บรรจุภัณฑ์อาหารต้านจุลินทรีย์จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพผสมน้ำมันหอมระเหย

นวดล เพ็ชรวัฒนา* ปานทิพย์ บุญส่ง ศจีมาจ ณ วิเชียร และ สาลินี อาจารีย์

บทคัดย่อ

ในอดีต อันตรกิริยาระหว่างอาหารกับบรรจุภัณฑ์นั้นไม่ได้รับการยอมรับเนื่องจากมีความเชื่อว่าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหาร แต่ในปัจจุบัน หลายงานวิจัยได้พิสูจน์แล้วว่าการเกิดอันตรกิริยาบางอย่างระหว่างอาหารและบรรจุภัณฑ์นั้นไม่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของอาหาร อีกทั้งยังสามารถชะลอการเสื่อมเสียของอาหารได้ ดังนั้นเทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์จึงเป็นหนึ่งในแนวคิดที่เหนี่ยวนำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างอาหารและบรรจุภัณฑ์ในขณะที่รักษาคุณภาพทางโภชนาการ คุณสมบัติรวมทั้งความปลอดภัยของอาหารไว้ไม่เปลี่ยนไป โดยสารเติมแต่งที่นิยมใช้เพื่อเป็นสารต้านจุลินทรีย์เป็นสารกลุ่มน้ำมันหอมระเหยซึ่งได้จากการสกัดสารสำคัญทางธรรมชาติจากพืช โดยสารเหล่านี้สามารถออกฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทั้งในกลุ่ม เชื้อรา ยีสต์และแบคทีเรีย ซึ่งทำให้อาหารเสื่อมเสียและสามารถก่อโรคได้ ส่วนพลาสติกชีวภาพนั้นเป็นวัสดุที่มีแนวโน้มจะนำมาใช้เพื่อทดแทนพลาสติกจากปิโตรเลียมในอนาคต ในเชิงพาณิชย์นั้นได้มีการนำเอาพลาสติกชีวภาพมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารเนื่องจากมีสมบัติทางกลที่ดีพร้อมทั้งยังสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพอีกด้วย ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดปริมาณขยะพลาสติกจากปิโตรเลียมพร้อมทั้งยืดอายุของอาหารที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ นักวิจัยหลายกลุ่มจึงได้พัฒนาบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพต้านจุลินทรีย์ขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา บทความนี้ได้กล่าวถึง ข้อมูลเบื้องต้นของพลาสติกชีวภาพ การเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์ การเคลื่อนย้ายของสารต้านจุลินทรีย์จากบรรจุภัณฑ์สู่อาหารรวมไปถึงเทคโนโลยีการใช้สารต้านจุลินทรีย์ในบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพกับอาหารประเภทต่างๆ

คำสำคัญ : พลาสติกชีวภาพ, บรรจุภัณฑ์อาหาร, บรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์, การถ่ายเทมวล

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และสังคม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
* ผู้ติดต่อ, อีเมล์: nawadon_p@hotmail.com รับเมื่อ 28 กันยายน 2562 16 มีนาคม 2562

Antimicrobial Packaging from Biodegradable Plastics and Essential Oils Blends

Nawadon Petchwattana*, Panthip Boonsong, Sageemas Na Wichian and Salinee Acharry

Abstract

The interaction between food and packaging was unacceptable in the past. It was believed to be altered the food quality. However, numerous literatures have proven that the specific interactions between food and packaging do not affect the quality of the food and it can also slow down the deterioration of food. Antimicrobial packaging technology is one of the concepts that induce interactions between food and packaging while maintaining the food properties, safety and nutritional quality. Generally, the additives used as an antimicrobial agent are essential oils, which extracted from plants. These essential oils are able to inhibit the growth of fungus, yeast, bacteria, food spoilage and pathogenic microorganisms. Bioplastics is expected to replace plastics from petroleum in the near future. Commercially, bioplastics were used for the food packaging applications due to their good mechanical properties and biodegradability. To reduce the plastic wastes together with the shelf life extension of food, many researchers have developed antimicrobial bioplastic packaging in the past decade. This article discusses the introduction to bioplastics, deterioration of food due to microorganisms, migration of antimicrobial agents from packaging to food as well as the antimicrobial packaging technology with various foods.

Keywords : Bioplastics, Food packaging, Antimicrobial packaging, Mass transfer

[1] Department of Social and Applied Science, College of Industrial Technology, King Mongkut University of Technology North Bangkok.

* Corresponding author, E-mail: nawadon_p@hotmail.com

1. บทนำ

ในปัจจุบันขยะจากบรรจุภัณฑ์อาหารเป็นหนึ่งในขยะพลาสติกที่สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมในปริมาณมาก เนื่องจากใช้เวลานานหลายร้อยปีกว่าจะเกิดการสลายตัว อย่างไรก็ตาม บรรจุภัณฑ์เหล่านี้กลับถูกนำไปใช้บรรจุอาหารที่มีอายุสั้น ส่งผลให้เกิดขยะที่ไม่ย่อยสลายสะสมเป็นปริมาณมาก [1] ในช่วง 5-10 ปีมานี้ พลาสติกชีวภาพได้รับความสนใจจากทั้งภาคอุตสาหกรรมและภาคการวิจัยโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับการใช้งานประเภทใช้แล้วทิ้ง [2] พลาสติกชีวภาพนั้นสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพซึ่งสังเคราะห์มาจากวัตถุดิบธรรมชาติ [3] มีสมบัติทางกลและทางความร้อนคล้ายคลึงกับพลาสติกจากปิโตรเลียม เช่น พอลิเอธิลีน (Polyethylene, PE) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) และพอลิเอธิลีนเทเรฟทาเลท (Poly(ethylene terephthalate), PET) ทำให้พลาสติกชีวภาพมีแนวโน้มจะเป็นหนึ่งในพลาสติกที่สามารถนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอนาคตโดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารทดแทนบรรจุภัณฑ์อาหารที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

