

การย่อยสลายพลาสติกชีวภาพภายใต้สภาวะการหมักขยะอินทรีย์และสภาวะจริง ในบ่อฝังกลบขยะ

ทิพย์อาภรณ์ บุปผาชาติ, พีระพงศ์ โภคพันธ์, สิริกร ศาสตระรุจิ, ญัฏฐาพัชร สังขนันท์, บรรพต เจียงเจริญ,
เบญจวรรณ ทองชื่นตระกูล, ธนาดี ลี้จากภัย, และ ชมณัฐชา บุญมี*

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี

* Corresponding author: chomnutch.boo@mtec.or.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันปัญหาขยะพลาสติกทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีพลาสติกจำนวนมากที่ไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของประชาชนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ พลาสติกชีวภาพจึงได้รับความสนใจในฐานะวัสดุทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ พอลิแลกติกแอซิด (PLA), พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) และพอลิบิวทิลีนอะดิפט-โค-เทเรฟทาเลต (PBAT) ภายใต้สภาวะการหมักขยะอินทรีย์แบบใช้อากาศที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลา 84 วัน และในสภาวะจริงของบ่อฝังกลบขยะเป็นระยะเวลา 365 วัน ผลการศึกษาพบว่า พลาสติกชีวภาพทั้งสามชนิดสามารถย่อยสลายได้สมบูรณ์ในระบบหมักแบบใช้อากาศ โดย PLA ย่อยสลายได้ภายใน 14 วัน ขณะที่ PBS และ PBAT ใช้เวลา 84 วัน ในทางตรงกันข้าม ภายใต้สภาวะบ่อฝังกลบขยะพบว่าเฉพาะ PLA เท่านั้นที่สามารถย่อยสลายได้สมบูรณ์ภายใน 365 วัน ขณะที่ PBS และ PBAT ย่อยสลายได้เพียงร้อยละ 11 จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพลาสติกชีวภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว ได้แก่ ความขรุขระ รอยแตก และการเกาะติดของจุลินทรีย์ ซึ่งบ่งชี้ถึงกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพที่เกิดขึ้น

ข้อมูลจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนและพัฒนาการจัดการขยะพลาสติกชีวภาพอย่างยั่งยืนในประเทศไทย

คำสำคัญ: พลาสติกชีวภาพ / ขยะอินทรีย์ / การย่อยสลาย / บ่อฝังกลบขยะ / จุลินทรีย์

Biodegradation of Biodegradable Plastics under Organic Waste Composting and Landfill Conditions

Tiparporn Bubpachat, Peeraphong Pokphat, Sirikorn Sastraruji, Natthaphat Sangkanan,
Banphot Jiangchareon, Benjawan Thongchuentrakool, Thanawadee Leejarkpai, and
Chomnutcha Boonmee*

¹National Metal and Materials Technology Center, National Science and Technology Development Agency (NSTDA),
Khlong Nueng, Khlong Luang, Pathum Thani

*Corresponding author: Chomnutcha.boon@mttc.or.th

Abstract

The global accumulation of plastic waste continues to rise annually, with a substantial proportion being improperly disposed of, resulting in severe environmental degradation and negative impacts on public health. Biodegradable plastics have emerged as a promising alternative to conventional plastics, offering a sustainable solution for mitigating plastic pollution. This study aims to evaluate the biodegradation behavior of three types of bioplastics—polylactic acid (PLA), polybutylene succinate (PBS), and polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT)—under two distinct conditions: (1) simulated industrial-scale aerobic composting at elevated temperature over 84 days, and (2) real landfill conditions over a 365-day period. The results revealed that all three bioplastics underwent complete degradation under composting conditions. PLA fully degraded within 14 days, while PBS and PBAT achieved complete biodegradation within 84 days. In contrast, the landfill environment significantly slowed down the degradation process. PLA was the only material that completely degraded within 365 days under landfill conditions, whereas PBS and PBAT showed only approximately 11% degradation during the same period. Surface morphology analysis using scanning electron microscopy (SEM) indicated increased surface roughness, the presence of cracks, and microbial colonization on the residual bioplastics, confirming the occurrence of biodegradation.

These findings provide valuable insights for the development of bioplastic materials and offer guidance for the effective management of biodegradable plastic waste in Thailand, contributing to more sustainable environmental practices.

Keywords: Biodegradable plastics / Organic waste / Degradation / Landfill / Microorganisms

