

บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะแบบใช้แล้วทิ้ง: เมื่อบรรจุภัณฑ์ตรวจสอบความสดของอาหารได้ผ่านสมาร์ทโฟน (Disposable smart packaging: when food packaging can check freshness via smartphone)

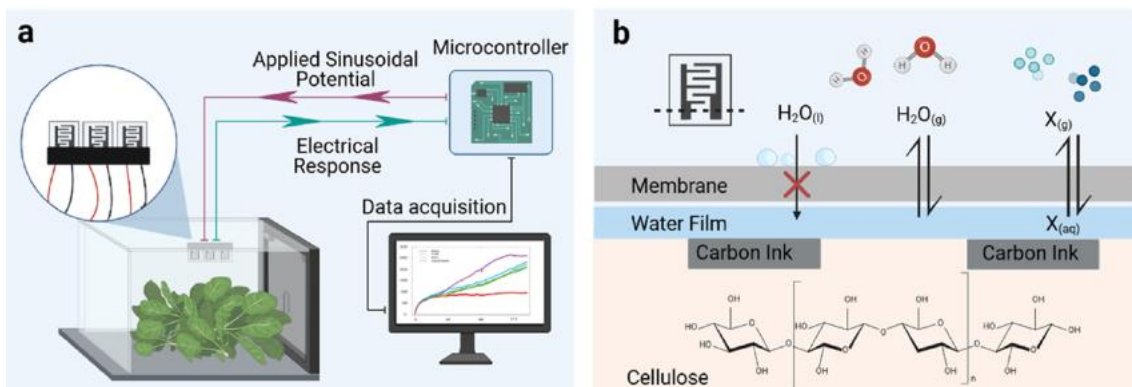
บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะเป็นแนวทางการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ที่ไม่ได้ทำหน้าที่เพียงปกป้องอาหารจากสิ่งแวดล้อมภายนอกเท่านั้น แต่ยังสามารถติดตามคุณภาพ ความสด และการเปลี่ยนแปลงของอาหารระหว่างการเก็บรักษาได้ ตัวอย่างหนึ่งคือระบบบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะที่ใช้เซนเซอร์ตรวจจับก๊าซแบบกระดาษร่วมกับเทคโนโลยี near-field communication (NFC) เพื่อประเมินการเสื่อมคุณภาพของอาหาร โดยงานวิจัยนี้ใช้ผักโขมบรรจุถุงเป็นตัวอย่างในการศึกษา ระบบดังกล่าวสามารถอ่านผลผ่านสมาร์ทโฟนได้โดยไม่ต้องใช้แบตเตอรี่ และถูกออกแบบให้มีต้นทุนต่ำ เหมาะสำหรับการใช้งานแบบใช้แล้วทิ้ง

ในปัจจุบันบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะส่วนใหญ่มีอยู่ในรูปของฟิล์มอินดิเคเตอร์หรือเซนเซอร์ที่ติดบนบรรจุภัณฑ์ ซึ่งแสดงผลผ่านการเปลี่ยนสีเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของก๊าซ ค่า pH หรือสภาวะเวลาและอุณหภูมิสะสม วิธีนี้มีข้อดีคือ ใช้งานง่าย ต้นทุนไม่สูง และช่วยให้ผู้บริโภคมองเห็นสถานะความสดของอาหารได้โดยตรง อย่างไรก็ตามข้อมูลที่ได้มักเป็นเพียงการประเมินเชิงคุณภาพ ขณะที่เซนเซอร์ชนิดไฟฟ้าและไฟฟ้าเคมีสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงได้ไวกว่า ให้ผลตอบสนองแบบ real-time และสามารถติดตามคุณภาพอาหารได้อย่างต่อเนื่องตลอดห่วงโซ่อุปทาน

เมื่อผสานเซนเซอร์ไฟฟ้าเข้ากับเทคโนโลยีไร้สาย เช่น NFC หรือสมาร์ทโฟน บรรจุภัณฑ์จึงสามารถส่งข้อมูลคุณภาพอาหารไปยังผู้ใช้งานได้โดยตรง แนวทางนี้ช่วยให้ผู้ผลิต ผู้จัดจำหน่าย และผู้บริโภคตัดสินใจได้รวดเร็วขึ้น ทั้งในด้านการควบคุมคุณภาพ การตรวจสอบย้อนกลับ การจัดการอายุการเก็บรักษา และการลดการสูญเสียอาหาร

