

การย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในดินจากบ่อฝังกลบขยะผสมกากตะกอนภายใต้สภาวะ
ไร้ออกซิเจน

นายนาวิน เนสุสินธุ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

Degradation of biodegradable plastics exposed to landfill soil mixed with
anaerobic sludge under anaerobic condition

Mr. Nawin Nesusinth

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในดินจากบ่อฝังกบ
โดย	ชยะผสมกากตะกอนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน
สาขาวิชา	นายนาวิน เนสสินธุ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์
	ดร.ชนาวดี ลีจากภัย

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร. ชนาวดี ลีจากภัย)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชะลอ จารุสิทธิรักษ์)

นาวิน เนสุสินธุ์: การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพในดินจากบ่อฝักรวมขยะผสมกากตะกอน ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (Degradation of biodegradable plastics exposed to landfill soil mixed with anaerobic sludge under anaerobic condition) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.ธนาดี ลี้จากภัย, 87 หน้า.

ทำการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายทางชีวภาพเพื่อประเมินความสามารถในการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ 2 ชนิด คือ Poly(lactic acid) (PLA) และ poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) ด้วยดินจากบ่อฝักรวมขยะผสมกากตะกอน อัตราส่วนต่างๆ ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ผสมกากตะกอนกับดินร้อยละ 30 ความชื้นสัมพัทธ์ 55 องศาเซลเซียส และเติมน้ำ 45 มล. ติดตามผลการย่อยสลายทางชีวภาพจากน้ำหนักแห้งที่ลดลงของพลาสติกทดสอบ และก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้น ยืนยันการย่อยสลายของพลาสติกจากโครงสร้าง และพื้นที่ผิวที่เปลี่ยนแปลงไป ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากการทดสอบพบว่าน้ำหนักแห้งพลาสติกลดลงเมื่อเวลาการทดสอบเพิ่มขึ้น ในวันที่ 15 30 45 และ 60 น้ำหนักแห้งของ PLA ลดลงประมาณร้อยละ 2 8 57 และ 67 มีก๊าซชีวภาพสะสมในวันที่ 60 ประมาณ 760 มล. ส่วน PBAT ในวันที่ 15 30 45 และ 60 น้ำหนักแห้งลดลงร้อยละ 3 5 6 และ 7 มีก๊าซชีวภาพสะสมในวันที่ 60 ประมาณ 500 มล. ผลการทดลองดังกล่าวบ่งชี้ว่าพลาสติกทดสอบสามารถย่อยสลายได้ และ PLA สามารถย่อยสลายได้รวดเร็วกว่า PBAT ที่สภาวะควบคุมภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนนี้

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต.....
 ปีการศึกษา 2554 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5187189920: MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORDS: ANAEROBIC CONDITION/DEGRADATION//PLA/PBAT

NAWIN NESUSINTH: DEGRADATION OF BIODEGRADABLE PLASTICS EXPOSED TO LANDFILL SOIL MIXED WITH ANAEROBIC SLUDGE UNDER ANAEROBIC CONDITION. ADVISOR: ASST. PROF.CHARNWIT KOSITANONT, Ph.D., CO-ADVISOR: THANAWADEE LEEJARKPAI. Ph.D., 87 pp.

Determining the optimized condition to assess the degradation of poly(lactic acid) (PLA) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) by exposed to landfill soil mixed with anaerobic sludge. The experiment was investigated under anaerobic condition. The optimized condition was obtained, the percent landfill soil amended sludge of 30, added water 45 ml. and temperature as 55 °c under anaerobic condition. Weight loss and evolved gas was periodically collected. Structural changes determined under SEM were used as indicators of the biodegradation. The dry weight is found to decrease with increasing incubation time. For PLA, at the day 15 30 45 and 60 PLA was percent degraded of 2 8 57 and 67 with accumulated biogas of 760 ml were found. On the other hand PBAT was less degraded. The percent degradation were 3 5 6 and 7 with accumulated biogas of 500 ml was obtained on the same date as PLA. These results indicated that PLA degradation more rapidly proceeded than PBAT degradation in this anaerobic condition.

Field of Study: Environmental Science

Academic Year: 2011

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ อย่างสูงที่ได้กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ดร.ชนาวดี ลีจากภัย ที่ได้กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ทั้งสองท่านได้ให้ความช่วยเหลือในการให้คำแนะนำ ชี้แนะในหลายต่อหลายสิ่งจนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี นอกจากนี้ท่านยังกรุณาอบรมสั่งสอนขัดเกลาให้ผู้ศึกษาสามารถดำรงชีวิตและเป็นสมาชิกที่ดีได้ในสังคม ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เฟ็งปรีชา ประธานสอบวิทยานิพนธ์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอก ดร.ชโล จารุสิทธิรักษ์ ท่านเหล่านี้ได้ให้ความกรุณาในการแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ของงานวิจัยเพื่อให้วิทยานิพนธ์สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อมและสาขาวิชาอื่นๆ ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ต่างๆ จนสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำวิจัยให้สำเร็จ รวมทั้งขอขอบคุณวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยจากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) โรงผลิตขนมจีน อ.สามโคก และทุนสนับสนุนจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้มอบทุนอุดหนุนวิจัยสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยรวมถึงห้องปฏิบัติการสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ชั้น 17 อาคารมหามกุฏ

ขอขอบคุณคุณจิตตรี พละกุล (พี่มุก) เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ สิ่งแวดล้อมที่คอยใส่ใจ และให้ความช่วยเหลือต่างๆ และคุณโยษิตา ฤดีกิจ (พี่แก้ว) เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่กรุณาให้คำปรึกษาและเก็บตัวอย่างในการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ พท.นาวา เนสุสินธุ์ ตลอดจนทุกๆ คนในครอบครัวเนสุสินธุ์ทุกท่านที่คอยให้ความใส่ใจช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจมาโดยตลอด รวมทั้งขอขอบคุณ ขอบใจ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมทุกท่าน

คุณค่าและประโยชน์ใด ๆ ที่เป็นผลอันเนื่องมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยขอมอบแด่ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัว ครูอาจารย์ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทุก ๆ ท่านด้วยความเคารพยิ่ง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	3
2.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	4
2.3 เทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	6
2.3.1 วัตถุดิบ.....	6
1) แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้.....	6
2) แหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม.....	6
2.3.2 เทคโนโลยีต้นน้ำ – กลางน้ำ.....	7
1) กระบวนการหมัก.....	8
2) กระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน.....	8
3) กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยใช้เทคโนโลยีพันธุวิศวกรรม.....	8
2.3.3 เทคโนโลยีปลายน้ำ.....	8
1) กระบวนการคอมพาวด์.....	8
2) กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์.....	9
2.4 พอลิแลคติกแอซิด.....	10
2.5 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรพทาเลท.....	13
2.6 กลไกการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	14

บทที่	หน้า
2.6.1 การแตก/หักเป็นชิ้นเล็ก.....	14
2.6.2 การย่อยสลายทางชีวภาพ.....	17
2.7 การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน และการเกิดมีเทน.....	17
2.7.1 ขั้นตอนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน.....	17
1) การสลายด้วยน้ำ.....	17
2) การเกิดกรดอะซิติก.....	18
3) การเกิดมีเทน.....	19
2.8 แบบที่เรียที่เกี่ยวข้อกับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน.....	19
2.8.1 แบบที่เรียสร้างกรดไขมันระเหย.....	19
2.8.2 แบบที่เรียสร้างกรดอะซิติก.....	19
2.8.3 แบบที่เรียสร้างมีเทน.....	20
2.9 ปัจจัยสำคัญในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน.....	21
1) สมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	22
2) องค์ประกอบของเสีย / ของแข็งระเหยได้.....	24
3) ระดับความเป็นกรด – ต่าง.....	24
4) อุณหภูมิ.....	24
5) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน.....	25
6) ของแข็งรวม / อัตราบรรทุกสารอินทรีย์.....	25
7) ระยะเวลาที่กักพั้ในการย่อยสลาย.....	25
8) การผสม.....	25
2.10 วัฏจักรในดินที่เกี่ยวข้อกับการย่อยสลาย.....	26
2.10.1 วัฏจักรไนโตรเจน.....	26
2.10.2 วัฏจักรคาร์บอน.....	27
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อ.....	27
3. วิธีดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 สถานที่ดำเนินการศึกษา.....	31
3.1.1 ภาคสนาม.....	31
3.1.2 ห้องปฏิบัติการ.....	31
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการศึกษา.....	31
3.3 เคมีภัณฑ์.....	31
3.4 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา.....	32

บทที่	หน้า
3.5 วิธีดำเนินการศึกษา.....	33
3.5.1 ตัวอย่างพลาสติกชีวภาพ.....	33
3.5.2 ดินบ่อฝังกลบขยะและกากตะกอน.....	34
3.5.3 การเตรียมหน่วยทดลอง.....	35
3.5.4 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ.....	35
3.5.5 การศึกษาการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพด้วยระบบการย่อยสลายแบบ ไร้ออกซิเจนภายใต้สภาวะที่คัดเลือก.....	38
3.5.6 การตรวจผลการทดลอง.....	39
1) ร้อยละน้ำหนักแห้งที่เหลือจากการย่อยสลายทางชีวภาพ.....	39
2) ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลง.....	39
3) ของแข็งระเหย.....	40
4) ก๊าซชีวภาพ.....	40
5) พื้นผิวพลาสติกชีวภาพ.....	40
6) วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชัน.....	40
7) วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน.....	40
3.5.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40
4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	41
4.1 สมบัติของดินบ่อฝังกลบขยะและกากตะกอน.....	41
4.2 การศึกษาเพื่อคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ..	41
4.2.1 พอลิแลคติกแอซิด.....	42
4.2.2 พอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท.....	45
4.3 การศึกษาการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพด้วยระบบการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนภายใต้สภาวะที่คัดเลือก.....	49
4.3.1 การย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิดภายใต้สภาวะที่คัดเลือก.....	50
4.3.2 การย่อยสลายของพอลิเอริลีนอะดิเพท – โค – เทเรฟธาเลท ภายใต้สภาวะที่คัดเลือก.....	55
4.3.3 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของ พอลิแลคติกแอซิด และ พอลิเอริลีนอะดิเพท – โค – เทเรฟธาเลท ภายใต้สภาวะคัดเลือก.....	58
4.3.3.1 ร้อยละของแข็งระเหย และค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลง.....	58
4.3.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการย่อยสลายทางชีวภาพของ พอลิแลคติกแอซิดและพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท.....	60

บทที่	หน้า
4.3.3.3 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิแลคติก แอซิดและพอลิบีวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท.....	62 63
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	63
5.1 สรุปผลการศึกษา.....	64
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	65
รายการอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	70
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	82

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	4
2.2 สมบัติของ PLA ที่ผลิตเพื่อการค้า.....	12
2.3 สมบัติของ PBAT ที่ผลิตเพื่อการค้า.....	14
2.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอสเตอร์ที่เป็นสายโซ่พอลิคาร์บอเนต พอลิยูรีเทน และพอลิเอไมด์ และอุณหภูมิการหลอมเหลว.....	23
3.1 โมเดลหมายเลข BB0316.....	37
3.2 ปัจจัยและรหัสปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง.....	37
3.3 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในแต่ละหน่วยทดลองต่อพลาสติกทดสอบ 1 ชนิด.....	38
4.1 สมบัติของดินบ่อฝังกลบขยะและกากตะกอน.....	43
4.2 แสดงร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงของ PLA และ PBAT หลังจากการทดสอบ การย่อยสลายเป็นเวลา 60 วัน.....	48
4.3 สรุปอิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีต่อการย่อยสลาย ของ PLA และ PBAT.....	49
4.4 T95 T50 และ T5 ของ PLA และ PBAT เปรียบเทียบก่อนและหลังการ ทดสอบการย่อยสลาย 60 วัน.....	62

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แหล่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	7
2.2 การผลิตพอลิแลกติกแอซิด.....	11
2.3 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแลกติกแอซิด.....	12
2.4 โครงสร้างทางเคมีของ PBAT.....	13
2.5 ชั้นที่ 1 การแตกเป็นชั้นของพลาสติกในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ จากแสงความสั้น เอนไซม์จากจุลินทรีย์ หรือ ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมอื่นๆ.....	16
2.6 ชั้นที่ 2 การย่อยสลายทางชีวภาพ เกิดขึ้นหลังจากพลาสติกแตกเป็นชั้น และเป็นโซ่คาร์บอนสายสั้นๆ.....	16
2.7 ขั้นตอนกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน.....	18
2.8 Acetogenesis pathway (Acetyl-CoA pathway).....	20
2.9 อุณหภูมิการหลอมเหลวและการย่อยสลายของพลาสติกชนิดต่างๆ.....	23
3.1 Fourier Transform Infrared (FT - IR) Spectroscopy.....	32
3.2 Thermogravimetric Analyzer (TGA) รุ่น TGA7.....	32
3.3 Gas Chromatography (GC - TCD) รุ่น GC - 14B.....	33
3.4 Scanning electron microscope รุ่น JSM-5410LV.....	34
3.5 พลาสติกชีวภาพและวัสดุมาตรฐาน.....	35
3.6 ดิน กากตะกอน และ หน่วยทดลอง.....	35
3.7 หน่วยทดลองต่อกับชุดเก็บก๊าซ.....	39
3.8 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของชุดเก็บก๊าซชีวภาพ.....	39
4.1 แผนภูมิแสดงปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยสลายของ PLA.....	42
4.2 แผนภูมิแสดงปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อการย่อยสลายของ PLA.....	43
4.3 แผนภาพแสดงการกระจายแบบปกติของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการย่อยสลาย ของ PLA.....	43
4.4 แผนภูมิ cube plot แสดงผลการย่อยสลายของ PLA ภายใต้สภาวะต่างๆ.....	44
4.5 แผนภูมิแสดงปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยสลายของ PBAT.....	45
4.6 แผนภูมิแสดงปัจจัยร่วมที่มีผลต่อการย่อยสลายของ PBAT.....	45
4.7 แผนภาพแสดงการกระจายแบบปกติของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการย่อยสลาย ของ PBAT.....	46
4.8 แผนภูมิ cube plot แสดงผลการย่อยสลายของ PBAT ภายใต้สภาวะต่างๆ.....	46
4.9 ร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงจากการย่อยสลาย.....	47

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
4.10 ร้อยละน้ำหนักแห้งของ PLA PBAT CE และ PE ที่ลดลงจากการย่อยสลาย 3 ทางชีวภาพภายใต้สภาวะที่คัดเลือก.....	50
4.11 การเปลี่ยนแปลงของ PLA หลังจากการทดลองที่เวลาต่างๆ.....	50
4.12 ไฮดรอลิซิสและการตัดแบบสุ่มบริเวณหมู่เอสเทอร์.....	51
4.13 การเปลี่ยนแปลงของ PBAT หลังจากการทดลองที่เวลาต่างๆ.....	52
4.14 ร้อยละของแข็งระเหยในดินผสมกากตะกอนที่วัดได้จากการย่อยสลาย ของ PLA PBAT CE และ Blank ภายใต้สภาวะที่คัดเลือก.....	53
4.15 ค่าพี-เอชที่เปลี่ยนแปลงในดินผสมกากตะกอนจากการย่อยสลาย ของ PLA PBAT CE และ Blank ภายใต้สภาวะที่คัดเลือก.....	54
4.16 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยในแต่ละช่วงการเก็บตัวอย่างจากการทดสอบ การย่อยสลายของ PLA PBAT CE และ Blank ภายใต้สภาวะที่คัดเลือก.....	54
4.17 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยสะสมจากการทดสอบการย่อยสลาย ของ PLA PBAT CE และ Blank ภายใต้สภาวะที่คัดเลือก.....	55
4.18 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA PBAT CE และ Blank ภายใต้สภาวะที่คัดเลือก.....	56
4.19 การเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของ PLA หลังจากสิ้นสุดการทดลอง.....	57
4.20 การเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของ PBAT หลังจากสิ้นสุดการทดลอง.....	58
4.21 FT – IR สเปกตรัมของ pure PLA และ PLA.....	59
4.22 FT – IR สเปกตรัมของ pure PBAT และ PBAT.....	60
4.23 TGA เทอร์โมแกรมของ PLA ก่อนเปรียบเทียบกับ หลังการย่อยสลาย 60 วัน.....	61
4.24 TGA เทอร์โมแกรมของ PBAT ก่อนเปรียบเทียบกับ หลังการย่อยสลาย 60 วัน.....	62

คำย่อและคำจำกัดความ

คำย่อ	คำเต็ม
ASTM	American Society for Testing and Materials
ISO	International Organization for Standardization
BPS Japan	Biodegradable Plastics Society, Japan
CEN	the European Committee for Standardizations
MTEC	National Metal and Materials Technology Center
PLA	polylactic acid
PBAT	poly (butylene adipate-co-terephthalate)
Tg	glass transition temperature

เทคโนโลยีต้นน้ำ (Upstream Technology) หมายถึง ขั้นตอนแรกในการเปลี่ยนวัตถุดิบทางการเกษตร เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย ฯลฯ ไปเป็นมอนอเมอร์โดยกระบวนการเทคโนโลยีชีวภาพ (biotechnology) เช่น การหมักด้วยจุลชีพที่จำเพาะ ดังในกรณีของการหมัก แป้งให้เป็นกรดแลคติก อย่างไรก็ดี กระบวนการทางชีวภาพอาจครอบคลุมถึง

เทคโนโลยีกลางน้ำ (Intermediate Technology) หมายถึง ขั้นตอนกลางในการเปลี่ยนมอนอเมอร์ที่เป็นโมเลกุลเล็กให้เป็นสายโซ่ของพอลิเมอร์ ซึ่งอาจทำได้ทั้งกระบวนการเทคโนโลยีทางชีวภาพโดยให้จุลชีพ หรือด้วยกระบวนการพอลิเมอร์สังเคราะห์ (polymer synthesis technology) โดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่มอนอเมอร์เชื่อมโยงกันเป็นสายโซ่ยาว ได้เป็นผงหรือเม็ดพอลิเมอร์ (polymer powder or resin) อย่างไรก็ดี กระบวนการทางชีวภาพอาจครอบคลุมทั้งขั้นต้นและขั้นกลางด้วย เช่นในกรณีของพอลิไฮดรอกซีลอะคริเลต ซึ่งเตรียมได้โดยตรงจากแป้งพอลิเมอร์ด้วยกลไกของจุลินทรีย์จำเพาะ

เทคโนโลยีปลายน้ำ (Downstream Technology) หมายถึง ขั้นตอนท้ายสุดในการใช้เม็ดพลาสติกชีวภาพมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติก ซึ่งครอบคลุมกระบวนการการปรับคุณสมบัติของเม็ดพลาสติกให้เหมาะสมต่อการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้ด้วยการใช้เทคโนโลยีการคอมพาวด์ (compounding) รวมทั้งการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยการใช้เทคโนโลยีการขึ้นรูป (processing) ให้เป็นผลิตภัณฑ์ประเภทต่าง ๆ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ ที่อำนวยความสะดวกให้แก่มนุษย์ล้วนมีพลาสติกเป็นส่วนประกอบเนื่องจากสามารถตอบสนองต้องการใช้งาน แต่ถึงแม้จะมีจุดเด่นและให้ความพึงพอใจแก่มนุษย์ได้เท่าไรก็ตาม แต่ปัญหาด้านการย่อยสลายยากและตกค้างในธรรมชาติส่งผลให้เกิดปัญหาเรื่องของการกำจัดขยะ การหาพื้นที่ฝังกลบ หรือการกำจัดด้วยการเผาไหม้อันก่อให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Nishide และคณะ, 1999; Ishigaki และคณะ, 2004; Kim และคณะ, 2009) ประเด็นเหล่านี้เป็นประเด็นปัญหาสำคัญซึ่งเป็นที่ยอมรับแล้วว่าต้องเร่งหาวิธีแก้ไข ดังนั้นการใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงเป็นวิธีที่สามารถใช้แก้ไขปัญหาดังกล่าว (Yosita และคณะ, 2004) การพัฒนาวัสดุเพื่อผลิตพลาสติกชนิดใหม่เพื่อการใช้งานในอนาคตก็เป็นประเด็นหลักที่ต้องศึกษาสำหรับรองรับมาตรการและนโยบายการจัดการในด้านการรักษาสิ่งแวดล้อม เช่น ผลิตภัณฑ์สินค้าที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (กล้าณรงค์, 2546)

Polylactic Acid (PLA) และ Poly(butyleneadipate - co - butylene terephthalate) (PBAT) ถูกออกแบบให้ย่อยสลายได้ในสิ่งแวดล้อม และหากพิจารณาถึงการจัดการขยะพลาสติกร่วมกับระบบการกำจัดขยะแบบฝังกลบ พลาสติกชีวภาพเหล่านี้สามารถเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ได้ด้วยปฏิกิริยาทางเอนไซม์ (Calil, 2007) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ (สภาวะมีอากาศ) และมีเทน (สภาวะไร้ออกซิเจน) จากปฏิกิริยาดังกล่าวในสภาวะไร้ออกซิเจนสามารถผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นพลังงานทดแทน (Yagi และคณะ, 2009)

การวิจัยครั้งนี้ใช้พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 2 ชนิด ได้แก่ PLA และ PBAT เนื่องจากพลาสติกทั้ง 2 ชนิดนี้กำลังจะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายกว่าแต่ก่อนซึ่งนิยมนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เช่น ไหมละลาย วัสดุค้ำจุน แต่ในปัจจุบันมีการนำไปผลิตเป็นภาชนะและบรรจุภัณฑ์ต่างๆมากขึ้น (อมรรัตน์, 2554) ผู้วิจัยได้ทำการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมและตรวจสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA และ PBAT โดยใช้ดินจากบ่อฝังกลบขยะผสมกากตะกอนอัตราส่วนต่างๆภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ต่างจากนักวิจัยท่านอื่นที่ทำการทดลองโดยใช้สภาวะการหมักปุ๋ย (Tuominen และคณะ, 2002; Sedlarik และคณะ, 2008; Rudeekit, 2009) จากนั้นทำการเก็บข้อมูลหาอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ และเปรียบเทียบการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเทียบกับเซลล์ูโลซจากกระดาษกรอง

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพด้วยดินจากบ่อฝังกลบขยะผสมกากตะกอนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ทดลองหาสภาวะที่มีผลต่อการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ (PLA และ PBAT) ด้วยระบบไร้ออกซิเจน ซึ่งได้แก่ อัตราส่วนของกากตะกอน อุณหภูมิ ความชื้นของดิน และปริมาณไนโตรเจน

1.3.2 ทดสอบการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพทั่วไปด้วยระบบไร้ออกซิเจนภายใต้สภาวะที่เหมาะสมเปรียบเทียบกับกรย่อยสลายของวัสดุมาตรฐาน ได้แก่ เซลลูโลส และพอลิเอทิลีน

1.3.3 ศึกษาหน้าหน้าของตัวอย่างพลาสติกชีวภาพที่เปลี่ยนแปลงไปและพื้นผิวที่ถูกย่อยสลายด้วยกล้อง scanning electron microscope (SEM) เปรียบเทียบกับวัสดุมาตรฐาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบสภาวะที่เหมาะสม และอัตราการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพชนิด PLA และ PBAT ในสภาวะไร้ออกซิเจน

1.4.2 เป็นข้อมูลสำหรับการวิจัยต่อไปเกี่ยวกับระบบย่อยสลายพลาสติกชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนต่อไปในอนาคต

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

สืบเนื่องจากแนวโน้มการใช้งานพลาสติกย่อยสลายในอนาคตได้เพิ่มขึ้น เนื่องจากหลายสาเหตุ เช่น มีการค้นพบ และพัฒนากระบวนการผลิตใหม่ๆ ทำให้พลาสติกมีราคาต่ำลง และมีสมบัติต่างๆดีขึ้น รวมถึงการมีกฎข้อบังคับ และค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะที่สูงขึ้น ทำให้บริษัทต่างๆ ทำการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่มีสมบัติหลากหลายแตกต่างกัน บางครั้งผลิตภัณฑ์เหล่านี้ไม่เกิดการย่อยสลายผ่านกระบวนการทางชีวภาพอย่างแท้จริง เพื่อควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว ปัจจุบันจึงมีหลายองค์กรทั่วโลกได้ดำเนินการจัดทำมาตรฐานผลิตภัณฑ์ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (Biodegradable Plastics) ขึ้น และให้คำจำกัดความของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยไว้ ดังนี้

ASTM D6400-99 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพคือ พลาสติกที่ย่อยสลายได้เนื่องมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น แบคทีเรีย ราและสาหร่าย

ISO 472:1998 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ พลาสติกที่ถูกออกแบบให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใต้สภาวะแวดล้อมที่กำหนด เป็นสาเหตุทำให้สมบัติต่างๆ ของพลาสติกลดลงภายในช่วงเวลาหนึ่งซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้วิธีทดสอบมาตรฐานที่เหมาะสม ผลการทดสอบสามารถนำมาใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีดังกล่าวต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ในธรรมชาติ

BPS Japan (1994) พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ คือ วัสดุพอลิเมอร์ ที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสารประกอบที่มีน้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลงได้ โดยมีอย่างน้อย 1 ขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายนี้เกิดผ่านกระบวนการเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในธรรมชาติ

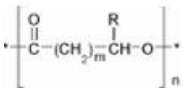
CEN (1993) วัสดุย่อยสลายได้ คือ วัสดุที่การย่อยสลายเป็นผลมาจากการทำงานของจุลินทรีย์ทำให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และ/หรือ แก๊สมีเทน และมวลชีวภาพใหม่เป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้าย

สำหรับคำว่า Biodegradation (หรือการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ) ย่อมาจาก biotic degradation ในมาตรฐานต่างๆ มีคำจำกัดความที่ใช้พื้นฐานแนวคิดเดียวกัน คือ เป็นการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีต่อชิ้นวัสดุ เป็นผลให้วัสดุเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ หรือแก๊สมีเทนและน้ำ (MTEC, 2007)

2.2 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

เมื่อจำแนกตามองค์ประกอบพื้นฐานของพลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน พอลิเอสเทอร์ และพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ประเภทอื่น ดังตาราง 2.1

ตารางที่ 2.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

	ประเภทพอลิเมอร์	รายละเอียด	ประเภทวัตถุดิบ
พลาสติกที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน	แป้งที่มีสมบัติเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic Starch, TPS)	มีแป้งเป็นส่วนประกอบมากกว่าร้อยละ 70 และผ่านการทำให้เป็นเจลลิติน	แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่เตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้
	แป้งผสมพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรง (Starch-aliphatic polyester blends)	แป้งนำไปผสมกับพอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรง เช่น PLA PCL PBS PBSA	<ul style="list-style-type: none"> • แป้งเตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ • พอลิเอสเทอร์เตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี และวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้
	แป้งผสมพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Starch-PVA blends)	แป้งนำไปผสมกับ PVA	<ul style="list-style-type: none"> • แป้งเตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ • PVA จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี
พอลิเอสเทอร์	พอลิแลคติกแอซิด (Poly Lactic Acid, PLA) 	พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงที่มีกรดแลคติกหรือแลคไทด์เป็นมอนอเมอร์	เตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้
	พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Poly Hydroxyalkanoates, PHAs) 	กลุ่มพอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรงซึ่งผลิตได้ทางธรรมชาติโดยแบคทีเรีย	เตรียมได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้

ตารางที่ 2.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (ต่อ)

	ประเภทพอลิเมอร์	รายละเอียด	ประเภทวัตถุดิบ
พอลิเอสเทอร์	<p>พอลิบิวทิลีนเทอเรพธาลेट (Poly ButyleneTerephthalate,PBT)</p> 	<p>พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงที่มีวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้างเตรียมได้จากมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ 1,4-บิวเทนไดออล (BDO) และกรดเทอเรพธาลิก (TPA) หรือไดเมทิลเทอเรพธาลेट (DMT)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • BDO เตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีและวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ • TPA และ DMT เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี
	<p>พอลิไตรเมทิลีนเทอเรพธาลेट (Poly Trimethylene Terephthalate, PTT)</p> 	<p>พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงที่มีวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้างเตรียมจากมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ 1,3-โพรเพนไดออล (PDO) และกรดเทอเรพธาลิก (TPA) หรือไดเมทิลเทอเรพธาลेट (DMT)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • PDO เตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีและวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ • TPA และ DMT เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี
พอลิเอไมด์ที่ย่อยสลายได้ประเภทอื่น	<p>พอลิเอไมด์ (Poly Amides,PAs) มี 2 ประเภท คือ</p> <p>1. ประเภท AABB</p>  <p>2. ประเภท AB</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • พอลิเอไมด์สังเคราะห์ประเภทAABBเตรียมได้จากมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ ไดเอมีน และกรดไดคาร์บอกซิลิก เช่น ไนลอน 66 ไนลอน 69 • พอลิเอไมด์สังเคราะห์ประเภท AB เตรียมได้จากกรดอะมิโนหรือแลคแทม เช่น ไนลอน 6 	<ul style="list-style-type: none"> • ไดเอมีนเตรียมได้ จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี • กรดไดคาร์บอกซิลิก กรดอะมิโน และแลคแทมเตรียมได้จากทั้งผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีและวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้
	<p>พอลิยูรีเทน (Poly Urethane,PURs)</p> 	<p>พอลิยูรีเทนสังเคราะห์เตรียมได้จากมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ ไอโซไซยาเนต(เช่น TDI MDI) และไดออล หรือพอลิออล (เช่น พอลิเอสเทอร์พอลิอีเทอร์)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • ไอโซไซยาเนต เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี • พอลิออล เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีและวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้

ตารางที่ 2.1 ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (ต่อ)

	ประเภทพอลิเมอร์	รายละเอียด	ประเภทวัตถุดิบ
พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ประเภทอื่น	พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Poly Vinyl Alcohol, PVA) $\left[\text{CH}_2 - \underset{\text{OH}}{\text{CH}} \right]_n$	พอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้ และการสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี
	พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ด้วยแสง	พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่มีพันธะเคมีที่แตกหักง่ายภายใต้แสง UV	เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี
	controlled degradation additive master-batches	พลาสติกที่มี การเติมสารเติมแต่งเพื่อให้สามารถย่อยสลายได้	เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี

ที่มา: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551

2.3 เทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.3.1 วัตถุดิบ ที่ใช้ในการทำพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ ได้แก่ พืชผลทางการเกษตรจำพวกแป้งและน้ำตาล เช่นข้าวโพด มันฝรั่ง มันสำปะหลัง อ้อย หัวบีท ข้าวสาลี ข้าวไรย์ และปาล์ม ในประเทศสหรัฐอเมริกา พืชทางการเกษตรหลักที่ใช้ในการผลิตสารตั้งต้น ได้แก่ ข้าวโพด ในขณะที่หัวบีทถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในกลุ่มสหภาพยุโรป นอกจากพืชผลทางการเกษตรแล้ว ยังมีการนำผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมนมโคได้แก่ หางนม มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตมอนอเมอร์ (กรดแลคติก) เนื่องจากความต้องการในการลดต้นทุนการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงมีการแสวงหามวลชีวภาพประเภทอื่นที่มีศักยภาพ และราคาต่ำมาใช้เป็นวัตถุดิบนอกเหนือจากแป้งและน้ำตาล ได้แก่ เซลลูโลส และลิกโนเซลลูโลซิก (lignocellulotic) ที่มีอยู่ในพืช ซึ่งสามารถนำไปย่อยเป็นน้ำตาลได้ อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีสำหรับการย่อยเซลลูโลส และลิกโนเซลลูโลซิกไปเป็นน้ำตาลในระดับอุตสาหกรรมยังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนา

