

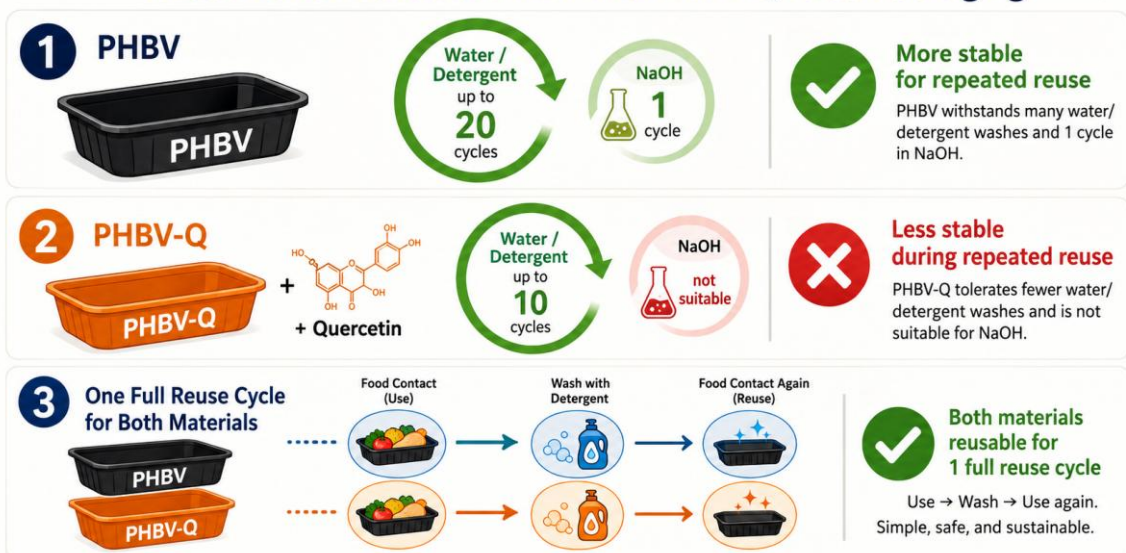
## ความคงตัวเชิงโครงสร้างและความปลอดภัยของบรรจุภัณฑ์อาหารจาก PHBV ภายใต้การใช้ซ้ำ (Structural Stability and Safety of PHBV-Based Food Packaging under Repeated Use)

บรรจุภัณฑ์อาหารเป็นหนึ่งในภาคส่วนที่มีการใช้พลาสติกในปริมาณสูง โดยบรรจุภัณฑ์พลาสติกมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 40 ของขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นทั่วโลก บรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่ยังคงมีลักษณะการใช้งานแบบครั้งเดียว (single-use) ก่อนเข้าสู่กระบวนการกำจัด เช่น การฝังกลบหรือการเผา ขณะที่พลาสติกที่หลุมรดสู่สิ่งแวดล้อมสามารถแตกตัวเป็นไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติก ซึ่งปัจจุบันมีรายงานการตรวจพบในห่วงโซ่อาหารและก่อให้เกิดความกังวลด้านผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยของอาหาร

ภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน การใช้ซ้ำ (reuse) เป็นแนวทางสำคัญในการยืดอายุการใช้งานของวัสดุ ลดการใช้ทรัพยากรใหม่ และปริมาณขยะพลาสติก โดยนโยบาย 3R ของสหภาพยุโรปและฝรั่งเศสมีเป้าหมายเพิ่มสัดส่วนบรรจุภัณฑ์พลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อย่างน้อยร้อยละ 50 ภายในปี ค.ศ. 2030 อย่างไรก็ตามข้อมูล การศึกษาความเป็นไปได้ของระบบบรรจุภัณฑ์แบบใช้ซ้ำที่ผ่านมานั้นที่พลาสติกฐานปิโตรเลียม โดยเฉพาะ polyethylene terephthalate (PET) ขณะที่ข้อมูลเกี่ยวกับความสามารถในการใช้ซ้ำของพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้ยังมีอยู่อย่างจำกัด

