

การผลิตพลาสติกชีวภาพ การใช้ประโยชน์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

Bioplastics: Production, Applications, and Environmental Impacts

ฉนวนวรรณ ศรีพัฒน์พงศ์

Tanawan Tripattanapong

นักวิจัยอิสระ

Independent researcher

* Email: t.tanawan1310@gmail.com

ส่งต้นฉบับบทความ : 14 พ.ค. 68 / ส่งบทความฉบับแก้ไข : 26 ก.ค. 68 / ตอปรับให้เผยแพร่ : 30 ก.ค. 68 / เผยแพร่ : 21 ส.ค. 68

การอ้างอิง: ฉนวนวรรณ ศรีพัฒน์พงศ์ (2568). การผลิตพลาสติกชีวภาพ การใช้ประโยชน์ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม. สิ่งแวดล้อมไทย, ปีที่ 29 (ฉบับที่ 2).

<https://doi.org/10.35762/TE.2568006>

บทคัดย่อ

พลาสติกชีวภาพเป็นวัสดุทางเลือกที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากปัญหาขยะพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ สามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ กลุ่มที่ผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติและย่อยสลายได้ (เช่น PLA, PHAs), กลุ่มจากปิโตรเลียมแต่ย่อยสลายได้ (เช่น PBAT), และกลุ่มที่ผลิตจากชีวมวลแต่ไม่ย่อยสลาย (เช่น Bio-PE, Bio-PET) ซึ่งกระบวนการผลิตมีทั้งจากการสกัดโดยตรง การใช้จุลินทรีย์ และการสังเคราะห์จากมอนอเมอร์ชีวภาพ พลาสติกชีวภาพถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์ซึ่งเป็นตลาดหลัก รวมถึงการแพทย์ ยานยนต์ และเกษตรกรรม โดยมีแนวโน้มการเติบโตของตลาดทั่วโลกอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม แม้จะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าพลาสติกทั่วไป แต่การผลิตและการจัดการหลังใช้งานยังมีข้อจำกัดและอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้ที่ดินอย่างไม่เหมาะสม การปล่อยก๊าซเรือนกระจก และมลภาวะจากไมโคร/นาโนพลาสติก จึงจำเป็นต้องมีระบบจัดการที่ครอบคลุมเพื่อให้การใช้พลาสติกชีวภาพเกิดประโยชน์สูงสุดอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : พลาสติกชีวภาพ; การผลิตพลาสติกชีวภาพ; สิ่งแวดล้อม

Abstract

Bioplastics have continuously garnered increasing attention as an alternative material due to the persistent problem of non-biodegradable plastic waste. These materials can be classified into three primary categories including bio-based and biodegradable, petroleum-based and biodegradable, and bio-based and non-biodegradable. The production processes of bioplastics

include direct extraction from biomass, microbial fermentation, and synthesis from bio-based monomers. The bioplastics are utilized in many industries, with packaging being the largest market segment. Their applications also extend to medical, automotive, and agricultural sectors. The global market for bioplastics demonstrates continuous growth trajectories across these diverse applications. The bioplastics are generally considered more environmentally benign than conventional plastics, even though their production and post-consumer management are associated with significant limitations and potential environmental impacts. These concerns include adverse land use changes, GHG emissions, and micro/nanoplastic pollution. Consequently, comprehensive management systems are necessitated to ensure the optimal and sustainable utilization of bioplastics.

Keyword: Bioplastic; Bioplastic Production; Environment

1. บทนำ

ปัญหาขยะพลาสติกได้กลายเป็นวิกฤตการณ์สิ่งแวดล้อมระดับโลกที่ทวีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยพลาสติกทั่วไปส่วนใหญ่ผลิตจากปิโตรเลียม ในปัจจุบันมีการใช้พลาสติกทั่วไปในปริมาณมหาศาล เนื่องจากพลาสติกมีคุณสมบัติที่เบา แข็งแรง สามารถปรับแต่งรูปร่างให้มีลักษณะตามต้องการได้ ทำให้พลาสติกมีบทบาทต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก มีการคาดการณ์ว่าภายในปี ค.ศ. 2025 ปริมาณขยะพลาสติกทั่วโลกจะสูงถึง 460 ล้านตันต่อปี ซึ่งมีสาเหตุมาจากการบริโภคและความพยายามในการรีไซเคิลที่ไม่เพียงพอ (Waste Direct, 2025) โดยประเทศไทยในปี พ.ศ. 2566 คาดว่าจะมีปริมาณขยะพลาสติกประมาณ 3.03 ล้านตันของปริมาณขยะที่เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งเพิ่มขึ้นปริมาณ 0.2 ล้านตัน เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2565 (กรมควบคุมมลพิษ, 2567) ซึ่งขยะเหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

พลาสติกชีวภาพ (bioplastics) จึงได้กลายเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพและได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างมาก เนื่องจากพลาสติกชีวภาพมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับพลาสติกจากปิโตรเลียมที่มีการใช้อยู่ปัจจุบัน ผลิตได้จากแหล่งทรัพยากรหมุนเวียน เช่น อ้อย ข้าวโพด และพลาสติกชีวภาพบางชนิดสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable) ในปี ค.ศ. 2024 มีกำลังผลิตพลาสติกชีวภาพทั่วโลกอยู่ที่ 2.47 ล้านตัน โดยมีปริมาณผลิตจริงอยู่ที่ 1.44 ล้านตัน คิดเป็นการใช้พลาสติกชีวภาพอยู่ที่ประมาณ 60% ของกำลังการผลิตพลาสติกชีวภาพทั้งหมด และในปี ค.ศ. 2029 มีคาดการณ์ว่ากำลังการผลิตจะเพิ่มขึ้นเป็น 5.73 ล้านตันต่อปี (European bioplastics, 2024) ทำให้ตลาดพลาสติกชีวภาพทั่วโลกมีแนวโน้มเติบโตอย่างมีนัยสำคัญ มีการคาดการณ์ว่าจะเติบโตจากมูลค่า 16.8 พันล้านดอลลาร์สหรัฐในปี ค.ศ. 2025 เป็น 98 พันล้านดอลลาร์สหรัฐภายในปี ค.ศ. 2035 โดยมีอัตราการเติบโตเฉลี่ยต่อปี (CAGR) อยู่ที่ 19.3% เนื่องจากการมีส่งเสริมการใช้วัสดุที่ยั่งยืนรัฐบาลประเทศต่าง ๆ จึงกำหนดกฎระเบียบจากความกังวลทางด้านสิ่งแวดล้อมที่มากขึ้น มีการกำหนดกฎระเบียบของรัฐบาลประเทศต่าง ๆ ทำให้ความต้องการที่เพิ่มขึ้นในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น บรรจุภัณฑ์