2) แหล่งวัตถุดิบปิโตรเลียม เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ แนพธา (naphtha) และถ่านหินซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ไม่สามารถหาทดแทนได้ ถูกใช้เป็นตัวให้พลังงานและแหล่งวัตถุดิบในกระบวนการผลิตแหล่งวัตถุดิบดังกล่าวนอกจากจะใช้แล้วหมดไปแล้ว กระบวนการผลิต และผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ได้ยังก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมอีกด้วย แหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่คำนึงถึงการนำไปใช้เป็นแหล่งให้พลังงานและแหล่ง

วัตถุดิบในการผลิตวัสดุโดยเฉพาะวัสดุประเภทพลาสติกเพื่อลดการใช้วัตถุดิบปิโตรเลียมลง นอกจากนี้วัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้สามารถแก้ปัญหาเรื่องการขาดแคลนด้านวัตถุดิบแล้วยังช่วยบรรเทาเรื่องผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมด้วย



ภาพที่ 2.1 แหล่งวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

2.3.2 เทคโนโลยีต้นน้ำ – กลางน้ำ

1) กระบวนการหมัก (Fermentation) โดยใช้เทคโนโลยีชีวภาพ

- การเตรียมน้ำตาล โดยเริ่มต้นจากการบดหรือโม่วัตถุดิบทางการเกษตรโดยให้ละเอียดเป็นแป้งจากนั้นทำการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสที่ใช้เอนไซม์ หรือกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา
 - การเตรียมมอนอเมอร์ โดยการนำน้ำตาลไปหมักด้วยจุลินทรีย์ที่เหมาะสมให้เกิดการสังเคราะห์มอนอเมอร์ขึ้น เช่น กรดแลคติก ซึ่งต้องนำไปผ่านกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชัน ใช้ปฏิกิริยาเคมีเพื่อเชื่อมต่อให้เป็นพลาสติกชีวภาพ เช่น PLA (Polylactic Acid)
 - การเตรียมพอลิเมอร์ เป็นกระบวนการผลิตโดยตรงจากการนำวัตถุดิบน้ำตาลหรือน้ำมันไปหมักด้วยจุลินทรีย์ที่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลไปเป็นพอลิเมอร์ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ซึ่งสามารถสกัดออกมาเป็นพอลิเมอร์ได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการผลิตมอนอเมอร์ก่อน ตัวอย่างเช่น PHAs

2) กระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) คือ กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากมอนอเมอร์ซึ่งเป็นหน่วยย่อยที่เกิดปฏิกิริยาเคมี แล้วเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวภายใต้สภาวะต่างๆ เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ ความดัน เป็นต้น ปฏิกิริยาเคมีในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ได้แก่

- ปฏิกิริยาการควบแน่น (condensation): มอนอเมอร์มีส่วนที่ไวต่อปฏิกิริยาที่ปลายทั้งสองเมื่อทำปฏิกิริยากันแล้วจะเกิดการเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว
- ปฏิกิริยาการเติม (addition): มอนอเมอร์มีพันธะคู่อยู่ในโครงสร้างเมื่อเกิดปฏิกิริยาพันธะคู่จะเปิดออกแล้วจึงเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว
- ปฏิกิริยาการเปิดวง (ring-opening): มอนอเมอร์มีโครงสร้างเป็นวงแหวนเมื่อเกิดปฏิกิริยาจะเกิดการเปิดวงแล้วจึงเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว

3) กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยใช้เทคโนโลยีพันธุวิศวกรรม

กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์สามารถทำได้โดยตรงจากการปรับแต่งพันธุกรรมในพืชบางชนิด เช่น Switch Grass โดยหากได้มีการนำยีนที่สำคัญในการสร้างพอลิเมอร์จากจุลินทรีย์ไปใส่ในพืชเป้าหมายเพื่อให้พืชนั้นสามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์ได้โดยตรงจากกระบวนการสังเคราะห์แสงและเก็บสะสมไว้ในส่วนต่างๆ ของพืชซึ่งสามารถสกัดออกมาเป็นพอลิเมอร์ u3652 ได้โดยตรงซึ่งจะทำให้ต้นทุนการผลิตของพลาสติกชีวภาพลดลงมากจนสามารถแข่งขันกับพลาสติกที่ผลิตจากปิโตรเคมี

2.3.3 เทคโนโลยีปลายน้ำ

1) กระบวนการคอมพาวด์ดิ้ง (Compounding)

กระบวนการคอมพาวด์ดิ้ง เป็นเทคโนโลยีที่สำคัญในการปรับสมบัติทางกายภาพและทางกลของพลาสติกชีวภาพ ให้การไหลและการก่อตัวดีขึ้น รวมทั้งมีความยืดหยุ่นแก้ปัญหาเรื่องความเปราะบางเพื่อให้เข้าใกล้กับสมบัติเด่นของพลาสติกที่มาจากปิโตรเคมีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยการผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่นหรือการเติมสารเติมแต่ง (additive) ให้เหมาะสมทั้งกับเงื่อนไขการขึ้นรูปและการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น พลาสติกไซเซออร์ (plasticizer) สารช่วยผสม (compatibilizer) ฟิลเลอร์ (filler) สารเสริมแรง (reinforcing agent) และสารก่อผลึก (nucleating agent) เป็นต้น นอกจากนี้ ยังมีสารเติมแต่งบางชนิดที่ใส่เพื่อลดต้นทุนการผลิต หรือเพื่อแก้ปัญหาที่เกิดจากการใช้สารเติมแต่งอีกชนิดหนึ่ง การผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ ลงไปใน

พอลิเมอร์เรียกว่า พอลิเมอร์คอมพาวด์ (polymer compounding) สารเติมแต่งมีทั้งสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งสามารถจำแนกตามหน้าที่การทำงานได้ 5 ประเภทดังต่อไปนี้

1. สารดัดแปรสมบัติเชิงกล (mechanical property modifiers)
2. สารดัดแปรสมบัติทางเคมี (chemical property modifiers)
3. สารดัดแปรเพื่อความสวยงาม (aesthetic property modifiers)
4. สารดัดแปรสมบัติที่พื้นผิว (surface property modifiers)
5. สารดัดแปรสำหรับกระบวนการผลิต (processing modifiers)

2) กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ (Processing)

การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกทำได้โดยการทำให้เม็ดพลาสติกหลอมเหลวหรืออ่อนตัวด้วยความร้อนหรือใช้แรงอัด เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์พลาสติกสำเร็จรูปในรูปทรงตามต้องการซึ่งจะต้องใช้เทคโนโลยีสำคัญคือการออกแบบและสร้างแม่พิมพ์ที่มีความเที่ยงตรงสูงโดยพลาสติกชีวภาพ จะนำมาขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกได้ด้วยกระบวนการและเครื่องจักรสำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกประเภทต่างๆที่มีอยู่ในอุตสาหกรรมปลายน้ำดังต่อไปนี้

- การอัดรีด (Extrusion) เม็ดพลาสติกสามารถนำไปผสมกับสารที่ให้สี (colorants) และสารเติมแต่งอื่นๆ และถูกป้อนเข้าไปในเครื่องอัดรีดจะมีเกลียวรีดหมุนอัดเม็ดพลาสติกผ่านส่วนให้ความร้อน เม็ดพลาสติกจะผสมกับสารเติมแต่งและหลอมละลายแล้วอัดผ่านช่องแม่แบบ (die) ลักษณะต่างๆ แล้วแต่รูปร่างตามความต้องการ เช่น ใช้สำหรับผลิตหลอดดูดเครื่องดื่ม ท่อพลาสติก แผ่นหรือฟิล์มพลาสติก เป็นต้น

- การอัดรีดแบบแผ่น (Sheeting) พลาสติกจะถูกอัดผ่านลูกกลิ้งที่ร้อน 2 ลูก ถ้าแผ่นพลาสติก มีความหนาน้อยกว่า 0.25 มิลลิเมตรจะได้แผ่นฟิล์ม โดยแผ่นฟิล์มนี้สามารถผลิตได้จากการอัดรีดแบบเป่าหรือ tubular (blow or tubular extrusion)

- การอัดรีดแบบเป่า (Blow extrusion) ใช้สำหรับผลิตฟิล์ม และถุงพลาสติก โดยเม็ดพลาสติกจะถูกหลอมเหลวด้วยความร้อน และถูกดันผ่านช่องที่มีลักษณะวงแหวนแล้วใช้ลมเป่าตรงกลางภายในเพื่อให้พลาสติกเกิดการขยายตัว และมีการดึงอย่างต่อเนื่องในแนวตั้งได้เป็นฟิล์มบางที่มีลักษณะเป็นท่อยาว เมื่อแผ่นฟิล์มเย็นลงจะถูกป้อนผ่านลูกกลิ้งเพื่อทำให้แบนก่อนถูกม้วนเก็บแผ่นฟิล์มที่ได้จะนำมาตัด และปิดบริเวณกันถุงให้ได้ขนาดตามต้องการ หรือหากกรีดคลี่ออกจะได้แผ่นฟิล์ม

- การฉีดเข้าแม่พิมพ์ (Injection moulding) พลาสติกจะถูกหลอมเหลวแล้วอัดผ่านหัวฉีดไปยังแม่พิมพ์โดยใช้แรงดันด้วยระบบลูกสูบ เมื่อพลาสติกเย็นตัวจะ

แข็งตัวตามรูปทรงในแม่แบบแล้วเปิดแม่แบบออกแล้วนำชิ้นงานไปตัดตกแต่งต่อไปใช้สำหรับทำถัง ตะกร้า จาน ชาม เป็นต้น

- การเป่าขึ้นรูป (Blow moulding) เป็นกรรมวิธีการขึ้นรูปต่อเนื่อง โดยวิธีการอัดรีด พลาสติกจะถูกขึ้นรูปเป็นท่อร้อนด้วยการอัดรีด แล้วเป่าลมเข้าไปเพื่อดันให้ผนังของพลาสติกขยายตัวไปกระทบกับแม่พิมพ์พลาสติกจะเย็นตัว และคงรูปเป็นผลิตภัณฑ์ตามรูปแบบของแม่พิมพ์จากนั้นเปิดแม่พิมพ์ออกแล้วนำชิ้นงานไปตัดตกแต่งต่อไปใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ที่กลวงขนาดเล็ก ขวด ของเล่น เป็นต้น

- การหมุนขึ้นรูป (Rotational moulding) พลาสติกที่เป็นผง หรือเหลวถูกใส่ลงในแม่พิมพ์ซึ่งจะถู กทำให้ร้อนขณะหมุน ซึ่งพลาสติกจะถูกเคลือบที่ผนังของแม่พิมพ์ หลังจากเย็นตัวลง เปิดแม่พิมพ์ออกแล้วนำชิ้นงานไปตัดตกแต่งต่อไปใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ที่กลวงขนาดใหญ่ เช่น ของเล่น ถังน้ำแกลลอน เป็นต้น

- การอัดขึ้นรูป (Compression moulding) เป็นการอัดผงพลาสติกโดยใช้ความร้อน และความดันทำให้พลาสติกไหลเข้าเต็มในช่องว่างของแม่พิมพ์เมื่อเย็นตัวลงจะได้ผลิตภัณฑ์ตามแม่พิมพ์ใช้สำหรับผลิตจาน ชาม ถ้วย โครงสวิตช์ไฟฟ้า เป็นต้น

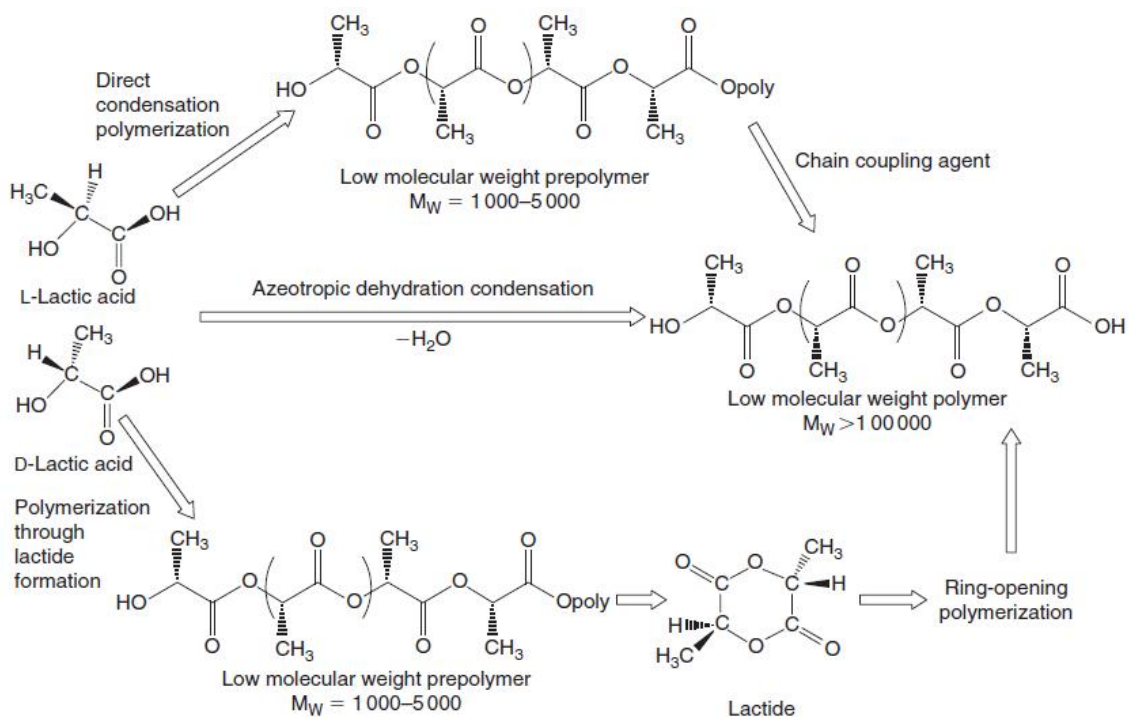
- การขึ้นรูปแบบเทอร์โมฟอร์ม (Thermoforming) เป็นการทำให้แผ่นพลาสติกมีรูปร่างต่าง ๆ ตามแม่แบบ โดยทำให้แผ่นพลาสติกร้อน และอ่อนตัว จากนั้นทำให้มีรูปร่างตามแม่แบบโดยใช้แรงลมดันหรือระบบสูญญากาศทิ้งไว้ให้เย็นตัวก่อนนำออกจากแม่แบบ และผ่านขั้นตอนการตัดขอบที่ไม่ต้องการออก

- การปั่นหลอม (Melt spinning) เป็นการผลิตเส้นใยโดยการนำเม็ดพลาสติกมาหลอมโดยใช้ความร้อนแล้วอัดผ่านหัวฉีดที่มีลักษณะเป็นรูเล็กๆออกมาเป็นเส้นซึ่งจะแข็งตัวเมื่อสัมผัสกับน้ำหรืออากาศเย็น เส้นใยที่ได้ในขั้นตอนนี้ยังไม่แข็งแรงมากนักจึงต้องผ่านขั้นตอนการดึงเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่เส้นใยก่อนที่จะม้วนเก็บไว้เพื่อนำไปถักทอเป็นผืนต่อไป (สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551)

2.4 พอลิแลคติกแอซิด (Polylactic acid หรือ PLA)

เป็นพลาสติกที่ผลิตจากกระบวนการหมักพืชจำพวกแป้ง PLA เป็นแหล่งคาร์บอนที่ได้จากวัตถุดิบที่สร้างขึ้นทดแทนได้ กระบวนการสังเคราะห์ PLA ถูกคิดค้นขึ้นครั้งแรกโดยนักวิจัยของบริษัท Dupon ประเทศสหรัฐอเมริกา ในปี 1932 โดยการให้ความร้อนแกกรดแลคติก ภายใต้ความดันสูญญากาศ และได้ผลิตภัณฑ์เป็น PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ และได้จดสิทธิบัตรไว้ในปี 1954

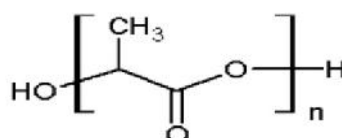
จากนั้นได้มีการศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง แต่เนื่องจากราคาที่สูงของ PLA ทำให้การนำไปใช้งานมุ่งเน้นไปทางด้านการแพทย์ และเกษตรกรรม บริษัท Cargill, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นหนึ่งในบริษัทผู้ผลิต PLA โดยในปี 1987 ได้เริ่มทำการวิจัยเพื่อผลิตกรดแลคติกสายยาว (lactide) และ PLA ในปี 1992 ได้เริ่มการผลิตในระดับโรงงานต้นแบบ จากนั้น ในปี 1997 ได้ร่วมลงทุนกับบริษัท Dow Chemical Company, Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกา แล้วสร้างบริษัท Cargill Dow LLC ขึ้นมา เพื่อทำการพัฒนาเทคโนโลยี และผลิตภัณฑ์ PLA เพื่อการค้าอย่างเต็มรูปแบบ และในปี 2001 ได้ส่งผลิตภัณฑ์ที่มีชื่อทางการค้าว่า Nature Work[®] ออกมาสู่ตลาดบริษัท ในปี 2005 บริษัท Dow Chemical Company, Inc. ได้ถอนตัวออกจึงมีการเปลี่ยนชื่อเป็นบริษัท Nature Work[®] แทน PLA ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของวัสดุที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีแนวทางหนึ่งที่ได้พัฒนาจนประสบความสำเร็จและได้พอลิเมอร์ในปริมาณที่เหมาะสมแก่การลงทุน คือ การใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้จากข้าวโพดโดยการแยกส่วนของแป้งและน้ำตาลที่หลงเหลือในเศษข้าวโพด น้ำตาลที่สกัดได้จะนำไปเข้ากระบวนการหมักจนกระทั่งได้ผลผลิต คือ กรดแลคติก (Flieger, M. และคณะ, 2003) แล้วจึงนำไปเข้ากระบวนการอื่นๆต่อไป



ภาพที่ 2.2 การผลิตพอลิแลคติกแอซิด

ที่มา: Avérous, 2008

ความปลอดภัยของ PLA ถูกจัดให้เป็น GRAS (generally recognized as safe) โดยสำนักงานอาหารและยาของประเทศสหรัฐอเมริกาสมบัติของ PLA มีลักษณะใส และมีความแวววาวสูงซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของสารเติมแต่งที่ใช้ PLA มีสมบัติเชิงกล (mechanical property) และสามารถนำไปใช้งานได้เช่นเดียวกับพอลิเมอร์พื้นฐานทั่วไปที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก PLA สามารถกักเก็บกลิ่น และรสชาติได้ดี มีความต้านทานต่อน้ำมัน และไขมันสูง ในขณะที่ก๊าซออกซิเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำแพร่ผ่านได้ดี มีความคงทนต่อการกระแทก (impact strength) ต่ำ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ PVC ที่ไม่มีการเติมสารเสริมสร้างพลาสติก มีความแข็ง ความความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับ polyethylene terephthalate (PET) นอกจากนี้ PLA ยังมีสมบัติใกล้เคียงกับ Polystyrene (PS) และสามารถนำไปดัดแปรให้มีสมบัติใกล้เคียงกับ polyethylene (PE) หรือ polypropylene (PP) ดังนั้น PLA จึงสามารถนำไปปรับปรุงสมบัติพื้นฐานทั้งด้านการขึ้นรูปและการใช้งานได้เช่นเดียวกับพลาสติกที่ผลิตจากระบวนการปิโตรเคมี ซึ่งสมบัติของ PLA ที่ผลิตเพื่อการค้าได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของ PLA

ที่มา: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551

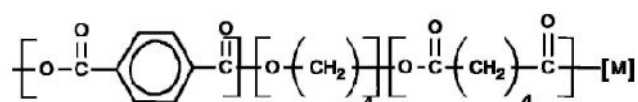
ตารางที่ 2.2 สมบัติของ PLA ที่ผลิตเพื่อการค้า

สมบัติ	Nature Work [®] PLA	Biomer [®] L9000
ความหนาแน่น (กรัม/มล.)	1.24	1.25
T _g (C°)	56.7 - 57.9	n/a
T _m (C°)	140 - 152	n/a
HDT (C°)	40 - 45 (amorphous) 135 (crystalline)	n/a
Tensile strength (MPa)	53	70
Elongation (%)	6	2.4
Flexular Modulus (MPa)	350 - 450	3600

ที่มา สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551

2.5 พอลิบีวาทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (Poly (butylene adipate-co-terephthalate) หรือ PBAT)

คือ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีลักษณะเป็น aliphatic - aromatic copolyester มีองค์ประกอบพื้นฐานจากกระบวนการปิโตรเลียม (petroleum base) แต่สามารถย่อยสลายได้ในสิ่งแวดล้อม เนื่องจากถูกออกแบบให้มีส่วนหาง (tailor - made molecular structures) ซึ่งประกอบด้วย terephthalic acid, adipic acid และ 1, 4-butanediol เชื่อมต่อกันอยู่ มีระบบเชื่อมโยงโมเลกุลสามารถนำมอนอเมอร์ชนิดอื่นมาต่อ เช่น สายไฮโดรคาร์บอน ส่งผลให้มีการต่อกันเป็นแขนง (branching) นำไปสู่การต่อกันเป็นสายยาวเพื่อเพิ่มน้ำหนักโมเลกุล โครงสร้าง PBAT แสดงดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ PBAT

PBAT มีชื่อทางการค้า เช่น Ecoflex[®] ผลิตโดยบริษัท BASF (เยอรมัน) Easter Bio[®] ผลิตโดย Eastman Chemical (สหรัฐอเมริกา) Origo-Bi[®] ผลิตโดย Novamont (อิตาลี) การผลิต PBAT เริ่มจากการควบรวม (polycondensation) 1, 4-butanediol adipic acid และ terephthalic acid (มากกว่าร้อยละ 35) เข้าด้วยกัน ทำให้ได้พลาสติกที่มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีในเรื่องของอุณหภูมิ (thermal property) แต่อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกดังกล่าวจะลดลงเมื่อมี terephthalic acid มากกว่าร้อยละ 55 ในปี ค.ศ. 1997 บริษัท Dupont (สหรัฐอเมริกา) ได้ผลิตเรซินย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มี copolyester เป็นองค์ประกอบ มีชื่อทางการค้าว่า Biomax[®] ซึ่งมีการพัฒนาจาก poly (ethylene terephthalate) ที่มี terephthalic acid ปริมาณมาก และมีอุณหภูมิสภาพคล้ายแก้วสูง (T_m ประมาณ 200 °C) เมื่ออยู่ในลักษณะฟิล์ม PBAT จะมีความทนทานต่อแรงฉีกและมีความยืดหยุ่น (tear-resistant and flexible) ทนน้ำและการเปลี่ยนแปลงความชื้น (water and fluctuations in humidity) ลักษณะเด่นของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจาก Ecoflex คือ ทนต่อแรง มีความยืดหยุ่น และใช้พลังงานต่ำในการผลิต ซึ่งลักษณะเหล่านี้มีความคล้ายคลึงกับลักษณะฟิล์มที่ผลิตจากพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (Polyethylene-low density film: PE-LD) แต่มีลักษณะต่างจาก PELD ในเรื่องการซึมผ่านของอากาศ Ecoflex สามารถให้อากาศผ่านได้ปานกลาง และสามารถ

ปรับเปลี่ยนได้จากสูตรและกระบวนการผลิต (different Ecoflex-batches) และ Ecoflex สามารถใช้กระบวนการผลิตเดียวกับ PE-LD

ตารางที่ 2.3 สมบัติของ PBAT ที่ผลิตเพื่อการค้า

สมบัติ	PBAT
ความหนาแน่น (กรัม/มล.)	1.25 – 1.27
T_g (C°)	-30
T_m (C°)	110 - 115
HDT (C°)	80
Tensile strength (MPA)	32
Elongation (%)	580

ที่มา: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551

2.6 กลไกการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

กลไกการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (ธนาวดี ลีจากภัย, 2549) แบ่งได้ 2 ขั้นตอน ได้แก่ การแตก/หักเป็นชิ้นเล็ก (fragmentation) และการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation)

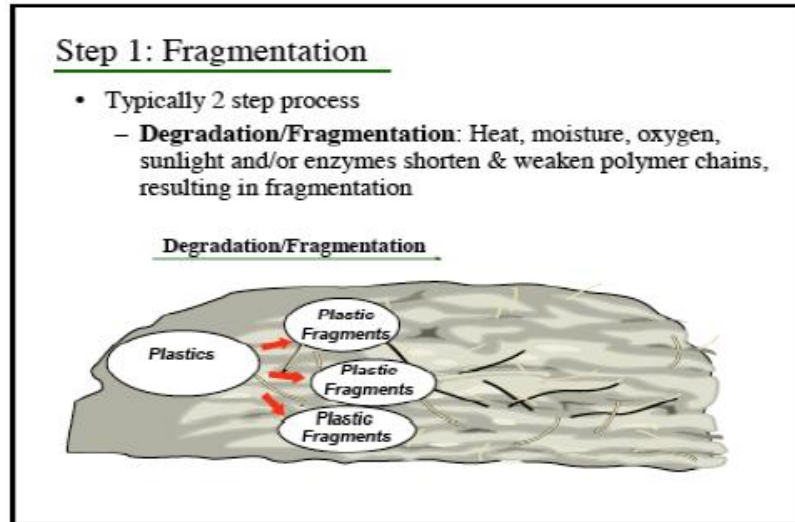
2.6.1 การแตก/หักเป็นชิ้นเล็ก (Fragmentation)

• การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidative degradation) การย่อยสลายผ่าน ปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติกเป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้าๆ โดยมีออกซิเจน และความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) ของแสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็น อนุมูลอิสระ RO และ OH ที่ไม่เสถียรและเข้าทำปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้น

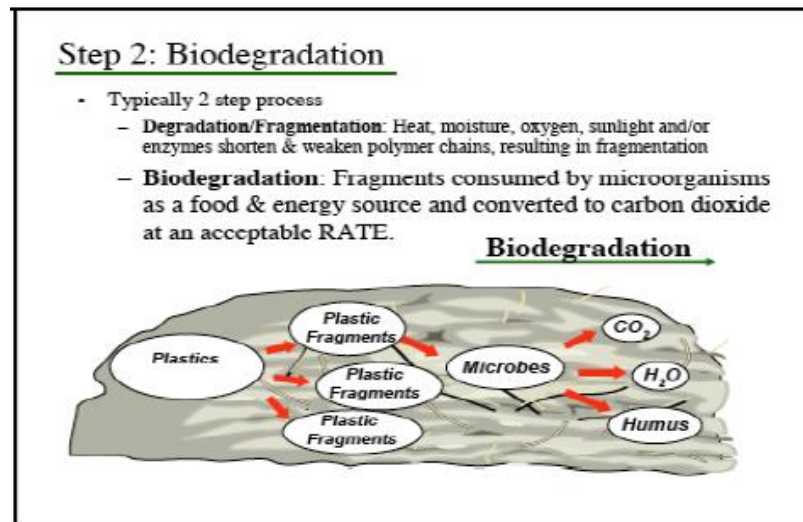
ภายในช่วงเวลาที่กำหนดโดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชันซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalysis) การแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์เป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

- การย่อยสลายด้วยแสง (photodegradable plastic) การย่อยสลายด้วยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความว่องไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (ketone) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระซึ่งไม่เสถียรจึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีด หรือแม้กระทั่งชั้นพลาสติกที่มีการเคลือบด้วยหมึกที่หนามากบนพื้นผิว เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรงประเทศฝรั่งเศสใช้พลาสติกประเภทนี้ ขนาดกว้างประมาณ 1 เมตร ปลูกบนทุ่งนาเพื่อกักเก็บความร้อนในดินและเร่งผลผลิตอายุใช้งานอยู่ระหว่าง 1-3 ปีก่อนพายุพัดไปกับดิน แต่พลาสติกชนิดนี้ต้องใช้ในภูมิภาคที่มีแสงแดดสม่ำเสมอ เพื่อให้สลายตัวตามอัตราที่คาดการณ์ได้

- การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolytic degradation plastic) การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิเอโนไฮไดรด์ พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทนผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ โดยทั่วไปปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic hydrolytic) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (non-catalytic hydrolytic) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (external catalytic degradation) และแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลพอลิเมอร์เองในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (internal catalytic degradation) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายนอกมี 2 ชนิด คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเอนไซม์ต่างๆ (enzymes) เช่น depolymerase lipase esterase และ glycolhydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzyme) เช่น โลหะแอสคาไลน์ (alkaline metals) เบส (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส



ภาพที่ 2.5 ขั้นที่ 1 การแตกเป็นชิ้นของพลาสติกในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพจากแสง ความชื้น เอนไซม์จากจุลินทรีย์ หรือ ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมอื่นๆ



ภาพที่ 2.6 ขั้นที่ 2 การย่อยสลายทางชีวภาพ เกิดขึ้นหลังจากพลาสติกแตกเป็นชิ้น และเป็นไซ้คาร์บอนสายสั้นๆ

ที่มา: Biodegradable product institute, 2006

2.6.2 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)

• การย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) มีกลไกการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ และแบคทีเรีย เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมวลชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นในการเจริญเติบโต และดำรงชีวิตของพืชรวมถึงมันสำปะหลัง และข้าวโพด ที่เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ดังนั้นวงจรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงมีรูปแบบคือ มีสมบัติในการใช้งานเช่นเดียวกับพลาสติกทั่วไป แต่จะมีความแตกต่างกันตรงที่เมื่อทิ้งพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนี้ไปเป็นขยะ และอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม มีแบคทีเรีย และเอนไซม์ พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพนั้นก็จะเกิดการย่อยสลาย

2.7 การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน และการเกิดมีเทน

อินทรีย์สารสามารถย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนได้โดยอาศัยกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์หรือระหว่างกลุ่มจุลินทรีย์ที่ต่อเนื่อง และเป็นลำดับ ได้แก่ การสลายด้วยน้ำ (hydrolysis/ liquefaction) การเกิดกรด (acidogenesis) และ การเกิดมีเทน (methanogenesis) ชั้นแรกจุลินทรีย์กลุ่มที่หนึ่ง ผลิตและหลั่งเอนไซม์ซึ่งมีสมบัติในการสลายอินทรีย์สารที่อยู่ในรูปพอลิเมอร์ให้อยู่ในรูปมอนอเมอร์ เช่น กลูโคส และกรดอะมิโน ชั้นต่อมาจุลินทรีย์กลุ่มที่สองเปลี่ยนสารเหล่านี้ให้เป็นกรดไขมันระเหยได้ ก๊าซไฮโดรเจน และกรดอะซิติก จุลินทรีย์กลุ่มนี้ คือ acetogenic bacteria ชั้นสุดท้ายจุลินทรีย์กลุ่มที่สาม คือ methanogenic bacteria เปลี่ยนไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และกรดอะซิติก เป็นมีเทน ดังรายละเอียดที่จะอธิบายต่อไปข้างล่างนี้

2.7.1 ขั้นตอนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (anaerobic digestion process) ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน

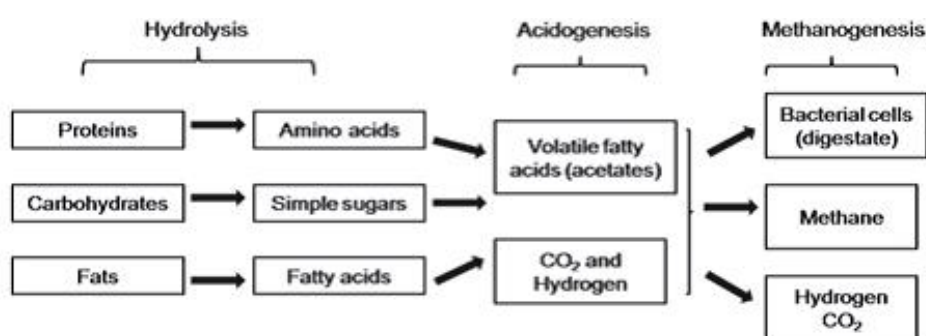
1) การสลายด้วยน้ำ (hydrolysis/ liquefaction)

