การพัฒนาระบบทดสอบการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ มาตรฐาน ISO14855-1 รุ่นที่ 2

บัญชา อุนพานิช[1,*] และ วรรณดารา อินทรปัญญา[2]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330
[2]ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

อีเมลผู้ประพันธ์บรรณกิจ: bancha.o@chula.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ การพัฒนาระบบทดสอบการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพและปุ๋ยหมักจุลินทรีย์มีคุณสมบัติในการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ การพัฒนาระบบเครื่องทดสอบการย่อยสลายของพลาสติกถูกออกแบบและสร้างขึ้นตามมาตรฐาน ISO 14855-1 เพื่อใช้ในการทดสอบพลาสติกชีวภาพที่สามารถจำลองการย่อยสลายในสภาวะกลบฝังในดิน เพื่อเป็นการสนับสนุนงานวิจัยในประเทศได้มีการออกแบบและสร้างโดยเครื่องทดสอบนี้ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 5 ส่วนได้แก่ ระบบควบคุมอุณหภูมิ ระบบจ่ายอากาศไร้คาร์บอนไดออกไซด์ ระบบกำเนิดความชื้นและตัวควบคุม กระบอกแยกอากาศพร้อมกับระบบวัดอัตราการไหล ระบบวัดคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น การพัฒนาปุ๋ยหมักจุลินทรีย์ตามกรรมวิธีแม่โจ้โมเดลมีคุณสมบัติในการย่อยพลาสติกชีวภาพเป็นการหมักมูลวัวร่วมกับฟางข้าวเป็นเวลา 2 เดือน

ผลการออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการย่อยพลาสติกชีวภาพประสบความสำเร็จด้วยดีได้ตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 14855-1 ขณะเดียวกันการพัฒนาปุ๋ยหมักมีเชื้อจุลินทรีย์เมื่อนำเอาเครื่องทดสอบพลาสติกชีวภาพมาทำงานร่วมกับปุ๋ยหมักที่ผลิตขึ้นตามมาตรฐานที่กำหนดพบว่าพลาสติก PLA และ Standard Cellulose สามารถย่อยสลายได้ โดยคิดเป็น 2.3 และ 2.3 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับภายในระยะเวลา 90 วัน

คำสำคัญ: พลาสติกชีวภาพ; การย่อยสลายทางชีวภาพ; อุณหภูมิ; มาตรฐาน ISO14855-1; โพลีแลคติกแอสิด

Development of A Testing System for the Biodegradation of Bioplastics ISO14855-1 Standard, Version 2

Bancha Ounpanich[1,*] and Wannadara Intarapanya[2]

[1]*Department Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand*
[2]*Department Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand*

Corresponding author's e-mail: bancha.o@chula.ac.th

Abstract

The objectives of the research are divided into two parts: The development of a biodegradation testing system for bioplastic and microbial compost that has the ability to biodegrade bioplastic. The development of the biodegradation testing machine is designed and constructed according to the ISO 14855-1 standard for testing bioplastics that can simulate biodegradation under burial conditions in soil. This is aimed at supporting research in the country, and the testing machine is designed and built with five main components: a temperature control system, a carbon dioxide-free air supply system, a moisture generation and control system, an air separation chamber with a flow rate measurement system, and a carbon dioxide measurement system. The development of the microbial compost using the Mae Jo model method is designed to biodegrade bioplastics through composting cow manure with rice straw for a period of 2 months.

The results from the design and construction of the biodegradation test machine were successful and met the ISO 14855-1 testing standard. At the same time, the development of microbial compost, when combined with the bioplastic testing machine, showed that PLA plastic and Standard Cellulose were able to degrade by 2.3 and 2 % within 90 days respectively.

Keyword: Bioplastic; Biodegradation; Temperature; ISO 14855-1; Polylactic acid

บทนำ

พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) หรือพลาสติกชีวภาพย่อยสลายได้ (Biodegradable plastic) เป็นพลาสติกที่ผลิตขึ้นจากวัสดุธรรมชาติส่วนใหญ่เป็นพืช สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ (biodegradable) ด้วยจุลินทรีย์ พืชที่เหมาะสมแก่การผลิตพลาสติกชีวภาพต้องมีคุณสมบัติที่ให้แป้งสูง เช่น ข้าวโพด โปรตีนจากถั่วหรือมันสำปะหลัง ข้าวสาลี มันฝรั่ง มันเทศ เป็นต้น การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพเป็นการ ช่วยลดปัญหามลพิษในสิ่งแวดล้อม

กระบวนการผลิตพลาสติกชีวภาพชนิด PLA (Poly lactic Acid) ได้จากการนำพืชที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบเช่น ข้าวโพด หรือมันสำปะหลัง มาผ่านกระบวนการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลด้วยแบคทีเรีย กระบวนการย่อยแป้งจะได้กรดแลคติก (Lactic acid) จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการ polymerization ทำให้ เป็นโพลีเมอร์สายยาวที่เรียกว่า Polylactic acid (PLA) ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษคือ มีความใส ไม่ย่อยสลายในสภาพแวดล้อมทั่วไป แต่สามารถย่อยสลายได้เองเมื่อนำไปฝังกลบในดินที่มีเชื้อจุลินทรีย์ หรือสร้างสภาวะการทดสอบที่สมบูรณ์

การย่อยสลายเป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่มีส่วนสำคัญในการกำจัดผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาจากกลุ่มงานวิจัยศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้พัฒนาการกำจัดขยะ PLA และ PET โดยใช้จุลินทรีย์ในกลุ่มคัดเลือกทำหน้าที่ในการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในสภาวะอุณหภูมิห้อง (Saowaluk Krainara et al., 2023) ในส่วนของงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบทดสอบการย่อยพลาสติกชีวภาพ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมตามมาตรฐานการทดสอบ ISO14855-1 จากรุ่นที่ 1 (บัญชา อุนพานิช และคณะ, 2561) เป็นรุ่นที่ 2 ขณะเดียวกันงานวิจัยนี้ก็ได้ดำเนินการพัฒนาการผลิตจุลินทรีย์โดยกระบวนการหมักปุ๋ยคอกจากมูลวัวโดยใช้วัสดุฟางข้าวที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในประเทศไทยผสมกับมูลวัวที่มีเชื้อจุลินทรีย์หมักเป็นเวลา 2-3 เดือน โดยใช้สูตรแม่โจ้โมเดลซึ่งไม่กลับกองปุ๋ยในระหว่างการหมัก เชื้อจุลินทรีย์ธรรมชาติที่ได้มีปริมาณมากขึ้น มีคุณสมบัติในการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพตามต้องการ การย่อยสลายนี้จะเปลี่ยนเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและปุ๋ยซึ่งสามารถนำกลับมาปลูกพืชได้อีกครั้ง

