ฟิล์มอัลจินตเป็นวัสดุชีวพอลิเมอร์ที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดี มีความปลอดภัย ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมีความสามารถในการลดการซึมผ่านของออกซิเจน อย่างไรก็ตามฟิล์มอัลจินตยังมีข้อจำกัดด้านสมบัติการกันความชื้น ความเสถียรของโครงสร้าง และสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะภายใต้สภาวะที่มีความชื้นสูง บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมและวิเคราะห์องค์ความรู้เกี่ยวกับฟิล์มอัลจินตที่เสริมโพรไบโอติกและสารต้านอนุมูลอิสระสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารเชิงหน้าที่ โดยครอบคลุมกลไกการเกิดฟิล์ม บทบาทของอัลจินตในฐานะเมทริกซ์นำส่งโพรไบโอติก กลไกการต้านออกซิเดชัน และปฏิสัมพันธ์ระหว่างโพรไบโอติก สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และโครงสร้างของฟิล์ม ซึ่งชี้ให้เห็นว่าฟิล์มอัลจินตที่เสริมโพรไบโอติกและสารต้านอนุมูลอิสระมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารเชิงหน้าที่ที่มีความสอดคล้องกับแนวโน้มด้านความยั่งยืนและอาหารเพื่อสุขภาพ อย่างไรก็ตามการนำไปใช้จริงยังจำเป็นต้องปรับปรุงสูตรฟิล์ม ควบคุมเสถียรภาพของโพรไบโอติก และประเมินประสิทธิภาพในผลิตภัณฑ์อาหารจริงอย่างเป็นระบบ

คำสำคัญ: ฟิล์มอัลจินต โพรไบโอติก สารต้านอนุมูลอิสระ บรรจุภัณฑ์อาหารเชิงออกฤทธิ์ ฟิล์มบริโภคนได้

Abstract

Functional food packaging is a vital strategy for developing modern materials that protect food products, extend shelf life, preserve quality, and offer health-related benefits. Alginate films have attracted considerable attention as biopolymer-based materials due to their excellent film-forming capabilities, safety, biodegradability, and ability to reduce oxygen permeability. However, these films have limitations in moisture-barrier properties, structural stability, and mechanical performance, especially under high-humidity conditions. This review aims to critically analyze current knowledge on alginate films incorporating probiotics and antioxidants for use in functional food packaging. It discusses the film-forming mechanism of alginate, its role as a delivery matrix for probiotics, the antioxidant mechanisms that inhibit oxidative deterioration, and the interactions among probiotics, bioactive compounds, and film structure. The evidence suggests that alginate films incorporating probiotics and antioxidants have significant potential as multifunctional food packaging materials, aligning with contemporary trends in sustainability and health-oriented food products. Nonetheless, further research is necessary to optimize film formulations, enhance probiotic stability, and systematically evaluate film performance in real food applications.

Keywords: Alginate film, Probiotics, Antioxidants, Functional food packaging, Edible film

บทนำ

บรรจุภัณฑ์อาหารมีบทบาทสำคัญในการรักษาคุณภาพ ความปลอดภัย และอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยทำหน้าที่ป้องกันการปนเปื้อนทางกายภาพ เช่น ฝุ่นละอองและสิ่งแปลกปลอม การปนเปื้อนทางเคมีจากสารปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม และการปนเปื้อนทางจุลชีววิทยาจากจุลินทรีย์ก่อโรคและจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสีย ตลอดจนช่วยลดการสูญเสียความชื้นของอาหาร ควบคุมการแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างอาหารกับสิ่งแวดล้อมภายนอก และชะลอปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดการเสื่อมคุณภาพของอาหาร เช่น การออกซิเดชันของไขมัน และการเปลี่ยนแปลงสี กลิ่น รสชาติ และคุณค่าทางโภชนาการ [1] ปัจจุบันบรรจุภัณฑ์อาหารจำนวนมากยังคงผลิตจากพลาสติกปิโตรเลียม เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ขึ้นรูปง่าย ต้นทุนต่ำ และมีสมบัติเชิงกลและสมบัติการกั้นที่เหมาะสมต่อการใช้งานในอุตสาหกรรมอาหาร อย่างไรก็ตามพลาสติกประเภทดังกล่าวมีข้อจำกัดสำคัญด้านการย่อยสลายและการจัดการหลังการใช้งาน โดยการสะสมของขยะพลาสติกและไมโครพลาสติกในสิ่งแวดล้อมอาจส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศห่วงโซ่อาหาร และสุขภาพของมนุษย์ในระยะยาว [2, 3] จากข้อจำกัดดังกล่าว การพัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์จากชีวพอลิเมอร์จึงได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในฐานะทางเลือกที่สอดคล้องกับแนวคิดด้านความยั่งยืน วัสดุชีวพอลิเมอร์ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ โปรตีน และลิพิด สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มหรือสารเคลือบที่มีศักยภาพในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ มีความปลอดภัยต่อผู้บริโภค และสามารถประยุกต์ใช้ในระบบบรรจุภัณฑ์อาหารได้ [4] วัสดุกลุ่มอัลจินเตเป็นพอลิแซ็กคาไรด์จากสาหร่ายทะเลที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีความสามารถในการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม มีสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซออกซิเจนที่ดี และสามารถเกิดโครงสร้างเจลหรือโครงข่ายพอลิเมอร์ผ่านการเชื่อมขวางกับไอออนแคลเซียมซึ่งช่วยเพิ่มความคงตัวของโครงสร้างฟิล์ม [4, 5] แม้ฟิล์มอัลจินเตจะมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร แต่ยังมีข้อจำกัดสำคัญด้านสมบัติด้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ ความเสถียรของโครงสร้าง และสมบัติเชิงกล โดยเฉพาะภายใต้สภาวะที่มีความชื้นสูง เนื่องจากอัลจินเตเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะชอบน้ำ ส่งผลให้ฟิล์มสามารถดูดซับน้ำได้ง่าย และอาจทำให้ความแข็งแรงเชิงกลและประสิทธิภาพการกั้นลดลงระหว่างการเก็บรักษาหรือการใช้งานจริง [4, 5] ดังนั้นการพัฒนาฟิล์มอัลจินเตจึงไม่ควรมุ่งเน้นเฉพาะการทดแทนพลาสติกแบบดั้งเดิมเท่านั้น แต่ควรให้ความสำคัญกับการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของฟิล์ม



เช่น ความแข็งแรงเชิงกล สมบัติด้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจน ความคงตัวของโครงสร้าง และความสามารถในการนำส่งสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