ขั้นตอนนี้จุลินทรีย์เปลี่ยนสารอินทรีย์ที่โมเลกุลมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ เป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง และละลายน้ำ เช่น เซลลูโลส ถูกเปลี่ยนไปเป็น น้ำตาล / แอลกอฮอล์ หรือโปรตีน ถูกเปลี่ยนไปเป็นเปปไทด์/กรดอะมิโน เป็นต้น การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้อาศัยเอนไซม์ที่ผลิต และปล่อยมาจากจุลินทรีย์กลุ่ม fermentative bacteria ช่วยเร่งการแตกตัวของโมเลกุล

ปฏิกิริยาการสลายด้วยน้ำ (hydrolysis/ liquefaction)

ลิปิด	→	กรดไขมัน
พอลิแซ็กคาไรด์	→	มอนอแซ็กคาไรด์
โปรตีน	→	กรดอะมิโน
กรดนิวคลีอิก	→	พิวรีน และ ไพริมิดีน

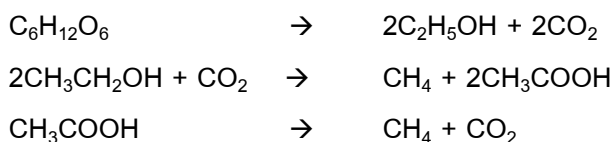
แบคทีเรียกลุ่มนี้จะได้รับสารอาหารบางชนิดจากสารอินทรีย์ผ่านการดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้โดยตรง เรียกเอนไซม์เหล่านี้ว่า ไฮโดรไลติก เอนไซม์ (hydrolytic enzymes) เช่น ไลเปส (lipases) โปรตีเอส (proteases) เซลลูเลส (cellulases) อะไมเลส (amylases) ฯลฯ ปฏิกริยาขั้นนี้มีความสำคัญ และเป็นปฏิกิริยาที่สามารถกำหนด (rate limiting) ผลการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โรงงานอุตสาหกรรมบางแห่งใช้วิธีทางเคมีเพื่อเพิ่ม/ส่งเสริมปฏิกิริยาการสลายด้วยน้ำซึ่งให้ผลในการย่อยสลายอินทรีย์สารที่รวดเร็ว และผลได้ของก๊าซมีเทนที่มากขึ้น



ภาพที่ 2.7 ขั้นตอนกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน
ที่มา: Santibáñez, 2011

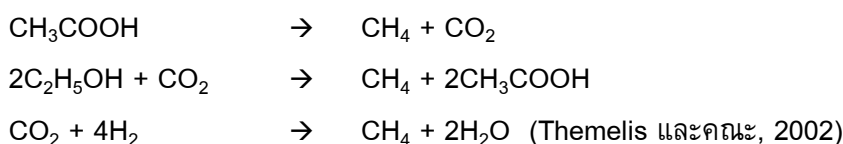
2) การเกิดกรดอะซิติก (Acetogenesis)

ขั้นตอนนี้จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างกรด เช่น acetogenic bacteria เปลี่ยนสารผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนแรก (การสลายด้วยน้ำ) เป็นกรดอินทรีย์อย่างง่าย คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้หลัก ๆ แล้ว ได้แก่ กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดโพรไพอิก ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$) กรดบิวไทริก ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) และเอทานอล ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) สารผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันในขั้นตอนนี้สาเหตุมาจากจำนวน และชนิดจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง การเกิดกรดอะซิติกมีสมการ ดังนี้



3) การเกิดมีเทน (methanogenesis)

ขั้นตอนสุดท้าย การเกิดมีเทนแบ่งเป็น 2 วิธีโดยอาศัยจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทน (methanogens) วิธีแรกมีการแยกโมเลกุลของกรดอะซิติกเพื่อสร้าง คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน วิธีที่สองอาศัยการรีดิวซ์ (reduce) คาร์บอนไดออกไซด์ด้วยไฮโดรเจนซึ่งวิธีนี้จะให้ก๊าซมีเทนมากกว่าวิธีแรก (การแยกโมเลกุลกรดอะซิติก) แต่ระดับความเข้มข้นของไฮโดรเจนในถังหมักต้องเพียงพอเพราะต้องใช้ไฮโดรเจนในปฏิกิริยาการสร้างกรดอะซิติกด้วย ดังสมการต่อไปนี้



2.8 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน

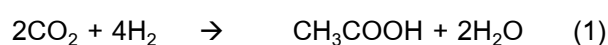
2.1.1 แบคทีเรียสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenic Bacteria)

ในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหยของกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจน กรดจะผลิตขึ้นโดยแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเด็ดขาด (Obligate Anaerobes) มากกว่าชนิด Facultative ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียชนิดเด็ดขาดมีจำนวนมากกว่าแบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจนชนิดเด็ดขาดที่มีบทบาทในการสร้างกรดไขมันระเหย ก็คือกลุ่ม Clostridium ซึ่งมีเมตาบอลิซึมหลายแบบ จึงสามารถใช้สารอาหารทั้งที่เป็นพวกแป้งหรือโปรตีนได้ ผลปฏิกิริยาที่ได้มีหลากหลายชนิดเช่น กรดบิวทริกกรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน เอทานอล บิวทานอล อะซีโตน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียในกลุ่ม Propionibacterium ที่ผลิตกรดพรอพิโอนิก (Propionic Acid) และกรดอะซิติกจากกรดแลคติก

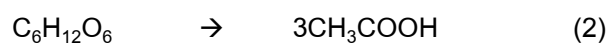
2.8.2 แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria)

แบคทีเรียที่สามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้นั้น สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

• **Homoacetogenic Bacteria** แบคทีเรียชนิดนี้ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสารรับอิเล็กตรอน และผลิตกรดอะซิติก (เป็นกระบวนการหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน) ผ่านวิถีที่เรียกว่า Acetyl-CoA pathway แบคทีเรียชนิดนี้ เช่น *Acetobacterium woodii* และ *Clostridium acetivum* สามารถเจริญเติบโตทั้งในแบบ Autotrophic คือ ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอน และแหล่งคาร์บอน และใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอนเพื่อเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก อีกทั้งเจริญเติบโตในแบบ Heterotrophic ก็ได้โดยการหมักน้ำตาลตั้งสมการข้างล่าง



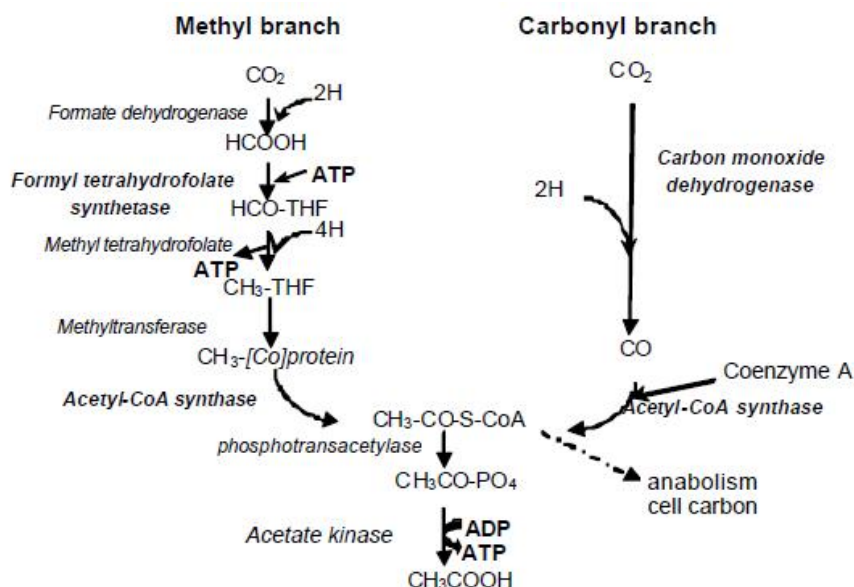
กรดอะซิติก



กลูโคส

กรดอะซิติก

แบคทีเรียพวก *Clostridium* มีอยู่ทั้งในกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดทั่วไป (Acidogenic Bacteria) และกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) ทั้งนี้เพราะแบคทีเรียกลุ่มนี้มีเมตาบอลิซึมหลายแบบ ได้แก่



ภาพที่ 2.8 Acetogenesis pathway (Acetyl-CoA pathway)

ที่มา: McSweeney, 2009

• **H₂-producing Acetogenic Bacteria** แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้กรดไขมันระเหย (ที่ไม่ใช่กรดอะซิติก) หรือแอลกอฮอล์เป็นสารอาหาร แล้วสร้างกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเป็นสารอาหารของแบคทีเรียสร้างมีเทน ดังนั้นแบคทีเรียชนิดนี้จึงมีบทบาทสำคัญ เพราะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดกับแบคทีเรียสร้างมีเทน อย่างไรก็ตาม แบคทีเรียชนิดนี้จะเจริญเติบโตได้ไม่ดีเมื่ออยู่ตามลำพัง ทั้งนี้เพราะถ้ามีการสะสมของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นมาจะทำให้ความดันของก๊าซไฮโดรเจนที่สูงยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก ทำให้ปฏิกิริยาสร้างกรดอะซิติกไม่เกิดขึ้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การอยู่ร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกและแบคทีเรียสร้างมีเทนให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน ต่างก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ดีถ้าอยู่เพียงลำพัง นั่นคือ แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจะสร้างอาหารให้แก่แบคทีเรียที่สร้างมีเทน ส่วนแบคทีเรียที่สร้างมีเทนก็ช่วยลดก๊าซไฮโดรเจนให้กับแบคทีเรียที่สร้างกรด แบคทีเรียชนิดนี้จะอยู่ในจีโนม *Syntrophomonas* และจีโนม *Syntrophobacter* โดยแบคทีเรีย *Syntrophomonas wolfei* จะย่อยกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 4 ถึง 8 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนแบคทีเรีย *Syntrophobacter wolinii* จะย่อยกรดพรอพิโอนิกให้กลายเป็นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เช่นกัน

2.8.3 Methanogenesis Bacteria (แบคทีเรียสร้างมีเทน) ในขั้นตอนการสร้างมีเทน แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนจะเป็นแบคทีเรียประเภทที่ไม่อาจทนต่อออกซิเจนได้แม้ในปริมาณเพียงเล็กน้อย (strict anaerobe bacteria) แบคทีเรียพวกนี้จะเจริญเติบโตซ้ำ สารอาหารสำหรับแบคทีเรียสร้างมีเทน เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นสารอาหารที่มีเกือบทั่วไปในธรรมชาติ แบคทีเรียสร้างมีเทนพวกนี้จะจัดเป็นจุลินทรีย์อโทโทรฟิก และเป็นกาไรหายไบบไม่ใช่ออกซิเจน โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นสารรับอิเล็กตรอน แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน (methanogens) ได้แก่ *methanobacterium*, *methanobacillus*, *methanococcus* และ *methanosarcina* เป็นต้น

2.9 ปัจจัยสำคัญในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

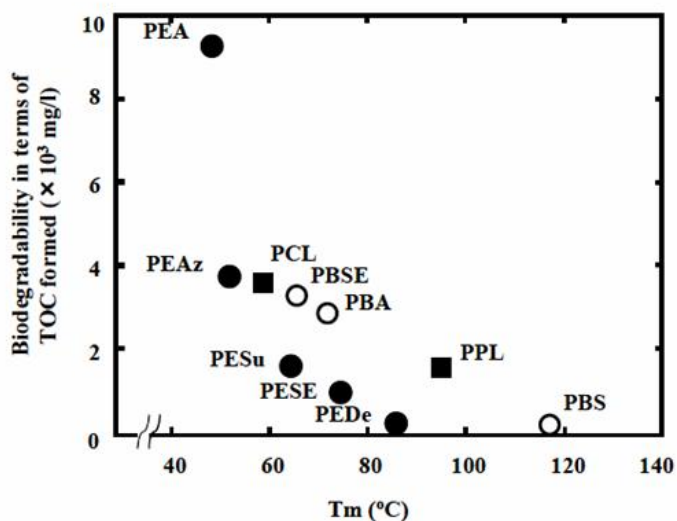
อัตราการเจริญของจุลินทรีย์มีความสำคัญอย่างมากในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ดังนั้นจึงควรมีการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อส่งเสริมการเจริญและกิจกรรมของจุลินทรีย์ซึ่งจะมีผลให้การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ พารามิเตอร์สำคัญที่ต้องควบคุม มีดังต่อไปนี้

1) สมบัติของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

สมบัติของพลาสติกทั้งทางเคมี และกายภาพ มีผลต่อความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ เช่น สภาพของพื้นที่ผิว (ขนาดพื้นที่ผิว และสมบัติการละลายน้ำ) โครงสร้างอย่างง่ายของพลาสติก (โครงสร้างทางเคมี และน้ำหนักโมเลกุล) โครงสร้างระดับสูง (อุณหภูมิการกลายเป็นแก้ว อุณหภูมิการหลอมเหลว สภาพโครงสร้างความยืดหยุ่น โครงสร้างความเป็นผลึก) สมบัติเหล่านี้มีความสำคัญอย่างมากในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ

โดยทั่วไปแล้วพอลิเอสเตอร์ที่มีสายโซ่ข้างมักย่อยสลายได้ช้ากว่าพวกที่ไม่มีโซ่ข้าง และหากน้ำหนักโมเลกุลยิ่งมากการย่อยสลายทางชีวภาพยิ่งช้าลง เช่น Poly (-Caprolactone) (PCL) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลมาก ($M_n > 4,000$) ย่อยสลายโดย *Rhizopus delemar* ได้ช้ากว่า PCL ที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ค่าโครงสร้างความเป็นผลึกก็สำคัญอย่างมาก เนื่องจากเอนไซม์จากจุลินทรีย์จะเข้าไปย่อยสลายโครงสร้างหลักของพอลิเมอร์ หากพอลิเมอร์มีความเป็นผลึกสูง (crystalline) เอนไซม์จึงเข้าไปย่อยสลายโครงสร้างได้ยากกว่าโครงสร้างที่อยู่กันอย่างหลวมๆ (amorphous) เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m) จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิการหลอมเหลวมีผลอย่างมากต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ อุณหภูมิการหลอมเหลวที่มากการย่อยสลายก็ยิ่งลดลง

พอลิเอสเตอร์ที่เป็นสายโซ่ [ester bond (-CO-O-)] และพอลิคาร์บอเนต [carbonate bond (-O-CO-O-)] เป็นพอลิเมอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับใช้ผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เพราะมีความจำเพาะและถูกย่อยสลายได้ดีโดยไลโปไลติก เอนไซม์ (lipolytic enzyme) จากจุลินทรีย์ เมื่อเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวของพอลิเมอร์ในตารางที่ 2.4 พอลิเอไมด์ (ไนลอน) จะย่อยสลายได้ยากที่สุด และมีค่าอุณหภูมิการหลอมเหลวสูงที่สุด เนื่องมาจากโครงสร้างที่มีพันธะไฮโดรเจนจำนวนมากทำให้ต้องใช้พลังงานสูงในการสลายพันธะ



PEA: poly(ethylene adipate); PESu: poly(ethylene suberate); PEAz: poly(ethylene azelate); PESE: poly(ethylene sebacate); PEDe: poly(ethylene decamethylate); PBS: poly(butylene succinate); PBA: poly(butylene adipate); PBSE: poly(butylene sebacate); PCL: polycaprolactone; PPL polypropiolactone.

ภาพที่ 2.9 อุณหภูมิการหลอมเหลวและการย่อยสลายของพลาสติกชนิดต่างๆ
ที่มา: Tokiwa และคณะ, 2009

ตารางที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอสเตอร์ที่เป็นสายโซ่ (aliphatic polyester) พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate) พอลิยูรีเทน (polyurethane) และพอลิเอไมด์ (polyamide) และอุณหภูมิการหลอมเหลว (T_m)

Name	Chemical Structure	T _m (°C)
Polyester	-O-(CH ₂) ₆ -O-CO-(CH ₂) ₄ -CO-	60
Polycarbonate	-O-(CH ₂) ₄ -O-CO-O-(CH ₂) ₄ -O-CO-	65
Polyurethane	-NH-(CH ₂) ₆ -NH-CO-O-(CH ₂) ₄ -O-CO-	180
Polyamide	-NH-(CH ₂) ₆ -NH-CO-(CH ₂) ₆ -CO-	240
Polyamide	-NH-(CH ₂) ₆ -NH-CO-(CH ₂) ₄ -CO-	265

ที่มา: Tokiwa และคณะ, 2009

2) องค์ประกอบของเสีย / ของแข็งระเหยได้ (waste composition / volatile solid)

ของเสียที่อยู่ในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนมักประกอบด้วยส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งย่อยสลายได้ทางชีวภาพ เช่น เศษอาหารจากโรงครัว หญ้า เศษไม้ ส่วนที่เผาไหม้ได้ ได้แก่ สารอินทรีย์ที่มีลิแกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบซึ่งย่อยสลายได้ช้า เช่น เปลือกไม้ กระจาด และส่วนที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น หิน แก้ว ทราาย และโลหะ ส่วนนี้ควรมีการกำจัดออกก่อนทำการฝังกลบ เพื่อลดปริมาตรของเสีย ในของเสียที่มีปริมาณน้ำมาก เช่น ขยะเปียก หรือ มูลสัตว์มักเกิดกระบวนการย่อยสลายได้เร็วกว่าของเสียที่ประกอบด้วยลิแกโนเซลลูโลสเป็นหลัก เนื่องจากขยะเปียก และมูลสัตว์ เกิดกระบวนการสลายด้วยน้ำรวดเร็ว เป็นผลให้จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ง่าย

ของแข็งระเหยได้ (VS) ในขยะอินทรีย์ คำนวณจากส่วนต่างของปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณถ้ำหลังจากของเสียถูกเผาอย่างสมบูรณ์ Kayhanian (1995) ทำการวิจัยที่บ่งชี้ว่าของแข็งระเหยได้ในขยะชุมชนเป็นส่วนที่ช่วยให้การย่อยสลายทางชีวภาพ และการเกิดก๊าซชีวภาพรวดเร็วยิ่งขึ้น ดังนั้นระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนที่เหมาะสมจึงควรมีของแข็งระเหยได้ในปริมาณพอเหมาะจึงจะเกิดการย่อยสลายและการสร้างก๊าซได้ดี

3) ระดับความเป็นกรด – ด่าง (pH level) แบคทีเรียไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria) โดยเฉพาะกลุ่มที่สร้างมีเทน (methanogens) มีความไวต่อความเข้มข้นของกรด สภาวะที่เป็นกรดสามารถยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียเหล่านี้ ค่าความเป็นกรด – ด่างที่เหมาะสมต่อระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอยู่ระหว่าง 5.5 – 8.5 (RISE-AT, 1998) ในระหว่างการย่อยสลายจะเกิดกระบวนการสร้างกรด (acidification) แล้วจึงเกิดกระบวนการสร้างมีเทน (methanogenesis) ทั้ง 2 กระบวนการต้องมีการควบคุมค่าความเป็นกรด – ด่างให้เหมาะสม นอกจากนั้นระยะเวลาในการหมักยังมีผลต่อค่าความเป็นกรด – ด่างอีกด้วย เช่น ในระบบการหมักแบบครั้งเดียว (batch) กระบวนการสร้างกรดอะซิติกมักเกิดอย่างรวดเร็วในช่วงต้นของการหมัก ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ และนำระบบไปสู่สภาวะเป็นกรด หากค่าดังกล่าวต่ำกว่า 5 จะส่งผลยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมปูนขาว เป็นต้น เมื่อกระบวนการย่อยสลายดำเนินมาถึงลำดับขั้นการสร้างมีเทน ระดับแอมโมเนียจะสูงขึ้นเป็นผลให้ค่าความเป็นกรด – ด่างเพิ่มอยู่ที่ประมาณ 8 เมื่อขั้นตอนการสร้างมีเทนคงที่ค่าความเป็นกรด – ด่าง จะอยู่ที่ประมาณ 7.2 – 8.2

4) อุณหภูมิ (temperature) ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อสร้างก๊าซมีเทน แบ่งออกเป็น 2 ช่วงหลัก ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิระดับกลาง (mesophilic) คือระหว่าง 20 – 40 องศาเซลเซียส แต่ช่วงที่เหมาะสมกับระบบ คือ 30 – 35 องศา

เซลเซียส ส่วนช่วงอุณหภูมิระดับสูง (thermophilic) อยู่ระหว่าง 50 – 60 องศาเซลเซียส (RISE-AT, 1998) และได้มีการทดลองบ่งชี้ว่ายิ่งอุณหภูมิในช่วงนี้สูงขึ้น ระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายจะลดลง

5) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (carbon to nitrogen ratio) หรือ C/N ratio คือค่าแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอน และไนโตรเจนในสารอินทรีย์ ซึ่งมีช่วงที่เหมาะสมกับระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอยู่ที่ 20 – 30 ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ที่สูงบ่งชี้ว่าไนโตรเจนถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทนเป็นผลให้การสร้างก๊าซมีเทนลดลง ในทางตรงกันข้ามค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ที่ต่ำแสดงว่าเกิดการสะสมแอมโมเนีย และทำให้ค่าความเป็นกรด – ด่าง เพิ่มขึ้นเกิน 8.5 ซึ่งเป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มนี้ สามารถทำให้ระบบมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมได้โดยการเติมอินทรีย์วัตถุที่มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงหรือต่ำ เช่น การผสมขยะอินทรีย์กับขยะเปียก หรือมูลสัตว์ เป็นต้น

6) ของแข็งรวม / อัตราบรรทุกสารอินทรีย์ (total solids content / organic loading rate) แบ่งระบบย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนตามของแข็งเป็น 3 ระบบ ได้แก่ ระบบที่มีของแข็งต่ำ (น้อยกว่าร้อยละ 10) ระบบที่มีของแข็งปานกลาง (ระหว่างร้อยละ 10 - 15) และระบบที่มีของแข็งสูง (ระหว่างร้อยละ 22 - 40) การเพิ่มปริมาณของแข็งในระบบจะช่วยให้ระบบมีปริมาตรที่เล็กลง ส่วนอัตราบรรทุกสารอินทรีย์นั้นส่งผลต่ออัตราการเกิดก๊าซมีเทน เนื่องจากอัตราบรรทุกสารอินทรีย์ที่มากเกินไปทำให้เกิดการสะสมสารยับยั้งในระบบ เช่น กรดไขมัน ทำให้ระบบต้องลดการเติมสารอินทรีย์ลงจึงจะได้อัตราการเกิดก๊าซมีเทนกลับมาเหมือนเดิม (Tchobanoglous, 1993)

7) ระยะเวลากักพักในการย่อยสลาย (Retention Time) ระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ และส่วนประกอบของของเสีย ระยะเวลาที่กักพักระบบที่ต้องการเมื่อระบบย่อยสลายใช้อุณหภูมิระดับปานกลางอยู่ระหว่าง 10 – 40 วัน แต่หากระบบย่อยสลายใช้ระดับอุณหภูมิสูงเวลากักพักระบบที่ใช้ก็จะลดลง ตัวอย่างเช่นในระบบที่ของเสียมีปริมาณของแข็งสูง ระดับอุณหภูมิปานกลางใช้เวลากักพัก 14 วัน

8) การผสม (mixing) จุดประสงค์ของการผสมคือการทำให้อินทรีย์วัตถุผสมเข้ากับจุลินทรีย์อย่างทั่วถึง นอกจากนั้นยังป้องกันการเกิดช่องว่างระหว่างอินทรีย์วัตถุในระบบ และช่วยให้อุณหภูมิเท่ากันทั่วถึงตลอดระบบ อย่างไรก็ตามการผสม/กลับ หรือกวนที่เร็วเกินไปสามารถรบกวนการทำงานของจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงควรทำอย่างช้าๆหรือเมื่อถึงเวลาที่เหมาะสม (Themelis, 2002)

2.10 วัฏจักรที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายเนื่องมาจากจุลินทรีย์

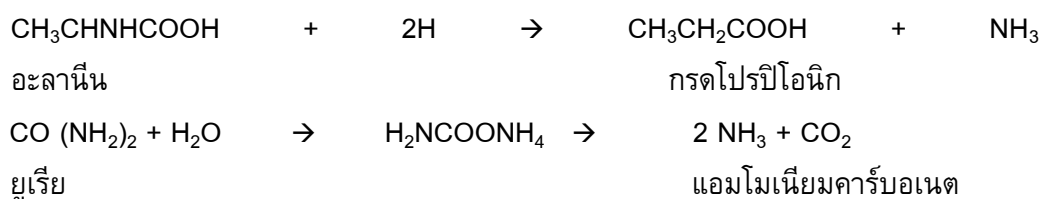
จุลินทรีย์ในดินสามารถย่อยสลายอินทรีย์วัตถุได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และ สารประกอบอื่นที่สำคัญ ได้แก่ แอมโมเนียม ไนเตรต ฟอสฟอรัส จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบในดิน มีผลต่อการเกิดความอุดมสมบูรณ์ของดิน ทำให้เกิดวัฏจักรต่างๆขึ้นในดิน ดังต่อไปนี้

2.10.1 วัฏจักรไนโตรเจน

ไนโตรเจนที่เกิดในวัฏจักรเกิดจากขบวนการทางฟิสิกส์ เคมี ชีวภาพ เช่น ในบรรยากาศมีไนโตรเจนที่เกิดจากปรากฏการณ์ฟ้าแลบ ฟ้าผ่า สำหรับทางด้านเคมีชีวภาพ เกิดจากพืช และสัตว์มีสารอินทรีย์ที่มีธาตุไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ เช่น โปรตีน กรดนิวคลีอิก เมื่อสิ่งมีชีวิตล้มตาย แบคทีเรียจะเปลี่ยนแปลงสารที่อยู่ในซากสิ่งมีชีวิตด้วยขบวนการต่อไปนี้ จนกระทั่งได้ก๊าซไนโตรเจนอีก คือ

1) การย่อยสลายโปรตีน แบคทีเรียสร้างเอนไซม์โปรทีโอไลติกออกมาย่อยโปรตีน ได้ผลผลิตเป็นกรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ จนในที่สุดจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ แอมโมเนีย และ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น

2) การดึงหมู่อะมิโน (NH_2) ออกจากกรดอะมิโน แล้วได้แอมโมเนียหรือคาร์บอนไดออกไซด์บางครั้งจะได้ซัลเฟตด้วย ถ้ากรดอะมิโนนั้นมีกำมะถันปนอยู่ แอมโมเนียและซัลเฟตจะถูกพืชดูดซึมไปใช้ และคาร์บอนไดออกไซด์ พืชนำไปใช้ในการสังเคราะห์แสง แบคทีเรียพวก *Clostridium* และ *Micrococcus* สามารถทำให้เกิดขบวนการ Ammonifying ดังสมการ



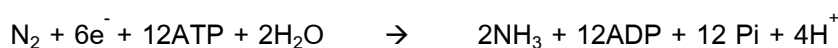
สำหรับไนเตรตไอออนในดินถูกชะล้างได้ง่าย เพราะเป็นตัวถูกทำลายได้ดีมีส่วนที่เคลื่อนย้ายตามการไหลของน้ำใต้ดินไนเตรตไอออนยังถูกพืชดูดไปใช้ได้ และการเปลี่ยนไนเตรตให้เป็นแอมโมเนีย โดยแบคทีเรีย เช่น *Agrobacterium Acotobacter Bacillus Micrococcus* ฟังไจ เช่น *Aspergillus Pennicilum* หรือ ยีสต์ เช่น *Candida* ดังสมการ



การเปลี่ยนแปลงไนเตรตให้เป็นก๊าซไนโตรเจนในอากาศโดยอาศัย Denitrifying bacteria จำพวก *Agromobacter* *Acrbacteriu* *Bacillus* และ *Vibrio Pseudomonas* ดังสมการ



3) การตรึงไนโตรเจน (nitrogen fixing) จุลินทรีย์สามารถจับ หรือตรึงไนโตรเจน จากอากาศให้กลับมาเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของสารในรูปแอมโมเนีย โดยใช้เอนไซม์ ไนโตรจีเนสคอมเพลกซ์ ดังสมการ

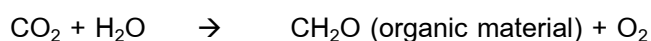


สำหรับแหล่งอิเล็กตรอนที่ใช้ในการรีดิวซ์ไนโตรเจน มีหลายแหล่งด้วยกันขึ้นกับชนิดของ จุลินทรีย์ที่เกี่ยวกับการตรึงไนโตรเจน เช่น คอสมโตรเดียมมีรีดิวซ์เฟอริดอกซินเป็นสารให้อิเล็กตรอน แก่ไนโตรเจน แต่ในอะโซโทแบคเตอร์ มีเมตาไฮดรอกซิลบิวไทริกแอซิด เป็นสารให้อิเล็กตรอนแก่ ไนโตรเจน แอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะรวมกับคาร์โบไฮเดรตภายในเซลล์ของจุลินทรีย์กลายเป็นกรด อะมิโนมีปฏิกิริยาขั้นต่อไปทำให้เกิดกรดอะมิโนอีกหลายตัว บางส่วนซึมออกมานอกเซลล์จุลินทรีย์ รากพืชนำส่วนนี้ไปใช้ในการสร้างโปรตีนได้ จุลินทรีย์ที่ตรึงไนโตรเจนได้มี 2 พวกคือ จุลินทรีย์ที่อยู่ ร่วมกับโฮสต์ พืชตระกูลถั่วสามารถจับคาร์โบไฮเดรตออกมากกระตุ้นการเจริญของไรโซเบียมบริเวณ รอบรากพืชให้เจริญ เพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็วแล้วเข้าสู่รากลึก เจริญเป็นปม แบคทีเรียสายพันธุ์ เดียวกัน เมื่ออยู่ร่วมกับถั่วต่างชนิดกัน จะทำให้ปมที่รากมีขนาดแตกต่างกันไปด้วย การเกิดปมเกิด ได้ทั่วบริเวณรากแก้ว รากแขนง และรากฝอย และจุลินทรีย์ที่อยู่อิสระ แบคทีเรียที่ตรึงไนโตรเจนได้ เช่น อะโซโตแบคเตอร์ชนิดต่าง ๆ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่ตรึงไนโตรเจนได้เช่นนอสตอคและ ออสซิลลาทอเรียพบว่ามีจุลินทรีย์ที่อยู่ร่วมกันกับโฮสต์ มีความสามารถในการตรึงไนโตรเจนได้ดีกว่า พวกอยู่อิสระ (สมศักดิ์ วั่งโน, 2524)

2.10.2 วัฏจักรคาร์บอน

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในวัฏจักรนี้ช่วยดึงคาร์บอนจากทั้งสิ่งมีชีวิตและไม่มีชีวิต แล้ว เปลี่ยนคาร์บอนเหล่านั้นให้อยู่ในรูปที่จุลินทรีย์สามารถใช้ได้ จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องมีทั้งแบคทีเรีย รา และสาหร่าย สามารถพบได้ในสิ่งแวดล้อมทั่วไป ในโคลนกันทะเลสาบ ในดิน เป็นต้น คาร์บอนที่ เข้าสู่วัฏจักรมากที่สุดคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในรูปก๊าซนี้สามารถเปลี่ยนรูปเป็นสารอินทรีย์ได้

โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthesis) โดยจุลินทรีย์ที่สามารถเปลี่ยนรูปสารเคมีได้ (chemoautotroph) เช่น แบคทีเรียยุคแรกเริ่ม (archae bacteria) สาหร่ายสีเขียว (green algae) ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ คาร์โบไฮเดรต และน้ำตาล ดังสมการ



คาร์บอนที่อยู่ในรูปของคาร์โบไฮเดรต และน้ำตาลจะเข้าสู่เมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ คือ Tricarboxylic acid cycle (TCA) เพื่อสลาย (breakdown) น้ำตาลให้ได้พลังงาน กระบวนการนี้เรียกว่า กระบวนการหายใจของจุลินทรีย์ (respiration) ดังสมการ



แต่ในสถานะที่ไม่มีอากาศจุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนรูปคาร์บอนเพื่อให้ได้พลังงานได้เช่นกันโดยใช้กระบวนการหมัก (fermentation) ในสถานะนี้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ โดยแบคทีเรียสร้างมีเทน (methanogen)

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกชีวภาพชนิด PLA และ PBAT

พลาสติกชีวภาพที่มีโครงสร้างเป็นแบบสายโซ่ตรง (aliphatic) เช่น PLA สามารถย่อยสลายได้ง่ายเนื่องจากมีหมู่ hydrolyze ester เป็นส่วนประกอบ Yagi และคณะ (2009) ได้ทดสอบการย่อยสลายของ PLA ที่อุณหภูมิ 35 และ 55 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่ไร้ออกซิเจนและความชื้นสูง (aquatic condition) (ร้อยละของแข็งรวมของกากตะกอนที่ใช้อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และ 35 องศาเซลเซียสมีค่า 2.07 และ 2.24 ตามลำดับ) จากการทดลองที่ใช้อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส พบว่า PLA ย่อยสลายไปร้อยละ 60 80 และ 90 เมื่อเวลาผ่านไป 30 60 และ 90 วัน แต่ในทางกลับกัน การทดลองที่ใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส PLA เพิ่งเริ่มย่อยเมื่อเวลาผ่านไป 55 วัน นอกจากนี้อัตราการย่อยสลายของ PLA ที่อุณหภูมินี้ยังช้ากว่าที่ 55 องศาเซลเซียสอีกด้วย ในปีถัดมา Yagi และคณะ (2010) ได้ทำการทดลองย่อยสลาย PLA ในสภาวะเดิมที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส แต่กากตะกอนที่ใช้นำมาจากถังบำบัดที่มีอุณหภูมิขณะดำเนินการอยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส ก่อนการทดลองการย่อยสลาย Yagi และคณะได้นำกากตะกอนดังกล่าวไปบ่ม (preincubate) ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 12 18 และ 40 วัน จากนั้นจึงนำกากตะกอนดังกล่าวไป

ย่อยสลาย PLA เปรียบเทียบผลการทดลองจากผลการย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA ปรากฏว่า กากตะกอนที่นำไปหมักก่อนนำไปย่อยสลาย 18 วัน ให้ผลการย่อยสลายสูงที่สุด

ขณะที่พลาสติกที่มีโครงสร้างเป็นวง (aromatic) มักย่อยสลายได้ยากแต่มีความแข็งแรงมากกว่าพลาสติกชีวภาพที่มีลักษณะเป็นสายโซ่ จึงได้มีการปรับปรุงคุณภาพพลาสติกชีวภาพให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นโดยการนำพลาสติกทั้งสองชนิดมาผสมกันเป็น aliphatic – aromatic copolyester เช่น PBAT เป็นต้น (Muller และคณะ 2000) ในปี 2005 Massardier-Nageotte และคณะ ทำการทดลองย่อยสลาย PBAT ในสภาวะ solid state มีออกซิเจน และในสภาวะ liquid phase มีและไม่มีออกซิเจน ตามมาตรฐานการทดสอบวัสดุต่างๆ ได้แก่ ISO 14851 ASTM G 21-90 และ ASTM G 22-76 หลังจากการบ่มเป็นเวลา 28 วัน พบว่า การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพลาสติกและสภาวะในการย่อยสลาย เห็นได้จากการที่ PBAT ย่อยสลายได้ช้ากว่าพลาสติกชนิดอื่น (ย่อยสลายได้ร้อยละ 15) ในสภาวะมีออกซิเจน แต่ไม่ย่อยสลายเลยในสภาวะไร้ออกซิเจน ต่อมาปี 2008 Chen และคณะสรุปว่าพลาสติกที่เกิดจากการปรับปรุงดังกล่าวให้ผลดีทั้งในเรื่องของคุณสมบัติของพลาสติกและเรื่องของการย่อยสลายทางชีวภาพ

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพลาสติกชีวภาพชนิดอื่น

ธนาวดี ลีจากภัย และคณะ (2548) ศึกษาการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพด้วยจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนโดยได้ทำการพัฒนาวิธีการทดสอบการย่อยสลายของวัสดุตามมาตรฐานสากลขึ้น เพื่อใช้ศึกษาอัตราการย่อยสลายของวัสดุพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ทั้งชนิดย่อยสลายได้และย่อยสลายไม่ได้ในภาชนะปิดภายใต้สภาวะหมักที่มีการควบคุม (อุณหภูมิ 58 ± 2 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรด-เบสของดิน 6-8 และความชื้น 50-55% ในระยะเวลา 90 วัน) โดยทำการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเพื่อใช้คำนวณหาอัตราการย่อยสลายจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ในช่วงเวลาต่างๆ และเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุ พลาสติกชีวภาพที่นำมาศึกษาได้แก่ cellulose thermoplastic starch Polylactic acid และ polyethylene ผลปรากฏว่าอัตราการย่อยสลาย cellulose thermoplastic starch และ Polylactic acid เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ร้อยละ 6 34 และ 24 ตามลำดับ ส่วน polyethylene ไม่เกิดการย่อยสลายภายใต้สภาวะที่ใช้ในการทดลองเดียวกัน

Yan และคณะ (2008) ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของ thermoplastic starch (TPS) และ thermoplastic dialdehyde starch (TPDAS) ภายใต้สภาวะการหมักปุ๋ย (composting condition) ตามวิธี ISO 14855 (อุณหภูมิ 58 ± 2 องศาเซลเซียส ความชื้น 65 เปอร์เซ็นต์ อัตราการให้อากาศ 30 มล. ต่อ นาที) จากผลการศึกษาพบว่า การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของแป้งมีผลโดยตรงต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ ผลการทดลองปรากฏว่า TPS ย่อยสลายได้เร็วกว่า

TPDAS และพบว่าอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของ TPDAS มีค่าใกล้เคียงกับการย่อยสลายจากปฏิกิริยาการเติมออกซิเจน(oxidation) ของ dialdehyde starch (DAS) พบว่าการย่อยสลายทางชีวภาพของ TPS และ TPDAS ประกอบด้วย 3 ระยะ คือ ระยะแรกการย่อยสลายเป็นไปอย่างช้าๆ ต่อมาระยะที่สองอัตราการย่อยสลายเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและกลับมามีค่าที่อีกในระยะเวลาสุดท้าย ผู้วิจัยได้ทำการคัดแยกเชื้อจุลินทรีย์จากชุดการทดลอง พบจุลินทรีย์กลุ่ม actinomycete 3 ชนิด ได้แก่ micromonospora nocardia และ streptomycete จากนั้นผู้วิจัยได้นำจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิดไปทดสอบการย่อยสลาย TPS และ TPDAS พบว่า nocardia ให้ผลในการย่อยสลายดีที่สุด

Mohee และคณะ (2008) ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกชีวภาพภายใต้สภาวะที่มี และไม่มีออกซิเจน ในการศึกษาใช้พลาสติกชีวภาพ 2 ชนิด คือ Environmental Product Inc. (EPI) ซึ่งเป็นพลาสติกที่ผสมด้วยพลาสติกชีวภาพ 3 เปอร์เซ็นต์ และ Novamont Mater-Bi (MB) product ซึ่งเป็นพลาสติกที่มีส่วนผสมระหว่างแป้งและเรซินสังเคราะห์ 60 และ 40 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ใช้ขี้เถ้าหมักเป็นหัวเชื้อสำหรับการทดลองในสภาวะที่มีออกซิเจน และสังเกตผลการทดลองด้วยการหาน้ำหนักแห้งที่หายไป(mass loss) พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 72 วัน น้ำหนักแห้งของ MB ลดลงร้อยละ 27.1 สำหรับการทดลองในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ใช้หัวเชื้อจากโรงบำบัดน้ำเสีย และสังเกตผลการทดลองจากการผลิตแก๊สมีเทนสะสม(accumulative methane gas production) โดยใช้กระดาษกรองเซลลูโลสเป็นชุดทดลองควบคุม ผลปรากฏว่าการย่อยสลายทางชีวภาพสามารถผลิตแก๊สชีวภาพสะสมได้สูง(245 มล.) เมื่อเทียบกับชุดทดลองควบคุม(246.8 มล.) หลังจากการทดลองผ่านไป 32 วัน ปรากฏว่ามีการเพิ่มขึ้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สะสม(accumulative carbon dioxide evolution) ของ CFP MB และ EPI แปรผันตามเวลาแบบ sigmoid type curves ด้วยค่าสหสัมพันธ์ 0.996 0.996 และ 0.995 ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ 2 ชนิด ด้วยดินจากบ่อฝังกลบขยะผสมกากตะกอนอัตราส่วนต่างๆภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน จากนั้นทำการเก็บข้อมูลความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ และเปรียบเทียบการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเทียบกับวัสดุมาตรฐาน

3.1 สถานที่ดำเนินการศึกษา

3.1.1 สถานที่เก็บตัวอย่าง

ดินเก็บมาจากบ่อฝังกลบขยะ เทศบาลเมือง อำเภอเมืองจังหวัดสุพรรณบุรี และกากตะกอนเก็บมาจากบ่อบำบัดน้ำเสียโรงงานทำขนมจีนสามโคก อำเภอสามโคก จังหวัดปทุมธานี

3.1.2 ห้องปฏิบัติการ

การเตรียมตัวอย่างพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพดำเนินการเตรียมที่ห้องปฏิบัติการของศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี ส่วนการเตรียมและวิเคราะห์ ดิน กากตะกอน และหน่วยทดลอง ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาคารมหามกุฏ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ดำเนินการศึกษา

1. เครื่องชั่งน้ำหนัก รุ่น AB 204-S บริษัท Mettler Toledo, Switzerland.
2. เครื่องชั่งสองตำแหน่ง รุ่น BJ 1000C บริษัท Precisa, Switzerland.
3. เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH meter) รุ่น BA 350 บริษัท Mettler Toledo, Switzerland.
4. ตู้อบ (hot air oven) รุ่น UE/BE 200-800 บริษัท Memmert, Germany.
6. อ่างให้ความร้อน (heating waterbath) รุ่น WB 22 บริษัท Memmert, Germany.

7. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและระเหยแห้งแบบให้ความร้อน (drybath incubator) รุ่น MD01N บริษัท Major Science, Taiwan.
8. อุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพ
 - กล้องจุลทรรศน์ รุ่น ECLIPSE E200 บริษัท Nikon, Japan
 - กล้องดิจิทัล รุ่น COOLPIX P5100 บริษัท Nikon, Japan
9. เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิ รุ่น MD-N บริษัทแสงชัยมิเตอร์ จำกัด ประเทศไทย
10. ตู้ดูดความชื้น รุ่น ST48-A บริษัท โคแอกซ์ กรุ๊ป คอร์ปอเรชั่น จำกัด ประเทศไทย
11. Fourier Transform Infrared Spectroscopy รุ่น spectrum one บริษัท Perkin Elmer, USA



ภาพ 3.1 Fourier Transform Infrared (FT - IR) Spectroscopy

12. Thermogravimetric Analyzer (TGA) รุ่น TGA7 บริษัท Perkin Elmer, USA



ภาพที่ 3.2 Thermogravimetric Analyzer (TGA) รุ่น TGA7

13. Gas Chromatography (GC - TCD) รุ่น GC – 14B บริษัท Shimadzu, Japan



ภาพที่ 3.3 Gas Chromatography (GC - TCD) รุ่น GC – 14B

14. Scanning electron microscope รุ่น JSM-5410LV บริษัท JEOL, Japan



ภาพที่ 3.4 Scanning electron microscope รุ่น JSM-5410LV

3.3 เคมีภัณฑ์

1. เอทานอล บริษัท Merck, Germany
2. ปู่ยยูเรีย บริษัท เรือไปไวกิ่ง ประเทศไทย

3.4 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid; PLA)
2. พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดพอลิเอทิลีนอะดิเพตเทเรฟทาเลท (poly (butylenes adipate – co – terephthalate); PBAT)
3. กระดาษกรองเซลลูโลส (cellulose; CE)
4. พลาสติกชนิดพอลิเอทิลีน (polyethylene; PE)
5. ดินจากบ่อฝังกลบขยะ เทศบาลอำเภอเมือง จังหวัดสุพรรณบุรี
6. กากตะกอน โรงงานขนมจีนสามโคก อำเภอสามโคก จังหวัดปทุมธานี

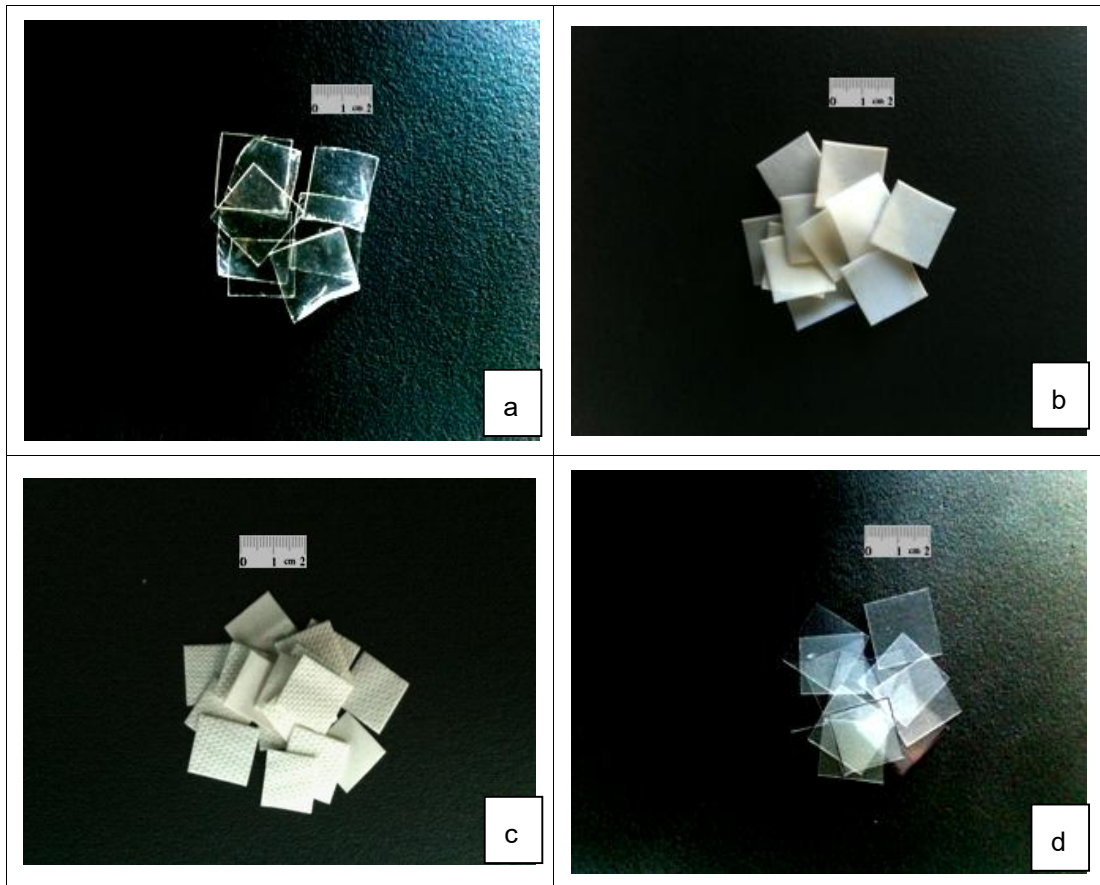
3.5 วิธีดำเนินการศึกษา

3.5.1 การเตรียมตัวอย่างพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

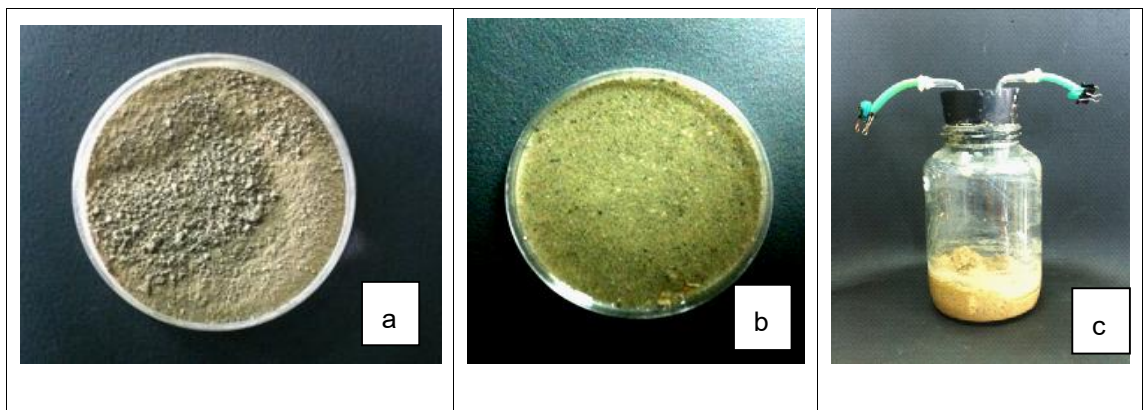
พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ใช้ในการทดลองมี 2 ชนิด ได้แก่ Poly (butylenes adipate – co – butylenes terephthalate) (PBAT) และ Polylactic Acid (PLA) ซึ่งรูปเป็นแผ่นขนาด $150 \times 150 \times 0.3$ มม.³ ด้วยวิธีการอัดความร้อนตัดเป็นแผ่นเล็กๆขนาด 2×2 ซม.² แสดงดังภาพที่ 3.5 ใช้ polyethylene (PE) และ cellulose (CE) เป็นวัสดุเปรียบเทียบ

3.5.2 การเตรียมดินบ่อฝังกลบขยะ (landfill soil) และกากตะกอน (sludge)

นำดินไปผึ่งลม (air dry) ให้แห้งจากนั้นบดให้ละเอียดแล้วร่อนด้วยตะแกรงขนาด 2×2 มม.² เพื่อแยกหินและขยะออก ส่วนกากตะกอนนำไปผึ่งลมให้หมาด นำดินและกากตะกอนปริมาณอย่างละ 10 กรัม ผสมน้ำในอัตราส่วน 1:1 วัดค่าพีเอช จากนั้นหาความชื้นโดยการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส 24 ชม. และหาปริมาณของแข็งระเหยได้ (volatile solid) ซึ่งหาได้จากผลต่างของน้ำหนักแห้งระหว่างปริมาณของแข็งรวมกับน้ำหนักแห้งที่เหลือจากการอบดินที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส 2 ชม. โดยปริมาณดิน และกากตะกอนน้ำหนักเริ่มต้นต้องเท่ากัน (Yosita และคณะ, 2004) ของแข็งระเหยได้เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณสารอินทรีย์ในดิน หลังจากนั้นนำดินที่ได้จากการร่อนและกากตะกอนไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ดินและกากตะกอนแสดงดังภาพที่ 3.6 a และ b



ภาพที่ 3.5 Poly(lactic acid) (a) Poly (butylene adipate-co-butylene terephthalate) (b) และวัสดุ
มาตรฐาน Cellulose (c) Polyethylene (d)



ภาพที่ 3.6 ดิน (a) กากตะกอน (b) และ หน่วยทดลอง (c)

3.5.3 วิธีศึกษาการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

แปรผันปัจจัยที่ทดสอบ 4 ปัจจัย ดังนี้

- | | |
|--------------------|---------------------------|
| 1) กากตะกอน | ร้อยละ 0 10 และ 30 |
| 2) อุณหภูมิ | 35 45 และ 55 องศาเซลเซียส |
| 3) ปริมาณน้ำ | 45 82 และ 105 มล. |
| 4) การเติมไนโตรเจน | 0 60 และ 100 มก./กก.ดิน |

ศึกษาผลการแปรผันปัจจัยต่อการย่อยสลายพลาสติกด้วยวิธี factorial design แบบ 2^{K-1} design เมื่อ K คือ จำนวนปัจจัย factorial design เป็นการทดลองที่พิจารณาผลรวมของปัจจัยทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง (holistic) การทดลองแบบแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ ได้แก่ ช่วยลดจำนวนการทดลอง ทำให้สามารถเห็นผลจากอิทธิพลร่วมจากปัจจัยต่างๆ ที่ศึกษาซึ่งให้ข้อสรุปของเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองได้และช่วยให้เห็นผลรวมที่เกิดจากปัจจัยทั้งหมดที่ใช้ในการทดลอง การศึกษานี้ใช้โมเดลหมายเลข หมายเลข BB0316 (Haaland, 1989) ดังตารางที่ 3.1 เนื่องจากมีความเหมาะสมกับจำนวนปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง ในการออกแบบการทดลองแบ่งตัวแปรออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ ตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม

ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ทั้งหมด 4 ปัจจัย ดังตารางที่ 3.3

ตัวแปรตาม คือ ร้อยละของน้ำหนักแห้งของพลาสติกที่ลดลง

เมื่อแทนค่ารหัสปัจจัยต่างๆ จากตารางที่ 3.2 ลงในโมเดลตารางที่ 3.1 แล้วจึงจะได้สภาวะสำหรับการทดลองสำหรับการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของพลาสติกทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 บ่มในที่มืดเป็นเวลา 60 วัน แล้ววิเคราะห์หาร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลง

3.5.4 วิธีเตรียมหน่วยทดลอง

หน่วยทดลองแต่ละหน่วยประกอบด้วย ขวดแก้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มม. ปริมาตร 650 มล. ภายในบรรจุดินจากบ่อฝังกลบขยะ กากตะกอน และพลาสติกทดสอบในอัตราส่วน 10: 1 (Yagi และคณะ, 2009) ปล่อยให้เป็นสภาวะไร้ออกซิเจนโดยการเติมก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 20 นาที ปากขวดปิดด้วยจุกยาง พันทับรอยต่อด้วย parafilm แสดงดังภาพที่ 3.6 c

ตารางที่ 3.1 โมเดลหมายเลข BB0316

RUN	factor			
	A	B	C	D
1	+1	-1	-1	-1
2	+1	-1	+1	+1
3	+1	+1+	-1	+1
4	+1	1	+1	-1
5	-1	-1	-1	+1
6	-1	-1	+1	-1
7	-1	+1	-1	-1
8	-1	+1	+1	+1
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0

ที่มา: Haaland, 1989

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยและรหัสปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย (factor)	รหัส	ค่า
ดินผสมกากตะกอน 150 กรัม ซึ่งประกอบด้วยกากตะกอน (ร้อยละ)	-1	10
	0	0
	+1	30
อุณหภูมิตั้ง (องศาเซลเซียส)	-1	35
	0	45
	+1	55
ปริมาณน้ำ (มล.)	-1	45
	0	82
	+1	105
การเติมไนโตรเจนเติม (มก./กก.ดิน)	-1	0
	0	60
	+1	100

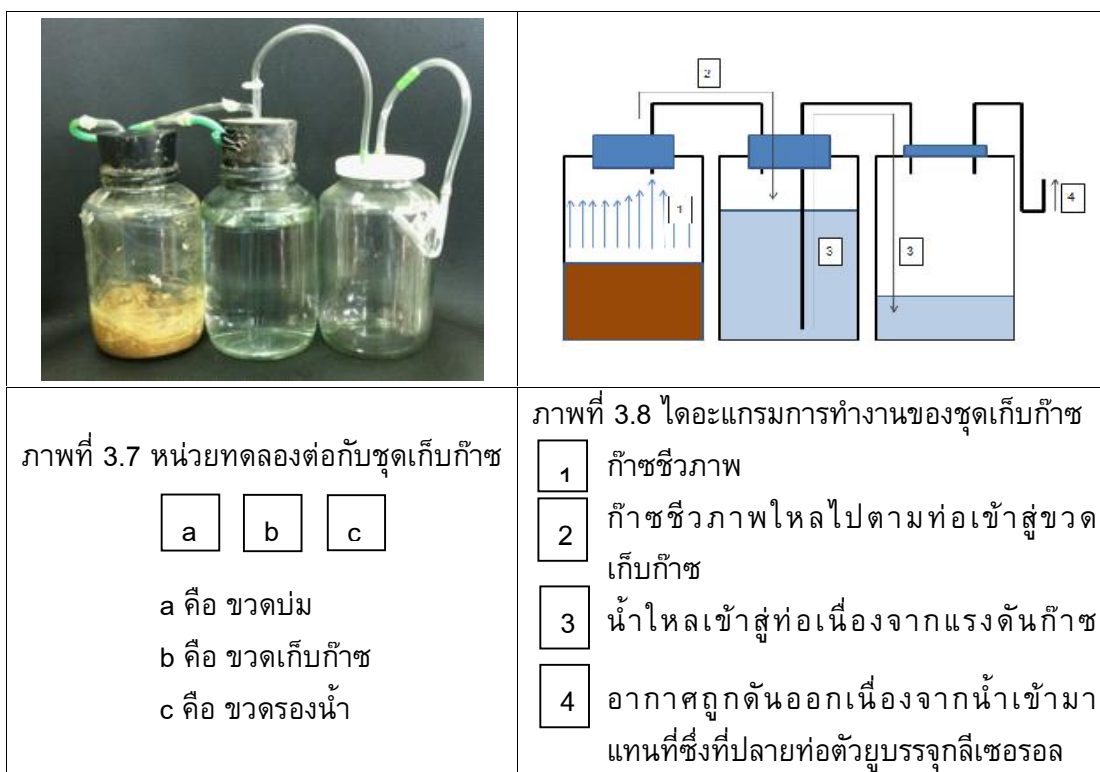
หมายเหตุ: รหัส 1, 0, -1 ใช้สำหรับการคำนวณในโปรแกรมทางสถิติ

ตารางที่ 3.3 ปัจจัยที่ต้องควบคุมในแต่ละหน่วยทดลองต่อพลาสติกทดสอบ 1 ชนิด

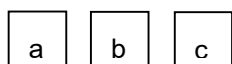
หน่วยทดลอง	ปริมาณกากตะกอน	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณน้ำ (มล.)	ไนโตรเจน
1	ร้อยละ 10	35±2	45	ไม่เติม
2	ร้อยละ 10	35±2	105	100 มก./กก.
3	ร้อยละ 10	55±2	45	100 มก./กก.
4	ร้อยละ 10	55±2	105	ไม่เติม
5	ร้อยละ 30	35±2	45	100 มก./กก.
6	ร้อยละ 30	35±2	105	ไม่เติม
7	ร้อยละ 30	55±2	45	ไม่เติม
8	ร้อยละ 30	55±2	105	100 มก./กก.
9	ไม่เติม	45	82	60 มก./กก
10	ไม่เติม	45	82	60 มก./กก
11	ไม่เติม	45	82	60 มก./กก

3.5.5 วิธีศึกษาการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยระบบการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนภายใต้สภาวะคัดเลือก

ทำการทดสอบการย่อยสลาย PLA PBAT ใช้ CE (positive control) และ PE (negative control) เป็นวัสดุเปรียบเทียบ กำหนดสภาวะทดลองจากผลการทดลองข้อ 3.5.3 และเตรียมหน่วยทดลองตามข้อ 3.5.4 ใส่ดินผสมกากตะกอน ผสมกับพลาสติกทดสอบในอัตราส่วน 10: 1 จากนั้นต่อชุดเก็บก๊าซเข้ากับหน่วยทดลอง โดยชุดเก็บก๊าซประกอบไปด้วยขวดเก็บก๊าซและขวดรองน้ำ ดังแสดงในภาพที่ 3.7 ทำการทดลองเป็นเวลา 60 วัน วัดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.4 โดยแบ่งการวัดผลการทดลองเป็น 4 ช่วง ช่วงละ 15 วัน จนถึงวันที่ 60



ภาพที่ 3.7 หน่วยทดลองต่อกับชุดเก็บก๊าซ



- a คือ ขวดปั๊ม
b คือ ชุดเก็บก๊าซ
c คือ ขวดรองน้ำ

ภาพที่ 3.8 ไดอะแกรมการทำงานของชุดเก็บก๊าซ

- 1 ก๊าซชีวภาพ
2 ก๊าซชีวภาพไหลไปตามท่อเข้าสู่ขวดเก็บก๊าซ
3 น้ำไหลเข้าสู่ท่อเนื่องจากแรงดันก๊าซ
4 อากาศถูกดันออกเนื่องจากน้ำเข้ามาแทนที่ซึ่งที่ปลายท่อตัวยูบรจูลีเซอร์อล

3.5.6 วิธีวัดผลการทดลอง

- 1) ร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงเนื่องจากการย่อยสลายทางชีวภาพ
วิธีวัดน้ำหนักแห้งที่ลดลง ทำโดยการร่อนส่วนที่อยู่ในขวดปั๊มด้วยตะแกรงที่ 2×2 มม² นำพลาสติกที่ติดอยู่บนตะแกรงไปล้างด้วยน้ำกลั่นจนสะอาด ผึ่งลมให้แห้งเก็บในตู้ดูดความชื้น 48 ชม. แล้วนำไปชั่งด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง หาร้อยละน้ำหนักแห้งจากสมการ

$$W_L\% = \frac{W_o - W_t}{W_o} \times 100$$

- เมื่อ $W_L\%$ = ร้อยละของน้ำหนักที่ลดลง
 W_o = น้ำหนักแห้งเริ่มต้น
 W_t = น้ำหนักแห้ง ณ เวลาต่างๆ

- 2) ค่าพีเอช

นำดินและกากตะกอนที่อยู่ในหน่วยทดลองปริมาณ 10 กรัม ผึ่งให้แห้ง บดจนละเอียด ผสมน้ำในอัตราส่วน 1:1 ที่ไว้นาน 15 นาทีแล้วจึงกวนให้เข้ากันอีกครั้ง วัดค่าพีเอชด้วยเครื่องวัดค่าพีเอช

3) ของแข็งระเหย (volatile solid)

เผาดินผสมกากตะกอนปริมาณ 20 กรัมที่ได้หลังจากการหาของแข็งรวม (total solid) ไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นับเมื่ออุณหภูมิถึง 550 องศาเซลเซียส ทิ้งให้เย็นลงแล้วจึงเก็บในเดสิกเคเตอร์จนเย็นเท่าอุณหภูมิห้องแล้วจึงชั่งน้ำหนัก น้ำหนักที่เหลืออยู่ คือ ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด และ น้ำหนักที่หายไปในการเผาเป็นของแข็งระเหยทั้งหมด คำนวณดังสมการ

$$\text{ร้อยละของแข็งระเหย} = [(A - B)/A][100]$$

A คือ น้ำหนักดินผสมกากตะกอนหลังอบที่ 105 องศาเซลเซียส

B คือ น้ำหนักดินผสมกากตะกอนหลังเผาที่ 550 องศาเซลเซียส

(สำนักพัฒนาที่ดิน, 2547)

4) ก๊าซชีวภาพ (biogas)

วัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายพลาสติกโดยการใส่กระบอกดวงดวงน้ำที่ได้จากการแทนที่ของก๊าซชีวภาพจากขวดรองน้ำของชุดเก็บก๊าซ และวัดปริมาณมีเทนในก๊าซชีวภาพโดยดูดก๊าซชีวภาพจากขวดเก็บด้วยเข็มฉีดยาใส่ลงในหลอดเก็บเลือดสุญญากาศ แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC - TCD) รุ่น GC - 14B ใช้ carrier gas ที่ใช้คือก๊าซฮีเลียม (He) และใช้ detector ชนิด TCD (thermal conductivity) การฉีดแต่ละครั้งจะใช้เข็มฉีดยาดูดก๊าซปริมาตร 0.5 มิลลิลิตร ตั้งอุณหภูมิของ column ตั้งแต่ 31-150 องศาเซลเซียส

