

รายงานการศึกษาเชิงลึก

เรื่อง แนวทางการส่งเสริมการพัฒนา บรรจุกภัณฑ์เพื่อลด Food Waste

โครงการศูนย์สารสนเทศอัจฉริยะอุตสาหกรรมบรรจุกภัณฑ์ ปีงบประมาณ 2568

จัดทำโดย ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ
คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
งบประมาณโดย สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม



จัดทำโดย ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ
คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
งบประมาณโดย สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม

รายงานการศึกษาเชิงลึก เรื่อง แนวทางการส่งเสริมการพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อลด Food waste

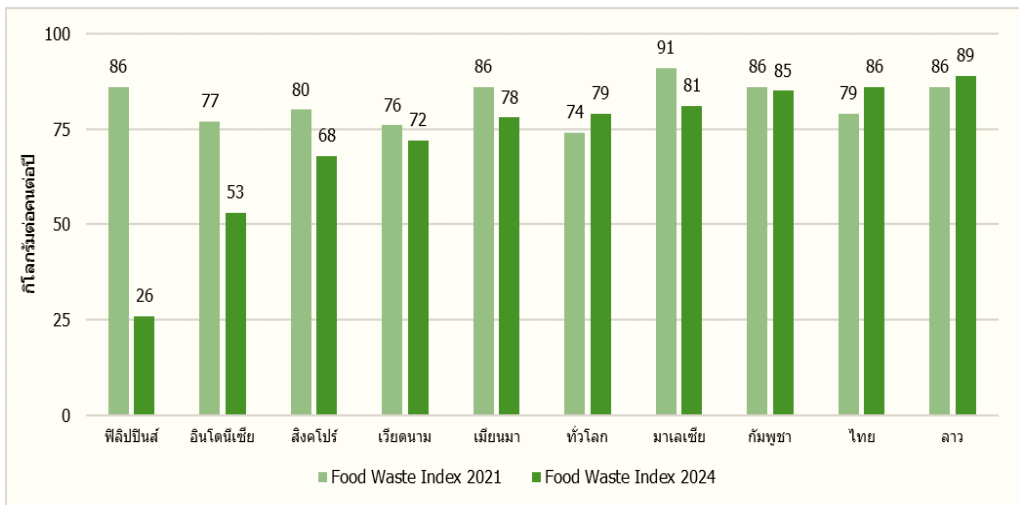
1. สถานการณ์ปัจจุบันเกี่ยวกับปริมาณ Food waste และผลกระทบ

ในปัจจุบัน ขยะอาหาร (Food waste) ถือเป็นหนึ่งในปัญหาระดับโลก ในปี ค.ศ. 2022 ปริมาณ Food waste จากครัวเรือน ร้านค้าปลีกและร้านอาหาร คิดเป็นสัดส่วนถึงประมาณร้อยละ 19 ของอาหารที่ผลิตทั่วโลก (Food waste Index Report, 2024) การเกิดขึ้นของขยะอาหารแสดงถึงการจัดสรรทรัพยากรที่ไม่มีประสิทธิภาพ ในแต่ละปีทั่วโลกมีอาหารที่ถูกทิ้งออกจากห่วงโซ่อาหารของมนุษย์ เช่น อาหารที่รับประทานไม่หมด อาหารที่หมดอายุ และเศษผักที่ใช้ตกแต่งจาน เกิดขึ้นทั่วโลกมากถึง 2.5 พันล้านตันต่อปี คิดเป็นมูลค่ากว่า 1 ล้านล้านดอลลาร์สหรัฐ และส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยรวมทั่วโลกถึง 3.3 พันล้านตันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า แนวโน้มนี้สะท้อนถึงความสูญเสียทางเศรษฐกิจอีกทั้งยังสร้างความท้าทายด้านสิ่งแวดล้อม รวมทั้งส่งผลต่อความมั่นคงทางอาหาร (food security) เนื่องจากเกิดการสูญเสียไปของทรัพยากรในการผลิตที่ไม่จำเป็น ในขณะที่ยังมีประชากรโลกกว่า 783 ล้านคน ที่ยังคงเผชิญกับความอดอยากและขาดแคลนอาหารที่มีคุณภาพ การลดขยะอาหารเป็นหนึ่งในเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals, SDGs, target 12.3) ซึ่งองค์การสหประชาชาติ (United Nations, UN) ได้ตั้งเป้าลดขยะอาหารที่เกิดจากการจำหน่ายและการบริโภคทั่วโลกลงร้อยละ 50 ภายในปี ค.ศ. 2030 (Environment in Geneva, <https://www.Genevaenvironmentnetwork.org/environment-geneva>)

คำว่า Food waste หมายถึง อาหารที่มนุษย์สามารถบริโภคได้แต่เกิดการสูญเสียไป เช่น อาจจะถูกทิ้ง อาหารที่เสีย หรือหมดอายุระหว่างการผลิต การเตรียม การขาย หรือการสูญเสียไปในร้านบริการอาหารต่าง ๆ โดยโครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (United Nations Environment Programme, UNEP) เป็นโครงการภายใต้องค์การสหประชาชาติและมีบทบาทในการวางยุทธศาสตร์เพื่อลดปัญหา Food waste พร้อมเก็บข้อมูลสถิติที่เกี่ยวข้องกับ Food waste ในระดับโลก ส่วนคำว่า Food loss นั้น หมายถึง การสูญเสียอาหารที่เกิดขึ้นก่อนที่อาหารจะถึงผู้บริโภค ซึ่ง Food loss มาจากส่วนเหลือจากผลิตผลการเกษตร อาทิ ฟาร์มการเกษตร ผลิตภัณฑ์จากป่าไม้ ผลิตภัณฑ์ประมงที่ไม่ได้นำมาเข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งอาจจะมีสาเหตุจากผลผลิตนั้น ๆ มีปริมาณที่มีไม่เพียงพอต่อการผลิต การไม่คุ้มทุน หรือมีส่วนเหลือที่ไม่สามารถนำเข้าสู่กระบวนการผลิตแปรรูปได้ การสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้อาจจะเกิดหลังการเก็บเกี่ยว การดูแลเก็บรักษาในโซ่อุปทานที่ไม่เหมาะสม หรืออาจจะมีสาเหตุจากภัยธรรมชาติทำให้เกิด Food loss ดังกล่าว และ Food loss โดยรวมทั่วโลกอาจจะคิดเป็นมูลค่าถึง 218 ล้านดอลลาร์สหรัฐ โดยองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) เป็นหน่วยงานหลักที่เก็บข้อมูลสถิติที่เกี่ยวข้องกับ Food loss (FAO Food Loss Index, FLI) โดยบทวิเคราะห์นี้จะเน้นเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับแนวทางการส่งเสริมการพัฒนาบรรจุภัณฑ์เพื่อลด Food waste เป็นหลัก การสูญเสียอาหารและขยะอาหาร

รวมกันก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกประมาณร้อยละ 8-10 จากก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด (Food waste Index 2024, The United Nations Environment Programme (UNEP)) ขยะอาหาร (Food waste) มีความสัมพันธ์กับก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gases) อย่างใกล้ชิด โดยการย่อยสลายของขยะอาหารในหลุมฝังกลบจะปล่อยก๊าซมีเทน (methane) ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีศักยภาพในการกักเก็บความร้อนสูงกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) หลายเท่า ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน การลดขยะอาหารจึงเป็นวิธีหนึ่งในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและบรรเทาปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (<https://ourworldindata.org/food-waste-emissions>)