ยานยนต์ และสินค้าอุปโภคบริโภค เป็นต้น (Future Market Insights Global and Consulting, 2025) โดยบรรจุภัณฑ์เป็นสินค้าหลักของตลาดพลาสติกชีวภาพ สามารถคิดเป็น 45% (1.12 ล้านตัน) ของตลาดพลาสติกชีวภาพทั้งหมดในปี 2024 (European bioplastics, 2024) ซึ่งการใช้งานในรูปแบบของบรรจุภัณฑ์ซึ่งแม้จะช่วยแก้ปัญหาบางด้านของพลาสติกทั่วไป แต่ก็อาจถูกมองว่าเป็นการส่งเสริมการใช้แล้วทิ้ง แทนที่จะมุ่งเน้นไปที่หลักการลด (Reduce) และใช้ซ้ำ (Reuse) ซึ่งอยู่ลำดับต้นของหลักการลำดับชั้นการจัดการขยะ (Waste Hierarchy) โดยอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) มีการขยายตัวในตลาดที่มีศักยภาพการเติบโตสูง เช่น ตลาดของผู้บริโภคที่ให้ความสำคัญกับความปลอดภัยด้านสุขอนามัย ตลาดของผู้ประกอบการในธุรกิจที่ต้องการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก และตลาดเฉพาะเจาะจง (Niche Market) ในสินค้าบรรจุภัณฑ์หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ (Packaging Design) ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (NSTDA, 2567)

สำหรับประเทศไทยนั้น รัฐบาลไทยได้กำหนดให้ โมเดลเศรษฐกิจชีวภาพ-เศรษฐกิจหมุนเวียน-เศรษฐกิจสีเขียว (Bio-Circular-Green Economy Model, BCG) เป็นวาระแห่งชาติและเป็นกลไกสำคัญในการขับเคลื่อนการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศอย่างยั่งยืนหลังสถานการณ์โควิด-19 (Kumagai, 2022) โดยพลาสติกชีวภาพและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องถือเป็นองค์ประกอบหลักของเศรษฐกิจชีวภาพ (Bioeconomy) และเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ภายใต้โมเดล BCG นี้ โดยมุ่งเน้นการใช้ประโยชน์จากจุดแข็งของประเทศด้านความหลากหลายทางชีวภาพและภาคเกษตรกรรม เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร พัฒนาพลังงานชีวภาพ วัสดุชีวภาพ และเคมีชีวภาพ รัฐบาลตั้งเป้าหมายให้ภาคเศรษฐกิจ BCG มีสัดส่วนประมาณ 24-25% ของ GDP ภายในปี 2025-2027 และมีการตั้งเป้าหมายการลงทุนในอุตสาหกรรมชีวภาพที่ชัดเจน เนื่องจากประเทศไทยเป็นผู้ผลิตสินค้าเกษตรรายใหญ่ของโลก โดยเฉพาะอ้อยและมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตพลาสติก (Bangkokpost, 2023)

2. การจำแนกประเภทของพลาสติกชีวภาพ

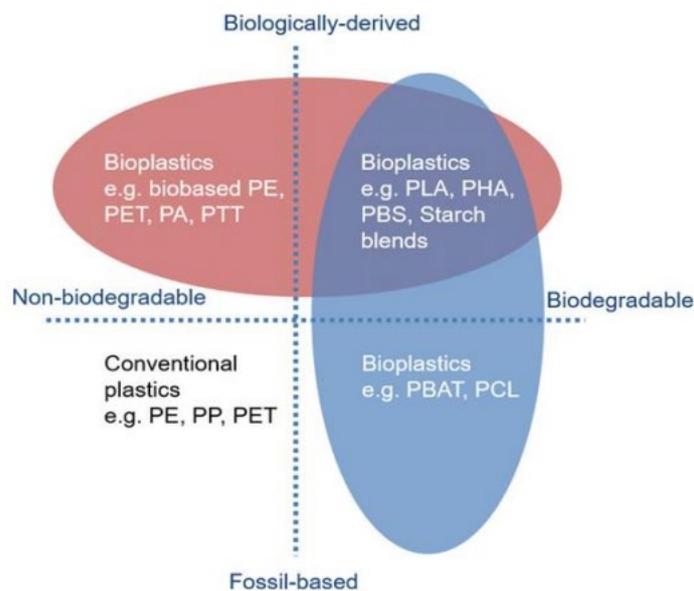
พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) หมายถึง พลาสติกที่ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติจากพืช หรือชีวมวล เช่น ข้าวโพด อ้อย เป็นต้น หรือมีคุณสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้ โดยพลาสติกชีวภาพได้รับความสนใจจากทางอุตสาหกรรมที่จะนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น โพลีแลคติกแอซิด (Polylactic acid, PLA) โพลีไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Polyhydroxyalkanoates, PHAs) โพลีบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene succinate, PBS) และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (thermoplastic starch, TPS) เป็นต้น (Fredri and Dorigato, 2021) โดยมีการแบ่งกลุ่มพลาสติกชีวภาพตาม European Bioplastic แบ่งเป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ (รูปที่ 1) ได้แก่ (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2564)

2.1 พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติและสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Bio-based and Biodegradable) โดยผลิตขึ้นจากวัตถุดิบที่สามารถหมุนเวียนได้ และสามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบอินทรีย์ มวลชีวภาพ เช่น โพลีแลคติกแอซิด (PLA) โพลีไฮดรอกซีไฮดร

อกซิงอัลคาโนเอต (PHAs) โพลีบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ชนิดที่ผลิตจากแป้ง และพลาสติกที่มีแป้งองค์ประกอบพื้นฐานอย่างสตาร์ช (Starch blend)

2.2 พลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเลียมและย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Petroleum-based and Bio-degradable) เป็นพลาสติกที่มีแหล่งกำเนิดจากปิโตรเลียม และสามารถสลายตัวได้ทางชีวภาพได้เช่นเดียวกับพลาสติกชีวภาพได้ในกลุ่มแรก เช่น โพลีบิวทิลีนอะดิเพท โคเทรพทาเลท (PBAT), โพลีคาโพรแลคโตน (PCL), โพลีบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) ชนิดที่ผลิตจากปิโตรเลียม ซึ่งบางแหล่งข้อมูลอาจจะมีการเรียกรวมกันของกลุ่มที่ 1 และ 2 ว่า พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics)

