

AI for Food Packaging: การติดตามความปลอดภัยอาหารแบบอัจฉริยะ

การพัฒนา intelligent packaging ในปัจจุบันไม่ได้จำกัดอยู่เพียงการใช้ sensor หรือ indicator เพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของอาหารและสภาพแวดล้อมภายในบรรจุภัณฑ์ แต่เริ่มมีการผสมผสาน artificial intelligence (AI) โดยเฉพาะ machine learning (ML) และ deep learning (DL) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลจากเซนเซอร์และเชื่อมโยงข้อมูลเหล่านั้นกับความปลอดภัย และคุณภาพของอาหาร เซนเซอร์สามารถตรวจวัดข้อมูลพื้นฐาน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น องค์ประกอบของก๊าซ การเปลี่ยนแปลงของ pH หรือการตอบสนองต่อจุลินทรีย์ ขณะที่ AI ช่วยวิเคราะห์ข้อมูลหลายตัวแปร จัดจำรูปแบบ และคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงของอาหารที่อาจซับซ้อนเกินกว่าจะประเมินจากค่าของเซนเซอร์เพียงตัวเดียว

รูปที่ 1 ระบบ AI-enabled intelligent packaging สามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การตรวจวัดด้วย sensor หรือ indicator การรวบรวมข้อมูลในรูปของภาพ ค่าตัวเลข หรือสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา การประมวลผลด้วยแบบจำลอง AI และการแปลผลเป็นข้อมูลที่นำไปใช้ได้ เช่น การจำแนกความสด การแจ้งเตือนการเสื่อมเสีย การคาดการณ์อายุการเก็บรักษา และการประเมินความเสี่ยงทางจุลชีววิทยา บทบาทสำคัญของ AI จึงอยู่ที่การเปลี่ยนข้อมูลดิบจากเซนเซอร์ให้เป็นข้อมูลเชิงความหมายที่สามารถใช้สนับสนุนการตัดสินใจด้านคุณภาพและความปลอดภัยของอาหารได้

ตัวอย่างพื้นฐานของการประยุกต์ใช้ AI คือการนำข้อมูล อุณหภูมิและความชื้น มาใช้ร่วมกับแบบจำลองเชิงคาดการณ์ Yin et al. (2024) ใช้ข้อมูลจากเซนเซอร์เพื่อติดตามความสดของกุ้ง และวิเคราะห์ด้วย Support Vector Machine (SVM) และ GA-enhanced Artificial Neural Network (GA-ANN) โดยให้ความแม่นยำประมาณ 92.5 และ 94.3% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าข้อมูลสภาวะแวดล้อมระหว่างการเก็บรักษาและขนส่งสามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ได้แบบพลวัต



รูปที่ 1 แนวคิดการประยุกต์ใช้ AI ร่วมกับ intelligent packaging สำหรับการติดตามความสดและความปลอดภัยของอาหาร โดยข้อมูลจาก sensor และ indicator ถูกประมวลผลด้วย machine learning และ deep learning เพื่อจำแนกสถานะของอาหาร แจ้งเตือนการเสื่อมเสีย คาดการณ์อายุการเก็บรักษา และประเมินความเสี่ยงทางจุลชีววิทยา (ดัดแปลงแนวคิดจาก Jia et al. (2026))

อีกแนวทางที่มีการศึกษาอย่างกว้างขวางคือการตรวจวัด ก๊าซและสารระเหยที่เกิดจากการเสื่อมเสีย เช่น ammonia, trimethylamine และ volatile organic compounds (VOCs) โดยใช้ sensor array ร่วมกับ deep learning ตัวอย่างเช่น ระบบ colorimetric paper sensor สำหรับปลาแซลมอนร่วมกับ deep convolutional neural network สามารถจำแนก

ความสดได้ด้วยความแม่นยำ 99.2% ขณะที่ colorimetric sensor array สำหรับเนื้อวัวร่วมกับ ResNet-50 ให้ความแม่นยำประมาณ 99.3% นอกจากนี้ ระบบตรวจ trimethylamine ที่ใช้ pH-sensitive dye array ร่วมกับ CNN สามารถจำแนกความสดได้ประมาณ 98% และตรวจ trimethylamine ได้ในระดับต่ำถึง 8.02 ppb

อีกแนวทางที่ได้รับความสนใจคือการตรวจวัด ก๊าซและสารระเหยที่เกิดจากการเสื่อมเสีย เช่น ammonia, trimethylamine และ volatile organic compounds (VOCs) เมื่อเชื่อมต่อ sensor array กับ deep learning สามารถจำแนกความสดของอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างเช่น paper-based sensor สำหรับปลาแซลมอนร่วมกับ deep convolutional neural network สามารถจำแนกความสดได้ด้วยความแม่นยำ 99.2% ขณะที่ colorimetric sensor array สำหรับเนื้อวัวร่วมกับ ResNet-50 ให้ความแม่นยำประมาณ 99.3% นอกจากนี้ ระบบตรวจ trimethylamine ร่วมกับ CNN สามารถจำแนกความสดได้ประมาณ 98% และตรวจสารได้ในระดับต่ำถึง 8.02 ppb