5) พื้นผิวพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (plastic surface)

ส่องดูพื้นผิวพลาสติกทดสอบภายใต้กล้อง scanning electron microscope (SEM) และบันทึกภาพลักษณะพื้นผิวตัวอย่างพลาสติกและลักษณะการรุ่มพองที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพที่ระยะเวลาต่างๆ เตรียมตัวอย่างพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพติดลงบนแผ่นทองเหลืองแล้วนำไปเคลือบทอง จากนั้นนำไปเข้าเครื่อง SEM ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า 10 ไมโครเมตร 10 KV

6) หมู่ฟังก์ชัน (functional group)

วิเคราะห์เพื่อตรวจดูโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกที่ใช้ในการทดลองว่าเปลี่ยนไปหรือไม่หลังจากการทดสอบการย่อยสลาย วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy รุ่น spectrum one บริษัท Perkin Elmer, USA เตรียมตัวอย่างโดยการบดผสมสารที่ต้องการวิเคราะห์กับ KBr แล้วนำมาอัดด้วยเครื่องอัดให้เป็นแผ่นบางและใส ด้วยแรงดัน 10,000 - 15,000 psi ในสถานะสุญญากาศ จากนั้นจึงนำเข้าเครื่องวิเคราะห์ต่อไปโดยใช้ wave number 400 - 4,000 cm^{-1}

7) วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงมวลของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน เพื่อดูว่าชิ้นพลาสติกทดสอบมีการสลายตัวเนื่องจากถูกย่อยสลายหรือไม่ โดยทั่วไปนั้นหากพลาสติกเกิดการย่อยสลาย เมื่อเปรียบเทียบกับเทอร์โมแกรมก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายของชิ้นพลาสติกทดสอบ เทอร์โมแกรมที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม วิธีนี้ การวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) รุ่น TGA7 บริษัท Perkin Elmer, USA ตรวจสอบอุณหภูมิการสลายตัวของพลาสติกทดสอบ โดยตัดชิ้นงานตัวอย่างให้มีน้ำหนัก ประมาณ 5 มิลลิกรัม จากนั้นทำการทดสอบด้วยการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียส จนถึง 700 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราคงที่ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ใช้บรรยากาศเป็นก๊าซไนโตรเจน โดยให้ สารตัวอย่างมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิคงตัวในขณะที่ทำการทดลองและศึกษาการเปลี่ยนแปลงของมวล เทียบกับอุณหภูมิ จะได้กราฟ TGA ของความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับอุณหภูมิ (m, T)

3.5.7 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

สร้างแผนภูมิจากผลการทดลองข้อ 3.5.3 พร้อมกับวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการทาง สถิติ ได้แก่ อิทธิพลจากความสัมพันธ์ของปัจจัยต่างๆ ทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วม แล้วจึงวิเคราะห์ หาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการย่อยสลายพลาสติกทดสอบ จากนั้นสร้างแผนภูมิจากข้อ 3.5.5 เปรียบเทียบผลการทดลองจากลักษณะของแผนภูมิ และการวิเคราะห์ความแปรปรวน ประกอบกับ ภาพถ่ายจาก scanning electron microscope (SEM) ข้อมูลจาก Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) และ Thermogravimetric Analysis (TGA)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การศึกษาค้นคว้าวิจัยได้ทำการทดลองเพื่อคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายทางชีวภาพและทดสอบความสามารถในการย่อยสลายของ PLA และ PBAT ภายใต้สภาวะคัดเลือก โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

4.1 สมบัติของดินบ่อฝังกลบขยะ (landfill soil) และกากตะกอน (sludge)

ดินที่ใช้ในการทดลองมีเนื้อดินเป็นดินเหนียว ดินบนมีสีดำดินล่างมีสีน้ำตาลอ่อน ระบายน้ำได้น้อย ดินและกากตะกอนที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างเป็นกลางปริมาณของแข็งระเหย และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ต่ำนี้แสดงว่าดินไม่อุดมสมบูรณ์ จุลินทรีย์อาจเจริญได้ค่อนข้างช้า แต่ก็ยังเจริญได้อยู่เนื่องจากค่ายังไม่ต่ำกว่า 8 : 1 ซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของเซลล์จุลินทรีย์ ดินที่อุดมสมบูรณ์จะมีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ที่ช่วง 20 : 1 ถึง 30 : 1 โดยคาร์บอนเป็นแหล่งพลังงานให้แก่จุลินทรีย์ส่วนไนโตรเจนวัตถุดิบในการสร้างโปรตีนสำหรับการสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์ (สุนทรียังชัชวาลย์, 2554) สมบัติเบื้องต้นของดินและกากตะกอนแสดงดังตารางที่ 4.1

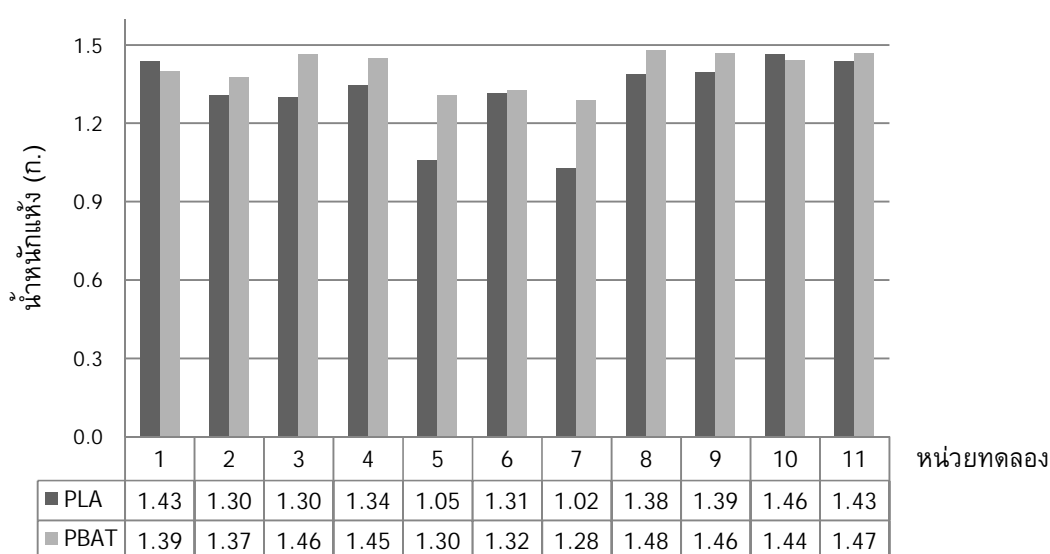
ตารางที่ 4.1 สมบัติของดินบ่อฝังกลบขยะและกากตะกอน

หัวข้อ	พารามิเตอร์				
	VS	C	N	C:N Rato	pH
ดิน (g/g _{soil})	0.089	6	0.8	7.5	7.3
กากตะกอน(g/g _{sludge})	0.519	0.35	0.04	8.7	6.5

4.2 วิธีศึกษาการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของ PLA และ PBAT ในดินจากบ่อฝังกลบขยะที่ผสมกากตะกอน ด้วยวิธีทดลองแบบแฟคทอเรียล (factorial design) แบบ 2^{k-1} (Halaan, 1989) k คือ จำนวนปัจจัย ได้แก่ ร้อยละกากตะกอน อุณหภูมิ ปริมาณน้ำ และการเติม

ไนโตรเจนออกแบบการทดลองแล้วได้หน่วยการ 11 หน่วยตั้งอธิบายไว้ในข้อ 3.5.4 จากนั้นทำการทดสอบการย่อยสลายโดยนำพลาสติกทดสอบ 1.5 กรัม ผสมกับดินผสมกากตะกอน 150 กรัม เติมไนโตรเจน ปรับปริมาณน้ำ และควบคุมสภาวะดังแสดงในตารางที่ 3.3 เป็นเวลา 60 วัน เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ได้นำพลาสติกที่เหลืออยู่ในแต่ละหน่วยทดลองมาวัดน้ำหนักแห้งที่เหลือตามข้อ 3.5.6 แสดงผลไว้ดังภาพที่ 4.1



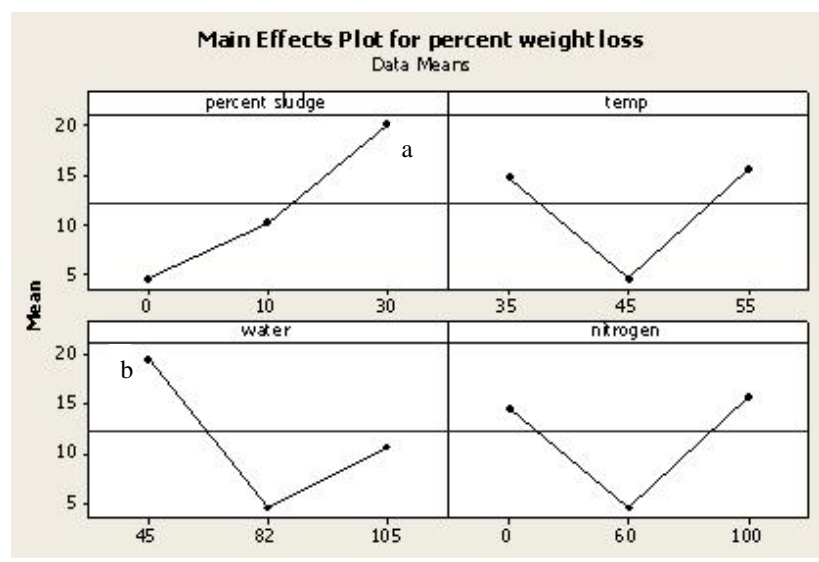
ภาพที่ 4.1 น้ำหนักแห้งที่เหลือของ PLA และ PBAT หลังการทดสอบการย่อยสลายเป็นเวลา 60 วัน

จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยวิธีทางสถิติ เพื่อกรองปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองการย่อยสลายของ PLA และ PBAT โดยการวิเคราะห์หาอิทธิพลจากปัจจัยหลักและปัจจัยรวมที่มีผลต่อการย่อยสลายของ PLA และ PBAT ซึ่งให้ผลวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

4.2.1 พอลิแลคติกแอซิด (PLA)

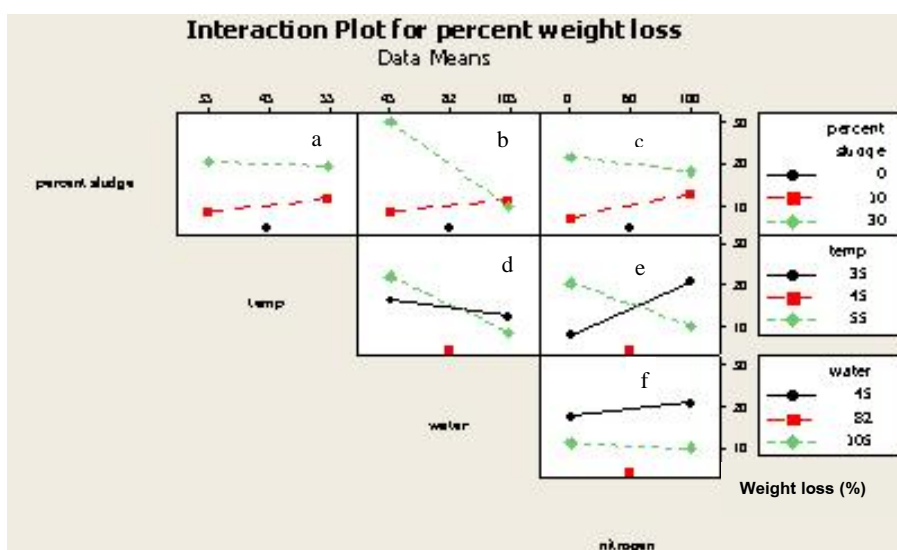
หลังจากวิเคราะห์ผลร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงของ PLA จากการย่อยสลาย 60 วัน ด้วยวิธีทางสถิติ เมื่อแยกพิจารณาเฉพาะปัจจัย พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายของ PLA อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (หมายถึงปัจจัยที่ทดลองแล้วมีอิทธิพลต่อการย่อยสลายของ PLA) โดยใช้ค่า alpha 0.05 มี 2 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณน้ำ และกากตะกอน (p-value 0.032

และ 0.025 ตามลำดับ) และปัจจัยที่มีอิทธิพลร่วมกันต่อการย่อยสลาย ได้แก่ ปริมาณน้ำร่วมกับกากตะกอน (p-value 0.019)



ภาพที่ 4.2 ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยสลายของ PLA

จากการสร้างแผนภูมิทางสถิติ ภาพที่ 4.2 แสดงอิทธิพลจากปัจจัยหลัก แกน x คือ ค่าปัจจัยต่างๆ แกน y คือ ค่าเฉลี่ยร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลง (% weight loss) จากทุกหน่วยทดลองที่ใช้ระดับปัจจัยนั้นๆ เช่น ทุกหน่วยทดลองที่ผสมกากตะกอนร้อยละ 30 น้ำหนักแห้งที่ลดลงจากการย่อยสลายเฉลี่ยแล้วประมาณร้อยละ 20 (a) ส่วนทุกหน่วยทดลองที่ผสมกากตะกอนร้อยละ 10 น้ำหนักแห้งที่ลดลงจากการย่อยสลายเฉลี่ยแล้วประมาณร้อยละ 5 เป็นต้น เส้นอ้างอิง (เส้นกลาง) คือ ค่าเฉลี่ยของร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงจากทุกหน่วยการทดลอง การแปลผลข้อมูลของภาพนี้แปลผลตามระดับสูงต่ำของจุดในแผนภูมิ (minitab Inc., 2005) โดยค่าปัจจัยของจุดที่อยู่สูงกว่าจะมีอิทธิพลต่อการย่อยสลายของ PLA มากกว่าค่าของจุดที่อยู่ต่ำกว่า ผลการทดลองพบว่าทุกหน่วยทดลองที่ผสมกากตะกอนร้อยละ 30 กับดินจากบ่อฝังกลบขยะ (a) และเติมน้ำ 45 มล.(b) ให้ผลในการย่อยสลายได้ดีกว่าหน่วยทดลองที่ใช้ระดับปัจจัยอื่นๆ การเพิ่มอุณหภูมิที่ 35 ถึง 55 องศาเซลเซียสให้ผลการย่อยสลายไม่ต่างกัน คล้ายกับการเติมหรือไม่เติมไนโตรเจน และอาจบอกได้ว่าในการทดลองนี้มีแบคทีเรียอยู่ 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิปานกลาง (mesophile) และอุณหภูมิสูง (thermophile) ที่สามารถย่อยสลาย PLA ได้



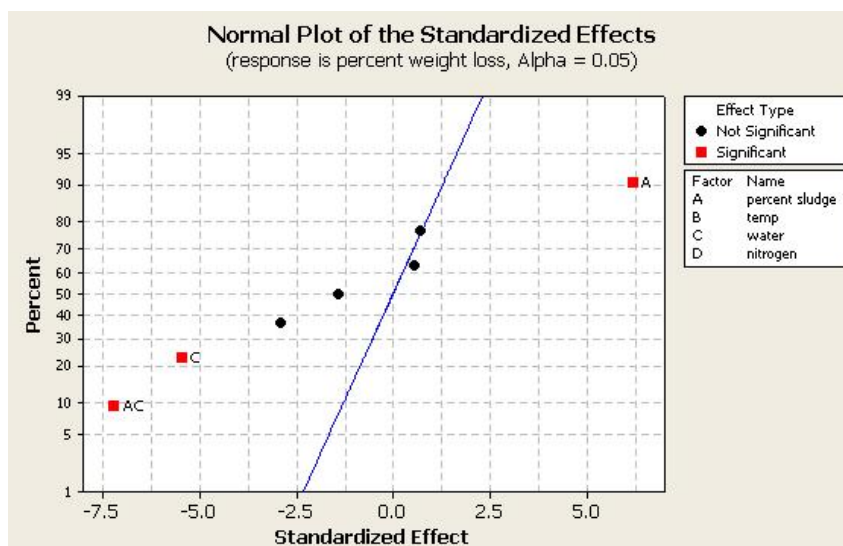
ภาพที่ 4.3 ปัจจัยร่วมที่ส่งผลต่อการย่อยสลายของ PLA

จากนั้นจึงพิจารณาภาพที่ 4.3 อิทธิพลร่วม (interaction) จากปัจจัยต่างๆ ซึ่งอิทธิพลร่วมจากปัจจัยอาจมีผลเพิ่มหรือลดการย่อยสลายของ PLA ได้ แกน x และกรอบสีขาวทางด้านขวา คือ ค่าของปัจจัย แกน y คือ ค่าร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงจากการย่อยสลายของ PLA (% weight loss) การแปลผลให้แปลผลตามความชันของเส้นค่าปัจจัยต่างๆ ยิ่งความชันมากยิ่งมีอิทธิพลร่วมต่อการย่อยสลาย PLA มาก การตัดกันของเส้นปัจจัยที่บริเวณปลายแสดงถึงการมีอิทธิพลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเห็นได้จากความชันของเส้นปัจจัยต่างกันมาก การตัดกันบริเวณกึ่งกลางแสดงถึงการมีอิทธิพลร่วมกันแต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเห็นได้จากความชันของเส้นปัจจัยที่ไม่ต่างกัน การที่เส้นปัจจัยมีความชันเท่าๆกันและเส้นไม่ตัดกันแสดงว่าค่าปัจจัยดังกล่าวไม่มีอิทธิพลร่วมต่อการย่อยสลายในช่วงค่าที่ใช้ในการทดลองนี้ (minitab Inc., 2005) ภาพที่ 4.3b จะเห็นว่าการเพิ่มกากตะกอน (ร้อยละ 30) และการเติมน้ำปริมาณน้อย (45 มล.) มีอิทธิพลร่วมกันให้ผลการย่อยสลายของ PLA ดีกว่าการเติมน้ำปริมาณน้อยและการเพิ่มปริมาณน้ำ ดูได้จากเส้นประสีเขียว (กากตะกอนร้อยละ 30) มีความชันมากกว่าเส้นสีแดงมาก (กากตะกอนร้อยละ 10) ส่วนอิทธิพลร่วมภาพที่ 4.3d อุดหนุนมีกับปริมาณน้ำมีอิทธิพลร่วมกันแต่ไม่มีนัยสำคัญส่งผลต่อการย่อยสลายเห็นได้จากเมื่อเพิ่มหรือลดอุดหนุนหรือปริมาณน้ำก็ได้ให้ค่าร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงจากการย่อยสลายต่างกันมากนักภาพที่ 4.3e อุดหนุนมีกับการเติมไนโตรเจน พบว่ามีอิทธิพลร่วมกันต่อการย่อยสลายที่อุดหนุนมีต่ำ (35 องศาเซลเซียส) การเพิ่มปริมาณไนโตรเจนช่วยให้การย่อยสลายดีขึ้น หรือหากไม่เติมไนโตรเจนการเพิ่มอุดหนุนเป็น 55 องศาเซลเซียสก็ให้ผลการย่อย

สลายที่ดีขึ้นเช่นกัน ส่วนภาพที่ 4.3a ร้อยละกากตะกอนกับปริมาณน้ำ ภาพที่ 4.3c ร้อยละกากตะกอนกับการเติมไนโตรเจน และภาพที่ 4.3f ปริมาณน้ำกับการเติมไนโตรเจน เส้นแสดงอิทธิพลร่วมของปัจจัยไม่มีจุดตัดกันแสดงว่าไม่มีอิทธิพลร่วมกันต่อการย่อยสลายของ PLA ในช่วงค่าที่ใช้ในการทดลอง

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของปัจจัยต่างๆ ภาพที่ 4.4 ผลปรากฏว่าการกระจายตัวเป็นแบบไม่ปกติ (เส้นสีน้ำเงินคือเส้นการกระจายตัวปกติ) หมายความว่าแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลองส่งผลต่อการย่อยสลายของ PLA ไม่เท่ากัน และปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจะมีความสัมพันธ์กันตามสมการการถดถอยที่ได้จากโปรแกรม minitab 16 ดังนี้

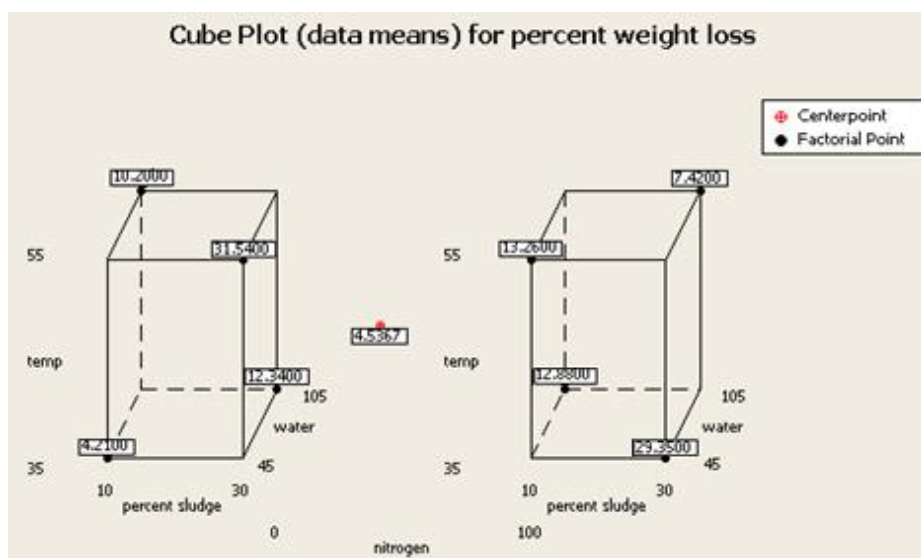
$$\text{Yield} = 15.150 + 5.012*\%sludge - 4.440*water - 5.843*\%sludge*water; R \text{ Square} = 0.9889$$



ภาพที่ 4.4 การกระจายแบบปกติของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการย่อยสลายของ PLA

สมการการถดถอยและภาพที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงของ PLA มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณกากตะกอน(A) และมีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณน้ำ (C และ AC) ผลการทดลองข้างต้น (ภาพที่ 4.2 และ 4.3) จะได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของ PLA คือ การเติมกากตะกอนร้อยละ 30 และปริมาณน้ำ 45 มล.แต่เนื่องจากอุณหภูมิและการเติมไนโตรเจนไม่ใช่ปัจจัยที่มีนัยสำคัญทางสถิติ (ภาพที่ 4.2) สามารถเลือกได้ทั้ง 35 และ 55 องศาเซลเซียส และเติมหรือไม่เติมไนโตรเจน แต่หากพิจารณาแผนภูมิ cube plot (ภาพที่ 4.5) ที่ได้

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติแผนภูมิแสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และไม่เติมไนโตรเจนให้ผลการย่อยสลาย PLA ได้ดีที่สุด



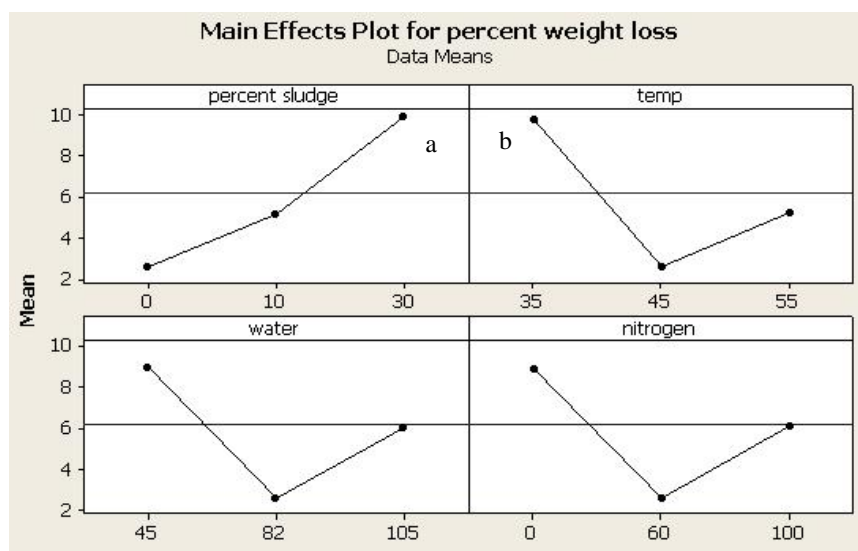
ภาพที่ 4.5 แผนภูมิ cube plot แสดงผลการย่อยสลายของPLA ภายใต้สภาวะต่างๆ

4.2.2 พอลิบิวทิลีนอะดิเพต-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT)

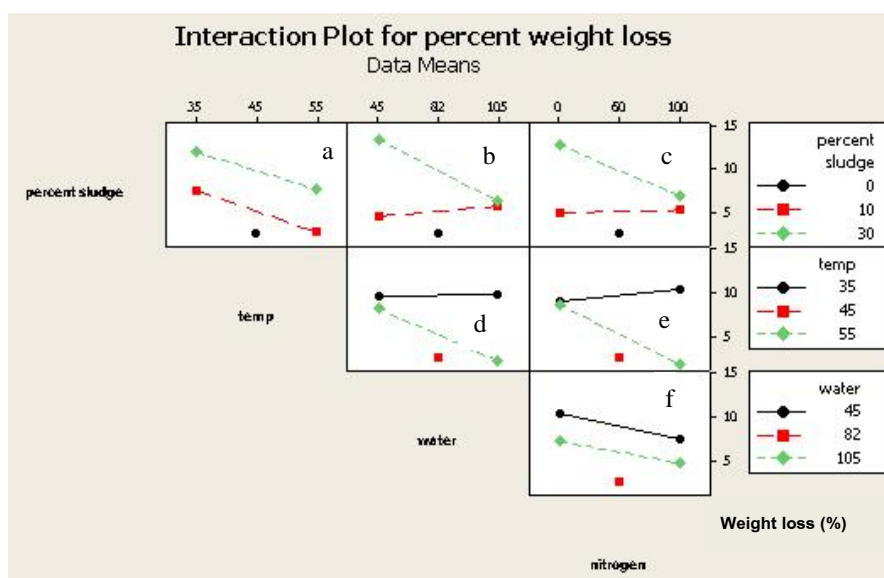
หลังจากการวิเคราะห์น้ำหนักแห้งที่ลดลงด้วยวิธีทางสถิติแล้วหากแยกพิจารณาเป็นปัจจัยภาพที่ 4.6 พบว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($\alpha = 0.05$) ต่อการย่อยสลาย PBAT มี 2 ปัจจัยคือ กากตะกอน และอุณหภูมิ (p-value 0.023 และ 0.024 ตามลำดับ) ส่วนอิทธิพลร่วม (ภาพที่ 4.7) จากปัจจัยมาจากกากตะกอนร่วมกับปริมาณน้ำ (p-value 0.028)

ภาพที่ 4.6 แผนภูมิแสดงอิทธิพลจากปัจจัยหลัก แกน x คือ ค่าปัจจัยต่างๆ แกน y คือ ค่าเฉลี่ยร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลง (% weight loss) จากทุกหน่วยทดลองที่ใช้ระดับปัจจัยนั้นๆ ผลการทดลองพบว่าทุกหน่วยทดลองที่ผสมกากตะกอนร้อยละ 30 (a) และใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (b) ให้ผลในการย่อยสลาย PBAT ได้ดีกว่าหน่วยทดลองที่ใช้ระดับปัจจัยอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนปริมาณน้ำ และการเติมไนโตรเจนหากพิจารณาเฉพาะอิทธิพลหลักจะแปลผลได้ว่าไม่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายของ PBAT และเห็นได้ว่าการเติมน้ำที่ปริมาณ 82 มล. ให้ผลร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงจากการย่อยสลาย (% weight loss) ต่ำ และปริมาณน้ำที่ 45 กับ 105 มล. ให้ผลร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P value 0.623) คล้ายกับ

การเติมหรือไม่เติมไนโตรเจนซึ่งให้ผลร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงของ PBAT ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (P value 0.543) เช่นกัน

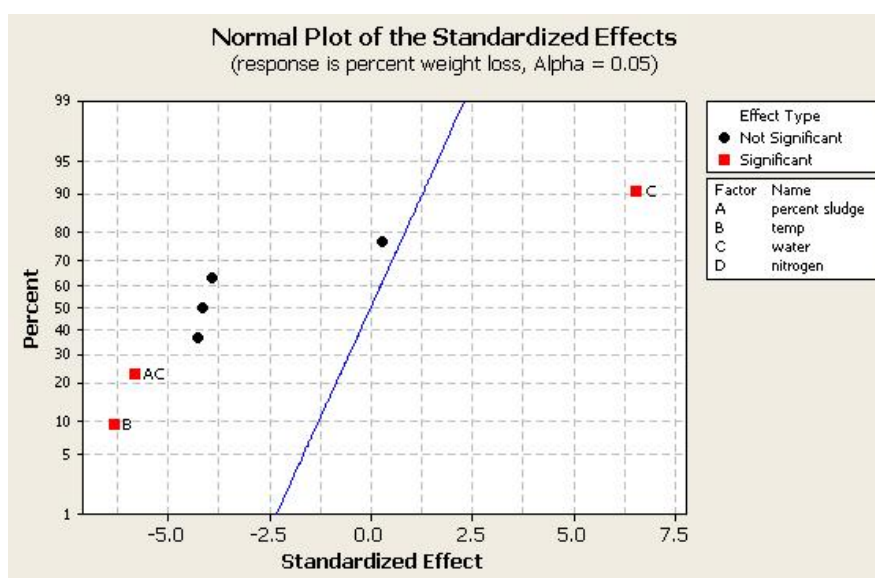


ภาพที่ 4.6 แผนภูมิแสดงปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยสลายของ PBAT



ภาพที่ 4.7 แผนภูมิแสดงปัจจัยร่วมที่มีผลต่อการย่อยสลายของ PBAT

ต่อมาพิจารณาอิทธิพลร่วมจากปัจจัยต่างๆ ภาพที่ 4.7 แกน x และกรอบสีขาวทางด้านขวา คือ ค่าของปัจจัยต่างๆ แกน y คือ ค่าร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงจากการย่อยสลาย (%weight loss) ของ PBAT จากภาพที่ 4.7b ผลปรากฏว่าการเพิ่มปริมาณกากตะกอน (ร้อยละ 30) กับการเติมน้ำปริมาณน้อย (45 มล.) มีอิทธิพลร่วมกันให้ผลการย่อยสลาย PBAT มากกว่าอิทธิพลร่วมจากปัจจัยอื่นๆ เห็นได้จากการที่เส้นประสีเขียว (กากตะกอนร้อยละ 30) มีความชันมากกว่าเส้นสีแดงมาก (กากตะกอนร้อยละ 10) เส้นปัจจัยตัดกันบริเวณปลายของเส้น และให้ผลร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงมากที่สุดประมาณร้อยละ 15 (แกน y) ซึ่งหากพิจารณาเฉพาะปัจจัยหลักจะไม่เห็นว่าแท้จริงแล้วปริมาณน้ำก็มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายของ PBAT แต่เป็นอิทธิพลร่วมกับร้อยละกากตะกอน ส่วนภาพที่ 4.7a อิทธิพลร่วมจากร้อยละกากตะกอนกับอุณหภูมิและภาพที่ 4.7f ปริมาณน้ำกับการเติมไนโตรเจน ไม่มีอิทธิพลร่วมกันอย่างชัดเจนเห็นได้จากเส้นปัจจัยที่ขนานกัน ส่วนภาพที่ 4.7c อิทธิพลร่วมระหว่างกากตะกอนและการเติมไนโตรเจน การเติมกากตะกอนร้อยละ 30 แต่ไม่เติมไนโตรเจนให้ผลในการย่อยสลายได้ดีกว่าการเติมไนโตรเจนไม่ว่าจะเติมกากตะกอนร้อยละ 10 หรือ 30 ก็ตาม และภาพที่ 4.7 e เห็นได้ว่าการเติมไนโตรเจน (100 มก./กก.) ไม่ส่งผลต่อการย่อยสลายของ PBAT ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แต่ที่ 55 องศาเซลเซียสการเติมไนโตรเจนกลับส่งผลให้ร้อยละการย่อยสลายของ PBAT ลดลง ภาพที่ 4.7d อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิกับปริมาณน้ำ การเพิ่มอุณหภูมิหรือปริมาณน้ำไม่ส่งผลให้ PBAT ย่อยสลายได้มากขึ้นแต่กลับทำให้การย่อยสลายของ PBAT ลดลงด้วย