ตามรายงานล่าสุดของโครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (UNEP) ปี 2567 พบว่า ปริมาณขยะอาหารทั่วโลกเพิ่มขึ้นจาก 74 กิโลกรัมต่อคนต่อปี เป็น 79 กิโลกรัมต่อคนต่อปี ในขณะที่คนไทยสร้างขยะอาหารเฉลี่ยคนละ 86 กิโลกรัมต่อคนต่อปี และเมื่อคำนวณกับจำนวนประชากรจะพบว่า ไทยสร้างขยะจากอาหารสูงถึง ปีละ 5.4 ล้านตัน โดยค่าเฉลี่ยปริมาณการสร้างขยะอาหาร (Food waste) ของไทยเทียบกับประเทศกลุ่มอาเซียน แสดงดังภาพที่ 1 และจากการที่องค์การสหประชาชาติกำหนดเป้าหมายให้ทุกประเทศต้องลดปริมาณอาหารขยะให้ได้ร้อยละ 50 ภายในปี ค.ศ. 2030 ทำให้ประเทศไทยได้กำหนดเป้าหมายลดปริมาณอาหารขยะประมาณ 3 ล้านตันต่อปี หรือเฉลี่ยคนละ 43 กิโลกรัม



ภาพที่ 1 ค่าเฉลี่ยปริมาณการสร้างขยะอาหาร (Food waste) ของไทยเทียบกับประเทศกลุ่มอาเซียน
ที่มา: The United Nations Environment Programme (UNEP)

2. ตัวอย่างนโยบายที่เกี่ยวข้องกับการลด Food waste ในต่างประเทศ

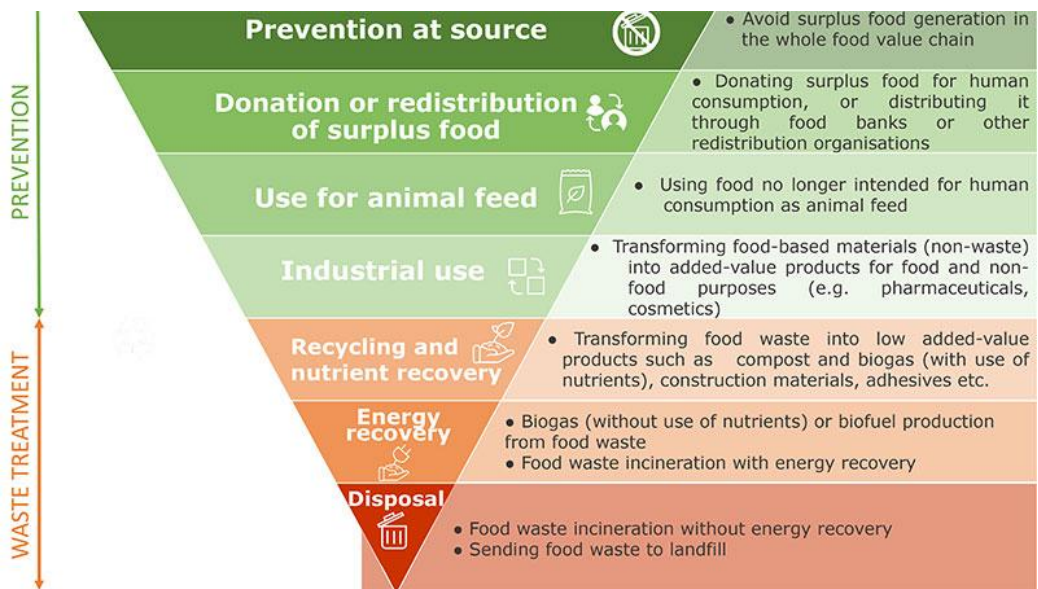
โดยภาพรวมแล้ว นโยบายการลดขยะอาหาร (Food waste reduction policies) มีเป้าหมายหลักเพื่อลดปริมาณขยะอาหารที่เกิดขึ้นตลอดห่วงโซ่อุปทาน ตั้งแต่การผลิต การขนส่ง การจำหน่าย การบริโภค และการกำจัด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อบรรเทาผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รวมทั้งส่งเสริมความมั่นคงทางอาหาร เพื่อลดผลกระทบดังกล่าว จึงมีการนำเสนอแนวทางต่าง ๆ เพื่อลด Food waste เช่น การใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิตอย่างเต็มประสิทธิภาพ การลดปริมาณขยะอาหาร เช่น การกำหนดขนาดบรรจุเพื่อจัดจำหน่ายตามความเหมาะสม การบริหารอาหารส่วนเกินที่ไม่สามารถจำหน่ายได้ อาทิ การบริจาค การนำไปแปรรูปใหม่ หรือการเปลี่ยนเศษอาหารให้เป็นปุ๋ยและพลังงาน นอกจากนี้แล้ว การพัฒนาแสวงหาเทคโนโลยีและนวัตกรรมใหม่ ๆ เพื่อช่วยลดการสูญเสียอาหารและขยะอาหารตลอดห่วงโซ่คุณค่า โดยเฉพาะการใช้เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ (Packaging and materials technology) ถือเป็นวิธีการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพและมีการศึกษาวิจัยต่อเนื่องในทุกประเทศทั่วโลก

หลายประเทศทั่วโลกต่างออกนโยบายทั้งภาคบังคับและสมัครใจเพื่อลด Food waste เช่น ประเทศเกาหลีใต้ได้ตั้งเป้าลดขยะอาหารลงร้อยละ 10 ระหว่างปี ค.ศ. 2013 – 2019 จากการบังคับใช้มาตรการต่าง ๆ เช่น การเก็บเงินค่าอาหารที่เหลือในจาน การรีไซเคิล และการลงทุนในเทคโนโลยีจัดการขยะ ประเทศญี่ปุ่นมีการนำขยะอาหารไปใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น การผลิตก๊าซชีวภาพ และการนำไปเป็นอาหารสัตว์ ในขณะที่ประเทศไทยมีการจัดทำแผนที่นำทางการจัดการขยะอาหาร (พ.ศ. 2566 – 2573) และแผนปฏิบัติการด้านการจัดการขยะอาหาร ระยะที่ 1 (พ.ศ. 2566 – 2570) เป็นต้น