ปัจจุบันได้มีการนำเม็ดพลาสติกที่ได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตเลียมมาขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหารอย่างแพร่หลาย แต่พลาสติกเหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยวิธีทางธรรมชาติ ทำให้เกิดเป็นขยะพลาสติกปริมาณมหาศาลส่งผลทำให้เกิดมลภาวะระดับวิกฤตทั้งบนบกและในทะเล หลายปีผ่านมามีการคิดค้นพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้เองโดยแบคทีเรียในดินเมื่อทำการกลบฝัง ทำให้มีพลาสติกชีวภาพชนิดต่างๆ หลายชนิด ในปัจจุบันกระบวนการก่อนที่จะได้การรับรองความเป็นชีวภาพของพลาสติกนั้นต้องผ่านกระบวนการทดสอบการย่อยสลายของพลาสติกโดยเครื่องทดสอบที่มีคุณภาพตามมาตรฐาน ISO 14855-1

การออกแบบและสร้างระบบทดสอบนี้มีสาเหตุมาจากต้องการทดสอบพลาสติกชีวภาพชนิดต่างๆ ของหน่วยปฏิบัติการโพลิเมอร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ผ่านงานวิจัยของนิสิตในระดับบัณฑิตศึกษา ที่ต้องการออกแบบเม็ดพลาสติกชีวภาพสองชนิดได้แก่ Poly Lactic Acid (PLA.) และ Polybutylene Succinate (PBS.) มาใช้งานทดแทนพลาสติกชนิดเดิมที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ โดยความคาดหวังว่าเมื่อทดสอบพลาสติกชีวภาพ สามารถย่อยสลายได้ ก็จะนำพลาสติกนี้ไปใช้งานออกแบบผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์และ หลังจากเลิกใช้งานผลิตภัณฑ์นี้เมื่อเสื่อมคุณภาพก็สามารถนำไปทำลายเพื่อย่อยสลายโดยไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม การทดสอบการย่อยสลายนี้หน่วยงานมาตรฐานในประเทศไทยมีหน่วยงานของรัฐที่บริการทดสอบ ที่เป็นมาตรฐานอยู่สองหน่วยงานได้แก่ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย (วว.) และ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ซึ่งราคาค่าทดสอบค่อนข้างสูงเนื่องจากการทดสอบใช้เวลานานถึงสามเดือนต่อตัวอย่าง โดยค่าบริการทดสอบ ปัจจุบันประมาณ 100,000 บาท/ตัวอย่าง การส่งตัวอย่างทดสอบไม่สามารถกระทำได้เนื่องจากมีราคาสูง งบประมาณของผู้วิจัยเพื่อการทดสอบไม่เพียงพอเนื่องจากต้องทำการทดสอบจำนวนตัวอย่างถึง 8 ตัวอย่าง จึงเกิดแนวคิดในการออกแบบและสร้างระบบทดสอบขึ้นใช้งานเอง อย่างไรก็ตามถึงแม้ถึงแม้จะเป็นการออกแบบและสร้างเครื่องขึ้นใช้งานเองการออกแบบและสร้างเพื่อการทดสอบก็ต้องกำหนดตามมาตรฐานการทดสอบพลาสติกชีวภาพ ISO14855-1 ด้วยเช่นกัน

มูลเหตุดังกล่าวจึงเกิดความร่วมมือระหว่างภาควิชาวิศวกรรมเคมีผู้ต้องการทดสอบ และภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ผู้ออกแบบและสร้างระบบทดสอบ ประสบความสำเร็จทั้งการสร้างระบบทดสอบและการทดสอบพลาสติกชีวภาพ ด้วยราคาประหยัดด้วยค่าวัสดุประมาณ 50,000 บาท เป็นไปตามมาตรฐาน ISO14855-1 สามารถทำให้งานวิจัยดำเนินต่อไปได้ไม่ติดขัด นับเป็นการวางรากฐานการวิจัยการทดสอบพลาสติกชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการได้เป็นผลสำเร็จ

วัตถุประสงค์

1) เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพตามมาตรฐาน ISO14855-1
2) เพื่อใช้เครื่องทำการทดสอบการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพชนิด PLA

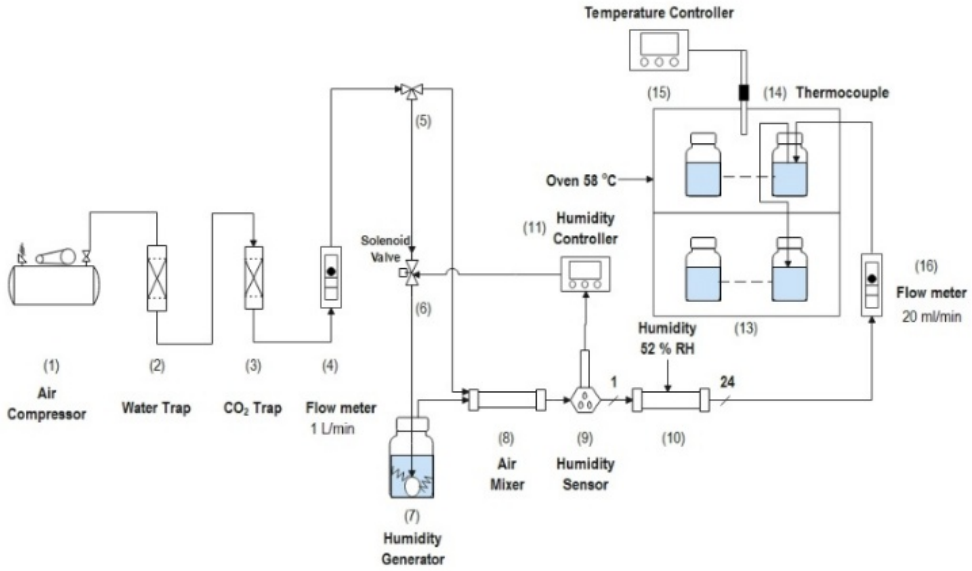
การออกแบบเครื่องทดสอบการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ

การออกแบบเครื่องทดสอบพลาสติกชีวภาพนี้เป็นไปตามมาตรฐานมาตรฐาน ISO14855-1 (ISO, 2005) และมาตรฐานมอก 2510 (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม, 2510) กระบวนการประดิษฐ์ได้จากศึกษาข้อกำหนดจากมาตรฐานในการทดสอบมาวิเคราะห์ ขณะเดียวกันก็ต้องใช้เทคนิคกระบวนการทางวิศวกรรมในการสร้าง ซึ่งกำหนดวัสดุภายในประเทศที่มีมาทำการออกแบบและสร้างเครื่องจนประสบความสำเร็จดังภาพที่ 2 ในราคาประหยัด เนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องงบประมาณ แต่ต้องคงไว้ซึ่งมาตรฐานการทดสอบระดับนานาชาติ ซึ่งข้อกำหนดมาตรฐานการทดสอบมีรายละเอียดดังนี้ อุณหภูมิทดสอบตัวอย่างกำหนดที่ 58 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้นอากาศเลี้ยงเชื้อไร้ CO_2 ควบคุมที่ 50 - 55 %RH ระบบวัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ทางเคมีด้วยวิธีการไตเตรท เป็นต้น

จากข้อกำหนดงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพได้มีการประดิษฐ์เครื่องทดสอบพลาสติกชีวภาพ (Gaurav Kale et al., 2007) และงานวิจัยการย่อยสลายพลาสติกโพลิเมอร์เพื่อการทดสอบ Thitisilp Kijchavengkul et al., 2010) โดยพบว่าเครื่องทดสอบที่มีขายเป็นลักษณะงานเฉพาะทางมีราคาแพงประมาณ 2 ล้านบาทและไม่ตอบสนองกับงานวิจัยที่กำลังดำเนินการอยู่เนื่องจากทดสอบได้เพียงครั้งละหนึ่งตัวอย่าง ประกอบกับการทดสอบตามมาตรฐานนี้ต้องใช้ระยะเวลานานไม่ต่ำกว่า 3 เดือน จากมาตรฐานและวิธีการทดสอบเหล่านี้สามารถนำเอาหลักการและวิธีการทดสอบนำมาประยุกต์ในการออกแบบ สร้าง และปรับปรุง งานวิจัยเดิมรุ่นที่ 1 ให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ระบบทดสอบพลาสติกชีวภาพที่สร้างในรุ่นที่ 2 ดังภาพที่ 1 และ 2

การออกแบบระบบทดสอบพลาสติกชีวภาพที่สร้างในรุ่นที่ 2 ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 5 ส่วน ได้แก่

1) ระบบควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)
2) ระบบจ่ายอากาศไร้คาร์บอนไดออกไซด์ (Air Supply System)
3) ระบบกำเนิดความชื้นและตัวควบคุม (Humidity Generator and Controller)
4) กระบอกแยกอากาศและระบบวัดอัตราการไหลอากาศ (Air separation cylinder and airflow measurement system)
5) ระบบวัดคาร์บอนคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Measurement System)



ภาพที่ 1 แผนภาพแสดงการทำงานและส่วนประกอบของระบบทดสอบพลาสติกชีวภาพ

หลักการทำงานระบบทดสอบพลาสติกชีวภาพ จากภาพเป็นการทำงานเริ่มจากแอร์คอมเพลสเซอร์ (1) ทำหน้าที่อัดอากาศเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ ส่งผ่านไปยังกระบอกดักความชื้น (2) และกระบอกดักคาร์บอนไดออกไซด์ (3) ตามลำดับ อากาศไร้คาร์บอนไดออกไซด์นี้จะผ่านระบบวัด Rotameter (4) ด้วยอัตราการไหล ที่ 2 L/Min อากาศผ่านสามแยก (Three way connector) (5) แบ่งออกเป็นสองทาง โดยอากาศส่วนที่หนึ่งส่งไปที่กระบอกผสมอากาศ (8) อากาศส่วนที่สองส่งไปที่ขวดกำเนิดความชื้น (7) ผ่านหัวทรายสร้างฟองอากาศในขวดกำเนิดความชื้น พาความชื้นจากน้ำกลั่น (Deionize Water) ไปผสมกับอากาศในกระบอก (8) กระบอกผสมอากาศทำหน้าที่ผสมอากาศให้ได้ 50 - 55 %RH โดยระบบควบคุมความชื้น (Humidity Controller) (11) ทำหน้าที่

ควบคุมการไหลของอากาศเข้าไปที่หัวทรายโดยสั่งให้โซลินอย (Solenoid SW.) (6) เปิดปิดเป็นช่วง ๆ อากาศที่คุมความชื้นนี้จะถูกส่งไปที่อุปกรณ์แยกอากาศ (10) ซึ่งอากาศเข้าหนึ่งท่อจะถูกแบ่งไปเข้าขวดตัวอย่างได้ถึง 24 ท่อ ในแต่ละตัวอย่างจะมี Flow meter (16) ในการวัดปริมาณอากาศไปเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์เท่าๆ กันประมาณ 10 - 20 mL/Min ในกล่องควบคุมอุณหภูมิบรรจุขวดตัวอย่าง (14) โดยมีเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (15) ทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิภายในกล่องที่ 58 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐานการทดสอบ อากาศที่มีออกซิเจนและมีความชื้นพอเหมาะจะถูกนำไปเลี้ยงเชื้อในขวดบรรจุตัวอย่างเพื่อย่อยพลาสติกชีวภาพ การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพจะเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ซึ่งปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์จะเป็นตัวชี้ว่ามีการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพเป็นปริมาณเท่าใด

จากแผนภาพการออกแบบระบบดังภาพที่ 1 สามารถนำมาสร้างเครื่องทดสอบการย่อยของพลาสติกชีวภาพด้วยวัสดุในประเทศเกือบทั้งหมดในราคาประหยัดได้เครื่องทดสอบดังภาพที่ 2 (พัฒนามาจากรุ่นที่ 1)

ภาพที่ 2 เครื่องทดสอบรุ่นที่ 2 พัฒนาขึ้นตามแผนภาพที่ 1

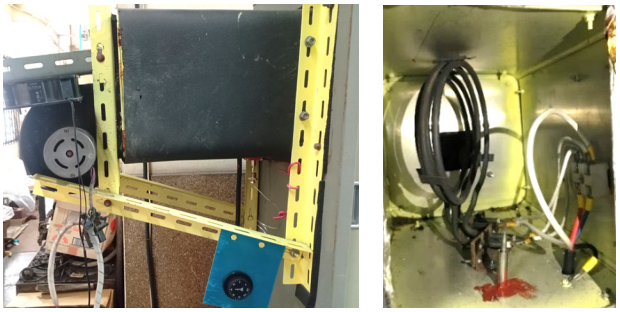
จากแผนภาพที่ 1 และ 2 ระบบทดสอบการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพที่สร้างขึ้นประกอบด้วยส่วนสำคัญต่างๆ ได้แก่

1) ระบบควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน ได้แก่ กล่องบรรจุตัวอย่างควบคุมอุณหภูมิ ระบบจ่ายความร้อน (Heater System) และเครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller)

1.1) กล่องบรรจุตัวอย่างควบคุมอุณหภูมิ ออกแบบด้วยกล่องเหล็ก ภายในบุด้วยฉนวนโพลีเอเทอรีน การจัดวางขวดตัวอย่างขนาด 2 ลิตร ทดสอบได้สูงสุด 24 ขวด กล่องทำหน้าที่รักษาอุณหภูมิให้ได้อุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ โดยขวดตัวอย่างต่อกับท่อนำอากาศมาเลี้ยงเชื้อ และท่อปล่อยอากาศขาออกที่มี CO_2 ไปยังระบบวัด ขวดตัวอย่างบรรจุในกล่องคุมอุณหภูมิดังภาพที่ 3

ภาพที่ 3 กล่องควบคุมอุณหภูมิบรรจุตัวอย่างทดสอบ

1.2) ระบบจ่ายความร้อน (Heater system) ดังภาพที่ 4 ทำหน้าที่จ่ายความร้อนให้กับกล่องควบคุมอุณหภูมิ ประกอบด้วยขดลวดลวดความร้อน (Heater coil) ขนาด 2,000 W. ดังภาพ 4(ข) บรรจุในกล่อง และมอเตอร์พัดลมขนาด 220 VAC 120 W. ความเร็วรอบ 1,200 รอบ/นาที ดังภาพ 4(ก) มอเตอร์พัดลมทำหน้าที่เป่าลมร้อนผ่านขดลวดเพื่อกระจายความร้อนส่งผ่านให้ทั่วกล่องควบคุมอุณหภูมิ โดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ



(ก) กล่องบรรจุฮีทเตอร์ (ข) ขดลวดความร้อน

ภาพที่ 4 ระบบจ่ายความร้อน

1.3) เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (Temperature Controller) (15) ดังภาพที่ 5 เป็นเครื่องควบคุมมาตรฐานตสาหกรรม ที่มีความแม่นยำในการควบคุมอุณหภูมิสูง ออกแบบให้วัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมคัปเปิล Pt-100 (14) วัดและตั้งค่าได้ละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส ตั้งค่าอุณภูมิการทดสอบได้ตามต้องการที่ 58 ± 0.2 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐานการทดสอบ ISO 14855-1

ภาพที่ 5 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ

2) ระบบจ่ายอากาศ (Air supply system)

หลักการทำงานของระบบจ่ายอากาศ ดังภาพที่ 6 แอร์คอมเพลสเซอร์ (1) ทำหน้าที่อัดอากาศเก็บในถัง การใช้งานต้องผ่านเกจวัดและปรับความดัน (Valve Regulator) ลดความดันอากาศลงประมาณ 2 Psi. ปล่อยอากาศผ่านไปยังกระบอกดักความชื้น (2) และกระบอกดัก CO_2 (3) ตามลำดับ อากาศที่ได้จะเป็นอากาศไร้ CO_2 ความชื้นต่ำ ที่มี O_2 ใช้ในการนำไปเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ในขวดตัวอย่าง

ภาพที่ 6 แสดงระบบจ่ายอากาศไร้คาร์บอนไดออกไซด์

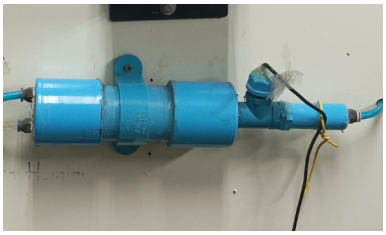
3) ระบบกำเนิดความชื้นและตัวควบคุม (Humidity Generator and Controller)

ระบบกำเนิดความชื้นประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนได้แก่ ขวดกำเนิดความชื้น เครื่องควบคุมความชื้น และกระบอกผสมอากาศดังที่ออกแบบและสร้างดังภาพที่ 7

3.1) ขวดกำเนิดความชื้น (Humidity Generator) (7) ภาพที่ 7(ก) ประกอบด้วยขวดบรรจุน้ำกลั่น (Deionize) การทำงานโดยปล่อยอากาศผ่านท่อนำอากาศไปยังหัวทรายทำให้เกิดฟองอากาศในน้ำอากาศออกจากขวดจะพาความชื้นเข้าไปจ่ายในกระบอกผสมอากาศ (Air Mixer) (8) ภาพ 7(ค)

(ก)ขวดกำเนิดความชื้น

(ข)เครื่องควบคุมความชื้น



(ค)กระบอกผสมอากาศ

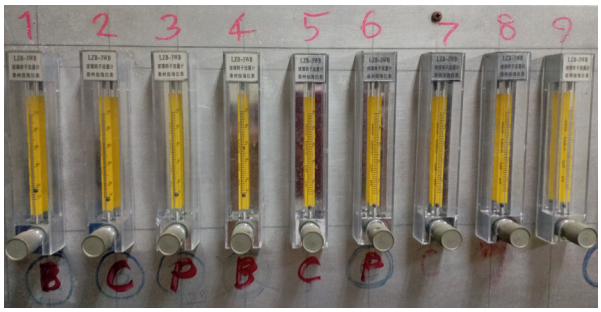
ภาพที่ 7 ระบบกำเนิดและควบคุมความชื้น

3.2) เครื่องควบคุมความชื้น (Humidity Controller) (11) ดังภาพที่ 7(ข) มีหน้าที่วัด และควบคุมความชื้นจ่ายให้ขวดตัวอย่างทดสอบ ประกอบด้วยหัววัดความชื้นอิเล็กทรอนิกส์ความไวสูงมีความละเอียดในการวัด 0.1 เปอร์เซ็นต์ สามารถวัดความชื้นได้ในช่วง 0 - 100 %RH. และตั้งค่าความชื้นได้ตลอดย่านการวัด การทดสอบจะตั้งความชื้นที่ 50 - 55 %RH.

