

การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิดและขยะอินทรีย์

นางสาวสุทิดา สมितिเวชรงค์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Biogas production from co-digestion of pretreated poly(lactic acid) with organic wastes

Miss Sutisa Samitthiwetcharong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมพลาสติกชีวภาพ  
ชนิดพอลิแลคติกแอซิดและขยะอินทรีย์

โดย

นางสาวสุทิสรา สมितिเวชรงค์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทฉบับนี้

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ขวาลิต รัตนธรรมสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญจพร สุวรรณศิลป์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.เสฏฐา ศาสนันทน์)

สุทิศา สมितिเวชรงค์ : การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิดและขยะอินทรีย์ (Biogas production from co-digestion of pretreated poly(lactic acid) with organic wastes) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร. อรทัย ชาวลาภฤทธิ, 157 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายทางชีวภาพจาก PLA พิล์ม ที่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะที่เหมาะสมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และการหมักร่วม (Co-digestion) กับขยะอินทรีย์ โดยทำการออกแบบชุดทดลองแบบประสมส่วนกลาง (Central Composite Design: CCD) และใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เพื่อคัดเลือกสภาวะปรับสภาพที่เหมาะสม ด้วยการใช้โปรแกรม Design Expert (Trial version 9) พบว่าการใช้ PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (พีเอชเท่ากับ 13) เป็นระยะเวลา 2.5 วัน (ใช้สารละลายปรับสภาพ NaOH อัตราส่วน PLA พิล์ม 1 กรัมต่อสารละลาย NaOH 5 มิลลิลิตร) ให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด และเมื่อนำไปศึกษาผลการหมักร่วมโดยการเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบทช์ เป็นระยะเวลา 65 วัน ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าการใช้ PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH กับขยะอินทรีย์ (อัตราส่วน 1:1) ได้แก่ ขยะเศษอาหารและเศษผักสด สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารตั้งต้นเพียงชนิดเดียว ซึ่งการใช้ PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH กับขยะเศษอาหารและเศษผักสด ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 627.4 และ 500.4 L/KgVS<sub>added</sub> ตามลำดับ นอกจากนี้การใช้ PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ร่วมกับขยะอินทรีย์สามารถเพิ่มร้อยละของก๊าซมีเทนให้อยู่ในช่วงร้อยละ 68-77 ดังนั้น PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH จึงมีคุณสมบัติเพียงพอที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุหมักร่วมกับขยะอินทรีย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2559



# # 5770477221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: BIOGAS PRODUCTION / BIOPLASTIC / ANAEROBIC DIGESTION / ORGANIC WASTES / PLA (POLYLACTIC ACID) / CO-DIGESTION

SUTISA SAMITTHIWETCHARONG: Biogas production from co- digestion of pretreated poly(lactic acid) with organic wastes. ADVISOR: ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., 157 pp.

The purposes of this study were to improve the efficiency of biogas production and biodegradation of pretreated polylactic acid (PLA) films by co-digestion with organic wastes. The central composite design (CCD) and the response surface methodology (RSM) were employed to evaluate the optimum condition of PLA films biodegradation (PLA pretreatment with NaOH and non-pretreatment) before running the experiment of biogas production. The RSM results indicated that the optimal PLA pretreatment condition was 0.5 M of NaOH (at pH=13) with 2.5 days of reaction time. We applied the co-digestion with pretreated PLA films and organic waste (food waste and vegetable waste), which yielded high biogas ( 627.4 L/ KgVS<sub>added</sub> and 500.4 L/KgVS<sub>added</sub> respectively). Combining pretreated PLA films as additive substance with co-digestion proved that the efficiency of biogas production could maximize methane yield up to 77%.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Environmental  
Engineering

Student's Signature .....

Advisor's Signature .....

Field of Study: Environmental  
Engineering

Academic Year: 2016

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่มีส่วนให้ความอนุเคราะห์ ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในทุกด้านตลอดระยะเวลาการวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญยิ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน แผนพลังงานทดแทนปี 2560 สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล (ประธานกรรมการ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์ (กรรมการ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ (กรรมการ) และอาจารย์ ดร.เสฏฐา ศาสนนันท์ (กรรมการนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้กรุณาชี้แนะแนวทาง ตลอดจนการแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ และมอบความปรารถนาดีให้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกตลอดมา

ขอบใจเพื่อนพ้องที่ได้ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์จนประสบความสำเร็จ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว สำหรับกำลังใจและการสนับสนุนตลอดการทำวิทยานิพนธ์จนประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจ

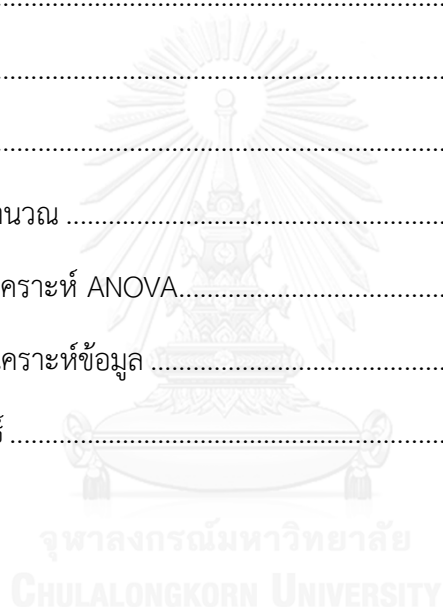
## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ .....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic).....	6
2.1.1 ความหมายและประเภทของพลาสติกชีวภาพ .....	7
2.1.2 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ .....	10
2.1.3 ประโยชน์ของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	12
2.1.4 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม .....	13
2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA).....	16
2.2.1 โครงสร้าง องค์ประกอบและการสังเคราะห์ .....	16
2.2.2 สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด .....	19
2.3 การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ .....	22
2.3.1 กลไกการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ.....	22

2.3.2	กระบวนการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ .....	24
2.3.3	ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติก .....	24
2.3.4	เทคนิคและวิธีพื้นฐานที่ใช้ในการทดสอบการย่อยสลาย .....	27
2.4	กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) .....	29
2.4.1	ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน .....	30
2.4.2	จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	32
2.4.3	ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพในสภาวะไร้ออกซิเจน.....	33
2.5	การหมักร่วม (Co-digestion) .....	37
2.5.1	วัสดุหมักร่วม .....	38
2.6	ก๊าซชีวภาพ .....	39
2.7	หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodlogy; RSM).....	40
2.7	การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) .....	43
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	45
2.9	สรุปผลการทบทวนเอกสารและแนวทางการวิจัย .....	49
บทที่ 3	วิธีดำเนินการวิจัย.....	53
3.1	แผนการดำเนินงานวิจัย .....	53
3.2	เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	56
3.2.1	เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์ .....	56
3.2.2	ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ .....	56
3.2.3	เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ .....	57
3.3	ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	58
3.3.1	การเตรียมวัตถุดิบ.....	58

3.3.2 ออกแบบชุดทดลองการปรับสภาพขั้นต้น PLA फिल्म ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อน.....	60
3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential; BMP) .....	64
3.4.4 ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) จากการหมักร่วม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นกับของเสียในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบทช์ (Batch Completely Stirred Tank Reactor) .....	66
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง.....	71
4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของ PLA फिल्म .....	73
4.2 ผลการศึกษาการปรับสภาพขั้นต้น PLA फिल्म โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ .....	74
4.2.1 ผลการศึกษาการปรับสภาพขั้นต้น PLA फिल्म โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อนที่ระยะเวลาต่างๆ.....	74
4.2.2 ผลการศึกษาการปรับสภาพขั้นต้น PLA फिल्म โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลาต่างๆ .....	76
4.2.3 เปรียบเทียบผลการศึกษาการปรับสภาพขั้นต้น PLA फिल्मจากชุดที่ 1 และ 2 .....	77
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีบีเอ็มพี .....	78
4.3.1 ผลการศึกษา PLA फिल्म ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และความร้อน.....	78
4.3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากPLA फिल्म ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ชุดที่ 2) .....	94
4.3.3 ผลการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ PLA फिल्म.....	107
4.4 การศึกษาการหมักร่วมPLA फिल्मกับขยะอินทรีย์.....	108
4.4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขยะอินทรีย์หมักร่วม .....	108
4.4.2 การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วม PLA กับขยะอินทรีย์ .....	109

4.4.3 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพของชุดทดลองต่างๆ .....	113
4.4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดทดลอง .....	115
4.4.5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางพื้นผิวของ PLA फिल्मจากการหมักร่วมด้วยการ ส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) .....	117
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	130
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	130
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	132
รายการอ้างอิง .....	133
ภาคผนวก.....	137
ภาคผนวก ก วิธีการคำนวณ .....	138
ภาคผนวก ข ผลการวิเคราะห์ ANOVA.....	139
ภาคผนวก ค ผลการวิเคราะห์ข้อมูล .....	145
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	157



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	พลังงานในการผลิตพลาสติกชีวภาพ .....	15
ตารางที่ 2.2	การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพลาสติกชีวภาพ.....	15
ตารางที่ 2.3	แสดงชนิด PLA จากบริษัท NatureWorks® ที่มีปริมาณ D-lactide ต่างกัน .....	18
ตารางที่ 2.4	รายชื่อองค์กรที่ทำงานด้านมาตรฐานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ.....	27
ตารางที่ 2.5	แสดงความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักที่มีผลต่อระบบย่อยสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน .....	36
ตารางที่ 2.6	แสดงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ .....	40
ตารางที่ 2.7	แสดงสมบัติของก๊าซบางชนิดในก๊าซชีวภาพ .....	40
ตารางที่ 2.8	เหตุผลของการพิจารณาเลือกพลาสติกชีวภาพ วิธีการปรับสภาพขั้นต้นและชนิดของขยะอินทรีย์ในการหมักร่วม .....	52
ตารางที่ 3.1	สมบัติของ PLA รุ่น ingeo 4043D ที่ผลิตเพื่อการค้า.....	59
ตารางที่ 3.2	ความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปร.....	61
ตารางที่ 3.3	ความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปร.....	62
ตารางที่ 3.4	ความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปร.....	63
ตารางที่ 3.5	ความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปร.....	63
ตารางที่ 3.6	ตัวแปรที่ใช้ในการปรับสภาพขั้นต้น PLA फिल्म .....	69
ตารางที่ 3.7	ตัวแปรที่ใช้ในการหมักร่วมพลาสติกชีวภาพชนิด PLA และขยะอินทรีย์ .....	69
ตารางที่ 3.8	วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง .....	70
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบทางเคมีของ PLA फिल्म.....	73
ตารางที่ 4.2	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (L/KgV <sub>s added</sub> ) จากชุดทดลองบีเอ็มพีของชุดที่ 1 ซึ่งใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร่วมกับความร้อนที่ระยะเวลาต่างๆ .....	79
ตารางที่ 4.3	การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่อปริมาณก๊าซชีวภาพ (ชุดที่ 1).....	80
ตารางที่ 4.4	การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี.....	82