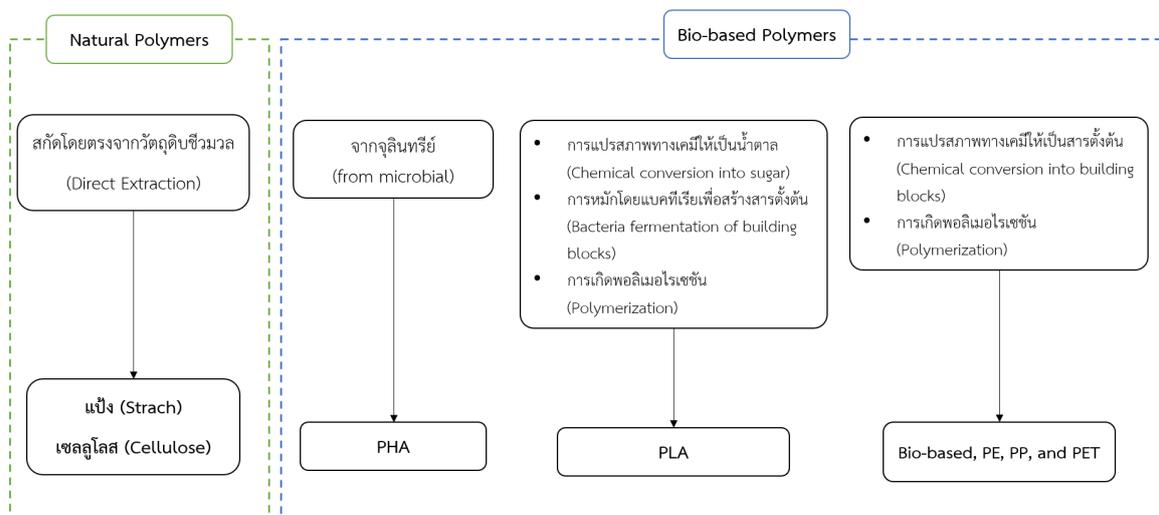
2.3 พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบธรรมชาติที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Bio-based and Non-biodegradable) หรือพลาสติกฐานชีวภาพ โดยพลาสติกจะผลิตจากวัตถุดิบชีวมวลบางส่วนซึ่งอาศัยแหล่งคาร์บอนที่มีอยู่ในแป้ง น้ำตาล น้ำมันพืช หรือเซลลูโลสที่ได้จากพืชที่สามารถปลูกทดแทนได้ ตามมาตรฐานสากลที่ใช้สำหรับรับรองผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพ ซึ่งต้องมีองค์ประกอบของวัตถุดิบชีวมวลอย่างน้อยร้อยละ 20 โดยอ้างอิง DIN Certco และ TUV Austria ซึ่งโครงสร้างทางเคมีเหมือนกับพลาสติกทั่วไป ที่มีคุณสมบัติความทนทานและไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น ไบโอ-โพลีเอทิลีน (Bio-PE), ไบโอ-โพลีโพรพิลีน (Bio-PP), ไบโอ-พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (Bio-PET), ไบโอ-โพลีเอไมด์ (Bio-PA) และไบโอ-โพลีไวนิลคลอไรด์ (Bio-PVC)



รูปที่ 1 ประเภทของพลาสติกชีวภาพ (ที่มา: Dalmia and Wadiye, 2020)

3. กระบวนการผลิตพลาสติกชีวภาพ

กระบวนการผลิตพลาสติกชีวภาพ มีความหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติกและวัตถุดิบตั้งต้น โดยทั่วไปสามารถจำแนกประเภทของพลาสติกชีวภาพตามกระบวนการผลิต (ตามรูปที่ 2) ได้แก่ พลาสติกชีวภาพที่สกัดโดยตรงจากวัตถุดิบชีวมวล (เช่น แป้ง เซลลูโลส โปรตีน) พลาสติกชีวภาพที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ (เช่น PHA) และพลาสติกชีวภาพที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ที่มาจากวัตถุดิบธรรมชาติ (เช่น PLA จากกรดแล็กติก, Bio-PE จากเอทิลีนที่มาจากวัตถุดิบธรรมชาติ) และได้มีการจำแนกพลาสติกชีวภาพตามแหล่งกำเนิด (รูปที่ 2) สามารถแบ่งได้เป็น พอลิเมอร์ที่ได้จากธรรมชาติ (Natural Polymers) ซึ่งสามารถสกัดได้โดยตรง และพอลิเมอร์ที่มาจากสารตั้งต้นที่มาจากวัตถุดิบทางการเกษตร (Bio-based Polymers)



รูปที่ 2 การจำแนกประเภทของพลาสติกตามแหล่งกำเนิดวัตถุดิบ

(ดัดแปลงจาก: Ibrahim et al., 2021; Saharan and Kharb, 2022; Jogi and Bhat, 2020)

3.1 พลาสติกชีวภาพที่สกัดโดยตรงจากวัตถุดิบชีวมวล (Bioplastics by direct extraction) สามารถผลิตได้โดยการสกัดชีวมวลจากพอลิเมอร์ชีวภาพที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ (เช่น แป้ง, เซลลูโลส) และโปรตีน (Nanda et al., 2021; Dalmia and Wadiye, 2020)

3.1.1 แป้ง (Starch) ได้แก่ ข้าวโพด มันสำปะหลัง มันฝรั่ง ข้าวสาลี เป็นต้น โดยแป้งยังเป็นหนึ่งในพอลิแซ็กคาไรด์จากพืชที่ใช้มากที่สุดในการผลิตพลาสติกชีวภาพ (Thakur et al., 2019) โดยแป้งประกอบด้วยหน่วย D-glucose ที่เชื่อมต่อกันในสองรูปแบบ คือ อะไมโลสและอะไมโลเพกทิน (Copeland et al., 2009) สามารถผสมกับพลาสติกไซเซอร์ (Plasticizer) เช่น กลีเซอรอล เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น และมักผสมกับพอลิเมอร์ที่ละลายตัวได้ทางชีวภาพชนิดอื่น ๆ เช่น PLA, PBAT, PCL, PHA เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้มักเรียกว่า เทอร์มอพลาสติกสตาโรซ (TPS)

3.1.2 เซลลูโลส (Cellulose) เป็นส่วนประกอบตามธรรมชาติของวัสดุจากพืชและสามารถได้จากแหล่งต่าง ๆ เช่น ไม้ เส้นใย ไม้ไผ่ ของเสียทางการเกษตร และป่าไม้ เป็นต้น พลาสติกชีวภาพ