สำหรับสหภาพยุโรปนั้น มีเป้าหมายชัดเจนในการลดขยะอาหาร ซึ่งระบุในคำสั่งของรัฐบาลยุโรปและสภายุโรป (แก้ไขข้อบังคับ 2008/98/EC ว่าด้วยขยะ) ซึ่งเรียกร้องให้สหภาพยุโรปและประเทศสมาชิกดำเนินการอย่างเข้มข้นและเร่งด่วน เพื่อให้แน่ใจว่าอาหารมีความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม โดยจากข้อมูลที่รายงานนั้นพบว่า ขยะอาหารประมาณ 58.5 ล้านตัน เกิดขึ้นในสหภาพยุโรประหว่าง ปี ค.ศ. 2020-19 ก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า 252 ล้านตัน ซึ่งเทียบเท่ากับร้อยละ 1.6 ของผลกระทบต่อก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่เกิดจากระบบอาหารของสหภาพยุโรป ขยะอาหารยังส่งผลให้เกิดการสูญเสียพื้นที่บริโภคเพื่อผลิตอาหารถึง 342 พันล้านลูกบาศก์เมตร และยังส่งผลผลกระทบต่อการใช้ที่ดินเพาะปลูก นอกจากนี้แล้ว ขยะอาหารประมาณ 58.5 ล้านตันนั้น ยังมีมูลค่าทางการตลาดที่เกี่ยวข้องถึงประมาณ 132 พันล้านยูโร จากความรุนแรงของปัญหาดังกล่าว สหภาพยุโรปจึงมุ่งหวังที่จะสนับสนุนแผนปฏิบัติการเศรษฐกิจหมุนเวียนเพื่อลดปริมาณขยะโดยรวมอย่างมีนัยสำคัญ และลดปริมาณขยะที่ไม่ได้รีไซเคิลลงครึ่งหนึ่งภายในปี ค.ศ. 2030 อีกทั้งยังมีการแก้ไขกฎหมายว่าด้วยบรรจุภัณฑ์และขยะบรรจุภัณฑ์ (Packaging and packaging waste directive, PPWD) โดยตั้งเป้าหมายที่จะลดปริมาณขยะบรรจุภัณฑ์ ขยะจากอาหาร และขยะจากสิ่งทอให้ได้ถึงร้อยละ 65 นอกจากนี้จากการศึกษาโดย Joint Research Centre ในสหภาพยุโรปได้เสนอแนวทางการจัดการลดปัญหา

Food waste ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระดับ เริ่มจากการป้องกัน หรือลดขยะอาหารตั้งแต่ต้นทาง และวิธีการบริหารจัดการขยะอาหารที่เกิดขึ้นอย่างเหมาะสมตามลำดับที่ส่งผลให้เกิดประโยชน์สูงสุด (ภาพที่ 2)

สำหรับสหรัฐอเมริกานั้น USDA ได้ประเมินว่า มี Food waste สูงถึงร้อยละ 30 – 40 ในโซ่อุปทานอาหาร ในปัจจุบันสหรัฐอเมริการได้เข้าร่วมเป้าหมายของสหประชาชาติในการลดขยะอาหารลง 50% ภายในปี ค.ศ. 2030 โดยมี 3 หน่วยงานหลักที่ร่วมมือเพื่อแก้ปัญหา Food waste ได้แก่ องค์การอาหารและยาสหรัฐ (U.S. Food and Drug Administration, FDA) กระทรวงเกษตรสหรัฐ (U.S. Department of Agriculture, USDA) และสำนักงานปกป้องสิ่งแวดล้อมสหรัฐ (U.S. Environmental Protection Agency, EPA) โดยในเดือนมิถุนายน ค.ศ. 2024 ทั้ง 3 หน่วยงานได้ออกยุทธศาสตร์ชาติเพื่อลด Food waste และ Food loss หรือ National strategy for reducing food loss and waste and recycling organics ซึ่งมีนโยบาย เช่น การส่งเสริมความรู้ความเข้าใจในเยาวชน ผู้ปกครอง หรือผู้บริโภค ในการลดขยะอินทรีย์จากอาหาร (ภาพที่ 3) การศึกษาวิจัยพฤติกรรมผู้บริโภคเพื่อลด Food waste การส่งเสริมเชิงนโยบายเพื่อบริจาคอาหารคุณภาพก่อนหมดอายุ การส่งเสริมให้มีการรีไซเคิลขยะอินทรีย์ รวมทั้งการส่งเสริมด้านตลาดสำหรับผลิตภัณฑ์รีไซเคิลจากขยะอินทรีย์ เป็นต้น



ภาพที่ 2 แนวทางการจัดการลดปัญหา Food waste ในสหภาพยุโรป

ที่มา: European Commission Joint Research Centre, 2024



United States Department of Agriculture

Easy Steps to Prevent Food Waste

Everyone is shopping smarter these days. It is important for the environment to keep food waste out of landfills where it produces methane, a powerful greenhouse gas.

Use these tips to save on groceries and help the environment.

1. Plan ahead



Before you go to the grocery store or order online, make a list so you don't buy more than you need.

2. Serve smart



Portion control is good for your waistline, and good for reducing plate waste.

3. Love your leftovers



Pack leftovers in small portions in shallow containers, mark the contents and date, refrigerate and use within 3 to 4 days or freeze immediately.

4. Compost, don't trash



Food scraps can be recycled into compost, an organic material that can be added to soil to help plants grow. Set up a home compost bin or drop your food waste at a local compost center.

Learn more about food loss and waste prevention at www.usda.gov/foodlossandwaste.

ภาพที่ 3 ตัวอย่างการสื่อสารไปยังผู้บริโภคเพื่อลด Food waste ในสหรัฐอเมริกา
ที่มา: <http://www.usda.gov/foodlossandwaste/consumers>

3. ตัวอย่างนวัตกรรมเทคโนโลยีสำหรับอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์เพื่อลด Food waste

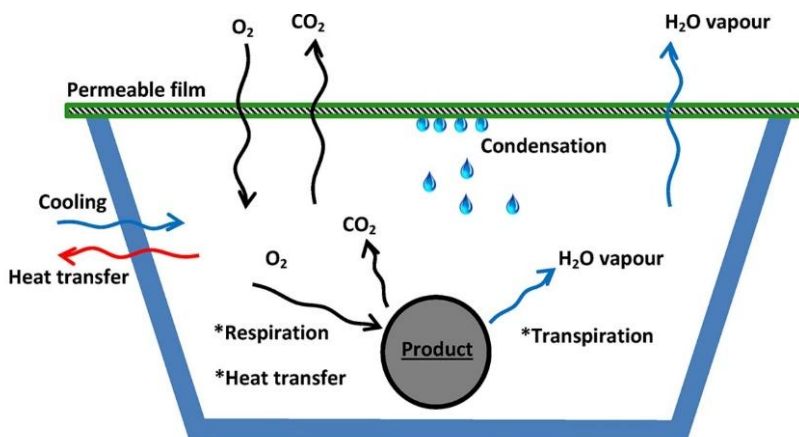
เทคโนโลยีการบรรจุอาหารสมัยใหม่ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการลดปริมาณขยะอาหารที่เกิดขึ้นตลอดห่วงโซ่อุปทาน โดยเฉพาะในช่วงหลังการเก็บเกี่ยว การขนส่ง การจัดจำหน่าย และการบริโภค ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการสูญเสียสูงที่สุด จากเดิมที่บรรจุภัณฑ์มีหน้าที่หลักในการปกป้องอาหารจากปัจจัยภายนอก ปัจจุบันได้พัฒนาไปสู่การทำหน้าที่เชิงรุก (Active function) ในการควบคุมสภาพแวดล้อมภายใน ชะลอการเสื่อมคุณภาพ และให้ข้อมูลคุณภาพอาหารแก่ผู้บริโภคโดยตรง

หนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการยืดอายุการเก็บรักษา และลดการสูญเสียอาหาร คือ การบรรจุแบบบรรยากาศดัดแปร (Modified Atmosphere Packaging, MAP) ซึ่งเป็นระบบควบคุมองค์ประกอบของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสมกับลักษณะและความต้องการเฉพาะของผลิตภัณฑ์อาหาร โดยสามารถจำแนกออกเป็นสองรูปแบบหลัก ได้แก่ Active MAP และ Passive MAP

