

บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ (Intelligent Packaging)

ชลิตา ชลไมตรี

นักวิจัย ปฏิบัติการ

ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์

สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในอุตสาหกรรมอาหารยุคปัจจุบัน บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะ (Intelligent Packaging) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญสำหรับใช้ประเมินคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ (Quality and Safety Assessment) โดยบรรจุภัณฑ์ประเภทนี้ไม่ได้ทำหน้าที่เพียงการห่อหุ้มหรือปกป้องอาหารจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเท่านั้น แต่ยังสามารถในการติดตาม (Monitor) ตรวจจับ (Detect) และสื่อสาร (Communicate) ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงของอาหารภายในบรรจุภัณฑ์ได้ตามเวลาจริง (Real-time) เทคโนโลยีนี้ทำงานโดยอาศัยระบบเซนเซอร์ (Sensors) อินดิเคเตอร์ (Indicators) หรือ Internet of Things (IoT) (Sobhan et al., 2025) อย่างไรก็ตาม ในที่นี้จะมุ่งเน้นเฉพาะระบบอินดิเคเตอร์ที่ตอบสนองด้วยการเปลี่ยนสี (Colorimetric Indicators) ซึ่งผู้บริโภคสามารถสังเกตและประเมินผลได้ง่ายด้วยตาเปล่า โดยไม่ต้องทำลายตัวอย่าง (Non-destructive Method) จึงสามารถนำมาใช้เป็นตัวบ่งชี้ความสดใหม่ของผลิตภัณฑ์อาหารได้หลากหลาย เช่น ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ และอาหารทะเล ทั้งนี้ สามารถจำแนกประเภทของอินดิเคเตอร์ตามกลไกและเป้าหมายในการตรวจวัดได้ ดังนี้

1. อินดิเคเตอร์บ่งชี้ความสด (Freshness Indicators) เป็นตัวบ่งชี้ที่ใช้สำหรับตรวจสอบคุณภาพและความปลอดภัยทางจุลชีววิทยาของอาหารโดยตรง (Microbial Spoilage) เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์กลุ่มผักและผลไม้ตัดแต่งพร้อมบริโภค (Fresh-cut) รวมถึงเนื้อสัตว์แช่เย็น และอาหารทะเล (Zhai et al., 2025)

- กลไกการทำงาน: เมื่ออาหารเริ่มเกิดการเสื่อมเสียจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ปนเปื้อน จุลินทรีย์จะหลั่งเอนไซม์ออกมาย่อยสลายสารอาหารและปลดปล่อยสารเมตาบอไลต์ (Metabolites) หรือแก๊สระเหยชนิดต่าง ๆ ออกมาสะสมอยู่ในช่องว่างเหนือผลิตภัณฑ์ (Headspace) ซึ่งสามารถจำแนกตามลักษณะเฉพาะของประเภทอาหารได้ดังนี้

- ผักและผลไม้ตัดแต่ง: จุลินทรีย์ (เช่น แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดแลกติก) จะทำให้เกิดกระบวนการหมักและปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เอทานอล (Ethanol) หรือสารระเหยอินทรีย์อื่น ๆ สารประกอบเหล่านี้จะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ภายในบรรจุภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไปจนไปกระตุ้นให้สารบ่งชี้ที่ไวต่อกรด-ด่าง (pH-sensitive Dyes) เกิดการเปลี่ยนสี

- เนื้อสัตว์และอาหารทะเล: จุลินทรีย์จะเกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสย่อยสลายโครงสร้างโปรตีน (Protein Hydrolysis) ให้กลายเป็นกรดอะมิโน และแปรสภาพต่อเนื่องไปเป็นแก๊สระเหยที่มีฤทธิ์เป็นด่างและกลุ่มซัลไฟด์ เช่น แอมโมเนีย และไฮโดรเจนซัลไฟด์ สารระเหยเหล่านี้จะเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับแถบอินดิเคเตอร์และแสดงสีที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างชัดเจน เพื่อเป็นสัญญาณเตือนล่วงหน้าก่อนที่อาหารจะเสื่อมสภาพและส่งกลิ่นเน่าเสีย