ในบทความนี้ได้แสดงตัวอย่างงานวิจัยของ Bonnenfant และคณะ ที่ได้รายงานถึงการประเมินการใช้ซ้ำบรรจุภัณฑ์จากพอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอตชนิด poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) หรือ PHBV ซึ่งมีสมบัติทางกายภาพและความสามารถในการขึ้นรูปเป็นบรรจุภัณฑ์อาหาร และได้รับอนุญาตให้ใช้เป็นวัสดุสัมผัสอาหารตามข้อกำหนดของสหภาพยุโรป นอกจากนี้ในงานวิจัยได้ศึกษาผลของการเติมสารเติมแต่งเพื่อพัฒนาคุณภาพของ PHBV สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร กล่าวคือ การเติมสารออกฤทธิ์จากธรรมชาติ โดยเฉพาะสารประกอบฟอลิฟินอล ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความคงตัวทางความร้อน สารดักจับออกซิเจนและอนุมูลอิสระ หรือสารต้านจุลชีพ ที่ผ่านมามีรายงานว่า catechin, tannic acid, lignin และ gallic acid สามารถเพิ่มความทนทานต่อความร้อนหรือเสริมสมบัติเชิงหน้าที่ของ PHB และ PHBV จึงมีศักยภาพสำหรับการพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารแบบแอคทีฟ (active food packaging) ในกลุ่มสารดังกล่าว quercetin เป็นสารต้านออกซิเดชันที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากสามารถช่วยปกป้อง PHBV จากการเสื่อมสภาพทางความร้อนและออกซิเดชันระหว่างการขึ้นรูป ดังนั้นการประเมินการใช้ซ้ำของ PHBV โดยเปรียบเทียบ PHBV กับ PHBV ที่เติม quercetin ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (PHBV-Q)

### Reuse Performance of PHBV and PHBV-Q Food Packaging



รูปที่ 1 การประเมินการใช้ซ้ำของ PHBV และ PHBV-Q ภายใต้การสัมผัสอาหาร การล้างด้วยน้ำหรือสารทำความสะอาด และการล้างด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (ภาพจัดทำขึ้นใหม่โดยสรุปข้อมูลจาก Bonnenfant et al. (2023))

คณะวิจัยประเมินความสามารถในการใช้ซ้ำของ PHBV และ PHBV-Q ใน 2 ลักษณะ ดังนี้

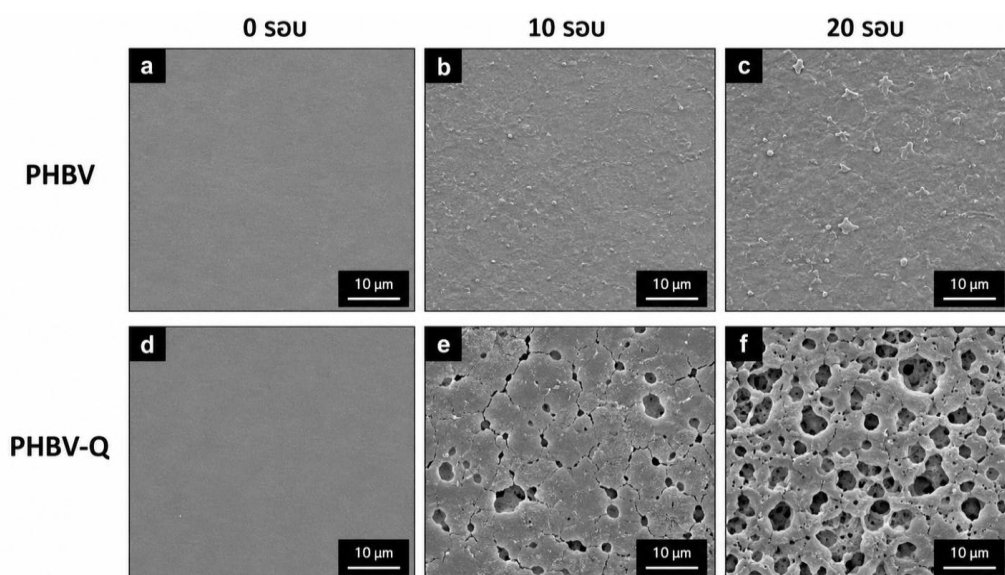
1. การจำลองการใช้ซ้ำ 1 รอบการใช้ซ้ำอย่างครบวงจร ประกอบด้วย การสัมผัสอาหารจำลอง การล้างด้วยสารทำความสะอาด และการสัมผัสอาหารจำลองอีกครั้ง
2. การประเมินความทนทานต่อการล้างทำความสะอาดซ้ำหลายรอบ โดยล้างวัสดุด้วยน้ำหรือสารทำความสะอาดที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส สูงสุด 20 รอบ นอกจากนี้ยังทดสอบการล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนัก ซึ่งเป็นสภาวะการทำความสะอาดที่รุนแรงกว่า โดยแต่ละรอบใช้เวลา 60 นาทีที่ 85 องศาเซลเซียส