Active MAP เป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมอย่างยิ่งกับผลิตภัณฑ์ประเภทเนื้อสัตว์และผลิตภัณฑ์แปรรูปอื่น ๆ โดยอาศัยการเติมก๊าซเฉพาะเข้าไปในบรรจุภัณฑ์ เช่น การเติมไนโตรเจนเพื่อแทนที่ออกซิเจน หรือการเพิ่มคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ โดยไม่ขึ้นอยู่กับกลไกธรรมชาติของผลิตภัณฑ์ภายในบรรจุภัณฑ์ โดยทั่วไปแล้วสัดส่วนของก๊าซที่ใช้กับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ ได้แก่ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ออกซิเจน (O_2) เพื่อคงสีสดของไมโอโกลบินในเนื้อแดง และไนโตรเจน (N_2) เพื่อแทนที่ออกซิเจนและทำหน้าที่เป็นก๊าซเฉื่อย งานวิจัยของ Gurunathan *et al.* (2022) แสดงให้เห็นว่า การปรับอัตราส่วนของ $\text{CO}_2:\text{O}_2:\text{N}_2$ อย่างเหมาะสมในบรรจุภัณฑ์เนื้อไก่สดช่วยลดการเพิ่มขึ้นของค่า TVB-N (total volatile basic nitrogen) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดการเน่าเสีย และลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมัน ทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งในด้านกลิ่น สี และเนื้อสัมผัสดีขึ้นอย่างชัดเจนตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา นอกจากนี้ ยังสามารถควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดให้อยู่ในระดับปลอดภัยภายใต้ระยะเวลาการเก็บที่ยาวนานขึ้น ที่สำคัญไปกว่านั้น การใช้ MAP ยังมีศักยภาพในการลดการพึ่งพาสารเคมี เช่น สารกันเสีย (preservatives) ในการยืดอายุอาหาร ซึ่งตอบสนองต่อแนวโน้มของผู้บริโภคยุคใหม่ที่ใส่ใจสุขภาพ ความปลอดภัยของอาหาร และความยั่งยืนด้านสิ่งแวดล้อมตามที่ Sandhya (2010) ได้รายงานไว้ว่า MAP เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัยต่อการยืดอายุผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาสารเคมีแต่งเพิ่มเติม

ในทางตรงกันข้าม Passive MAP เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ยังคงมีชีวิต เช่น ผักและผลไม้ โดยอาศัยกระบวนการหายใจของผลิตภัณฑ์ควบคู่กับการเลือกใช้วัสดุบรรจุที่มีสมบัติการแพร่ผ่านก๊าซในอัตราที่เหมาะสม โดยไม่ต้องมีการเติมก๊าซจากภายนอก (ภาพที่ 4) โดยหนึ่งในรูปแบบที่พัฒนาต่อยอดจาก Passive MAP อย่างก้าวหน้าคือ Equilibrium Modified Atmosphere Packaging (EMAP) ซึ่งออกแบบให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลของก๊าซอย่างรวดเร็ว โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหายใจของผลิตภัณฑ์กับอัตราการแพร่ผ่านก๊าซของวัสดุบรรจุ เช่น ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ส่งผลให้สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงภายในบรรจุภัณฑ์และชะลอการเสื่อมคุณภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยวัสดุ

บรรจุในระบบ EMAP มักได้รับการออกแบบให้มีรูเจาะระดับไมโครเมตร (microperforation) ด้วยเลเซอร์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการควบคุมการแลกเปลี่ยนก๊าซได้อย่างแม่นยำ ทั้งในวัสดุฐานปิโตรเลียม เช่น OPP และ PET และวัสดุฐานชีวภาพที่ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เช่น PLA และ PBS เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถออกแบบรูเจาะให้มีขนาดและจำนวนที่เหมาะสมต่อชนิดผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของ EMAP ที่ต้องอิงกับพฤติกรรมการหายใจเฉพาะของผลิตภัณฑ์



ภาพที่ 4 กระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในระบบการบรรจุแบบบรรยากาศดัดแปรของผลิตภัณฑ์สด
ที่มา: Belay *et al.*, 2016

ความสำคัญของ EMAP ยิ่งทวีความโดดเด่นในบริบทของประเทศไทย ซึ่งเป็นหนึ่งในประเทศผู้ส่งออกผักและผลไม้รายใหญ่ของโลก โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ที่มีอัตราการหายใจสูงและอายุสั้น เช่น มะม่วงกล้วย ผักใบเขียว และข้าวโพดฝักอ่อน ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ ซึ่งหากไม่จัดการอย่างเหมาะสมจะทำให้เกิดการเน่าเสียก่อนถึงมือผู้บริโภคปลายทาง เทคโนโลยี EMAP จึงไม่เพียงแต่ช่วยลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยวเท่านั้น แต่ยังช่วยรักษาคุณภาพและมูลค่าของสินค้าไทยในตลาดโลกได้อย่างยั่งยืน ตัวอย่างเช่น ผักสลัดรวม ซึ่งเป็นพืชที่มีอัตราการหายใจสูงมาก หากบรรจุในสภาวะที่มี O₂ มากเกินไปจะเร่งการหายใจและการเสื่อมคุณภาพ ในขณะที่ CO₂ มากเกินไปก็อาจทำให้เนื้อเยื่อเสียหาย งานวิจัยที่ใช้ฟิล์มลามิเนต PET/PE ที่เจาะรูด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์พบว่า สามารถควบคุมระดับก๊าซให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (10 – 13% O₂ และ 8 – 10% CO₂) และยืดอายุการเก็บรักษาได้นานถึง 9 วัน ที่อุณหภูมิ 8 องศาเซลเซียส (Winotapun *et al.*, 2021)

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่ออกแบบรูเจาะด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์บนฟิล์มฐานชีวภาพที่ย่อยสลายได้ ให้สอดคล้องกับอัตราการหายใจของข้าวโพดฝักอ่อน แสดงให้เห็นว่า EMAP ช่วยรักษาคุณภาพทั้งด้านสี ความสด และลดการสูญเสียได้อย่างชัดเจน (Winotapun *et al.*, 2023)