หลักการตรวจจับความสดของอาหาร

หลักการสำคัญของระบบนี้คือ การตรวจจับก๊าซที่เกิดขึ้นระหว่างการเสื่อมคุณภาพของอาหาร เช่น แอมโมเนีย ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารอินทรีย์ระเหยง่ายบางชนิด ก๊าซเหล่านี้เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์และกระบวนการสลายตัวของอาหาร เมื่อก๊าซละลายในชั้นความชื้นบางๆ บนผิวเซนเซอร์กระดาษ (paper-based electrical gas sensors, PEGS) จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของเซนเซอร์เปลี่ยนแปลง ค่าการนำไฟฟ้านี้จึงสามารถใช้เป็นสัญญาณบ่งชี้ระดับการเสื่อมคุณภาพของอาหารได้



รูปที่ 1 แผนภาพระบบโดยรวมที่ใช้ติดตามการเสื่อมคุณภาพของผักโขม โดยติดตั้งเซนเซอร์ PEGS ที่ถูกหุ้มด้วยเมมเบรนไว้บริเวณด้านบนของภาชนะบรรจุอาหาร เมื่อผักโขมเสื่อมคุณภาพและปล่อยก๊าซที่ละลายน้ำได้ออกมา ก๊าซดังกล่าวจะผ่านเมมเบรนเข้าสู่เซนเซอร์ และทำให้ค่าการนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงตามปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น

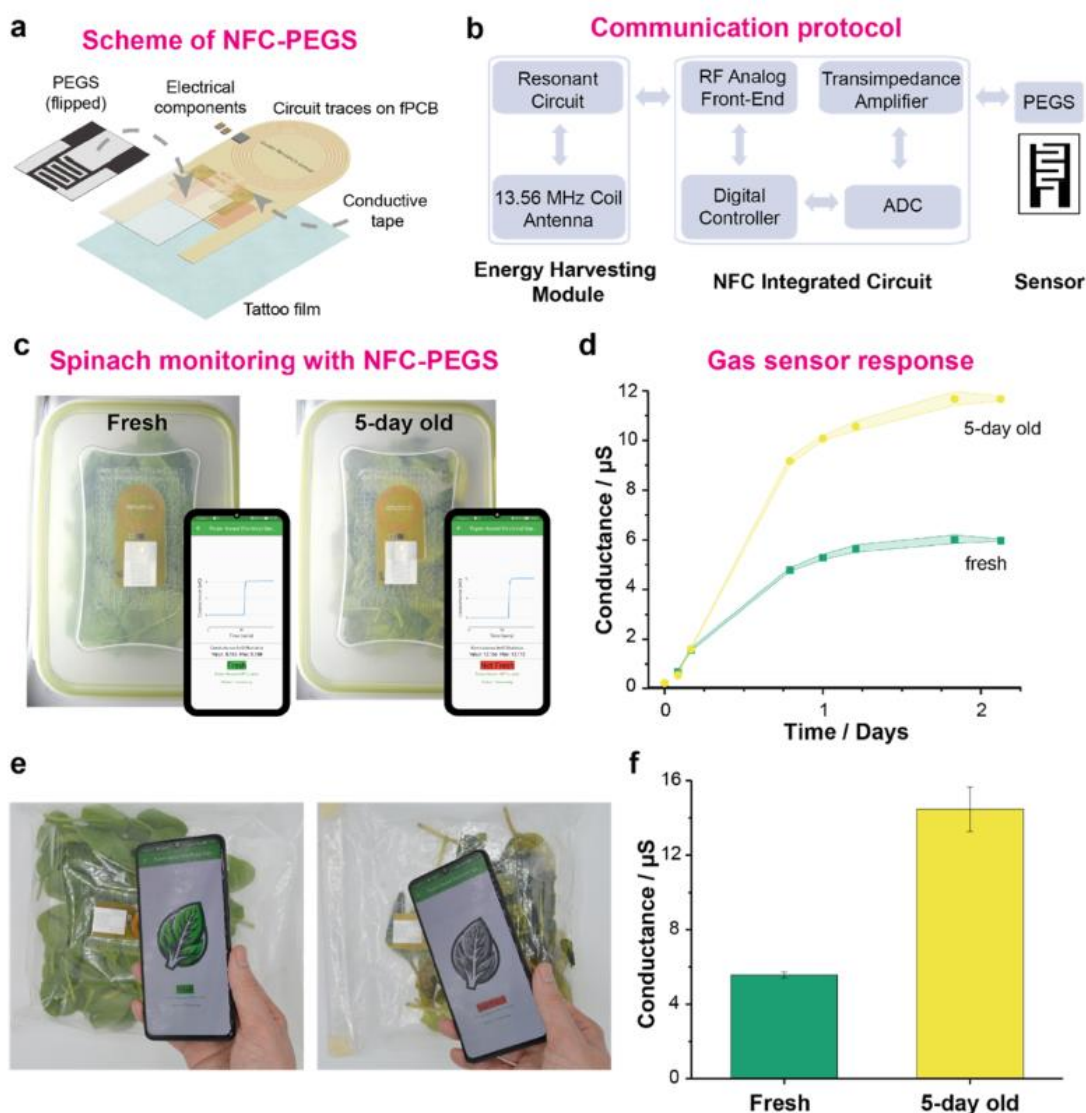
(ที่มา ดัดแปลงจาก Naik และคณะ, ACS Sens., 9, 6789–6799)