เป็นที่ทราบกันดีว่าอาหารนั้นเมื่ออยู่ในบรรจุภัณฑ์ช่วงระยะเวลาหนึ่งมักเกิดการเสื่อมสภาพในระหว่างการเก็บรักษา ส่งผลให้อาหารนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งสมบัติทางเคมี ทางกายภาพและทางชีวภาพ โดยมีสาเหตุหลักมาจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพที่ไม่พึงประสงค์และเป็นสิ่งที่ผู้บริโภคไม่ยอมรับ ส่งผลให้ต้องมีการใช้เทคนิคต่างๆเพื่อยืดอายุของอาหาร โดยวิธีการหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมคือการใส่สารกันบูดเพื่อชะลอการเน่าเสียของอาหาร อย่างไรก็ตาม รายงานการวิจัยระบุว่าหากร่างกายได้รับสารกันบูดในปริมาณน้อยร่างกายจะสามารถกำจัดออกได้ทางปัสสาวะ แต่ถ้าได้รับต่อเนื่องในปริมาณมากจะทำให้ ตับและไตทำงานหนัก [4] ส่งผลให้ต้องมีการออกกฎหมายเพื่อควบคุมปริมาณการใช้สารกันบูดในอาหารและผู้บริโภคส่วนหนึ่งไม่นิยมรับประทานอาหารที่ผสมสารกันบูดอีกด้วย

ในอดีต อันตรกิริยาระหว่างอาหารกับบรรจุภัณฑ์นั้นเป็นสิ่งที่ไม่ยอมรับเนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของอาหาร [2] แต่ในปัจจุบันงานวิจัยหลายชิ้นได้พิสูจน์แล้วว่าการเกิดอันตรกิริยาบางอย่างระหว่างอาหารและบรรจุภัณฑ์นั้นไม่ส่งผลเสียต่อคุณภาพของอาหาร แต่สามารถชะลอการเสื่อมเสียของอาหารได้ [5] เทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์นั้นเป็นหนึ่งในแนวคิดที่เหนี่ยวนำให้อันตรกิริยาระหว่างอาหารและบรรจุภัณฑ์ในขณะที่คุณภาพทางโภชนาการและความปลอดภัยอาหารไม่เปลี่ยนแปลง โดยสารที่นิยมใช้เพื่อเป็นสารต้านจุลินทรีย์เป็นสารกลุ่มน้ำมันหอมระเหยซึ่งได้จากการสกัดสารสำคัญทางธรรมชาติ ซึ่งสารเหล่านี้ออกฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทั้งในกลุ่ม เชื้อรา ยีสต์และแบคทีเรีย ซึ่งทำให้อาหารเสื่อมเสียและเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถก่อโรคได้ ตัวอย่างเช่น *Salmonella typhimurium, Escherichia coli, Staphylococcus aureus* และ *Yersinia enterocolitica* เป็นต้น การใช้บรรจุภัณฑ์ที่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์นับว่าเป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาคุณภาพชีวิตของผู้บริโภคได้อีกทางหนึ่ง

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่ออภิปรายถึงการใช้สารต้านจุลินทรีย์ในพลาสติกชีวภาพ กลไกการต้านจุลินทรีย์และการเคลื่อนย้ายของสารต้านจุลินทรีย์จากบรรจุ

ภัณฑ์รวมไปถึงการประยุกต์ใช้บรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์จากพลาสติกชีวภาพในปัจจุบันอีกด้วย

2. พลาสติกชีวภาพในเชิงพาณิชย์

พลาสติกชีวภาพนั้นมีมากมายหลายกลุ่ม ได้แก่ (1) กลุ่มที่ผลิตจากปิโตรเลียมแต่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (2) กลุ่มที่ผลิตจากสารชีวมวลแต่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพและ (3) ผลิตจากชีวมวลและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ในบทความนี้มุ่งเน้นอภิปรายพลาสติกกลุ่มที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เนื่องจากเป็นกลุ่มที่ตอบโจทย์ทางด้านสิ่งแวดล้อมมากที่สุด แม้พลาสติกชีวภาพนั้นมีการผลิตออกขายในเชิงพาณิชย์หลายชนิด แต่มีเพียงไม่กี่ชนิดที่นิยมนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ ตัวอย่างของพลาสติกชีวภาพที่มีการนำมาใช้ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ได้แก่ พอลิแลคติคแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Poly(butylene succinate), PBS) แป้งเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic starch, TPS) และเซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) เป็นต้น [6-8]

3. สารต้านจุลินทรีย์กลุ่มน้ำมันหอมระเหย

น้ำมันหอมระเหยเป็นสารประกอบระเหยง่าย มีกลิ่นหอมที่สกัดได้จากส่วนต่างๆ ของ พืช ได้แก่ ดอก ตา ใบ ผล กิ่ง เปลือก เมล็ดและราก เป็นต้น มีการนำมาใช้ครั้งแรกในอียิปต์ อินเดียและเปอร์เซียเมื่อ 2000 ก่อน โดยมีการพบฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียในช่วงหนึ่งศตวรรษที่ผ่านมา ปัจจุบันมีน้ำมันหอมระเหยหลายชนิดใช้เป็นสารต้านจุลินทรีย์ในบรรจุภัณฑ์อาหารดังแสดงในตารางที่ 1

4. การเสื่อมเสียของอาหาร

การเสื่อมเสียของอาหาร คือ การที่คุณภาพอาหารนั้นลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ผลิตเสร็จใหม่ เช่น การเปลี่ยนสี กลิ่น รสชาติ คุณค่าทางโภชนาการหรือเนื้อสัมผัสที่เปลี่ยนไปจนไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคซึ่งสามารถเกิดได้จาก 4 สาเหตุหลักได้แก่

