

สารเคลือบกระป๋องไม่ได้หยุดอยู่ที่ Migration: จาก BADGE สู่ปฏิกิริยากับองค์ประกอบในอาหาร (Beyond Migration in Can Coatings: From BADGE to Reactions with Food Components)

บรรจุภัณฑ์โลหะ โดยเฉพาะกระป๋องอาหารและเครื่องดื่ม เป็นระบบบรรจุภัณฑ์ที่มีบทบาทสำคัญในการรักษาคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาอาหาร เนื่องจากโครงสร้างโลหะสามารถป้องกันแสง ออกซิเจน และการปนเปื้อนจากสภาพแวดล้อมภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม การสัมผัสโดยตรงระหว่างอาหารกับผิวโลหะอาจก่อให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์ โดยเฉพาะในอาหารที่มีความเป็นกรดหรือมีองค์ประกอบที่ส่งเสริมการกัดกร่อน ดังนั้น พื้นผิวด้านในของกระป๋องจึงมักเคลือบด้วยชั้นพอลิเมอร์บาง ๆ เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นกั้นระหว่างอาหารกับโลหะ ช่วยป้องกันการกัดกร่อนและลดปฏิกิริยาระหว่างภาชนะกับอาหารระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษา

หนึ่งในระบบสารเคลือบที่มีการใช้งานมาอย่างยาวนานคือ epoxy-phenolic coating ซึ่งผลิตจากสารตั้งต้นในกลุ่ม bisphenol และ epichlorohydrin สารสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการผลิต epoxy resin สำหรับสารเคลือบประเภทนี้คือ bisphenol A diglycidyl ether หรือ BADGE โดย BADGE เป็นสารที่มีหมู่ epoxide ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการสร้างโครงสร้างพอลิเมอร์ และเมื่อผ่านกระบวนการบ่มจะเกิดเป็นชั้นเคลือบพอลิเมอร์ที่ทำหน้าที่ปกป้องพื้นผิวโลหะ

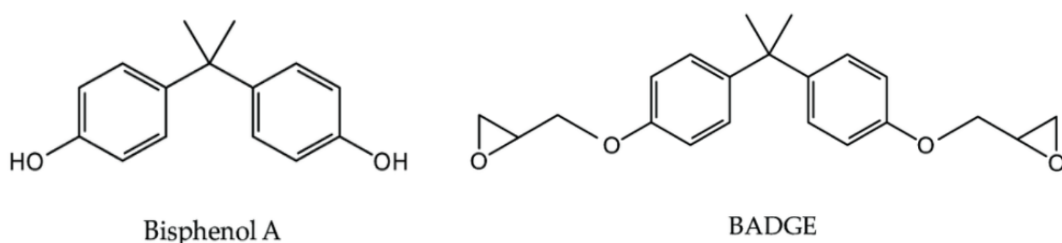
ในด้านความปลอดภัยของวัสดุสัมผัสอาหาร ประเด็นสำคัญไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะสมบัติของชั้นเคลือบ แต่ยังครอบคลุมถึงการเคลื่อนย้ายของสารจากวัสดุบรรจุภัณฑ์เข้าสู่อาหาร (migration) รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของสารเหล่านั้นภายหลังเข้าสู่ระบบอาหารด้วย เนื่องจากสารที่เคลื่อนย้ายออกจากบรรจุภัณฑ์อาจไม่คงอยู่ในรูปเดิมตลอดระยะเวลาการแปรรูปและการเก็บรักษา แต่สามารถเกิด hydrolysis หรือทำปฏิกิริยากับองค์ประกอบทางเคมีของอาหารจนเกิดผลิตภัณฑ์ชนิดใหม่ได้

BADGE และ BPA เป็นสารที่เกี่ยวข้องกัน แต่ไม่ใช่สารชนิดเดียวกัน

Bisphenol A (BPA) และ bisphenol A diglycidyl ether (BADGE) มีความเกี่ยวข้องกันในเคมีของ epoxy resin แต่เป็นสารเคมีคนละชนิด BPA สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ BADGE ขณะที่ BADGE มีหมู่ epoxide ซึ่งมีความว่องไวต่อปฏิกิริยา และถูกนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต epoxy-based coating