แนวโน้มการพัฒนาบรรจุภัณฑ์อาหารในปัจจุบันได้เปลี่ยนจากบรรจุภัณฑ์ที่ทำหน้าที่เป็นเพียงเกราะป้องกันทางกายภาพ ไปสู่บรรจุภัณฑ์อาหารเชิงหน้าที่ ซึ่งสามารถมีบทบาทในการควบคุมการเสื่อมคุณภาพของอาหาร ยืดอายุการเก็บรักษา และเพิ่มคุณค่าเชิงสุขภาพของผลิตภัณฑ์ได้ [4, 6] การเติมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น โพรไบโอติก สารต้านจุลินทรีย์ และสารต้านอนุมูลอิสระลงในส่วนผสมหรือเมทริกซ์ของฟิล์มชีวพอลิเมอร์จึงเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาฟิล์มให้มีคุณสมบัติหลายหน้าที่ โดยเฉพาะฟิล์มอัลจินเตที่สามารถทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์สำหรับกักเก็บและนำส่งโพรไบโอติก โดยโครงข่ายพอลิเมอร์ช่วยลดการสัมผัสโดยตรงของเซลล์กับสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม เช่น ความร้อนระหว่างกระบวนการทำแห้ง การสัมผัสออกซิเจน และการเปลี่ยนแปลงของความชื้นระหว่างการเก็บรักษา ตลอดจนสภาวะกรดและเกลือในตัวในระบบทางเดินอาหาร จึงช่วยคงความมีชีวิตและเพิ่มโอกาสการรอดชีวิตของโพรไบโอติกระหว่างการผลิต การเก็บรักษา และการนำส่งเข้าสู่ระบบทางเดินอาหาร [6-8] นอกจากนี้โพรไบโอติกบางสายพันธุ์สามารถผลิตสารเมแทบอไลต์ที่มีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ เช่น กรดอินทรีย์ เอทานอล ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแบคทีเรียโอซิน ซึ่งส่งผลต่อการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรคหรือจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียได้ เช่น การเติม *Lactiplantibacillus plantarum* IS-10506 ลงในฟิล์มอัลจินเต ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อรา *Botrytis cinerea* ได้ 49.54% [7, 8] ขณะเดียวกันการเติมสารต้านอนุมูลอิสระลงในฟิล์มอัลจินเตสามารถช่วยชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชัน ลดการเกิดกลิ่นหืน และช่วยรักษาคุณภาพของอาหารระหว่างการเก็บรักษา [5, 9, 10] สารต้านอนุมูลอิสระบางชนิด เช่น สารประกอบฟีนอลิกหรือสารสกัดจากธรรมชาติ อาจเกิดปฏิกิริยาระหว่างกับโครงสร้างของอัลจินเตผ่านพันธะไฮโดรเจนหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการกัน และการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์จากฟิล์ม [5, 9] ด้วยเหตุนี้ฟิล์มอัลจินเตที่เสริมโพรไบโอติกและสารต้านอนุมูลอิสระจึงเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารเชิงหน้าที่ที่เชื่อมโยงทั้งประเด็นด้านความยั่งยืน ความปลอดภัยของอาหาร การยืดอายุการเก็บรักษา และผลิตอาหารเพื่อสุขภาพ อย่างไรก็ตามการนำฟิล์มประเภทนี้ไปใช้จริงยังต้องพิจารณาปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ความมีชีวิตของโพรไบโอติกระหว่างการผลิตและการเก็บรักษา ความเข้ากันได้ระหว่างสารออกฤทธิ์กับเมทริกซ์อัลจินเต สมบัติด้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจน สมบัติเชิงกล การปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ และประสิทธิภาพของฟิล์มเมื่อประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหารจริง อย่างไรก็ตามงานวิจัยเกี่ยวกับฟิล์มอัลจินเตส่วนใหญ่ยังมุ่งศึกษาเฉพาะการปรับปรุงสมบัติของวัสดุ หรือการเติมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเพียงกลุ่มใดกลุ่มหนึ่ง ขณะที่ข้อมูลเกี่ยวกับการเสริมโพรไบโอติกและสารต้านอนุมูลอิสระ รวมถึงผลขององค์ประกอบดังกล่าวต่อโครงสร้าง สมบัติเชิงกล การต้านการซึมผ่าน การรอดชีวิตของโพรไบโอติก และการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ ยังขาดการรวบรวมและวิเคราะห์เชื่อมโยงอย่างเป็นระบบ ช่องว่างขององค์ความรู้นี้ทำให้การเลือกชนิดและความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ รวมถึงการออกแบบสูตรฟิล์มให้เหมาะสมกับอาหารเป้าหมายและการใช้งานจริงยังไม่มีแนวทางที่ชัดเจน

ด้วยเหตุนี้บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อรวบรวมและวิเคราะห์องค์ความรู้เกี่ยวกับฟิล์มอัลจินเตเชิงหน้าที่เสริมโพรไบโอติกและสารต้านอนุมูลอิสระสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยครอบคลุมกลไกการเกิดฟิล์ม บทบาทของอัลจินเตในการกักเก็บและนำส่งโพรไบโอติก กลไกการต้านออกซิเดชัน ปฏิสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบ การประเมินสมบัติของฟิล์ม ตลอดจนการประยุกต์ใช้กับอาหารและข้อจำกัดเชิงอุตสาหกรรม

1. ฟิล์มอัลจินเตและกลไกการเกิดฟิล์ม

อัลจินเตเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ธรรมชาติที่พบมากในผนังเซลล์ของสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล โดยมีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยกรด β -D-mannuronic acid และ α -L-guluronic acid ที่เชื่อมต่อกันเป็นสายพอลิเมอร์เชิงเส้น โดยที่โครงสร้างดังกล่าวทำให้อัลจินเตมีสมบัติเด่นด้านการเกิดเจล การเพิ่มความหนืด และการขึ้นรูปเป็นฟิล์ม จึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในฐานะวัสดุชีวพอลิเมอร์สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร [4, 11] ในบริบทของบรรจุภัณฑ์อาหาร ฟิล์มอัลจินเตมีข้อ

ได้เปรียบด้านความปลอดภัย ความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ความโปร่งใส และสมบัติด้านการซึมผ่านก๊าซ ออกซิเจนที่ดี ซึ่งสามารถช่วยลดการสัมผัสออกซิเจนของอาหารและชะลอการเสื่อมคุณภาพจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน [11-13] รายงานของ Parreidt และคณะ [11] ชี้ให้เห็นว่าอัลจินตสามารถใช้เป็นฟิล์มหรือสารเคลือบอาหารได้หลากหลายกลุ่ม เช่น ผัก ผลไม้ ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ ผลิตภัณฑ์นม และอาหารทะเล โดยมีบทบาทในการลดการสูญเสีย น้ำ ควบคุมการแลกเปลี่ยนก๊าซ และรักษาคุณภาพระหว่างการเก็บรักษา นอกจากนี้ Metha และคณะ [4] ได้พัฒนาฟิล์มไบโโคมได้ทั่วไปไปสู่ฟิล์มอัลจินตเชิงออกฤทธิ์ โดยเน้นการเติมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านจุลินทรีย์ ด้านอนุมูลอิสระ และเพิ่มบทบาทของฟิล์มในฐานะบรรจุภัณฑ์อาหารเชิงหน้าที่ ดังนั้นทิศทางการวิจัยปัจจุบันจึงไม่ได้มุ่งเพียงการใช้อัลจินตเป็นวัสดุทดแทนพลาสติก แต่เน้นการออกแบบให้เป็นระบบฟิล์มหลายหน้าที่ที่สามารถปกป้องอาหารและนำส่งสารออกฤทธิ์ได้พร้อมกัน [14-16]

กลไกการเกิดฟิล์มของอัลจินตเกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวของสายพอลิเมอร์และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล เช่น พันธะไฮโดรเจน แรงไฟฟ้าสถิต และการเชื่อมขวางด้วยไอออนโลหะ โดยเฉพาะไอออนแคลเซียมที่สามารถจับกับบริเวณที่มีหน่วย guluronic acid และสร้างโครงสร้างแบบ “egg-box model” ซึ่งการเชื่อมขวางลักษณะนี้ช่วยเพิ่มความคงตัวของโครงสร้าง ความแข็งแรงเชิงกล และความต้านทานต่อการละลายน้ำของฟิล์ม [4, 11] ดังนั้นความเข้มข้นของอัลจินต ชนิดและปริมาณพลาสติกไซเซอร์ ระดับการเชื่อมขวาง และสภาวะการทำแห้งจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่กำหนดคุณสมบัติสุดท้ายของฟิล์ม โดยทั่วไปฟิล์มอัลจินตสามารถเตรียมได้ด้วยวิธีการหล่อฟิล์มจากสารละลาย โดยละลายไซเดียมอัลจินตในน้ำ เติมพลาสติกไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอลและซอร์บิทอล ช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายพอลิเมอร์ ทำให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นและเปราะน้อยลง อย่างไรก็ตามการใช้พลาสติกไซเซอร์ที่ขบน้ำในปริมาณสูงอาจทำให้โครงข่ายพอลิเมอร์หลวมขึ้น ส่งผลให้การซึมผ่านไอน้ำเพิ่มขึ้นและฟิล์มมีลักษณะเหนียว และในทางตรงกันข้ามการเชื่อมขวางด้วยแคลเซียมไอออนช่วยเพิ่มความต้านแรงดึง ความคงตัว และความต้านทานต่อการละลายน้ำ แต่การเชื่อมขวางมากเกินไปจะจำกัดการเคลื่อนที่ของสายพอลิเมอร์ ทำให้การยืดตัวลดลงและฟิล์มเปราะมากขึ้น [4, 11] ดังนั้นปริมาณพลาสติกไซเซอร์และระดับการเชื่อมขวางจึงต้องได้รับการปรับให้เหมาะสมกับการใช้งาน