จากเซลลูโลสได้มาจากเอสเทอร์ ซึ่งรวมถึง เซลลูโลสอะซิเตต, เซลลูโลสไนเตรต, เซลลูโลสบิวทิเรต และเซลลูโลสโพรพิโอเนต เมื่อนำมาผสมกับแป้ง จะได้พลาสติกชีวภาพที่มีความแข็งแรงเชิงกลสูง สามารถซึมผ่านก๊าซได้ และทนทานต่อน้ำ สามารถปรับเปลี่ยนเป็นเทอร์โมพลาสติกและนำไปใช้ในการบรรจุภัณฑ์ได้

3.1.3 กลูเตน (Gluten) เป็นโปรตีนพืชที่พบใน ข้าวไรย์ ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ เป็นต้น (Jasthi et al., 2020) และกลูเตนยังเป็นผลพลอยได้จากการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพเอทานอล ซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพโดยใช้เทคโนโลยีการอัดรีดสำหรับเทอร์โมพลาสติกได้ และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการบรรจุภัณฑ์อาหาร (Arifeen et al., 2009; Jiménez-Rosado et al., 2019)

3.2 พลาสติกชีวภาพที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ (Bioplastics from microbial) เป็นกลุ่มของพอลิเมอร์ที่ผลิตและสะสมอยู่ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ เช่น *Alcaligenes eutrophus*, *Bacillus megaterium*, *Cupriavidus necator*, *Pseudomonas aeruginosa* และ *Pseudomonas putida* เป็นต้น (Zhou et al., 2023; Tufail, Munir and Jamil, 2017; Moreno et al., 2015) เพื่อเป็นแหล่งพลังงานสำรองโดยการควบคุมแหล่งคาร์บอนและสภาวะจำกัดสารอาหารบางชนิด เช่น มีคาร์บอนมากเกินไปขณะที่มีจำกัดไนโตรเจน ฟอสฟอรัส หรือออกซิเจน ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้สามารถใช้แหล่งคาร์บอนได้หลากหลาย ตั้งแต่ น้ำตาล ไขมัน ไปจนถึงของเสียอินทรีย์จากภาคเกษตร อุตสาหกรรม หรือน้ำทิ้ง โดยพลาสติกชีวภาพที่ได้จากจุลินทรีย์ คือ พอลิไฮดรอกซีอัลคานอยด์ (Polyhydroxyalkanoates, PHAs) ซึ่งคุณสมบัติทางกายภาพที่โดดเด่น คือ ทนต่อความร้อน และมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับพลาสติกสังเคราะห์ประเภทพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) สามารถนำมาขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้ (สถาบันพลาสติกไทย, ม.ป.ป.)

3.3 พลาสติกชีวภาพที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ที่มาจากวัตถุดิบทางการเกษตร (Bioplastics synthesized from bio-based monomers) สามารถผลิตได้จากการแปรรูปวัตถุดิบ (เช่น แป้ง น้ำตาล จาก อ้อย ข้าวโพด และมันสำปะหลัง เป็นต้น) ให้เป็นสารตั้งต้น เช่น กรดแลคติก (สำหรับ PLA) หรือเอทานอล (สำหรับ Bio-PE และ Bio-PET) ในการผลิตพลาสติกชีวภาพโดยกระบวนการหมักของจุลินทรีย์หรือกระบวนการทางเคมีพอลิแลคติกแอซิด (PLA) เป็นพลาสติกชีวภาพที่ผลิตมาจากวัตถุดิบทางการเกษตร คือ อ้อย ข้าวโพด และมันสำปะหลัง โดยการบดแป้งจากพืช จากนั้นแป้งจะถูกย่อยให้เป็นน้ำตาล (เดกซ์โทรส) จะถูกนำไปหมักโดยจุลินทรีย์เพื่อเปลี่ยนเป็นกรดแลคติก (Lactic acid) โดยกรดแลคติกจะถูกเปลี่ยนเป็นโมเลกุลรูปวงแหวนที่เรียกว่าแลกไทด์ (lactide) นำไปผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) (Fredi and Dorigato, 2021) ซึ่ง PLA มีคุณสมบัติเด่นคือ มีความแข็งแรงสูง ใส และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพภายใต้สภาวะที่เหมาะสม และเป็นหนึ่งในพลาสติกชีวภาพที่มีการใช้งานแพร่หลายที่สุด (Yadav et al., 2022)

- 3.3.1 ไบโอบีโอ-โพลีเอทิลีน (Bio-PE) ผลิตมาจากเอทานอลที่สังเคราะห์โดยกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ถูกนำมาใช้ในการผลิตพอลิเอทิลีน โดยการผลิตไบโอบีโอเอทานอลใช้วัตถุดิบชีวมวล เช่น อ้อย พืชแป้ง รวมถึงข้าวสาลี ข้าวโพด ซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี เทคนิค และกลไกคล้ายคลึงกับพอลิเอทิลีนทั่วไป มีความเหนียว ยืดหยุ่น ทนทาน (Saharan and Kharb, 2022)
- 3.3.2 ไบโอบีโอ-โพลีโพรพิลีน (Bio-PP) สามารถผลิตได้จากทรัพยากรชีวภาพผ่านกระบวนการหมักกลูโคสเพื่อให้ได้โอบีโอบิวทานอล และทำให้เกิดปฏิกิริยาการคายน้ำ (Dehydration) เพื่อผลิตไบโอบีโอบิวทิลีน และต่อยอดด้วยไบโอบีโอโพรพิลีน ซึ่งจะนำไปผลิตเป็นไบโอบีโอโพรพิลีน (Bio-PP) ผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Fredri and Dorigato, 2021)
- 3.3.3 ไบโอบีโอ-พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Bio-PET) ประกอบด้วยเอทิลีนไกลคอล (EG) ที่มาจากชีวภาพ (เช่น โมโนเอทิลีนไกลคอล หรือ MEG จากเอทานอลที่ได้จากอ้อย) และกรดเทเรฟทาสิก (TPA) ที่โดยทั่วไปยังคงมาจากแหล่งฟอสซิล โดยคุณสมบัติเหมือนกับ PET ทั่วไป มีความใส แข็งแรง ทนทานต่อแรงกระแทก มีสมบัติกันก๊าซได้ดี สามารถนำไปรีไซเคิลร่วมกับ PET ทั่วไปได้ (Fredri and Dorigato, 2021; Saharan and Kharb, 2022)