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (%Biodegradability).....	85
ตารางที่ 4.6 ค่าตอบสนองที่ใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพพลาสติกชีวภาพชนิด PLA พิล์มโดยได้จากการทดลองด้วยวิธีบีเอ็มพี (ชุดที่ 1).....	86
ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปริมาณก๊าซชีวภาพจากชุดที่ 1.....	89
ตารางที่ 4.8 สมการและค่าทางสถิติที่ได้จากโปรแกรม.....	90
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Experimental) และค่าที่ได้จากสมการ (Predicted).....	92
ตารางที่ 4.10 สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ PLA พิล์ม (ชุดที่ 1) จากโปรแกรม Design Expert.....	93
ตารางที่ 4.11 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (L/KgVS <sub>added</sub> ) จากชุดทดลองบีเอ็มพีของชุดที่ 2 ซึ่งใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ค่าพีเอชและระยะเวลาต่างๆ.....	95
ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่อปริมาณก๊าซชีวภาพ (ชุดที่ 2).....	95
ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี.....	97
ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (%Biodegradability).....	99
ตารางที่ 4.15 ค่าตอบสนองที่ใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ PLA พิล์มโดยได้จากการทดลองด้วยวิธีบีเอ็มพี (ชุดที่ 2).....	101
ตารางที่ 4.16 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่อปริมาณก๊าซชีวภาพ (ชุดที่ 2).....	104
ตารางที่ 4.17 สมการและค่าทางสถิติที่ได้จากโปรแกรม.....	105
ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Experimental) และค่าที่ได้จากสมการ (Predicted).....	106
ตารางที่ 4.19 สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ PLA พิล์ม (ชุดที่ 2) จากโปรแกรม Design Expert.....	107
ตารางที่ 4.20 องค์ประกอบทางเคมีของขยะเศษอาหารและเศษผักสด.....	109



ตารางที่ 4.21 สมบัติเริ่มต้นของสารตั้งต้นในแต่ละชุดทดลอง.....	109
ตารางที่ 4.22 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA พลาสติกชีวภาพและขี้เถ้าอินทรีย์และชุดควบคุม.....	111
ตารางที่ 4.23 ค่าพีเอชและอุณหภูมิของชุดทดลอง.....	122
ตารางที่ 4.24 สภาพต่างและอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างในแต่ละชุดทดลอง..	125
ตารางที่ 4.25 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายของ PLA พลาสติก ด้วยการปรับสภาพขั้นต้น (Pretreatment) และการหมักร่วม (Co-digestion) .....	128
ตารางที่ 4.26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายของ PLA พลาสติก การหมักร่วม (Co-digestion).....	129



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1 ภาพรวมของพลาสติกชีวภาพในตลาดโลก .....	7
ภาพที่ 2.2 การจำแนกพลาสติกชีวภาพ.....	9
ภาพที่ 2.3 วัฏจักรของพลาสติกชีวภาพ.....	14
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของกรดแลคติก.....	16
ภาพที่ 2.5 ปฏิกริยาการสังเคราะห์ PLA จากกรดแลคติกและหรือแลคไทด์ .....	17
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างไอโซเมอร์ของแลคไทด์โมโนเมอร์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งได้มาจากกรดแลคติก.....	18
ภาพที่ 2.7 พื้นที่ผิวตอบสนองแบบสามมิติ .....	42
ภาพที่ 2.8 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นที่ผิวตอบสนอง .....	42
ภาพที่ 2.9 แสดงการออกแบบประสมส่วนกลางสำหรับ $k = 2$ และ $k = 3$ ปัจจัย.....	44
ภาพที่ 3.1 ผังการไหลขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	55
ภาพที่ 3.2 ถังปฏิกรณ์กวนผสมบูรณ์ทดลองแบบแบทช์.....	57
ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas counter).....	58
ภาพที่ 3.4 เครื่องขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการเป่า รุ่น Blown film BL 180/400E.....	59
ภาพที่ 3.5 แผนการแสดงตำแหน่งการออกแบบชุดทดลองแบบส่วนประสมกลาง .....	61
ภาพที่ 3.6 ชุดทดลองศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมขยะอินทรีย์และ PLA ฟิล์ม ด้วยการเดินระบบในถังปฏิกรณ์กวนผสมบูรณ์แบบแบทช์.....	68
ภาพที่ 3.7 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วม PLA ฟิล์มและขยะอินทรีย์.....	68
ภาพที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของ PLA ฟิล์มที่ใช้ในงานวิจัย.....	73
ภาพที่ 4.2 ร้อยละของน้ำหนักแห้งที่หายไปของ PLA ฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะต่างๆ (ชุดที่ 1).....	74
ภาพที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของ PLA ฟิล์ม ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 2,000 เท่า .....	75

ภาพที่ 4.4 ร้อยละของน้ำหนักแห้งที่หายไปของ PLA फिल्मที่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะต่างๆ จาก(ชุดที่ 2).....	76
ภาพที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของ PLA फिल्म ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 2,000 เท่า .....	77
ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของ PLA फिल्म เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้น โซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลา (ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) .....	80
ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองบีเอ็มพี (ชุดที่ 1).....	81
ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีของ PLA फिल्म เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และอุณหภูมิ (ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง).....	83
ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability) ของชุดการทดลองบีเอ็มพี (ชุดที่ 1).....	84
ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA फिल्मเมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลา (ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส) .....	85
ภาพที่ 4.11 กราฟการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal plot).....	87
ภาพที่ 4.12 การกระจายส่วนตกค้างในแต่ละชุดทดลอง.....	88
ภาพที่ 4.13 การกระจายของส่วนตกค้างกับลำดับชุดทดลอง .....	88
ภาพที่ 4.14 พื้นผิวดอบ (ก) ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ข) ประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ .....	91
ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของ PLA ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยนพีเอชและระยะเวลา .....	96
ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองบีเอ็มพี (ชุดที่ 2).....	97
ภาพที่ 4.17 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของ PLA ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยนพีเอชและระยะเวลา .....	98

ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (%Biodegradability) ของชุดการทดลองบีเอ็มพี (ชุดที่ 2) .....	99
ภาพที่ 4.19 ประสิทธิภาพการย่อยสลายของ PLA ร่วมกับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยนพีเอชและระยะเวลา .....	100
ภาพที่ 4.20 กราฟการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal plot).....	102
ภาพที่ 4.21 การกระจายส่วนตกค้างในแต่ละชุดทดลอง.....	102
ภาพที่ 4.22 การกระจายของส่วนตกค้างกับลำดับชุดทดลอง .....	103
ภาพที่ 4.23 พื้นผิวตอบ (ก) ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ข) ประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ .....	105
ภาพที่ 4.24 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมในแต่ละชุดทดลอง.....	110
ภาพที่ 4.25 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของชุดทดลองหมักร่วม PLA พิล์มกับขยะอินทรีย์.....	112
ภาพที่ 4.26 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากชุดทดลองเดินระบบหมักไร้อากาศแบบแบทช์ที่อุณหภูมิห้อง ภายในระยะเวลา 60 วัน .....	114
ภาพที่ 4.27 เปรียบเทียบปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน ในแต่ละชุดทดลอง .....	114
ภาพที่ 4.28 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดทดลอง .....	116
ภาพที่ 4.29 ผลวิเคราะห์ค่าซีโอดีกรองของชุดทดลอง .....	117
ภาพที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของ PLA พิล์มหลังจากการเดินระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนที่ระยะเวลาต่างๆ ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า.....	119
ภาพที่ 4.31 ค่าพีเอชของชุดทดลอง .....	123
ภาพที่ 4.32 กรดไขมันระเหยง่าย (VFA) สภาพด่าง (Alkalinity) และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพด่าง (Volatile fatty acid/Alkalinity: VFA/ALK).....	126
ภาพที่ 4.33 ผังการไหลการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วม PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับขยะอินทรีย์.....	127

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลาสติกเป็นวัสดุสังเคราะห์ที่มีบทบาทอย่างมากในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ซึ่งผลิตได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ส่งผลให้ความต้องการใช้พลาสติกทั่วโลกมีอัตราการเติบโตเพิ่มขึ้นในทุกปี แต่ศักยภาพในการนำพลาสติกเหล่านี้กลับมาหมุนเวียนใช้ยังอยู่ในระดับต่ำ โดยพบว่าปัจจุบันประเทศไทยมีขยะเฉลี่ย 4,000 ตันต่อวัน หรือประมาณ 14 ล้านตันต่อปี โดยคิดเป็นขยะพลาสติกร้อยละ 20 และจากขยะพลาสติกที่เกิดขึ้นทั้งหมดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ โดยผ่านกระบวนการรีไซเคิลหรือแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงได้ร้อยละ 22 ดังนั้นขยะจำพวกพลาสติกจึงเหลือตกค้างและต้องนำไปกำจัดสูงถึง 2.2 ล้านตันต่อปี (ศุภชัย หล่อโลหการ, 2551) ส่งผลให้ประเทศไทยประสบปัญหาขยะพลาสติกตกค้างเกิดเป็นมลพิษในสิ่งแวดล้อม ซึ่งปัญหาเหล่านี้อาจเป็นผลมาจากความไม่พร้อมทางด้านการจัดการ การกำหนดแนวทางป้องกันและแก้ไขปัญหาพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ของประเทศ ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เช่น บรรจุภัณฑ์ที่ผลิตจากพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ จึงเป็นแนวทางเลือกในการแก้ไขปัญหาขยะพลาสติกตกค้างในสิ่งแวดล้อมที่น่าสนใจ