(1) การเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ คือ การเสื่อมเสียของอาหารที่มีสาเหตุหลักมาจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ ซึ่งประกอบไปด้วย แบคทีเรีย รา และยีสต์ ซึ่งปนเปื้อนมากับอาหารและเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสมจุลินทรีย์เหล่านี้จะเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนขึ้นในอาหาร จนมีจำนวนมากเพียงพอที่จะทำให้คุณภาพอาหารเปลี่ยนไปจนไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้แก่ การเหม็นหืน การเหม็นเน่า การเกิดก๊าซและรสเปรี้ยว การเกิดเมือกที่ผิวหน้า การเกิดสีบนผิวหน้าอาหารและการเกิดเชื้อราที่ผิวหน้า [9-10] นอกจากนี้แล้ว การปนเปื้อนของจุลินทรีย์ในอาหารยังสามารถทำให้เกิดโรคได้ หากจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนในอาหารเหล่านั้นเป็นจุลินทรีย์ชนิดก่อโรค เช่น *Vibrio parahaemolyticus* ทำให้เกิดโรคอาหารเป็นพิษและกระเพาะอาหารอักเสบ *Salmonella typhimurium* ทำให้เกิดโรคซาลโมเนลโลซิส (Salmonellosis) ติดเชื้อในระบบทางเดินอาหารและลำไส้อักเสบ *Staphylococcus aureus* ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ อาเจียน วิงเวียน เป็นตะคริวในช่องท้องและอ่อนเพลีย *Yersinia enterocolitica* ทำให้เกิดอาการกระเพาะและลำไส้อักเสบ ท้องเสีย และอาเจียนและ *Clostridium perfringens* ทำให้เกิดอาการคลื่นไส้ ปวดท้องและท้องร่วง เป็นต้น [4,9-10]

(2) การเสื่อมเสียทางกายภาพ คือ การเสื่อมเสียที่เกิดจากแรงกระทำ เช่น การกัดกินของแมลง การแตกหัก

การช้ำ ที่มีสาเหตุมาจากแรงการกระแทก แรงอัด แรงเจาะซึ่งมักเกิดขึ้นในระหว่างการขนส่ง การแปรรูปและการเก็บรักษา การเสื่อมเสียทางกายภาพนั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงทางรูปร่างของอาหารเท่านั้นมิได้ทำให้คุณค่าทางโภชนาการเสียไปด้วยและยังคงสามารถรับประทานได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการยอมรับของผู้บริโภค

(3) การเสื่อมเสียเนื่องจากเอนไซม์ คือ การเสื่อมเสียที่เกิดขึ้นจากโปรตีนบางชนิดที่พบในสิ่งที่มีชีวิต โดยโปรตีนเหล่านี้มีหน้าในการที่เร่งปฏิกิริยาภายในเซลล์และเนื้อเยื่อของสิ่งที่มีชีวิต เช่น กระบวนการย่อยอาหารหรือกระบวนการเร่งการสังเคราะห์สารภายในเซลล์เป็นต้น ทั้งนี้เมื่อเก็บเกี่ยวพืชหรือฆ่าสัตว์เพื่อนำมาแปรรูป เอนไซม์ที่อยู่ในสิ่งมีชีวิตเหล่านั้นก็ยังคงทำหน้าที่อยู่ เช่น การเร่งให้ผลไม้สุก เป็นต้น

(4) การเสื่อมเสียทางเคมี คือ การเสื่อมเสียเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างอาหารกับอาหาร อาหารกับสารเติมแต่งอาหาร อาหารกับบรรจุภัณฑ์ อาหารกับก๊าซที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมซึ่งแสดงออกมาในรูปของ การเหม็นหืน (Rancidity) ผลิตภัณฑ์มีสีซีด (Pale color) และการเกิดลักษณะเป็นแผ่นสีเขียว (Green patch) เป็นต้น

แม้ว่าอาหารนั้นสามารถเกิดการเสื่อมเสียได้จากหลายสาเหตุดังที่ได้ระบุไว้ข้างต้นแต่ในบทความนี้จะมุ่งเน้นไปที่การเสื่อมเสียเนื่องจากจุลินทรีย์เป็นหลัก โดยการเสื่อมเสียของอาหารเนื่องจากจุลินทรีย์นั้นมีสาเหตุหลักมาจากการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรีย ราหรือยีสต์ในอาหาร ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทางเคมีหรือทางชีวภาพของอาหาร ซึ่งล้วนนำไปสู่การไม่ยอมรับของผู้บริโภคหรือในกรณีที่อาหารนั้นปนเปื้อนจุลินทรีย์ที่ก่อโรค ก็จะส่งผลให้ผู้ที่บริโภคอาหารเหล่านั้นเข้าไปเกิดอาการเจ็บป่วย เช่น ปวดท้อง ท้องร่วง ท้องเสีย อาเจียน หรือในกรณีร้ายแรงอาจถึงแก่ชีวิตได้ โดยจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียในอาหารแต่ละประเภทแสดงในตารางที่ 2 การเสื่อมเสียของอาหารทุกชนิดไม่ว่าจะเป็นร้านอาหารข้างทางไปจนถึงอาหารที่ผ่านกระบวนการทางอุตสาหกรรมนั้นเริ่มต้นเสื่อมเสียได้ตั้งแต่กระบวนการผลิตนั้นเสร็จสิ้นเรื่อยไปในระหว่างกระบวนการขนส่ง กระบวนการขั้นชั้นเพื่อวางจำหน่ายไปจนถึงมือผู้บริโภค การใช้บรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมนั้นสามารถช่วยเพียงรักษาคุณสมบัติต่างๆของผลิตภัณฑ์ให้คงสภาพเดิมไปจนถึงมือผู้บริโภค ในส่วนของการยืดอายุอาหารนั้น ผู้ผลิตมักเติมสารกันบูดในปริมาณที่ไม่เกินกฎหมายกำหนดเพื่อยืดอายุของอาหาร อย่างไรก็ตามการใส่สารกันบูดเพื่อต้านการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และยืดอายุของอาหารได้นานยิ่งขึ้น โดยสารกันบูดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมีหลายชนิด ได้แก่ กรดเบนโซอิก (Benzoic aci กรดซอร์บิก (Sorbic acid) และสารในกลุ่มพาราเบน (Paraben) เป็นต้น หลายรายงานการวิจัยระบุว่าหากร่างกายได้รับสารกันบูดในปริมาณน้อยร่างกายจะสามารถกำจัดออกได้ทางปัสสาวะ แต่ถ้าได้รับต่อเนื่องในปริมาณมากจะทำให้ ตับและไตทำงานหนักและถ้ากำจัดออกจากร่างกายไม่หมดก็จะสะสมในร่างกายส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการทำงานของตับและไต อาจทำให้เกิดการเจ็บป่วยด้วยอาการตับและไตพิการ ส่งผลให้ผู้บริโภคส่วนใหญ่ไม่นิยมบริโภคอาหารที่ใส่สารกันบูด [4] การใช้บรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์ดูเหมือนจะเป็นแนวทางที่เหมาะสมในการลดการใช้สารกันบูดในขณะที่รูปแบบของบรรจุภัณฑ์กระบวนการบรรจุ การขนส่งและการเก็บรักษานั้นคงเดิม

