การย่อยสลายพลาสติก PBAT ในระหว่างกระบวนการทำปุ๋ยหมัก

Degradation of PBAT plastics during the composting process

สุทธยศ ยิ้มพูลทรัพย์

หลักสูตรวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนครศรีอยุธยา พระนครศรีอยุธยา 13000

Suttayot Yimpoolsap

Division of Environmental Science, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University,

Phranakhon Si Ayutthaya 13000

Corresponding author: s.yimpoolsap@gmail.com

Received: 10 January 2025/ Revised: 25 April 2025/ Accepted: 28 April 2025

บทคัดย่อ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการย่อยสลายพลาสติก polybutylene adipate-co-terephthalate (PBAT) ในระหว่างกระบวนการทำปุ๋ยหมักมูลโคนมร่วมกับขุยมะพร้าว ผลการศึกษาพบว่าพลาสติก PBAT สามารถย่อยสลายได้ในระหว่างกระบวนการทำปุ๋ยหมักที่มีสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) และความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 26.24% และ 62.27% ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการหมัก 42 วัน โดยชุดทดลองที่ 1 (P) และชุดทดลองที่ 2 (P+EM) มีน้ำหนักของพลาสติก PBAT ที่สูญหายไปในระหว่างกระบวนการหมัก 17.10% และ 19.12% ตามลำดับ โดยการย่อยสลายพลาสติก PBAT เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 0 – 7 ของการศึกษา และมีแนวโน้มการย่อยสลายในอัตราที่คงที่ในช่วงวันที่ 7 – 42 ของการศึกษา ซึ่งในช่วงวันที่ 7 – 42 ชุดทดลองที่ 2 (P+EM) ย่อยสลาย (%) 0.2695/วัน สูงกว่าชุดทดลองที่ 1 (P) ที่ย่อยสลาย (%) 0.1954/วัน นอกจากนี้ยังพบว่าปุ๋ยหมักที่ได้จากการทดสอบการย่อยสลายพลาสติก PBAT ทั้งสองชุดการทดลองมีค่า pH, ไนโตรเจนทั้งหมด (TKN), โพแทสเซียมทั้งหมด (Total K) และดัชนีการงอกของเมล็ด (ข้าวพันธุ์ กข.81 และถั่วเขียว) อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร

คำสำคัญ: การย่อยสลายทางชีวภาพ พลาสติก PBAT ปุ๋ยหมัก

Abstract

The study investigated to the degradation of polybutylene adipate terephthalate (PBAT) during the composting process with cow manure and coconut coir. The results showed that PBAT was degradable during the composting process given the carbon to nitrogen ratio (C/N ratio) and the average initial moisture content of 26.24 and 62.27 percent, respectively and the fermentation period was 42 days. The experiment 1 (P) and experiment 2 (P + EM) have 17.10 and 19.12 percent of the weight of PBAT lost during the fermentation process, respectively. PBAT degraded rapidly during days 0 – 7 of the study and tended to degrade at a constant rate during days 7 – 42 of the study. The experiment 2 (P + EM) had a degradation

rate of 0.2695 % per day, higher than the experimental 1 (P), which had a degradation rate of 0.1954 % per day. Both sets of experiments had pH, total nitrogen (TKN), Total Potassium (Total K) and the gemination index (such as 81 Rice RD and mung bean) was within the organic fertilizer standards of the Department of Agriculture.

Keywords: Biodegradation, PBAT plastic, Composting

บทนำ

ปี พ.ศ. 2566 ประเทศไทยมีขยะมูลฝอยประมาณ 26.95 ล้านตัน หรือประมาณ 73,840 ตันต่อวัน (เฉลี่ย 1.12 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน) ซึ่งปริมาณขยะมูลฝอยเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2565 ประมาณร้อยละ 5 เนื่องจากปี พ.ศ. 2566 ที่ผ่านมาประเทศไทยได้กลับเข้าสู่ภาวะปกติหลังจากสถานการณ์แพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 และได้เปิดประเทศเพื่อรองรับนักท่องเที่ยว แรงงาน และการลงทุน ซึ่งเป็นการกระตุ้นเศรษฐกิจ นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมการผลิตและการบริโภคของประชาชนที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก โดยเฉพาะพฤติกรรมการสั่งสินค้าและอาหารออนไลน์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้มีปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้น อีกทั้งร้านค้าและร้านสะดวกซื้อหลักของประเทศได้ผ่อนคลายมาตรการงดการใช้พลาสติกประเภทใช้ครั้งเดียวทำให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก [1]

ปัจจุบันการใช้พลาสติกที่เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณขยะพลาสติกเพิ่มขึ้นเป็นเงาตามตัว แต่เนื่องจากพลาสติกมีคุณสมบัติที่ยากต่อการสลายตัวและเสื่อมสภาพ ทำให้ขยะมูลฝอยประเภทพลาสติกคงอยู่ในสภาพแวดล้อมได้นานและก่อปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา ซึ่งอาจปนเปื้อนในห่วงโซ่อาหารหรือเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ พลาสติกเมื่อหมดอายุการใช้งานจะแตกออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ และอาจปนเปื้อนในดินและแหล่งน้ำ หากมีการเผาจะทำให้เกิดควันพิษในอากาศหรือ CO_2 ที่เป็นสาเหตุของปัญหาโลกร้อน [2] ดังนั้นภาครัฐควรรณรงค์เพื่อลดปริมาณขยะพลาสติก โดยส่งเสริมกลไกการคัดแยกขยะพลาสติกเพื่อนำกลับมาใช้ให้มากที่สุด และเร่งกำจัดขยะพลาสติกที่ตกค้างสะสมในสถานที่กำจัดขยะ รวมถึงสนับสนุนการแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะ (Refuse Derived Fuel: RDF) หรือมีนโยบายร่วมกับผู้ประกอบการ ร้านสะดวกซื้อ ห้างสรรพสินค้าต่าง ๆ เลิกแจกถุงพลาสติกให้แก่ลูกค้า [3] รวมทั้งการสนับสนุนให้มีการนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้ทดแทนพลาสติกทางการค้าทั่วไป ตามที่รัฐบาลให้ความสำคัญกับการเร่งรัดพัฒนาประเทศด้วยการใช้โมเดลทางเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว (Bio-Circular-Green Economy: BCG) ซึ่งเป็นการพัฒนา 3 เศรษฐกิจ ได้แก่ เศรษฐกิจชีวภาพ (Bio Economy) เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และเศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy) โดยพลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) เช่น Polylactic acid (PLA), Polybutylene adipate terephthalate (PBAT), Polybutylene succinate (PBS), Polyhydroxyalkanoates (PHAs) เป็นต้น เป็นสินค้า/ผลิตภัณฑ์เป้าหมายในการพัฒนา [4]

การนำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมาใช้ทดแทนพลาสติกทางการค้าทั่วไปเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม เพราะพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพส่วนใหญ่ผลิตจากแหล่งวัตถุดิบทางการเกษตร เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด น้ำตาล เป็นต้น ด้วยกระบวนการหมักโดยใช้จุลินทรีย์ ซึ่งได้ออกแบบมาให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ทำให้สมบัติต่าง ๆ ของพลาสติกเปลี่ยนแปลงไป พลาสติกชีวภาพสามารถแบ่งประเภทได้ตามสารตั้งต้นหรือวัตถุดิบที่นำมาใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ พลาสติกชีวภาพที่ผลิตด้วยชีวมวลพืชและสัตว์ พลาสติกชีวภาพที่ผลิตโดยใช้จุลินทรีย์ เช่น PHAs, poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) เป็นต้น และพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากกระบวนการเคมีโดยเปลี่ยนน้ำตาลจากแป้งพืชเป็นกรดแลคติก เช่น PLA [5] ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น แคปซูลบรรจุยา บรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร บรรจุภัณฑ์ทั่วไป กระถางต้นไม้ ส่วนประกอบของคอมพิวเตอร์ เป็นต้น [6] ผลิตภัณฑ์ดังกล่าวเป็นลักษณะเด่นของพลาสติกชีวภาพคือ มาจากธรรมชาติ ไม่เป็นพิษ ย่อยสลายได้โดยการฝังกลบ และสามารถหาใหม่ทดแทนได้ นอกจากนี้งานวิจัยของปาณิศา ศิริบุรมย์ [7] ยังพบว่า PLA สามารถย่อยสลายได้เมื่อหมักร่วมกับเศษอาหารในสภาวะมีและไร้ออกซิเจนในช่วงเวลา 90 วัน ซึ่ง PLA เกิดการสูญเสียน้ำหนักในปริมาณและ