ความแตกต่างดังกล่าวมีความสำคัญต่อการประเมินความปลอดภัยของวัสดุสัมผัสอาหาร เพราะการประเมินสารเคลือบประเภท epoxy ไม่ควรพิจารณาเฉพาะ BPA เท่านั้น แต่ควรครอบคลุม BADGE อนุพันธ์ของ BADGE ตลอดจนผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่อาจเกิดขึ้นเมื่อสารเหล่านี้สัมผัสกับอาหาร

ประเด็นนี้ยังมีความสำคัญภายใต้กฎระเบียบของสหภาพยุโรปในปัจจุบัน โดย Commission Regulation (EU) 2024/3190 กำหนดข้อจำกัดเกี่ยวกับการใช้ BPA และ bisphenols บางประเภทในวัสดุและผลิตภัณฑ์สัมผัสอาหาร และมีผลบังคับใช้ตั้งแต่เดือนมกราคม ค.ศ. 2025 ขณะที่แนวทางการบังคับใช้ที่ European Commission เผยแพร่ในปี 2025 แยกการพิจารณา BADGE ออกจาก BPA โดยไม่ได้กำหนดให้ BADGE เป็นสารที่ถูกห้ามใช้อย่างสมบูรณ์ และระบุว่าในกรณีที่ใช้ bisphenol derivatives เช่น BADGE ในการผลิตวัสดุสัมผัสอาหาร ต้องควบคุมไม่ให้มี BPA ตกค้างในฐานะ non-intentionally added substance หรือ NIAS ตามข้อ กำหนดที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของ Bisphenol A (BPA) และ bisphenol A diglycidyl ether (BADGE)

BADGE ที่เคลื่อนย้ายเข้าสู่อาหารอาจไม่คงอยู่ในรูปเดิม

งานวิจัยของ Coulier และคณะ ซึ่งตีพิมพ์ใน Journal of Agricultural and Food Chemistry ในปี 2010 มุ่งศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ BADGE ภายหลังจากเข้าสู่อาหาร โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างการแปรรูปและการเก็บรักษา รวมถึงการเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาระหว่าง BADGE กับองค์ประกอบต่างๆ ของอาหาร

ในการทดลอง นักวิจัยศึกษาตัวอย่างปลาทูน่าในน้ำมันดอกทานตะวัน แอปเปิลบด และเบียร์ โดยเติม BADGE ลงในตัวอย่างก่อนผ่านกระบวนการและการเก็บรักษาภายใต้สภาวะที่กำหนด ตัวอย่างปลาทูน่าและแอปเปิลบดบรรจุในกระป๋องที่เคลือบภายในด้วย epoxy-phenolic coating และผ่านกระบวนการให้ความร้อน ขณะที่ตัวอย่างเบียร์ถูกเก็บภายใต้สภาวะแรงเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ BADGE ตามระยะเวลา ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การลดลงของ BADGE ในอาหารจริงไม่สามารถอธิบายได้ด้วยการเกิด hydrolysis เพียงอย่างเดียว แต่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริสัมพันธ์ระหว่าง BADGE กับองค์ประกอบของอาหาร



รูปที่ 2 Timeline of new BPA ban

(Copyright© COLEAD 2026, AGRINFO is funded by the European Union and implemented by COLEAD.)

องค์ประกอบของอาหารมีส่วนกำหนดการเปลี่ยนแปลงของ BADGE

อาหารเป็นระบบทางเคมีที่มีความซับซ้อน ประกอบด้วยน้ำ คาร์โบไฮเดรต กรดอะมิโน โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ และสารประกอบอื่นอีกจำนวนมาก ขณะที่หมู่ epoxide ของ BADGE มีความไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันที่มีสมบัติเป็น nucleophile ดังนั้น BADGE ที่เข้าสู่อาหารจึงสามารถเกิดปฏิกิริยากับองค์ประกอบเหล่านี้และเปลี่ยนไปเป็นสารชนิดอื่นได้

การทดลองในระบบจำลองของ Coulier และคณะแสดงให้เห็นว่า BADGE สามารถทำปฏิกิริยากับ glucose และเกิดผลิตภัณฑ์ที่ระบุได้เป็น $\text{BADGE} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{glucose}$ ซึ่งสนับสนุนความเป็นไปได้ของการเกิด adduct ระหว่าง BADGE กับ คาร์โบไฮเดรต