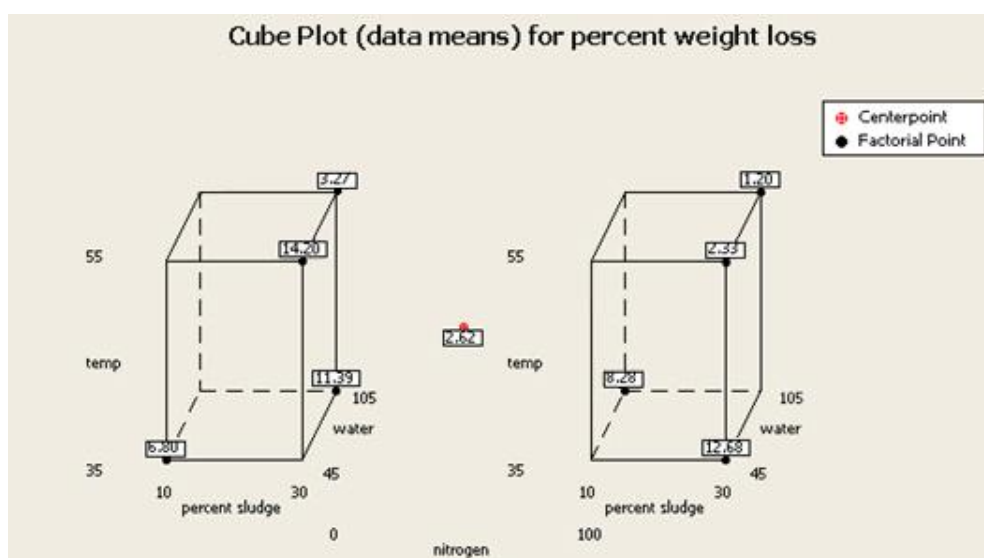
ภาพที่ 4.8 แผนภาพแสดงการกระจายแบบปกติของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการย่อยสลายของ PBAT

จากการวิเคราะห์การกระจายตัวของปัจจัยต่างๆ ภาพที่ 4.8 ผลปรากฏว่าการกระจายตัวเป็นแบบไม่ปกติหมายความว่าแต่ละปัจจัยที่ใช้ในการทดลองส่งผลต่อการย่อยสลายของ PBAT ไม่เท่ากันและปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติมีความสัมพันธ์กันตามสมการการถดถอยดังนี้

$$\text{Yield} = 7.519 + 2.349\% \text{sludge} - 2.269 \text{temperature} - 2.089\% \text{sludge} * \text{water};$$

$$R \text{ Square} = 0.9909$$

สมการถดถอยข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงจากการย่อยสลายของ PBAT มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับร้อยละกากตะกอนแต่มีความสัมพันธ์เชิงลบกับอุณหภูมิและร้อยละกากตะกอนร่วมกับปริมาณน้ำในหน่วยทดลอง



ภาพที่ 4.9 แผนภูมิ cube plot แสดงผลการย่อยสลายของ PBAT ภายใต้สภาวะต่างๆ

จากผลการวิเคราะห์อิทธิพลจากปัจจัยหลัก (ภาพที่ 4.6) ได้สภาวะที่คัดเลือกสำหรับการย่อยสลายของ PBAT คือ ผสมกากตะกอนร้อยละ 30 ปริมาณน้ำ 45 มล. อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์อิทธิพลจากปัจจัยหลักและ cube plot ทำให้เห็นว่าอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส น่าจะเหมาะสมต่อการย่อยสลายของ PBAT (ภาพที่ 4.6 และ 4.9) แต่มีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการทดลองย่อยสลาย PBAT ที่ช่วงอุณหภูมินี้แล้ว เช่น Massardier-Nageotte และคณะ, 2005 ทดลองย่อยสลาย Eastar Bio (ชื่อทางการค้าของ PBAT) ในสภาวะมีออกซิเจนและไร้ออกซิเจนที่

อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสใน aquatic condition 28 วัน พบว่า PBAT ย่อยสลายได้ร้อยละ 15 ในสภาวะมีออกซิเจนและไม่ย่อยสลายเลยในสภาวะไร้ออกซิเจน Someya และคณะ, 2007 ทดลองย่อยสลาย PBAT ด้วยอาหารเหลวสังเคราะห์ผสมกากตะกอนในสภาวะมีออกซิเจนควบคุมอุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส 60 วัน ปรากฏว่า PBAT ย่อยสลายประมาณไปร้อยละ 10 Mona และคณะ, 2012 ทดลองย่อย ecoflex (ชื่อการค้าของ PBAT) ด้วยดินจากชายฝั่งคลอง ดินสวน และดินจากกองปุ๋ยหมัก ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อผ่านไป 6 สัปดาห์ น้ำหนักแห้งของ PBAT ลดลงร้อยละ 90 88 และ 80 ตามลำดับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจการย่อยสลาย PBAT ด้วยอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส จึงเลือกอุณหภูมิดังกล่าวสำหรับใช้ศึกษาในการทดลองต่อไป

สรุปการทดลองจากข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 พบว่าปัจจัยหลักที่มีนัยสำคัญทางสถิติ มีอิทธิพลส่งผลต่อการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพทั้ง 2 ชนิดที่เหมือนกัน ได้แก่ กากตะกอนร้อยละ 30 เนื่องจากที่บ่อบำบัดของโรงงานผลิตขนมจีนไม่ได้มีการควบคุมอุณหภูมิ ก่อนการทดลองผู้วิจัยนำตัวอย่างกากตะกอนบางส่วนไปบ่ม (preincubate) ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส การบ่มเชื้อที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็นการคัดเลือกจุลินทรีย์ให้เหลือเฉพาะกลุ่มที่เจริญได้ในอุณหภูมิสูง (thermophile) และ/หรือจุลินทรีย์อื่นสามารถปรับตัวและเจริญได้ ดังนั้นการเพิ่มปริมาณกากตะกอนจึงอาจเป็นการเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้น (Yagi และคณะ, 2010) และปัจจัยร่วมที่เหมือนกัน ได้แก่ กากตะกอนร้อยละ 30 ร่วมกับปริมาณน้ำ 45 มล. ทั้งสองปัจจัยมีอิทธิพลร่วมกันในการย่อยสลายของพลาสติกทดสอบ จากการทดลองการเติมน้ำมากกว่า 45 มล. กากตะกอนบางส่วนจะลอยแยกชั้นจากดินทำให้การผสมไม่เป็นเนื้อเดียวกัน เป็นผลต่อเนื่องให้การกระจายตัวของประชากรจุลินทรีย์และสารอาหารกระจายไม่เท่ากันส่งผลต่อการย่อยสลายของพลาสติก

ปัจจัยหลักที่ไม่เหมือนกัน 2 ปัจจัย ได้แก่ (1) อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติต่อ PLA แต่มีนัยสำคัญต่อ PBAT เป็นไปได้ว่า PLA เมื่ออยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้อง (มากกว่า 25 องศาเซลเซียส) เป็นเวลานานจะเปราะและแตกออกเป็นชิ้นเล็กง่ายต่อการเกิดการย่อยสลายจากแบคทีเรียต่อไป (Biodegradable Products Institute, 2006) จากการทดลอง PBAT ย่อยสลายที่ 35 ได้ดีกว่าที่ 55 องศาเซลเซียส แต่ผู้วิจัยเห็นว่า PBAT เหนียวกว่า PLA (ระยะตั้งยัดร้อยละ 980 และ 30.7 ตามลำดับ) (จิตรระวี สุขเอมและคณะ, 2010) จึงสนใจการใช้ อุณหภูมิสูงเพื่อเร่งให้โครงสร้างของ PBAT เปลี่ยนแปลงได้เร็วขึ้น และ (2) ปริมาณน้ำ (มีนัยสำคัญทางสถิติต่อ PLA แต่ไม่มีนัยสำคัญต่อ PBAT) ที่ปริมาณน้ำ 45 มล. PLA ย่อยสลายได้ ส่วน PBAT นั้นยอมให้น้ำผ่านได้น้อย (226 มก./ม² ต่อวันที่ความดันบรรยากาศ) (จินดาวรรณ ปัญจางค์เจริญ และคณะ, 2010) การเติมน้ำ 45 82 หรือ 105 มล. จึงให้ผลการย่อยสลายไม่ต่างกัน ดังสรุปในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สรุปอิทธิพลของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มีผลต่อการย่อยสลายของ PLA และ PBAT

พลาสติกทดสอบ	อิทธิพลหลัก				อิทธิพลร่วม
	กากตะกอน	ปริมาณน้ำ	อุณหภูมิ	การเติมไนโตรเจน	กากตะกอนร่วมกับปริมาณน้ำ
PLA	√	√	×	×	√
PBAT	√	×	√	×	√

จากการวิเคราะห์ข้อมูลผู้วิจัยสามารถคัดเลือกสภาวะที่ใช้สำหรับการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายของ PLA และ PBAT ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สรุปสภาวะที่ใช้สำหรับการทดสอบความสามารถในการย่อยสลายของ PLA และ PBAT

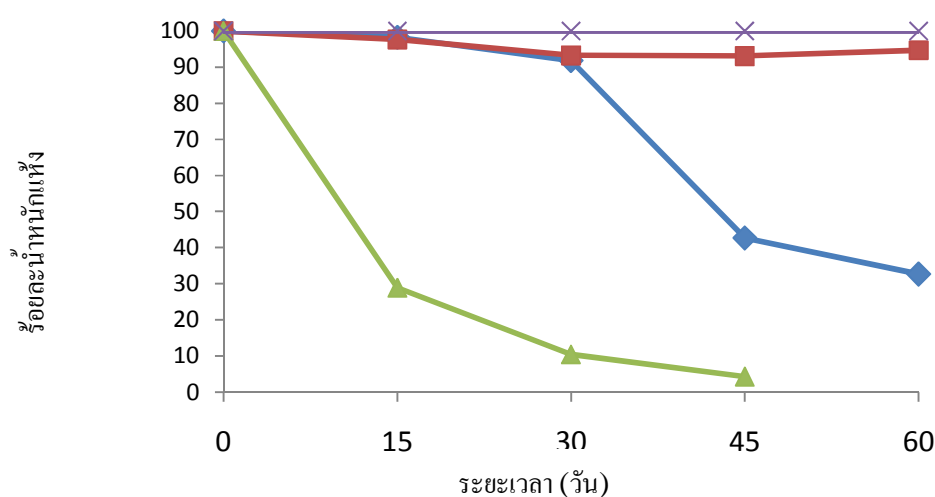
ปัจจัย			
ร้อยละกากตะกอน	ปริมาณน้ำ	อุณหภูมิ (°C)	การเติมไนโตรเจน (mg./ kg)
30	30	55	-

สภาวะที่คัดเลือกได้ตรงกับสภาวะทดลองของหน่วยทดลองที่ 7 ซึ่งให้ผลของการย่อยสลายที่ดีที่สุดโดย PLA และ PBAT น้ำหนักแห้งลดลงไปร้อยละ 31.54 และ 14.20ตามลำดับ

4.3 การศึกษาการย่อยสลายของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยระบบการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนภายใต้สภาวะที่คัดเลือก

จากตารางที่ 4.3 นำสภาวะซึ่งเป็นผลการคัดเลือกจาก ข้อ 4.2 มาทดสอบความสามารถในการย่อยสลายของพลาสติกทดสอบได้แก่ PLA PBAT และใช้ CE (positive control) กับ PE (negative control) เป็นวัสดุเปรียบเทียบเตรียมหน่วยทดลองโดยผสมพลาสติกทดสอบแต่ละชนิด

กับดินผสมกากตะกอนเติมน้ำ ควบคุมอุณหภูมิ(ข้อ 3.4.3)เก็บผลการทดลอง 4 ช่วงๆละ 15 วัน ทำการทดลอง 60 วัน ทำการทดลอง 3ซ้ำและตรวจติดตามพารามิเตอร์ต่างๆตามข้อ 3.4.5ผลการทดลองพบว่า CE ย่อยสลายได้รวดเร็ว น้ำหนักแห้งลดลงเหลือประมาณร้อยละ 5 ภายใน 45 วัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะน้ำในสารละลายในขวดปฏิกรณ์ทำให้ CE เปื่อยยุ่ยจึงย่อยสลายได้ง่าย ประกอบกับเซลล์ูโลสเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืชและโดยทั่วไปแล้วในดินจะมีซากพืชซึ่งซากพืชเหล่านี้จะเน่าเปื่อยและถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในบริเวณนั้น ดังนั้นดินที่นำมาทดลองจึงมีจุลินทรีย์ที่มีเอนไซม์ที่สามารถย่อยเซลล์ูโลสได้อยู่แล้ว(Leschine, 1995)จึงคุ้นเคยและทำให้ย่อยสลาย CE ได้รวดเร็ว ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายพลาสติกทดสอบมีความเป็นไปได้เนื่องจากในดินผสมกากตะกอนมีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายพอลิเมอร์ได้อยู่ลำดับต่อมาคือ PLA และ PBAT ตามลำดับ ส่วน PE นั้นไม่ย่อยสลายเลย ดังภาพที่ 4.10

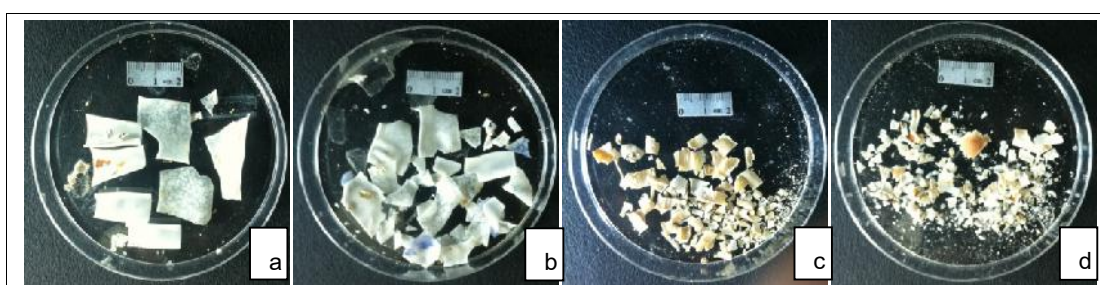


ภาพที่ 4.10 ร้อยละน้ำหนักแห้งของ PLA (◆) PBAT (■) CE (▲) และ PE (×) ที่ลดลงจากการย่อยสลายทางชีวภาพภายใต้สภาวะที่คัดเลือก

4.3.1 การย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิดภายใต้สภาวะที่คัดเลือก

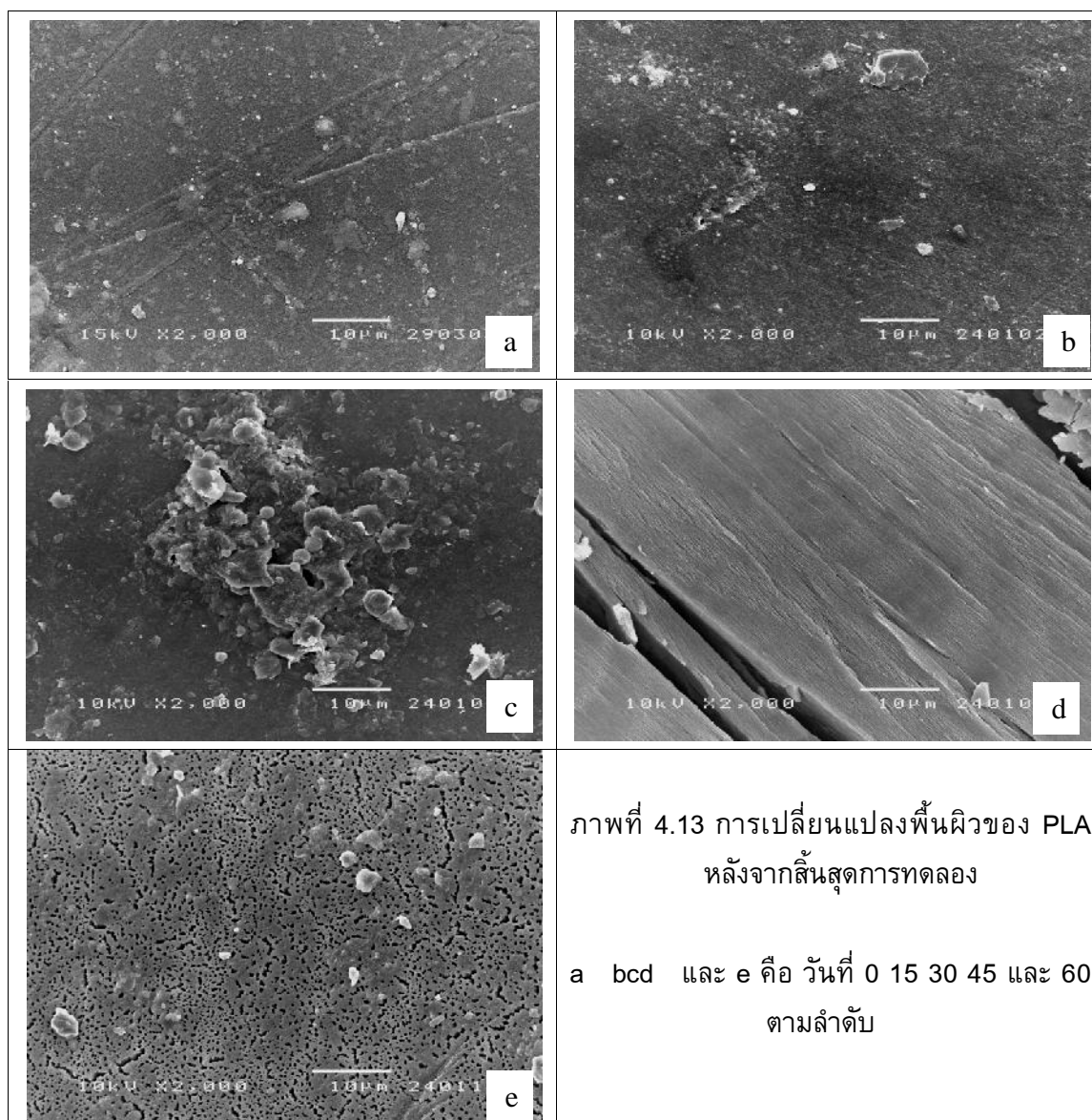
เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในวันที่ 15 และ 30 ของการทดลองน้ำหนักแห้งของ PLA ลดลงน้อย (ร้อยละ 1.79 และ 8.27) แต่ในช่วงหลังวันที่ 30 ถึง 45 น้ำหนักแห้งลดลงรวดเร็วจนเหลือร้อยละ 42.69 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (α 0.05 ค่า P 0.0018) กระทั่งในวันที่ 60 น้ำหนักแห้งลดลงเหลือเพียงประมาณร้อยละ 33 นอกจากนี้ น้ำหนักแห้งที่ลดลงไปแล้วยังมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและสีของ PLA อีกด้วย โดยพบว่าวันที่ 15 สีของ PLA เปลี่ยนจากใสเป็นขุ่น

ลักษณะบิดเบี้ยว เปราะ และหักง่าย (ภาพที่ 4.11) ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากอุณหภูมิในระบบใกล้เคียงกับ glass transition temperature (Tg) ของ PLA ทำให้ PLA เปราะ จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป PLA เริ่มหักและแตกเป็นชิ้นเล็กลงเรื่อยๆ เมื่อชิ้น PLA มีขนาดเล็กลงก็ง่ายต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ เมื่ออยู่ในสภาวะที่มีปริมาณน้ำเพียงพอประกอบกับเอนไซม์จากจุลินทรีย์เอง PLA จะถูกไฮดรอลิซิสและถูกตัดแบบสุ่มบริเวณหมู่เอสเทอร์ทั้งที่บริเวณปลายและบริเวณภายในสายโซ่ (ภาพที่ 4.12) และถูกจุลินทรีย์นำไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนดีในการเจริญ (Lucas และคณะ,2008)



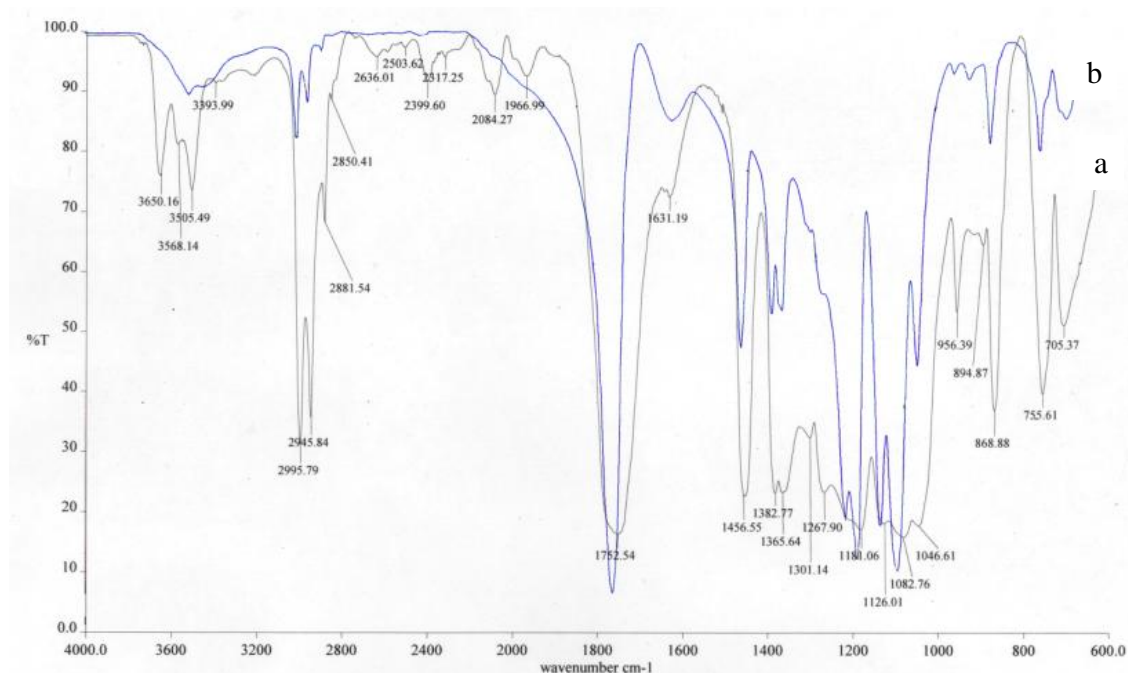
ภาพที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงของ PLA หลังการทดลอง 15 (a) 30 (b) 45 (c) และ 60 (d) วัน ตามลำดับ

เพื่อยืนยันการเปลี่ยนแปลงของชิ้นพลาสติกที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลาย จึงตรวจสอบพื้นผิวของชิ้น PLA ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 2,000 เท่า ได้ผลดังภาพที่ 4.13 จากภาพแสดงการเปลี่ยนแปลงของ PLA หลังการทดลองวันที่ 15 30 45 และ 45 ซึ่งเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงไปของพื้นผิว PLA เมื่อเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ในวันที่ 15 พื้นผิวยังค่อนข้างเรียบ พอผ่านไปในวันที่ 30 PLA เริ่มเปื่อย ในวันที่ 45 พบว่าชิ้น PLA มีรอยแตกที่เป็นผลมาจากสมบัติด้านความร้อนของพลาสติก และอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม (55 องศาเซลเซียส) เมื่อสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 60 ชิ้น PLA เกิดรูพรุนไปทั่ว และแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ ดังภาพที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงของชิ้น PLA ต่อเวลาที่แสดงไว้ข้างต้นซึ่งมีผลดีต่อแบคทีเรียในการย่อยสลายทางชีวภาพการแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆ และการเกิดรูพรุนเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการเข้าจับ (attach) ของจุลินทรีย์ทำให้โอกาสในการย่อยสลายเพิ่มมากขึ้น

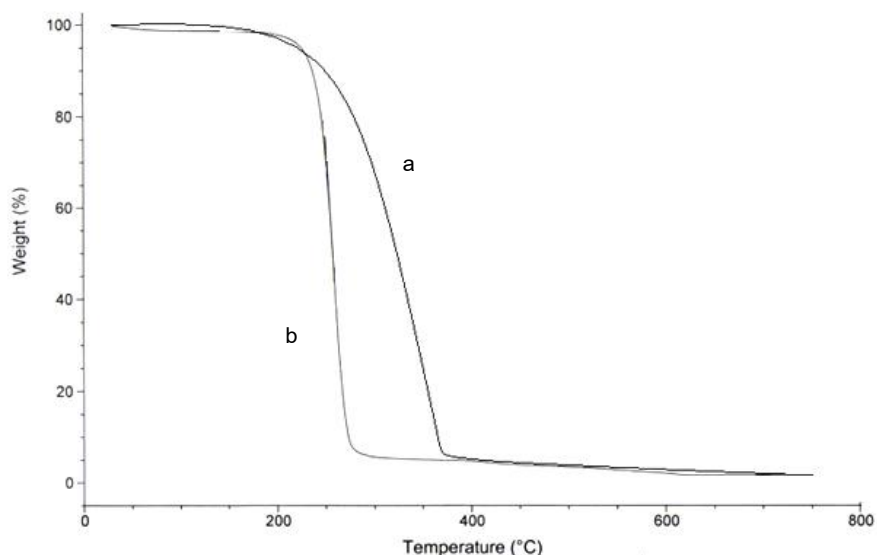


ภาพที่ 4.14 แสดงให้เห็นว่าสเปกตรัม FT – IR ของ PLA ก่อนและหลังการย่อยสลายยังคงมียอดสเปกตรัมตรงตำแหน่งเดิม ดังนั้นจึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของ PLA ไปเป็นพอลิเมอร์หรือสารชนิดอื่น แต่เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมตรงช่วง wave number 2,800 – 2,000 แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากการย่อยสลายของ PLA ดังนั้นต่อมาจึงนำชิ้น PLA ก่อนและหลังทดสอบการย่อยสลายมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อน ด้วยวิธี TGA (thermal gravity analysis) โดยทั่วไปนั้นเมื่อพลาสติกมีการ

เปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากการถูกย่อยสลายเทอร์โมแกรมที่ได้จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย (ชาริณี นามพิชญ์ และคณะ, 2553) อุณหภูมิที่ทำให้น้ำหนักของ PLA ก่อนการทดสอบการย่อยสลายถูกเผาจนมวลพลาสติกลดลงเหลือร้อยละ 95 (T_{95}) 50 (T_{50}) และ 5 (T_5) คือประมาณ 225 325 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากภาพที่ 4.17 เห็นได้ว่าการทดสอบการย่อยสลายของ PLA เทอร์โมแกรมที่ได้แตกต่างไปจากเดิมยกเว้นที่ T_{95} ยังเท่าเดิมคือ 225 องศาเซลเซียส แต่ T_{50} และ T_5 ของ PLA เปลี่ยนไปเป็น 250 และ 325 องศาเซลเซียสเทอร์โมแกรมที่เปลี่ยนไปจากเดิมแสดงดังภาพที่ 4.15 สาเหตุอาจมาจากมวลโมเลกุลที่ลดลงเนื่องจากการย่อยสลายของ PLA ทำให้ PLA สลายได้ง่ายขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเผาขึ้นไปเรื่อยๆ จากผลสเปกตรัม FT – IR และเทอร์โมแกรม TGA แสดงให้เห็นว่า PLA ย่อยสลายได้ที่สภาวะคัดเลือกนี้



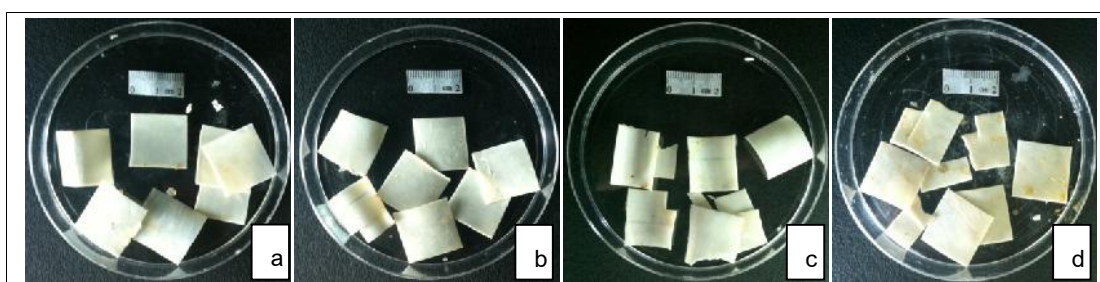
ภาพที่ 4.14 FT – IR สเปกตรัมของ PLA ก่อน (a) และหลัง (b) จากการย่อยสลาย 60 วัน; C=O ($1,750 \text{ cm}^{-1}$) และ O-H ($3,600 - 3,000 \text{ cm}^{-1}$)



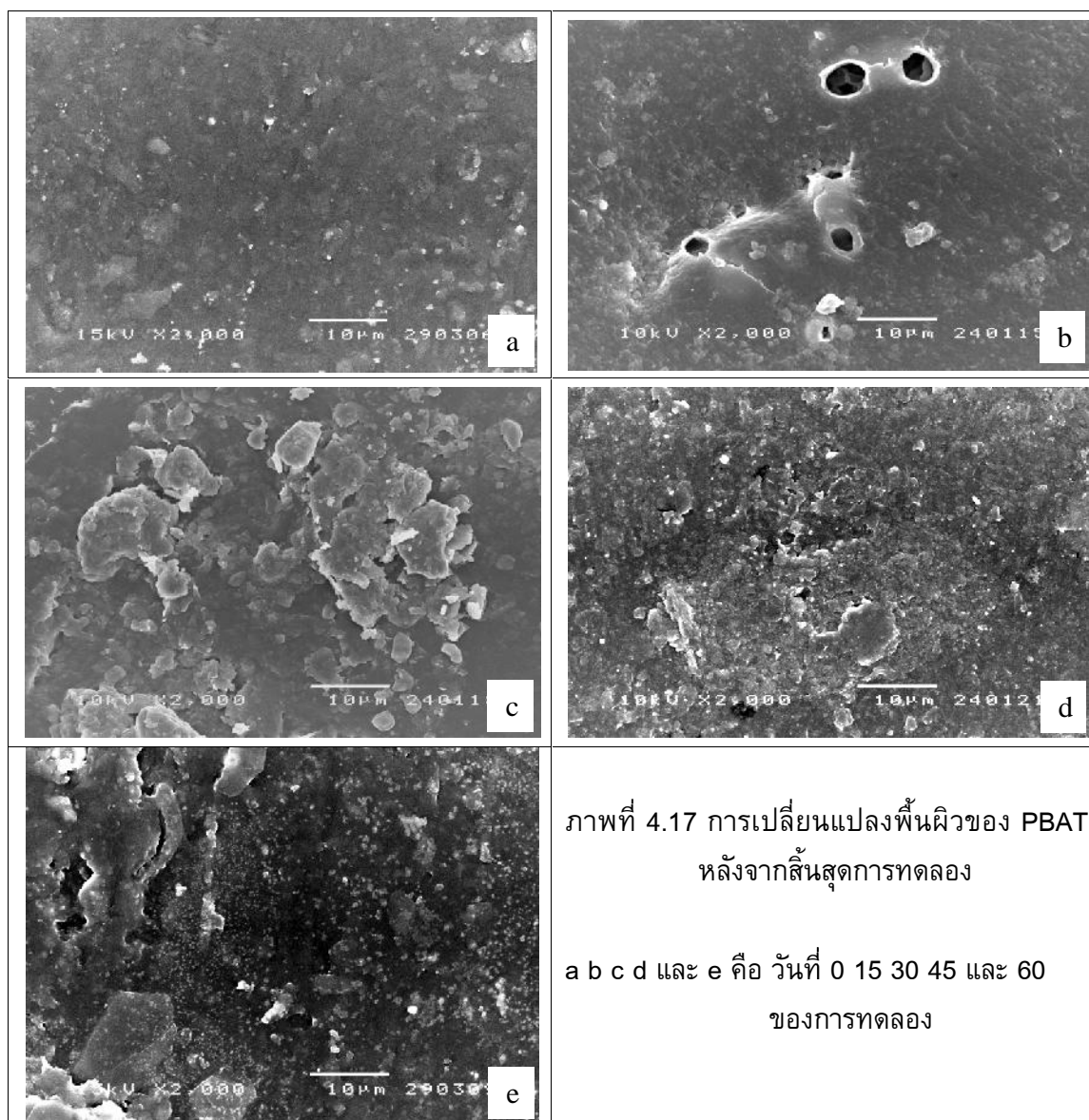
ภาพที่ 4.15 TGA เทอร์โมแกรมของ PLA ก่อน (a) เปรียบเทียบกับหลังการย่อยสลาย 60 วัน (b)