ตารางที่ 1 น้ำมันหอมระเหยที่สกัดได้จากพืชที่ใช้ต้านจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ และปริมาณขั้นต่ำสุดในการยับยั้งเชื้อ (Minimum inhibitory concentration, MIC) (ดัดแปลงจาก [9-10])

ชนิดของพืชที่นำมาสกัดน้ำมันหอมระเหย (Types of plants)	ชนิดของจุลินทรีย์ที่น้ำมันหอมระเหยออกฤทธิ์ (Types of microorganisms)	MIC
ตะไคร้ (*Cymbopogan citratus*)	*Escherichia coli*	0.6 µL/mL
	Salmonella typhimurium	2.5 µL/mL
	Staphylococcus aureus	0.6 µL/mL
ออริกาโน (*Origanum vulgarae*)	*Escherichia coli*	1600–1800 ppm
	Staphylococcus aureus	800–900 ppm
ลาเวนเดอร์ (*Lavandula officinalis*)	*Escherichia coli*	2000 ppm
	Staphylococcus aureus	1000–1200 ppm
อบเชย (*Cinnamomum zeylanicum*)	*Acinetobacter*	8 mg/mL
	Klebsiella pneumoniae	2 mg/mL
	Protreus vulgaris	8 mg/mL
	Enterococcus fecalis	4 mg/mL
	Staphylococcus aureus	0.5 mg/mL
	Staphylococcus epidermidis	1 mg/mL
พลู (*Piper betle*)	*Acinetobacter*	8 mg/mL
	Klebsiella pneumonia	4 mg/mL
	Proteus vulgaris	4 mg/mL
	Enterecoccus fecalis	4 mg/mL
	Staphylococcus aureus	0.5 mg/mL
	Staphylococcus epidermidis	0.5 mg/mL

(ต่อ)

ชนิดของพืชที่นำมาสกัดน้ำมันหอมระเหย (Types of plants)	ชนิดของจุลินทรีย์ที่น้ำมันหอมระเหยออกฤทธิ์ (Types of microorganisms)	MIC
ไทม์ (*Thymus vulgaris*)	*Clostridium perfringens*	1.25 mg/mL
สะระแหน่ (*Mentha piperita*)		10 mg/mL
ออริกาโน (*Origanum vulgarae*)		5.0 mg/mL
โรสแมรี (*Rosmarinus officinalis*)		10 mg/mL
โหระพา (*Ocimum basilicum*)		5.0 mg/mL
กระเทียม (*Allium sativum*)	*Escherichia coli*	15–1500 µg/mL
ยี่หร่า (*Cuminum cyminum*)	*Bacillus cereus*	0.05 µL/mL
	Bacillus subtilis	1000 µg/mL

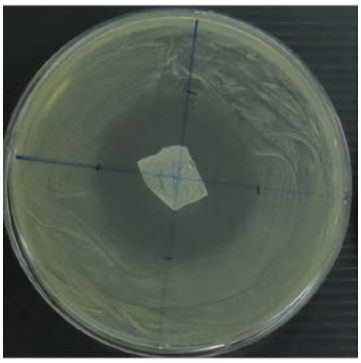
ตารางที่ 2 จุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของการเสื่อมเสียในอาหารแต่ละประเภท (ดัดแปลงจาก [11-12])

ประเภทอาหาร (Types of foods)	ชนิดของจุลินทรีย์ที่ทำให้เน่าเสีย (Types of microorganisms)
เนื้อสัตว์	*Pseudomonas, Achromobacter, Flavobacterium, Vibrio, Pseudomonas, Achromobacter, Micrococcus, Streptococcus, Sarcina, Lactobacillus, Leuconostoc, Salmonella, Proteus, Escherichia, Clostridium* และ *Bacillus*
ไข่	*Pseudomonas, Alcaligenes, Proteus, Eschericia* และ *Salmonella*
นม	*Micrococcus, Streptococcus* และ *Pseudomonas*
ผักและผลไม้	*Erwinia, Botrytis, Penicillum, Bacillus, Escherichia, Clostridium, Lactobacillus, Leuconostoc* และยีสต์
อาหารแห้ง	*Bacillus, Clostridium* และรา

5. การวัดประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ของบรรจุภัณฑ์

ในการประเมินประสิทธิภาพการยั้บยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ในอาหารนั้น การทดสอบที่เป็นที่นิยมมี 2 รูปแบบ คือ (1) การทดสอบรัศมีการยับยั้งเชื้อเป็นการสังเกตบริเวณที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้รอบชิ้นงานของบรรจุภัณฑ์ที่นำมาทดสอบ และ (2) การวัดร้อยละการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์โดยอาศัยเทคนิคการนับจำนวนโคโลนีของเชื้อบนวุ้นอาหาร (Plate count agar method, PCA) [13-14]

ฟิล์มปกติ



ฟิล์มที่เติมสารต้านจุลินทรีย์

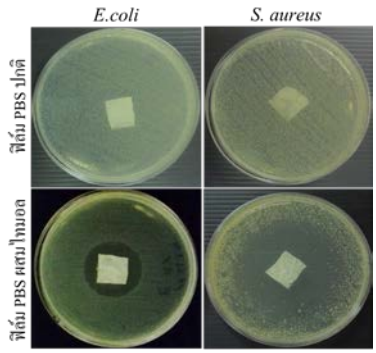
รูปที่ 1 ลักษณะการเกิดรัศมีการยับยั้งเชื้อของฟิล์มที่ทดสอบในจานเพาะเชื้อ