BADGE ยังสามารถทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโนได้หลายชนิด ได้แก่ tyrosine, histidine, methionine, lysine และ cysteine โดย cysteine แสดงความว่องไวสูงที่สุดในกลุ่มกรดอะมิโนที่ศึกษา ผลิตภัณฑ์ที่ตรวจพบ ได้แก่ $\text{BADGE} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{Cys}$ และ $\text{BADGE} \cdot 2\text{Cys}$ ซึ่งยืนยันว่าหมู่ epoxide ของ BADGE เป็นตำแหน่งสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา

การเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวไม่ได้จำกัดอยู่เฉพาะสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำ นักวิจัยยังศึกษาปฏิกิริยาระหว่าง BADGE กับ โปรตีนต้นแบบ ได้แก่ insulin และ bovine serum albumin โดยประยุกต์ใช้เทคนิค proteomics ร่วมกับ LC-MS/MS พบ peptide หลายชนิดที่เกิด adduct กับ BADGE และ peptide เหล่านี้มี cysteine เป็นองค์ประกอบ การทดลองเพิ่มเติมโดยใช้ Pronase สนับสนุนว่า cysteine เป็นตำแหน่งสำคัญในการเกิดปฏิกิริยาของ BADGE กับโปรตีน

เมื่อประยุกต์แนวทางดังกล่าวกับตัวอย่างอาหารจริง นักวิจัยสามารถตรวจพบ BADGE·H₂O·Cys ในโปรตีนที่แยกจากปลาทูน่า ซึ่งเป็นหลักฐานสนับสนุนว่า BADGE สามารถทำปฏิกิริยากับโปรตีนในอาหารจริงได้ ไม่ได้จำกัดเฉพาะระบบจำลองในห้องปฏิบัติการ

BADGE ภายใต้ข้อกำหนดด้านวัสดุสัมผัสอาหาร

ในสหภาพยุโรป BADGE และอนุพันธ์อยู่ภายใต้ Commission Regulation (EC) No 1895/2005 ซึ่งกำหนดให้ผลรวมของ BADGE, BADGE·H₂O และ BADGE·2H₂O ต้องไม่เกิน 9 mg/kg ของอาหารหรือ food simulant ขณะที่ผลรวมของอนุพันธ์กลุ่ม chlorohydrin ต้องไม่เกิน 1 mg/kg

สำหรับ BPA ในปี 2023 EFSA ได้กำหนดค่า Tolerable Daily Intake (TDI) ที่ 0.2 ng/kg body weight/day ซึ่งต่ำกว่าค่าเดิมอย่างมาก ต่อมา Commission Regulation (EU) 2024/3190 ได้กำหนดข้อห้ามและข้อจำกัดเกี่ยวกับการใช้ BPA ในวัสดุสัมผัสอาหารหลายประเภท รวมถึงสารเคลือบ

อย่างไรก็ตาม BADGE และ BPA เป็นสารคนละชนิดและอยู่ภายใต้ข้อกำหนดที่แตกต่างกัน แนวทางของ European Commission ในปี 2025 ระบุว่า BADGE ยังไม่ได้ถูกห้ามใช้อย่างสมบูรณ์ แต่ต้องควบคุม BPA ที่อาจตกค้างหรือเกิดขึ้นในฐานะ non-intentionally added substance (NIAS) โดยกำหนด detection limit สำหรับ BPA โดยทั่วไปไว้ที่ 1 µg/kg

ที่มาของข้อมูล

1. Coulier, L., Bradley, E. L., Bas, R. C., Verhoeckx, K. C. M., Driffield, M., Harmer, N., & Castle, L. (2010). Analysis of reaction products of food contaminants and ingredients: Bisphenol A diglycidyl ether (BADGE) in canned foods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58, 4873-4882. DOI: 10.1021/jf904160a.
2. European Food Safety Authority, EFSA (2023). Re-evaluation of the risks to public health related to the presence of bisphenol A in foodstuffs.
3. European Commission. Commission Regulation (EC) No 1895/2005 on the restriction of use of certain epoxy derivatives in materials and articles intended to come into contact with food.
4. European Commission. Commission Regulation (EU) 2024/3190 on the use of BPA and other bisphenols and bisphenol derivatives in certain food contact materials and articles.
5. European Commission. (2025). Note for Guidance on the implementation of Commission Regulation (EU) 2024/3190.