ปัจจุบันพลาสติกชีวภาพ (Bioplastics) เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในอุตสาหกรรมพลาสติกและผลิตภัณฑ์ เนื่องจากปัจจัยหนุนสำคัญคือ กระแสความสนใจในการแก้ไขปัญหาในเรื่องภาวะโลกร้อน และการอุปโภคบริโภคสินค้าที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยนิยามของพลาสติกชีวภาพคือ พลาสติกชนิดสลายตัวได้ทางชีวภาพ (bio-based biodegradable plastic) รวมถึงพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายได้แต่สังเคราะห์ได้จากของเสียที่ปลูกทดแทนใหม่ได้ (renewable resources) เช่น มันสำปะหลัง และอ้อย โดยกระบวนการผลิตที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกต่ำกว่าพลาสติกที่ผลิตได้ทางปิโตรเคมี นอกจากนี้หลังจากการใช้งานพลาสติกชนิดสลายตัวได้ทางชีวภาพแล้ว สามารถนำไปกำจัดด้วยกระบวนการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ได้ จึงไม่เหลือสารพิษตกค้างเป็นภาระต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นวัฏจักรของพลาสติกชีวภาพจึงเปรียบเสมือนวัฏจักรการย่อยสลายของวัสดุธรรมชาติ (สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551)

เนื่องด้วยประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีความพร้อมทางด้านวัตถุดิบทางการเกษตรที่มีศักยภาพทั้งด้านปริมาณและคุณภาพ ได้แก่ ข้าวเจ้า อ้อย มันสำปะหลัง ข้าวโพด ปาล์มน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งมีส่วนประกอบของแป้ง (คาร์โบไฮเดรต) น้ำตาล (กลูโคส) หรือเส้นใย (เซลลูโลส) สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลาสติกชีวภาพได้ โดยเฉพาะ มันสำปะหลัง ที่มีราคาถูกและมีการปลูก

และเก็บเกี่ยวผลผลิตปริมาณมากภายในประเทศ พบว่าในปี พ.ศ.2548 มีกำลังการผลิตหัวมันสดเป็นอันดับ 3 ของโลก และส่งออกเป็นอันดับ 1 ของโลก โดยมีพื้นที่เพาะปลูกมันสำปะหลังกว่า 6.6 ล้านไร่ และมีการผลิตหัวมันสดได้กว่า 17 ล้านตัน หรือคิดเป็นมูลค่าประมาณ 2,000 ล้านบาท ซึ่งจะสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มได้ถึง 10 เท่าเมื่อนำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพ มันสำปะหลังจึงเป็นวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมในการนำมาผลิตพลาสติกชีวภาพชนิด พอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid) หรือ PLA) อีกทั้งประเทศไทยยังมีอุตสาหกรรมปลายน้ำ อันได้แก่ การผลิตชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์พลาสติกซึ่งจัดเป็นอุตสาหกรรมที่สามารถรองรับอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพระดับต้นน้ำได้อย่างครบวงจร จากศักยภาพด้านวัตถุดิบและอุตสาหกรรมดังกล่าว ประเทศไทยจึงจัดทำนโยบายส่งเสริมและผลักดันให้ไทยเป็นผู้นำด้านอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพในภูมิภาคภายใน 15 ปี จากการจัดทำแผนที่นำทางแห่งชาติการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ ระยะที่ 2 (พ.ศ. 2554 - 2558) โดยสำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมถึงส่งเสริมให้มีการวิจัยค้นคว้าเรื่องการปรับปรุงคุณภาพพอลิแลคติกแอซิด กระบวนการผลิต กระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ รวมไปถึงกระบวนการย่อยสลายและการกำจัดพลาสติกชีวภาพเพื่อรองรับการเติบโตของอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพในอนาคตของประเทศไทยอีกด้วย

พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA) เป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มพอลิเอสเตอร์ที่มีสายโซ่ตรง (Aliphatic polyester) สังเคราะห์ได้จากกรดแลคติก (Lactic acid) ซึ่งกรดแลคติกเกิดจากกระบวนการหมักแป้งหรือน้ำตาล ซึ่งได้มาจากผลผลิตทางการเกษตรที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักได้แก่ ข้าว อ้อย ข้าวโพด และมันสำปะหลัง เป็นต้น ผลผลิตเหล่านี้ถือเป็นทรัพยากรที่สามารถสร้างทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง โดยพอลิแลคติกแอซิดจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่สามารถขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ได้โดยผ่านกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกทั่วไป สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายด้าน เช่น แก้ว พิล์ม ถุงใส่อาหาร โหมลละลายทางการแพทย์ และฟิล์มคลุมดินทางการเกษตร ภายหลังจากการใช้งานผลิตภัณฑ์จากพอลิแลคติกแอซิด สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยวิธีการฝังกลบ โดยตามธรรมชาติการเสื่อมสภาพของพอลิแลคติกแอซิดเกิดจากการกระตุ้นด้วยความร้อน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส หรือกิจกรรมทางชีวภาพ (เช่น เอนไซม์) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน การแตกสลายด้วยแสง (Photolysis) และการแตกสลายด้วยรังสี (Radiolysis) เนื่องจากการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นทั้งจากกระบวนการทางชีวภาพและกายภาพ (Madhavan Nampoothiri และคณะ, 2010) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลายจะได้คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ (สภาวะมีออกซิเจน) และมีเทน (สภาวะไร้ออกซิเจน) ซึ่งจากปฏิกิริยาในสภาวะไร้ออกซิเจนจะเกิดผลพลอยได้คือก๊าซชีวภาพซึ่งเป็นพลังงานทดแทน

งานวิจัยการศึกษาวิธีการกำจัดพลาสติกชีวภาพด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจนเป็นการศึกษาทางเลือกใหม่แทนการนำพลาสติกชีวภาพไปกำจัดด้วยวิธีฝังกลบ ซึ่งมีข้อดีคือได้ก๊าซมีเทนเป็นผล

พลอยได้ จากงานวิจัยของ Itävaara และคณะ (2002) พบว่าที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิดหรือ PLA สามารถย่อยสลายได้ในสภาวะไร้ออกซิเจน และให้ก๊าซมีเทนเป็นผลพลอยได้ แต่ข้อเสียคือใช้ระยะเวลาเวลานานกว่า 100 วัน ต่อมา Yagi และคณะ (2009) ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพชนิด PLA ด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจนร่วมกับขยะเศษอาหารและมูลวัวที่อุณหภูมิสูง 55 องศาเซลเซียส ในถังปฏิกรณ์ขนาด 1.5 ลิตร พบว่า PLA ถูกย่อยสลายสูงสุดถึง 91% ภายใน 75 วัน โดยให้ก๊าซมีเทน 53.8% แม้ว่าการหมักที่อุณหภูมิสูงจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายและเกิดก๊าซมีเทน แต่ก็มีข้อเสียคือสิ้นเปลืองพลังงานในการเดินระบบ ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวคิดที่จะต่อยอดงานวิจัยโดยการนำ PLA มาปรับสภาพขั้นต้นด้วยด่างหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อเพิ่มอัตราการย่อยสลายของ PLA โดยงานวิจัยของ Tsuji และคณะ (2006) พบว่า PLA มีการย่อยสลายสูงขึ้นเมื่อนำไปแช่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เป็นเวลา 20 ชั่วโมง และงานวิจัยของ Chauliac และคณะ (2013) ทำการเพิ่มอัตราการย่อยสลาย PLA ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร่วมความร้อน ที่ 0-1 โมลาร์ และอุณหภูมิ 60 และ 60 °C ระยะเวลา 2 ชม. พบว่าอัตราการย่อยสลายของ PLA กลายเป็นกรดแลคติกหรือ LA ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อนสูงกว่าเมื่อเทียบกับการแช่น้ำร่วมกับความร้อน ซึ่งในระบอบำบัดแบบไร้ออกซิเจนกรดแลคติกจะถูกเป็นกรดอะซิติก และแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทนจะเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นก๊าซชีวภาพได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA ฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อน เพื่อให้ทราบศักยภาพในการนำ PLA ฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นมาเป็นสารตั้งต้นในการหมักร่วม (Co-digestion) กับขยะอินทรีย์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการเดินระบบแบบไร้ออกซิเจนในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบทช์ (Batch Completely Stirred Tank Reactor) ต่อไป

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA โดยการหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ ได้แก่ ขยะเศษอาหารและเศษผักจากตลาดสด เพื่อนำไปพัฒนาทางเลือกใหม่ในการกำจัดพลาสติกชีวภาพด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจนและเป็นข้อมูลสนับสนุนการเลือกใช้พลาสติกชีวภาพในเชิงอุตสาหกรรมที่ยั่งยืนของประเทศในอนาคตต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายทางชีวภาพจาก PLA ฟิล์ม ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมพลาสติกชีวภาพชนิด PLA ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับขยะอินทรีย์ ได้แก่ ขยะ

เศษอาหารและเศษผักจากตลาดสด โดยการเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนด้วยถังปฏิกรณ์  
กวนสมบูรณ์แบบแบทช์

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) ที่อุณหภูมิตั้งที่ห้อง  
ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดย  
กำหนดขอบเขตการวิจัยดังนี้