1. บทนำ

พลาสติกเป็นวัสดุที่มีความสำคัญและมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีคุณลักษณะเฉพาะที่สอดคล้องกับความต้องการในการใช้งานในหลากหลายบริบท อาทิ น้ำหนักเบา ความคงทนต่อสภาพแวดล้อม ความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อน การดูแลรักษาที่ไม่ยุ่งยาก มีความเป็นพิษต่ำ ความโปร่งใสของวัสดุ ตลอดจนมีต้นทุนในการผลิตที่ไม่สูงมากนัก คุณสมบัติเหล่านี้ส่งผลให้พลาสติกสามารถประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในภาคอุตสาหกรรม ภาคพาณิชย์กรรม และภาคเกษตรกรรม ทั้งในรูปแบบของวัสดุสำหรับบรรจุภัณฑ์ ชิ้นส่วนประกอบเครื่องจักร รวมถึงผลิตภัณฑ์เพื่อการอุปโภคและบริโภคในชีวิตประจำวัน [1] โดยพลาสติกที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือบรรจุภัณฑ์ เช่น ถุงพลาสติก ขวด และบรรจุภัณฑ์อาหาร พลาสติกทั่วไปส่วนใหญ่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น พอลิเอทิลีน (PE) พอลิโพรพิลีน (PP) พอลิสไตรีน (PS) พอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) และพอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) [2] จากข้อมูลพบว่า ร้อยละ 76 ของขยะพลาสติกที่ถูกผลิตขึ้นทั่วโลก สามารถจำแนกกระบวนการจัดการได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ การรีไซเคิลร้อยละ 14 การเผาทำลายร้อยละ 14 และการฝังกลบหรือปล่อยทิ้งในสิ่งแวดล้อม คิดเป็นสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 72 สะท้อนถึงการบริหารจัดการขยะพลาสติกในระดับโลก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการจัดการที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดลอมและสุขภาพของมนุษย์ในระยะยาว [1] พลาสติกเหล่านี้ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากย่อยสลายได้ยากและยังคงสะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมหลังจากถูกกำจัดทิ้งไปแล้ว โดยขยะพลาสติกจะสลายตัวด้วยแรงธรรมชาติต่างๆ เช่น การเสียดสีทางกล การย่อยสลายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) การเกิดออกซิเดชัน และการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยสลายตัวเป็นชิ้นเล็กๆ ชิ้นส่วนพลาสติกขนาดเล็กกว่า 5 มิลลิเมตร หรือเรียกว่า ไมโครพลาสติก (MPs) [3] จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น จึงมีการนำพลาสติกชีวภาพมาใช้ทดแทนพลาสติกทั่วไปในบางผลิตภัณฑ์ เนื่องจากพลาสติกชีวภาพถูกผลิตมาจากวัสดุธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้ภายในระยะเวลาไม่นานและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หรือพลาสติกชีวภาพ เป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแทนพลาสติกที่ทำจากปิโตรเลียม สามารถบรรเทาปัญหาสิ่งแวดล้อมและปัญหาการกำจัดขยะพลาสติกได้ ได้แก่ พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHA) พอลิโพรพิโอแล็กไทน์ (PPL) และพอลิแลคติกแอซิด (PLA) ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในฟิล์มเกษตร ถุงปุ๋ยหมัก ผ้าพอลิเอสเตอร์ วัสดุบรรจุภัณฑ์ และเรซินที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพอื่นๆ [4] พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการแก้ไขปัญหาขยะพลาสติกและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม พลาสติกเหล่านี้สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่ได้จากทรัพยากรหมุนเวียน เช่น พืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก [5] ซึ่งไม่เพียงช่วยลดการพึ่งพาปิโตรเลียมเท่านั้น แต่ยังมีส่วนในการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตและย่อยสลายเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกทั่วไป ตัวอย่างเช่น พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (PHA) และกรดแลคติก (วัตถุดิบสำหรับ PLA) สามารถผลิตได้โดยกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพแบบหมักโดยใช้ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรและจุลินทรีย์ [2] ในความเป็นจริงแม้พลาสติกชีวภาพจะถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แต่อัตราการย่อยสลายนั้นแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุและเงื่อนไขของสภาพแวดล้อมภายนอก ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการย่อยสลาย ได้แก่ ประเภทของไบโอพอลิเมอร์ที่ใช้เป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งแต่ละชนิดมีโครงสร้างโมเลกุลแตกต่างกัน ส่งผลต่อความสามารถในการถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ ยิ่งไปกว่านั้น พลาสติกชีวภาพบางชนิดไม่ได้ประกอบด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพเพียงอย่างเดียว แต่ยังมีสารเติมแต่งต่างๆ เช่น สารเติมแต่งหรือวัสดุผสมอื่น ๆ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติเฉพาะด้าน เช่น ความเหนียว ความแข็งแรง หรือความสามารถในการขึ้นรูป ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้อาจส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายช้าลง หรือเปลี่ยนแปลงกลไกของการย่อยสลายไปจากที่คาดการณ์ไว้ภายใต้สภาวะธรรมชาติ [5] แม้ว่าการรีไซเคิลและการนำพลังงานความร้อนกลับมาใช้จากขยะพลาสติกจะเป็นแนวทางสำคัญในการลดปริมาณขยะและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม แต่กระบวนการเหล่านี้ยังคงมีข้อจำกัดอยู่มาก

โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา ซึ่งมักประสบปัญหาด้านการขาดแคลนทรัพยากรทั้งทางเทคนิคและเศรษฐกิจ ด้วยเหตุนี้พลาสติกจำนวนมากที่หมดอายุการใช้งานจึงถูกกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบในบ่อฝังกลบขยะ หรือทิ้งไว้ในพื้นที่รองรับขยะที่ไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสม [6] คาดว่าภายในปี พ.ศ. 2593 ขยะพลาสติก 12 พันล้านตัน จะถูกทิ้งในสภาพแวดล้อมธรรมชาติหรือหลุมฝังกลบขยะ [4] จากรายงานวิจัยหลายฉบับ พบว่าพลาสติกชีวภาพบางชนิด มีอัตราการสลายตัวที่ช้ากว่าที่คาดไว้เมื่อนำไปทิ้งในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ จึงทำให้เกิดความกังวลเกี่ยวกับผลกระทบจากการกำจัดพลาสติกชีวภาพในลักษณะที่ไม่เหมาะสมเมื่อหมดอายุการใช้งาน [5] โดยการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพในสภาวะที่ควบคุมที่เหมาะสม เช่น ในกระบวนการทำปุ๋ยหมักที่มีอุณหภูมิสูงและมีจุลินทรีย์เฉพาะกลุ่มที่ทำหน้าที่ย่อยสลายวัสดุได้อย่างรวดเร็ว [4]

ดังนั้นการศึกษาวิธีการกำจัดขยะพลาสติกชีวภาพในสภาวะที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ ทีมวิจัยจึงได้ทำการศึกษาการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ 3 ชนิด ได้แก่ พอลิแลคติกแอซิด (PLA), พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) และพอลิบิวทิลีนอะดิפט-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) ภายใต้สภาวะการหมักขยะอินทรีย์แบบใช้อากาศที่อุณหภูมิสูงและในสภาวะจริงในบ่อฝังกลบขยะ เพื่อรองรับการจัดการขยะพลาสติกชีวภาพในบ่อฝังกลบขยะ ซึ่งเป็นวิธีการกำจัดขยะหลักของประเทศไทย การศึกษาการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพจึงมีความสำคัญเพื่อสนับสนุนการใช้งานพลาสติกชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งเป็นการช่วยประเมินผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและการจัดการหลังการใช้ โดยทีมวิจัยคาดหวังว่า ผลการศึกษานี้จะช่วยในการจัดการขยะพลาสติกชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน รวมทั้งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในระยะยาว

2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อเปรียบเทียบอัตราและประสิทธิภาพการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพทั้งสามชนิดใน 2 สภาวะที่แตกต่างกัน
2. เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของพลาสติกชีวภาพหลังการย่อยสลายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
3. เพื่อเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้ข้อมูลในการพัฒนาสูตรการผลิตและการจัดการขยะพลาสติกชีวภาพในประเทศไทยอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

3. ขอบเขตของการศึกษา

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาพฤติกรรมการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ ภายใต้สภาวะการหมักขยะอินทรีย์และสภาวะจริงในบ่อฝังกลบขยะ โดยมีขอบเขตการศึกษาดังนี้

1. พลาสติกชีวภาพที่ใช้ คือ พอลิแลคติกแอซิด (PLA) พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS) และพอลิบิวทิลีนอะดิפט-โค-เทเรพทาเลต (PBAT) ซึ่งเป็นชนิดที่ได้รับการใช้งานแพร่หลายในผลิตภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้
2. สภาวะที่ใช้ในการทดสอบการย่อยสลาย คือ สภาวะเลียนแบบระบบหมักขยะอินทรีย์แบบใช้อากาศในระดับอุตสาหกรรม ที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลา 84 วัน ซึ่งเป็นการทดสอบที่ยอมรับในระดับสากล และสภาวะจริงในบ่อฝังกลบขยะเป็นเวลา 365 วัน ซึ่งเป็นการจัดการขยะหลักของประเทศไทย
3. ประเมินผลการย่อยสลายโดยคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายจากน้ำหนักที่หายไป และติดตามตรวจสอบพื้นผิวของพลาสติกชีวภาพระหว่างการทดสอบการย่อยสลายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

4. วิธีการศึกษา

4.1 การเตรียมพลาสติกชีวภาพ

นำเม็ดพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด ประกอบด้วย PLA, PBS และ PBAT ไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่น ด้วยการใช้เครื่องรีด (Cast sheet extrusion machine) (รุ่น LR 8906-02F บริษัท HAAKE, Germany) แผ่นพลาสติกชีวภาพที่ผ่านการขึ้นรูปจะถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติ โดยนำไปอบในตู้อบ (FED 720, Binder, Tuttlingen, Germany) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง จนน้ำหนักคงที่เพื่อวิเคราะห์ปริมาณความชื้นของตัวอย่าง (% moisture content) และปริมาณของแข็งทั้งหมดของตัวอย่าง (% total dry solids) จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์ค่าปริมาณของแข็งที่ระเหยได้ของตัวอย่าง (% Volatile solids) วิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธีเจลดาทาลโดยใช้เครื่องกลั่นวิเคราะห์ไนโตรเจน Vapodest 45s, C. Gerhardt GmbH & Co. KG, Königswinter, Germany) รวมถึงวัดค่าความหนาของตัวอย่างโดยใช้เครื่องวัดความหนาฟิล์ม (Film master model, Alfa Mirage Co., Ltd., Osaka, Japan) ตัวอย่างแผ่นพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด ให้มีขนาด 5 x 5 ตารางเซนติเมตร เก็บตัวอย่างในตู้ดูดความชื้นก่อนนำมาทำการศึกษการย่อยสลายทางชีวภาพ

4.2 การศึกษการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในระบบหมักขยะอินทรีย์

ศึกษการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในระบบหมักขยะอินทรีย์ โดยเตรียมวัสดุหมักและควบคุมสภาวะทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 16929: 2021 [7] นำตัวอย่างพลาสติกฝังลงในขยะอินทรีย์ บรรจุลงในห้องควบคุมอุณหภูมิ เป็นเวลา 84 วัน (1 รอบของการทดสอบการย่อยสลายในระบบหมักขยะอินทรีย์) ติดตามอุณหภูมิการหมักตลอดการศึกษาด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) เก็บตัวอย่างพลาสติกที่ผ่านการย่อยสลายในระบบหมักขยะอินทรีย์เป็นเวลา 7 14 21 28 42 56 70 และ 84 วัน มาล้างและกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ติดมากับตัวอย่าง จากนั้นนำตัวอย่างไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ นำค่าน้ำหนักมาคำนวณหาค่าร้อยละการย่อยสลาย ตามสมการที่ 1 พร้อมถ่ายรูปเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของชิ้นพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงไป เก็บตัวอย่างปุ๋ยหมักที่ได้หลังจบการศึกษาที่ 84 วัน มาวิเคราะห์สมบัติหลังผ่านการหมักในระบบหมักขยะอินทรีย์

$$\text{ร้อยละการย่อยสลาย} = \frac{(W_i - W_f)}{W_i} \times 100 \quad (1)$$

โดย W_i คือค่าน้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง หน่วยเป็นกรัม และ W_f คือค่าน้ำหนักของตัวอย่างที่เหลือหลังจากการย่อยสลายในแต่ละช่วงเวลา หน่วยเป็นกรัม

4.3 การศึกษการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในระบบฝังกลบขยะ

ศึกษการย่อยสลายการพลาสติกชีวภาพในระบบฝังกลบขยะในบ่อฝังกลบขยะชุมชน จังหวัดสุพรรณบุรี โดยนำตัวอย่างพลาสติกฝังลงในบ่อฝังกลบขยะที่ระดับความลึกประมาณ 2 เมตร จากพื้นดิน เป็นระยะเวลา 365 วัน (1 ปี) ติดตามอุณหภูมิในบ่อฝังกลบขยะตลอดการศึกษาด้วยเครื่องบันทึกข้อมูล (Data logger) เก็บตัวอย่างพลาสติกที่ 90 180 270 และ 365 วัน และนำตัวอย่างที่เก็บได้มาล้างและกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ติดมากับตัวอย่าง จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ นำค่าน้ำหนักมาคำนวณหาค่าร้อยละการย่อยสลาย ตามสมการที่ 1 เช่นเดียวกับข้อ 4.2 พร้อมถ่ายรูปเพื่อศึกษาลักษณะสันฐานวิทยาของชิ้นพลาสติกที่เปลี่ยนแปลงไป

4.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผิวพลาสติกหลังผ่านการย่อยสลายทางชีวภาพ

ศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของตัวอย่างพลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดหลังผ่านการศึกษาการย่อยสลายในระบบหมักขยะอินทรีย์และระบบฝังกลบขยะ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (Hitachi 3400N) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า บันทึกภาพและผลการศึกษาที่ได้

4.5 สถิติที่ใช้ในการศึกษา

ผลการศึกษากำหนดเสนอในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean $\pm$ SD) ดำเนินการในโปรแกรม Microsoft Excel 2019 โดยใช้ฟังก์ชัน AVERAGE และ STDEV

5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

5.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสติกชีวภาพ

คุณสมบัติของพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด แสดงในตารางที่ 1 โดยพลาสติกทั้ง 3 ชนิด มีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (%) รวมถึงค่าปริมาณของแข็งที่ระเหยได้ (%) ของตัวอย่าง สูงใกล้เคียงกันที่ 99% แสดงให้เห็นว่าพลาสติกที่นำมาศึกษาในการศึกษาครั้งนี้ มีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์ที่เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จะเกิดการสลายตัวไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ไม่พบปริมาณไนโตรเจนในพลาสติกทั้ง 3 ชนิด เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเจลาตล ค่าความหนาของแผ่นพลาสติกที่เตรียมได้มีค่าสม่ำเสมอตลอดทั้งแผ่นและมีค่าความหนาค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยพลาสติกชีวภาพชนิด PBS และ PBAT มีความหนากว่าพลาสติกชีวภาพชนิด PLA เล็กน้อย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของพลาสติกชีวภาพชนิด PLA PBS และ PBAT ที่ใช้ในการศึกษา

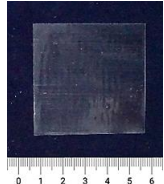
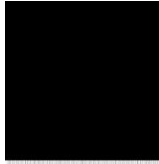
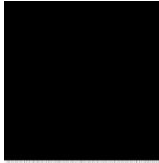
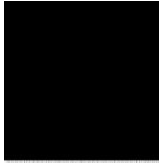
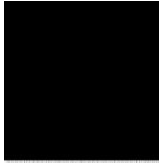
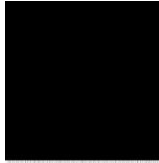
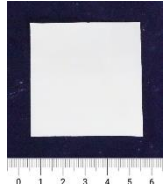
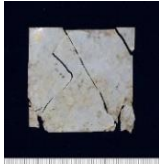
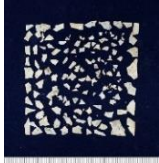
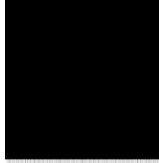
คุณสมบัติ	PLA	PBS	PBAT
ค่าความชื้น (%)	0.47 $\pm$ 0.02	0.39 $\pm$ 0.06	0.35 $\pm$ 0.01
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (%)	99.53 $\pm$ 0.02	99.61 $\pm$ 0.06	99.65 $\pm$ 0.01
ปริมาณของแข็งที่ระเหยได้ (%)	99.94 $\pm$ 0.02	99.93 $\pm$ 0.01	99.94 $\pm$ 0.01
ปริมาณไนโตรเจน (%)	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00	0.00 $\pm$ 0.00
ความหนาเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	0.113 $\pm$ 0.003	0.146 $\pm$ 0.002	0.168 $\pm$ 0.005

5.2 ผลการศึกษาการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในระบบหมักขยะอินทรีย์

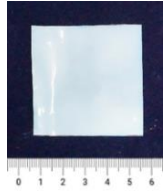
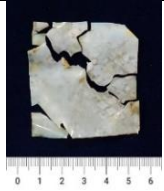
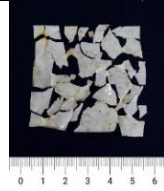
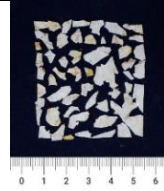
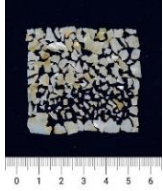
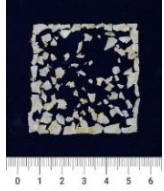
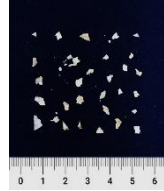
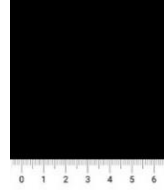
ลักษณะทางกายภาพของชิ้นพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด ที่คงเหลืออยู่ในระบบหลังผ่านการหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ที่เวลาต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2 ผลการศึกษาในวันที่ 7 พบว่า PLA เกิดการแตกหักเป็นชิ้นเล็กชิ้นน้อยอย่างชัดเจน ชิ้นพลาสติกมีความเปราะบางมาก มีการเปลี่ยนแปลงของสีจากโปร่งใสเป็นสีขาวขุ่น ส่วน PBS เริ่มเกิดการแตกหักออกเป็นชิ้น ในขณะที่ PBAT เกิดการบิดงอและพบรอยแตกเล็กน้อยบริเวณขอบของชิ้นพลาสติก การแตกหักออกเป็นชิ้นของ PBS และ PBAT จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาการหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ โดยในวันที่ 70 ของการศึกษาพบชิ้นส่วนขนาดเล็กของ PBS และ PBAT ที่มีความเปราะบางแตกหักง่าย และไม่พบชิ้นส่วนพลาสติกชีวภาพทั้ง 2 ชนิดนี้ในระบบเมื่อสิ้นสุดการศึกษาที่ 84 วัน