ความเร็วใกล้เคียงกันทั้งสองสภาวะ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลาย (K) ของสภาวะมีและไร้ออกซิเจนเท่ากับ 0.0006 และ 0.0007 ต่อสัปดาห์ตามลำดับ ซึ่งต่างจากพลาสติกที่มีแหล่งกำเนิดจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี นอกจากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มาจากสิ่งมีชีวิตแล้วยังมีพลาสติกที่ได้จากการสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของมอโนเมอร์ฐานปิโตรเลียมซึ่งสามารถแตกหรือย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น PBAT เป็นต้น [8]

PBAT เป็นพลาสติกที่ได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีแต่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และวงอะโรมาติกเป็นองค์ประกอบบนสายโซ่หลัก (Synthetic aliphatic-aromatic polyester) ทำให้มีความแข็งแรง เหนียว ขึ้นรูปได้ง่าย และมีความยืดหยุ่น มีคุณสมบัติคล้ายคลึงกับโพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low density polyethylene: LDPE) ในปัจจุบันนิยมนำ PBAT มาประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ [9] แต่ต้นทุนการผลิต PBAT และพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพอื่น ๆ มีต้นทุนในการผลิตที่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตพลาสติกสังเคราะห์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี อย่างไรก็ตามการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถือได้ว่าเป็นวัสดุที่เหมาะสมและควรนำมาใช้แทนพลาสติกทางการค้าที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไป นอกจากนี้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเมื่อถูกฝังกลบลงในดินแล้วสามารถย่อยสลายได้จนหมดภายในเวลา 6 – 12 เดือน นอกจากนี้การใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในอุตสาหกรรมส่งออกจะส่งผลให้ช่วยลดอุปสรรคในแง่ของการกีดกันทางการค้าระหว่างประเทศที่สหภาพยุโรป (EU) ได้มีมาตรการปฏิเสธบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกปิโตรเคมีได้ [10]

อย่างไรก็ตามการส่งเสริมการใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ จำเป็นต้องมีมาตรการในการจัดการขยะที่เกิดขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งขยะพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพประเภทใช้ครั้งเดียวทิ้ง หากมีปริมาณสะสมหรือตกค้างในสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมากจะก่อให้เกิดผลกระทบไม่ต่างจากขยะอินทรีย์ทั่วไป อาจเป็นสาเหตุของพาหะนำโรค รวมถึงเป็นแหล่งเกิดก๊าซเรือนกระจก ดังนั้นการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการย่อยสลายพลาสติก PBAT ในระหว่างกระบวนการทำปุ๋ยหมัก และศึกษาคุณภาพของปุ๋ยหมักที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายพลาสติก PBAT เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดระยะเวลาในการย่อยพลาสติก PBAT ในกองปุ๋ยหมัก และแนวทางจัดการพลาสติก PBAT ประเภทใช้ครั้งเดียวแล้วทิ้งต่อไปในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมปุ๋ยหมัก

การเตรียมปุ๋ยหมักที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.1 วัสดุชีวภาพสำหรับทำปุ๋ยหมักที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุชีวภาพสำหรับทำปุ๋ยหมักที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ประกอบไปด้วยมูลโคนม ขุยมะพร้าว และถุงพลาสติก PBAT มูลโคนมและขุยมะพร้าวซื้อจากร้านขายสินค้าทางการเกษตรภายในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา ส่วนพลาสติกพิจารณาใช้ถุงพลาสติก PBAT สั่งซื้อจากบริษัท ไบโอ-อีโค จำกัด ถุงพลาสติก PBAT ดังกล่าวได้รับการรับรองว่าเป็นวัสดุที่สามารถย่อยสลายได้หมดภายในระยะเวลา 12 เดือน ดังภาพที่ 1 โดยก่อนการหมักวัสดุชีวภาพ นำมูลโคนมและขุยมะพร้าวไปตากให้แห้งในที่ร่มเป็นเวลา 7 วัน เพื่อลดความชื้น หลังจากนั้นนำมูลโคนมและขุยมะพร้าวมาผสมกันให้มีน้ำหนักรวม 3 kg ประกอบด้วยมูลโคนม 2.6 kg และขุยมะพร้าว 0.4 kg

ภาพที่ 1 ถุงพลาสติก PBAT

1.2 การผสมวัสดุชีวภาพในการทำปุ๋ยหมักที่ใช้ในการศึกษา

การผสมวัสดุชีวภาพในการทำปุ๋ยหมักที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 ชุดทดลอง ได้แก่ ชุดทดลองที่ 1) ผสมมูลโคนมและขุยมะพร้าวร่วมกับพลาสติก PBAT (P) และชุดทดลองที่ 2) ผสมมูลโคนม ขุยมะพร้าว และน้ำหมักชีวภาพ EM ร่วมกับพลาสติก PBAT (P+EM) หมักวัสดุชีวภาพในแต่ละชุดทดลองเป็นเวลา 42 วัน กำหนดการกลับกองปุ๋ยทุก ๆ 4 วัน [11] โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนดังต่อไปนี้

ชุดทดลองที่ 1) ผสมมูลโคนมและขุยมะพร้าวร่วมกับพลาสติก PBAT (P)

1) ตัดถุงพลาสติก PBAT ให้มีขนาด 2 x 2 cm จำนวนรวม 1 g แล้วนำมาผสมให้เข้ากันกับมูลโคนมและขุยมะพร้าว

2) เติมน้ำกลั่นลงไป 4,500 ml แล้วบรรจุวัสดุหมักและพลาสติก PBAT ลงในถุงกระสอบขนาด 16x20 นิ้ว โดยทำทั้งหมดจำนวน 18 ถุง ดังรายละเอียดในตารางที่ 1 จากนั้นมัดปากถุงให้เรียบร้อยด้วยเชือกฟาง

3) ตรวจสอบการย่อยสลายของพลาสติก PBAT ทุก ๆ 7 วัน เป็นเวลา 42 วัน

ชุดทดลองที่ 2) ผสมมูลโคนม ขุยมะพร้าว และน้ำหมักชีวภาพ EM ร่วมกับพลาสติก PBAT (P+EM)

1) ตัดถุงพลาสติก PBAT ให้มีขนาด 2 x 2 cm จำนวน 1 g แล้วนำมาผสมให้เข้ากันกับมูลโคนมและขุยมะพร้าว

2) เติมน้ำกลั่นที่ผสมน้ำหมักชีวภาพ EM ในอัตราส่วนน้ำหมักชีวภาพ EM ต่อน้ำกลั่น 1:1,000 (V/V) ปริมาณ 4,500 ml แล้วบรรจุวัสดุหมักลงในถุงกระสอบขนาด 16 x 20 นิ้ว จำนวน 18 ถุง ดังรายละเอียดในตารางที่ 1 จากนั้นมัด ปากถุงให้เรียบร้อยด้วยเชือกฟาง

3) ตรวจสอบการย่อยสลายของพลาสติก PBAT ทุก ๆ 7 วัน เป็นเวลา 42 วัน

ตารางที่ 1 จำนวนถุงกระสอบที่บรรจุวัสดุอินทรีย์ (มูลโคนมและขุยมะพร้าว) สำหรับชุดทดลองที่ 1 (P) และ 2 (P+EM) และระยะเวลาในการหมักปุ๋ย

ลำดับที่	ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย (วัน)	จำนวนถุงกระสอบที่บรรจุวัสดุอินทรีย์ แต่ละชุดการทดลอง (ถุง)
1	7	3
2	14	3
3	21	3
4	28	3
5	35	3
6	42	3

หมายเหตุ: ชุดทดลองที่ 1 (P) หมายถึง ปุ๋ยหมัก + พลาสติก PBAT

ชุดทดลองที่ 2 (P+EM) หมายถึง ปุ๋ยหมัก + พลาสติก PBAT + น้ำหมักชีวภาพ EM

2. การตรวจสอบการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ PBAT

ชุดทดลองที่ 1 (P) และ 2 (P+EM) มีการใส่แผ่นพลาสติก PBAT ขนาด 2 × 2 cm น้ำหนักรวม 1 g ลงไปในแต่ละชุดทดลอง เมื่อครบระยะเวลาในการหมักนำตัวอย่างของแผ่นพลาสติกมาถ่ายรูปเพื่อเปรียบเทียบการย่อยสลายของแผ่นพลาสติกในแต่ช่วงเวลาในการหมัก แล้วชั่งน้ำหนักในแต่ละชุดทดลอง สำหรับการตรวจสอบการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ PBAT มีรายละเอียดและขั้นตอนดังนี้