- 1.3.1 พลาสติกชีวภาพที่ใช้ในงานวิจัย คือ พลาสติกชีวภาพชนิด PLA ที่ผ่านกรรมวิธีการขึ้น  
รูปแบบ Blown Film Extrusion เป็นแผ่นฟิล์มหนา 0.8 มิลลิเมตรและมีลักษณะใส
- 1.3.2 หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย ได้จากระบบบำบัดไร้ออกซิเจนจากบริษัท เสริมสุข จำกัด  
(มหาชน)
- 1.3.3 ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA ฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีบีเอ็มพี  
(BMP) โดยออกแบบการทดลองแบบประสมส่วนกลาง (Central Composite  
Design: CCD) เพื่อหาความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และระยะเวลา  
ในการปรับสภาพที่เหมาะสม
- 1.3.4 ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA ฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นด้วย NaOH ทำ  
การหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ ได้แก่ ขยะเศษอาหารและขยะเศษผักสด โดยระบบถัง  
ปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบทช์ ขนาด 6 ลิตร
- 1.3.5 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ศึกษาพื้นผิว PLA ฟิล์มที่เปลี่ยนไปส่องภายใต้  
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)  
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (TVS) สัดส่วนคาร์บอน  
ต่อไนโตรเจน ค่าซีโอดี (COD) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ ค่าความชื้น  
ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต่อวัน และองค์ประกอบก๊าซ  
ชีวภาพ

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและการอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของ  
PLA ฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และการ  
หมักร่วมกับขยะอินทรีย์ชนิดต่างๆ
- 1.4.2 เป็นทางเลือกใหม่ในการนำขยะพลาสติกชีวภาพมาเปลี่ยนเป็นพลังงานทดแทน



- 1.4.3 เป็นการวิจัยด้านการแตกสลายของผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพในรูปแบบต่างๆ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนากระบวนการกำจัดพลาสติกชีวภาพที่มีประสิทธิภาพและเกิดประโยชน์สูงสุด



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

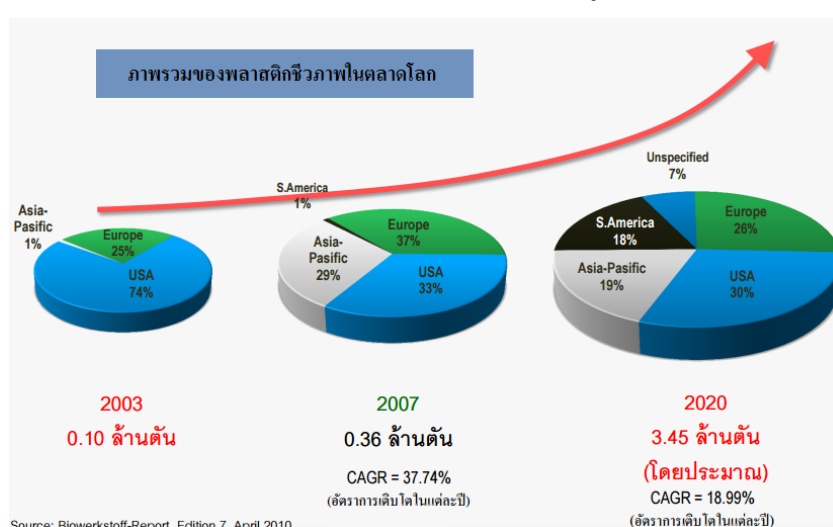
#### 2.1 พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic)

พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) เป็นพลาสติกที่ผลิตจากพืชหรือวัตถุดิบที่สามารถสร้างขึ้นใหม่ได้ (renewable resources) กระบวนการผลิตเป็นกระบวนการหมัก (fermentation) ซึ่งใช้พลังงานต่ำ หรือพลาสติกที่ย่อยสลายได้เองในธรรมชาติที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (petroleum based biodegradable plastics) ภายหลังจากการใช้งานและนำไปทำการฝังกลบ พลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้จะถูกล่อยจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ปัจจุบันพลาสติกชีวภาพได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางหลักแนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่ออนุรักษ์สิ่งแวดล้อม ส่งเสริมให้กลุ่มอุตสาหกรรมแนวหน้าทั่วโลกตื่นตัวในการคิดค้นหาวัตถุดิบหรือพอลิเมอร์ตัวใหม่เพื่อพัฒนาพลาสติกชีวภาพและให้มีคุณสมบัติในการใช้งานได้ดีเทียบเท่ากับพลาสติกดั้งเดิมที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีเพียงอย่างเดียว และสามารถทดแทนหรือลดการใช้งานพลาสติกที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมลงได้ (สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551)

พลาสติกชีวภาพ เป็นวัสดุทางเลือกใหม่ที่มีเป้าหมายเพื่อการผลิตและการบริโภคอย่างยั่งยืน การเลือกใช้พลาสติกชีวภาพเป็นวัสดุทดแทนพลาสติกทั่วไป มีข้อดีหลายประการ ได้แก่ (สุทธิเกตุดี ทัดพิทักษ์กุล, 2556)

- ลดปัญหาโลกร้อน โดยการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก
- ประหยัดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ลดการใช้น้ำมันดิบจากการผลิตพลาสติก
- เพิ่มมูลค่าของทรัพยากรที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบ (renewable resources)
- ลดปริมาณขยะและลดเนื้อที่การใช้งานของบ่อฝังกลบขยะ เนื่องจากพลาสติกชีวภาพบางชนิดสามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ
- ประหยัดพลังงาน เพราะการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพใช้พลังงานต่ำกว่าการผลิตพลาสติกทั่วไป
- คอมโพสท์ที่ได้จากการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพร่วมกับขยะอินทรีย์อื่นๆ สามารถนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของดิน ด้วยการเพิ่มสารอินทรีย์ ความชื้น และแร่ธาตุบางชนิดให้กับดิน
- เป็นทางเลือกใหม่ในการส่งเสริมการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม

เนื่องด้วยปัญหาด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาที่ทุกประเทศในระดับสากล ให้ความสำคัญตระหนักสนใจและตื่นตัวที่จะร่วมกันแก้ไข โดยพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนและวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นทางเลือกใหม่ที่จะทำให้โลกสามารถฟื้นฟูกลับสู่สภาพสมดุลของธรรมชาติได้ ดังนั้นทุกประเทศจึงเร่งสร้างเทคโนโลยีพื้นฐานและปรับเปลี่ยนจากแหล่งพลังงาน และวัสดุที่ผลิตได้จากน้ำมันปิโตรเลียมและปิโตรเคมีซึ่งมีข้อจำกัดทั้งด้านปริมาณและกระบวนการผลิตที่ก่อให้เกิดการสะสมของมลภาวะต่อระบบนิเวศไปสู่กระบวนการผลิต ดังนั้นนวัตกรรมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแหล่งวัตถุดิบที่ทดแทนใหม่ได้ (renewable resources) จึงได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง รวมถึงอุตสาหกรรมผลิตพลาสติกชีวภาพด้วยเช่นกัน ซึ่งพบว่ามียอดการผลิตในระดับเพิ่มสูงขึ้นทุกปี ดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 ภาพรวมของพลาสติกชีวภาพในตลาดโลก

ที่มา : คณะอนุกรรมการส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ (2556)

ปัจจุบันพลาสติกชีวภาพได้รับความสนใจเนื่องจากผลิตมาจากพืชหรือวัตถุดิบในธรรมชาติที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ต้นทุนต่ำ และสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ กระแสนุรักษ์ธรรมชาติและความตระหนักต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ทั่วโลกกำลังเผชิญร่วมกันส่งผลให้พลาสติกชีวภาพเป็นวัสดุแห่งอนาคตที่มีความต้องการมากขึ้น

### 2.1.1 ความหมายและประเภทของพลาสติกชีวภาพ

ความหมายของพลาสติกชีวภาพ

นิยามของพลาสติกชีวภาพ หรือ Bioplastics บัญญัติไว้ในสองความหมายดังนี้ (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4421, 2555)

### *พลาสติกสลายตัวได้ทางชีวภาพ (Biodegradable plastic)*

คือ พลาสติกที่เมื่อนำไปผ่านกระบวนการหมักทางชีวภาพในโรงปุ๋ยหมัก จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารประกอบอินทรีย์ มวลชีวภาพ และต้องไม่ทิ้งสิ่งที่มองเห็นด้วยตาเปล่า สิ่งแปลกปลอมหรือสารพิษหลงเหลือไว้ ตามมาตรฐาน ISO 17088 หรือ EN 13432 หรือ ASTM D-6400 โดยมีแหล่งกำเนิดได้จากวัสดุของเสีย (wastes) หรือวัสดุทางการเกษตรที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ (Renewable or bio-based) หรือวัสดุที่มาจากปิโตรเคมี (Nonrenewable or petro-based)

#### *ก. พลาสติกที่ผลิตจากวัสดุที่ปลูกทดแทนใหม่ (Bio-based Plastics)*

คือ พลาสติกที่ผลิตมาจากแหล่งวัสดุของเสีย หรือวัสดุทางการเกษตรเท่านั้น ไม่รวมถึงที่ผลิตจากวัสดุปิโตรเคมี ปัจจุบันใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D-6866 สำหรับพิสูจน์ว่าพลาสติกเป็น Bio-based plastics หรือไม่และมีสัดส่วนของแหล่งคาร์บอนใหม่ (C-14) เป็นเท่าใด

#### *ประเภทของพลาสติกชีวภาพ*

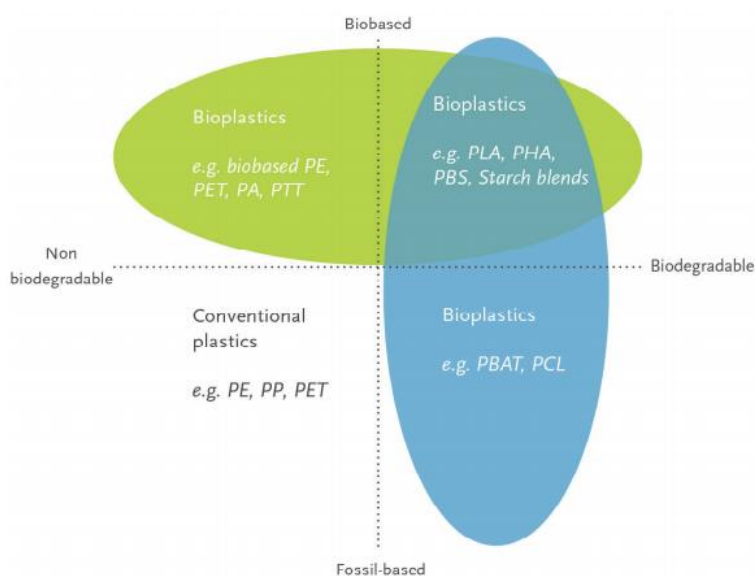
พลาสติกชีวภาพสามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดของวัสดุได้ 2 ประเภท ได้แก่ (พิสุทธิ์ เลิศวีไล, 2556)