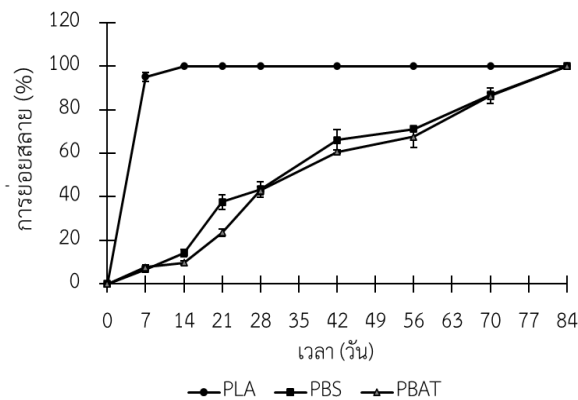
ชิ้นพลาสติกชีวภาพที่เหลือในระบบในแต่ละช่วงเวลาถูกนำมาชั่งน้ำหนักและคำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 1 ผลการศึกษาพบว่า พลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด เกิดการย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ (100%) ในระบบหมักขยะอินทรีย์เป็นเวลา 84 วัน โดย PLA เกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว มีค่าการย่อยสลายเฉลี่ยที่ 95.06% ภายใน 7 วัน ของการหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ และเกิดการย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 14 วัน ในขณะที่ PBS และ PBAT มีค่าการย่อยสลายเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ ในช่วง 21 วันแรกของการศึกษาพบว่า PBS มีค่าการย่อยสลายสูงกว่า PBAT โดย PBS มีค่าการย่อยสลายเฉลี่ยที่ 37.65% ส่วน PBAT มีค่าการย่อยสลายเฉลี่ยที่ 23.54% หลังจากนั้นค่าการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพทั้ง 2 ชนิดนี้มีค่าใกล้เคียงกัน และเกิดการย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายในเวลา 84 วัน

ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นพลาสติกชีวภาพชนิด PLA PBS และ PBAT ก่อนการย่อยสลายและหลังการย่อยสลายในระบบหมักขยะอินทรีย์

ก่อนการย่อยสลาย	หลังการย่อยสลายในระบบหมักขยะอินทรีย์ที่เวลาต่างๆ			
 PLA	 7 วัน	 14 วัน	 21 วัน	 28 วัน
	 42 วัน	 56 วัน	 70 วัน	 84 วัน
 PBS	 7 วัน	 14 วัน	 21 วัน	 28 วัน
	 42 วัน	 56 วัน	 70 วัน	 84 วัน

ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นพลาสติกชีวภาพชนิด PLA PBS และ PBAT ก่อนการย่อยสลายและหลังการย่อยสลายในระบบหมักขยะอินทรีย์ (ต่อ)

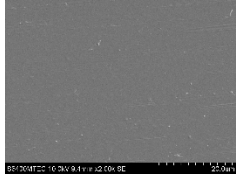
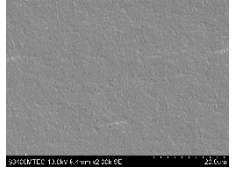
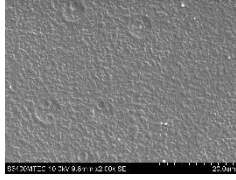
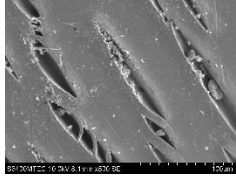
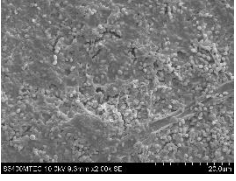
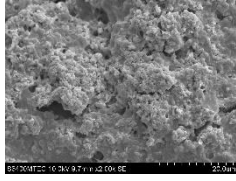
ก่อนการย่อยสลาย	หลังการย่อยสลายในระบบหมักขยะอินทรีย์ที่เวลาต่างๆ			
 PBAT	 7 วัน	 14 วัน	 21 วัน	 28 วัน
	 42 วัน	 56 วัน	 70 วัน	 84 วัน



รูปที่ 1 แสดงการย่อยสลาย (%) ของพลาสติกชีวภาพชนิด PLA PBS และ PBAT ในระบบหมักขยะอินทรีย์

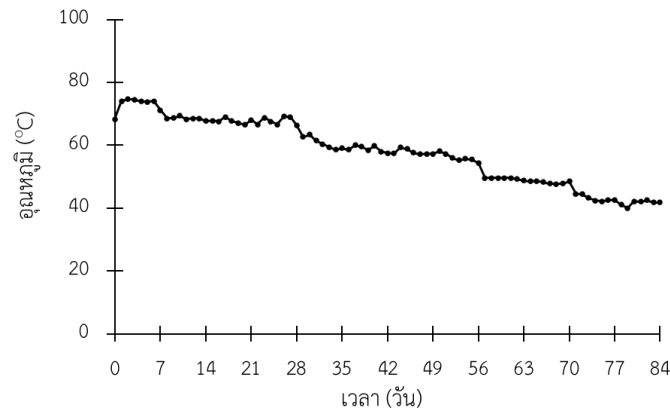
ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของตัวอย่างพลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดหลังผ่านการศึกษาการย่อยสลายในระบบหมักขยะอินทรีย์แสดงในตารางที่ 3 พบว่าพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด ก่อนการย่อยสลายจะมีลักษณะพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอ เมื่อผ่านการย่อยสลายพบว่า PLA มีรอยแตกขนาดใหญ่เกิดขึ้นบนผิวพลาสติก ส่วน PBS และ PBAT พบลักษณะพื้นผิวที่มีความขรุขระและฟูร่อน รวมถึงพบการเกาะติดของจุลินทรีย์บนผิวของพลาสติกชีวภาพทั้ง 2 ชนิดนี้ด้วย