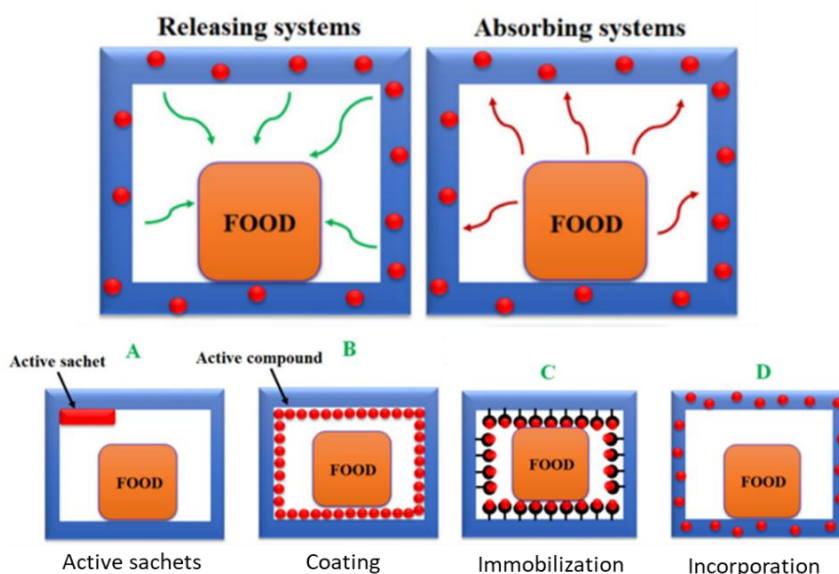
รวมถึงผลไม้เมืองร้อนอย่าง มะม่วงและกล้วยหอมทอง ซึ่งเป็นหนึ่งในสินค้าส่งออกสำคัญของไทย โดยจากการศึกษาพบว่า พิล์มฐานชีวภาพผสมระหว่าง PBS และ PBAT ในสัดส่วนร้อยละ 80:20 ที่เจาะรูด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถเพิ่มสมบัติเชิงกลและอัตราการแพร่ผ่านก๊าซของฟิล์มให้เหมาะสมกับการหายใจของมะม่วง และสร้างบรรยากาศดัดแปรภายในบรรจุภัณฑ์ให้ช่วยยืดอายุมะม่วงได้นานถึง 35 วัน โดยไม่เกิดกลิ่นเหม็นหมัก หรือการเสื่อมคุณภาพอย่างมีนัยสำคัญ (Winotapun *et al.*, 2024) ซึ่งถือเป็นระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการส่งออก ในขณะที่ฟิล์ม PBS ที่มีการเจาะรูด้วยเลเซอร์ในจำนวนและขนาดรูเจาะที่แตกต่างกันสำหรับบรรจุกล้วยหอมทองก็พบว่า จำนวนและขนาดของรูเจาะที่เพิ่มขึ้นเป็นปัจจัยโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของอัตราการซึมผ่าน O_2 และ CO_2 ของฟิล์ม ส่งผลให้สามารถคงคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษากล้วยหอมทองได้นานขึ้น (Nuamduang *et al.*, 2024) จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นแสดงให้เห็นว่า เทคโนโลยี EMAP โดยเฉพาะการใช้ฟิล์มเจาะรูด้วยเลเซอร์ชนิดคาร์บอนไดออกไซด์ถือเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการยืดอายุผลผลิตสด ช่วยลดขยะอาหาร และสนับสนุนการส่งออกสินค้าเกษตรของไทยได้อย่างเป็นระบบและยั่งยืน

อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของระบบการบรรจุแบบบรรยากาศดัดแปร (MAP) ไม่ว่าจะใช้กับผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ หรือผักผลไม้ ขึ้นอยู่กับการออกแบบที่คำนึงถึงปัจจัยหลายประการอย่างบูรณาการ ทั้งในเชิงวิทยาศาสตร์อาหาร เทคโนโลยีการบรรจุและวัสดุ และวิศวกรรมกระบวนการ โดยเฉพาะต้องพิจารณาองค์ประกอบของก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ให้เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ เช่น ปริมาณไขมัน ค่า pH หรืออัตราการหายใจในกรณีของผลผลิตสด ร่วมกับการเลือกใช้วัสดุบรรจุที่มีสมบัติสภาพให้ซึมผ่านได้ ก๊าซของวัสดุบรรจุ (Gas permeability) ที่เหมาะสมกับเป้าหมาย การควบคุมบรรยากาศภายใน การออกแบบบรรจุภัณฑ์ ควรสอดคล้องกับองค์ประกอบก๊าซภายในบรรจุภัณฑ์ที่แนะนำ สภาพแวดล้อมในการเก็บรักษา อุณหภูมิในการจัดเก็บ และอายุการเก็บรักษาที่ต้องการ ปัจจัยเหล่านี้ล้วนมีผลต่อความสามารถในการควบคุมอัตราการแลกเปลี่ยนก๊าซให้เกิดภาวะสมดุลภายในบรรจุภัณฑ์ได้อย่างแม่นยำ และส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ตลอดช่วงการจัดเก็บและการกระจายสินค้าในห่วงโซ่อุปทาน

โดยสรุป เทคโนโลยี MAP ทั้งในรูปแบบ Active และ EMAP ไม่เพียงแต่ช่วยยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์อาหารทั้งประเภทเนื้อสัตว์และผักผลไม้ให้ยาวนานขึ้นเท่านั้น แต่ยังมีส่วนเชิงยุทธศาสตร์ในการลดขยะอาหาร เพิ่มประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ และสนับสนุนความมั่นคงทางอาหารในระดับระบบห่วงโซ่อุปทานอย่างยั่งยืน อีกทั้งยังสามารถบูรณาการกับเทคโนโลยีอื่น เช่น การบรรจุแบบแอคทีฟ (Active packaging) และการบรรจุแบบอัจฉริยะ (Intelligent packaging) ได้อย่างลงตัว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมคุณภาพ และสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้บริโภคในยุคปัจจุบัน

การบรรจุแบบแอคทีฟ (Active packaging) เป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญในการยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร โดยอาศัยกลไกของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างบรรจุภัณฑ์กับผลิตภัณฑ์อาหาร หรือกับสภาพแวดล้อมภายในบรรจุภัณฑ์อย่างเหมาะสม เพื่อลดการเสื่อมสภาพของอาหาร

ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และลดปริมาณการสูญเสียอาหารที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต และการจัดจำหน่าย ระบบการบรรจุแบบแอคทีฟสามารถจำแนกตามกลไกการทำงานหลักได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ระบบที่ดูดซับสาร (Absorbent systems) และระบบที่ปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ (Releasing systems) โดยเทคนิคในการนำสารออกฤทธิ์ (Active compounds) ไปใช้งานนั้น อาจอยู่ในรูปของการผนวกรวมลงในวัสดุบรรจุโดยตรง การเคลือบบนพื้นผิว หรือการตรึงไว้ภายในชั้นของวัสดุ นอกจากนี้ ยังอาจวางแทรกไว้ภายในบรรจุภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น ซอง สติกเกอร์ แผ่นดูดซับ หรือหมึกพิมพ์ สารออกฤทธิ์เหล่านี้มีหน้าที่ก่อให้เกิดการโต้ตอบโดยตรงกับผลิตภัณฑ์อาหาร หรือกับช่องว่างอากาศภายในบรรจุภัณฑ์ ดังแสดงในภาพที่ 5 เพื่อควบคุมปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพ เช่น ความชื้น ก๊าซออกซิเจน เอทิลีน หรือเชื้อจุลินทรีย์ ทั้งนี้ เพื่อรักษาคุณภาพ ความปลอดภัย และความคงตัวของอาหารตลอดระยะเวลาการเก็บรักษาอย่างมีประสิทธิภาพ

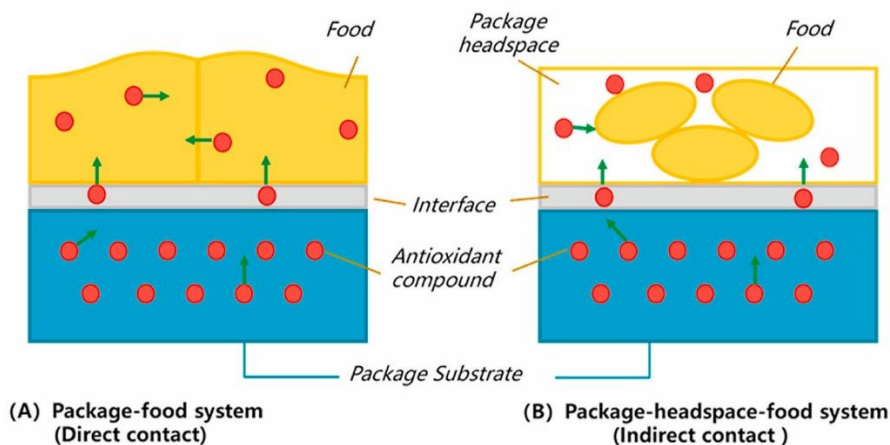


ภาพที่ 5 ระบบการบรรจุแบบแอคทีฟ

ที่มา: Almasi *et al.* (2021)