#### *ก. พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุปิโตรเคมี (petroleum-based biodegradable plastics)*

เช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ แนพธา (naphtha) และถ่านหิน ซึ่งเป็นแหล่งวัสดุที่ไม่สามารถทดแทนได้ และถูกใช้เป็นที่แหล่งให้พลังงานและแหล่งวัสดุในกระบวนการผลิตวัสดุต่าง ๆ ซึ่งนอกจากจะใช้แล้วหมดไป กระบวนการผลิตพลาสติกที่ได้อีกก่อให้เกิดผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมอีกด้วย แหล่งวัสดุที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้จึงเป็นทางเลือกใหม่ที่คำนึงถึงการนำไปใช้เป็นแหล่งให้พลังงานและแหล่งวัสดุในการผลิตวัสดุโดยเฉพาะวัสดุประเภทพลาสติกเพื่อลดการใช้วัสดุปิโตรเลียมลง ซึ่งนอกจากวัสดุที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้สามารถแก้ปัญหาเรื่องการขาดแคลนด้านวัสดุแล้ว ยังช่วยลดเรื่องผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมด้วย ทั้งนี้พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมี เช่น พลาสติกพอลิไว-นิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol, PVA) พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงเช่นพอลิคาร์-โปแลคโตน (polycaprolactone, PCL) เป็นต้น

ข. พลาสติกชีวภาพที่ผลิตจากวัตถุดิบของเสีย (bio-based biodegradable plastics)

ซึ่งได้มาจากแหล่งวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนใหม่ได้ ได้แก่ พืชผลการเกษตรประเภทแป้งและน้ำตาล เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง อ้อย หัวบีท ข้าวสาลี เป็นต้น ในประเทศสหรัฐอเมริกา พืชผลทางการเกษตรหลักที่ใช้ในการผลิตสารตั้งต้น ได้แก่ ข้าวโพด ในขณะที่น้ำตาลจากหัวบีทถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในกลุ่มประเทศสหภาพยุโรป นอกจากนี้พืชผลทางการเกษตรแล้ว ยังมีการนำผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมนมโค ได้แก่ หางนม (whey permeate) มาเป็นวัตถุดิบในการผลิต มอนอเมอร์ (กรดแลคติก) เนื่องจากความต้องการในการลดต้นทุนการผลิตพลาสติกชีวภาพ จึงมีการแสวงหามวลชีวภาพประเภทอื่นที่มีศักยภาพและราคาต่ำมาใช้เป็นวัตถุดิบนอกเหนือจากแป้งและน้ำตาล ได้แก่ เซลลูโลส และลิกโนเซลลูโลซิก (lignocellulosics) ที่มีอยู่ในพืช ซึ่งสามารถย่อยเป็นน้ำตาลได้ ซึ่งตัวอย่างพลาสติกที่ผลิตมาจากวัตถุดิบมวลชีวภาพ ได้แก่ พอลิแลคไทด์ (polylactide, PLA), พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (polyhydroxyalcanoate, PHA) และพอลิไฮดรอกซี-ซีบิวทีเรต (polyhydroxybutyrate, PHB) เป็นต้น



ภาพที่ 2.2 การจำแนกพลาสติกชีวภาพ

ที่มา : European bioplastics (2015)

เนื่องด้วยข้อจำกัดของน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งมีปริมาณลดลง ทำให้พลาสติกจากของเสียซึ่งผลิตได้จากวัตถุดิบหรือทรัพยากรที่เกิดทดแทนใหม่ได้ (renewable resource) ได้รับการยอมรับและเป็น

ที่สนใจอย่างกว้างขวาง ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาเกิดการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ที่มีความก้าวหน้า โดยนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัยขึ้นเป็นจำนวนมาก จึงทำให้เกิดโอกาสของธุรกิจนวัตกรรมพลาสติกชีวภาพซึ่งสามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัตถุดิบทางการเกษตรได้ (Tokiwa และคณะ, 2009)

### 2.1.2 พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกออกแบบให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีภายใต้สภาวะแวดล้อมที่จุลินทรีย์ในธรรมชาติสามารถย่อยสลายได้ เมื่อย่อยสลายหมดแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นประโยชน์ในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของพืช (สถาบันพลาสติก, 2556) โดยสามารถตรวจวัดการย่อยสลายได้ด้วยวิธีการทดสอบมาตรฐาน คือการวัดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่ามีการใช้คำว่า พลาสติกย่อยสลายได้ในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติ (Environmentally Degradable Plastic, EDP) ซึ่งหมายถึง พลาสติกที่สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ ในสภาวะแวดล้อม เช่น กรด ต่าง น้ำ และออกซิเจนในธรรมชาติ แสงแดด แรงเค้นจากการกระทบของเม็ดฝนและแรงลม หรือจากเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีกลายเป็นสารที่ถูกดูดซึม และย่อยสลายต่อได้อย่างสมบูรณ์ โดยจุลินทรีย์ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ สารอินทรีย์ และสารชีวภาพ เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจึงถือเป็นพลาสติกที่เป็นมิตรต่อสภาวะแวดล้อม (Environment Friendly Plastic) หรือพลาสติกสีเขียว (Green Plastic) ช่วยลดภาระในการจัดการขยะและส่งผลกระทบต่อสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าการใช้พลาสติกทั่วไป (ธนาวดี ลีจากภย์, 2555)

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพมีอยู่หลายชนิดแต่ชนิดที่ได้รับความนิยมและกำลังพัฒนาสู่ระดับอุตสาหกรรมได้แก่

#### ก. พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA)

คือพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพชนิดพอลิเอสเทอร์ที่มีสายโซ่ตรง (Aliphatic polyester) สังเคราะห์ได้จากกระบวนการหมักแป้งหรือน้ำตาลให้เป็นกรดแลคติก (Lactic acid) โดยพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวสาลีหรืออ้อย จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง จากนั้นจึงนำมาทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) ผลิตเป็นเม็ดพลาสติก PLA ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับพอลิสไตลีน (Polystyrene หรือ PS พลาสติกเบอร์ 6) และพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate หรือ PET พลาสติกเบอร์ 1) มีลักษณะใส ถ่ายเทความร้อนและความชื้น ได้ดีสามารถทนความร้อนได้ตั้งแต่ 60-120 องศาเซลเซียส พอลิแลคติกแอซิดจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) สามารถขึ้นรูปได้ด้วยกระบวนการผลิตที่ใช้กันทั่วไป เช่น การฉีดขึ้นรูป

(Injection molding) การขึ้นรูปด้วยความร้อน (Thermoforming) การอัดขึ้นรูป (Compression molding) การอัดรีด (Extrusion) และการเป่าขึ้นรูป (Blow molding) เป็นต้น ภายหลังจากใช้งานผลิตภัณฑ์จากพอลิแลคติกแอซิด สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพเมื่อนำไปฝังกลบในดินโดยใช้ระยะเวลาอันสั้นเมื่อเทียบกับพลาสติกที่ผลิตจากวัตถุดิบจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

#### ข. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (PBS)

คือ พลาสติกสลายได้ทางชีวภาพชนิดพอลิเอสเทอร์ (Polyester) อีก ชนิดหนึ่งที่ผลิตจากโมนอเมอร์ หลัก 2 ชนิด คือ กรดซัคซินิก (Succinic acid) ที่ผลิตมาจากพืช และ 1,4- Butanediol ที่ผลิตจากปิโตรเลียม PBS มีคุณสมบัติคล้ายพอลิเอทิลีน (Polyethylene หรือ PE พลาสติก เบอร์ 2) มีลักษณะขุ่น สามารถนำมาขึ้นรูปได้ง่ายในหลากหลายกระบวนการ โดยเฉพาะการฉีดขึ้นรูป และการเป่าขึ้นรูปฟิล์ม ซึ่ง PBS สามารถทนความร้อนได้ตั้งแต่ 80-95 องศาเซลเซียส และมีความยืดหยุ่นที่ดี อีกทั้งยังสามารถนำไปผสมกับ PLA เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์หลายประเภทได้อีกด้วย

#### ค. โพลิบิวทิลีนอะดีเพท-โค-เทอเรพทาเรต (Poly (butylene adipate-co-terephthalate), PBAT)

คือ พลาสติกสลายตัวได้ทางชีวภาพมีลักษณะเป็น aliphatic – aromatic copolyester มีองค์ประกอบพื้นฐานจากกระบวนการปิโตรเลียม แต่สามารถย่อยสลายได้ในสิ่งแวดล้อม เนื่องจากถูกออกแบบให้มีส่วนหาง (tailor – made molecular structures) ซึ่งประกอบด้วย terephthalic acid, และ 1, 4-butanediol เชื่อมต่อกันอยู่ มีระบบเชื่อมโยงโมเลกุลสามารถนำมอนอเมอร์ชนิดอื่นมาต่อ เช่น สายไฮโดรคาร์บอน ส่งผลให้มีการต่อกันเป็นแขนง (branching) นำไปสู่การต่อกันเป็นสายยาวเพื่อเพิ่มน้ำหนักโครงสร้าง PBAT