4.3.2 การย่อยสลายของพอลิเอธิลีนอะดิเพต - โค - เทเรฟทาเลทภายใต้สภาวะที่คัดเลือก

หลังจากทำการทดลอง 60 วันปรากฏว่าPBAT นั้นย่อยสลายได้เพียงร้อยละ 5 คล้ายกับรายงานของนักวิจัยท่านอื่น(Someyaและคณะ, 2006; Mohantiและคณะ, 2010; อาจสืบเนื่องมาจากพลาสติกชนิดนี้ได้ถูกปรับปรุงคุณสมบัติให้มีความแข็งแรงและคงทนมากกว่า PLAเมื่อสังเกตด้วยตา พบว่าเมื่อเวลาการทดลองเพิ่มขึ้น PBAT มีสีคล้ำลงมีรอยโป่งบวม บางส่วนโปร่งแสงมากขึ้น และจากเดิมที่มีความเหนียวฉีกได้ยากกลับสามารถฉีกเป็นริ้วได้ง่าย ดังภาพที่ 4.16



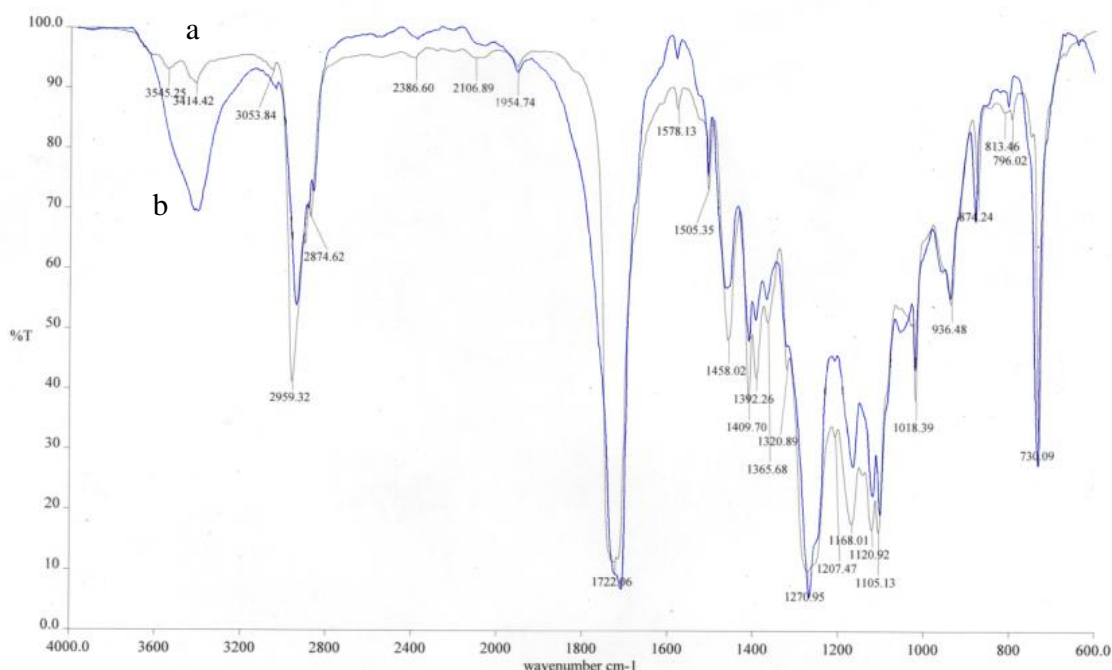
ภาพที่ 4.16 การเปลี่ยนแปลงของ PBAT หลังการทดลองที่เวลาต่างๆ (a b c และ d คือ PBAT หลังการทดลอง 15 30 45 และ 60 วัน ตามลำดับ)



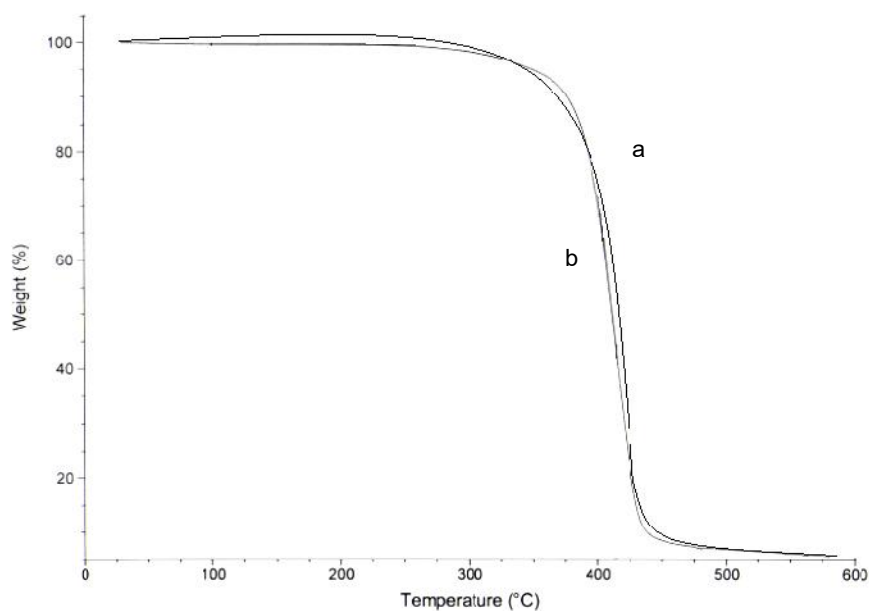
เพื่อยืนยันการเปลี่ยนแปลงของชั้นพลาสติกที่เกิดขึ้น เมื่อสิ้นสุดการทดสอบการย่อยสลายผู้วิจัยจึงตรวจสอบพื้นผิวของชั้น PBAT ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 2,000 เท่าเช่นเดียวกับ PLA ซึ่งได้ผลดังภาพที่ 4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ PBAT หลังจากการทดลองวันที่ 0 15 30 45 และ 60 ก่อนการทดลองเมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนพบว่า PBAT มีพื้นผิวค่อนข้างเรียบเมื่อเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นเป็น 15 วัน ชั้นพลาสติกเกิดที่พื้นผิวพอผ่านไปถึงวันที่ 30 จึงเริ่มเปื่อยเล็กน้อยในวันที่ 45 พบว่าชั้น PBAT เปื่อย

ยุ่ยลึกลงไปในเนื้อพลาสติกมากขึ้นและมีลักษณะเป็นขุย หลังสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 60 ชิ้น PBAT เปื่อยและเป็นขุยลึกลงมากขึ้นไปอีก นั่นอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ชิ้น PBAT ฉีกขาดได้ง่ายขึ้นกว่าตอนก่อนการทดสอบการย่อยสลาย ถึงแม้ว่าน้ำหนักแห้งของ PBAT ไม่ได้ลดลงมากนักแต่ก็เกิดการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวซึ่งชี้ให้เห็นถึงแนวโน้มในการย่อยสลายได้ของ PBAT แต่อาจจะต้องใช้เวลาในการย่อยสลายนานกว่า PLA มาก

จากนั้นพิจารณาผลสเปกตรัม FT – IR ของ PBAT (ภาพที่ 4.18) เพื่อตรวจโครงสร้างทางเคมี สเปกตรัม FT – IR ของ PBAT ก่อนและหลังการย่อยสลาย ยอดของสเปกตรัมที่ตำแหน่งต่างๆยังคงเหมือนเดิม แสดงว่าโครงสร้างทางเคมีของ PBAT หลังการย่อยสลายไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปเป็นพอลิเมอร์ชนิดอื่น TGA เทอร์โมกราฟของ PBAT ก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลาย 60 วันนั้นไม่แตกต่างกัน (ภาพที่ 4.19) แสดงว่าพอลิเมอร์ชนิดนี้ย่อยสลายได้น้อยมาก ก่อนการทดสอบการย่อยสลายอุณหภูมิที่ทำให้น้ำหนักของ PBAT ถูกเผาจนมวลลดลงเหลือร้อยละ 95 (T_{95}) 50 (T_{50}) และ 5 (T_5) คือประมาณ 360 400 และ 410 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ต่อมาหลังจากการทดสอบการย่อยสลาย ค่า T_{95} T_{50} และ T_5 ของ PBAT อยู่ที่ 360 385 และ 400 องศาเซลเซียสตามลำดับ



ภาพที่ 4.18 FT – IR สเปกตรัมของ PBAT ก่อน (a) และหลัง (b) จากการย่อยสลาย 60 วัน; C=O ($1,750\text{ cm}^{-1}$)และO-H ($3,600 - 3,000\text{ cm}^{-1}$)



ภาพที่ 4.19 TGA เทอร์โมแกรมของ PBAT ก่อน(a) เปรียบเทียบกับหลังการย่อยสลาย 60 วัน (b)

ผลความเสถียรทางความร้อนของพลาสติกทั้ง 2 ชนิดได้สรุปดังตารางที่ 4.4 T_{95} T_{50} และ T_5 ของ PLA และ PBAT เปรียบเทียบก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลาย 60 วัน

ตารางที่ 4.4 ผลความเสถียรทางความร้อนของพลาสติกทดสอบ

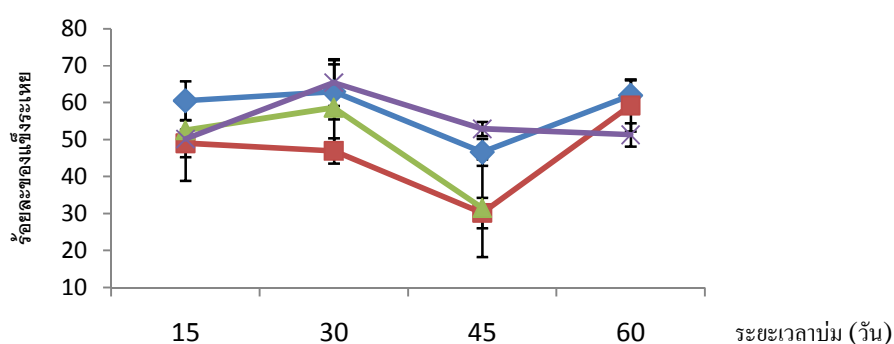
Biodegradable plastic		T_{95} (°c)	T_{50} (°c)	T_5 (°c)	T_5 (°c)
PLA	day0	225	325	400	75
	day60	225	250	325	
PBAT	day0	360	390	410	10
	day60	360	385	400	

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่าค่าความเสถียรทางความร้อนที่ T_5 ของ PLA ลดลงไปอย่างเห็นได้ชัด เพราะ PLA ถูกย่อยสลายไปในการทดลองเมื่อนำไปเผาด้วย TGA จึงสลายตัวง่ายขึ้นต่างจาก PBAT ที่ T_5 ลดลงไปเล็กน้อย แสดงว่า PBAT เกิดการย่อยสลาย

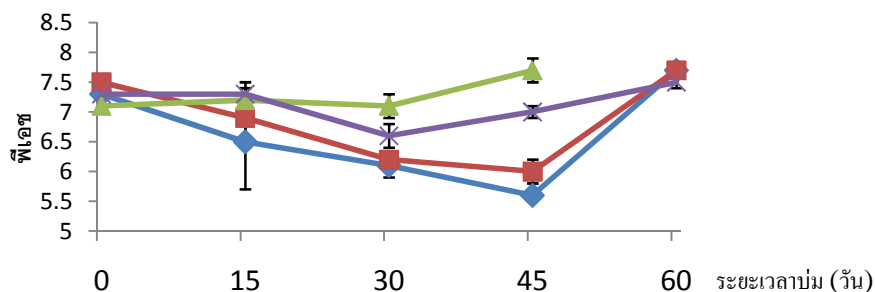
4.3.3 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA และ PBAT ภายใต้สภาวะคัดเลือก

4.3.3.1 ร้อยละของแข็งระเหยและค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลง

เมื่อพิจารณา ภาพที่ 4.20 ร้อยละของแข็งระเหย (VS) ที่เปลี่ยนแปลงขณะทำการทดลองซึ่งค่าของแข็งระเหยแสดงปริมาณสารอินทรีย์ในดิน ปริมาณสารอินทรีย์มีการเปลี่ยนแปลงตลอด 60 วัน แสดงว่ามีกิจกรรมของแบคทีเรียในดินผสมกากตะกอน และพบว่ามีผลสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช (ภาพที่ 4.21) โดยในช่วงวันที่ 15 ถึง 30 ทั้ง PLA และ PBAT ปริมาณของแข็งระเหยยังไม่เปลี่ยนแปลงมากนักแต่จะลดต่ำลงหลังจากวันที่ 30 จนถึงวันที่ 45 เช่นเดียวกับค่าพีเอช สำหรับ PLA ค่าพีเอชที่ต่ำลงเนื่องมาจากการย่อยสลาย PLA โดยแบคทีเรียเป็นกรดอินทรีย์อย่างง่ายตามขั้นตอนที่สอง (acidogenesis) ในกระบวนการสร้างมีเทน (methanogenesis) (Lyberatos, 1998) เห็นได้จากน้ำหนักแห้งของ PLA ลดลงอย่างต่อเนื่องหลังวันที่ 30 ของการทดลอง (ภาพที่ 4.10) ส่วน PBAT นั้นค่าพีเอชที่ลดลงของหน่วยทดลองอาจเนื่องมาจากแบคทีเรียเปลี่ยนสารอินทรีย์ในดินผสมกากตะกอนให้เป็นกรดอินทรีย์อย่างง่ายไม่ได้มาจากการย่อยสลาย PBAT เห็นได้จากน้ำหนักแห้งของ PBAT ลดลงเพียงเล็กน้อยตลอดการทดลองแต่หลังจากนั้นในช่วงวันที่ 45 ถึง 60 ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นอีกครั้งและกลับมาอยู่ในช่วงเป็นกลางเหมือนเดิมการที่ปริมาณกรดลดลงสาเหตุอาจมาจากแบคทีเรียได้ใช้กรดอินทรีย์ไปเป็นแหล่งคาร์บอนในกระบวนการเมแทบอลิซึมหรือการสร้างเซลล์ และเมื่อมีเซลล์แบคทีเรียในดินมากขึ้น การตรวจของแข็งระเหยด้วยการเผาส่งที่เหลืออยู่ในหน่วยทดลองหลังจากการแยกพลาสติกทดสอบออกแล้ว(ดินผสมกากตะกอน) ที่อุณหภูมิ 550 °C ค่าของแข็งระเหยที่เพิ่มอาจจะมาจากเซลล์นั่นเอง



ภาพที่ 4.20 ร้อยละของแข็งระเหยในดินผสมกากตะกอนที่วัดได้จากการย่อยสลายของ PLA (◆) PBAT (■) CE (▲) และ Blank (×) ภายใต้สภาวะที่คัดเลือก



ภาพที่ 4.21 ค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงในดินผสมกากตะกอนจากการย่อยสลายของ PLA (◆) PBAT (■) CE (▲) และ Blank (×) ภายใต้สภาวะที่คัดเลือก

จากภาพที่ 4.21 แสดงความเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชตลอดการทดลอง สังเกตได้ว่าในวันที่ 45 ค่าพีเอชของหน่วยทดลอง PLA และ PBAT ลดลงต่ำมาก (ประมาณ 5.5 และ 6 ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่าหน่วยทดลองขาดการสะเทิน (buffering) ที่ดี (Eliyan และคณะ, 2007) ซึ่งอาจส่งผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพได้ ส่วน Blank ค่าของแข็งระเหยและค่าพีเอชเปลี่ยนแปลงอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติตลอดการทดลอง (ที่ค่า alpha 0.05 ค่า p เป็น 0.07)

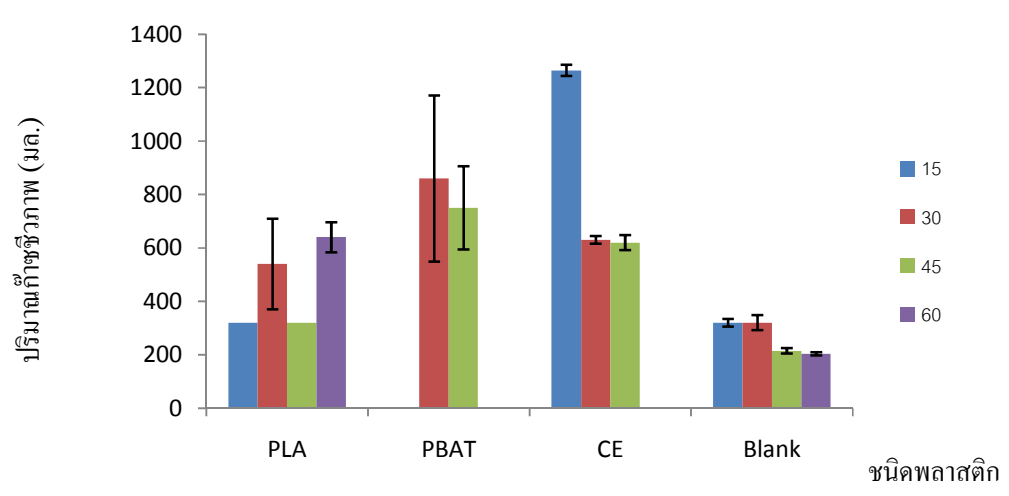
4.3.3.2 ร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพ (% biodegradation) ของพอลิแลคติกแอซิด (PLA) และพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลท (PBAT)

จากการเก็บผลการย่อยสลายของ PLA PBAT CE และชุดทดลองที่ไม่ได้ใส่พลาสติก (blank) ทุกๆ 15 วัน ตลอดการทดลอง 60 วัน ภายใต้สภาวะคัดเลือก พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพจาก blank เกิดก๊าซชีวภาพในแต่ละช่วงพอกันในวันที่ 15 และ 30 ประมาณ 320 มล. ในวันที่ 45 และ 60 ประมาณ 200 มล. และให้ก๊าซชีวภาพเฉลี่ยรวมประมาณ 1,060 มล. พบว่า CE ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากในช่วง 15 วันแรกประมาณ 1,265 มล. ต่อมาในวันที่ 30 และ 45 จึงลดลงซึ่งเกิดก๊าซชีวภาพประมาณ 630 และ 620 มล. ตามลำดับให้ก๊าซชีวภาพเฉลี่ยรวมประมาณ 2,515 มล. แต่เมื่อเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพจาก blank เพื่อหักปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินผสมกากตะกอนออกจะเหลือก๊าซชีวภาพในวันที่ 15 30 45 และก๊าซชีวภาพเฉลี่ยรวมประมาณ 945 310 400 และ 1,452 มล. ตามลำดับเมื่อพิจารณาผลของน้ำหนักแห้งที่ลดลงประกอบ (ข้อ 4.3.1) เป็นไปได้ว่า CE ย่อยสลายได้ง่ายจึงให้ก๊าซชีวภาพปริมาณมากในช่วงแรก แต่เมื่อถูกย่อยสลายหมดไปเรื่อยๆ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจึงลดลง

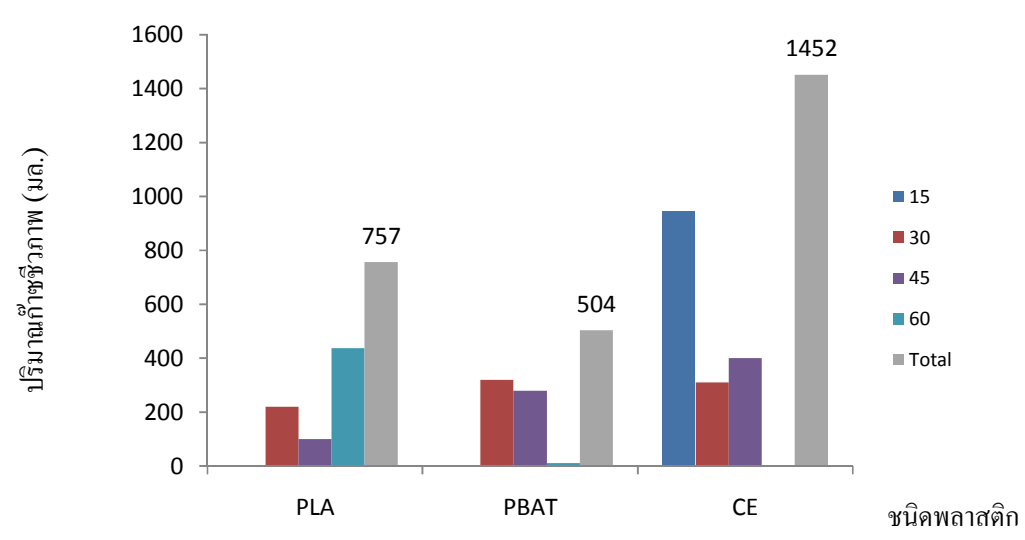
ในการย่อยสลายPLA ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้มีลักษณะแกว่งขึ้นลง ช่วงการสร้างและการสะสมกรด และช่วงการเปลี่ยนกรดเป็นก๊าซชีวภาพอาจเป็นสาเหตุให้แผนภูมิมีลักษณะดังกล่าว วันที่ 15 30 45 และ 60 เกิดก๊าซชีวภาพปริมาณ 320 540 320 และ 640 มล. ตามลำดับ ให้ก๊าซชีวภาพเฉลี่ยรวมประมาณ 1,820 มล. เมื่อเทียบกับปริมาณก๊าซชีวภาพจาก blank จะเหลือก๊าซชีวภาพจากวันที่ 15 30 45 60 และก๊าซชีวภาพเฉลี่ยรวม ปริมาณ 0(วันที่ 15 ไม่พบก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลาย) 220100 437และ 757มล.ตามลำดับ

ส่วน PBATวันที่ 15 30 45 และ 60 เกิดก๊าซชีวภาพปริมาณ 210 640 500 และ 213 มล.ตามลำดับ ให้ก๊าซชีวภาพเฉลี่ยรวมประมาณ 1,563มล. เมื่อหักลบกับปริมาณก๊าซชีวภาพจาก blank จะเหลือก๊าซชีวภาพจากวันที่ 15 30 45 60 และก๊าซชีวภาพเฉลี่ยรวม ปริมาณ 0 (วันที่ 15 ไม่พบก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลาย)320 280 10 และ 504มล.ตามลำดับผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.22 และ 4.23

จากภาพที่ 4.23 จะเห็นว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ยของ PLA มากกว่าPBAT (1,567และ 747มล. ตามลำดับ) สอดคล้องกับผลร้อยละน้ำหนักแห้งของ PLA ลดลงกว่า PBAT อย่างมาก(ภาพที่ 4.10) เป็นไปได้ว่าแบคทีเรียย่อยสลาย PBAT ได้ยากก๊าซชีวภาพที่ได้จึงมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในดินผสมกากตะกอน เห็นได้จากปริมาณของแข็งระเหยที่ลดลงไปมากในช่วงวันที่ 15 ถึง 45 โดยลดลงไปมากกว่าร้อยละ 20 เมื่อวิเคราะห์ร้อยละมีเทนในก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายของพลาสติกทดสอบทั้ง 2 ชนิด 30 วันแรกตรวจพบมีเทนได้เล็กน้อย สาเหตุที่ความเข้มข้นมีเทนในก๊าซชีวภาพไม่สูงเท่าที่ควรนั้นเพราะค่าพีเอชไม่เหมาะสมต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน (methanogen)(พีเอช 5.5 – 7 ดังแสดงในภาพที่ 4.15) ซึ่งโดยปกติแล้วพีเอชที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 7.2 – 8.2 (Rise-at, 1998)จากนั้นจึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ในวันที่ 60 ของการทดลอง PLA และ PBAT ตรวจพบมีเทนร้อยละ 20.95 และ 13.04 ตามลำดับ



ภาพที่ 4.22 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยในแต่ละช่วงการเก็บตัวอย่างจากการทดสอบการย่อยสลายของ PLA PBAT CE และ Blank ภายใต้สภาวะที่คัดเลือก



ภาพที่ 4.23 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยในแต่ละช่วงและก๊าซชีวภาพเฉลี่ยรวมจากการทดสอบการย่อยสลายของ PLA PBAT และ CE หลังหักลบกับ Blank ภายใต้สภาวะที่คัดเลือก

คำนวณร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพ (% biodegradation) จากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพเทียบกับก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทางทฤษฎี ดังสมการต่อไปนี้

$$\% \text{ Biodegradation} = [(V_s - V_b) / V_{\max}] \times 100 \text{ ----- 1.}$$

- เมื่อ V_{\max} คือ ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทางทฤษฎีที่ความดันบรรยากาศ
- V_{\max} = $[\text{mass}_{(\text{material})} / \text{molecular weight}) \times \text{carbon atom} \times 22.4]$ ----- 2.
- V_s = ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริง
- V_b = ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจาก blank

ในการคำนวณร้อยละความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (%biodegradation) จะต้องหักไอน้ำที่ระเหยจากขวดปมไปยังหน่วยเก็บก๊าซออกจากปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด เพื่อให้ได้ปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นจริง $V(\text{CO}_2+\text{CH}_4)$ ดังสมการ

$$V(\text{CO}_2+\text{CH}_4) = [(P_{\text{atom}} - P_w) / (P_{\text{atom}})] \times V_m \text{ ----- 3.}$$

$$V_s = (273/T_r) \times (P_{\text{atom}} / 1013) \times V(\text{CO}_2+\text{CH}_4) \text{ ----- 4.}$$

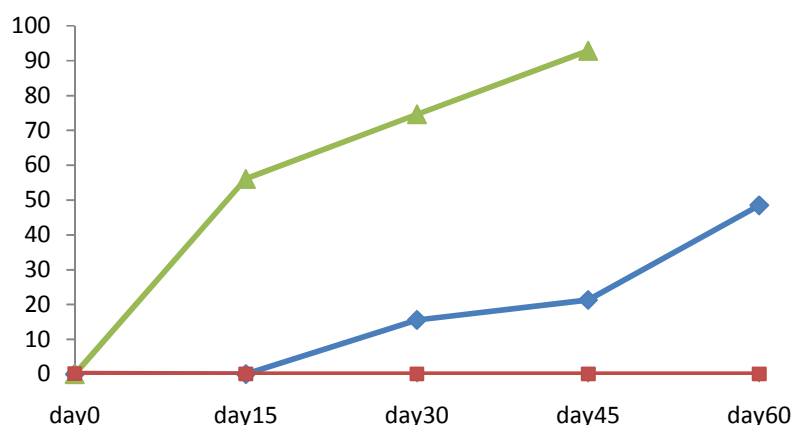
- V_m คือ ปริมาตรก๊าซที่ได้จากการทดลอง (L)
- V_s คือ ปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นที่สภาวะมาตรฐาน (273^0 K , 1013.25 hPa)
- P_{atom} คือ ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง (1013.25 hpa)
- P_w คือ ความดันไอน้ำที่อุณหภูมิห้อง (31.699 hpa)
- T_r คือ อุณหภูมิห้อง (298.15^0 K) (Yagi และคณะ, 2009)

จากการคำนวณในภาคผนวก ค่าต่างๆ ได้สรุปรวมไว้ดังแสดงในตาราง 4.5

ตารางที่ 4.5 สรุปค่าต่างๆ สำหรับการคำนวณร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพในสภาวะที่คัดเลือก

Plastic	V_{\max} (litre)	V_m (litre)	$V(\text{CO}_2+\text{CH}_4)$ (litre)	V_s (litre)
Blank	-	1.06	1.02	0.93
CE	1.24	2.51	2.43	2.22
PLA	1.40	1.82	1.76	1.61
PBAT	196.75	1.56	1.51	1.38

นำค่าต่างๆ จากตารางที่ 4.5 คำนวณตามสมการที่ [1.] จะได้ร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกทดสอบในสภาวะที่คัดเลือกดังภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 ร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพคิดจากก๊าซชีวภาพสะสมของPLA (◆) PBAT (■) และ CE (▲) ภายใต้สภาวะที่คัดเลือก

จากผลการทดลองภาพที่ 4.24 ร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพคิดจากก๊าซชีวภาพสะสม (evolved biogas) ของ PLA PBAT และCE ภายใต้สภาวะที่คัดเลือก พบว่าCE เริ่มเกิดก๊าซจากการย่อยสลายทางชีวภาพตั้งแต่วันแรกของการทดลองและสะสมเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 15 คิดร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพได้เป็นร้อยละ 56 หลังจากนั้นจึงลดลงและหยุดให้ก๊าซในวันที่ 45 คิดค่าการย่อยสลายทางชีวภาพได้ร้อยละ 92.8 คล้ายกับงานวิจัยของ Yagi และคณะ, 2009 ต่างจาก PLA ที่เริ่มเกิดก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายในวันที่ 15 จนถึงวันที่ 30 หลังจากนั้นการเกิดก๊าซน้อยลงแล้วจึงเพิ่มขึ้นอีกหลังจากวันที่ 45 จนถึงวันที่ 60 คิดร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพได้ร้อยละ 48.47 แต่จากผลน้ำหนักร้างหลังการย่อยสลายพบว่าหลังจากการทดลองวันที่ 60 น้ำหนักลดลงไปร้อยละ 67.33 เป็นไปได้ว่าพลาสติกบางส่วนย่อยสลายจนเป็นชิ้นเล็กมากและสามารถลอดผ่านตะแกรงกรอง (1×1 มม.²) ในขณะที่แยกพลาสติกออกจากดินและบางส่วนถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอินทรีย์หรือสารมัธยันต์อื่นๆสะสมอยู่ในดิน แต่ยังไม่ได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพ ส่วน PBAT ไม่ย่อยสลายในสภาวะที่คัดเลือกนี้ ลักษณะการเกิดก๊าซชีวภาพและร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพจากพลาสติกทดสอบสอดคล้องกับการลดลงของร้อยละน้ำหนักร้างจากการย่อยสลายภาพที่ 4.10 จากการทดลองต่างๆข้างต้นสามารถสรุปผลการทดสอบการย่อยสลายของ PLA และ PBAT ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส กากตะกอนร้อยละ 30 ปริมาณน้ำ 45 มล. ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สรุปผลการทดสอบการย่อยสลายของ PLA และ PBAT ในสภาวะคัดเลือกเป็น
ระยะเวลา 60 วัน