ระบบการบรรจุแบบแอคทีฟ โดยทั่วไปประกอบด้วย 3 องค์ประกอบ ได้แก่ สารออกฤทธิ์ วัสดุบรรจุและอาหารที่ต้องการเก็บรักษา ซึ่งสามารถจำแนกตามกลไกการทำงานออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ ระบบที่ทำงานบริเวณผิวอาหาร (Package–food system) และระบบที่ทำงานในช่องว่างเหนือผลิตภัณฑ์ภายในบรรจุภัณฑ์ก่อนส่งผลต่ออาหาร (Package–headspace–food system) (ภาพที่ 6) ในระบบแรก สารแอคทีฟอาจถูกผสมไว้ในเนื้อฟิล์ม หรือเคลือบลงบนผิวบรรจุภัณฑ์ เพื่อให้ปลดปล่อย หรือดูดซับสารอย่างต่อเนื่องโดยตรงจากผิวอาหาร ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Sayadi *et al.*

(2022) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ฟิล์มเจลลาตินที่ผสมไทเทเนียมไดออกไซด์ มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณ *Listeria monocytogenes* บนเนื้อสัตว์ได้อย่างชัดเจน ในขณะที่ระบบแบบที่ทำงานในช่องว่างเหนือผลิตภัณฑ์ภายในบรรจุภัณฑ์จะมุ่งเน้นการควบคุมบรรยากาศภายในบรรจุภัณฑ์ เช่น การใช้ช่องดูดซับเอทิลีนเพื่อชะลอการสุกของผลไม้ หรือการใส่แผ่นดูดซับออกซิเจนเพื่อลดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่อาจส่งผลต่อสี กลิ่น และรสของผลิตภัณฑ์ ดังงานวิจัยของ Gaikwad *et al.* (2020) รายงานถึงการใช้อยู่ active pad ที่บรรจุสารดูดซับในบรรจุภัณฑ์พลาสติก สามารถยืดอายุการเก็บรักษาได้นานกว่า 8 วัน เมื่อเทียบกับตัวอย่างกลุ่มควบคุม

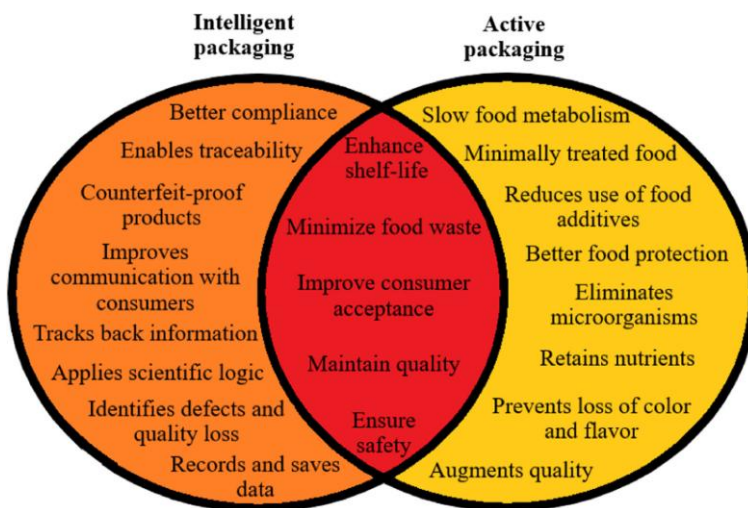


ภาพที่ 6 กลไกการปลดปล่อยสารออกฤทธิ์ในการบรรจุแบบแอททิฟ
ที่มา: Kuai *et al.* (2021)

ในบางกรณี การปลดปล่อยสารออกฤทธิ์อาจถูกออกแบบให้เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และต่อเนื่องในอัตราที่เหมาะสมกับลักษณะการเสื่อมของผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น การออกแบบฟิล์มที่มีความสามารถในการควบคุมการแพร่ของน้ำมันหอมระเหยในอัตราต่ำ เพื่อให้สอดคล้องและครอบคลุมกับระยะเวลาในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา นอกจากนี้ แนวโน้มการพัฒนาการบรรจุแบบแอททิฟ ยังเน้นการใช้สารออกฤทธิ์จากธรรมชาติ หรือพืชสมุนไพร เช่น น้ำมันจากอบเชย โหระพา และกานพลู เพื่อเพิ่มความปลอดภัยและความยอมรับของผู้บริโภค (Ribeiro-Santos *et al.*, 2017) ทั้งนี้ การพัฒนาระบบการบรรจุแบบแอททิฟยังต้องคำนึงถึงปัจจัยด้านกฎหมาย ความปลอดภัยของสารที่ใช้ ความคงตัวของสารระหว่างการเก็บรักษา และผลกระทบต่อประสาทสัมผัสของผู้บริโภคอีกด้วย

จากความก้าวหน้าทางวัสดุศาสตร์และเทคโนโลยีการผลิตในปัจจุบัน การผสมผสานการทำงานของระบบแอททิฟหลายชนิดเข้าด้วยกัน เช่น การรวมระหว่างสารดูดซับก๊าซกับสารยับยั้งจุลินทรีย์

หรือการรวม Active packaging เข้ากับระบบ Intelligent packaging เพื่อให้บรรจุภัณฑ์สามารถตอบสนองต่อสภาพแวดล้อมแบบทันทีได้มากขึ้น นำไปสู่การเก็บรักษาคุณภาพและอายุการเก็บรักษา การลดขยะอาหาร และการยอมรับของผู้บริโภค ถือเป็นแนวทางที่น่าสนใจและกำลังเป็นที่สนใจอย่างมาก ในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหารทั่วโลก (ภาพที่ 7)

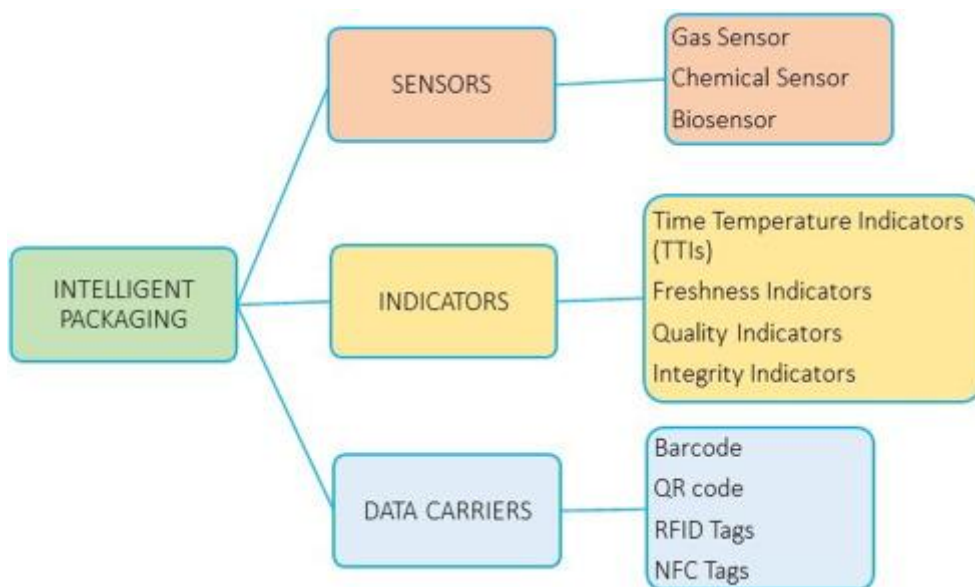


ภาพที่ 7 แผนภาพแสดงจุดที่เหมือนและแตกต่างระหว่างการบรรจุแอกทีฟ และการบรรจุแบบอัจฉริยะ
ที่มา: Thirupathi Vasuki *et al.* (2023)