#### ง. พอลิไฮดรอกซีอัลคานอยด์ (Polyhydroxyalkanoate, PHAs)

คือ สารพอลิเมอร์ตั้งต้นที่สามารถนำมาใช้ผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยบริษัท Metabolix Inc. ประเทศสหรัฐอเมริกาได้พัฒนาเทคโนโลยีการผลิต PHAs ได้ในระดับอุตสาหกรรม วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต Polyhydroxyalkanoates (PHAs) คือ แป้งหรือน้ำตาลที่มาจากทรัพยากรธรรมชาติที่เกิดขึ้นใหม่ได้ (renewable resource) ซึ่งได้แก่ พืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลังและอ้อย เป็นต้น โดยมีกระบวนการผลิตเริ่มต้นจากการบดหรือม่พืชนั้นให้ละเอียดเป็นแป้ง จากนั้นทำการย่อยแป้งให้ได้เป็นน้ำตาล และนำไปหมัก (fermentation) ด้วยจุลินทรีย์ชนิดพิเศษชื่อ *Eschericia Coli* ซึ่งกินน้ำตาลเป็นอาหาร และสามารถเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลภายในตัวจุลินทรีย์เองเป็น PHAs ซึ่งสามารถแยกออกมาได้โดย

การกะเทาะแยกเปลือกนอกหุ้มจุลินทรีย์ออก เนื่องจาก PHAs มีช่วงอุณหภูมิในการหลอมเหลว (Tm) ที่กว้างตั้งแต่ 50 – 180 องศาเซลเซียส จึงทำให้มีคุณสมบัติในการนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์พลาสติกได้หลากหลาย เช่น การขึ้นรูปเป็นฟิล์ม การฉีดยาและการเป่า

#### จ. พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต (Polybutylene Succinate, PBS)

พอลิบิวทิลีนซัคซิเนต หรือ PBS คือ Biobased Biodegradable Plastics ผลิตจากวัตถุดิบ 2 ชนิด คือ Succinic Acid และ 1, 4 Butanediol โดยทั้งสองวัตถุดิบ สามารถผลิตได้จากสารตั้งต้นคือ น้ำตาลดิบ โดย PBS มีคุณลักษณะเป็นเกล็ดของแข็งสีขาว มีคุณสมบัติคล้ายกับ PET และด้วยคุณสมบัติที่สามารถขึ้นรูปได้ดี จึงมีการนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบการขึ้นรูปพลาสติก (applications) ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ Injection Moulding, Extrusion Moulding, Blown Film Extrusion ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ อาทิเช่น Mulch Film, Packaging Film, Bags and Flushable Hygiene Products หรือนำไปผสม (compound) กับ Starch และ Adipate Copolymers ผลิตเป็น Polybutylene Succinate (PBSA) เพื่อปรับคุณสมบัติให้เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์

#### 2.1.3 ประโยชน์ของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

พลาสติกสลายตัวได้ทางชีวภาพใช้ประโยชน์ในหลายด้าน (ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ, 2555) ได้แก่

##### ด้านการแพทย์

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพถูกนำมาผลิตเป็นวัสดุทางการแพทย์ เช่น ผิวน้ำแข็งเทียม ไหมละลาย อุปกรณ์ประเภทสกรูและแผ่นตามกระดูกที่ฝังอยู่ในร่างกายที่สามารถย่อยสลายได้เอง

##### ด้านบรรจุภัณฑ์เพื่อการบริโภค

เช่น สารเคลือบกระดาษสำหรับห่ออาหาร แก้วน้ำชนิดใช้แล้วทิ้ง ถ้วยหรือถาดย่อยสลายได้สำหรับบรรจุอาหาร ฟิล์มและถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สำหรับใช้ใส่ขยะเศษอาหาร โฟมเม็ดกันกระแทก เป็นต้น

โดยปกติการใช้บรรจุภัณฑ์อาหารที่ผลิตจากพลาสติกทั่วไปมักไม่ได้รับความนิยมน่ากลับมารีไซเคิลมากนัก เนื่องจากมีการปนเปื้อนสูง ทำให้ไม่สะดวกต่อการเก็บและทำความสะอาด การนำพลาสติกย่อยสลายได้มาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหาร จึงเป็นแนวทางหนึ่งในการลดปัญหาด้านการจัดการขยะบรรจุภัณฑ์ลงได้ รวมทั้งผลิตภัณฑ์จำพวกฟิล์มและถุงพลาสติกทั่วไปที่มีความยุ่งยากในรีไซเคิล ตั้งแต่ขั้นตอนการคัดแยกและทำความสะอาด ทำให้มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูงไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ฟิล์มและถุงพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสำหรับใช้ใส่ขยะเศษอาหารจึงถือเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับสถานที่ที่มีระบบการจัดการขยะอินทรีย์ด้วยวิธีการคอมโพสท์ ซึ่งได้รับ



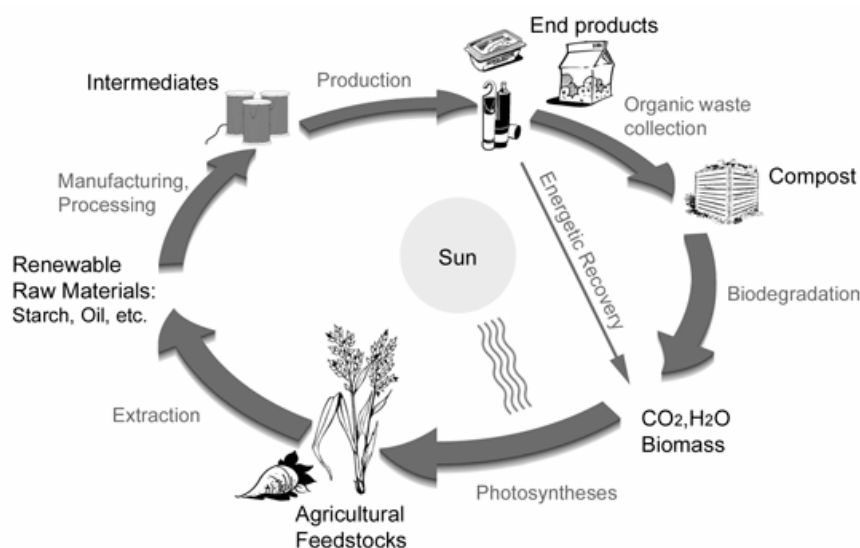
ความนิยมในต่างประเทศ เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการนำมาทำคอมโพสท์พร้อมขยะอินทรีย์อื่น ๆ ทำให้เกิดความสะอาดไม่ต้องแยกทิ้ง

#### *ด้านการเกษตร*

ผลิตเป็นแผ่นฟิล์มคลุมดินและวัสดุสำหรับการเกษตร ได้แก่ แผ่นฟิล์มป้องกันการเติบโตของวัชพืชและรักษาความชื้นในดิน ฟิล์มคลุมดินสำหรับการเกษตรเป็นอุปกรณ์ทางการเกษตรที่สำคัญในการเพาะปลูกพืชบางชนิด เช่น มะเขือเทศ ซึ่งแผ่นฟิล์มจะช่วยป้องกันการเติบโตของวัชพืช และรักษาความชื้นในดิน การใช้ฟิล์มสามารถผลิตได้จากพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะช่วยลดขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์มภายหลังเสร็จสิ้นการใช้งาน เนื่องจากสามารถกำจัดโดยการไถพรวนลงดินได้โดยตรง ช่วยป้องกันการสูญเสียแร่ธาตุและสารอาหารบริเวณหน้าดินซึ่งมักเกิดขึ้นในขั้นตอนการเก็บและกำจัดฟิล์ม นอกจากนี้ยังมีการนำพลาสติกย่อยสลายได้มาใช้เป็นวัสดุควบคุมการปลดปล่อยสารสำคัญ เช่น ฮอร์โมนพืช สารเคมีสำหรับการเกษตร วัสดุกักเก็บน้ำสำหรับการเพาะปลูกพืชในทะเลทราย รวมถึงทั้งหรือกระถางสำหรับเพาะต้นกล้า

#### **2.1.4 วัฏจักรของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม**

พลาสติกชีวภาพวัสดุทางเลือกใหม่ที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีสมบัติด้านการใช้งานเหมือนพลาสติกทั่วไป แต่มีคุณสมบัติที่แตกต่างคือถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการชีวภาพหรือถูกหมักเป็นปุ๋ยได้ในสภาวะที่เหมาะสม ซึ่งกระบวนการผลิตพลาสติกชีวภาพจะเริ่มจากพืชของเสียปริมาณหลายพันล้านตันที่ถูกผลิตขึ้นด้วยกระบวนการสังเคราะห์แสงตามธรรมชาติ จากนั้นก็นำไปเป็นวัตถุดิบของการผลิตพลาสติกชีวภาพ และพลาสติกชีวภาพเหล่านี้ในปริมาณที่เท่ากันก็จะถูกจุลินทรีย์ในธรรมชาติย่อยสลายจนกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งสามารถนำมาหมุนเวียนใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเพื่อผลิตพืชของเสียอีกครั้ง ซึ่งกระบวนการผลิตพลาสติกชีวภาพตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงกระบวนการย่อยสลาย จึงเป็นการถอดแบบวัฏจักรของธรรมชาติได้อย่างครบวงจร ดังภาพที่ 2.3 โดยไม่ต้องมีกระบวนการกำจัดขยะเข้ามาเกี่ยวข้องจึงไม่ส่งผลกระทบต่อปัญหาสิ่งแวดล้อมและไม่ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะอีกด้วย ดังนั้นพลาสติกชีวภาพจึงถือเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง เพราะเกิดจากการใช้ทรัพยากรแบบอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมภายใต้ทรัพยากรที่ปลูกทดแทนได้ (renewable resources) รวมถึงยังไม่ก่อให้เกิดมลภาวะสิ่งแวดล้อมหลังจากหมดอายุการใช้งาน (สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551)



ภาพที่ 2.3 วัฏจักรของพลาสติกชีวภาพ

ที่มา : European bioplastics (2015)

กระบวนการนำพลาสติกชีวภาพไปใช้ภายหลังการใช้งานทั่วไปมีดังนี้

#### การหมักปุ๋ย

ปุ๋ยที่ได้จากการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพร่วมกับขยะอินทรีย์อื่น ๆ สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพดินโดยเป็นการเพิ่มสารอินทรีย์ ความชื้น และสารอาหารให้แก่ดิน และยังช่วยลดปริมาณการใช้ปุ๋ยและลดการเกิดโรคได้อีกด้วย