หลังจากได้สารตั้งต้นหรือมอนอเมอร์ในการผลิตพลาสติกชีวภาพ จะนำสารตั้งต้นมาเปลี่ยนรูปและสังเคราะห์ให้เป็นพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) กระบวนการนี้เชื่อมต่อกับโมเลกุลมอนอเมอร์ให้กลายเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ โดยแบ่งออกเป็น (1) พอลิเมอไรเซชันแบบเติม (Addition Polymerization) ใช้ผลิต PE และ Bio-PE โดยการนำโมเลกุลเอทิลีนมาต่อกันเป็นสายยาว โดยอาศัยตัวเร่งปฏิกิริยา และ (2) พอลิเมอไรเซชันแบบควบแน่น (Condensation Polymerization) ใช้ผลิตพอลิเอสเทอร์ เช่น PET, PBS และ PLA โดยมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันจะทำปฏิกิริยากันและปล่อยโมเลกุลน้ำออกมา สำหรับ PLA มักใช้กระบวนการ Ring-Opening Polymerization

ด้วยความซับซ้อนเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ต้นทุนการผลิตพลาสติกชีวภาพส่วนใหญ่ยังสูงกว่าพลาสติกทั่วไป โดยวิธีการผลิตที่ใช้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัตถุดิบและลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น พิล์มบางหรือชิ้นส่วนที่เป็นโครงสร้างแข็ง โดยเทคนิคการผลิตที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ การฉีดขึ้นรูป (Injection Molding), การอัดรีด (Extrusion), การเป่าขึ้นรูป (Blow Molding) ทั้งนี้ บางกระบวนการอาจไม่เหมาะสมในเชิงความยั่งยืน ต้นทุน หรือประสิทธิภาพ ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาผลิต ตัวอย่างเช่น พลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดจะมีโครงสร้างทางเคมีเฉพาะตัวส่งผลให้ต้องมีการควบคุมเงื่อนไขในการผลิตต่างกัน (Shah et al., 2021; Chauhan et al., 2024)

4. การจัดการพลาสติกชีวภาพเมื่อสิ้นสุดอายุการใช้งาน

เมื่อพลาสติกชีวภาพสิ้นสุดอายุการใช้งานสามารถจัดการได้โดย การรีไซเคิล (Recycling) การเผา (Incineration) และการฝังกลบ (Landfill) นอกจากนี้พลาสติกชีวภาพยังสามารถจัดการเป็นขยะอินทรีย์

ใช้การทำปุ๋ยหมัก (Compost) หรือการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) ซึ่งวิธีการจัดการต่าง ๆ มีข้อดีและข้อจำกัด สามารถแบ่งได้ (Islam et al., 2024) ดังนี้

4.1 การรีไซเคิล (Recycling) แบ่งออกเป็น การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical Recycling) และรีไซเคิลเชิงเคมี (Chemical Recycling)

4.1.1 การรีไซเคิลเชิงกล (Mechanical Recycling) เป็นกระบวนการทางกายภาพที่ใช้กับพลาสติกคุณภาพสูงมาใช้ใหม่ โดยไม่เปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีด้วยวิธีการอัดรีดซ้ำ (Re-extrusion) การบด (grinding) และการทำให้เป็นเม็ด (granulation) เพื่อขึ้นรูปพลาสติกใหม่ เป็นต้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ประหยัดพลังงานและปล่อยก๊าซเรือนกระจกน้อยกว่าการรีไซเคิลเชิงเคมี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของคุณภาพของพลาสติกชีวภาพต่ำอาจเสื่อมคุณภาพเมื่อทำการรีไซเคิลหลายครั้ง และอาจจะมีการปนเปื้อนกับพลาสติกจากปิโตรเลียมทำให้คุณภาพรีไซเคิลลดลง

4.1.2 การรีไซเคิลเชิงเคมี (Chemical Recycling) เป็นกระบวนการใช้ความร้อนหรือสารเคมีเพื่อย้อนกลับพลาสติกให้เป็นสารตั้งต้น เช่น ไพโรไลซิส (pyrolysis), แก๊สซิฟิเคชัน (gasification), ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ซึ่งจะได้ผลพลอยได้เป็นมอนอเมอร์ ไฮโดรเจน น้ำมัน ก๊าซ เป็นต้น เนื่องจากการรีไซเคิลเชิงเคมีใช้พลังงานสูงและปล่อยสารพิษ และต้องใช้วัตถุดิบที่สะอาด โดยสิ่งปนเปื้อนในวัตถุดิบสามารถนำไปสู่ผลพลอยได้ที่ไม่พึงประสงค์และการปล่อยมลพิษที่เป็นอันตราย ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพอากาศและก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพ นอกจากนี้ สิ่งเจือปนในวัตถุดิบสามารถทำให้เกิดการเปรอะเปื้อนและการกัดกร่อนในอุปกรณ์ปลายน้ำ ซึ่งสามารถลดประสิทธิภาพและเพิ่มต้นทุนในการบำรุงรักษา

4.2 การเผา (Incineration) เป็นการจัดการขยะด้วยการเผาเพื่อให้ได้พลังงาน เช่น ไฟฟ้าและความร้อน โดยพลาสติกชีวภาพมีคุณสมบัติติดไฟได้ในตัวและค่าความร้อนสูง ทำให้สามารถนำไปเผาในโรงงานเผาพลาสติกทั่วไปได้ ซึ่งพลาสติกชีวภาพที่มีส่วนประกอบหลักเป็นแป้ง เช่นเดียวกับไม้ เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ได้ แม้ว่าจะมีค่าความร้อนรวมต่ำกว่าถ่านหินเล็กน้อย (Muthusamy and Pramasivam, 2019; Rujnic-Sokele and Pilipović, 2017) แต่เนื่องจากวัสดุนี้ย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ การเผาจึงอาจถูกมองว่าเป็นการสูญเสียเปล่าของสารอาหารสำคัญที่สามารถนำไปรีไซเคิลเป็นปุ๋ยได้ (Rahman and Bhoi, 2021)

4.3 การฝังกลบ (Landfill) เป็นวิธีจัดการขยะทั่วไปในการกำจัดขยะพลาสติกทั่วไป แต่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน (ก๊าซเรือนกระจก) และสารปนเปื้อนที่ชะออกมาจากหลุมฝังกลบ (leachate) ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม และการฝังกลบยังทำให้สูญเสียโอกาสในการรีไซเคิลหรือหมุนเวียนทรัพยากร