1) การตรวจสอบการย่อยสลายของพลาสติก PBAT ในแต่ละชุดทดลองและแต่ละช่วงเวลาที่ศึกษา ให้คัดแยกพลาสติก PBAT ออกจากปุ๋ยหมักทันที จากนั้นให้นำปุ๋ยหมักมาตากให้แห้งในที่ร่มระยะเวลา 5 – 7 วัน เพื่อลดความชื้นและนำมาร่อนผ่านตะแกรงที่มีขนาดรู 4 mm และขนาดรู 2 mm ตามลำดับ เพื่อคัดแยกพลาสติก PBAT ส่วนที่เหลือในกรณีที่พลาสติกมีการแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ

2) รวบรวมพลาสติก PBAT ที่คัดแยก ในแต่ละชุดทดลองและระยะเวลาของการหมักที่กำหนดมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปตากในที่ร่มจนแห้ง จากนั้นนำไปกำจัดความชื้นในตู้ดูดความชื้นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักตัวอย่างที่คงที่ นำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณร้อยละน้ำหนักพลาสติก PBAT ที่สูญหายในแต่ละระยะเวลาในการหมักปุ๋ย ดังสมการที่ (1) [6, 12]

$$\text{น้ำหนักพลาสติกที่สูญหาย (g)} = \left(\frac{\text{น้ำหนักพลาสติกเริ่มต้น (g)} - \text{น้ำหนักพลาสติกหลังฝังกลบ (g)}}{\text{น้ำหนักพลาสติกเริ่มต้น (g)}}\right) \times 100 \quad (1)$$

3. การวิเคราะห์สมบัติปุ๋ยหมัก

วิเคราะห์สมบัติปุ๋ยหมักชุดทดลองที่ 1 (P) และ 2 (P + EM) ในวันที่ 0 และวันที่ 42 โดยเพิ่มชุดควบคุม (C) คือ ชุดทดลองที่ไม่ใส่พลาสติก PBAT และน้ำหมักชีวภาพ EM โดยกำหนดให้ดำเนินการวิเคราะห์สมบัติปุ๋ยหมัก ดังพารามิเตอร์ที่แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์สมบัติปุ๋ยหมัก

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธี	อ้างอิง
อุณหภูมิ	องศาเซลเซียส (°C)	Thermometer method	-
ความชื้น	ร้อยละ (%)	Oven – drying method	กรมวิชาการเกษตร [13]
ปริมาณอินทรียวัตถุ (OM)	ร้อยละ (%)	Walkley and Black method	กรมพัฒนาที่ดิน [14]
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	pH meter	กรมพัฒนาที่ดิน [14]
C/N ratio	-	-	-
การนำไฟฟ้า (EC)	เดซิซีเมนต่อเมตร (dS/m)	EC meter	กรมพัฒนาที่ดิน [14]
ไนโตรเจนทั้งหมด (TKN)	ร้อยละ (%)	Kjeldahl method	กรมพัฒนาที่ดิน [14]
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)	ร้อยละ (%)	Colorimetry	กรมพัฒนาที่ดิน [14]
โพแทสเซียมทั้งหมด (TK)	ร้อยละ (%)	Atomic Emission Spectroscopy (ABS)	-
การย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์	ร้อยละ (%)	วิธีการทดสอบการงอกของเมล็ดพืช	กรมพัฒนาที่ดิน [14]

4. การย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์

การตรวจวัดการย่อยสลายเสร็จสมบูรณ์ของปุ๋ยอินทรีย์เป็นวิธีที่บอกถึงคุณภาพของปุ๋ยในแง่ของความเป็นพิษต่อพืช บอกถึงสภาวะกระบวนการผลิตปุ๋ยว่าได้ออกซิเจนเพียงพอหรือขาดออกซิเจนระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ย การประเมินเสถียรภาพการย่อยสลายอินทรียวัตถุ หากมีการย่อยสลายอยู่อาจทำให้เกิดสาระสำคัญในระดับที่เป็นพิษ เช่น NH_4^+, กรดอะซิติก เป็นต้น ตกค้างในดิน ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของพืช (phytotoxicity) [15] ขั้นตอนในการตรวจวัดการย่อยสลายสมบูรณ์ของปุ๋ยอินทรีย์ ดัดแปลงจากกรมวิชาการเกษตร [14] ดังนี้

1) สกัดสารละลายปุ๋ยหมักที่ผ่านการผึ่งให้แห้งในที่ร่มจากชุดทดลองที่ 1, 2 และชุดควบคุม (C) โดยชั่งตัวอย่างปุ๋ยหมัก 1 g เติมน้ำ 10 ml (อัตราส่วน 1 : 10 w/v) เขย่าด้วยเครื่องเขย่านาน 1 ชั่วโมง

2) กรองน้ำสกัดปุ๋ยหมักใส่ในขวดปรับปริมาตร โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 42

3) ตีตารางบนกระดาษเพาะเมล็ดจำนวน 10 ช่อง แล้วนำไปวางในจานเพาะเชื้อ

4) วางเมล็ดพืชช่องละ 1 เมล็ด รวม 10 เมล็ดต่อหนึ่งจานเพาะเชื้อ จำนวน 3 ซ้ำ ใช้เมล็ดข้าวพันธุ์ กข.81 เป็นตัวแทนของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว และใช้เมล็ดถั่วเขียวเป็นตัวแทนของพืชใบเลี้ยงคู่

5) ใส่น้ำสกัดปุ๋ยหมักจานเพาะเชื้อละ 5 ml ส่วนชุดควบคุมให้ใส่น้ำกลั่นแทนการใส่น้ำสกัดปุ๋ยหมัก

6) บ่มไว้ในที่มืด 48 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิห้อง

7) เก็บรวบรวมข้อมูลดังต่อไป

7.1) ค่าเฉลี่ยจำนวนเมล็ดที่งอกทั้งหมดต่อจานเพาะเชื้อ (%)

7.2) ความยาวของรากแต่ละเมล็ดทั้ง 10 เมล็ดต่อจานเพาะเชื้อ แล้วหาค่าเฉลี่ย (cm)

8) คำนวณหาค่าดัชนีการงอกของเมล็ด (Germination index: GI) ดังสมการที่ 2

$$GI\ (\%) = \left(\frac{\text{จำนวนเมล็ดที่งอกของชุดทดลอง}\ (\%) \times \text{ความยาวรากของชุดทดลอง}\ (cm)}{\text{จำนวนเมล็ดที่งอกของชุดทดลอง}\ (\%) \times \text{ความยาวรากของชุดทดลอง}\ (cm)} \right) \text{x } 100 \qquad (2)$$

5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ความแตกต่างของการย่อยสลายพลาสติก PBAT (%) ในแต่ละชุดทดลองและแต่ละช่วงเวลาด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-way ANOVA) ที่นัยสำคัญ 0.05 และวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) ระหว่างระยะเวลาในการหมักปุ๋ย 7 – 42 วัน กับน้ำหนักพลาสติกที่สูญหาย (g) เพื่อหาอัตราการย่อยสลายพลาสติก PBAT ในช่วงเวลาดังกล่าวของแต่ละชุดทดลอง

ผลการวิจัย

1. ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน (OC) และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) ในวัสดุอินทรีย์

การศึกษาการย่อยสลายพลาสติก PBAT ในระหว่างกระบวนการทำปุ๋ยหมักครั้งนี้ใช้มูลโคนม และขุยมะพร้าวเป็นวัสดุอินทรีย์ในกระบวนการทำปุ๋ยหมัก โดยนำมูลโคนมและขุยมะพร้าวมาผสมกันให้มีน้ำหนักรวม 3 kg ประกอบด้วยมูลโคนม 2.6 kg และขุยมะพร้าว 0.4 kg ซึ่งผลการศึกษา OC และ TKN ของมูลโคนมและขุยมะพร้าว ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 OC TKN และ C/N ของมูลโคนม และขุยมะพร้าว

วัสดุอินทรีย์	OC (g/kg)	TKN (g/kg)	C/N
มูลโคนม	204.03	10.27	19.87
ขุยมะพร้าว	418.28	2.99	139.90