3.3) กระบอกผสมอากาศ (Air Mixer) (8) ภาพที่ 7(ค) ทำหน้าที่ผสมอากาศสองส่วนเข้าด้วยกันได้แก่ อากาศจากเครื่องกำเนิดความชื้นและอากาศไร้ CO_2 ที่ได้จากแอร์คอมเพลสเซอร์ อากาศที่ผสมกันนี้ จะจะถูกปล่อยออกไปใช้เลี้ยงเชื้อในขวดตัวอย่างในสภาวะควบคุมความชื้นที่เหมาะสมที่ตั้งไว้ประมาณ 52 %RH.

4) กระบอกแยกอากาศ และระบบวัด ดังภาพ 8 ประกอบด้วยกระบอกแยกอากาศตามภาพที่ 8ก ทำหน้าที่รับอากาศ 1 ท่อ แยกเป็นอากาศขาออก 24 ท่อ แต่ละท่อผ่านระบบวัด Rotameter ดังภาพที่ 8(ข) โดยปรับอัตราการไหลของอากาศ 10 - 20 mL/Min เป็นอากาศที่มีความชื้น 50 - 55 %RH. เข้าเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ในขวดทดลอง

(ก)กระบอกแยกอากาศ



(ข)Rotameter

รูปที่ 8 ระบบจ่ายและวัดอัตราการไหลของอากาศ

5) ระบบวัดคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Measurement System)

การวัดปริมาณ CO_2 ที่ได้จากการย่อยพลาสติกชีวภาพ เป็นระบบวัดไตรเตรท การจัดระบบวัดทำโดยเตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ $(NaOH)_3$ ขวดต่ออนุกรมกันโดยท่อนำก๊าซต่อถึงกัน ซึ่งขวดแรกของสารละลายจะรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากขวดตัวอย่างทดลอง แรงดันของก๊าซผ่านท่อลงในสารละลาย NaOH จะดักจับ CO_2 โดย CO_2 จะทำปฏิกิริยากับสารละลาย เปลี่ยนเป็นโซเดียมคาร์บอเนต Na_2CO_3 ดังสมการที่ (2) การจัดเตรียมระบบวัดดังดัก CO_2 แสดงดังภาพที่ 9

ภาพที่ 9 ระบบดักจับคาร์บอนไดออกไซด์

การคำนวณปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์

การวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายทางชีวภาพ ทำได้โดยนำคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ดังแสดงในสมการที่ (1) และ (2)

$$NaOH + CO_2 \rightarrow NaHCO_3 \quad (1)$$

$$NaHCO_3 + NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O \quad (2)$$

จากนั้นนำสารละลายที่ได้จากสมการที่ (2) ไปไทเทรตกับสารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีนและเมทิล เรดเป็นอินดิเคเตอร์ ดังแสดงในสมการที่ (3) และ (4) แล้วจึงนำปริมาณสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่ใช้มาคำนวณหาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์

$$Na_2CO_3 + HCl \rightarrow NaHCO_3 + NaCl \quad (3)$$

$$NaHCO_3 + HCl \rightarrow NaCl + H_2O + CO_2 \quad (4)$$

ปริมาณ CO_2 คำนวณได้จากสมการที่ (5)

$$\text{ปริมาณ } CO_2 \text{ ที่เกิดขึ้น} = \frac{\mathbf{C \times V \times 44}}{\mathbf{1{,}000}} \quad (5)$$

เมื่อ C = ความเข้มข้นของ HCl ที่ใช้ในการไทเทรต (โมลต่อลิตร)
V = ปริมาณ HCl ที่ใช้ในการไทเทรตในสมการที่ (4) (มิลลิลิตร)
44 = มวลโมเลกุลของ CO_2 (กรัมต่อโมล)

และสามารถคำนวณหาปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี ($ThCO_2$) ตามสมการที่ (6)

$$ThCO_2 = M_{TOT} \times C_{TOT} \times 44/12 \quad (6)$$

เมื่อ M_{TOT} = ของแข็งแห้งทั้งหมด ในวัสดุทดสอบที่จุดเริ่มต้นของการทดสอบ (กรัม)
C_{TOT} = สัดส่วนของคาร์บอนอินทรีย์ (total organic carbon) ในของแข็งแห้งทั้งหมดของวัสดุทดสอบ
44, 12 = มวลโมเลกุลของคาร์บอนไดออกไซด์และคาร์บอน ตามลำดับ

การคำนวณระดับการย่อยสลายทางชีวภาพ

จากปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยออกมา สามารถคำนวณระดับการย่อยสลายทางชีวภาพ D_t ของวัสดุทดสอบตามสมการที่ (7)

$$D_t = \frac{(CO_2)_T - (CO_2)_B}{ThCO_2} \times 100 \qquad (7)$$

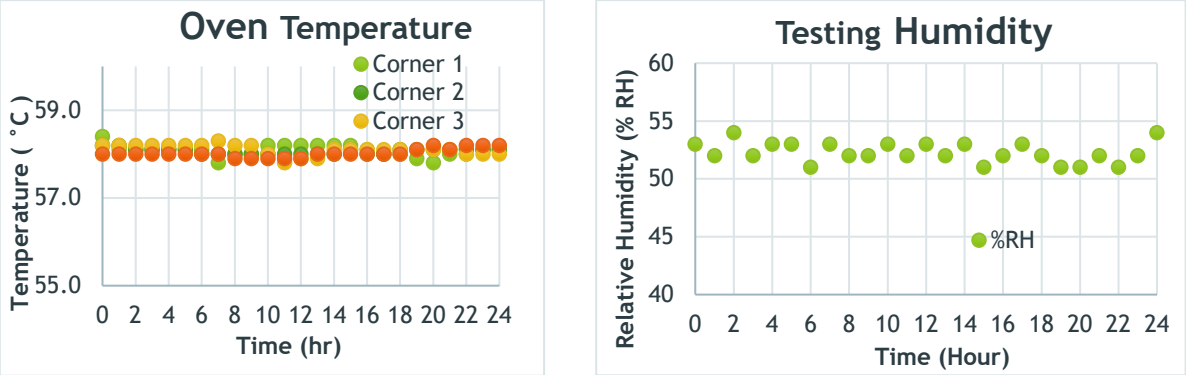
เมื่อ $(CO_2)_T$ = ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่เกิดขึ้นในภาชนะตัวอย่างทดสอบ (กรัม)