การบรรจุแบบอัจฉริยะ (Intelligent packaging) ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมอาหารสดที่มีความไวต่อการเสื่อมคุณภาพ เทคโนโลยีนี้ทำหน้าที่เสมือน “ผู้สังเกตการณ์” ของอาหาร โดยสามารถตรวจจับ (sense), เฝ้าระวัง (monitor), บันทึก (record), ตรวจสอบย้อนกลับ (trace) และแสดงข้อมูลคุณภาพของอาหารในรูปแบบที่เข้าใจง่ายต่อทั้งผู้ผลิตและผู้บริโภค แม้จะไม่มีคุณสมบัติในการโต้ตอบกับอาหารเหมือนระบบการบรรจุแบบแอกทีฟ แต่ก็มีความสำคัญในระบบการจัดการคุณภาพและความปลอดภัยของอาหาร โดยเฉพาะในบริบทของการตัดสินใจด้านอายุการเก็บรักษา (shelf-life), ความสด (freshness) และความปลอดภัยในการบริโภค (Safety decision making) (Firouz *et al.*, 2021)

ระบบการบรรจุแบบอัจฉริยะสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ (1) Indicators เช่น फिल्मที่เปลี่ยนสีตาม pH หรือการสะสมของสารระเหยจากอาหารเสีย (2) Sensors เช่น ตัวตรวจจับก๊าซเฉพาะชนิด หรือออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์ และ (3) Data carriers เช่น RFID หรือ QR code ที่ใช้ในการติดตามและตรวจสอบย้อนกลับสินค้า (Chaudhary *et al.*, 2024) ตัวอย่างที่ได้รับความนิยม คือ

การใช้ฟิล์มที่มีแอนโทไซยานินจากธรรมชาติ ซึ่งไวต่อ pH ที่เปลี่ยนไปเมื่ออาหารเริ่มเสื่อมคุณภาพ โดยเฉพาะในเนื้อสัตว์และปลา ซึ่งปล่อยสารประกอบระเหยที่มีฤทธิ์เป็นด่างออกมา ฟิล์มชนิดนี้จะเปลี่ยนจากสีแดงไปม่วง หรือเขียว ตามค่าความเป็นกรด – ด่างที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการแสดงความสดอย่างเป็นรูปธรรมโดยไม่ต้องเปิดบรรจุภัณฑ์ (Chen *et al.* (2020) และ Liu *et al.* (2023)) นอกจากนี้ ยังมีการนำระบบตัวตรวจวัดเวลาและอุณหภูมิ (Time-Temperature Indicators, TTI) มาใช้ในระบบโลจิสติกส์แบบควบคุมอุณหภูมิ (Cold chain) เพื่อบ่งชี้ว่าผลิตภัณฑ์เคยสัมผัสกับช่วงอุณหภูมิที่อาจส่งผลต่อคุณภาพหรือไม่ ตัวอย่างของ TTI ที่เปลี่ยนสีตามเวลาที่สัมผัสกับอุณหภูมิสูงเกินค่าที่กำหนดได้รับการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมนมและอาหารทะเลเพื่อเพิ่มความมั่นใจให้กับผู้บริโภค



ภาพที่ 8 การจำแนกประเภทระบบการบรรจุแบบอัจฉริยะในการตรวจจับหรือติดตามสถานะของผลิตภัณฑ์
ที่มา: Chaudhary *et al.* (2024)

จากการวิเคราะห์ภาพรวมจะเห็นว่า การบรรจุแบบอัจฉริยะไม่เพียงแต่ช่วยในการตรวจสอบความสดและความปลอดภัยของอาหารเท่านั้น แต่ยังมีศักยภาพสูงในการเพิ่มความโปร่งใสและความน่าเชื่อถือในห่วงโซ่อุปทานอาหาร โดยเฉพาะในยุคที่ผู้บริโภคให้ความสำคัญกับความยั่งยืนและความรับผิดชอบต่อตราสินค้า เมื่อพิจารณาจากผลการศึกษากันทั่วโลกจะพบว่า เทคโนโลยีการบรรจุอัจฉริยะเหล่านี้ สามารถลดอัตราการเน่าเสียของอาหารสด เพิ่มโอกาสการขาย ลดความเสียหายและการเรียกคืนสินค้า อีกทั้งยังช่วยสร้างความเชื่อมั่นให้แก่ผู้บริโภคในด้านคุณภาพและความปลอดภัย

ทั้งนี้ ยังพบว่า ภาคอุตสาหกรรมอาหารและบรรจุภัณฑ์เริ่มหันมาให้ความสำคัญกับการออกแบบบรรจุภัณฑ์โดยอิงจากข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์ เช่น ค่าการแพร่ผ่านของก๊าซ (permeation) แบบจำลองอายุการเก็บรักษา (Shelf-life modeling) หรือการจับคู่ระหว่างอัตราการหายใจของผลิตภัณฑ์กับค่าการแพร่ผ่านของวัสดุบรรจุ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงระบบที่ขับเคลื่อนด้วยนวัตกรรมอย่างแท้จริง

4. แนวทางการส่งเสริมเชิงนโยบายเพื่อลด Food waste โดยใช้เทคโนโลยีและนวัตกรรมบรรจุ

สำหรับแนวทางการส่งเสริมเชิงนโยบายเพื่อลด Food waste นั้น สามารถดำเนินการได้หลายวิธี ทั้งการใช้หลักด้านการบริหารจัดการโซ่อุปทานที่เหมาะสม การใช้นโยบายด้านภาษี และการเก็บค่าธรรมเนียม การให้ข้อมูลสร้างความตระหนักและการจูงใจผู้บริโภค และการใช้เทคโนโลยีและนวัตกรรมบรรจุ หรือนวัตกรรมด้านบรรจุภัณฑ์ เป็นต้น โดยสามารถสรุปในภาพรวมได้ ดังนี้

4.1 การส่งเสริมด้านการบริหารจัดการโซ่อุปทานที่เหมาะสม เป็นการลดปริมาณขยะอาหารในแต่ละภาคส่วนในโซ่อุปทาน โดยเฉพาะในกระบวนการผลิต ขนส่ง และค้าปลีก เช่น การส่งเสริมให้มีการบริจาคอาหารโดยผู้ผลิต หรือผู้ค้าปลีก ส่งเสริมผู้ประกอบการให้นำอาหารเหลือมาแปรรูปใหม่ แบ่งปันส่งต่อให้กับคนที่ต้องการ หรือนำไปเป็นอาหารสัตว์ การนำขยะอาหารเข้ากระบวนการผลิตเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในรูปแบบอื่น ๆ เช่น การผลิตก๊าซชีวภาพ น้ำหมักชีวภาพ การผลิตปุ๋ยเพื่อใช้ในการเกษตร และขั้นตอนสุดท้าย คือ การกำจัด เช่น การฝังกลบอย่างถูกหลักวิธี