#### การย่อยสลายโดยการฝังกลบ

การใช้ถุงใส่ขยะที่เป็นพลาสติกชีวภาพ เมื่อนำไปกำจัดโดยการฝังกลบจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการย่อยสลายของขยะเศษอาหารหรือขยะอินทรีย์ในบ่อฝังกลบ ซึ่งจะช่วยลดเนื้อที่การใช้งานของบ่อฝังกลบ รวมทั้งช่วยเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในกรณีที่บ่อฝังกลบถูกออกแบบมาให้ผลิตและใช้ประโยชน์จากก๊าซมีเทนได้ นอกจากนี้การใช้ฟิล์มพลาสติกชีวภาพเพื่อปกคลุมด้านบนของการฝังกลบ สามารถเพิ่มวงจรชีวิตของบ่อฝังกลบแทนการใช้วิธีเดิมคือการใช้ดินคลุม ซึ่งจะใช้พื้นที่ประมาณร้อยละ 25 ของเนื้อที่การฝังกลบทั้งหมด

#### การนำไปใช้คัดแยกขยะอินทรีย์

ในประเทศญี่ปุ่น ที่เมืองฟูราโน ได้มีการนำถุงใส่ขยะที่ผลิตจากพลาสติกชีวภาพมาใช้คัดแยกขยะอินทรีย์ได้ถึงร้อยละ 90 ซึ่งถุงใส่ขยะจากพลาสติกชีวภาพพร้อมขยะอินทรีย์สามารถนำไปหมักเป็นปุ๋ยอินทรีย์คุณภาพสูง นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ผลิตก๊าซมีเทนเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือ

ผลิตไฟฟ้าได้อีกด้วย นับว่าเป็นรูปแบบการจัดการขยะที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยิ่ง

จากกระบวนการผลิตพลาสติกชีวภาพตั้งแต่ขั้นตอนการปลูกของเสียเพื่อนำไปเป็นวัตถุดิบ จนกระทั่งภายหลังการใช้งานของพลาสติกชีวภาพ ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในเชิงบวกของพลาสติกชีวภาพที่เกิดขึ้น คือ ในกระบวนการผลิตพลาสติกชีวภาพใช้พลังงานและปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หรือก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse Gas, GHG) ค่อนข้างต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตพลาสติกจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยนอกจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาในกระบวนการผลิตและจะไม่มีการผลิตคาร์บอนในรูปแบบอื่น ๆ ออกสู่บรรยากาศ ปริมาณการใช้พลังงานและการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตพลาสติกชีวภาพชนิดต่าง ๆ ได้แสดงดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 พลังงานในการผลิตพลาสติกชีวภาพ

พอลิเมอร์	พลังงาน (MJ/kg)
LDPE	81
PHA – fermentation process	81
PCL	77
PVOH	58
PLA	57
Thermoplastic starch (TPS)	25

ที่มา : สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (2551)

ตารางที่ 2.2 การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากพลาสติกชีวภาพ

พอลิเมอร์	การปล่อย GHG×10 (kgCO <sub>2</sub> eq./kg)
PCL	53
LDPE	50
HDPE	49
PVOH	42
Thermoplastic starch (TPS)	11
PHA – fermentation process	n/a
PLA	n/a

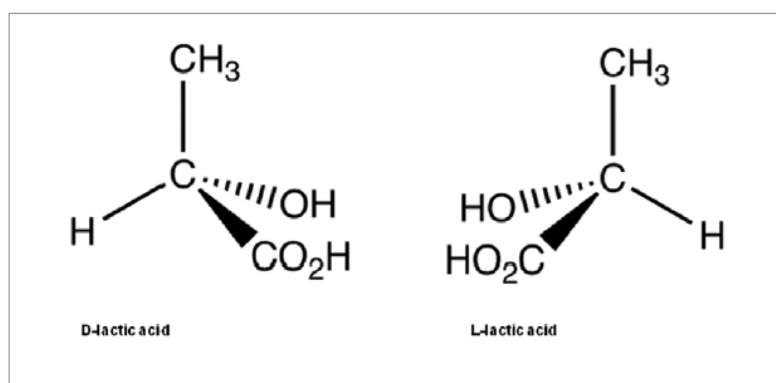
ที่มา : สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (2551)

## 2.2 พอลิแลคติกแอซิด (Poly(lactic acid), PLA)

พอลิแลคติกแอซิด (PLA) เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ ที่ได้มาจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของกรดแลคติก (ซึ่งเป็นสารที่ได้จากการหมักคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้งข้าวโพด และแป้งมันสำปะหลัง) ซึ่งการสังเคราะห์ PLA ดังนั้นพืชที่มีแป้งหรือน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ข้าวโพด มันสำปะหลัง ข้าวสาลีหรืออ้อย จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ ซึ่งทรัพยากรเหล่านี้สามารถสร้างขึ้นทดแทนใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง (อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล, 2554)

### 2.2.1 โครงสร้าง องค์ประกอบและการสังเคราะห์

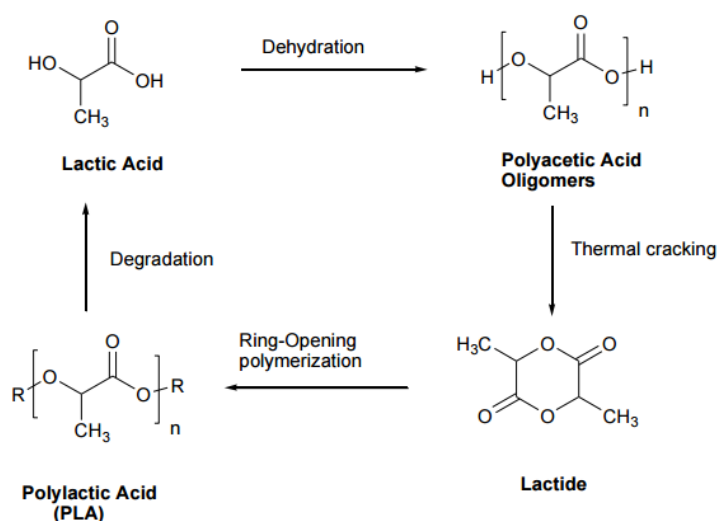
พอลิแลคติกแอซิดสังเคราะห์ขึ้นจาก กรดอัลฟาไฮดรอกซี ( $\alpha$ -Hydroxy acids) หน่วยย่อยหรือมอนอเมอร์ของพอลิแลคติกแอซิด คือ กรดแลคติก หรือมีชื่อทางเคมีคือ 2-ไฮดรอกซี โพรพิโอนิก แอซิด (2-Hydroxy propionic acid) กรดแลคติกมีไอโซเมอร์สองรูปแบบ คือ แบบดีและแอล (ภาพที่ 2.4) ซึ่งเป็นนิแอนซีโอเมอร์ (Enantiomer) ที่มีความว่องไวต่อแสง (Optical active) ต่างกัน กล่าวคือ มีสูตรเคมีเหมือนกันแต่จัดเรียงตัวในสามมิติไม่เหมือนกัน และบิตระนาบแสงโพลาไรซ์ในทิศทางต่างกัน ในธรรมชาติส่วนใหญ่พบในรูปแบบแอล-ไอโซเมอร์ หรือพบในรูปแบบของผสมระหว่างแอล-และดี-ไอโซเมอร์ เรียกว่าของผสมราซิมิก (Racemic mixture, อัตราส่วน = 1:1 เขียนแทนด้วย DL) หรือ สารประกอบมีโซ (meso-compound) ซึ่งไม่มีสมบัติบิตระนาบแสงโพลาไรซ์ (Optically inactive) ปัจจุบันการผลิตกรดแลคติกอาศัยการหมักเป็นหลัก ซึ่งสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสง (Optical purity) ที่ดี



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของกรดแลคติก

ที่มา : อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล (2554)

การสังเคราะห์ PLA สามารถทำได้หลายวิธี (ภาพที่ 2.5) เช่น การสังเคราะห์โดยปฏิกิริยา Azeotropic dehydration condensation ซึ่งจะทำให้ได้ PLA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงถึงระดับมากกว่า 100,000 หรือปฏิกิริยาควบแน่นโดยตรงของกรดแลคติก (ได้เป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ประมาณ 1,000 – 5,000 บางครั้งเรียกว่าพรีพอลิเมอร์) นอกจากนี้ เมื่อนำพรีพอลิเมอร์ดังกล่าวไปผ่านปฏิกิริยาแตกตัวย้อนกลับ (depolymerization) จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแลคไทด์ซึ่งมีโครงสร้างไอโซเมอร์หลายแบบ เช่น LL, LD, และ DD (ภาพที่ 2.6) ซึ่งสารดังกล่าว สามารถเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเปิดวง (ring opening polymerization) ได้เป็นพอลิแลคติกแอซิดอีกครั้ง ซึ่งจะมีน้ำหนักโมเลกุลสูงในระดับมากกว่า 100,000 เช่นเดียวกัน

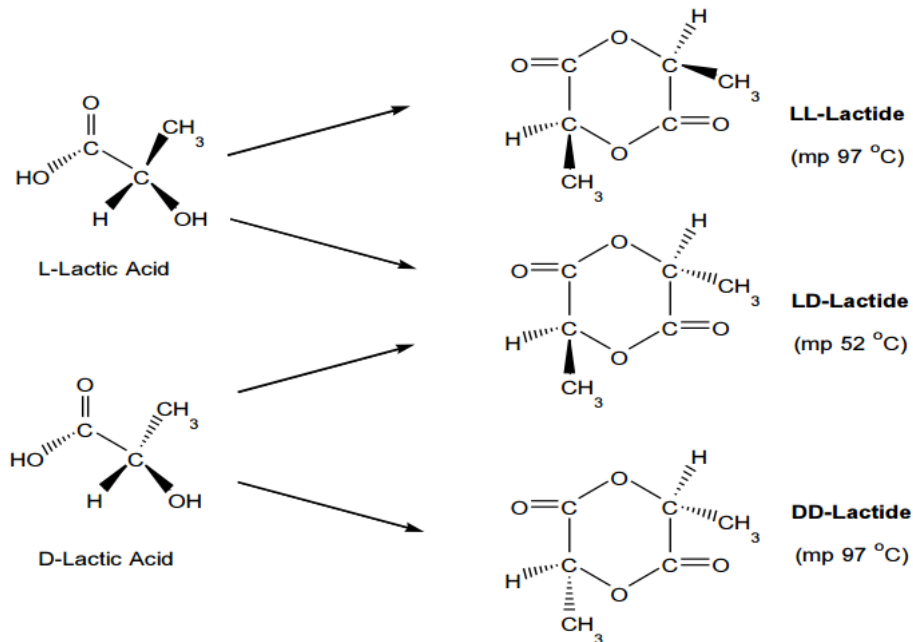


ภาพที่ 2.5 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ PLA จากกรดแลคติกและหรือแลคไทด์