ระบบตรวจติดตามดังกล่าวประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ (i) หน่วยตรวจจับ ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารเป้าหมายกับวัสดุตรวจจับให้เป็นสัญญาณ (ii) หน่วยประมวลผลหรือตัดสินใจ ซึ่งแปลงข้อมูลดิบจากเซนเซอร์ให้อยู่ในรูปแบบที่ผู้ใช้อ่านเข้าใจได้ และ (iii) หน่วยจ่ายพลังงาน ซึ่งทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ระบบ โดยอาจใช้แบตเตอรี่หรือกลไกการเก็บเกี่ยวพลังงานจากภายนอก ในกรณีของงานวิจัยนี้ ระบบใช้พลังงานจากสมาร์ทโฟนผ่าน NFC จึงไม่จำเป็นต้องมีแบตเตอรี่ภายในบรรจุภัณฑ์

บทบาทของเซนเซอร์กระดาษและเมมเบรนหุ้มเซนเซอร์

หนึ่งในความท้าทายสำคัญของบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะคือ การนำเซนเซอร์เข้าไปติดตั้งในบรรจุภัณฑ์อาหารได้อย่างปลอดภัยและใช้งานได้จริง เซนเซอร์ต้องสามารถตรวจจับก๊าซจากการเสื่อมคุณภาพของอาหารได้โดยไม่สัมผัสอาหารโดยตรง และต้องไม่ถูกรบกวนจากน้ำหรือความชื้นภายในบรรจุภัณฑ์โดยตรง ดังนั้นเมมเบรนหุ้มเซนเซอร์จึงเป็นองค์ประกอบสำคัญ เพราะทำหน้าที่เป็นชั้นปกป้องเซนเซอร์ ขณะเดียวกันยังต้องยอมให้ก๊าซและไอน้ำผ่านเข้าสู่บริเวณตรวจจับได้

เซนเซอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เรียกว่า paper-based electrical gas sensors (PEGS) ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าคาร์บอนที่พิมพ์ลงบนกระดาษกรอง โดยใช้กระดาษเซลลูโลสเป็นวัสดุตรวจจับก๊าซที่ละลายน้ำได้ เซนเซอร์ชนิดนี้อาศัยสมบัติการดูดความชื้นของเส้นใยเซลลูโลส เมื่อก๊าซจากอาหารเสื่อมคุณภาพละลายในชั้นความชื้นบาง ๆ บนผิวกระดาษ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าการนำไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นสัญญาณบ่งชี้ความสดของอาหารได้



รูปที่ 2 ต้นแบบบรรจุภัณฑ์อัจฉริยะที่ใช้เซนเซอร์ PEGS ร่วมกับระบบ NFC แบบไร้แบตเตอรี่ อุปกรณ์ประกอบด้วยแผงวงจรพิมพ์ชนิดยืดหยุ่น เซนเซอร์ก๊าซแบบกระดาษ และเมมเบรนหุ้มเซนเซอร์ เมื่อติดตั้งในกล่องหรือถุงพอลิเอทิลีนที่บรรจุผักโขม ระบบสามารถตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามก๊าซจากการเสื่อมคุณภาพของอาหาร และอ่านผลผ่านสมาร์ทโฟนได้ ในรูปแบบ “Fresh” หรือ “Not Fresh” (ที่มา ดัดแปลงจาก Naik และคณะ, ACS Sens., 9, 6789–6799)