จากตารางที่ 3 พบว่าขุยมะพร้าวมี C/N ที่ค่อนข้างกว้างซึ่งจะทำให้เกิดการย่อยสลายที่ช้า ในขณะที่มูลโคนมมี C/N ที่แคบกว่าจะทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่า ดังนั้นในการกำหนดน้ำหนักของมูลโคนม 2,600 g : ขุยมะพร้าว 400 g ซึ่งสัดส่วนน้ำหนักดังกล่าวจะทำให้มีสัดส่วน C/N เริ่มต้นอยู่ในช่วง 25.01 - 26.24 : 1 (ตารางที่ 4) ซึ่งช่วงดังกล่าวอยู่ในช่วง 20 - 30 : 1 โดยเป็นช่วงที่เหมาะสมในการเริ่มต้นทำปุ๋ยหมัก [16]

ตารางที่ 4 C/N และความชื้นเริ่มในแต่ละชุดทดลอง

ชุดทดลอง	ความชื้นเริ่มต้น (%)	C/N เริ่มต้น
1	62.8	25.01
2	61.8	26.38

หมายเหตุ: ชุดทดลองที่ 1 (P) หมายถึง ปุ๋ยหมัก + พลาสติก PBAT

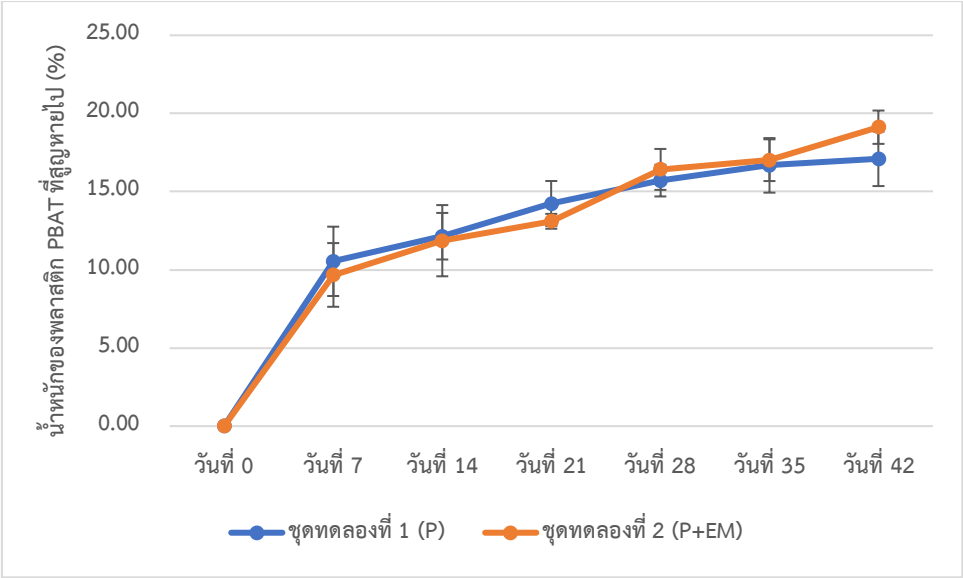
ชุดทดลองที่ 2 (P+EM) หมายถึง ปุ๋ยหมัก + พลาสติก PBAT ที่เติมน้ำหมักชีวภาพ EM

2. การย่อยสลายพลาสติก PBAT

การย่อยสลายพลาสติก PBAT ในระหว่างกระบวนการทำปุ๋ยหมักมูลโคนมร่วมกับขุยมะพร้าวที่มีค่า C/N และความชื้นเริ่มต้นอยู่ในช่วง 25.01 - 26.24 : 1 และ 61.8 - 62.8% ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการหมัก 42 วัน และกำหนดให้มีการกลับกองปุ๋ยหมักทุก ๆ 4 วัน แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดทดลอง ได้แก่ ชุดทดลองที่ 1 (P) และชุดทดลองที่ 2 (P + EM)

โดยในแต่ละชุดทดลองใส่แผ่นพลาสติก PBAT ขนาด 2 x 2 cm ที่มีน้ำหนักรวม 1.0 g ในแต่ละชุดทดลอง ผลการศึกษามีดังต่อไปนี้

ชุดทดลองที่ 2 (P+EM) มีการย่อยสลายพลาสติก PBAT ได้สูงกว่าชุดทดลองที่ 1 (P) แต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่นัยสำคัญ 0.05 (F = 0.793, P>0.05) โดยพลาสติก PBAT ทั้ง 2 ชุดทดลอง มีการย่อยสลายอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก ในระหว่างกระบวนการทำปุ๋ยหมัก ซึ่งเร็วกว่าช่วงวันที่ 7 – 42 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่นัยสำคัญ 0.05 (F = 134.13, P<0.05) โดยมีน้ำหนักลดลงเฉลี่ย 12.11% และ 11.04% ในชุดทดลองที่ 1 (P) และ 2 (P+EM) ตามลำดับ (ภาพที่ 2 ตารางที่ 5 และตารางที่ 6)



ภาพที่ 2 น้ำหนักของพลาสติก PBAT ที่สูญหายไป (%) ในระหว่างกระบวนการหมักมูลโคนมร่วมกับขุยมะพร้าวที่ระยะเวลา 0 – 42 วัน

ตารางที่ 5 น้ำหนักเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของพลาสติก PBAT ที่สูญหายไประหว่างกระบวนการหมักมูลโคนมร่วมกับขุยมะพร้าวที่ระยะเวลา 0 – 42 วัน

วันที่	น้ำหนักพลาสติกที่สูญหาย (%)	
	ชุดทดลองที่ 1 (P)	ชุดทดลองที่ 2 (P+EM)
0	0.00 (±0.00)	0.00 (±0.00)
7	10.54 (±2.22)	9.67 (±2.04)
14	12.15 (±1.49)	11.86 (±2.28)
21	14.24 (±1.44)	13.10 (±0.47)
28	15.70 (±1.01)	16.42 (±1.31)
35	16.68 (±1.74)	17.01 (±1.33)
42	17.10 (±1.75)	19.12 (±1.07)

หมายเหตุ: ชุดทดลองที่ 1 (P) หมายถึง ปุ๋ยหมัก + พลาสติก PBAT
ชุดทดลองที่ 2 (P+EM) หมายถึง ปุ๋ยหมัก + พลาสติก PBAT ที่เติมน้ำหมักชีวภาพ EM
ตัวเลขในวงเล็บ หมายถึง ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

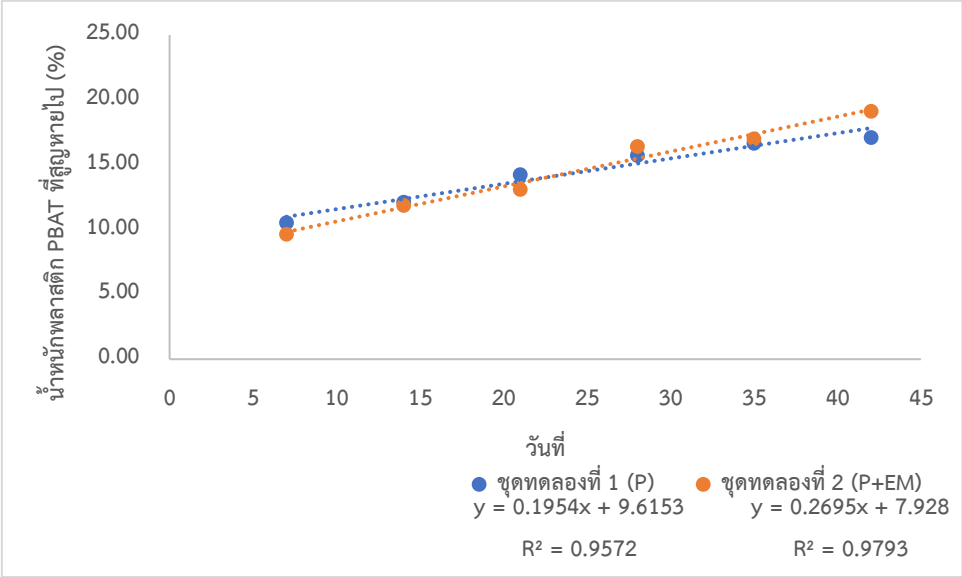
ตารางที่ 6 ภาพการเปรียบเทียบแผ่นพลาสติก PBAT ที่ใช้ในการหมักตามระยะเวลาที่กำหนด