2. อินดิเคเตอร์บ่งชี้ความสุก (Ripeness Indicators) เป็นตัวบ่งชี้ที่พัฒนาขึ้นสำหรับกลุ่มผักผลไม้และผลไม้ตัดแต่ง เช่น ทูเรียน และมะม่วง (Niponsak et al., 2020; Noiwan et al., 2022)

- กลไกการทำงาน: อินดิเคเตอร์ประเภทนี้จะใช้ตรวจวัดแก๊สและสารระเหยอินทรีย์จากกระบวนการหายใจ (Respiration) และกระบวนการสุกตามธรรมชาติของเซลล์พืช แทนการตรวจวัดปริมาณการปนเปื้อนจากเชื้อจุลินทรีย์

- ดัชนีชี้วัดและการแสดงผล: ในระหว่างที่ผลไม้พัฒนาระดับความสุก เนื้อเยื่อของพืชจะมีการสังเคราะห์และปลดปล่อยแก๊สเอทิลีน (C_2H_4) รวมถึงสารหอมระเหย (Aroma Volatiles) ออกมาสะสมภายในบรรจุภัณฑ์ แถบอินดิเคเตอร์จะทำหน้าที่ดักจับปริมาณความเข้มข้นของแก๊สเหล่านี้ และเกิดปฏิกิริยาเคมีที่แปรผลออกมาเป็นเฉดสีต่าง ๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับความนิ่ม ปริมาณน้ำตาล หรือรสชาติที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ผู้บริโภคสามารถจำแนกความสุกของผลไม้ได้อย่างแม่นยำ

3. อินดิเคเตอร์บ่งชี้เวลา-อุณหภูมิ (Time-Temperature Indicators: TTIs) เป็นนวัตกรรมที่อาศัยหลักการทางเคมีในการเปลี่ยนเฉดสีของแถบวัดตามการแปรผันของระยะเวลาและอุณหภูมิที่ผลิตภัณฑ์ได้รับในระหว่างกระบวนการจัดเก็บ การขนส่ง และการวางจำหน่าย โดยฉลากจะเกิดการเปลี่ยนสีอย่างถาวรเมื่อสถานะแวดล้อมในการเก็บรักษาส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิที่เหมาะสม เทคโนโลยีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหารประเภทเสื่อมเสียรวดเร็ว ที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสูง เช่น ผลิตภัณฑ์นม และผักผลไม้แช่เยือกแข็ง เพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพตลอดห่วงโซ่อุปทาน (Yar et al., 2025)

เอกสารอ้างอิง

- Niponsak, A., Laohakunjit, N., Kerdchoechuen, O., Wongsawadee, P., & Uthairatanakij, A. (2020). Novel ripeness label based on starch/chitosan incorporated with pH dye for indicating eating quality of fresh-cut durian. *Food Control*, 107, 106785.
- Noiwan, D., Suppakul, P., & Rachtanapun, P. (2022). Preparation of methylcellulose film-based CO₂ indicator for monitoring the ripeness quality of mango fruit cv. Nam Dok Mai Si Thong. *Polymers (Basel)*, 14(17), 3616.
- Sobhan, A., Hossain, A., Wei, L., Muthukumarappan, K., & Ahmed, M. (2025). IoT-enabled biosensors in food packaging: A breakthrough in food safety for monitoring risks in real time. *Foods*, 14(8), 1403.
- Yar, M.S., Ibeogu, I.H., Regmi, A., Zhang, N., & Li, C. (2025). Advances in intelligent time-temperature indicators for cold chain monitoring: mechanisms, challenges, and applications. *Trends in Food Science & Technology*, 163, 105128.
- Zhai, X., Xue, Y., Sun, Y., Ma, X., Ban, W., Marappan, G., Tahir, H. E., Huang, X., Wu, K., Chen, Z., Zou, W., Liu, B., Zhang, L., Yang, Z., & Katona, J. (2025). Colorimetric food freshness indicators for intelligent packaging: progress, shortcomings, and promising solutions. *Foods*, 14(16), 2813.