นอกจากนี้สมบัติด้านทานการซึมผ่านของไอน้ำที่ค่อนข้างต่ำยังเป็นข้อจำกัดสำคัญของฟิล์มอัลจินต เนื่องจากอัลจินตมีหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอกซิลจำนวนมากในโครงสร้าง ทำให้มีลักษณะชอบน้ำและสามารถเกิดปฏิสัมพันธ์กับโมเลกุลน้ำได้ง่าย ภายใต้สภาวะที่มีความชื้นสูง ฟิล์มอาจเกิดการพองตัว สูญเสียความแข็งแรงเชิงกล และมีประสิทธิภาพการต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำลดลง [5, 11, 17] ข้อจำกัดนี้คล้ายกับฟิล์มจากพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดอื่น เช่น สตาร์ช เพคติน และไคโตซาน ซึ่งมีลักษณะชอบน้ำเช่นกัน [17-19] ดังนั้นการพัฒนาฟิล์มอัลจินตเพื่อการใช้งานจริงจำเป็นต้องปรับปรุงคุณสมบัติด้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและความเสถียรของฟิล์มโดยยังคงความปลอดภัยหรือสมบัติเชิงหน้าที่ โดยแนวทางการปรับปรุงฟิล์มอัลจินตสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การสร้างฟิล์มคอมโพสิตร่วมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น การเติมลิพิดหรือสารไม่ชอบน้ำเพื่อลดการซึมผ่านของไอน้ำ การใช้สารเชื่อมขวางเพื่อเพิ่มความคงตัวของโครงสร้าง และการเติมวัสดุนาโนหรือสารเสริมแรงเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลและสมบัติการกัน [20, 21] อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุนาโนหรือสารเสริมแรงในระบบบรรจุภัณฑ์อาหารจำเป็นต้องพิจารณาความปลอดภัย การเคลื่อนย้ายของสารจากฟิล์มสู่อาหาร และข้อกำหนดด้านวัสดุสัมผัสอาหาร [13, 22]

นอกจากนี้การเติมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก สารสกัดจากพืช สารต้านจุลินทรีย์ หรือสารต้านอนุมูลอิสระ สามารถพัฒนาให้ฟิล์มอัลจินตมีบทบาทเป็นบรรจุภัณฑ์เชิงออกฤทธิ์ได้ [23-26] การศึกษาก่อนหน้าพบว่าการพัฒนาฟิล์มอัลจินตที่เติมกรดแทนนิกความเข้มข้นไม่เกิน 1% สามารถเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจาก 0.008% เป็น 89.02% และสามารถยับยั้ง *Escherichia coli* DH5alpha ได้ โดยขนาดบริเวณยับยั้งเพิ่มขึ้นตามปริมาณของกรดแทนนิกที่ใช้ แต่ยังไม่พบการยับยั้ง *Staphylococcus aureus* ATCC 6538 อย่างชัดเจน [5] ขณะที่ฟิล์มอัลจินตที่มีส่วนผสมของสารหยาบหรือสารออกฤทธิ์จากแหล่งธรรมชาติสามารถช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกล สมบัติด้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ และฤทธิ์ทางชีวภาพได้ [10, 27] ดังนั้นฟิล์มอัลจินตจึงเป็นเมทริกซ์สำคัญสำหรับการกักเก็บและนำส่งสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพอีกด้วย โดยการ



ออกแบบสูตรต้องคำนึงถึงความเหมาะสมระหว่างคุณสมบัติเชิงกล สมบัติการกัน ความเสถียรภายใต้ความชื้น และประสิทธิภาพของสารออกฤทธิ์ในระบบฟิล์ม [24]

2. ฟิล์มอัลจินเตเสริมโพรไบโอติก

จุลินทรีย์โพรไบโอติกเป็นจุลินทรีย์ที่มีชีวิตและมีศักยภาพในการส่งเสริมสุขภาพของผู้บริโภคเมื่อได้รับในปริมาณที่เหมาะสม โดยที่ประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ที่มีโพรไบโอติกขึ้นอยู่กับปริมาณเซลล์ที่มีชีวิตทั้งในระหว่างการผลิตและการเก็บรักษา ตลอดจนอัตราการรอดชีวิตของจุลินทรีย์โพรไบโอติกในสภาวะของระบบทางเดินอาหาร [28, 29] อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์โพรไบโอติกมีความไวต่อปัจจัยแวดล้อมหลายประการ เช่น ความร้อน ออกซิเจน ความชื้น ความเครียดออกซิเดติก และความเป็นกรด เป็นต้น จึงจำเป็นต้องมีการป้องกันหรือระบบนำส่งที่เหมาะสมเพื่อคงความมีชีวิตของเซลล์จนถึงระยะเวลาการบริโภค [6, 7, 29, 30] ฟิล์มอัลจินเตมีศักยภาพในการทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์กักเก็บและนำส่งโพรไบโอติก เนื่องจากโครงสร้างของอัลจินเตสามารถสร้างโครงข่ายพอลิเมอร์ที่ช่วยห่อหุ้มเซลล์ ลดการสัมผัสโดยตรงกับปัจจัยแวดล้อม และช่วยควบคุมการปลดปล่อยเซลล์ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม [7] นอกจากนี้การเกิดเจลหรือการเชื่อมขวางด้วยไอออนแคลเซียมของอัลจินเตยังช่วยเพิ่มความคงตัวของโครงสร้างและอาจช่วยปกป้องเซลล์จากปัจจัยภายนอกที่ก่อให้เกิดความเครียดของจุลินทรีย์โพรไบโอติกในระหว่างการผลิต การทำแห้ง และการเก็บรักษา [4, 6, 11]

งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นศักยภาพของฟิล์มอัลจินเตในการเป็นพาหะนำส่งโพรไบโอติก โดยการศึกษาของ Medeiros และคณะ [6] ได้พัฒนาฟิล์มอัลจินเตเชื่อมขวางด้วยแคลเซียมที่กักเก็บ *Bacillus coagulans* ไว้ภายในโครงข่ายพอลิเมอร์ ซึ่งช่วยลดการสัมผัสกับสภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้สามารถคงจำนวนเซลล์มีชีวิตได้มากกว่า $8 \log \text{CFU/g}$ ของฟิล์มแห้ง ในระหว่างการทำแห้ง การเก็บรักษา และการย่อยในระบบทางเดินอาหารจำลอง สะท้อนถึงศักยภาพในการปกป้องและนำส่งโพรไบโอติกเข้าสู่ระบบทางเดินอาหาร ขณะที่รายงานการศึกษาของ Wardana และคณะ [7] พบว่าโพรไบโอติกที่อยู่ในฟิล์มอัลจินเตไม่ได้เป็นเพียงองค์ประกอบเชิงชีวภาพเท่านั้น แต่ยังส่งผลต่อคุณสมบัติของฟิล์ม เช่น คุณสมบัติความโปร่งใส ความทึบแสง สมบัติต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ และฤทธิ์ต้านเชื้อรา นอกจากนี้รายงานของ Kalkan และคณะ [31] พบว่าการเติมโพรไบโอติก *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* B94, *Lactobacillus rhamnosus* GG และหัวเชื้อคีเฟอร์ลงในฟิล์มโซเดียมอัลจินเต ส่งผลให้สูตรฟิล์มที่เติมจุลินทรีย์ทั้งสามชนิดมีความหนาเพิ่มจาก 50.00 เป็น 100.00 ไมโครเมตร และค่าการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มจาก 1.45 เป็น 2.11 $\text{g}\cdot\text{mm}/\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{kPa}$ แสดงให้เห็นว่าสมบัติการต้านทานการซึมผ่านไอน้ำลดลง ฟิล์มที่เสริมโพรไบโอติกนี้มีค่าความต้านแรงดึงอยู่ในช่วง 0.42–1.49 MPa และการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) 20.45–28.62% โดยที่ฟิล์มดังกล่าวสามารถยับยั้ง *S. aureus* ได้ดีกว่า *E. coli* โดยมีบริเวณยับยั้งเท่ากับ 23.00–24.75 และ 15.50–19.00 มิลลิเมตร ตามลำดับ และคงอัตราการรอดชีวิตของโพรไบโอติกหลังการทำแห้งได้ 81.79–90.57% ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าโพรไบโอติกอาจเปลี่ยนแปลงโครงสร้างฟิล์มและประสิทธิภาพการใช้งานได้โดยตรงเมื่อเปรียบเทียบกับระบบฟิล์มที่มีส่วนผสมหรือเสริมโพรไบโอติกของ Pop และคณะ [29] พบว่าการเติมโพรไบโอติกในฟิล์มและสารเคลือบสามารถเพิ่มศักยภาพของอาหารเชิงหน้าที่ได้ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเมทริกซ์ สภาวะการผลิต ความชื้นของฟิล์ม และสภาวะการเก็บรักษา รายงานของ Semwal และคณะ [30] พัฒนาฟิล์มโซเดียมเคซีเนต (sodium caseinate) ที่เติม *Limosilactobacillus fermentum* NKN51 และ *Lactobacillus brevis* NKN52 โดยใช้สารเมือกจากเมล็ดเจีย (chia seed mucilage) เป็นสารปกป้องเซลล์ การเพิ่มสารเมือกจากเมล็ดเจียสามารถเพิ่มการรอดชีวิตของโพรไบโอติกได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสัมพันธ์กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างพอลิแซ็กคาไรด์ในสารเมือกกับเมทริกซ์โปรตีนของโซเดียมเคซีเนต ซึ่งส่งผลให้ฟิล์มมีความยืดหยุ่นเพิ่มขึ้นและการละลายน้ำลดลง ผลการตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่าเซลล์โพรไบโอติกที่อยู่ในฟิล์มยังคงอยู่ในสภาพสมบูรณ์ เมื่อนำฟิล์มไปประยุกต์ใช้ในการเคลือบขนมปังจากแป้งสาลี โพรไบโอติกสามารถรอดชีวิตได้นาน 3 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 4 °C และ 2 สัปดาห์ที่อุณหภูมิ 25 °C ผลการศึกษาดังกล่าวทำให้ฟิล์มมีศักยภาพเป็นพาหะสำหรับปกป้องและนำส่งโพรไบโอติกจนถึงการบริโภค และรายงาน Boubakeur และคณะ [32] พัฒนาสารเคลือบซินไบโอติกจากโซเดียมอัลจินเตที่มีโพรไบโอติก *Lactiplantibacillus plantarum* subsp. *plantarum* DSM 20205 และอินูลิน 1% (w/v) เป็นพรีไบโอติก

