

พลาสติกชีวภาพ PHBV สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร (PHBV Bioplastic for Food Packaging Applications)

บรรจุภัณฑ์อาหารมีบทบาทสำคัญในการปกป้องผลิตภัณฑ์จากความชื้น ออกซิเจน แสง การปนเปื้อน และความเสียหายระหว่างการขนส่ง อย่างไรก็ตามบรรจุภัณฑ์ส่วนใหญ่ยังผลิตจากพลาสติกฐานปิโตรเลียมซึ่งย่อยสลายได้ยากและก่อให้เกิดการสะสมของขยะในสิ่งแวดล้อม การพัฒนาพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากทรัพยากรหมุนเวียนและสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้จึงเป็นแนวทางสำคัญในการลดผลกระทบจากขยะบรรจุภัณฑ์ โดยพอลิไฮดรอกซีบิวทิเรต-โค-ไฮดรอกซีวาเลอเรต หรือ PHBV เป็นวัสดุชีวภาพชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพสำหรับการผลิตฟิล์ม ภาชนะ และบรรจุภัณฑ์อาหาร

PHBV หรือ Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) เป็นพอลิเอสเตอร์ชีวภาพในกลุ่มพอลิไฮดรอกซีแอลคาโนเอต หรือ PHA ซึ่งจุลินทรีย์สามารถสังเคราะห์และสะสมไว้ในเซลล์เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานสำรอง โครงสร้างของ PHBV ประกอบด้วยหน่วยซ้ำ 2 ชนิด ได้แก่ 3-hydroxybutyrate หรือ 3HB และ 3-hydroxyvalerate หรือ 3HV ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอสเทอร์

PHBV ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดของพอลิ(3-ไฮดรอกซีบิวทิเรต) หรือ PHB ซึ่งมีความเป็นผลึกสูง แข็ง และเปราะ อีกทั้งมีช่วงอุณหภูมิสำหรับการแปรรูปค่อนข้างแคบ เนื่องจากอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ใกล้กับช่วงที่พอลิเมอร์เริ่มเสื่อมสภาพทางความร้อน การเพิ่มหน่วย 3HV เข้าไปในสายโซ่ PHB ช่วยรบกวนการจัดเรียงตัวของสายโซ่ ลดความเป็นผลึก และอุณหภูมิหลอมเหลว ส่งผลให้วัสดุมีความยืดหยุ่นและแปรรูปได้ง่ายกว่า PHB บริสุทธิ์

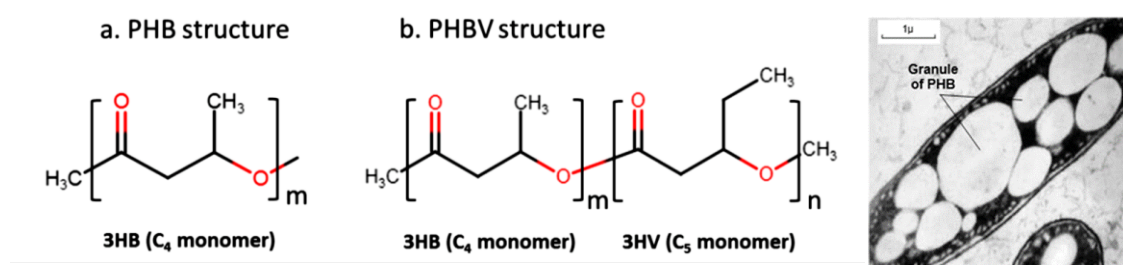
หน่วย 3HB มีหมู่เมทิลเป็นหมู่ข้างเคียง ขณะที่หน่วย 3HV มีหมู่เอทิลซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า ดังนั้นสัดส่วนของหน่วย 3HV จึงมีผลโดยตรงต่อโครงสร้างผลึก สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล และความสามารถในการแปรรูปของ PHBV

การสังเคราะห์ PHBV

PHBV ผลิตโดยกระบวนการสังเคราะห์ทางชีวภาพภายในเซลล์จุลินทรีย์ ไม่ได้เกิดจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันทางเคมีเช่นเดียวกับพลาสติกฐานปิโตรเลียมทั่วไป จุลินทรีย์หลายชนิดสามารถสะสมพอลิเมอร์ในกลุ่ม PHA ได้ โดยมักเกิดขึ้นเมื่อจุลินทรีย์ได้รับแหล่งคาร์บอนอย่างเพียงพอ แต่มีสารอาหารจำเป็นบางชนิดจำกัด เช่น ไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัส

กระบวนการผลิตเริ่มจากการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ในถังหมัก โดยใช้แหล่งคาร์บอน เช่น กลูโคส ซูโครส น้ำมันพืช หรือ ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเกษตร เพื่อสร้างหน่วย 3HB หากต้องการเพิ่มหน่วย 3HV อาจเติมสารประกอบที่มีจำนวนคาร์บอนเป็นเลขคี่ เช่น กรดโพรพิโอนิกหรือกรดวาเลอริกลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ สารตั้งต้นเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนผ่านกระบวนการเมแทบอลิซึมเป็นสารประกอบในรูป hydroxyacyl-CoA จากนั้นเอนไซม์ PHA synthase จะเร่งการเชื่อมต่อสารตั้งต้นให้เป็นสายโซ่ PHBV และสะสมอยู่ในรูปแกรนูลภายในไซโทพลาซึม