$(CO_2)_B$ = ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์สะสมที่เกิดขึ้นในภาชนะเปล่า (กรัม)

$ThCO_2$ = ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี (กรัม)

ผลการทดสอบเครื่องทดสอบพลาสติกชีวภาพ

1) ผลการทดสอบอุณหภูมิ ณ.ตำแหน่งต่างๆ ในกล่องควบคุมอุณหภูมิ 4 ตำแหน่งแสดงดังกราฟ ภาพที่ 10 พบว่า อุณหภูมิมีค่าการควบคุมอุณหภูมิสม่ำเสมอที่ 58 ±0.5˚ ได้อย่างถูกต้องโดยมีค่าคลาดเคลื่อนเพียง ± 0.5 องศาเซลเซียส (ISO14855-1) ยอมให้คลาดเคลื่อน ± 2 องศาเซลเซียส)



ภาพที่ 10 กราฟแสดงอุณหภูมิและความชื้นที่ทดสอบในระบบ

2) ผลการทดสอบความชื้นภายในระบบ ณ ตำแหน่งหัววัด (Humidity Sensor) โดยตั้งความชื้นไว้ที่ 52 %RH. แสดงการควบคุมความชื้นดังกราฟภาพที่ 10 ทุกๆ 30 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง พบว่าความชื้นภายในระบบสามารถควบคุมความชื้นที่ทดสอบ 52 %RH. ได้อย่างถูกต้องโดยมีค่าคลาดเคลื่อน (Error) ±2 %RH. ข้อกำหนดการทดสอบความชื้นระหว่าง 50 - 55 %RH.)

การเตรียมปุ๋ยหมักเชื้อจุลินทรีย์เพื่อการทดสอบ

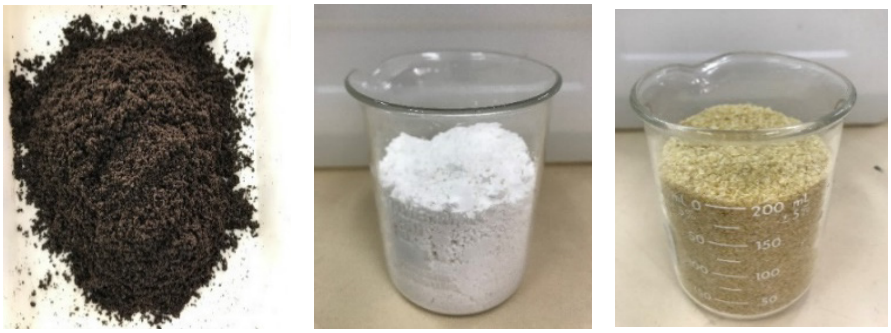
การหมักปุ๋ย ดังภาพ 11 เป็นการเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ย่อยพลาสติกชีวภาพ จากงานวิจัยการย่อยสลายแป้งและเซลลูโลสในกระเพาะวัว (เติ้งเค่อ ฮัว และคณะ, 2565) โดยที่กระเพาะวัวมีจุลินทรีย์ในการย่อยพืชที่เป็นเซลลูโลส มูลวัวที่ได้จะเป็นเซลลูโลสที่ผ่านการย่อยแล้วมีปริมาณจุลินทรีย์น้อย จากงานวิจัยการทดสอบพลาสติกชีวภาพตามมาตรฐาน ISO14855-2 (วิรัตน์ วาณิชย์ศรีรัตนา, 2554) มีแนวคิดในการเพิ่มจุลินทรีย์โดยหมักกับฟาง (การทดสอบพลาสติกชีวภาพตามมาตรฐาน ISO14855-2; 2560) ในสภาพที่เหมาะสมตามระบบแม่โจ้โมเดล (ธีรพงษ์ สว่างปัญญากูร, 2558) ด้วยระยะเวลาประมาณ 2 เดือน ดังภาพที่ระยะเวลาต่างๆ

เริ่มต้น หมักหนึ่งเดือน หมักสองเดือน

ภาพที่ 11 การเตรียมปุ๋ยหมักที่มีเชื้อจุลินทรีย์ที่ระยะเวลาต่างๆ

การเตรียมตัวอย่างทดสอบย่อยพลาสติกชีวภาพ

ตัวอย่างการทดสอบการย่อยพลาสติกชีวภาพประกอบด้วย ปุ๋ยหมักที่มีเชื้อจุลินทรีย์ Standard Cellulose และพลาสติกชีวภาพ PLA ตามลำดับดังภาพที่ 12 ตัวอย่างทั้งหมดจะผ่านการคัดขนาดด้วย Sieve ให้มีขนาดเล็กกว่า 850 ไมโครเมตร หลังจากนั้นจึงนำไปใส่ขวดตัวอย่างด้วยอัตราส่วน ปุ๋ยหมักต่อตัวอย่างทดสอบเท่ากับ 6 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปเข้าเครื่องทดสอบการย่อยสลายของพลาสสติกที่สร้างขึ้น



(ก)จุลินทรีย์ปุ๋ยหมัก (ข)Cellulose (ค)PLA.