5.1 การทดสอบรัศมีการยับยั้งเชื้อ

การทดสอบรัศมีการยับยั้งเชื้อ คือ การสังเกตบริเวณใส (Clear zone) ซึ่งเป็นพื้นที่ที่จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้รอบชิ้นงานทดสอบซึ่งเกิดจากการปลดปล่อยสารต้านจุลินทรีย์ออกจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเปรียบเทียบแผ่นฟิล์มที่เติมและไม่เติมสารต้านจุลินทรีย์ จากรูปเห็นได้อย่างชัดเจนว่าแผ่นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่เติมสารต้านจุลินทรีย์นั้นเกิดบริเวณใสขึ้นรอบชิ้นงานทดสอบ ยิ่งความสามารถในการแพร่ของสารต้านจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ดี (ขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Diffusion coefficient, D) และชนิดของอาหารตัวกลางที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์) บริเวณพื้นที่ใสก็จะเกิดได้กว้างขึ้นหรืออีกนัยหนึ่งคือบรรจุภัณฑ์นั้นสามารถต้านจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเราสามารถแปลงผลการทดสอบเชิงคุณภาพจากการสังเกตด้วยตาเปล่าให้เป็นค่าเชิงปริมาณได้โดยใช้สมการที่ (1) โดยการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางบริเวณใส (D_C) และเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงานทดสอบ (D_S) นำค่าไปคำนวณในสมการจะได้ค่ารัศมีการยับยั้งเชื้อ (R) ออกมา ทั้งนี้ขั้นตอนและสภาวะในการทดสอบสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ตามมาตรฐาน AATCC90 [14] และมาตรฐานอื่นๆ [15-16]

$$R = (D_C - D_S)/2 \qquad (1)$$

ในฟิล์ม PBS ที่ผสมสารต้านจุลินทรีย์กลุ่มน้ำมันหอมระเหยก็มีการใช้เทคนิคในการวัดประสิทธิภาพในการต้านเชื้อจุลินทรีย์ข้างต้น ในฟิล์ม PBS ที่ผสมไทมอล พบว่าเกิดการต้านเชื้อเป็นบริเวณใสทั้งในจานเลี้ยงเชื้อ *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณใส 2.09 และ 5.52 เซนติเมตร ตามลำดับ [1] ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะการเกิดรัศมีการยับยั้งเชื้อของฟิล์มที่ทดสอบในจานเพาะเชื้อ (ดัดแปลงจาก [1])

5.2 การวัดร้อยละการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์

การวัดร้อยละการลดลงของเชื้อจุลินทรีย์ คือ การวัดจำนวนโคโลนีของจุลินทรีย์บนวุ้นอาหารเลี้ยงเชื้อ (Plate count agar method, PCA) หลักการของการทดสอบทำได้โดยการเจือจางจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ที่จะนำมาทดสอบตั้งต้นที่ 10^6 โคโลนีต่อมิลลิลิตรนำไปใส่ลงในสารตัวกลางการทดสอบแล้วบ่มที่อุณหภูมิ 37 ± 0.5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำสารละลายที่บ่มไว้ปริมาตร 100 ไมโครลิตร มาเทและเกลี่ยให้ทั่ววุ้นอาหารเลี้ยงเชื้อและนำไปบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยร้อยละการลดลงของจำนวนเชื้อจุลินทรีย์สามารถคำนวณได้จากจำนวนโคโลนีที่ได้จากแผ่นฟิล์มที่ไม่ผสมสารต้านจุลินทรีย์ (A) ลบกับจำนวนโคโลนีที่ได้จากแผ่นฟิล์มที่ผสมสารต้านจุลินทรีย์ (B) ดังแสดงในสมการที่ (2) ทั้งนี้รายละเอียดเพิ่มเติมของการทดสอบสามารถศึกษาได้จากมาตรฐาน โดย ASTM E2149 [14,17]

$$R = 100 \times (A-B) / A \qquad (2)$$

6. การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ผสมน้ำมันหอมระเหย

ตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการบ่งบอกประสิทธิภาพในการปลดปล่อยสารต้านจุลินทรีย์ที่อยู่ในฟิล์มพลาสติกก็คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (Diffusion coefficient, D) โดยทั่วไปแล้ว การวัดอัตราการปลดปล่อยสารต้านจุลินทรีย์ประเภทน้ำมันหอมระเหยนั้นทำได้โดยการนำเอาฟิล์มบรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์จุ่มในตัวอาหารตัวแทนประเภทต่างๆ โดยปกติมักใช้ (1) น้ำกลั่นแทนอาหารที่มีสมบัติเป็นกลาง (2) กรดอะซิติกแทนอาหารที่เป็นกรด (3) เอธานอลแทนอาหารที่เป็นแอลกอฮอล์ และ (4) กรดไขมันไอโซไซยาเนตแทนอาหารที่เป็นน้ำมันหรือไขมัน จากนั้นทำการวัดการปลดปล่อยของน้ำมันหอมระเหยที่ลงมาสู่อาหาร ณ ช่วงเวลาต่างๆ ตั้งแต่ 0 ถึง 15 วัน หรืออาจมากกว่าตามการออกแบบการทดลอง หรืออาจวัดอัตราการระเหยจาก Headspace ของบรรจุภัณฑ์มาวัดปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่แพร่ออกมา จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันหอมระเหยที่ปลดปล่อยออกมาด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ เช่น High Performance Liquid Chromatography (HPLC) หรือ Gas Chromatography (GC) เป็นต้น ข้อมูลจากเครื่องมือดังกล่าวทำให้ได้ค่าปริมาณของน้ำมันหอมระเหยที่ถูกปลดปล่อยออกมา โดยการคำนวณนั้นจะอ้างอิงตามทฤษฎีการแพร่ของฟิกส์ (Fick's law of diffusion) ซึ่งสามารถนำไปสู่การหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของระบบที่เป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ผสมน้ำมันหอมระเหยได้โดยใช้สมการ (3) ถึง (5) [1]

$$\frac{M_{F,t}}{M_{F,\infty}} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\alpha(1+\alpha)}{1+\alpha+\alpha^2 q_n^2} \exp\left[\frac{-Dq_n^2 t}{L_p^2}\right] \qquad (3)$$