4.4 การทำปุ๋ยหมัก (Composting) ใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในสภาวะที่กำหนด (อุณหภูมิและความชื้นสูง) ให้กลายเป็นปุ๋ย โดยมีหลักเกณฑ์ที่กำหนดไว้ เช่น การลดลงของมวลในช่วงเวลาที่กำหนด (EN 13432) หรือการรวมกันของการย่อยสลายของวัสดุและการสร้างคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) น้ำชีวมวล และสารอินทรีย์ (ASTM D6400) โดยการทำปุ๋ยหมักอุตสาหกรรมนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมประมาณ 60-70 °C และระดับความชื้นสูง (ประมาณ 60%) ปริมาณน้ำที่เพียงพอเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนเพื่อเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Bátori et al., 2018) นอกจากนี้อัตราส่วนของคาร์บอนและไนโตรเจน (C:N) มีความสำคัญต่อการทำปุ๋ยหมัก โดยถ้าอัตราส่วนสูงสามารถขัดขวางการย่อยสลายทางชีวภาพ เนื่องจากไนโตรเจนทำหน้าที่เป็นตัวจำกัดปฏิกิริยา ในขณะที่อัตราส่วนที่ต่ำอาจส่งผลให้ไนโตรเจนส่วนเกินถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย (NH₃) (Castro-Aguirre et al., 2017) โดยพลาสติกชีวภาพนำมาใช้ในการทำปุ๋ยหมัก คือ PLA และ TPS เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ภายในระยะเวลาที่ค่อนข้างสั้นภายใต้ที่สภาวะที่กำหนด

4.5 การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion, AD) นั้นใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน มีผลผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ (biogas) และตะกอนเหลวที่ย่อยสลายแล้ว (Digestate) โดยมีทั้งหมด 4 ขั้นตอน ได้แก่ ไฮโดรไลซิส (hydrolysis), แอซิโดเจเนซิส (acidogenesis), อะซิโตเจเนซิส (acetogenesis) และมีเทนโนเจเนซิส (methanogenesis) (Ferreira et al., 2019) โดยมีเทนที่ได้จากกระบวนการสามารถถูกกักเก็บเพื่อใช้ประโยชน์เป็นแหล่งพลังงานต่อไปได้ และวัสดุที่ย่อยสลายได้แบบไม่ใช้ออกซิเจนถูกกำหนดในมาตรฐาน EN 13432:2000 ผลิตภัณฑ์ทั้งหมดอย่างน้อยครึ่งหนึ่งควรถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพภายในระยะเวลา 2 เดือน (EUBP, 2015; Batori et al., 2018) โดยพลาสติกชีวภาพ เช่น PLA, PHB และ TPS มีความสามารถในการย่อยสลายได้ในสภาวะอุณหภูมิสูง (อุณหภูมิระหว่าง 5 ถึง 65 °C) ในช่วงเทอร์โมฟิลิก (thermophilic) ที่จุลินทรีย์สามารถเติบโตได้

5. ผลกระทบของพลาสติกชีวภาพต่อสิ่งแวดล้อม

พลาสติกชีวภาพถูกมองว่าเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าพลาสติกจากปิโตรเลียม เนื่องจากผลิตจากทรัพยากรหมุนเวียนและบางชนิดมีศักยภาพในการย่อยสลาย อย่างไรก็ตามต้องมีการพิจารณาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของพลาสติกชีวภาพจึงจำเป็นต้องมีการประเมินอย่างครอบคลุม เมื่อเทียบกับพลาสติกจากปิโตรเลียม ดังนั้นจึงมีการใช้เครื่องประเมินวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assessment, LCA) เพื่อประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของพลาสติกชีวภาพ ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่การผลิตวัตถุดิบ การใช้งานไปจนถึงการจัดการเมื่อสิ้นอายุการใช้งาน (cradle-to-grave) และได้ศึกษาคาร์บอนฟุตพริ้นต์ (Carbon Footprint) ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ถูกปล่อยออกมาตลอดวัฏจักรชีวิตของผลิตภัณฑ์ พบว่าพลาสติกชีวภาพ PLA และ PHA มีคาร์บอนฟุตพริ้นต์ต่ำกว่าพลาสติกจากปิโตรเลียม เนื่องจากมีการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ของชีวมวลระหว่างที่เติบโตทำให้ปริมาณก๊าซเรือนกระจกลดลง โดยตัวอย่างจาก

การศึกษา LCA พบว่า การใช้ PLA ผลิตจากเศษวัสดุทางการเกษตรสามารถลดการปล่อย CO₂ ได้มากถึง 70% เมื่อเทียบกับพลาสติกจากปิโตรเลียม และการผลิต PHA จากเศษอาหารสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 25% เมื่อเทียบกับการผลิตพลาสติกโพลิโพรพิลีน (PP) (Ali et al., 2023; Morris and Hicks, 2022) แม้พลาสติกชีวภาพจะสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ แต่ยังคงมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในด้านอื่น ๆ (Islam et al., 2024) ดังนี้

5.1 การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในทางที่ไม่เหมาะสม (Adverse land use changes) โดยแม้ว่าชีวมวล (biomass) จะเป็นทรัพยากรหมุนเวียน แต่การใช้ที่ดินมากเกินไปอาจนำไปสู่ปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้ปุ๋ยและน้ำมากเกินไป การกัดเซาะดิน การสูญเสียพื้นที่เพาะปลูก และการเปลี่ยนแปลงความหลากหลายทางชีวภาพ โดยการใช้ที่ดินเพื่อปลูกพืชสำหรับพลาสติกชีวภาพอาจแข่งกับการใช้ที่ดินเพื่อผลิตอาหาร และอาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินในทางที่ไม่เหมาะสม (Bazzanella and Ausfelder, 2017)

5.2 การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (Climate Change) โดยการผลิตพลาสติกชีวภาพจะผลิตจากวัตถุดิบทางชีวภาพและสามารถลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล แต่การผลิตจริงอาจยังใช้พลังงานจากแหล่งที่ไม่หมุนเวียน (non-renewable energy, NREU) มากกว่าพลาสติกจากปิโตรเลียม ซึ่งก่อให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) ซึ่งส่งผลให้เกิดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่สิ่งแวดล้อม (Troschl et al., 2017) นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศอาจเกี่ยวข้องกับการจัดการพลาสติกชีวภาพหลังสิ้นสุดการใช้งาน เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาพลาสติกชีวภาพ ซึ่งมีเฉพาะคาร์บอน (C), ไฮโดรเจน (H), ออกซิเจน (O) เท่านั้น ถือว่ามีส่วนทำให้ปริมาณคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ในวัฏจักร เนื่องจากถูกใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงเพื่อสร้างชีวมวลใหม่ (Rosenboom et al., 2022) ในทางตรงกันข้ามพลาสติกชีวภาพที่มีไนโตรเจน (N), ซัลเฟอร์ (S), คลอรีน (Cl) สามารถเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนออกไซด์ (NOx), ซัลเฟอร์ออกไซด์ (SOx) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ตามลำดับ โดยการเผาสารเติมแต่งต่าง ๆ ที่มีอยู่ในพลาสติกชีวภาพสามารถก่อให้เกิดการปล่อยสารอันตราย ซึ่งต้องมีการแทรกแซงในการดักจับและบำบัดที่มีค่าใช้จ่ายสูง (Harding et al., 2007)