ชุดทดลอง	วันที่ 0	7	14	21	28	35	42
P							
P + EM							

หมายเหตุ: P หมายถึง ชุดการทดลองที่ 1 ไม่มีการเติมกลุ่มจุลินทรีย์ EM
P+E หมายถึง ชุดการทดลองที่ 2 มีการเติมกลุ่มจุลินทรีย์ EM

จากตารางที่ 6 แสดงให้เห็นถึงการย่อยสลายของพลาสติก PBAT ในระหว่างกระบวนการทำปุ๋ยหมักมูลโคนมร่วมกับขุยมะพร้าว ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงของพลาสติกในปุ๋ยหมักทั้ง 2 ชุดทดลอง มีลักษณะคล้ายคลึงกันโดยในช่วงวันที่ 0 – 7 พลาสติกมีลักษณะเปื่อย ยุ่ย และมีรอยแตกเล็กน้อย ส่วนช่วงระยะเวลาหมักปุ๋ย 7 – 35 วัน พลาสติกเริ่มแตกและฉีกอย่างชัดเจน แต่ยังไม่ขาดออกจากกัน ในขณะที่ช่วงระยะเวลาหมักปุ๋ย 42 วัน พบว่าพลาสติกเริ่มมีการฉีกขาดออกจากกันโดยเฉพาะในชุดการทดลองที่ 1 (P)

การย่อยสลายพลาสติก PBAT มีแนวโน้มย่อยสลายเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงวันที่ 7 – 42 ของกระบวนการทำปุ๋ยหมักทั้ง 2 ชุดทดลอง โดยมีอัตราการย่อยสลายในช่วงวันที่ 7 – 42 เท่ากับ 0.1219%/วัน และ 0.2346%/วัน ในชุดทดลองที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาในการหมักมูลโคนมร่วมกับขุยมะพร้าว (วันที่ 7 – 42) กับน้ำหนักของพลาสติก PBAT ที่สูญหายไป (%) ในชุดทดลองที่ 1 (P) และชุดทดลองที่ 2 (P + EM)

3. สมบัติของปุ๋ยหมัก

การศึกษาสมบัติของปุ๋ยหมักที่เกิดจากการหมักมูลโคนมร่วมกับขุยมะพร้าวที่ระยะเวลา 42 วัน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดทดลอง ได้แก่ ชุดทดลองที่ 1 ไม่มีการเติมกลุ่มจุลินทรีย์ EM (P) ชุดทดลองที่ 2 มีการเติมกลุ่มจุลินทรีย์ EM

(P+EM) และชุดควบคุม (C) โดยตรวจวัดสมบัติของปุ๋ยหมักที่ระยะเริ่มหมัก (วันที่ 0) และหลังหมัก (วันที่ 42) เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของปุ๋ยหมัก โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สมบัติของปุ๋ยหมักมูลโคนมร่วมกับขุยมะพร้าวที่ระยะเวลาก่อนหมัก (วันที่ 0) และระยะเวลาหลังหมัก (วันที่ 42)

พารามิเตอร์	ก่อนหมัก (วันที่ 0)			หลังหมัก (วันที่ 42)			เกณฑ์กำหนด [17]
	C	P	P + EM	C	P	P + EM	
T (°C)	29 (±0)	29 (±0)	29 (±0)	26 (±0)	27 (±0)	27 (±0)	-
ความชื้น (%)	62.3 (±1.7)	62.8 (±1.1)	61.8 (±1.7)	36.40 (±1.1)	41.67 (±0.81)	34.7 (±2.5)	<35%
OM (%)	50.47 (±4.16)	52.76 (±0.78)	56.34 (±0.67)	27.09 (±3.84)	31.50 (±5.26)	28.84 (±2.50)	≥30
OC (g/kg)	292.73 (±24.15)	306.04 (±4.52)	326.78 (±3.91)	157.12 (±22.29)	182.69 (±30.53)	167.31 (±14.52)	-
pH	7.68 (±0.05)	7.67 (±0.04)	7.67 (±0.01)	7.67 (±0.07)	7.63 (±0.06)	7.70 (±0.02)	5.5–8.5
C/N	27.34	25.01	26.45	13.78	16.76	15.93	≤20
EC (dS/m)	17.72	17.82	15.94	18.26	16.60	17.26	<6 ds/m
TKN (%)	2.55 (±0.12)	2.79 (±0.08)	2.64 (±0.05)	1.14 (±0.03)	1.09 (±0.02)	1.05 (±0.05)	≥1
NH_4^+ (mg/kg)	12.09 (±0.08)	12.09 (±0.12)	5.61 (±0.16)	16.02 (±7.69)	2.19 (±0.53)	2.61 (±1.18)	-
NO_3^- (mg/kg)	4.97 (±0.05)	4.97 (±0.02)	3.42 (±0.01)	1.610 (±1.13)	1.81 (±0.14)	1.28 (±0.16)	-
TP (%)	0.120 (±0.20)	0.120 (±0.05)	0.142 (±0.08)	0.123 (±0.01)	0.121 (±0.13)	0.121 (±0.06)	≥0.5
TK (%)	2.04 (±0.02)	2.04 (±0.03)	2.10 (±0.03)	2.35 (±0.32)	1.97 (±0.27)	2.18 (±0.24)	≥0.5
การย่อยสลายสมบูรณ์ (%)							
- ข้าวพันธุ์ กข81	53.19 (±10.15)	67.77 (±6.95)	79.23 (±4.06)	188.25 (±37.85)	147.74 (±33.21)	131.24 (±31.86)	>80
- ถั่วเขียว	56.75 (±8.91)	60.02 (±4.46)	68.90 (±4.98)	176.09 (±30.11)	166.61 (±39.31)	145.03 (±20.25)	

หมายเหตุ: P หมายถึง ชุดทดลองที่ 1 ไม่มีการเติมกลุ่มจุลินทรีย์ EM
P+E หมายถึง ชุดทดลองที่ 2 มีการเติมกลุ่มจุลินทรีย์ EM
C หมายถึง ชุดควบคุม
ตัวเลขในวงเล็บ หมายถึง ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)

3.1 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่สามารถบ่งชี้ถึงกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในกองปุ๋ยหมักที่ส่งผลต่อสมบัติของปุ๋ยหมัก [18] การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในกองปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงลดลง โดยในวันที่

0 ของการหมัก อุณหภูมิของปุ๋ยหมักมีค่าเฉลี่ย 29 °C ทั้ง 3 ชุดทดลอง และเมื่อสิ้นสุดการทดลองวันที่ 42 อุณหภูมิของปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 26 - 27 °C ซึ่งโดยปกติแล้วอุณหภูมิของปุ๋ยหมักจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในช่วง 7 วันแรกของการหมักและจะลดลงหลังจากนั้นจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิบรรยากาศเรียกว่า ช่วงการย่อยสลายสมบูรณ์ (maturation phase) ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักเกิดจากการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในกองปุ๋ยหมัก

3.2 ความชื้น (Moisture)

ความชื้นเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการหมัก เนื่องจากความชื้นบ่งบอกถึงปริมาณน้ำในกองปุ๋ยหมัก ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับจุลินทรีย์ที่ต้องใช้ในการดำรงชีวิตและกิจกรรมต่าง ๆ ความชื้นเริ่มต้นที่เหมาะสมในการหมักปุ๋ยควรอยู่ในช่วง 50 – 70% ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้ความชื้นเริ่มต้นของทั้ง 3 ชุดทดลองอยู่ในช่วง 61.8 – 62.8% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ภายหลังจากหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน พบว่าปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง มีความชื้นเฉลี่ยอยู่ในช่วง 34.7 – 41.7% โดยชุดทดลองที่ 1 (P) มีความชื้นสูงที่สุด อย่างไรก็ตามความชื้นของปุ๋ยหมักในวันที่ 42 ของทั้ง 3 ชุดทดลอง มีค่าเกินมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรที่กำหนดให้มีความชื้นไม่เกิน 30%

3.3 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

pH ของปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง ในวันที่ 0 มีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 7.67 – 7.68 ภายหลังจากการหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน ปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง มีค่าอยู่ในช่วง 7.63 – 7.70 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรที่กำหนดให้อยู่ในช่วง 5 – 9

3.4 การนำไฟฟ้า (EC)