สำหรับมะม่วงดัดแต่ง หลังเก็บรักษาที่ 4 °C เป็นเวลา 5 วัน สูตรซินไบโอติกคงจำนวนโพรไบโอติกได้ 6.53 log CFU/g ซึ่งสูงกว่าสูตรที่ไม่เติมอินูลิน (5.61 log CFU/g) และไม่พบการเจริญของแบคทีเรียชอบอุณหภูมิต่ำ ยีสต์ และรา ซึ่งสะท้อนแนวทางการประยุกต์ใช้ที่ใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์จริงมากกว่าการศึกษาเฉพาะสมบัติฟิล์มในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากผลไม้ดัดแต่งมีความชื้นสูง กรดอินทรีย์ และจุลินทรีย์ประจำถิ่น ซึ่งอาจส่งผลต่อทั้งความคงตัวของฟิล์มและการรอดชีวิตของโพรไบโอติก [32, 33] ซึ่งแนวทางการใช้โพรไบโอติกร่วมกับพรีไบโอติกยังสอดคล้องกับกรอบความเข้าใจเรื่องซินไบโอติกและอาหารหมักที่เน้นการทำงานร่วมกันระหว่างจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์และชั้นสเตรตที่สนับสนุนการเจริญของจุลินทรีย์

ดังนั้นการพัฒนาฟิล์มอัลจินตที่มีโพรไบโอติกจึงจำเป็นต้องประเมินทั้งในมิติของวัสดุบรรจุภัณฑ์และมิติของการนำส่งจุลินทรีย์ ได้แก่ การรอดชีวิตของเซลล์หลังการเตรียมฟิล์มและในระหว่างการเก็บรักษา ความทนต่อสภาวะจำลองระบบทางเดินอาหาร ความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของเซลล์ในฟิล์ม และผลของเซลล์ต่อสมบัติเชิงกล สมบัติด้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ และความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์อาหาร [29] อีกทั้งการเลือกสายพันธุ์โพรไบโอติกควรพิจารณาความปลอดภัย ความเข้ากันได้กับอัลจินต ความทนต่อสารออกฤทธิ์ที่ใช้เป็นส่วนผสม และความเหมาะสมต่ออาหารเป้าหมาย เพื่อให้ฟิล์มทำหน้าที่เป็นทั้งวัสดุบรรจุภัณฑ์และพาหะนำส่งโพรไบโอติกพร้อมอาหารผ่านระบบทางเดินอาหารไปยังลำไส้ โดยยังคงการรอดชีวิตของเซลล์ในระดับที่เหมาะสม

3. สารต้านอนุมูลอิสระในฟิล์มบรรจุภัณฑ์เชิงหน้าที่

สารต้านอนุมูลอิสระเป็นสารที่สามารถยับยั้งหรือชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งเป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญของการเสื่อมคุณภาพของอาหาร โดยเฉพาะอาหารที่มีไขมัน โปรตีน หรือสารสีธรรมชาติเป็นองค์ประกอบ การเกิดออกซิเดชันของไขมันสามารถนำไปสู่การเกิดกลิ่นหืน การเปลี่ยนแปลงสี การสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการ และการลดคุณภาพทางประสาทสัมผัส ดังนั้นการเติมสารต้านอนุมูลอิสระในเมทริกซ์ของฟิล์มชีวพอลิเมอร์จึงเป็นแนวทางสำคัญในการพัฒนาบรรจุภัณฑ์เชิงหน้าที่ที่สามารถช่วยรักษาคุณภาพอาหารระหว่างการเก็บรักษา [5, 9, 24, 25, 34]

ในระบบฟิล์มอัลจินต สารต้านอนุมูลอิสระสามารถออกฤทธิ์ได้หลายกลไก ได้แก่ การจับอนุมูลอิสระ การให้ไฮโดรเจนหรืออิเล็กตรอนแก่สารออกซิแดนท์ การจับโลหะไอออนที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการลดผลกระทบจากออกซิเจนหรือแสงที่กระตุ้นการเสื่อมคุณภาพของอาหาร [5, 10] สารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติ เช่น สารประกอบฟีนอลิก กรดแทนนิก สารสกัดจากชาเขียว สารสกัดจากพืช สมุนไพร หรือสาหร่าย สามารถเพิ่มทั้งฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ และสมบัติเชิงหน้าที่ของฟิล์ม [5, 9, 10, 26, 34, 35] งานวิจัยก่อนหน้านี้ชี้ให้เห็นว่าสารต้านอนุมูลอิสระแต่ละชนิดส่งผลต่อฟิล์มอัลจินตแตกต่างกัน โดยงานวิจัยของ Li และคณะ [5] พบว่าการเติมกรดแทนนิก 1% ในสารละลายขึ้นรูปฟิล์มโซเดียมอัลจินต ช่วยเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจาก 0.008% เป็น 89.02% และเพิ่มฤทธิ์ยับยั้ง *E. coli* DH5alpha นอกจากนี้พันธะไฮโดรเจนระหว่างกรดแทนนิกกับอัลจินตช่วยให้โครงข่ายฟิล์มแน่นขึ้น ส่งผลให้การซึมผ่านของไอน้ำลดลง ผลการศึกษาของ Dysjaland และคณะ [10] แสดงให้เห็นว่าการเติมผงสาหร่ายทะเล *Laminaria hyperborea* ปริมาณ 10–50% (w/w เทียบกับน้ำหนักอัลจินต) ช่วยเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและลดการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม อย่างไรก็ตามการเติมผงสาหร่ายทำให้ความต้านแรงดึงและการยืดตัว ณ จุดขาดลดลง ส่วนการใช้น้ำที่ผ่านการกระตุ้นด้วยพลาสมาในการเตรียมฟิล์มช่วยเพิ่มความต้านแรงดึงและเสริมสมบัติด้านทานการซึมผ่านของไอน้ำเมื่อเทียบกับการใช้น้ำกลั่น นอกจากนี้สารละลายขึ้นรูปฟิล์มที่เตรียมด้วยน้ำดังกล่าวยังสามารถยับยั้ง *E. coli* และ *S. aureus* ได้ ขณะที่รายงานของ Yang และคณะ [27] นำกากธัญพืชจากกระบวนการกลั่นที่ผ่านการปรับสภาพด้วยตัวทำละลายยูเทกติกเชิงลึก (deep eutectic solvent; DES) มาผสมกับโซเดียมอัลจินตเพื่อผลิตฟิล์มคอมโพสิต พบว่าฟิล์มมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและสมบัติด้านทานการซึมผ่านของไอน้ำดีขึ้น รวมทั้งมีความต้านแรงดึง 31.58 mPa การยืดตัว ณ จุดขาด 5.53 % โดยมีความคงตัวทางความร้อนและสามารถย่อยสลายได้ งานวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าอัลจินตสามารถใช้เป็นเมทริกซ์สำหรับกักเก็บและนำส่งสารออกฤทธิ์จากธรรมชาติได้ อย่างไรก็ตามสมบัติของฟิล์มและการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสาร รวมถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารดังกล่าวกับโครงข่ายอัลจินต งานวิจัย Benlloch-Tinoco และคณะ [9] เตรียมฟิล์มจากโซเดียมอัลจินตร้อยละ 0.5–2.0 (w/v) และ