5.3 ความเป็นกรดและยูโทรฟิเคชัน (Acidification and Eutrophication) การใช้ปุ๋ยจำนวนมากในการปลูกพืชเพื่อผลิตพลาสติกชีวภาพ อาจส่งผลให้เกิดความเป็นกรดในดินและน้ำ และภาวะยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำ โดยได้มีการศึกษาของ Harding et al. (2007) ดำเนินการวิเคราะห์ LCA แบบ cradle-to-gate และสรุปว่า PHB มีค่าผลกระทบต่อด้านยูโทรฟิเคชันสูงกว่าพลาสติกฟอสซิลถึง 5.5–6.4 เท่า

5.4 มลพิษจากไมโครและนาโนพลาสติก (Micro/Nano-Plastic Pollution) โดยการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพอาจทำให้เกิดไมโครพลาสติกและนาโนพลาสติก แม้ว่าจะย่อยสลายได้แต่ในสภาพแวดล้อมจริงการย่อยสลายอาจไม่สมบูรณ์ซึ่งสามารถแทรกซึมเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารได้

นอกจากนี้ผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอนการจัดการหลังสิ้นอายุการใช้งาน เช่น การฝังกลบ หรือการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนอาจมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เนื่องจากมีการย่อยสลายมากกว่าเมื่อเทียบกับพลาสติกจากปิโตรเลียมซึ่งปกติไม่ย่อยสลายในหลุมฝังกลบ (Atiwesh et al., 2021) ถึงแม้ว่าพลาสติกชีวภาพจะมีผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม แต่ข้อมูลจากการประเมิน LCA แสดงให้เห็นถ้าหากมีการบริหารจัดการตลอดวัฏจักรอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การปรับปรุงในห่วงโซ่อุปทานของวัตถุดิบ เช่น การลดการใช้สารกำจัดศัตรูพืชหรือการเผาป่าเพื่อเตรียมพื้นที่เพาะปลูก อาจช่วยลดผลกระทบทางลบของพลาสติกชีวภาพได้ และการนำของเสียอินทรีย์หรือเศษอาหารมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพ (Rosenboom et al., 2022) หรือปรับปรุงระบบในการจัดการคัดแยกขยะที่ดีเพื่อส่งเสริมประสิทธิภาพในการรีไซเคิล (Filiciotto and Rothenberg, 2021) โดยพลาสติกชีวภาพสามารถเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนได้ และควรได้รับการส่งเสริมในรูปแบบที่สอดคล้องกับระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

6. บทสรุป

พลาสติกชีวภาพเป็นวัสดุทางเลือกที่ผลิตจากวัตถุดิบชีวภาพ เช่น แป้ง น้ำตาล และเซลลูโลส โดยมีทั้งแบบย่อยสลายได้และไม่สามารถย่อยสลายได้ ซึ่งถูกนำมาใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น บรรจุภัณฑ์ การแพทย์ ยานยนต์ และเกษตรกรรม แม้จะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมกว่าพลาสติกจากปิโตรเลียม แต่ยังมีข้อจำกัดด้านต้นทุน การผลิต และการจัดการหลังใช้งาน ซึ่งอาจก่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การใช้ที่ดินไม่เหมาะสมและมลพิษจากไมโคร/นาโนพลาสติก

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.เสาวนีย์ วิจิตรโกสุม ที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะในการเขียนบทความ และสนับสนุนตลอดการทำงาน

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมมลพิษ. (2566). รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2566. https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2024/06/pcdnew-2024-06-21_06-42-54_474054.pdf

สถาบันพลาสติกไทย. (ม.ป.ป.). *Bio Plastics*.

<http://asp.plastics.or.th:8001/ArticleKnowledgeList.aspx?articleGroupID=5>

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม. (2024).

แนวโน้มของพลาสติกชีวภาพในอนาคต : การวิเคราะห์ตลาดและแนวโน้มทางเทคนิค.

<https://www.nstda.or.th/nac/2024/seminar/nac-47/>

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. (2564). “พลาสติกชีวภาพ” นวัตกรรมเพื่อนสิ่งแวดล้อมและอนาคตอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพในประเทศไทย.

[https://www.oie.go.th/assets/portals/1/fileups/31/files/OIE%20SHARE\(April%2064\).pdf](https://www.oie.go.th/assets/portals/1/fileups/31/files/OIE%20SHARE(April%2064).pdf)

- Ali, S. S., Abdelkarim, E. A., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Li, F., Kornaros, M., ... & Sun, J. (2023). *Bioplastic production in terms of life cycle assessment: A state-of-the-art review*. Environ. Sci. Ecotechnology, 15, 100254.
- Arifeen, N., Kookos, I. K., Wang, R., Koutinas, A. A., & Webb, C. (2009). *Development of novel wheat biorefining: Effect of gluten extraction from wheat on bioethanol production*. Biochem. Eng. J., 43(2), 113-121.
- Atiweh, G., Mikhael, A., Parrish, C. C., Banoub, J., & Le, T. A. T. (2021). *Environmental impact of bioplastic use: A review*. Heliyon, 7(9).
- Bangkokpost. (2023). *Thailand claims No.2 rank for bioplastic production*.
<https://www.bangkokpost.com/business/2513861/thailand-claims-no-2-rank-for-bioplastic-production?fbclid=IwAR1cDoD96kocLFNcaJhXKoValc-qGH7BhtYDGzHYDSiDiPeoy-EWfKYZycA>
- Bátori, V., Åkesson, D., Zamani, A., Taherzadeh, M. J., & Horváth, I. S. (2018). *Anaerobic degradation of bioplastics: A review*. Waste Manag., 80, 406-413.
- Bazzanella, A., & Ausfelder, F. (2017). *Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry: Technology Study*. DECHEMA, Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie eV.
- Castro-Aguirre, E., Auras, R., Selke, S., Rubino, M., & Marsh, T. (2017). *Insights on the aerobic biodegradation of polymers by analysis of evolved carbon dioxide in simulated composting conditions*. Polym. Degrad. Stab., 137, 251-271.
- Chauhan, K., Kaur, R., & Chauhan, I. (2024). *Sustainable bioplastic: a comprehensive review on sources, methods, advantages, and applications of bioplastics*. Polym.-Plast. Technol. Mater., 63(8), 913-938.
- Copeland, L., Blazek, J., Salman, H., & Tang, M. C. (2009). *Form and functionality of starch*. Food Hydrocoll., 23(6), 1527-1534.
- Dalmia, J., & Wadiye, G. (2020). *Review of Types and Applications of Bioplastics*. IARJSET, 7(6), 55-59.
- EUBP. (2015). EN 13432 Certified Bioplastics Performance in Industrial Composting (2015).
https://docs.european-bioplastics.org/publications/bp/EUBP_BP_En_13432.pdf
- European bioplastics. (2024). *Bioplastics Market Development Update 2024*.
https://docs.european-bioplastics.org/publications/market_data/2024/EUBP_Market_Data_Report_2024.pdf
- Ferreira, J. A., Agnihotri, S., & Taherzadeh, M. J. (2019). *Waste biorefinery. In Sustainable resource recovery and zero waste approaches* (pp. 35-52). Elsevier.
- Filiciotto, L., & Rothenberg, G. (2021). *Biodegradable plastics: standards, policies, and impacts*. ChemSusChem, 14(1), 56-72.
- Fredi, G., & Dorigato, A. (2021). *Recycling of bioplastic waste: A review*. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 4(3), 159-177.
- Future Market Insights Global and Consulting. (2025). *Biobased Biodegradable Plastic Market to Reach*