ค่า EC ของปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง ในวันที่ 0 มีค่าอยู่ในช่วง 15.94 – 17.82 dS/m ภายหลังจากการหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน ปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง มีค่าอยู่ในช่วง 16.60 – 18.26 dS/m ซึ่งปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง ในวันที่ 42 มีค่า EC ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรที่กำหนดให้ต้องไม่เกิน 6 dS/m

3.5 อินทรียวัตถุ (OM) และอินทรีย์คาร์บอน (OC)

ปริมาณ OM ของปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง ในวันที่ 0 มีค่าอยู่ในช่วง 50.76 – 56.34% ภายหลังจากหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน พบว่าปริมาณ OM ทั้ง 3 ชุดทดลอง มีแนวโน้มลดลงอยู่ในช่วง 27.09 – 31.50% ซึ่งมีเพียงชุดทดลองที่ 1 (P) เท่านั้นที่มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรที่กำหนดให้ต้องไม่ต่ำกว่า 30% อาจเนื่องจากชุดทดลองที่ 1 (P) มีการเติมพลาสติก PBAT ลงไปในกระบวนหมักซึ่งอาจส่งผลให้ส่วนผสมที่เป็นสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายออกมาทำให้มี OM สูงกว่าชุดทดลองอื่น ๆ ในขณะที่ชุดทดลองที่ 2 (P+EM) ถึงแม้ว่าจะมีการเติมพลาสติก PBAT ลงไปในกระบวนการหมักก็ตาม แต่ก็มีการเติมเชื้อจุลินทรีย์ EM ลงไปเพื่อช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และ OM ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายส่วนหนึ่งอาจถูกนำไปใช้โดยจุลินทรีย์เอง จึงอาจเป็นสาเหตุให้มีปริมาณ OM ต่ำกว่าชุดทดลองที่ 1 (P) ปริมาณ OC ของปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง ในวันที่ 0 มีค่าอยู่ในช่วง 292.73 – 326.78 g/kg ภายหลังจากการหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน พบว่าปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง มีปริมาณ OC อยู่ในช่วง 157.12 – 182.69 g/kg โดยชุดทดลองที่ 1 (P) มีปริมาณ OC สูงที่สุด รองลงมาคือ ชุดทดลองที่ 2 (P+EM) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณ OM ที่พบในชุดทดลองที่ 1 (P) และ 2 (P+EM) ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการเติมพลาสติก PBAT ลงไปในกระบวนการทำปุ๋ยหมักสามารถเพิ่มปริมาณ OC ในกองปุ๋ยหมักได้เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (C) ที่ไม่มีการเติมพลาสติก PBAT ซึ่งปริมาณ OC ที่เพิ่มขึ้นในกองปุ๋ยหมักในชุดควบคุม (C) และ 2 (P+EM) น่าจะมาจากวัตถุอินทรีย์ตามธรรมชาติที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมในการทำพลาสติก PBAT ที่เกิดจากการย่อยสลายในช่วง 7 วันแรกของการศึกษา และส่วน OC ที่เหลือน่าจะมาจากการย่อยสลายโพลิเมอร์ PBAT ในช่วงวันที่ 7 – 42 ของการศึกษา

3.6 ไนโตรเจน

การศึกษาปริมาณไนโตรเจนในกองปุ๋ยหมักวันที่ 0 และ 42 ได้แก่ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (TKN) ปริมาณแอมโมเนียม (NH_4^+) และปริมาณไนเตรท (NO_3^-) มีรายละเอียดดังนี้ TKN ของปุ๋ยหมักในวันที่ 0 มีค่าอยู่ในช่วง 2.55 –

2.79 % ภายหลังหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน พบว่าปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง มีปริมาณ TKN ลดลงอยู่ในช่วง 1.05 – 1.14% โดยชุดควบคุม (C) มีปริมาณ TKN สูงสุด อย่างไรก็ตามปุ๋ยหมักในวันที่ 42 ของการศึกษาของทุกชุดทดลอง มีปริมาณอยู่เกณฑ์มาตราฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรที่กำหนดให้ต้องไม่ต่ำกว่า 1% ปริมาณ NH_4^+ ของปุ๋ยหมักในวันที่ 0 มีค่าอยู่ในช่วง 5.61 – 12.09 mg/kg ภายหลังหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน พบว่าปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง มีปริมาณ NH_4^+ อยู่ในช่วง 2.19 – 16.02 mg/kg โดยชุดควบคุม (C) มีปริมาณ NH_4^+ สูงที่สุด ปริมาณ NO_3^- ของปุ๋ยหมักในวันที่ 0 มีค่าอยู่ในช่วง 3.42 – 4.97 mg/kg ภายหลังหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน พบว่าปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง มีปริมาณ NO_3^- ลดลงอยู่ในช่วง 1.28 – 1.81 mg/kg โดยชุดทดลองที่ 1 (P) มีปริมาณ NO_3^- สูงที่สุด

3.7 ฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP)

ปริมาณ TP ของปุ๋ยหมักในวันที่ 0 มีค่าอยู่ในช่วง 0.120 – 0.142% ภายหลังหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน พบว่าปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง มีปริมาณ TP อยู่ในช่วง 0.121 – 0.123% ซึ่งปริมาณ TP มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยในวันที่ 42 ชุดควบคุม (C) มีปริมาณ TP สูงที่สุด อย่างไรก็ตามปุ๋ยหมักในวันที่ 42 ของการศึกษาของทุกชุดทดลอง มีปริมาณ TP ต่ำกว่าเกณฑ์มาตราฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรที่กำหนดให้ต้องไม่ต่ำกว่า 0.5% อาจเนื่องจากวัสดุอินทรีย์ที่นำมาหมักปุ๋ยอินทรีย์ในครั้งนี้เริ่มต้นมีปริมาณ TP ต่ำกว่า 0.5% อยู่แล้ว

3.8 สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)

การศึกษาการย่อยสลายพลาสติก PBAT ในระหว่างกระบวนการหมักมูลโคนมร่วมกับขุยมะพร้าวได้กำหนด C/N ไว้ที่ 30 : 1 โดยใช้มูลโคนมจำนวน 2,600 g และขุยมะพร้าว 400 g รวม 3000 g ซึ่งผลการวิเคราะห์ C/N ของปุ๋ยหมักในวันที่ 0 ของทั้ง 3 ชุดทดลอง ที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 25.01 – 27.34 ซึ่งต่ำกว่าค่า C/N ที่กำหนดไว้ ภายหลังจากหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน พบว่าทั้ง 3 ชุดทดลอง มี C/N ลดลงโดยมีค่าอยู่ในช่วง 13.78 – 16.76 โดยชุดทดลองที่ 1 (P) มี C/N สูงที่สุด ซึ่งสัดส่วน C/N ทั้ง 3 ชุดทดลอง อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรที่กำหนดให้ต้องมีสัดส่วน C/N ไม่เกิน 20

3.9 โพแทสเซียมทั้งหมด (TK)

ปริมาณ TK ของปุ๋ยหมักในวันที่ 0 มีค่าอยู่ในช่วง 2.04 – 2.10% ภายหลังหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน พบว่าปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง มีปริมาณ TK อยู่ในช่วง 1.97 – 2.35% ซึ่งปริมาณ TK มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย โดยในวันที่ 42 ชุดควบคุม (C) มีปริมาณ TK สูงที่สุด อย่างไรก็ตามปุ๋ยหมักในวันที่ 42 ของการศึกษาของทุกชุดทดลอง มีปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมดผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรที่กำหนดให้ต้องไม่ต่ำกว่า 0.5%

3.10 การย่อยสลายสมบูรณ์

การศึกษาดัชนีการย่อยสลายพิจารณาจากค่า GI ของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข.81 ซึ่งเป็นตัวแทนของพืชใบเลี้ยงเดี่ยว และถั่วเขียวซึ่งเป็นตัวแทนของพืชใบเลี้ยงคู่ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้ ค่า GI ของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข.81 ที่ทดสอบกับปุ๋ยหมักในวันที่ 0 มีค่าอยู่ในช่วง 53.19 – 79.23% ภายหลังหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน แล้วนำไปทดสอบค่า GI พบว่าปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง มีการงอกเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 131.24 – 188.25% ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรที่กำหนดให้ต้องมีค่า GI ไม่ต่ำกว่า 80% โดยการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าปุ๋ยหมักที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ชุดทดลอง ไม่ส่งผลเสียต่อการงอกของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข.81 และค่า GI ของเมล็ดถั่วเขียวที่ทดสอบกับปุ๋ยหมักในวันที่ 0 มีค่าอยู่ในช่วง 56.75 – 68.90% ภายหลังหมักทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน แล้วนำไปทดสอบค่า GI พบว่าปุ๋ยหมักทั้ง 3 ชุดทดลอง มีการงอกเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 145.03 – 176.09% ซึ่งผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรที่กำหนดให้ต้องมีค่า GI ไม่ต่ำกว่า 80% โดยการศึกษาครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าปุ๋ยหมักที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 ชุดทดลอง ไม่ส่งผลเสียต่อการงอกของเมล็ดถั่วเขียว