$$\alpha = \frac{K_{FP} V_F}{V_P} \quad (4)$$

$$K_{FP} = \frac{C_{F,\infty}}{C_{P,\infty}} \quad (5)$$

$$\tan q_n = -\alpha q_n \quad (6)$$

โดยที่ $M_{F,t}$ และ $M_{F,\infty}$ คือมวลของน้ำมันหอมระเหยที่แพร่ออกจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์ ณ เวลา t และที่สมดุลของการแพร่ตามลำดับ $M_{F,\infty}$ นั้นสามารถอนุมานให้มีค่าเท่ากับ $M_{P,0}$ ได้ โดยที่ L_P คือค่าความหนาของบรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์ K_{FP} คือค่าสัมประสิทธิ์การแบ่งกั้นระหว่างน้ำมันหอมระเหยกับอาหารที่บรรจุในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ (3) ค่า $C_{F,\infty}$ และ $C_{P,\infty}$ คือความเข้มข้นของน้ำมันหอมระเหยในอาหารและในบรรจุภัณฑ์ที่จุดสมดุลตามลำดับ V_F และ V_P คือปริมาตรของอาหารที่บรรจุลงในบรรจุภัณฑ์และปริมาตรของบรรจุภัณฑ์ตามลำดับ ค่า q_n คือค่ารากที่เป็นบวกของค่าที่ถอดจาก $\tan q_n$ โดยหาได้จากสมการที่ (4) โดยหาได้จากการวาดกราฟของฟังก์ชันของสมการเส้นตรง $f(q_n) = \tan q_n + \alpha q_n$ โดยดึงข้อมูล ณ $f(q_n)$ มีค่าเป็น 0 [1]

อย่างไรก็ตาม เราสามารถจัดรูปสมการที่ (2) ให้อยู่ในรูปอย่างง่ายโดยเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจากสมการที่ (7)

$$\left[\frac{1}{\pi} - \frac{1}{\alpha}\cdot\frac{M_{F,t}}{M_{P,0}}\right]^{0.5} = -\frac{D^{0.5}}{\alpha \cdot L_P}\cdot t^{0.5} + \frac{1}{\pi^{0.5}} \quad (7)$$

โดยที่ $M_{P,0}$ คือปริมาณของสารต้านจุลินทรีย์ที่ถูกปลดปล่อยออกจากบรรจุภัณฑ์ ณ จุดเริ่มต้น สำหรับกรณีการเกิดการแพร่แบบสมบูรณ์ $M_{F,\infty}$ มีค่าเท่ากับ $M_{P,0}$

ทั้งนี้ในกรณีที่ $M_{F,t}/M_{P,0}$ มีค่าไม่เกิน 0.6, สมการที่ (7) สามารถลดรูปได้เป็นสมการที่ (8)-(9) ดังนี้

$$\frac{M_{F,t}}{M_{P,0}} = \frac{2}{L_P}\left(\frac{Dt}{\pi}\right)^{(0.5)} \quad (8)$$

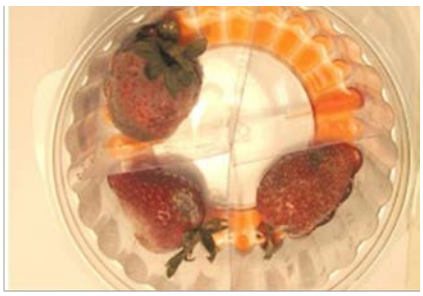
$$\frac{M_{F,t}}{M_{P,0}} = 1 - \frac{8}{\pi^2}\exp\left(\frac{-\pi^2 Dt}{4L_P^2}\right) \quad (9)$$

นักวิจัยหลายกลุ่มใช้สมการดังกล่าวเพื่อศึกษาการปลดปล่อยสารต้านจุลินทรีย์กลุ่มน้ำมันหอมระเหยจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์ PBS Prtchwattana และ Naknaen [1] ศึกษาการปลดปล่อยของน้ำมันหอมระเหยชนิดไทมอลจากฟิล์ม PBS โดยนำไปบรรจุตัวแทนของอาหาร 4 ชนิดได้แก่ อาหารกลุ่มน้ำ ไขมัน กรด และแอลกอฮอล์ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของไทมอลมีค่าสูงที่สุดเมื่อในอาหารกลุ่มที่เป็นไขมันเนื่องจากอาหารกลุ่มนี้มีสภาพขั้วเหมาะสมกับการชะละลายของไทมอลลงสู่อาหารจำลองมากที่สุด โดยผู้วิจัยได้สรุปว่าเกิดกลไกในการแพร่ของน้ำมันหอมระเหยจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์ PBS ลงสู่อาหาร 4 กลไก ได้แก่ (1) การแพร่ของโมเลกุลอาหารเข้าสู่ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ (2) โมเลกุลของน้ำมันหอมระเหยละลายเข้ากับโมเลกุลของอาหารที่แพร่เข้ามาสู่ฟิล์มบรรจุภัณฑ์ (3) น้ำมันหอมระเหยถูกชะละลายจากด้านในของฟิล์มบรรจุภัณฑ์มาสู่ผิวด้านนอกและ (4) สารต้านจุลินทรีย์แพร่ออกจากฟิล์มบรรจุภัณฑ์ไปสู่อาหารจนกระทั่งระบบถึงสภาวะสมดุล [18-19] ทั้งนี้ Han [20] ได้สรุปเพิ่มเติมว่าอัตราการปลดปล่อยของสารต้านจุลินทรีย์นั้น

ขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่เป็นบรรจุภัณฑ์และสภาพขั้วของน้ำมันหอมระเหยเป็นสำคัญ

7. เทคโนโลยีบรรจุภัณฑ์อาหารต้านจุลินทรีย์จากพลาสติกชีวภาพ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา มีการวิจัยและพัฒนาบรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์ในหลายรูปแบบโดยมุ่งเน้นไปที่การยืดอายุของผลิตภัณฑ์อาหารกลุ่มที่มีการเน่าเสียได้ง่าย เช่น เนื้อสัตว์ ขนมปัง ผักและผลไม้ซึ่งแต่ละงานวิจัยมุ่งใช้สารต้านจุลินทรีย์ที่เฉพาะเจาะจงกับเชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิดที่เป็นสาเหตุของการเน่าเสียของอาหารนั้นๆ โดยในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการประยุกต์ใช้งานบรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์จากพลาสติกชีวภาพเพื่อยืดอายุของอาหารประเภทต่างๆ



บรรจุภัณฑ์ปกติ

บรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์

รูปที่ 3 การเสื่อมเสียของสตอเบอรี่หลังจากเก็บรักษาไว้ในบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพระหว่างการผสมและไม่ผสมน้ำมันหอมระเหยลงในวัสดุที่นำมาขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์ (ดัดแปลงจาก [21])