สารสกัดชาเขียวร้อยละ 25–50 (w/w) พบว่าฟิล์มที่เติมสารสกัดชาเขียวร้อยละ 25 มีการยืดตัว ณ จุดขาดประมาณร้อยละ 14 และปลดปล่อยพอลิฟีนอลได้ช้ากว่าสูตรที่เติมร้อยละ 50 ซึ่งมีการยืดตัวประมาณร้อยละ 6 นอกจากนี้ฟิล์มที่มีอัลจินต์ร้อยละ 2 สามารถปลดปล่อยพอลิฟีนอลภายใต้แบบจำลองการย่อยอาหารได้ร้อยละ 54.41 โดยมีค่าสูงกว่าสารสกัดชาเขียวซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 33.73 แสดงให้เห็นว่าเมทริกซ์อัลจินต์ช่วยควบคุมการปลดปล่อยและเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงทางชีวภาพของพอลิฟีนอลได้

ขณะที่ Lopes และคณะ [34] ศึกษาการเติมสารสกัดจากใบเสจ (*Salvia officinalis*) ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus obliqua*) ไทม์ (*Thymus vulgaris*) และชะเอมเทศ (*Glycyrrhiza glabra*) ในสารเคลือบและฟิล์มอัลจินต์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 (w/v) พบว่าสารเคลือบที่เติมสารสกัดส่วนใหญ่สามารถยับยั้งหรือลดการเจริญของแบคทีเรียที่ทดสอบ โดยฟิล์มที่เติมสารสกัดชะเอมเทศและยูคาลิปตัสที่สามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมบวก ได้แก่ *Bacillus cereus*, *Listeria monocytogenes* และ *S. aureus* ขณะที่ฟิล์มทุกสูตรไม่สามารถยับยั้งแบคทีเรียแกรมลบ ได้แก่ *E. coli* และ *Pseudomonas aeruginosa* ได้ และฟิล์มทุกสูตรที่เติมสารสกัดมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ผลการศึกษานี้สะท้อนว่าประสิทธิภาพของสารออกฤทธิ์ขึ้นอยู่กับชนิดของสารสกัด รูปแบบการใช้เป็นสารเคลือบหรือฟิล์ม และชนิดของจุลินทรีย์เป้าหมาย นอกจากนี้รายงานของ Gheorghita และคณะ [36] แสดงให้เห็นว่าฟิล์มและสารเคลือบโซเดียมอัลจินต์มีศักยภาพในการลดการสูญเสียน้ำหนักและชะลอการเปลี่ยนแปลงของสีและเนื้อสัมผัสในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ การเติมสารออกฤทธิ์จากธรรมชาติ โดยเฉพาะน้ำมันหอมระเหยจากโรสแมรี่ ออริกาน ออบเชย และกานพลู ยังช่วยเพิ่มฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์และชะลอการเกิดออกซิเดชันของไขมันได้ จึงมีศักยภาพเป็นวัสดุบรรจุภัณฑ์ชีวภาพสำหรับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ อย่างไรก็ตามยังต้องพิจารณาความปลอดภัย สมบัติเชิงกล คุณภาพทางประสาทสัมผัส และความเหมาะสมต่ออาหารแต่ละชนิดก่อนนำไปใช้จริง และรายงานของ Xie และคณะ [24] รวบรวมการประยุกต์ใช้ฟิล์มไบโอบีโกลได้จากพอลิเมอร์ธรรมชาติหลายชนิดที่เติมสารสกัดจากพืช เช่น สารสกัดจากเปลือกส้มแปรรูปในฟิล์มอัลจินต์สำหรับเนื้อวัว สารสกัดจากใบผักโขมในฟิล์มสำหรับเนื้อไก่และปลา และสารสกัดจากกากช็อคโกแลตในฟิล์มแปรงสำหรับเนื้อวัวแช่เย็น ผลการศึกษาที่รวบรวมไว้แสดงให้เห็นว่าฟิล์มดังกล่าวสามารถช่วยรักษาสี ชะลอการเกิดออกซิเดชันและการเจริญของจุลินทรีย์ ตลอดจนยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ สัตว์ปีก และสัตว์น้ำได้ ทั้งนี้ประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ สารสกัด และอาหารที่นำไปใช้

อย่างไรก็ตามการเติมสารออกฤทธิ์ลงในฟิล์มยังมีข้อจำกัด ซึ่งการเติมสารสกัดธรรมชาติในปริมาณสูงอาจส่งผลให้ฟิล์มมีสีเข้มขึ้น ความโปร่งใสลดลง โครงสร้างไม่สม่ำเสมอ เกิดการแยกเฟส หรือมีผลต่อกลิ่นและรสของอาหาร [26, 34] ดังนั้นการพัฒนาฟิล์มอัลจินต์ที่มีสารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติยังต้องศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมระหว่างฤทธิ์ทางชีวภาพ คุณภาพของฟิล์ม และการยอมรับของผู้บริโภค หากมุ่งเน้นที่การเพิ่มฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระโดยไม่พิจารณาสมบัติเชิงกล สี กลิ่น หรือความเหมาะสมกับอาหารเป้าหมาย ฟิล์มที่พัฒนาขึ้นอาจมีข้อจำกัดในการนำไปใช้จริง

4. ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอัลจินต โปรไบโอติก และสารต้านอนุมูลอิสระ

การพัฒนาฟิล์มอัลจินต์ที่เสริมทั้งโปรไบโอติกและสารต้านอนุมูลอิสระมีความซับซ้อนมากกว่าการเติมองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่ง เนื่องจากระบบดังกล่าวเกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างเมทริกซ์พอลิเมอร์ เซลล์จุลินทรีย์ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ปฏิสัมพันธ์เหล่านี้อาจส่งผลทั้งเชิงบวกและเชิงลบต่อคุณสมบัติของฟิล์ม ความมีชีวิตของโปรไบโอติก และประสิทธิภาพของสารต้านอนุมูลอิสระ [29, 31]

ในเชิงโครงสร้างนั้นอัลจินต์ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์หลักที่สร้างโครงข่ายพอลิเมอร์เพื่อกักเก็บเซลล์และสารออกฤทธิ์การมีโปรไบโอติกอยู่ภายในฟิล์มอาจเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของโครงสร้าง ความหยาบของพื้นผิว ความทึบแสง ความสามารถในการดูดซับน้ำ และสมบัติต้านทานการซึมผ่านไอน้ำของฟิล์ม [6, 7, 31] ในขณะเดียวกันสารต้านอนุมูลอิสระ โดยเฉพาะสารประกอบฟีนอลิก อาจเกิดปฏิสัมพันธ์กับอัลจินต์ผ่านพันธะไฮโดรเจนหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ส่งผลต่อความแข็งแรงเชิงกล ความยืดหยุ่น และอัตราการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ [5, 37] เมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มอัลจินต์ที่เติมสารต้านอนุมูลอิสระกับฟิล์มอัลจินต์ที่เติมโปรไบโอติก พบว่าทั้งสองระบบมีเป้าหมายเชิงหน้าที่แตกต่างกัน ฟิล์มที่เติมสาร

ด้านอนุมูลอิสระมุ่งลดการเกิดออกซิเดชันและรักษาคุณภาพอาหาร โดยเฉพาะอาหารที่มีไขมันหรือสารสีธรรมชาติ [5, 9, 24, 38] ในขณะที่ฟิล์มเติมโพรไบโอติกมุ่งเพิ่มคุณค่าเชิงสุขภาพ และอาจช่วยยับยั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้อาหารเสื่อมเสียผ่านสารเมแทบอลิต์ของจุลินทรีย์ [29] เมื่อรวมสององค์ประกอบนี้ในฟิล์มเดียวกัน ทำให้เกิดระบบหลายหน้าที่ที่สามารถทำหน้าที่ทั้งปกป้องอาหาร ยืดอายุการเก็บรักษา และนำเสนอองค์ประกอบเชิงสุขภาพ อย่างไรก็ตามการรวมสารต้านอนุมูลอิสระและโพรไบโอติกในเมทริกซ์เดียวกัน ยังต้องพิจารณาความเข้ากันได้ทางชีวภาพ ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระอาจช่วยลดความเครียดจากออกซิเดชันภายในระบบฟิล์มและสนับสนุนอัตราการรอดชีวิตของโพรไบโอติก โดยเฉพาะในสภาวะที่มีออกซิเจน ความชื้น หรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิระหว่างการเก็บรักษา [9, 29] และในทางตรงกันข้ามสารสกัดจากพืชหรือสารประกอบฟีนอลิกบางชนิดมีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์สูง จึงอาจลดอัตราการรอดชีวิตของโพรไบโอติก หากเลือกชนิดหรือความเข้มข้นไม่เหมาะสม [7, 26, 34, 37] ดังนั้นการเลือกสารต้านอนุมูลอิสระจึงควรพิจารณาทั้งฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน ฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ และผลต่อการรอดชีวิตของโพรไบโอติกด้วย