ผลการทดลอง พลาสติก	ร้อยละน้ำหนัก แห้งที่เหลือ	ปริมาณก๊าซชีวภาพ เฉลี่ยสะสม (มล.)	ร้อยละก๊าซมีเทน ในก๊าซชีวภาพ	ร้อยละการย่อย สลายทางชีวภาพ
CE	4.7	1,452	-	92.8
PLA	32.66	757	20.95	48.47
PBAT	94.65	504	13.04	0.2

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษาครั้งนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน ทำการทดลองภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ศึกษาการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ 2 ชนิด ได้แก่ PBAT และ PLA ด้วยดินจากบ่อฝิ่งกลบ เทศบาลจังหวัดสุพรรณบุรี การทดลองตอนแรก คือ การคัดเลือกสภาวะสำหรับการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพดังกล่าว โดยพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 4 ปัจจัย ได้แก่ ร้อยละกากตะกอน อุณหภูมิ การเติมน้ำ และการเติมไนโตรเจน ทำการทดลอง 60 วัน หลังจากวิเคราะห์ผลด้วยวิธีการทางสถิติ สรุปได้ว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยสลายของพลาสติกทดสอบ ได้แก่ ร้อยละกากตะกอน ส่วนปัจจัยร่วม คือ ร้อยละกากตะกอนกับปริมาณน้ำ โดยสภาวะที่คัดเลือกสำหรับการย่อยสลาย PBAT และ PLA เป็นดังต่อไปนี้ กากตะกอนร้อยละ 30 อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำ 45 มล. และไม่จำเป็นต้องเติมไนโตรเจน ที่สภาวะดังกล่าวน้ำหนักแห้งของ PLA และ PBAT ลดลงร้อยละ 31.54 และ 14.20 ตามลำดับ การทดลองส่วนต่อมาก็คือ การประเมินการย่อยสลายของ PBAT และ PLA ในสภาวะคัดเลือก ทำการทดลอง 60 วัน ตลอดการทดลองแบ่งการเก็บตัวอย่างเป็น 4 ช่วง จากผลการทดลองสรุปว่าเมื่อเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นการย่อยสลายของพลาสติกทดสอบเพิ่มขึ้น เมื่อสิ้นสุดการทดสอบ น้ำหนักแห้งของ PLA ลดลงร้อยละ 67.34 ส่วน PBAT ลดลงร้อยละ 4.4 มีการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในดินเป็นกรดอินทรีย์ สังเกตได้จากค่าพีเอชที่ลดลงต่ำในบางช่วงของการทดลอง และการย่อยสลายมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของดินเล็กน้อย ค่าพีเอชของดินที่ลดลงต่ำจะเพิ่มกลับขึ้นจนเป็นกลางอีกครั้งเมื่อเวลาผ่านไป ในวันที่ 60 PLA และ PBAT ให้ก๊าซชีวภาพ 757 และ 504 มล. ความเข้มข้นของมีเทนในก๊าซชีวภาพร้อยละ 20.95 และ 13.04 ตามลำดับ สภาวะที่ใช้ทดสอบความสามารถในการย่อยสลายทำให้ลักษณะทางกายภาพของพลาสติกทดสอบเปลี่ยนแปลงไป เห็นได้จากผลการส่องดูภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เห็นได้ว่าเกิดรูบนชั้นพลาสติก การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทำให้ทราบว่าโครงสร้างทางเคมีของพลาสติกยังคงเหมือนเดิมหลังจากการทดสอบ และการวิเคราะห์ความเสถียรทางความร้อนของพลาสติกก่อนและหลังการทดสอบสามารถยืนยันว่า PLA เกิดการย่อยสลายแต่ PBAT ไม่เกิดการย่อยสลาย เมื่อคำนวณจากผลการทดลองแล้วความสามารถในการย่อยสลายของ PLA เป็นร้อยละ 48.4 และ PBAT ไม่ย่อยสลายในสภาวะที่คัดเลือกนี้

ตามข้อมูลทีกล่าวมาข้างต้นสรุปว่า PLA ย่อยสลายได้ แต่ PBAT ไม่ย่อยสลาย สาเหตุที่ PLA ย่อยสลายได้นั้นเนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างของ PLA มีความซับซ้อนน้อยกว่า PBAT ซึ่งมีวงแหวนอะโรมาติกเป็นส่วนประกอบ แต่เมื่อเวลาการบ่มเพิ่มขึ้นน้ำหนักแห้งของ PBAT จึงค่อยๆ ลดลงเล็กน้อย แสดงว่า PBAT ก็ยังย่อยสลายได้แต่ต้องการระยะเวลาการบ่มมากกว่าการย่อยสลาย PLA หรืออาจจะต้องมีการเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการทดสอบการย่อยสลาย ผลดังกล่าวบ่งชี้ว่าความสามารถในการย่อยสลายของพลาสติกทดสอบเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น ความสามารถและกระบวนการย่อยสลายของพลาสติกมีความซับซ้อนขึ้นอยู่กับธรรมชาติ สมบัติของพลาสติก และสภาวะที่ใช้ย่อยสลาย

5.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาครั้งนี้ขนาด (scale) ของหน่วยทดลองมีขนาดเล็ก ดำเนินการทดลองแบบกะ (batch) จึงไม่มีการปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เมื่อค่าพีเอชสูงหรือต่ำเกินไปก็มีผลกระทบต่อการศึกษาหรือกิจกรรมของแบคทีเรียบางชนิด เช่น แบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตมีเทน ทำให้ได้ความเข้มข้นของมีเทนในก๊าซชีวภาพน้อย หรืออาจจะใช้เวลาในการสร้างมีเทนนานเนื่องจากแบคทีเรียต้องการเวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อม ดังนั้นการเพิ่มขนาดของหน่วยทดลองอาจเป็นการเพิ่มการปรับสมดุล (buffer) ของระบบด้วยตัวของระบบเอง และจากการสรุปการทดลองเห็นได้ว่า PBAT ย่อยสลายได้ช้าจึงอาจแก้ไขโดยการปรับปรุงโครงสร้างของ PBAT โดยการนำไปผสมกับพอลิเมอร์ชนิดอื่น เช่น PLA แป้ง หรือ พลาสติกชีวภาพที่ได้จากชีวมวลต่างๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพให้มากขึ้นไปอีก

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กล้าณรงค์ ศรีรอด. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จินดาวรรณ ปัญจรงค์เจริญ., อำพร เสน่ห์., และ รังรอง ยกसान. 2552. การเตรียมและสมบัติของวัสดุผสมพอลิบิวทิลีนอะดิเพท-โค-เทเรฟทาเลทและเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36 กรุงเทพมหานคร.

ปารเมศ ชุติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชนาวดี ลีจากภัย. 2549. สารละลายตัวนำโพลิเมอร์. วารสารสมาคมโพลิเมอร์. 6, 1 (มกราคม-เมษายน.): 3.

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, กระทรวง. 2551. แผนที้นำทางแห่งชาติการพัฒนาคูตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ. สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

สมศักดิ์ วั่งไฉ. 2528. จุลินทรีย์และกิจกรรมในดิน. กรุงเทพฯ: ไทยวัฒนาพานิช.

สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC). 2007. เทคโนโลยีต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน [ออนไลน์].แหล่งที่มา: http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradableplastic/bio_de_plas.html [2553, มกราคม 13].

อำพร เสน่ห์., รังรอง ยกसान., และ จิตรวิ สุขเอม. 2552. "อิทธิพลของสตาร์ชถั่วเขียวและพอลิบิวทิลีนอะดิเพทโคเทเรฟทาเลทต่อสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าว. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 36. กรุงเทพมหานคร

ภาษาอังกฤษ

ASTM international. 1999. Annual book of ASTM standards: D 6400 Standard Specification for Compostable Plastics. 08. 03 West Conshohocken.

Avérous, L. 2008. Synthesis Properties and Applications. Polylactic Acid. 433 – 435.

Biodegradable Plastic Society. 1992. Report on the field test of the biodegradable plastics. Biodegradable Plastic Society. Tokyo.

Biodegradable product, Institute. 2006. Confused by the terms Biodegradable&Biobased. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.bpiworld.org/resources/Documents/PROiiaeIB%5B1%5D.pdf>. [2553 เมษายน 3]

Calil, M.R., Gaboardi, F., Bardì, M.A.G., Rezende, M.L., and Rosa, D.S. 2007. Enzymatic degradation of poly (ε-caprolactone) and cellulose acetate blends by lipase and α-amylase. Journal of Polymer Testing 26: 257 – 261.

Eliyan, C. 2007. Anaerobic digestion of municipal solid waste in thermophilic condition operation. Asian Institute of Technology School of Environment, Resource and Development Thailand.

Flieger, M., Kantorova, M., Prael, A., Rezanka, T., and Votruba, J. 2003. Biodegradable plastic from renewable source. Folia Microbiol. 48 (1): 27 – 24.

Haaland, D.P., 1989. Experimental design in biotechnology. USA: Marcel Dekker, INC.

International Organization for standardization. 1998. Handbook ed3: ISO 472 Plastics Vocabulary. Geneva.

Ishigaki, T., Sugano, W., Nakanishi, A., Tateda, M., Ike, M., and Fujita M. 2004. The degradability of biodegradable plastics in aerobic and anaerobic waste landfill model reactors. Chemosphere 54: 225 – 233.

- Kayhanian, M. 1995. Biodegradability of the organic fraction of municipal solid waste in a high-solids anaerobic digester. Waste Management and Research 13:123-136.
- Kim, C.M., and Masuoka, T. 2009. Degradation properties of PLA and PHBV films treated with CO₂ – plasma. Journal of Reactive & Functional Polymers 69: 287 – 292.
- Leschine, S.B. 1995. Anaerobic Decomposition of Insoluble Natural Polymers; Fuels from Biomass. Microbial Biology. University of Massachusetts.
- Lucas, N., Bienaime, C., Belloy, C., Queneudee, M., Silvestre, F., Jose-Edmundo., and Nava-Saucedo., 2008. Polymer biodegradation: mechanism and estimation techniques – a review. Chemosphere 73, 429–442
- Lyberatos, G., and Skiadas, I.V. 1999. Modelling of anaerobic digestion – a review. Global Nest: the Int. J. Vol 1, No 2, pp 63-76.
- McSweeney, C., Kang, S., Gagen, E., Davis, C., Morrison, M., and Denman, S. 2009. Recent developments in nucleic acid based techniques for use in rumen manipulation. Sociedade Brasileira de Zootecnia. 38: 341 – 351.
- Müller, R.J., Kleeberg, I., and Deckwer, W.D. 2000. Biodegradation of polyesters containing aromatic constituents. Journal of biotechnology. 86 (2) 87 – 95.
- Nishide, H., Toyata, K., and Kimura, M. 1999. Effects of soil temperature and anaerobiosis on degradation of biodegradable plastics in soil and their degrading microorganisms. Soil Sci. Plant Nutr. 45, 963–972.
- Regional Information Service Centre for South East Asia on Appropriate Technology (RISE-AT). 1998. Review of current status of Anaerobic Digestion Technology for treatment of MSW. Regional Information Service Center for South East Asia on Appropriate Technology. 2: 3-5
- Rudeekit, Y., Leejakpai, T., Eauphantasate, N., and Kongsuwan K. 2004. Comparative degradation of biodegradable plastics by aerobic microorganism using ASTM D

5338 – 93 (03) and ASTM D 5988 (03) as standard method. Journal of Phathumtani: National Metals and Materials Technology Center.

Santibáñez, C., Varnero, T.M., and Bustamante, M. 2011. Residual glycerol from biodiesel manufacturing, waste or potential source of biogenergy: A review. Chilean journal of agricultural research. 7: 3

Tchobonoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S. 1993. Integrated Solid Waste Management. New York: Mc Graw Hill.

Themelis, N.J. 2002. Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes. Submitted in partial fulfillment of the requirements for Master of Science Degree in Earth Resources Engineering. 6 – 9.

Tokiwa, Y., Calabia, B.P., Ugwu, C.U., and Aiba, S. 2009. Biodegradability of Plastics. Int. J. Mol. Sci. 10: 3722 – 3742.

Vroman, I., and Tighzert, L. 2009. Biodegradable Polymers. Materials 2009. 2: 307-344.

Volova, T.G., Gladyshev, M.I., Trusova, M., and Zhila, N.O. 2006. Degradation of polyhydroxy alkanates and the composition of microbial destructors under natural conditions. Journal of Mikrobiologiya 75(5): 682 – 688.

Yagi, H., Ninomiya, F., Funabashi, M., and Kunioka, M. 2009. Anaerobic biodegradation tests of poly (lactic acid) and polycaprolactone using New evaluation system for methane fermentation in anaerobic sludge. Journal of Polymer Degradation and Stability 94: 1397–1404

Yagi, H., Ninomiya, F., Funabashi, M., and Kunioka, M. 2010. Bioplastic biodegradation activity of anaerobic sludge prepared by preincubation at 55 °C for new anaerobic biodegradation test. Polymer degradation and stability. 95 (8): 1349 – 1355.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางก1 แสดงผลการทดลองที่ 3.5.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของ PLA

หน่วย	อัตราส่วนหัวเชื้อ	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นของดิน	ปริมาณไนโตรเจน	PLA		
					ก่อน	หลัง	ร้อยละหน.ที่เหลือ
7	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 30	55±2	ร้อยละ 30	ไม่เติมไนโตรเจน	15.00	10.27	68.46
5	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 30	35±2	ร้อยละ 30	เติมไนโตรเจน 100มก./กก.	15.30	10.81	70.65
3	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 10	55±2	ร้อยละ 30	เติมไนโตรเจน 100มก./กก.	15.00	13.01	86.74
2	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 10	35±2	ร้อยละ 70	เติมไนโตรเจน 100มก./กก.	15.30	13.33	87.12
4	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 10	55±2	ร้อยละ 70	ไม่เติมไนโตรเจน	15.01	13.48	89.80
6	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 30	35±2	ร้อยละ 70	ไม่เติมไนโตรเจน	15.40	13.50	87.66
8	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 30	55±2	ร้อยละ 70	เติมไนโตรเจน 100มก./กก.	15.10	13.98	92.58
9	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะ	45±2	ร้อยละ 55	เติมไนโตรเจน 60มก./กก	15.09	14.04	93.04
11	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะ	45±2	ร้อยละ 55	เติมไนโตรเจน 60มก./กก	15.06	14.42	95.75
1	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 10	35±2	ร้อยละ 30	ไม่เติมไนโตรเจน	15.21	14.57	95.79
10	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะ	45±2	ร้อยละ 55	เติมไนโตรเจน 60มก./กก	15.03	14.67	97.60

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดลองที่ 3.5.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายของ PBAT

หน่วยทดลอง	อัตราส่วนหัวเชื้อ	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้นของดิน	ปริมาณไนโตรเจน	PBAT		
					ก่อน	หลัง	ร้อยละน.ที่เหลือ
7	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 30	55±2	ร้อยละ 30	ไม่เติมไนโตรเจน	15.01	12.88	85.80
5	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 30	35±2	ร้อยละ 30	เติมไนโตรเจน 100มก./กก.	15.15	13.23	87.32
6	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 30	35±2	ร้อยละ 70	ไม่เติมไนโตรเจน	15.20	13.47	88.61
2	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 10	35±2	ร้อยละ 70	เติมไนโตรเจน 100มก./กก.	15.10	13.85	91.72
1	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 10	35±2	ร้อยละ 30	ไม่เติมไนโตรเจน	15.15	14.12	93.20
10	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะ	45±2	ร้อยละ 55	เติมไนโตรเจน 60มก./กก.	15.05	14.48	96.21
4	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 10	55±2	ร้อยละ 70	ไม่เติมไนโตรเจน	15.02	14.53	96.73
3	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 10	55±2	ร้อยละ 30	เติมไนโตรเจน 100มก./กก.	15.02	14.67	97.67
9	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะ	45±2	ร้อยละ 55	เติมไนโตรเจน 60มก./กก.	15.01	14.70	97.93
11	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะ	45±2	ร้อยละ 55	เติมไนโตรเจน 60มก./กก.	15.03	14.73	98.00
8	ดินจากบ่อฝึงคลบขยะผสมกากตะกอนร้อยละ 30	55±2	ร้อยละ 70	เติมไนโตรเจน 100มก./กก.	15.00	14.82	98.8

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์สถิติจากผลการทดลองที่ 3.5.4 การหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลาย

1) Fractional Factorial Design

Factors: 4 Base Design: 4,8 Resolution: IV

Runs: 11 Replicates: 1 Fraction: 1/2

Blocks: 1 Center pts (total): 3

Design Generators: D = ABC

Factorial Fit: %WL versus Inoculum, Temperature, Moisture, Nitrogen

2) Factorial Fit: %WL versus Inoculum, Temp, Moisture, Nitrogen for PLA

Estimated Effects and Coefficients for %WL (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		15.139	0.8109	18.67	0.003
Inoculum	10.047	5.024	0.8109	6.20	0.025
Temp	0.932	0.466	0.8109	0.58	0.623
Moisture	-8.857	-4.429	0.8109	-5.46	0.032
Nitrogen	1.178	0.589	0.8109	0.73	0.543
Inoculum*Temp	-2.297	-1.149	0.8109	-1.42	0.292
Inoculum*Moisture	-11.707	-5.854	0.8109	-7.22	0.019
Inoculum*Nitrogen	-4.733	-2.366	0.8109	-2.92	0.100
Ct Pt		-3.078	2.3310	-1.32	0.318

S = 2.29348

PRESS = *

R-Sq = 98.89%

R-Sq(pred) = **

R-Sq(adj) = 94.45%

3) Factorial Fit: %WL versus Inoculum, Temperature, Moisture, Nitrogen for PBAT

Estimated Effects and Coefficients for %WL (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		7.781	0.3585	21.71	0.002
Inoculum	5.257	2.629	0.3585	7.33	0.018
Temperature	-5.057	-2.529	0.3585	-7.05	0.020
Moisture	-2.447	-1.224	0.3585	-3.41	0.076
Nitrogen	-3.352	-1.676	0.3585	-4.68	0.043
Inoculum*Temperature	-0.362	-0.181	0.3585	-0.51	0.663
Inoculum*Moisture	-3.612	-1.806	0.3585	-5.04	0.037
Inoculum*Nitrogen	2.759	1.379	2.7777	0.50	0.669
Temperature*Moisture	-6.346	-3.173	2.8048	-1.13	0.375

S = 1.01385

PRESS = *

R-Sq = 99.19%

R-Sq(pred) = **

R-Sq(adj) = 95.94%

ภาคผนวก ค

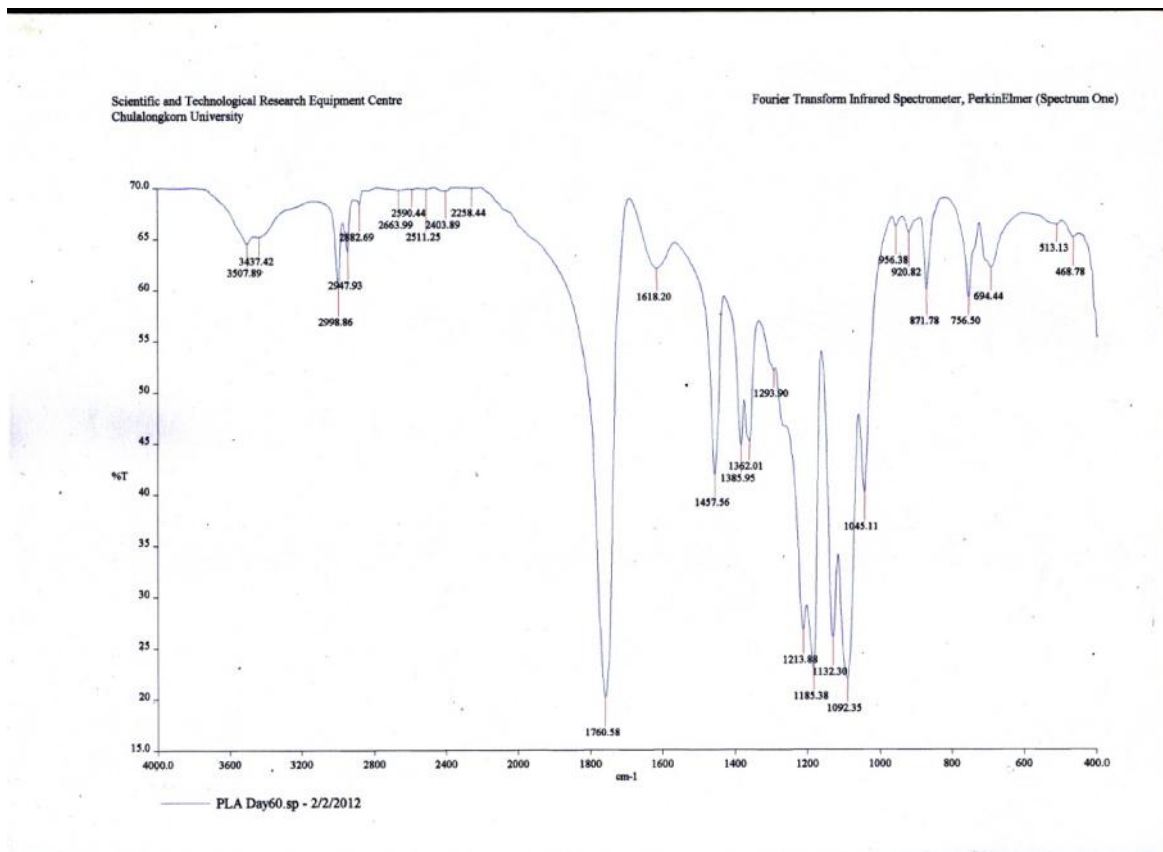
ตารางค1 แสดงผลการทดลองร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลงจากการย่อยสลายในสภาวะที่คัดเลือก

หน่วยทดลอง	ร้อยละกากตะกอน	อุณหภูมิ	ปริมาณน้ำ	ไนโตรเจน	ร้อยละน้ำหนักแห้งที่ลดลง
1	10	35	45	0	4.21
2	10	35	105	100	12.88
3	10	55	45	100	13.26
4	10	55	105	0	10.20
5	30	35	45	100	29.35
6	30	35	105	0	12.34
7	30	55	45	0	31.54
8	30	55	105	100	7.42
9	0	45	82	60	6.96
10	0	45	82	60	2.40
11	0	45	82	60	4.25

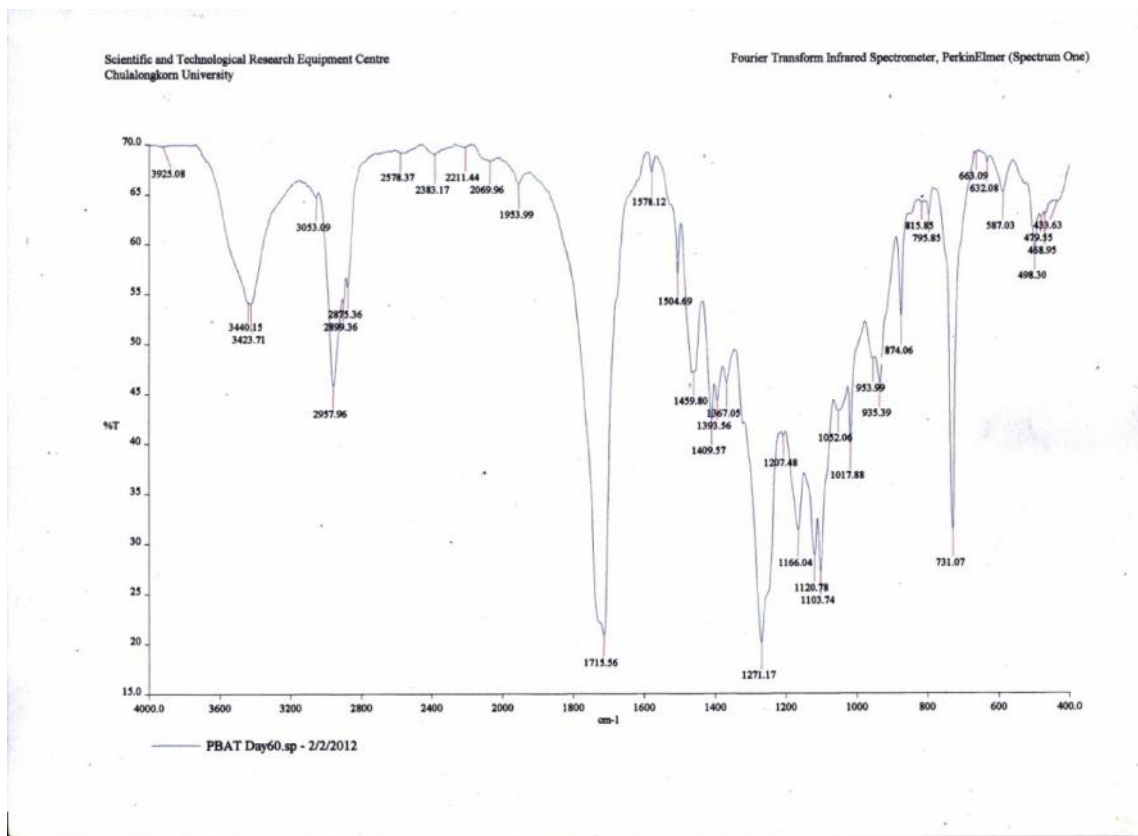
ภาคผนวก

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

ภาพที่ค1 FT – IR spectra ของ PLA หลังสิ้นสุดการทดลอง



ภาพที่ 2 FT – IR spectra ของ PBAT หลังสิ้นสุดการทดลอง



ภาคผนวก จ

ตารางที่ 1 ก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ย

Sample	Biogas (ml)				
	0	15	30	45	60
PLA	0	320	540	320	640
SD	0	0	170	0	57
PBAT	0	0	860	750	0
SD	0	0	311	156	0
CE	0	1265	630	620	0
SD	0	21	14	28	0
Blank	0	320	320	215	203
SD	0	14	28	10	6

ภาคผนวก จ

ร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพ (% Biodegradation)

หาจากสมการ

$$\% \text{ Biodegradation} = [(V_s - V_b) / V_{\max}] \times 100 \text{ ----- 1.}$$

เมื่อ V_{\max} คือ ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทางทฤษฎีที่ความดันบรรยากาศ

$$V_{\max} = [\text{mass}_{(\text{material})} / \text{molecular weight}] \times \text{carbon atom} \times 22.4 \text{ ----- 2.}$$

V_s = ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจริง

V_b = ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจาก blank (Yagi และคณะ, 2009)

ในการคำนวณร้อยละความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (%biodegradation) จะต้องหักไอน้ำที่ระเหยจากขวดบ่มไปยังหน่วยเก็บก๊าซออกจากปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมด เพื่อให้ได้ปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นจริง $V(\text{CO}_2+\text{CH}_4)$ ดังสมการ

$$V(\text{CO}_2+\text{CH}_4) = [(P_{\text{atom}} - P_w) / (P_{\text{atom}})] \times V_m \text{ ----- 3.}$$

$$V_s = (273/T_r) \times (P_{\text{atom}} / 1013) \times V(\text{CO}_2+\text{CH}_4) \text{ ----- 4.}$$

V_m คือ ปริมาตรก๊าซที่ได้จากการทดลอง (L)

V_s คือ ปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นที่สภาวะมาตรฐาน (273⁰ K, 1013.25 hPa)

P_{atom} คือ ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง (1013.25 hpa)

P_w คือ ความดันไอน้ำที่อุณหภูมิห้อง (31.699 hpa)

T_r คือ อุณหภูมิห้อง (298.15⁰ K)

การคำนวณ

Blankสมการที่ [3.] หา $V(\text{CO}_2+\text{CH}_4)$

$$\begin{aligned} V(\text{CO}_2+\text{CH}_4) \text{ ของ CE} &= [(P_{\text{atom}} - P_w)/(P_{\text{atom}})] \times V_m \\ &= [(1013.25 - 31.69)/(1013.25)] \times 1.06 \\ &= 1.02 \end{aligned}$$

สมการที่ [4.] หา V_s

$$\begin{aligned} V_s \text{ ของ Blank} &= (273/T_r) \times (P_{\text{atom}} / 1013) \times V(\text{CO}_2+\text{CH}_4) \\ &= (273/298.15)(1013.25/1013)(1.02) \\ &= 0.93 \text{ L} \end{aligned}$$

CE

$$\begin{aligned} \text{สมการที่ [2.] } V_{\text{max}} \text{ ของ CE } [(C_6H_{10}O_5)_n] 1.5 \text{ กรัม} &= [(1.5/162) \times 6 \times 22.4] \\ &= 1.24 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สมการที่ [3.] } V(\text{CO}_2+\text{CH}_4) \text{ ของ CE} &= [(P_{\text{atom}} - P_w)/(P_{\text{atom}})] \times V_m \\ &= [(1013.25 - 31.69)/(1013.25)] \times 2.51 \\ &= 2.43 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สมการที่ [4.] } V_s \text{ ของ CE} &= (273/T_r) \times (P_{\text{atom}} / 1013) \times V(\text{CO}_2+\text{CH}_4) \\ &= (273/298.15)(1013.25/1013)(2.43) \\ &= 2.22 \text{ L.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า [4] ในสมการที่ [1] \% Biodegradation} &= [(V_s - V_b) / V_{\text{max}}] \times 100 \\ &= [(2.22 - 0.93)/1.4] \times 100 \\ &= 92.14 \end{aligned}$$

PLA

$$\begin{aligned} \text{สมการที่ [2.] } V_{\max} \text{ ของ PLA } [(C_3H_4O_2)_n] \text{ 1.5 กรัม} &= [(1.5/72) \times 3 \times 22.4] \\ &= 1.4 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สมการที่ [3.] } V(CO_2+CH_4) \text{ ของ PLA} &= [(P_{\text{atom}} - P_w)/(P_{\text{atom}})] \times V_m \\ &= [(1013.25 - 31.69)/(1013.25)] \times 1.82 \\ &= 1.76 \text{ L.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สมการที่ [4.] } V_s \text{ ของ PLA} &= (273/T_r) \times (P_{\text{atom}} / 1013) \times V(CO_2+CH_4) \\ &= (273/298.15)(1013.25/1013)(1.76) \\ &= 1.61 \text{ L.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า [4] ในสมการที่ [1] \% Biodegradation} &= [(V_s - V_b) / V_{\max}] \times 100 \\ &= [(1.61 - 0.93)/1.4] \times 100 \\ &= 48.57 \end{aligned}$$

PBAT

$$\begin{aligned} \text{สมการที่ [2.] } V_{\max} \text{ ของ PBAT } [(C_{26}H_{20}O_7)_n] \text{ 1.5 กรัม} &= [(1.5/444) \times 26 \times 22.4] \\ &= 196.75 \text{ ลิตร} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สมการที่ [3.] } V(CO_2+CH_4) \text{ ของ PLA} &= [(P_{\text{atom}} - P_w)/(P_{\text{atom}})] \times V_m \\ &= [(1013.25 - 31.69)/(1013.25)] \times 1.56 \\ &= 1.51 \text{ L.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{สมการที่ [4.] } V_s &= (273/T_r) \times (P_{\text{atom}} / 1013) \times V(CO_2+CH_4) \\ &= (273/298.15)(1013.25/1013)(1.51) \\ &= 1.38 \text{ L.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า [4] ในสมการที่ [1] \% Biodegradation} &= [(V_s - V_b) / V_{\max}] \times 100 \\ &= [(1.38 - 1.06)/196.75] \times 100 \\ &= 0.1 \end{aligned}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายนาวิน เนสุสินธุ์ เกิดเมื่อวันที่ 9 กันยายน พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดลพบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาจุลชีววิทยาอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทบัณฑิตหลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551