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การย่อยสลายพลาสติก PBAT พบว่าสาเหตุที่พลาสติก PBAT มีการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก อาจเนื่องจากพลาสติก PBAT ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีส่วนผสมของวัสดุชีวภาพ อาทิ ข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง ซึ่งสอดคล้องกับ

งานวิจัยของดวงฤทัย เขมะไชเวช และคณะ [19] ที่ศึกษาการย่อยสลายของแผ่นพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากมันสำปะหลังและแป้งสาคูในดินร่วมกับปุ๋ยหมัก พบว่าพลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากมันสำปะหลังและแป้งสาคูสามารถย่อยสลายได้ 99.73% และ 97.76% ในดินร่วมกับปุ๋ยหมักภายใน 7 และ 8 วัน ตามลำดับ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าในช่วงแรกของการย่อยสลายพลาสติก PBAT ในระหว่างกระบวนการทำปุ๋ยหมักในช่วง 7 วันแรก พลาสติก PBAT ในส่วนที่ผลิตจากวัสดุชีวภาพจะถูกย่อยสลายโดยอาศัยจุลินทรีย์ในระหว่างกระบวนการผลิตปุ๋ยหมัก โดยกลไกการย่อยสลายพลาสติก PBAT ในส่วนที่ผลิตจากวัสดุชีวภาพเริ่มจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์และปัจจัยภายนอกที่ส่งผลให้พลาสติกเปื่อยยุ่ย และมีรอยฉีก แต่ยังไม่ขาดออกจากกัน โดยจุลินทรีย์จะปล่อยเอนไซม์ออกมาภายนอกเซลล์เพื่อย่อยสลายแผ่นพลาสติก PBAT ในส่วนที่ผลิตจากแป้ง โดยเริ่มจากการทำงานของจุลินทรีย์และปัจจัยภายนอกส่งผลให้พลาสติกมีลักษณะเปื่อยยุ่ย นอกจากนี้ระหว่างกระบวนการหมักปุ๋ยในช่วงแรกอาจเกิดความร้อน/อุณหภูมิที่สูงขึ้น จนเกิดกิจกรรมการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์โดยตรงของจุลินทรีย์จึงอาจส่งผลให้กองปุ๋ยหมักมีอุณหภูมิสูงขึ้น [16] ซึ่งอุณหภูมิในกองปุ๋ยหมักที่สูงขึ้นในช่วงแรกอาจส่งผลต่อการย่อยสลายพลาสติก PBAT ในส่วนที่ผลิตจากวัสดุชีวภาพ ชมณัฏชา บุญมี [12] กล่าวว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเกิดการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ นอกจากนี้ Sing & Sharma [20] รายงานว่าการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในกองปุ๋ยหมักที่ความชื้นในช่วง 45 – 55% มีความเหมาะสมต่อการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพได้อย่างรวดเร็ว และถ้ากองปุ๋ยหมักแห้งเกินไปจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลาย เนื่องจากจุลินทรีย์ไม่สามารถขยายพันธุ์ได้ ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้มีความชื้นเริ่มต้นในชุดทดลองที่ 1 (P) และ 2 (P+EM) เท่ากับ 62.8% และ 61.8% ตามลำดับ เป็นไปได้ว่าในช่วงระยะเวลา 7 วัน ของการหมักปุ๋ยค่าความชื้นมีแนวโน้มลดลงไปอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายพลาสติก ส่งผลให้ในช่วง 7 วันแรกของการหมักปุ๋ยน้ำหนักของพลาสติกลดลง 12.11% และ 11.04% ในชุดทดลองที่ 1 (P) และ 2 (P+EM) ตามลำดับ

สาเหตุที่ชุดทดลองที่ 2 มีอัตราการย่อยสลายพลาสติก PBAT สูงกว่าชุดทดลองที่ 1 แต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($F = 0.075$, $P>0.05$) อาจเนื่องจากชุดทดลองดังกล่าวมีการเติมกลุ่มจุลินทรีย์ EM ซึ่งเชื้อดังกล่าวอาจเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายพลาสติก PBAT สอดคล้องกับทองปัก ดอนประจำ [21] ที่พบว่าการใช้กลุ่มจุลินทรีย์ EM ในการย่อยสลายพลาสติก PLA สามารถย่อยสลายได้ 4.58% เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมกลุ่มจุลินทรีย์ EM ในช่วงเวลา 28 วัน สาเหตุที่ชุดทดลองที่ 2 มีการเติมกลุ่มจุลินทรีย์ EM ลงไปในระหว่างกระบวนการทำปุ๋ยหมักมีอัตราการย่อยสลายสูงกว่าชุดทดลองที่ 1 ที่ไม่เติมกลุ่มจุลินทรีย์ EM อาจเนื่องจากกลุ่มจุลินทรีย์ EM มีเชื้อที่ค่อนข้างหลากหลาย เช่น กลุ่มจุลินทรีย์พวกเชื้อราที่มีเส้นใย กลุ่มจุลินทรีย์ที่สร้างกรดแลกติก กลุ่มจุลินทรีย์ที่สังเคราะห์แสง กลุ่มจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมัก และกลุ่มจุลินทรีย์ที่ตรึงไนโตรเจน [21] ซึ่งความหลากหลายของกลุ่มจุลินทรีย์ที่พบใน EM อาจส่งผลให้อัตราการย่อยสลายของชุดทดลองที่ 2 สูงกว่าชุดทดลองที่ 1 เล็กน้อย อย่างไรก็ตามในการศึกษาครั้งนี้พบว่าพลาสติก PBAT สามารถย่อยสลายได้ในระหว่างการทำปุ๋ยหมักแต่ต้องใช้ระยะเวลาที่นานกว่า 42 วัน ซึ่งจากการศึกษาของชมณัฏชา บุญมี [12] ที่พบว่าพลาสติก PBAT สามารถย่อยสลายได้ในช่วง 0.59 – 4.87% ที่ระยะเวลา 30 วัน ในตะกอนชีวภาพที่มีการกำหนดปริมาณออกซิเจนและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

การศึกษาการย่อยสลายพลาสติก PBAT ในระหว่างกระบวนการทำปุ๋ยหมักมูลโคร่วมกับขุยมะพร้าวในชุดทดลองที่ 1 (P) และชุดทดลองที่ 2 (P+EM) ที่มีสัดส่วน C/N เริ่มต้นเท่ากับ 25.01 และ 26.45 ตามลำดับ และมีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 62.8% และ 61.8% ตามลำดับ ที่หมักทิ้งไว้เป็นเวลา 42 วัน โดยกลับกองปุ๋ยทุก ๆ 4 วัน พบว่าสมบัติของปุ๋ยหมักทั้ง 2 ชุดทดลอง ได้แก่ pH, C/N, TKN, TK และดัชนีการงอกของเมล็ดข้าวพันธุ์ กข.81 และถั่วเขียว ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร ในขณะที่ความชื้น EC และ TP ของปุ๋ยหมักวันที่ 42 ของทั้ง 2 ชุดทดลอง ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร ส่วนปริมาณ OM พบว่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตรเฉพาะชุดทดลองที่ 2 (P) เท่านั้น

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าพลาสติก PBAT สามารถย่อยสลายได้ในระหว่างกระบวนการหมักมูลโคนม ร่วมกับขุยมะพร้าวในชุดทดลองที่ 1 (P) และชุดทดลองที่ 2 (P+EM) ที่มีสัดส่วน C/N เริ่มต้น 25.01 และ 26.38 มีความชื้นเริ่มต้น 62.8 และ 61.8% ที่ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย 42 วัน ได้ 17.10% และ 19.12% ตามลำดับ โดยสามารถแบ่งกระบวนการย่อยได้เป็น