สัดส่วนของแหล่งคาร์บอนและสภาวะการหมักสามารถใช้ควบคุมอัตราส่วนระหว่างหน่วย 3HB และ 3HV ซึ่งส่งผลต่อสมบัติของพอลิเมอร์โดยตรง เมื่อสิ้นสุดการหมัก เซลล์จุลินทรีย์จะถูกเก็บเกี่ยวและผ่านกระบวนการแยกพอลิเมอร์ เช่น การสกัดด้วยตัวทำละลาย การสลายเซลล์ด้วยสารเคมีหรือเอนไซม์ และการทำให้บริสุทธิ์ จากนั้น PHBV จะถูกทำให้แห้งและเตรียมเป็นผงหรือเม็ดพลาสติกสำหรับแปรรูปด้วยกระบวนการอัดรีด การฉีดขึ้นรูป การอัดขึ้นรูป หรือการผลิตฟิล์ม



รูปที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของ PHB และ PHBV (ที่มา https://2018.igem.org/Team:Edinburgh_OG/PHBV_Production) และแกรนูลของ PHB ที่สะสมอยู่ในเซลล์ (ที่มา <https://www.redalyc.org/journal/835/83554561010/html/>)

อิทธิพลของปริมาณ 3HV ต่อสมบัติของ PHBV

การเพิ่มปริมาณ 3HV ทำให้ความสม่ำเสมอของสายโซ่ PHBV ลดลง เนื่องจากหมู่เอทิลของหน่วย 3HV มีขนาดใหญ่กว่าหมู่เมทิลของหน่วย 3HB จึงรบกวนการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบและลดความสามารถในการเกิดผลึก ผลการศึกษาพบว่า PHBV ที่มี 3HV ร้อยละ 20 มีระดับความเป็นผลึกต่ำกว่า PHBV ที่มี 3HV ร้อยละ 5 อย่างชัดเจน โดยระดับความเป็นผลึกจากการให้ความร้อนครั้งที่สองลดลงจากประมาณร้อยละ 56.5 เหลือร้อยละ 7.13 นอกจากนี้ PHBV ที่มีปริมาณ 3HV สูงยังอาจแสดงการหลอมมากกว่าหนึ่งตำแหน่ง ซึ่งสัมพันธ์กับความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างผลึก รวมถึงการหลอมและการเกิดผลึกใหม่ระหว่างการให้ความร้อน

ในด้านสมบัติเชิงกล การเพิ่มปริมาณ 3HV โดยทั่วไป มีแนวโน้มลดความแข็งตึงและความแข็งแรงของวัสดุ ตัวอย่าง PHBV จากผู้ผลิตเดียวกันแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่ม 3HV จากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 20 โมดูลัสยืดหยุ่นลดลงจาก 13.0 เป็น 8.37 กิกะพาสคัล และความต้านทานแรงดึงลดลงจาก 22.1 เป็น 15.2 เมกะพาสคัล อย่างไรก็ตามค่าการยืดตัวก่อนขาดยังคงต่ำและไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

สมบัติเชิงกลของ PHBV ยังขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล สารเติมแต่ง ชนิดของจุลินทรีย์ กระบวนการหมัก และสภาวะการแปรรูป ตัวอย่างที่มีปริมาณ 3HV ใกล้เคียงกันแต่น้ำหนักโมเลกุลต่างกันจึงอาจแสดงความแข็งแรงและการยืดตัวก่อนขาดแตกต่างกันอย่างมาก ดังนั้นการพิจารณาผลของ 3HV ควรเปรียบเทียบกับวัสดุจากแหล่งผลิตเดียวกันและมีน้ำหนักโมเลกุลใกล้เคียงกัน



รูปที่ 2 ตัวอย่างภาชนะบรรจุอาหารที่ผลิตจาก PHBV จากโครงการ YPACK

(ที่มา <https://bioplasticsnews.com/2020/06/12/ypack-biodegradable-food-packaging-shelf-life/>)

สมบัติของ PHBV สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร

PHBV เป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึกที่มีความแข็งตึงและสามารถคงรูปได้ดี จึงเหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์บรรจุภัณฑ์ที่ต้องการความแข็ง เช่น ภาชนะ และชิ้นงานขึ้นรูป อย่างไรก็ตาม PHBV หลายเกรดยังมีความเปราะและค่าการยืดตัวก่อนขาดต่ำ จึงอาจแตกร้าว เมื่อได้รับแรงกระแทกหรือการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว การนำไปผลิตฟิล์มยืดหยุ่นจึงอาจต้องปรับปรุงด้วยการผสมกับพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่น การเติมพลาสติกไซเซอร์ หรือการควบคุมโครงสร้างผลึกระหว่างการแปรรูป