ในเชิงวัสดุศาสตร์โพรไบโอติกอาจทำหน้าที่คล้ายอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ฟิล์ม ส่งผลต่อพื้นผิวของฟิล์ม ความทึบแสง และสมบัติด้านทานการซึมผ่านของไอน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป [6, 7, 31] ส่วนสารประกอบฟีนอลิกอาจเกิดปฏิสัมพันธ์กับสายพอลิเมอร์ของอัลจินเตผ่านพันธะไฮโดรเจนหรือแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ทำให้ความแข็งแรงหรือความยืดหยุ่นของฟิล์มเปลี่ยนแปลงเช่นกัน [5, 9, 27] หากเติมทั้งโพรไบโอติกและสารต้านอนุมูลอิสระพร้อมกัน อาจส่งผลต่อผลรวมของปฏิสัมพันธ์หลายระดับ ได้แก่ พอลิเมอร์กับเซลล์ พอลิเมอร์กับสารออกฤทธิ์ และเซลล์กับสารออกฤทธิ์ ดังนั้นการประเมินเพื่อพัฒนาฟิล์มให้มีประสิทธิภาพ จึงควรครอบคลุมสมบัติเชิงกล สมบัติด้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ การรอดชีวิตของโพรไบโอติก การปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ และประสิทธิภาพการประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์อาหาร ดังนั้นแนวคิดสำคัญในการพัฒนาฟิล์มอัลจินเตเชิงหน้าที่จำเป็นต้องสร้างสมดุลระหว่างสมบัติของวัสดุกับหน้าที่ทางชีวภาพ กล่าวคือฟิล์มต้องมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นเพียงพอต่อการใช้งาน รวมทั้งมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำที่เหมาะสมกับอาหารเป้าหมาย ขณะเดียวกันเมทริกซ์ฟิล์มต้องช่วยรักษาการรอดชีวิตของโพรไบโอติกระหว่างการผลิตและการเก็บรักษา ตลอดจนควบคุมการปลดปล่อยสารต้านอนุมูลอิสระให้มีปริมาณและระยะเวลาที่เพียงพอต่อการชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชันและการเสื่อมคุณภาพของอาหาร ทั้งนี้การเติมโพรไบโอติกหรือสารออกฤทธิ์ในปริมาณสูงอาจรบกวนโครงสร้างของฟิล์ม ทำให้ฟิล์มเปราะหรือมีการซึมผ่านของไอน้ำเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงควรกำหนดชนิดและความเข้มข้นขององค์ประกอบจากการประเมินทั้งสมบัติของฟิล์มและประสิทธิภาพเมื่อใช้กับอาหารจริง [11, 26, 31, 33]

5. การประเมินสมบัติของฟิล์มอัลจินเตเชิงหน้าที่

การประเมินคุณสมบัติของฟิล์มอัลจินเตเชิงหน้าที่ควรครอบคลุมทั้งสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติด้านทานการซึมผ่านของไอน้ำ สมบัติทางชีวภาพ และประสิทธิภาพในการใช้งานจริง เนื่องจากฟิล์มประเภทนี้ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นวัสดุป้องกันอาหารเท่านั้น แต่ยังทำหน้าที่เป็นระบบนำส่งโพรไบโอติกและสารต้านอนุมูลอิสระ [7, 11, 23] สามารถสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 1 การประเมินคุณสมบัติที่ครอบคลุมจะช่วยอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของฟิล์ม โครงสร้างของเมทริกซ์ และประสิทธิภาพเชิงหน้าที่ของฟิล์มได้อย่างเป็นระบบ โดยสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนา ความชื้น ปริมาณน้ำอิสระ (water activity) ความสามารถในการละลายน้ำ สี ความโปร่งใส และความทึบแสง ซึ่งค่าเหล่านี้มีผลโดยตรงต่อความเหมาะสมในการใช้งานและการยอมรับของผู้บริโภค โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้มองเห็นลักษณะของอาหารภายในบรรจุภัณฑ์ [5, 11, 17, 33] การเติมโพรไบโอติกหรือสารสกัดธรรมชาติอาจทำให้ฟิล์มมีสีเข้มขึ้น ทึบแสงมากขึ้น หรือเกิดความไม่สม่ำเสมอของผิวฟิล์ม จึงควรควบคุมสูตรให้เหมาะสมกับอาหารเป้าหมาย [31] สมบัติเชิงกลเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่กำหนดความสามารถของฟิล์มในการทนต่อการจับ การห่อหุ้ม และการขนส่ง ตัวชี้วัดที่นิยมใช้ ได้แก่ tensile strength, elongation at break และ Young's modulus [5, 11, 13, 23, 26] ฟิล์มที่มี tensile strength สูงเกินไปแต่ elongation ต่ำอาจเปราะและฉีกขาดง่าย ขณะที่ฟิล์มที่มีความยืดหยุ่นมากเกินไปอาจขาดความคงตัวของรูปทรง ดังนั้นการปรับสภาวะที่เหมาะสมระหว่างความแข็งแรงและความยืดหยุ่นจึงเป็นประเด็นสำคัญในการพัฒนาฟิล์มเชิงหน้าที่ [17, 26, 38] สมบัติด้านการต้านการ



ซึมผ่านของฟิล์มประเมินได้จากค่าการซึมผ่านของไอน้ำ (water vapour permeability) และค่าการซึมผ่านของออกซิเจน (oxygen permeability) เป็นตัวชี้วัดสำคัญสำหรับการประเมินความสามารถของฟิล์มในการลดการถ่ายเทไอน้ำและออกซิเจนระหว่างอาหารกับสิ่งแวดล้อม โดยค่าการซึมผ่านที่ต่ำแสดงว่าฟิล์มสามารถป้องกันการถ่ายเทของสารดังกล่าวได้ดี [4, 5, 10, 11] โดยที่ฟิล์มอัลจินเตสามารถต้านการซึมผ่านของออกซิเจนได้ดี แต่มีข้อจำกัดในการต้านการซึมผ่านของไอน้ำ เนื่องจากอัลจินเตมีโครงสร้างที่ชอบน้ำ ดังนั้นการเติมลพิดซึ่งมีสมบัติไม่ชอบน้ำ สารเชื่อมขวาง หรือวัสดุนาโนจึงเป็นแนวทางที่ช่วยลดการซึมผ่านของไอน้ำและเพิ่มประสิทธิภาพของฟิล์มได้ [13, 18, 20, 38]

สำหรับฟิล์มที่มีโพรไบโอติก จำเป็นต้องประเมินความมีชีวิตของจุลินทรีย์ทั้งหลังการเตรียมฟิล์ม ระหว่างการเก็บรักษา และหลังผ่านสภาวะจำลองระบบทางเดินอาหาร [29, 31] ตัวชี้วัดที่ควรพิจารณาในการพัฒนาฟิล์มดังกล่าว ได้แก่ ปริมาณจุลินทรีย์ในหน่วย log CFU/g หรือ log CFU/หน่วยบริโภค (CFU/portion) อัตราการรอดชีวิตหลังการทำแห้ง และความคงตัวของเซลล์ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความชื้นต่าง ๆ สำหรับฟิล์มที่มีสารต้านอนุมูลอิสระ ควรประเมินความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS ความสามารถในการรีดิวซ์ไอออนเฟอร์ริก (ferric reducing antioxidant power; FRAP) รวมถึงความสามารถในการลดตัวบ่งชี้การเกิดออกซิเดชันของไขมัน (lipid oxidation markers) ในอาหารจริง เช่น ค่า TBARS และค่าเปอร์ออกไซด์ [7, 8, 29, 37]