ผักและผลไม้นับเป็นอาหารซึ่งเสื่อมเสียได้ง่าย เนื่องจากมีปริมาณน้ำมากส่งผลให้ค่ากิจกรรมของน้ำ (Water activity) สูง และจุลินทรีย์เติบโตได้อย่างรวดเร็ว การยืดอายุของผักและผลไม้จึงนับเป็นประเด็นสำคัญที่ตอบโจทย์ในเชิงพาณิชย์ได้เป็นอย่างดี Campos-Requena และคณะ [21] ได้พัฒนาบรรจุภัณฑ์จากแป้งเทอร์โมพลาสติกผสมกับน้ำมันหอมระเหยชนิดไทมอลและคาร์วาครอลเพื่อยืดอายุของสตอเบอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 3 จากภาพเห็นได้ชัดเจนว่าสารต้านจุลินทรีย์ทั้งสองชนิดนี้ร่วมกันช่วยยืดอายุสตอเบอรี่อย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือสามารถยืดอายุได้ประมาณ 2 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ได้เติมน้ำมันหอมระเหย

บรรจุภัณฑ์ปกติ หลังจากเก็บรักษา 19 วัน

บรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์ หลังจากเก็บรักษา 19 วัน

รูปที่ 4 การเสื่อมเสียของกล้วยหลังจากเก็บไว้ในบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพระหว่างการผสมและไม่ผสมน้ำมันหอมระเหยลงในวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์หลังจากเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 19 วัน (ดัดแปลงจาก [22])

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น เมทิลเซลลูโลสและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ก็ถูกนำมาพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์โดยนำมาผสมกับสารประกอบแทนนินเพื่อยืดอายุของกล้วย และพบว่าบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวสามารถยืดอายุกล้วยได้ยาวนานมากกว่า 19 วัน ดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกันแล้วเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากล้วยที่บรรจุอยู่ในบรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์นั้นยังคงมีเปลือกสีเหลืองและเนื้อด้านในอยู่ในสภาพที่น่ารับประทาน ในขณะที่บรรจุภัณฑ์ปกตินั้นส่งผลให้เปลือกกล้วยเปลี่ยนเป็นสีดำและเนื้อของกล้วยเป็นสีเหลืองช้ำอย่างชัดเจน

ขนมปังนับเป็นอาหารยอดนิยมซึ่งมีอายุสั้นประมาณไม่เกิน 2 สัปดาห์ ซึ่งโดยปกติแล้วผู้บริโภคขนมปังโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีขนมปังแถว จะไม่รับประทานหมดภายในครั้งเดียว ส่งผลให้มีขนมปังเกิดการเน่าเสียก่อนการบริโภคหมด จึงมีนักวิจัยหลายกลุ่มพยายามยืดอายุขนมปังด้วยบรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์ทดแทนการใส่สารกันบูดลงในขนมปังโดยตรง Ramos [23] ศึกษาการใช้สารต้านจุลินทรีย์ชนิดไทมอลที่ผสมลงในฟิล์มพลาสติกชีวภาพ ผลการวิจัยพบว่าขนมปังเริ่มปรากฏราชัดเจนตั้งแต่วันที่ 13 เมื่อบรรจุในบรรจุภัณฑ์ปกติ ในขณะที่บรรจุภัณฑ์ที่ผสมไทมอลนั้งยังคงมีสภาพปกติ ดังแสดงในรูปที่ 5

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นเห็นได้ว่าในปัจจุบันเทคโนโลยีการผลิตบรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์นั้นมีความพร้อมทั้งในด้านของกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์และข้อมูลการยืดอายุของอาหารซึ่งยืนยันว่าระบบของบรรจุภัณฑ์ดังกล่าวนั้นสามารถประยุกต์ใช้งานได้จริง อุปสรรคเพียงอย่างเดียวที่ยังจำกัดการผลิตออกสู่ตลาดในเชิงพาณิชย์ของบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพต้านจุลินทรีย์ก็คือต้นทุนของวัตถุดิบของทั้งจากพลาสติกชีวภาพเองและต้นทุนจากน้ำมันหอมระเหยซึ่งทำให้ต้นทุนบรรจุภัณฑ์เพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 2 เท่า ดังนั้นนักพัฒนาบรรจุภัณฑ์เองจึงมีความจำเป็นที่ต้องเปลี่ยนรูปแบบของการต้านจุลินทรีย์จากเดิมผลิตบรรจุภัณฑ์ทั้งชิ้นให้ต้านจุลินทรีย์ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อลดต้นทุนแต่ยังคงประสิทธิภาพในการต้านจุลินทรีย์ได้เหมือนเดิม

รูปที่ 5 การเสื่อมเสียของขนมปังหลังจากถูกเก็บไว้ในบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพหลังจากเก็บรักษาเป็นเวลา 13 วัน ระหว่างการเติมน้ำมันหอมระเหยชนิดไทมอลที่ร้อยละ 0 และ 8 โดยน้ำหนัก (ดัดแปลงจาก [23])

8. สรุปผล

การใช้พลาสติกชีวภาพเพื่อเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารต้านจุลินทรีย์มีแนวโน้มที่ดีทั้งทางด้านการยอมรับของผู้บริโภคและประสิทธิภาพในการยืดอายุของอาหารซึ่งคาดว่าในอนาคตอันใกล้เราอาจได้เห็นบรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์จำหน่ายในประเทศไทย ซึ่งนอกจากจะเป็นการสร้างนวัตกรรมของประเทศแล้วยังเป็นการเพิ่มความปลอดภัยให้กับผู้บริโภคจากเชื้อก่อโรคต่างๆที่ปนเปื้อนมากับอาหารและทำให้อาหารเสื่อมเสียอีกด้วย ยิ่งไปกว่านั้นการใช้บรรจุภัณฑ์ต้านจุลินทรีย์จากพลาสติกชีวภาพยังช่วยส่งเสริมภาพลักษณ์ความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยในทางอาหารให้แก่ผู้บริโภคอีกด้วย จากข้อมูลที่ได้ทำเสนอมาแสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีการผลิตบรรจุภัณฑ์อาหารต้านจุลินทรีย์จากพลาสติกชีวภาพนั้นมีความพร้อมในการนำออกสู่ท้องตลาด เนื่องจากมีผลการทดสอบรองรับทั้งทางด้านการยืดอายุอาหารและความสามารถในการขึ้นรูปด้วยกระบวนการทางพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามสิ่งที่ยังเป็นอุปสรรคของบรรจุภัณฑ์กลุ่มนี้ก็คือต้นทุนที่ยังไม่สามารถแข่งขันได้เมื่อเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ปกติที่ผลิตจากพลาสติกปิโตรเลียม

9. เอกสารอ้างอิง

[1] N. Petchwattana and P. Naknaen. “Utilization of thymol as an antimicrobial agent for biodegradable poly(butylene succinate)”, Materials Chemistry and Physics 163, 2015, pp. 369-375.