ผลการศึกษาพบว่า PHBV สามารถผ่านการล้างด้วยน้ำและสารทำความสะอาดได้ถึง 20 รอบ โดยสมบัติของวัสดุเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แม้การล้างซ้ำจะทำให้อุณหภูมิหลอมเหลวและมวลโมเลกุลลดลงบางส่วน โดยเฉพาะเมื่อใช้สารทำความสะอาด แต่การเปลี่ยนแปลงโดยรวมยังไม่รุนแรงจนทำให้วัสดุไม่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ภายใต้สภาวะที่ศึกษา

สำหรับการล้างด้วยสารละลาย NaOH ผลที่สนับสนุนศักยภาพการใช้ซ้ำของ PHBV พบเฉพาะกรณีสารละลาย NaOH ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก จำนวน 1 รอบ โดยแม้ผิวชั้นนอกของวัสดุจะถูกกัดออก แต่สมบัติทางกายภาพและเคมียังเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อเพิ่มจำนวนรอบการล้าง หรือเพิ่มความเข้มข้นของ NaOH เป็นร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก การเสื่อมสภาพของวัสดุรุนแรงขึ้น ดังนั้นผลดังกล่าวไม่ควรตีความว่า PHBV สามารถทนต่อการล้างด้วยด่างได้ทุกความเข้มข้นหรือทุกจำนวนรอบ

สำหรับ PHBV-Q การเติม quercetin ซึ่งช่วยลดการเสื่อมสภาพทางความร้อนระหว่างการขึ้นรูป ไม่ได้ทำให้วัสดุทนทานต่อการใช้ซ้ำได้ดีกว่า PHBV บริสุทธิ์เสมอไป ระหว่างการล้างด้วยน้ำและสารทำความสะอาด quercetin สามารถเคลื่อนออกจากเนื้อพอลิเมอร์ได้ โดยหลังการล้าง 20 รอบ พบการละลายของ quercetin ในน้ำและสารทำความสะอาด ประมาณร้อยละ 37 และ 30 ตามลำดับ การหลุดออกของสารเติมแต่งดังกล่าวสามารถเพิ่มช่องทางให้น้ำแทรกเข้าสู่เนื้อพอลิเมอร์และเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ส่งผลให้ PHBV-Q มีการเสื่อมสภาพของพื้นผิวชัดเจนกว่า PHBV โดยเฉพาะเมื่อผ่านการล้างด้วยสารทำความสะอาดซ้ำหลายรอบ

ผลการสังเกตพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดสนับสนุนแนวโน้มดังกล่าว โดยพื้นผิวของ PHBV หลังการล้างด้วยสารทำความสะอาดมีความผิดปกติเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ขณะที่ PHBV-Q เริ่มปรากฏรูและรอยแตกอย่างชัดเจนหลังการล้าง 10 รอบ และเมื่อเพิ่มเป็น 20 รอบ รอยแตกพัฒนาเป็นโครงกระจายทั่วพื้นผิวจนมีลักษณะเป็นรูพรุน คณะวิจัยอธิบายว่าการเสื่อมสภาพนี้เกิดจากทั้งผลของสารทำความสะอาดที่เร่งการกัดเซาะพื้นผิว และการหลุดออกของ quercetin ซึ่งเอื้อต่อการแทรกซึมของน้ำและการเกิดไฮโดรไลซิสของพอลิเมอร์



รูปที่ 2 ภาพจำลองเชิงแผนภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของ PHBV และ PHBV-Q หลังการล้างด้วยสารทำความสะอาด 0, 10 และ 20 รอบ โดยเรียบเรียงจากผลการวิเคราะห์ SEM ของ Bonnenfant et al. (2023)