ตารางที่ 3 การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด หลังผ่านการย่อยสลายในระบบหมักขยะอินทรีย์ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

ชนิดพลาสติกชีวภาพ	PLA	PBS	PBAT
ก่อนการย่อยสลาย			
หลังการย่อยสลาย	 7 วัน	 70 วัน	 70 วัน

ในการศึกษานี้ มีการควบคุมอุณหภูมิของระบบหมักขยะอินทรีย์ตามมาตรฐาน ISO 16929: 2021 แสดงในรูปที่ 2 โดยอุณหภูมิสูงสุดอยู่ในช่วง 68.27 – 74.71 องศาเซลเซียส ภายใน 7 วันแรกของการทดสอบ และอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 45 – 65 องศาเซลเซียส ตลอดกระบวนการหมัก ก่อนลดลงต่ำกว่า 45 องศาเซลเซียส ในช่วงท้ายของการหมักขยะอินทรีย์ (วันที่ 70–84) การควบคุมอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งเสริมการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ โดยในช่วงอุณหภูมิสูงจะมีกิจกรรมของจุลินทรีย์เทอร์โมไฟล์ และในช่วงอุณหภูมิลดลงจะเป็นบทบาทของจุลินทรีย์มีโซไฟล์ ส่งผลให้การหมักเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ อุณหภูมิที่สูงยังช่วยเร่งการย่อยสลายของ PLA เนื่องจากใกล้เคียงกับค่า glass transition temperature ของวัสดุ ทำให้ PLA แตกเปราะและถูกย่อยสลายผ่านกระบวนการ hydrolysis ได้ง่ายขึ้น พลาสติกชีวภาพชนิด PBS และ PBAT มีอัตราการย่อยสลายที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม ในช่วง 21 วันแรกของการทดสอบพบว่า PBS มีอัตราการย่อยสลายที่สูงกว่า PBAT ซึ่งอาจเนื่องมาจากความแตกต่างของโครงสร้างโมเลกุล โดย PBS มีโครงสร้างพอลิเมอร์แบบไซตรง ซึ่งสามารถถูกจุลินทรีย์เข้าถึงและย่อยสลายได้ง่ายกว่า ขณะที่ PBAT ประกอบด้วยหน่วยโครงสร้างที่เป็นวงแหวนแอโรมาติก ซึ่งมีความคงตัวสูง ทำให้ต้านทานต่อกระบวนการย่อยสลายได้มากกว่า

คุณสมบัติขยะอินทรีย์ก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักและคุณสมบัติของปุ๋ยหมักหลังผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 84 วัน แสดงในตารางที่ 4 ปุ๋ยหมักที่ได้จากกระบวนการหมักพลาสติกชีวภาพร่วมกับขยะอินทรีย์เป็นเวลา 84 วัน มีคุณสมบัติเบื้องต้นอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ตามข้อกำหนดของกรมพัฒนาที่ดิน [8]



รูปที่ 2 แสดงอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้ในระหว่างกระบวนการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในระบบหมักขยะอินทรีย์

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของขยะอินทรีย์ก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักและปุ๋ยหมักที่ได้หลังผ่านกระบวนการหมักเป็นเวลา 84 วัน

คุณสมบัติ	ขยะอินทรีย์	ปุ๋ยหมัก
ค่าความชื้น (%)	72.06 ± 2.91	73.39 ± 4.33
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (%)	27.94 ± 2.91	26.61 ± 4.33
ปริมาณของแข็งที่ระเหยได้ (%)	86.56 ± 1.38	74.14 ± 1.33
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	7.52 ± 0.02	6.77 ± 0.19
ค่าการนำไฟฟ้า (dS/m)	3.45 ± 0.10	8.94 ± 0.16
ปริมาณอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (%)	38.52	32.30
ปริมาณไนโตรเจน (%)	2.92 ± 0.11	3.62 ± 0.04
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio)	13.19	8.92

5.3 ผลการศึกษาการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในระบบฝังกลบขยะ

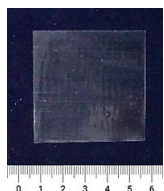
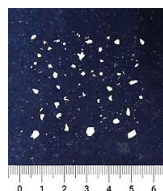
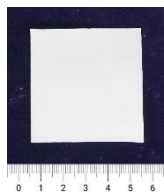
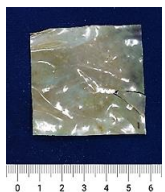
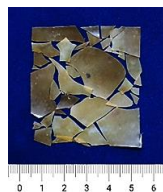
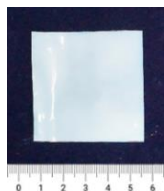
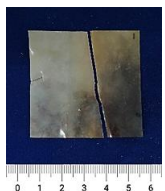
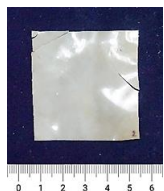
ตารางที่ 5 แสดงลักษณะทางกายภาพของพลาสติกชีวภาพชนิด PLA PBS และ PBAT ทั้งก่อนและหลังการย่อยสลายภายใต้สภาวะบ่อฝังกลบขยะเป็นระยะเวลา 365 วัน ส่วน รูปที่ 3 แสดงเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด จากผลการศึกษาพบว่า PLA เป็นพลาสติกชีวภาพเพียงชนิดเดียวที่สามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ โดยช่วง 90 วันแรก พบว่าทั้ง 3 ชนิด เริ่มเกิดการย่อยสลายเพียงเล็กน้อย เมื่อทำการทดสอบจนถึงวันที่ 180 พบว่า PLA แสดงค่าการย่อยสลายเฉลี่ยสูงถึง 82.09% พร้อมกับการแตกออกเป็นชิ้นขนาดเล็ก ในขณะที่ PBS และ PBAT ยังคงมีค่าการย่อยสลายต่ำกว่า 5% ในช่วงเวลาเดียวกัน