สองช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 ระยะเวลาการหมัก 0 – 7 วัน และช่วงที่ 2 ระยะเวลาในการหมัก 7 – 42 วัน โดยในช่วงที่ 1 พลาสติก PBAT มีการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วมีน้ำหนักลดลงเฉลี่ย 10.54% และ 9.67% ในชุดทดลองที่ 1 (P) และ 2 (P+EM) ตามลำดับ อาจเนื่องจากในช่วงแรกของการย่อยสลายพลาสติก PBAT เป็นการย่อยสลายในส่วนของวัสดุอินทรีย์ที่ใช้เป็นส่วนผสมของการผลิตพลาสติก PBAT หลังจากนั้นในช่วงที่ 2 น้ำหนักของพลาสติก PBAT มีแนวโน้มลดลงค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาที่ศึกษา โดยพบว่าในช่วงระยะเวลาที่ศึกษาน้ำหนักของพลาสติก PBAT ในชุดทดลองที่ 1 และ 2 มีการลดลงเท่ากับ 0.1954%/วัน และ 0.2695%/วัน ตามลำดับ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ชุดทดลองที่ 2 มีอัตราการลดลงที่สูงกว่าอาจเนื่องจากในชุดทดลองดังกล่าวมีการเติมเชื้อจุลินทรีย์ EM ซึ่งเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่หลากหลายและมีความสามารถในการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์ที่ดี ในขณะที่ปุ๋ยหมักมูลโคและขุยมะพร้าวที่ใช้ในการทดสอบกระบวนการย่อยสลายพลาสติก PBAT ในชุดทดลองที่ 1 และ 2 ที่ระยะเวลาในการหมักปุ๋ย 42 วัน พบว่าสมบัติของปุ๋ยหมัก ได้แก่ pH (7.63, 7.70) TKN (1.09% และ 1.05%) TK (1.97% และ 2.18%) และดัชนีการงอกของข้าวพันธุ์ กข.81 และถั่วเขียว ซึ่งสมบัติดังกล่าวผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร ในขณะที่ความชื้น (41.67% และ 34.70%) EC (16.60 และ 17.26 dS/m) และ TP (0.121% และ 0.121%) ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ของกรมวิชาการเกษตร ส่วน OM พบว่ามีชุดทดลองที่ 1 (P) (31.50%) ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน

สำหรับข้อเสนอแนะแนวทางในการศึกษาครั้งต่อไปควรเพิ่มระยะเวลาในการหมักให้นานกว่า 42 วัน และควบคุมความชื้นของปุ๋ยหมักให้มีความชื้นที่ 60% ตลอดระยะเวลาของการหมักเพราะที่ความชื้นดังกล่าวจะส่งผลให้จุลินทรีย์ในกองปุ๋ยหมักมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายพลาสติก PBAT ได้ตลอดระยะเวลาในกระบวนการหมักปุ๋ย

เอกสารอ้างอิง

1. กองจัดการกากของเสียและสารอันตราย กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. รายงานสถานการณ์ สถานที่กำจัดขยะมูลฝอยชุมชนประเทศไทย ปี พ.ศ. 2566. กรมควบคุมมลพิษ [อินเตอร์เน็ต]. 2567 [เข้าถึงเมื่อ 6 ม.ค. 2568]. เข้าถึงได้จาก: https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2024/05/pcdnew-2024-05-09_07-53-50_682275.pdf
2. ศุลีพร แสงกระจ่าง, ปัทมา พลอยสว่าง, ปริณดา พรหมหิตาธร. ผลกระทบของพลาสติกต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม. วารสารพิษวิทยาไทย 2556;28(1):39-50.
3. สุภัค จันทรประทุม. แนวทางการจัดการขยะพลาสติกยุควิถีชีวิตใหม่ (New Normal) เพื่อนำไปสู่ความยั่งยืน กรณีศึกษา: บุคลากรด้านสิ่งแวดล้อมของผู้ประกอบการพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด ตำบลมาบตาพุด อำเภอเมือง จังหวัดระยอง. รายงานค้นคว้าอิสระปริญญามหาบัณฑิต, คณะบริหารการพัฒนาสิ่งแวดล้อม สถาบันบัณฑิตพัฒนาบริหารศาสตร์. กรุงเทพฯ; 2563.
4. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม. BCG in Action: สาขาพลังงาน วัสดุและเคมีชีวภาพ. กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม[อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 10 มี.ค. 2568]. เข้าถึงได้จาก https://waa.inter.nstda.or.th/stks/pub/bcg/bcg-in-action-energy-01.pdf
5. Chandra R, Rustgi, R. Biodegradable polymers. Prog Polym Sci 1998;23(7):1273-335.
6. สุรีรัตน์ บัวชื่น. การย่อยสลายผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพในดินที่เก็บในแต่ละภูมิภาคของไทย สมบัติทางเคมี และกายภาพของดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร, มหาวิทยาลัยนเรศวร. พิษณุโลก; 2553.

7. ปาณิศา ศิริบุรมย์. การย่อยสลายของวัสดุภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้งในหลุมฝังกลบที่รับขยะเศษอาหาร. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ; 2560.
8. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. นวัตกรรมพลาสติกเพื่อสิ่งแวดล้อมจากพืช. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ [อินเทอร์เน็ต]. 2560 [เข้าถึงเมื่อ 26 ต.ค. 2565]. เข้าถึงได้จาก https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=23710
9. ศูนย์พัฒนาประมงแห่งเอเชียตะวันออกเฉียงใต้. พลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ (Biodegradable Plastic). [อินเทอร์เน็ต]. 2565 [เข้าถึงเมื่อ 26 ต.ค. 2565]. เข้าถึงได้จาก http://www.seaf dec.or.th/home/fishery-knowledge/miscellaneous/biodegradable-plastic.
10. บุญเกิด ศิริพงษ์. การศึกษาองค์ประกอบและอิทธิพลของปุ๋ยหมักที่ใช้ทดสอบการสลายตัวของพลาสติกชีวภาพต่อการชะละลายธาตุอาหารพืชในดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร, มหาวิทยาลัยนเรศวร. พิษณุโลก; 2553.
11. Tiquia SM. Microbial transformation of nitrogen during composting. Microbiology of Composting 2002;237-45.
12. ชมณัฏฐ์ชา บุญมี. การย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจนและสภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา), บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ; 2558.
13. กรมพัฒนาที่ดิน. คู่มือการปฏิบัติงาน การวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางกายภาพ. [อินเทอร์เน็ต]. 2553 [เข้าถึงเมื่อ 26 ต.ค. 2565]. เข้าถึงได้จาก https://www.ldd.go.th/PMQA/2553/Manual/OSD-04.pdf
14. กรมพัฒนาที่ดิน. คู่มือการปฏิบัติงาน การวิเคราะห์พืช ปุ๋ย และสิ่งปรับปรุงดิน. [อินเทอร์เน็ต]. 2553 [เข้าถึงเมื่อ 26 ต.ค. 2565]. เข้าถึงได้จาก https://www.ldd.go.th/PMQA/2553/Manual/OSD-07.pdf
15. Frančáková H, Líšková M, Bojnanská T, Mareček J. Germination Index as an indicator of malting potential. Czech J Food Sci 2012;30(4):377-84.
16. ฉัตรชัย จันทร์ดวงเด่น. การทำปุ๋ยหมัก. วารสาร MTEC ฉบับเดือนกรกฎาคม–กันยายน 2550;48-54.
17. กรมวิชาการเกษตร. ประกาศกรมวิชาการเกษตร เรื่อง มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ พ.ศ. 2548. ราชกิจจานุเบกษา 2548; 112(109ง),9-10.
18. Ko HJ, Kim KY, Hyeon T, Kim HT. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure. Waste management 2008;28(5):813-20.
19. ดวงฤทัย เขมะไชเวช, ชกชนม์ แสงจันทร์, พลพัฒน์ รวมเจริญ, สุชีวรรณ ยอยรู้รอบ. การย่อยสลายทางชีวภาพของแผ่นพลาสติกชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาคู. วารสารหน่วยงานวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้ 2564;13(1):60-70.
20. Singh B, Sharma N. Mechanistic implications of plastic degradation. Polym Degrad Stab 2008;93(3):561-84.
21. ทองปักษ์ ดอนประจำ. การพัฒนาถังปฏิกิริยาย่อยสลายพลาสติกที่เหมาะสมกับชุมชน. วิทยานิพนธ์ปริญญาสาธารณสุขศาสตรดุษฎีบัณฑิต, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น; 2562.