ตารางที่ 1 แนวทางการประเมินสมบัติสำคัญของฟิล์มอัลจินเตเชิงหน้าที่

คุณสมบัติสำคัญ	ตัวชี้วัด	การประเมิน	อ้างอิง
กายภาพ	ความหนา ความชื้น สี ความโปร่งใส	บ่งชี้ความสม่ำเสมอ ความคงตัว	[4, 11, 17]
	ความสามารถในการละลายน้ำ	และความเหมาะสมต่อการใช้งาน	
เชิงกล	tensile strength, elongation, Young's modulus	ประเมินความแข็งแรง ความยืดหยุ่น และความทนทานของฟิล์ม	[4, 11, 17, 31]
การต้านการซึมผ่าน	water vapor permeability, oxygen permeability	ประเมินความสามารถในการลดการถ่ายเทไอน้ำและออกซิเจน	[4, 10, 11, 17, 27]
ชีวภาพ	antioxidant activity, antimicrobial activity	ประเมินบทบาทของฟิล์มเชิงออกฤทธิ์ในการชะลอการเสื่อมคุณภาพ	[5, 7, 10, 26, 34, 35]
	log CFU/g, survival rate, simulated gastrointestinal tolerance	ประเมินความเหมาะสมของฟิล์มในฐานะระบบนำส่งโพรไบโอติก	[6-8, 28-32, 37]
การใช้งานจริง	shelf-life test, sensory quality, microbial quality, oxidation markers	ประเมินประสิทธิภาพของฟิล์มในผลิตภัณฑ์อาหารจริง	[8, 9, 24, 32-38]

6. การประยุกต์ใช้กับอาหารและข้อจำกัดเชิงอุตสาหกรรม

ฟิล์มอัลจินเตเชิงหน้าที่สามารถประยุกต์ใช้กับอาหารได้หลายกลุ่ม โดยเฉพาะอาหารที่ต้องการการปกป้องผิวหน้า ลดการสูญเสีย น้ำ ชะลอการออกซิเดชัน หรือเสริมคุณค่าเชิงสุขภาพ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ ได้แก่ ผลไม้ตัดแต่ง ผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ อาหารพร้อมบริโภค และอาหารที่มีความไวต่อปฏิกิริยาออกซิเดชัน [8, 15, 30, 32, 36, 38] การพัฒนาฟิล์มลักษณะนี้ยังสอดคล้องกับแนวโน้มการลดผลกระทบจากบรรจุภัณฑ์พลาสติก การใช้วัสดุชีวพอลิเมอร์ และการออกแบบบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีความยั่งยืนมากขึ้น [2, 14, 39-41] ซึ่งผลิตภัณฑ์อาหารที่เหมาะสมกับฟิล์มอัลจินเตเชิงหน้าที่แบ่งได้เป็นสามกลุ่มหลัก กลุ่มแรกคือผลไม้และผักตัดแต่ง ซึ่งต้องการฟิล์มหรือสารเคลือบที่ช่วยลดการสูญเสีย น้ำ ชะลอการหายใจ ลดการ

เปลี่ยนสี และอาจเสริมโพรไบโอติกหรือพรีไบโอติกได้ [32, 33] กลุ่มที่สองคือผลิตภัณฑ์เบเกอรี่หรืออาหารพร้อมบริโภค ซึ่งอาจใช้ฟิล์มเป็นตัวพาโพรไบโอติกโดยหลีกเลี่ยงการสัมผัสความร้อนสูงโดยตรง [30] กลุ่มที่สามคือผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์หรืออาหารที่มีไขมัน ซึ่งต้องการฟิล์มที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและต้านจุลินทรีย์เพื่อลดกลิ่นหืนและชะลอการเสื่อมคุณภาพ [24, 36, 38] โดยที่การเลือกใช้ฟิล์มกับอาหารแต่ละกลุ่มจำเป็นต้องกำหนดเป้าหมายเชิงหน้าที่ให้ชัดเจน ซึ่งไม่ควรใช้สูตรเดียวกันกับอาหารทุกประเภท

แม้ว่าฟิล์มอัลจินเตเชิงหน้าที่มีศักยภาพสูง แต่การนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมยังมีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ ความไวต่อความชื้น ความเปราะบางของฟิล์มในบางสูตร ความไม่สม่ำเสมอของการกระจายตัวของสารออกฤทธิ์ ความคงตัวของโพรไบโอติกระหว่างการผลิตและขนส่ง ต้นทุนของสารออกฤทธิ์ และข้อกำหนดด้านความปลอดภัยของวัสดุสัมผัสอาหาร [4, 11, 26, 31] นอกจากนี้การขยายขนาดการผลิตจากระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับอุตสาหกรรมต้องการการควบคุมความสม่ำเสมอของฟิล์ม ความหนา ความขึ้นคงเหลือ ระยะเวลาในการทำแห้ง และความคงตัวของสารออกฤทธิ์ [14-16] อีกทั้งการประเมินประสิทธิภาพของฟิล์มในระบบอาหารจริงยังมีความซับซ้อนซึ่งยังเป็นข้อจำกัด เนื่องจากสมบัติของอาหาร เช่น ความชื้น ความเป็นกรดต่าง ปริมาณไขมัน โปรตีน เกลือ และจุลินทรีย์ สามารถส่งผลกระทบต่อการทำงานของฟิล์ม การปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ และการรอดชีวิตของโพรไบโอติกได้ [9, 24, 33, 34, 36] ดังนั้นแนวทางการศึกษาเพื่อพัฒนาฟิล์มอาจมุ่งเน้นการทดสอบในผลิตภัณฑ์อาหารจริงภายใต้สภาวะการเก็บรักษาที่เหมาะสม รวมถึงการประเมินความปลอดภัย การยอมรับของผู้บริโภค และความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ [9, 16, 24, 33, 34, 36, 41] ดังรายละเอียดสรุปในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ข้อจำกัด ผลกระทบ และแนวทางพัฒนาของฟิล์มอัลจินเตเชิงหน้าที่

ข้อจำกัด	ผลกระทบต่อการใช้งาน	แนวทางพัฒนา	อ้างอิง
สมบัติต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ	ฟิล์มดูดซับน้ำ พองตัว และสูญเสียความแข็งแรง	เติมลิพิด สร้างฟิล์มคอมโพสิต หรือใช้สารเชื่อมขวาง	[4, 11, 17, 27]
ความเปราะหรือความแข็งแรงไม่เพียงพอ	ฉีกขาดง่ายระหว่างการห่อหุ้มและขนส่ง	ปรับชนิดและปริมาณพลาสติไซเซอร์ หรือเติมสารเสริมแรง	[4, 11, 17, 27, 31]
ความมีชีวิตของโพรไบโอติกลดลง	ประสิทธิภาพเชิงสุขภาพลดลง	ใช้สารปกป้องเซลล์ พรีไบโอติก หรือควบคุมสภาวะการทำแห้ง	[6-8, 29-32, 37]
การปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ไม่เหมาะสม	ออกฤทธิ์เร็วหรือช้าเกินไป	ปรับโครงสร้างเมทริกซ์ ความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ และสภาวะการเก็บรักษา	[5, 9, 24, 27, 34, 35]
สี กลิ่น หรือรสจากสารสกัดธรรมชาติ	อาจลดการยอมรับของผู้บริโภค	เลือกสารสกัดที่เหมาะสมกับอาหาร เป้าหมายและประเมินทางประสาทสัมผัส	[9, 24, 34, 36]
การขยายผลเชิงอุตสาหกรรม	คุณสมบัติฟิล์มไม่สม่ำเสมอ และต้นทุนสูง	พัฒนากระบวนการขึ้นรูป การทำแห้ง และการควบคุมคุณภาพอย่างเป็นระบบ	[11, 14-16, 41]

7. สรุป

ฟิล์มอัลจินเตเสริมโพรไบโอติกและสารต้านอนุมูลอิสระมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารเชิงหน้าที่ โดยผสมสมบัติของวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเข้ากับความสามารถในการปกป้องอาหาร ชะลอปฏิกิริยาออกซิเดชัน และนำส่งโพรไบโอติก อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของฟิล์มไม่ได้ขึ้นอยู่กับการเติมสารออกฤทธิ์เพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารออกฤทธิ์ สายพันธุ์โพรไบโอติก และปฏิสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบดังกล่าวกับเมทริกซ์อัลจินเต ซึ่งส่งผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจน การรอดชีวิตของโพรไบโอติก และการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ข้อจำกัดสำคัญของฟิล์มยังคงเป็นสมบัติต้านทานการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ ความไวต่อความชื้น ความเปราะบางของ



ฟิล์ม ความคงตัวของโพรไบโอติกระหว่างการเก็บรักษา และการขยายขนาดกระบวนการผลิต การพัฒนาในอนาคตจึงควรมุ่งสร้างสมดุลระหว่างสมบัติของวัสดุและประสิทธิภาพทางชีวภาพ พร้อมประเมินประสิทธิภาพ ความปลอดภัย และความคงตัวในผลิตภัณฑ์อาหารจริง เพื่อสนับสนุนการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมอย่างเหมาะสมและยั่งยืน ซึ่งสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับนักวิจัย ผู้พัฒนาวัสดุบรรจุภัณฑ์ และผู้ประกอบการอุตสาหกรรมอาหารในการคัดเลือกโพรไบโอติก สารต้านอนุมูลอิสระ และองค์ประกอบของฟิล์ม รวมถึงการออกแบบและประเมินสูตรฟิล์มให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์อาหารเป้าหมาย