4.2 การใช้นโยบายทางกฎหมาย นโยบายด้านการเรียกเก็บ หรือลดหย่อนภาษี และการเก็บค่าธรรมเนียม เช่น ให้ Tax credit สำหรับค่าใช้จ่ายในการวางระบบจัดการขยะอาหารสำหรับภาคธุรกิจ การคืน VAT ให้แก่ผู้บริจาคอาหาร เพื่อกระตุ้นให้เกิดการหมุนเวียนส่งต่ออาหาร และการเพิ่มอัตราค่าธรรมเนียมการจัดเก็บขยะ (Polluters pay) เป็นต้น

4.3 การให้ข้อมูลสร้างความตระหนักและการจูงใจผู้บริโภค เช่น การส่งเสริมให้ผู้บริโภควางแผนก่อนซื้อของ เพื่อกำหนดปริมาณอย่างพอเหมาะกับการใช้งาน ไม่ตุนอาหารมากเกินไป รวมทั้งเพิ่มแรงจูงใจผู้บริโภคในการลดปริมาณขยะอาหาร และทำความเข้าใจกับผู้บริโภคที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบจากขยะอาหาร

4.4 การส่งเสริมเชิงนโยบายให้ผู้ประกอบการเลือกใช้ หรือดำเนินการวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีและนวัตกรรมด้านบรรจุภัณฑ์ เช่น การกำหนดขนาดบรรจุที่เหมาะสม การออกแบบบรรจุภัณฑ์แบบควบคุมปริมาณการบริโภค (Portion control) หรือแบ่งช่องบรรจุ (Dual compartment) การใช้เทคโนโลยีการบรรจุเพื่อรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ระบบการบรรจุแบบบรรยากาศดีดแปรในผลิตผลสด หรือผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ การใช้เทคโนโลยีการบรรจุแบบสมาร์ท เช่น ระบบการบรรจุแบบการบรรจุเอกทิฟเพื่อลดการเสื่อมสภาพของอาหาร ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ และลดปริมาณการสูญเสียอาหารที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตและการจัดจำหน่าย หรือการวิจัยพัฒนาระบบการบรรจุแบบอัจฉริยะในการตรวจจับ หรือติดตามสถานะของผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

UNEP Food waste Index Report. 2024.

<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/45230>

Environment in Geneva, <https://www.genevaenvironmentnetwork.org/environment-geneva/>

ขยะอาหารล้นโลก แต่ผู้คนยังอดอยาก ความเหลื่อมล้ำที่ต้องเร่งจัดการ. 10 กุมภาพันธ์ 2568.

<https://resourcecenter.thaihealth.or.th/>

Ritchie, H. 2020. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/food-waste-emissions>
European Commission Joint Research Centre. 2024.

file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/JRC137760_01.pdf

USDA. <https://www.usda.gov/foodlossandwaste/consumers>

Almasi, H., Jahanbakhsh Oskouie, M., & Saleh, A. (2021). A review on techniques utilized for design of controlled release food active packaging. **Critical reviews in food science and nutrition**, 61(15), 2601-2621.

Belay, Z. A., Caleb, O. J., & Opara, U. L. (2016). Modelling approaches for designing and evaluating the performance of modified atmosphere packaging (MAP) systems for fresh produce: A review. **Food Packaging and Shelf Life**, 10, 1-15.

Chaudhary, M. T., Hassan, A., Goksen, G., & Trif, M. (2024). Intelligent packaging—tracing devices. In **Intelligent Packaging** (pp. 127-160). Academic Press.

Chen, H. Z., Zhang, M., Bhandari, B., & Yang, C. H. (2020). Novel pH-sensitive films containing curcumin and anthocyanins to monitor fish freshness. **Food Hydrocolloids**, 100, 105438.

Firouz, M. S., Mohi-Alden, K., & Omid, M. (2021). A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development. **Food Research International**, 141, 110113.

Gaikwad, K. K., Singh, S., & Negi, Y. S. (2020). Ethylene scavengers for active packaging of fresh food produce. **Environmental Chemistry Letters**, 18(2), 269-284.

Gurunathan, M., Srinivasan, M., & Ganesan, M. (2022). Influence of modified atmosphere packaging on quality characteristics of fresh chicken meat. **Journal of Food Safety**, 42(2), e12956. <https://doi.org/10.1111/jfs.12956>

Kuai, L., Liu, F., Chiou, B. S., Avena-Bustillos, R. J., McHugh, T. H., & Zhong, F. (2021). Controlled release of antioxidants from active food packaging: A review. **Food Hydrocolloids**, 120, 106992.

- Liu, D., Zhong, Y., Li, X., Pu, Y., Chen, S., & Zhang, C. (2023). Indicator films based on anthocyanins loaded on metal-organic framework carriers and BP neural network for monitoring meat freshness. **Food Hydrocolloids**, 145, 109106.
- Nuamduang, P., Winotapun, C., Harnkarnsujarit, N., Sungdech, P., Issaraseree, Y., & Leelaphiwat, P. (2024). Regulating gas transmission rates in microperforated polybutylene succinate films for modified atmosphere packaging of bananas. **Food Packaging and Shelf Life**, 45, 101347.
- Ribeiro-Santos, R., Andrade, M., de Melo, N. R., & Sanches-Silva, A. (2017). Use of essential oils in active food packaging: Recent advances and future trends. **Trends in food science & technology**, 61, 132-140.
- Sandhya. (2010). Modified atmosphere packaging of fresh produce: Current status and future needs. **LWT - Food Science and Technology**, 43(3), 381–392.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2009.05.018>
- Sayadi, M., Amiri, S., & Radi, M. (2022). Active packaging nanocomposite gelatin-based films as a carrier of nano TiO₂ and cumin essential oil: the effect on quality parameters of fresh chicken. **Journal of Food Measurement and Characterization**, 16(1), 420-430.
- Thirupathi Vasuki, M., Kadirvel, V., & Pejavara Narayana, G. (2023). Smart packaging—An overview of concepts and applications in various food industries. **Food Bioengineering**, 2(1), 25-41.
- Winotapun, C., Aontee, A., Inyai, J., Pinsuwan, B., & Daud, W. (2021). Laser perforation of polyethylene terephthalate/polyethylene laminated film for fresh produce packaging application. **Food Packaging and Shelf Life**, 28, 100677.
- Winotapun, C., Issaraseree, Y., Sirirutbunkajal, P., & Leelaphiwat, P. (2023). CO₂ laser perforated biodegradable films for modified atmosphere packaging of baby corn. **Journal of Food Engineering**, 341, 111356.
- Winotapun, C., Tameesrisuk, M., Sirirutbunkajal, P., Sungdech, P., & Leelaphiwat, P. (2024). Enhancing gas transmission rate of PBS/PBAT composite films: a study on microperforated film solutions for mango storage. **ACS omega**, 9(3), 3469-3479.