ในด้านความปลอดภัยของวัสดุสัมผัสอาหาร คณะวิจัยประเมินการเคลื่อนย้ายสารจาก PHBV และ PHBV-Q สู่อาหารจำลอง โดยใช้สารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก เป็นตัวแทนอาหารที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบสูง และสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เป็นตัวแทนอาหารที่มีความเป็นกรด ผลการสัมผัสอาหารจำลองครั้งแรกพบว่า ค่าการเคลื่อนย้ายสารรวม (overall migration) ของ PHBV และ PHBV-Q ในอาหารจำลองทั้งสองชนิดต่ำกว่าเกณฑ์ตามข้อกำหนดของสหภาพยุโรป (10 มิลลิกรัมต่อตารางเดซิเมตร) นอกจากนี้เมื่อวัสดุผ่านการล้างด้วยสารทำความสะอาดและนำกลับมาสัมผัสอาหารจำลองเป็นครั้งที่สอง ค่าการเคลื่อนย้ายสารรวมลดลงจนใกล้ศูนย์ แสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้งสองยังอยู่ภายในเกณฑ์ด้านการเคลื่อนย้ายสารสำหรับอาหารประเภทดังกล่าวภายใต้สภาวะการทดสอบ

อย่างไรก็ตามผลด้านความปลอดภัยจำเป็นต้องติดตามชนิดของอาหารจำลองที่ใช้ ในการทดลองเบื้องต้นยังมีการใช้สารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก เพื่อจำลองสภาวะที่รุนแรงต่อ PHBV ซึ่งพบการเคลื่อนย้ายของ quercetin จาก PHBV-Q ในปริมาณสูง เนื่องจากเอทานอลทำให้พอลิเมอร์เกิดการบวม อย่างไรก็ตามคณะวิจัยระบุว่าอาหารจำลองชนิดนี้ไม่เหมาะสมสำหรับพอลิเมอร์ที่มีขี้ จึงไม่นำผลจากสารละลายเอทานอลเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก มาใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป ดังนั้นข้อสรุปด้านความปลอดภัยของ PHBV ควรจำกัดอยู่ที่ชนิดอาหารและสภาวะที่ได้รับการประเมิน ไม่ควรตีความว่าครอบคลุมอาหารทุกประเภท

เมื่อพิจารณาการล้างด้วยสารละลาย NaOH พบว่า PHBV-Q มีข้อจำกัดชัดเจน โดยการล้างด้วยสารละลาย NaOH เข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เพียง 1 รอบ ทำให้มวลโมเลกุลและอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวลดลงมากกว่า PHBV บริสุทธิ์

โดยสรุป ผลการศึกษาชี้ว่า PHBV มีศักยภาพสำหรับการพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์อาหารแบบใช้ซ้ำภายใต้สภาวะการใช้งานและการทำความสะอาดที่เหมาะสม โดยสามารถผ่านการล้างด้วยน้ำหรือสารทำความสะอาดได้หลายรอบโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรุนแรง และยังมีค่าการเคลื่อนย้ายสารอยู่ในเกณฑ์สำหรับอาหารจำลองชนิดน้ำและกรดอ่อนที่ศึกษา สำหรับการทำความสะอาดด้วยสารละลายต่าง 1 รอบ PHBV สามารถคงสภาพได้ โดยสมบัติหลักยังเปลี่ยนแปลงไม่มาก แต่การเพิ่มจำนวนรอบหรือความเข้มข้นของด่างทำให้การเสื่อมสภาพรุนแรงขึ้น ขณะเดียวกันการสารเติมแต่งที่ช่วยเพิ่มความคงตัวของพอลิเมอร์ระหว่างการขึ้นรูป อาจไม่ได้ให้ผลเช่นเดียวกันตลอดวงจรการใช้ซ้ำของบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากสารเติมแต่งอาจเคลื่อนย้ายออกจากวัสดุหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีระหว่างการล้าง และส่งผลต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเมอร์ในระยะยาว

#### ที่มาของข้อมูล

1. Bonnenfant, C., Gontard, N., and Aouf, C. (2023), PHBV-based polymers as food packaging: Physical-chemical and structural stability under reuse conditions. *Polymer* 270, 125784. (<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.125784>)