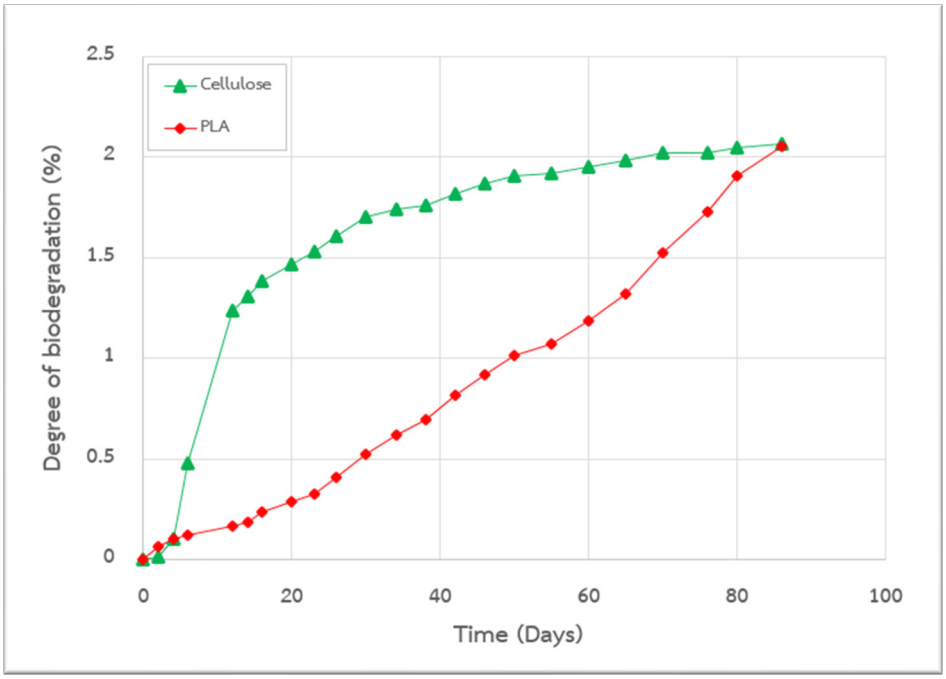
ภาพที่ 12 ตัวอย่างทดสอบ

กระบวนการทดสอบพลาสติกชีวภาพด้วยเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้น ตามมาตรฐานจะต้องทดสอบที่อุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส ความชื้น 50 - 55 % RH. และระบบจ่ายอากาศเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ โดยต้องบรรจุปุ๋ยหมักที่มีจุลินทรีย์และพลาสติกชีวภาพเข้าด้วยกันเพื่อทดสอบในอัตราส่วน 6:1 โดยน้ำหนัก ในภาชนะมาตรฐานขนาดความจุ 2 ลิตร ดังภาพที่ 13 ตามมาตรฐาน ISO 14855-1 เป็นเวลา 90 วัน

ภาพที่ 13 พลาสติกชีวภาพ ในภาชนะทดสอบผสมกับปุ๋ยหมักเพื่อให้จุลินทรีย์ทำการย่อยสลาย

ผลการทดสอบการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ

การทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพภายใต้สภาวะควบคุมการหมักทางชีวภาพที่ควบคุมอุณหภูมิ 58 ± 2 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 52 เปอร์เซ็นต์ พบว่า PLA และ Standard Cellulose คลายตัว ความชื้นภายใต้สภาวะควบคุมสามารถแทรกซึมไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไรซิสตัดสายโซ่โพลิเมอร์ให้มีขนาดสั้นและเล็กลง ง่ายต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ จึงทำให้เกิดการย่อยสลายที่เร็วในสภาวะแวดล้อมจริง การทดสอบ Cellulose และ PLA โดยพบระดับการย่อยสลายทางชีวภาพ คือ 2.3 และ 2.3 เปอร์เซ็นต์ ดังกราฟในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 กราฟแสดงระดับการย่อยสลายทางชีวภาพของ STD Cellulose และ PLA

สรุปผลการวิจัยและประโยชน์ที่ได้รับ

สรุปผลการวิจัยแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ การพัฒนาปรับปรุงเครื่องมือทดสอบเป็นรุ่นที่ 2 และ การวิจัยพัฒนาผลิตปุ๋ยจุลินทรีย์เพื่อใช้ย่อยพลาสติกชีวภาพ

1) ผลการวิจัยส่วนที่ 1 เป็นการพัฒนาปรับปรุงเครื่องมือทดสอบจากรุ่นที่ 1 เป็นรุ่นที่ 2 ผลของการประดิษฐ์ได้ระบบทดสอบพลาสติกชีวภาพที่มีขีดความสามารถในการทดสอบตามมาตรฐาน ISO14855-1 ประสิทธิภาพการการทำงานเทียบเคียงต่างประเทศด้วยวัสดุการประดิษฐ์ในประเทศประมาณ 50,000 บาท ปริมาณตัวอย่างต่อการทดสอบมากถึง 24 ตย./การทดสอบ

ในส่วนการประดิษฐ์ได้เปลี่ยนระบบจ่ายอากาศจากเดิมต้องเปลี่ยนท่อออกซิเจนทุกสัปดาห์ในระหว่างการทดสอบเป็นระบบแอร์คอมเพลสเซอร์ปั๊มจ่ายอากาศ ระบบวัดอัตราการจ่ายอากาศใช้ Rotameter เป็นตัววัดปริมาณอากาศเลี้ยงเชื้อแยกแต่ละขวด และระบบวัด CO_2 จากหนึ่งขวดเป็น 3 ขวดเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับ CO_2 การปรับปรุงนี้ทำให้ระบบทดสอบทั้งหมดมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้นเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ ISO14855-1 ทุกประการ ซึ่งเมื่อนำเครื่องไปทำการทดสอบตัวอย่างมาตรฐาน Cellulose และ PLA ตามกระบวนการย่อยพลาสติกชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ในสภาวะควบคุมการหมักทางชีวภาพ PLA สามารถย่อยสลายได้ จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปขยายเสกลเป็นโรงงานย่อยพลาสติกชีวภาพในอนาคต

2) ผลการวิจัยเมื่อนำปุ๋ยหมักนี้ไปทดสอบร่วมกับ PLA และ STD Cellulose ด้วยเครื่องรุ่นที่ 2 ที่พัฒนาขึ้น ได้ผลการทดสอบการย่อยประมาณ 2.3 เปอร์เซ็นต์ ตามภาพที่ 14 สอดคล้องกับการนำปุ๋ยหมักไปทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการโครงการพัฒนาวิชาการดิน ปุ๋ย และสิ่งแวดล้อม ม.เกษตร พบว่ามี Cellulolytic bacteria 1.1x10 ^{7} CFU/g (dry soil) ซึ่งมีคุณสมบัติในการย่อยสลายเซลลูโลส (เพชรดา ปินใจ, 2567)

ข้อเสนอแนะงานวิจัย

1) ระบบวัด CO_2 โดยวิธีการไตรเตรททางเคมีเป็นระบบวัดที่ให้ผลการวิเคราะห์ช้าและความแม่นยำน้อย ควรใช้ระบบวัดอิเล็กทรอนิกส์ที่มีเซ็นเซอร์ CO_2 เป็นอีกทางเลือกที่ดีกว่าซึ่งสามารถทำการวัดในทันที และเก็บข้อมูลผ่านระบบคอมพิวเตอร์ได้อีกด้วย

2) จากผลการทดสอบการย่อยได้ค่าการย่อยสลายของพลาสติกยังน้อย ประเด็นอาจเกิดจาก ปริมาณและจุลินทรีย์กลุ่มย่อยพลาสติกชีวภาพจากการหมักด้วยมูลวัวมีน้อย ซึ่งในฐานะวิศวกรไม่มีความชำนาญ สิ่งจำเป็นควรหากลุ่มงานวิทยาศาสตร์ทีมีความรู้ความชำนาญเกี่ยวกับจุลินทรีย์ย่อยพลาสติกมาทำงานร่วมกัน