ในด้านการแปรรูป การลดอุณหภูมิหลอมเหลวจากการเพิ่มหน่วย 3HV ช่วยให้ PHBV สามารถขึ้นรูปได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า PHB อย่างไรก็ตาม PHBV มีความไวต่อความร้อน โดยสายโซ่อาจเกิดการแตกขาดเมื่อสัมผัสอุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลและความหนืดขณะหลอมลดลง การศึกษาพบว่า PHBV บางเกรดเกิดการลดลงของความหนืดอย่างมากที่อุณหภูมิ 160 ถึง 170 องศาเซลเซียส จึงเสนอให้แปรรูปวัสดุที่อุณหภูมิต่ำกว่า 160 องศาเซลเซียสและใช้ความเร็วรอบสกรูไม่สูงเกินไป เพื่อลดการเสื่อมสภาพของสายโซ่

สำหรับสมบัติกัน บริเวณผลึกของ PHBV ช่วยจำกัดการเคลื่อนที่และเพิ่มความคงตัวของเส้นทางการแพร่ผ่านของโมเลกุล อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณ 3HV ทำให้ความเป็นผลึกลดลงและเพิ่มสัดส่วนบริเวณอสัณฐาน จึงอาจทำให้ไอน้ำซึมผ่านวัสดุได้ง่ายขึ้น ในตัวอย่างจากผู้ผลิตเดียวกัน อัตราการซึมผ่านไอน้ำเพิ่มจากประมาณ 372 เป็น 440 g/m².day เมื่อเพิ่ม 3HV จากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 20 แต่ค่าที่ได้จากต่างผู้ผลิตมีความแตกต่างกันมาก เนื่องจากยังขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล สารเติมแต่ง วิธีการเตรียมฟิล์ม และความหนาของวัสดุ

PHBV อาจไม่เหมาะสำหรับใช้เป็นชั้นกันไอน้ำเพียงชั้นเดียวในบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีความชื้นสูงหรือมีอายุการเก็บรักษานาน การปรับปรุงสมบัติกันอาจทำได้ด้วยการเคลือบผิว การผลิตเป็นโครงสร้างหลายชั้น หรือการผสมกับวัสดุที่มีสมบัติกันสูงกว่า

จุดเด่นสำคัญของ PHBV คือความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจากสายโซ่ประกอบด้วยพันธะเอสเทอร์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและถูกย่อยโดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามอัตราการย่อยสลายขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ความชื้น ชนิดของจุลินทรีย์ ความหนาของผลิตภัณฑ์ น้ำหนักโมเลกุล และระดับความเป็นผลึก จึงไม่ควรสรุปว่าผลิตภัณฑ์ PHBV ทุกชนิดจะย่อยสลายได้ในระยะเวลาและสภาวะเดียวกัน

ศักยภาพและข้อจำกัดในการใช้งาน

PHBV มีศักยภาพสำหรับการผลิตฟิล์มห่ออาหาร ถาด ภาชนะขึ้นรูป วัสดุเคลือบ และบรรจุภัณฑ์ใช้ครั้งเดียว เนื่องจากผลิตด้วยกระบวนการทางชีวภาพ สามารถย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม และแปรรูปได้ด้วยกระบวนการของเทอร์โมพลาสติกทั่วไป อย่างไรก็ตามการใช้งานเชิงพาณิชย์ยังมีข้อจำกัดด้านความเปราะ ความแข็งแรงขณะหลอม ความเสถียรทางความร้อน สมบัติกันไอน้ำ และต้นทุนการผลิต

โดยสรุปปริมาณ 3HV เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดสมบัติของ PHBV การเพิ่มหน่วย 3HV ช่วยลดความเป็นผลึกและอุณหภูมิหลอมเหลว ทำให้วัสดุแปรรูปได้ง่ายขึ้น แต่ในขณะเดียวกันอาจลดความแข็งแรงและสมบัติกันไอน้ำ การเลือก PHBV สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารจึงต้องพิจารณาพร้อมกันทั้งสัดส่วน 3HV น้ำหนักโมเลกุล สารเติมแต่ง กระบวนการแปรรูป และลักษณะของอาหารที่บรรจุ การพัฒนาสูตรผสมและโครงสร้างบรรจุภัณฑ์หลายชั้นจึงเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มศักยภาพของ PHBV สำหรับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์อย่างยั่งยืน

ที่มาของข้อมูล

1. Modi, M., Koelling, K., and Vodovotz, Y. (2011), Assessment of PHB with varying hydroxyvalerate content for potential packaging applications. *European Polymer Journal* 47: 179–186. (<https://doi.org/10.1007/s11947-025-03854-1>)
2. <https://www.redalyc.org/journal/835/83554561010/html/>
3. <https://www.eufic.org/en/newsroom/article/eu-project-ypack-develops-innovative-biodegradable-food-packaging-extending-food-shelf-life>
4. <https://bioplasticsnews.com/2020/06/12/ypack-biodegradable-food-packaging-shelf-life/>