การอ่านผลผ่านสมาร์ทโฟนด้วยระบบ NFC

เมื่อเชื่อมต่อเซนเซอร์ PEGS เข้ากับแผงวงจรพิมพ์ชนิดยืดหยุ่นและเสาอากาศ NFC ระบบจะสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องใช้แบตเตอรี่ เมื่อผู้ใช้แตะสมาร์ทโฟนกับบรรจุภัณฑ์ โทรศัพท์จะจ่ายพลังงานให้วงจรผ่าน NFC และอ่านค่าการนำไฟฟ้าจากเซนเซอร์ จากนั้นแอปพลิเคชันจะแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบที่เข้าใจง่าย เช่น “Fresh” หรือ “Not Fresh”

ในการทดสอบกับผักโขม ระบบสามารถแยกความแตกต่างระหว่างผักโขมสดและผักโขมที่เก็บไว้ 5 วันได้ โดยตัวอย่างที่เสื่อมคุณภาพจะปล่อยก๊าซจากกระบวนการเสื่อมสภาพมากกว่า ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของเซนเซอร์สูงขึ้น ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าบรรจุภัณฑ์สามารถสื่อสารสถานะความสดของอาหารกับผู้ใช้ได้โดยตรง ไม่จำเป็นต้องอาศัยเพียงวันหมดอายุที่ระบุไว้ล่วงหน้า

จุดเด่นของเทคโนโลยีนี้คือ สามารถประเมินความสดของอาหารจากสภาพจริงภายในบรรจุภัณฑ์ ไม่ได้อาศัยเพียงวันหมดอายุที่กำหนดไว้ล่วงหน้า จึงอาจช่วยลดการทิ้งอาหารที่ยังบริโภคได้ และช่วยให้การจัดการอายุการเก็บรักษามีความแม่นยำมากขึ้น นอกจากนี้การใช้ NFC ยังช่วยลดความซับซ้อนของระบบ เพราะไม่จำเป็นต้องมีแบตเตอรี่ภายในบรรจุภัณฑ์ และผู้ใช้สามารถอ่านผลได้โดยตรงด้วยสมาร์ทโฟน

อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังอยู่ในระดับต้นแบบหรือ proof-of-concept จึงยังมีข้อจำกัดบางประการที่ต้องพิจารณา เช่น ความทนทานของการยึดติดระหว่างเมมเบรนกับเซนเซอร์ในระยะยาว การที่เซนเซอร์ตรวจวัดผลรวมของก๊าซที่ละลายน้ำได้มากกว่าการจำแนกก๊าซแต่ละชนิด และการที่เซนเซอร์แบบแห้งต้องใช้เวลาปรับสมดุลความชื้นก่อนให้สัญญาณที่คงที่มากขึ้นในอนาคต การใช้เทคนิควิเคราะห์ก๊าซ เช่น GC-MS หรือ SIFT-MS อาจช่วยให้เข้าใจชนิดและปริมาณของก๊าซที่เกิดขึ้นระหว่างการเสื่อมคุณภาพของอาหารได้ชัดเจนขึ้น

บรรจุภัณฑ์อัจฉริยะที่ใช้เซนเซอร์ก๊าซร่วมกับเทคโนโลยี NFC เป็นแนวทางที่น่าสนใจสำหรับการติดตามคุณภาพอาหารแบบ real-time โดยเฉพาะอาหารสดหรืออาหารพร้อมบริโภคที่เสื่อมคุณภาพง่าย ระบบนี้สะท้อนทิศทางใหม่ของบรรจุภัณฑ์อาหารที่ก้าวจากบทบาทเดิมของการ “ปกป้องสินค้า” ไปสู่การ “สื่อสารข้อมูลคุณภาพของสินค้า” กับผู้ผลิต ผู้ค้าปลีก และผู้บริโภคโดยตรง ซึ่งอาจช่วยเพิ่มความปลอดภัยของอาหาร ลดการสูญเสีย และสนับสนุนระบบอาหารที่ยั่งยืนมากขึ้นในอนาคต

ที่มาของข้อมูล

1. Naik, A., Lee, H.S., Herrington, J., Barandun, G., Flock, G., Güder, F., Gonzalez-Macia, L. (2024), Smart Packaging with Disposable NFC-enabled Wireless Gas Sensors for Monitoring Food Spoilage. *ACS Sens.*, 9: 6789–6799. (<https://doi.org/10.1021/acssensors.4c02510>)