เอกสารอ้างอิง

1. Marsh K, Bugusu B. Food packaging--roles, materials, and environmental issues. *J Food Sci* 2007;72(3):R39-55.
2. Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv* 2017;3(7):e1700782.
3. Wright SL, Kelly FJ. Plastic and human health: a micro issue? *Environ Sci Technol* 2017;51(12):6634-47.
4. Metha C, Pawar S, Suvarna V. Recent advancements in alginate-based films for active food packaging applications. *Sustain Food Technol* 2024;2(5):1246-65.
5. Li H, Liu C, Sun J, Lv S. Bioactive edible sodium alginate films incorporated with tannic acid as antimicrobial and antioxidative food packaging. *Foods* 2022;11(19):3044.
6. Medeiros JA, Otoni CG, Niro CM, Sivieri K, Barud HS, Guimarães FEG, et al. Alginate films as carriers of probiotic bacteria and Pickering emulsion. *Food Packag Shelf Life* 2022;34:100987.
7. Wardana AA, Wigati LP, Tanaka F, Tanaka F, Surono IS. Probiotic cells support alginate-based edible film properties: study of optical, water barrier and antifungal characteristics. *Int J Food Sci Technol* 2023;58(2):929-38.
8. Soukoulis C, Yonekura L, Gan H-H, Behboudi-Jobbehdar S, Parmenter C, Fisk I. Probiotic edible films as a new strategy for developing functional bakery products: the case of pan bread. *Food Hydrocoll* 2014;39:231-42.
9. Benlloch-Tinoco M, Gentile P, Taylor L, Girón-Hernández J. Alginate edible films as delivery systems for green tea polyphenols. *Food Hydrocoll* 2025;158:110518.
10. Dysjaland H, Sone I, Noriega Fernández E, Sivertsvik M, Sharmin N. Mechanical, barrier, antioxidant and antimicrobial properties of alginate films: effect of seaweed powder and plasma-activated water. *Molecules* 2022;27(23):8356.
11. Senturk Parreidt T, Müller K, Schmid M. Alginate-based edible films and coatings for food packaging applications. *Foods* 2018;7(10):170.
12. Elkaliny NE, Alzamel NM, Moussa SH, Elodamy NI, Madkor EA, Ibrahim EM, et al. Macroalgae bioplastics: a sustainable shift to mitigate the ecological impact of petroleum-based plastics. *Polymers* 2024;16(9):1246.
13. Pires JRA, Rodrigues C, Coelho I, Fernando AL, Souza VGL. Current applications of bionanocomposites in food processing and packaging. *Polymers* 2023;15(10):2336.
14. Martins VFR, Pintado ME, Morais RMSC, Morais AMMB. Recent highlights in sustainable bio-based edible films and coatings for fruit and vegetable applications. *Foods* 2024;13(2):318.



15. Gupta D, Lall A, Kumar S, Patil TD, Gaikwad KK. Plant-based edible films and coatings for food-packaging applications: recent advances, applications, and trends. *Sustain Food Technol* 2024;2(5):1428-55.
16. V AK, Hasan M, Mangaraj S, M P, Verma DK, Srivastav PP. Trends in edible packaging films and its prospective future in food: a review. *Appl Food Res* 2022;2(1):100118.
17. Cazón P, Velazquez G, Ramírez JA, Vázquez M. Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: a review. *Food Hydrocoll* 2017;68:136-48.
18. Priyadarshi R, Rhim J-W. Chitosan-based biodegradable functional films for food packaging applications. *Innov Food Sci Emerg Technol* 2020;62:102346.
19. Aranaz I, Alcántara AR, Civera MC, Arias C, Elorza B, Heras Caballero A, et al. Chitosan: an overview of its properties and applications. *Polymers* 2021;13(19):3256.
20. Bharathi VSK, Jayas DS. Evolution of bionanocomposites: innovations and applications in food packaging. *Foods* 2024;13(23):3787.
21. Basavegowda N, Baek K-H. Advances in functional biopolymer-based nanocomposites for active food packaging applications. *Polymers* 2021;13(23):4198.
22. Youssef AM, El-Sayed SM. Bionanocomposites materials for food packaging applications: concepts and future outlook. *Carbohydr Polym* 2018;193:19-27.
23. Khin MN, Ahammed S, Kamal MM, Saqib MN, Liu F, Zhong F. Investigating next-generation edible packaging: protein-based films and coatings for delivering active compounds. *Food Hydrocoll Health* 2024;6:100182.
24. Xie Q, Liu G, Zhang Y, Yu J, Wang Y, Ma X. Active edible films with plant extracts: an updated review of their types, preparations, reinforcing properties, and applications in muscle foods packaging and preservation. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2023;63(32):11425-47.
25. Chawla R, Sivakumar S, Kaur H. Antimicrobial edible films in food packaging: current scenario and recent nanotechnological advancements: a review. *Carbohydr Polym Technol Appl* 2021;2:100024.
26. Punia Bangar S, Chaudhary V, Thakur N, Kajla P, Kumar M, Trif M. Natural antimicrobials as additives for edible food packaging applications: a review. *Foods* 2021;10(10):2282.
27. Yang L, Yang Y, Yang Y, He K, Jiang G, Tian Y. Bioactive composite films with improved antioxidant and barrier properties prepared from sodium alginate and deep eutectic solvent treated distillers' grains. *Int J Biol Macromol* 2024;275:133376.
28. Swanson KS, Gibson GR, Hutkins R, Reimer RA, Reid G, Verbeke K, et al. The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of synbiotics. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol* 2020;17(11):687-701.
29. Pop OL, Pop CR, Dufrechou M, Vodnar DC, Socaci SA, Dulf FV, et al. Edible films and coatings functionalization by probiotic incorporation: a review. *Polymers* 2020;12(1):12.
30. Semwal A, Ambatipudi K, Navani NK. Development and characterization of sodium caseinate based probiotic edible film with chia mucilage as a protectant for the safe delivery of probiotics in functional bakery. *Food Hydrocoll Health* 2022;2:100065.



31. Kalkan S, Çopur SY, Akben SB, Otağ MR, Engin MS. Effect of incorporation of mix probiotic culture in sodium alginate film characteristics: antimicrobial, physiochemical, mechanical, and barrier properties. *Probiotics Antimicrob Proteins* 2025;17(5):3774-89.
32. Boubakeur H, Tanhaş E, Erci F. Alginate-based edible films loaded by probiotic and prebiotic for preservation of fresh-cut mango snacks. *Food Bioprocess Technol* 2026;19(3):127.
33. Otoni CG, Avena-Bustillos RJ, Azeredo HMC, Lorevice MV, Moura MR, Mattoso LHC, et al. Recent advances on edible films based on fruits and vegetables: a review. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 2017;16(5):1151-69.
34. Lopes AI, Melo A, Caleja C, Pereira E, Finimundy TC, Afonso TB, et al. Evaluation of antimicrobial and antioxidant activities of alginate edible coatings incorporated with plant extracts. *Coatings* 2023;13(9):1487.
35. Ning H, Lu L, Xu J, Lu L, Pan L, Lin Z. Development of sodium alginate-based antioxidant and antibacterial bioactive films added with IRMOF-3/carvacrol. *Carbohydr Polym* 2022;292:119682.
36. Gheorghita R, Gutt G, Amariei S. The use of edible films based on sodium alginate in meat product packaging: an eco-friendly alternative to conventional plastic materials. *Coatings* 2020;10(2):166.
37. Seyedzade Hashemi S, Khorshidian N, Mohammadi M. An insight to potential application of synbiotic edible films and coatings in food products. *Front Nutr* 2022;9:875368.
38. Sahraee S, Milani JM, Regenstein JM, Kafil HS. Protection of foods against oxidative deterioration using edible films and coatings: a review. *Food Biosci* 2019;32:100451.
39. Ncube LK, Ude AU, Ogunmuyiwa EN, Zulkifli R, Beas IN. Environmental impact of food packaging materials: a review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials. *Materials* 2020;13(21):4994.
40. Syarifuddin A, Muflih MH, Izzah N, Fadillah U, Ainani AF, Dirpan A. Pectin-based edible films and coatings: from extraction to application on food packaging towards circular economy: a review. *Carbohydr Polym Technol Appl* 2025;9:100680.
41. Hussain S, Akhter R, Maktedar SS. Advancements in sustainable food packaging: from eco-friendly materials to innovative technologies. *Sustain Food Technol* 2024;2(5):1297-364.