[2] N. Petchwattana and P. Naknaen, “Influence of packaging material and storage time on physical, chemical and microbiological properties of set yogurt: A comparative study between modified biodegradable poly(lactic acid) and polypropylene”, Journal of Engineering Science and Technology, 11, 2016, pp. 1437-1449.

[3] Y. Sriwirat and K. Tanta, “Formulation development for biodegradable packaging: Polybutylene succinate and cellulose acetate butyrate blends”, Naresuan Phayao Journal, 8, 2015, pp. 174-177. (In Thai)

[4] C. Dong, Y. Mei, and L. Chen, “Simultaneous determination of sorbic and benzoic acids in food dressing by headspace solid phase microextraction and gas chromatography”, Journal of Chromatopgraphy A, 1117, 2006, pp. 109-114.

[5] B. Malhotra, A. Keshwani and H. Kharkwal, “Antimicrobial food packaging: potential and pitfalls”, Frontiers in microbiology, 6, 2015, pp. 1-9.

[6] M.V. Guettler, D. Rumler and M.K. Jain, “Actinobacillus *succinogenes sp. nov.,* a novel succinic acid producing strain from the bovine lumen”, International Journal of Systematic Bacteriology, 49, 1999, pp. 207-216.

[7] G.N. Vemuri, M.A. Eiteman and E. Altman, “Succinate production in dual-phase Escherichia coli fermentations depends on the time of

transition from aerobic to anaerobic conditions", Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 28, 2002, pp. 325-332.

[8] P. Paoprasert, "Polymers from biological sources: A literature review", KKU Research Journal, 18, 2013, pp. 536-547. (In Thai)

[9] S. Chouhan, K. Sharma and S. Guleria, "Antimicrobial activity of some essential oils—Present status and future perspectives", Medicines (Basel), 4, 2017, 58.

[10] Y.X. Seow, C.R. Yeo, H.L. Chung and H.G. Yuk, "Plant essential oils as active antimicrobial agents", Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 54, 2014, pp. 625-644.

[11] J.H.J. Huis in't Veld, "Microbial and biochemical spoilage of foods: an overview", International Journal of Food Microbiology, 33, 1996, pp. 1-18.

[12] P. Lertsatitthanakorn, K. Montree, J. Bunjong, B. Samrual and S. Kotchan, "Antimicrobial activities of *Cinnamomum zeylanicum* blume bark essential oil", Thai Pharmaceutical and Health Science Journal, 7, 2012, pp.39-43. (In Thai)

[13] P. Appendini and J. H. Hotchkiss, "Review of antimicrobial food packaging", Innovative Food Science & Emerging Technologies, 3, 2002, pp. 113–126.

[14] A. Kositchaiyong, C. Thongpin, K. Sombatsompop, C. Chandavasu, T. Markpin, E. Wimolmala and N. Sombatsompop, "Material characterizations and anti-bacterial performances of triclosan containing high-density polyethylene", Journal of Research and Innovation for Thai Industries, 1, 2010, pp. 16-27. (In Thai)

[15] A.W. Bauer, W.M. Kirby, J.C. Sherris and M. Turck, "Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method", American Journal of Clinical Pathology, 45, 1966, pp. 493–496.

[16] L.B. Reller, M. Weinstein, J.H. Jorgensen and M.J. Ferraro, "Antimicrobial susceptibility testing: A review of general principles and contemporary practices", Clinical Infectious Diseases, 49, 2009, pp. 1749–1755.

[17] T. Jin and H. Zhang, "Biodegradable polylactic acid polymer with nisin for use in antimicrobial food packaging", Journal of Food Science, 73, 2008, pp. M127-M134.

[18] M. Mastromatteo, A. Danza, A. Conte, G. Muratore and M.A. Del Nobile, "Shelf life of ready to use peeled shrimps as affected by thymol essential oil and modified atmosphere packaging", International journal of food microbiology, ,144 2010, pp. 250-256.

[19] Y. Zhao, J. Qu, Y. Feng, Z. Wu, F. Chen, and H. Tang, "Mechanical and thermal properties of

epoxidized soybean oil plasticized polybutylene succinate blends", Polymers for Advanced Technologies, 23, 2012, pp. 632-638.

[20] J.H. Han, "Antimicrobial food packaging", In: R. Ahveniainen (Ed.) "Novel food packaging techniques"' 1st ed. Woodhead Publishing, Cambridge. 2003.

[21] V.H. Campos-Requena, B.L. Rivas, M.A. Pérez, C.R. Figueroa, E.N. Figueroa and E.A. Sanfuentes, "Thermoplastic starch/clay nanocomposites loaded with essential oil constituents as packaging for strawberries-In vivo antimicrobial synergy over *Botrytis cinerea*", Postharvest Biology and Technology, 129, 2017, pp. 29-36.

[22] M.M.H. Senna, K.M. Al-Shamrani and A.S. Al-Arifi, "Edible coating for shelf-life extension of fresh banana fruit based on gamma irradiated plasticized poly(vinyl alcohol)/carboxymethyl cellulose/tannin composites", Materials Sciences and Applications, 5, 2014, pp. 45851.

[23] M. Ramos, A. Beltran, A. Valdes, M.A. Peltzer, A. Jimenez, M.C. Garrigos and G.E. Zaikov, "Carvacrol and thymol for fresh food packaging", Journal of Bioequivalence & Bioavailability, 5, 2013, pp. 154-160.