- USD 15.6 Billion by 2035 Amid Rising Demand for Sustainable Solutions.*
<https://www.globenewswire.com/news-release/2025/02/27/3033579/0/en/Biobased-Biodegradable-Plastic-Market-to-Reach-USD-15-6-Billion-by-2035-Amid-Rising-Demand-for-Sustainable-Solutions-Future-Market-Insights-Inc.html>
- Harding, K. G., Dennis, J. S., Von Blottnitz, H., & Harrison, S. T. (2007). *Environmental analysis of plastic production processes: Comparing petroleum-based polypropylene and polyethylene with biologically-based poly- ϵ -hydroxybutyric acid using life cycle analysis.* J. Biotech., 130(1), 57-66.
- Ibrahim, N. I., Shahar, F. S., Sultan, M. T. H., Shah, A. U. M., Safri, S. N. A., & Mat Yazik, M. H. (2021). *Overview of Bioplastic Introduction and Its Applications in Product Packaging.* Coatings, 11(11), 1423.
- Islam, M., Xayachak, T., Haque, N., Lau, D., Bhuiyan, M., & Pramanik, B. K. (2024). *Impact of bioplastics on environment from its production to end-of-life.* Process Safety and Environmental Protection.
- Jasthi, B., Pettit, J., & Harnack, L. (2020). Addition of gluten values to a food and nutrient database. J. Food Compos. Anal., 85, 103330.
- Jiménez-Rosado, M., Zarate-Ramírez, L. S., Romero, A., Bengoechea, C., Partal, P., & Guerrero, A. (2019). *Bioplastics based on wheat gluten processed by extrusion.* J. Clean. Prod., 239, 117994.
- Jogi, K., & Bhat, R. (2020). *Valorization of food processing wastes and by-products for bioplastic production.* Sustain. Chem. Pharm., 18, 100326.
- Kumagai. (2022). BCG (Bio-Circular-Green) economy in Thailand.
<https://www.jri.co.jp/en/MediaLibrary/file/english/periodical/vrim/2022/84.pdf>
- Moreno, P., Yañez, C., Cardozo, N. S. M., Escalante, H., Combariza, M. Y., & Guzman, C. (2015). *Influence of nutritional and physicochemical variables on PHB production from raw glycerol obtained from a Colombian biodiesel plant by a wild-type Bacillus megaterium strain.* N. Biotechnol., 32(6), 682-689.
- Morris, M. I. R., & Hicks, A. L. (2022). *A human-centered review of life cycle assessments of bioplastics.* Int. J. Life Cycle Assess., 27(1), 157-172.
- Muthusamy, M. S., & Pramasivam, S. (2019). *Bioplastics—an eco-friendly alternative to petrochemical plastics.* Curr. World Environ., 14(1), 49.
- Nanda, S., Patra, B. R., Patel, R., Bakos, J., & Dalai, A. K. (2022). *Innovations in applications and prospects of bioplastics and biopolymers: A review.* Environ. Chem. Lett., 20(1), 379-395.
- Negrete-Bolagay, D., & Guerrero, V. H. (2024). *Opportunities and Challenges in the Application of Bioplastics: Perspectives from Formulation, Processing, and Performance.* Polymers, 16(18), 2561.
- Rahman, M. H., & Bhoi, P. R. (2021). *An overview of non-biodegradable bioplastics.* J. Clean. Prod., 294, 126218.
- Rosenboom, J. G., Langer, R., & Traverso, G. (2022). *Bioplastics for a circular economy.* Nat. Rev. Mater., 7(2), 117-137.

- Rujnić-Sokele, M., & Pilipović, A. (2017). *Challenges and opportunities of biodegradable plastics: A mini review*. *Waste Manag. Res.*, 35(2), 132-140.
- Saharan, R., & Kharb, J. (2022). *Exploration of Bioplastics: (A Review)*. *Orient. J. Chem.*, 38(4).
- Shah, M., Rajhans, S., Pandya, H. A., & Mankad, A. U. (2021). *Bioplastic for future: A review then and now*. *WJARR*, 9(2), 056-067.
- Thakur, R., Pristijono, P., Scarlett, C. J., Bowyer, M., Singh, S. P., & Vuong, Q. V. (2019). *Starch-based films: Major factors affecting their properties*. *Int. J. Biol. Macromol.*, 132, 1079-1089.
- Troschl, C., Meixner, K., & Drosig, B. (2017). *Cyanobacterial PHA production—review of recent advances and a summary of three years' working experience running a pilot plant*. *Bioeng.*, 4(2), 26.
- Tufail, S., Munir, S., & Jamil, N. (2017). *Variation analysis of bacterial polyhydroxyalkanoates production using saturated and unsaturated hydrocarbons*. *Braz. J. Microbiol.*, 48(4), 629-636.
- Venkatachalam, H., & Palaniswamy, R. (2020). *Bioplastic world: A review*. *J. Adv. Sci. Res.*, 11(03), 43-53.
- Waste Direct. (2025). *Plastic Waste Statistics & Trends*. <https://wastedirect.co.uk/blog/plastic-waste-statistics/>
- Yadav, D., Srivastava, A., Yadav, A., Srivastava, M., & Mehla, B. (2022). *Development and sustainability of bioplastics: A review*.
- Zhou, W., Bergsma, S., Colpa, D. I., Euverink, G. J. W., & Krooneman, J. (2023). *Polyhydroxyalkanoates (PHAs) synthesis and degradation by microbes and applications towards a circular economy*. *J. Environ. Manag.*, 341, 118033.