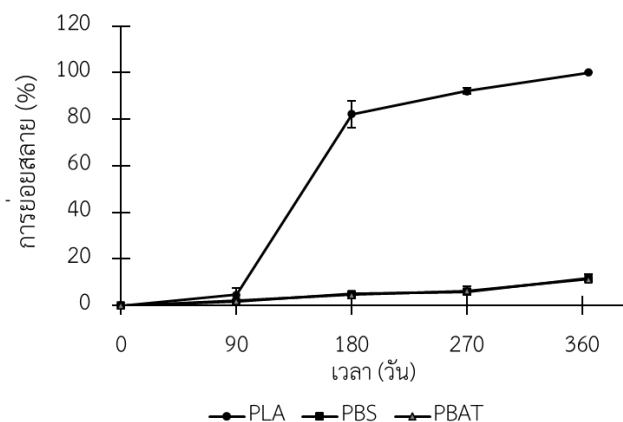
เมื่อเพิ่มระยะเวลาการฝังกลบเป็น 270 วัน พบว่า PLA เหลือชิ้นส่วนเพียงเล็กน้อย และไม่พบชิ้นส่วนเหลืออยู่เลยภายหลังจากครบ 365 วัน แสดงถึงการย่อยสลายที่สมบูรณ์

ส่วน PBS และ PBAT มีการแตกออกเป็นชิ้นเล็กมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป โดยเฉพาะในวันที่ 270 อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายโดยน้ำหนัก พบว่า PBS และ PBAT ยังคงมีค่าค่อนข้างต่ำอยู่ที่ 5.80% และ 6.32% ตามลำดับ และมีความเฉลี่ยสุดท้ายเท่ากันที่ประมาณ 11% ภายหลังจากครบระยะเวลา 365 วัน

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างพลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดหลังการฝังกลบ (ตารางที่ 6) พบว่า ชิ้นส่วนของ PLA ที่ยังหลงเหลือในวันที่ 270 มีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระมากขึ้น มีรูขนาดเล็กบนพื้นผิว และพบการเกาะติดของจุลินทรีย์ ซึ่งอาจเป็นชนิดที่สามารถย่อยสลาย PLA ได้ สำหรับ PBS และ PBAT ถึงแม้ว่าจะมีเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายต่ำในระบบฝังกลบขยะ แต่ยังพบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวในลักษณะขรุขระ และพบการเกาะติดของจุลินทรีย์เช่นกัน ซึ่งบ่งชี้ถึงแนวโน้มการย่อยสลายในระยะยาว

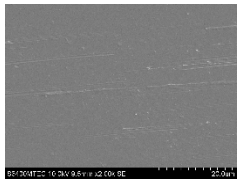
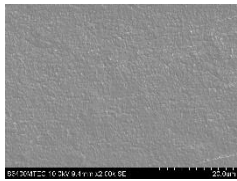
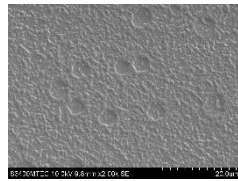
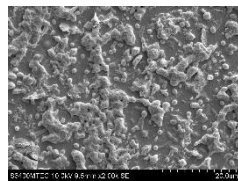
ตารางที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของชิ้นพลาสติกชีวภาพชนิด PLA PBS และ PBAT ก่อนการย่อยสลายและหลังการย่อยสลายในบ่อฝังกลบขยะ

ก่อนการย่อยสลาย	หลังการย่อยสลายในระบบหมักขยะอินทรีย์ที่เวลาต่างๆ				
 PLA	 90 วัน	 180 วัน	 270 วัน	 365 วัน	
 PBS	 90 วัน	 180 วัน	 270 วัน	 365 วัน	
 PBAT	 90 วัน	 180 วัน	 270 วัน	 365 วัน	



รูปที่ 3 แสดงเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพชนิด PLA PBS และ PBAT ในบ่อฝังกลบขยะ

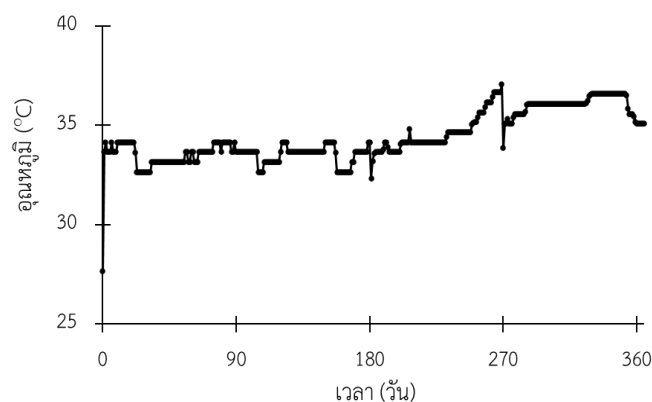
ตารางที่ 6 การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของพลาสติกชีวภาพทั้ง 3 ชนิด หลังผ่านการย่อยสลายในบ่อฝังกลบขยะ วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า

ชนิดพลาสติกชีวภาพ	PLA	PBS	PBAT
ก่อนการย่อยสลาย			
หลังการย่อยสลาย	 270 วัน	 365 วัน	 365 วัน

จากผลการศึกษาพบว่า พลาสติกชีวภาพทั้งสามชนิด สามารถย่อยสลายได้รวดเร็วและสมบูรณ์มากกว่าในระบบหมักขยะอินทรีย์เมื่อเทียบกับระบบฝังกลบขยะ โดยอัตราการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ โครงสร้างทางพอลิเมอร์ ขนาดและความหนาของวัสดุ ซึ่งมีผลต่อความแข็งแรงและความยากง่ายในการย่อยสลาย รวมถึงปัจจัยแวดล้อม เช่น แสง อุณหภูมิ ความชื้น ความร้อน และปริมาณออกซิเจนในระบบ