AI ยังถูกนำมาใช้วิเคราะห์ biochemical spoilage indicators ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอาหารระหว่างการเก็บรักษา เช่น pH, biogenic amines และ histamine ตัวอย่างหนึ่งคือ fluorescent sensor array ร่วมกับ CNN ซึ่งสามารถจำแนก biogenic amines หลายชนิดได้ด้วยความแม่นยำสูงถึง 99.29% นอกจากนี้ การประมวลผลภาพจาก freshness indicator ด้วย deep learning ยังสามารถใช้ประเมินการเปลี่ยนแปลงของปลา กุ้ง ผลไม้ และผลิตภัณฑ์อาหารอื่นๆ ได้ ขณะที่การใช้ภาพจากสมาร์ทโฟนร่วมกับ artificial neural network แสดงศักยภาพในการวิเคราะห์ histamine ผ่านระบบตรวจสอบแบบพกพาและไม่ทำลายตัวอย่าง

ในด้าน microbial safety การเชื่อมโยง biosensor หรือ colorimetric sensor กับ AI ช่วยเพิ่มความสามารถในการจำแนกการปนเปื้อนและการเจริญของจุลินทรีย์ ตัวอย่างเช่น chromogenic paper sensor ร่วมกับ neural network สามารถตรวจเชื้อก่อโรคในอาหารทะเลด้วยความแม่นยำประมาณ 90 ถึง 99% ขณะที่ nanofiber sensor ร่วมกับ SVM สามารถจำแนก Staphylococcus aureus ได้ด้วยความแม่นยำประมาณ 91% นอกจากนี้ explainable AI ยังเริ่มถูกนำมาใช้ร่วมกับข้อมูล microbial genome เพื่อคาดการณ์การเจริญของ Clostridium และช่วยอธิบายปฏิสัมพันธ์ของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเสื่อมเสียของอาหาร

จากตัวอย่างเหล่านี้ บทบาทของ AI จึงไม่ได้อยู่ที่การทดแทน sensor แต่เป็นการเพิ่มความสามารถในการ แปลผล และเชื่อมโยงข้อมูลจาก sensor กับสถานะของอาหาร โดยเฉพาะข้อมูลที่มีหลายตัวแปรหรือเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องตามเวลา การประมวลผลดังกล่าวสามารถนำไปสู่การจำแนกความสด การแจ้งเตือนการเสื่อมเสีย และการคาดการณ์อายุการเก็บรักษาที่เหลืออยู่ตามสถานะจริงของผลิตภัณฑ์ ซึ่งให้ข้อมูลมากกว่าการพิจารณาจากระยะเวลาการเก็บรักษาเพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม ควรแยกความหมายระหว่าง freshness or spoilage monitoring กับการประเมิน food safety โดยตรง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ pH ก๊าซระเหย (biogenic amines) สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การเสื่อมคุณภาพได้ แต่ไม่ได้ยืนยันการมีหรือไม่มีเชื้อก่อโรคในทุกกรณี ดังนั้น ระบบที่นำมาใช้เพื่อการตัดสินใจด้านความปลอดภัยอาหารจำเป็นต้องผ่านการตรวจสอบความถูกต้องกับวิธีอ้างอิงและจุลินทรีย์เป้าหมายที่เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แต่ละประเภท

แม้งานวิจัยจำนวนมากรายงานความแม่นยำของระบบ AI-enabled monitoring มากกว่า 90 ถึง 99% แต่เทคโนโลยีส่วนใหญ่ยังได้รับการทดสอบภายใต้สภาวะควบคุม ประสิทธิภาพในการใช้งานจริงยังขึ้นอยู่กับคุณภาพและความหลากหลายของข้อมูล ความไวและความเสถียรของเซนเซอร์ สภาวะแสงสำหรับระบบวิเคราะห์ภาพ ตลอดจนความแตกต่างของ food matrix นอกจากนี้ข้อมูลสำหรับการพัฒนาแบบจำลองด้าน spoilage, migration และ shelf-life ยังมีข้อจำกัดด้านปริมาณ ความเป็นมาตรฐาน และการเข้าถึงข้อมูล

การพัฒนาในระยะต่อไปจึงควรมุ่งสู่ multimodal sensor fusion ซึ่งรวมข้อมูลจากเซนเซอร์หลายประเภทเพื่อเพิ่มความแม่นยำและความทนทานของระบบ ควบคู่กับการพัฒนา explainable AI เพื่อให้ผลการวิเคราะห์และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจของแบบจำลองสามารถอธิบายและตรวจสอบได้ นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องมีการทดสอบกับผลิตภัณฑ์จริงในระดับอุตสาหกรรม เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือ ความคุ้มค่า และความสามารถในการใช้งานภายใต้สภาวะการผลิต การขนส่ง และการเก็บรักษาที่มีความแปรปรวนจริง

โดยสรุป การผสาน sensor กับ AI ทำให้ intelligent packaging มีศักยภาพก้าวจากการเป็นระบบที่เพียงแสดงการเปลี่ยนแปลงของอาหาร ไปสู่ระบบที่สามารถ วิเคราะห์ ตีความ และคาดการณ์สถานะของผลิตภัณฑ์ ได้แบบ real-time หรือ

near real-time ซึ่งอาจช่วยให้การประเมินความสด การตรวจสอบการเสื่อมเสีย และการเฝ้าระวังความปลอดภัยของอาหารมีความแม่นยำและสอดคล้องกับสภาพจริงของผลิตภัณฑ์มากขึ้น

ที่มาของข้อมูล

1. Jia, X., Li, X., Alharbi, M. O., Ma, P., Ismail-Fitry, M. R., Xia, S., Zhang, Y., Li, Y., & Wang, Q. (2026). AI awakens food packaging: Integrative advances, challenges, and future perspectives. Trends in Food Science & Technology, 168, 105466. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2025.105466>.