3) เครื่องทดสอบที่ออกแบบและสร้างนี้ กลุ่มงานวิจัยจะดำเนินการทำงานวิจัยเพิ่มระบบวัดอิเล็กทรอนิกส์ด้วยระบบวัด CO_2

ประโยชน์ที่ได้รับ

1) ด้านงานวิจัย ได้เครื่องทดสอบต้นแบบนำไปสู่การสร้างห้องปฏิบัติการทดสอบพลาสติกชีวภาพเป็นไปตามมาตรฐาน ISO14855-1. และนำผลงานรุ่นที่ 1 ไปสนับสนุนงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วง ผ่านงานวิจัยในระดับบัณฑิตศึกษาเรื่อง “การศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอสิกและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต” (สาวิกา แจวศรีทอง, 2556)
ในอนาคตไม่จำเป็นต้องส่งตัวอย่างไปทดสอบในราคาแพง ปัจจุบันค่าทดสอบประมาณ 100,000 บาท/ตัวอย่าง

2) ด้านงบประมาณการใช้จ่าย สามารถสร้างระบบทดสอบพลาสติกชีวภาพได้ในราคาประหยัดด้วยวัสดุในประเทศเกือบทั้งหมด เป็นการประหยัดงบประมาณในการซื้อระบบนี้นับล้านบาท

3) ด้านสังคม เมื่องานวิจัยพลาสติกชีวภาพก้าวหน้าและถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายจะถูกนำมาทดแทนพลาสติกชนิดเก่าย่อมทำให้สิ่งแวดล้อมดีขึ้น ไม่เกิดขยะพิษ คุณภาพชีวิตดีขึ้น

4) ด้านธุรกิจอุตสาหกรรม สามารถนำไปเป็นต้นแบบในการออกแบบและสร้างสนับสนุนงานวิจัยในห้องปฏิบัติการทดสอบของภาครัฐและเอกชน หรือทำการทดสอบในหน่วยควบคุมคุณภาพของภาคอุตสาหกรรม

ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาต่อ

1) ระบบการย่อยสลายที่ออกแบบและสร้างขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทดสอบกับพลาสติกชีวภาพชนิดอื่นๆได้

2) ระบบการวัด CO_2 ด้วยวิธีทางเคมีเป็นระบบวัดที่สิ้นเปลืองบุคลากร ผลการวัดช้าในการนำตัวอย่างไปตรวจวัดระบบวัดด้วยเซ็นเซอร์อิเล็กทรอนิกส์ CO_2 แสดงผลการวัดได้ไวในทันที เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งซึ่งอยู่ในระหว่างการพัฒนาควรทดแทนระบบวัดทางเคมีต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีสนับสนุนสถานที่ทำงานวิจัย รศ. ดร.ธราทร มงคลสุข และหน่วย Bio Circular Green (BCG.) คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนวางแผนงานวิจัยจนประสบความสำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

เติ้งเค่อ ฮัว, วูเตอร์ เอช เฮนดริกส์, เบนไห่ ซิออง, และ วิลเบิร์ต เอฟ เปลลิคาน. (2565). *การย่อยสลายแป้งและเซลลูโลสในกระเพาะรูเมนและการประยุกต์ใช้เมตาจีโนมิกส์กับจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมน* (รายงานการวิจัย). นนทบุรี: ห้องสมุดการแพทย์แห่งชาติ.

เพชรดา ปินใจ. (2567). *รายงานผลการทดสอบห้องปฏิบัติการโครงการพัฒนาวิชาการดิน ปุ๋ย และสิ่งแวดล้อม ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.* กรุงเทพฯ: คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ธีรพงษ์ สว่างปัญญากูร. (2558). *คณะวิศวกรรมการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ปริมาณมากแบบไม่พลิกกลับกอง วิธีวิศวกรรมแม่โจ้ งบประมาณมหาวิทยาลัยแม่โจ้ อุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โครงการพัฒนาอุตสาหกรรมอาหารอินทรีย์จังหวัดเชียงใหม่.* เชียงใหม่: คณะวิศวกรรมการผลิตปุ๋ยอินทรีย์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

บัญชา อุนพานิช, สาวิกา แจวสีทอง, สิริจุฑารัตน์ โควาวิสารัช, และ นวดล เพ็ชรวัฒนา. (2561). *ระบบทดสอบการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ ตามมาตรฐาน ISO14855-1* (หน้า 307-317). ใน รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการวิจัยระดับชาติสำหรับบุคลากรสายสนับสนุนวิชาการในสถาบันอุดมศึกษา ครั้งที่ 10.

วิรัตน์ วาณิชย์ศรีรัตนา. (2554). *การพัฒนาระบบและการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพเบื้องตนสำหรับอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพตามมาตรฐาน ISO 14855-2* (รายงานวิจัย). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สาวิกา แจวศรีทอง. (2556). *การศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอสิดและพอลิบิวทิลีนซัคซิเนต*. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต). กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2510). *การหาการแตกสลายทางชีวภาพในขั้นสุดท้ายแบบใช้ออกซิเจนของพลาสติกภายใต้สภาวะควบคุมการหมักทางชีวภาพ - วิธีวิเคราะห์คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น - เล่ม 2: การชั่งน้ำหนักคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในการทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ*. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

ISO. (2005). *Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions-Method by analysis of evolved carbon dioxide*. Geneva, Switzerland: ISO.

Kale, G., Auras, R., Singh, S. P., & Narayan, R. (2007). Biodegradability of polylactic bottles in real and simulated composting conditions. *Polymer Testing, 26*, 1049-1061.

Kijchavengkul, T., Auras, R., Rubino, M., Selke, S., Ngouajio, M., & Fernandez, R. T. (2010). Biodegradation and hydrolysis rate of aliphatic polyester. *Polymer Degradation and Stability, 95*, 2641-2647.

Krainara, S., Mistry, A. N., Malee, C., Chavananikul, C., Pinyakong, O., Assavalapsakul, W., Jitpraphai, S. M., Kachenchart, B., & Luepromchai, E. (2023). Development of a plastic waste treatment process by combining deep eutectic solvent (DES) pretreatment and bioaugmentation with a plastic-degrading bacterial consortium. *Journal of Hazardous Materials, 460*, 132507.