เมื่อเปรียบเทียบสภาวะของทั้ง 2 ระบบ พบว่า ปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อความแตกต่างของอัตราการย่อยสลาย ได้แก่ ชนิดของจุลินทรีย์, ปริมาณออกซิเจนในอากาศ, และ อุณหภูมิของระบบ โดยระบบหมักขยะอินทรีย์เป็นระบบที่ต้องการอากาศ (aerobic composting) ซึ่งอาศัยจุลินทรีย์กลุ่มใช้ออกซิเจนเป็นหลักในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และมีการกลับกองหมักเพื่อเพิ่ม

การถ่ายเทอากาศและส่งเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์ ในทางตรงกันข้าม ระบบฝังกลบขยะเป็นระบบที่เกิดภายใต้สภาวะไร้อากาศ (anaerobic conditions) ซึ่งจำกัดกิจกรรมของจุลินทรีย์บางกลุ่ม อีกทั้ง อุณหภูมิเฉลี่ยในระบบฝังกลบตลอดการศึกษาครั้งนี้อยู่ที่ 34.41 องศาเซลเซียส (แสดงในรูปที่ 4) ซึ่งต่ำกว่าระบบหมักขยะอินทรีย์ ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายของพลาสติกทั้งสามชนิดนี้เกิดขึ้นได้ช้ากว่าในระบบหมักขยะอินทรีย์



รูปที่ 4 แสดงอุณหภูมิที่ตรวจวัดได้ในระหว่างกระบวนการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในระบบฝังกลบขยะ

6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพชนิด PLA PBS และ PBAT ภายใต้ 2 ระบบ ได้แก่ ระบบหมักขยะอินทรีย์และระบบฝังกลบขยะ โดยใช้ระยะเวลาการศึกษา 84 วัน สำหรับระบบหมักขยะอินทรีย์ และ 365 วัน สำหรับระบบฝังกลบขยะ ผลการศึกษาพบว่า พลาสติกชีวภาพทั้งสามชนิดสามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ภายใน 84 วัน ในระบบหมักขยะอินทรีย์ โดย PLA ย่อยสลายเร็วที่สุด (95.06% ภายใน 7 วัน และสมบูรณ์ใน 14 วัน) ส่วน PBS และ PBAT ย่อยสลายได้ช้ากว่า โดย PBS มีอัตราการย่อยสลายสูงกว่า PBAT ในช่วง 21 วันแรก และทั้ง 2 ชนิด ย่อยสลายได้สมบูรณ์ในระยะเวลา 84 วัน เช่นกัน การศึกษาการย่อยสลายภายใต้สภาวะฝังกลบขยะพบว่า PLA เป็นพลาสติกชีวภาพเพียงชนิดเดียวที่สามารถย่อยสลายได้สมบูรณ์ภายใน 365 วัน โดยมีการแตกออกเป็นชิ้นเล็ก มีอัตราการย่อยสลายเฉลี่ยสูงถึง 82.09% ในวันที่ 180 และไม่พบชิ้นส่วนหลงเหลือในวันสุดท้ายของการศึกษา ขณะที่ PBS และ PBAT มีการย่อยสลายเพียงเล็กน้อยตลอดช่วงการศึกษา โดยมีค่าการย่อยสลายเฉลี่ยสุดท้ายอยู่ที่ประมาณ 11% การควบคุมอุณหภูมิตามมาตรฐาน ISO 16929: 2021 ในระบบหมักขยะอินทรีย์ มีบทบาทสำคัญต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ โดยอุณหภูมิที่สูงในช่วงต้นกระตุ้นจุลินทรีย์เทอร์โมไฟล์ และอุณหภูมิที่ลดต่ำลงในช่วงท้ายส่งเสริมกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์มีโซไฟล์ ทำให้การย่อยสลายขยะอินทรีย์รวมถึงพลาสติกชีวภาพเกิดได้อย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- [1] Ali, S. S., Elsamahy, T., Koutra, E., Kornaros, M., El-Sheekh, M., Abdelkarim, E. A., ... & Sun, J. (2021). Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *Science of the Total Environment*, 771, 144719.
- [2] Tokiwa, Y., Calabia, B. P., Ugwu, C. U., & Aiba, S. (2009). Biodegradability of plastics. *International journal of molecular sciences*, 10(9), 3722-3742.
- [3] Qin, M., Chen, C., Song, B., Shen, M., Cao, W., Yang, H., ... & Gong, J. (2021). A review of biodegradable plastics to biodegradable microplastics: another ecological threat to soil environments?. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127816.
- [4] Sun, Y., Shaheen, S. M., Ali, E. F., Abdelrahman, H., Sarkar, B., Song, H., ... & Wang, Q. (2022). Enhancing microplastics biodegradation during composting using livestock manure biochar. *Environmental Pollution*, 306, 119339.
- [5] Ahsan, W. A., Hussain, A., Lin, C., & Nguyen, M. K. (2023). Biodegradation of different types of bioplastics through composting—a recent trend in green recycling. *Catalysts*, 13(2), 294.
- [6] Xochitl, Q. P., María del Consuelo, H. B., María del Consuelo, M. S., Rosa María, E. V., & Alethia, V. M. (2021). Degradation of plastics in simulated landfill conditions. *Polymers*, 13(7), 1014.
- [7] ISO 16929:2021 Plastics — Determination of the degree of disintegration of plastic materials under defined composting conditions in a pilot-scale test.
- [8] กรมพัฒนาที่ดิน. มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ (ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูง), 19 มกราคม 2568.
http://www1.ddd.go.th/Ldd/Fertilizer/Organic_Fertilizer.pdf