ที่มา : อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล (2554)

น้ำหนักโมเลกุลจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของ PLA ที่ สังเคราะห์ได้ เช่น สมบัติเชิงกล ความเหนียว ความแข็งแรงขณะหลอม สมบัติด้านการไหล และอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะ ตัวอย่างเช่น PLA ที่มีปริมาณ D-lactide เท่ากัน จะมีค่า  $T_g$  และ  $T_m$  สูงขึ้นเมื่อน้ำหนักโมเลกุลเพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงน้ำหนักโมเลกุลต่ำประมาณ 10,000–30,000 กรัมต่อโมล (ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของ L-lactide โมโนเมอร์ใน PLA) อย่างไรก็ตามเมื่อเลยจุดดังกล่าว ค่า  $T_g$  จะเริ่มไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงตามน้ำหนักโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น

PLA ที่ใช้ในทางการค้าจะเป็นโคพอลิเมอร์ระหว่าง PLLA กับ PDLLA ซึ่งสังเคราะห์โดยผ่านกลไกแบบปฏิกิริยาเปิดวงของ L- lactide และ L,D-lactide ตามลำดับ โดยที่พอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะมี L-lactide เป็นองค์ประกอบหลักมากกว่า เนื่องจากโมโนเมอร์ที่สกัดได้จากธรรมชาติจะอยู่ในรูปของ L-lactic acid มากกว่า (จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, 2556)



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างไอโซเมอร์ของแลคไทด์โมโนเมอร์ชนิดต่าง ๆ ซึ่งได้มาจากกรดแลคติก  
ที่มา : จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ (2556)

ตัวอย่างเช่น พอลิแลคติกแอซิด จากบริษัท NatureWorks® ชนิดต่าง ๆ ซึ่งมีสัดส่วนปริมาณ D-lactide โมโนเมอร์แตกต่างกันดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงชนิด PLA จากบริษัท NatureWorks® ที่มีปริมาณ D-lactide ต่างกัน

ชนิดของ PLA	ปริมาณ D-lactide
NatureWorks 4032-D	1-2%
NatureWorks 4042-D	3-5%
NatureWorks 4060-D	11-13%

ที่มา : จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ (2556)

ปริมาณ D-lactide และหรือปริมาณ L-lactide จะส่งผลต่อสมบัติด้านต่าง ๆ ของ PLA เช่น ค่าอุณหภูมิในการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และอุณหภูมิในการหลอมผลึก ( $T_m$ ) มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ L-lactide โมโนเมอร์ที่เพิ่มขึ้น

### 2.2.2 สมบัติของพอลิแลคติกแอซิด

ความบริสุทธิ์เชิงแสง (Optical purity) ของพอลิแลคติกแอซิดส่งผลอย่างมากต่อสมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกลและสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซและของเหลว (Barrier properties) พอลิแลคติกแอซิดที่มีสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์สูงกว่าร้อยละ 90 มีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) ในขณะที่พอลิเมอร์ที่มีดี-ไอโซเมอร์ในองค์ประกอบเพิ่มขึ้น มีความบริสุทธิ์เชิงแสงต่ำลงและมีแนวโน้มเป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน (Amorphous) นอกจากนี้คุณสมบัติการหลอมเหลว อุณหภูมิกลาสทรานสิชันและระดับความเป็นผลึกมีแนวโน้มลดลงตามสัดส่วนของแอล-ไอโซเมอร์ที่ลดลงด้วย

สัดส่วนของไอโซเมอร์ที่แตกต่างกันในสายโซ่พอลิเมอร์ทำให้พอลิแลคติกแอซิดที่สังเคราะห์ขึ้นนั้นมีสมบัติได้หลากหลาย จึงสามารถปรับให้รองรับความต้องการการใช้งานได้กว้างขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ผลิตจากวัตถุดิบที่มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น พอลิเอทิลีนเทเรพทาเลต (PET) และ พอลิสไตรีน (PS) พอลิแลคติกแอซิดมีความใส และมีสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติด้านการซึมผ่านของก๊าซใกล้เคียงกัน (อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล, 2554)

#### สมบัติการละลาย

การละลายของพอลิแลคติกแอซิดขึ้นอยู่กับสัดส่วนของหน่วยที่เป็นองค์ประกอบในสายโซ่พอลิเมอร์ และระดับความเป็นผลึก (Degree of crystallinity) พอลิแลคติกแอซิดไม่ละลายน้ำ แอลกอฮอล์ และสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีหมู่แทนที่ เช่น เฮกเซน (Hexane) และเฮปเทน (Heptane) ตัวทำละลายที่ดีสำหรับพอลิแลคติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงสูง (Poly(L-lactic acid), PLLA) ได้แก่ ตัวทำละลายอินทรีย์กลุ่มคลอรีเนตและฟลูออรีเนต (Chlorinated or fluorinated organic solvents) ไดออกเซน (Dioxane) ไดออกโซเลน (Dioxolane) และฟูเรน (Furane) ราซิมีคพอลิแลคติกแอซิด (Poly(rac-lactic acid) นอกจากละลายได้ในตัวทำละลายสำหรับพอลิแลคติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสงสูงที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น ยังละลายได้ในอะซิโตน (Acetone) ไพริดีน (Pyridine) เอทิลแลคเตต (Ethyl lactate) เอทิลอะซิเตต (Ethyl acetate) เตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran) ไชลีน (Xylene) ไดเมทิลซัลฟอกไซด์ (Dimethylsulfoxide) เอ็น,เอ็น ไดเมทิลฟอร์มามิด (N,N-dimethylformamide) และเมทิลเอทิลคีโตน (Methyl ethyl ketone)

#### สมบัติทางกายภาพและทางกล

พอลิแลคติกแอซิดมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.25 พอลิเมอร์ที่ไม่ผ่านการดึงยึด (Unoriented PLA) มีความเปราะมากแต่มีความคงรูป (Stiffness) และความแข็งแรง (Strength) สูง

เมื่อนำไปผ่านการดึงยืด (Oriented) จะมีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเอทิลีน เทเรฟทาเรต (Polyethylene terephthalate, PET) แต่ดีกว่าพอลิสไตรีนที่ผ่านการดึงยืด (Oriented PS) มอดูลัสแรงดึงและแรงดัด (Tensile and flexural moduli) ของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าสูงกว่าพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิโพรพิลีน (PP) และพอลิสไตรีน (PS) แต่ความทนต่อแรงกระแทก (Izod impact strength) และการยืดที่จุดแตกหัก (Elongation at break) มีค่าต่ำกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ

#### *สมบัติทางความร้อน*

พอลิแลคติกแอซิดมีอุณหภูมิกลาสทรานสิชัน ( $T_g$ ) และอุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) ค่อนข้างสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกทั่วไป อุณหภูมิกลาสทรานสิชันมีค่าขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุลและอัตราส่วนระหว่างอีแนนซีโอเมอร์ โดยพบว่าอุณหภูมิกลาสทรานสิชันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักโมเลกุล การผสมแอล-อีแนนซีโอเมอร์เข้ากับดี-อีแนนซีโอเมอร์ทำให้อุณหภูมิกลาสทรานสิชันมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราส่วนระหว่างแอลและดีใกล้เคียงกันมากขึ้น เช่น อัตราส่วนระหว่างแอลต่อดีเป็น 1:1 อุณหภูมิกลาสทรานสิชันมีแนวโน้มลดลงมากที่สุด

อุณหภูมิหลอมเหลว ( $T_m$ ) ของพอลิแลคติกแอซิดขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์เชิงแสงของพอลิเมอร์ด้วยเช่นกัน อุณหภูมิหลอมเหลวสูงที่สุดที่พบในพอลิแลคติกแอซิดที่มีความบริสุทธิ์เชิงแสง (ทั้ง PLLA และ PDLA) มีค่าประมาณ 180 องศาเซลเซียส และมีค่าเอนทัลปี 40-50 จูลต่อกรัม อุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิเมอร์มีค่าลดลง หากในโครงสร้างมีปริมาณของดี-แลคไทด์เป็นองค์ประกอบเพิ่มขึ้น โดยอุณหภูมิหลอมเหลวลดลงได้มากถึง 50 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิแลคติกแอซิดเมื่อใช้ปริมาณมีโซแลคไทด์ (meso-lactide) เพิ่มขึ้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ โดยทั่วไปอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิแลคติกแอซิดมีค่าอยู่ในช่วง 130-160 องศาเซลเซียส การลดลงของอุณหภูมิหลอมเหลวเนื่องจากผลของมีโซแลคไทด์มีความสำคัญโดยช่วยให้ขึ้นรูปง่ายขึ้น และลดการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน

#### *การแปรรูป*

วิธีการแปรรูปหลักสำหรับพอลิแลคติกแอซิดคือการขึ้นรูปโดยใช้ความร้อนเช่นเดียวกับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป ระดับความร้อนที่ใช้ขึ้นรูปด้วยความร้อนหรือเทอร์โมฟอร์มมิง (Thermo-forming) ความร้อนที่ใช้อยู่ในระดับที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการอ่อนตัวและสามารถดึงยืดได้ตามแบบของแม่พิมพ์เท่านั้น ในขณะที่การอัดรีด (Extrusion) การฉีดขึ้นรูป (Injection molding) การอัดขึ้นรูป (Compression molding) และการเป่าขึ้นรูป (Blow molding) นั้น ความร้อนที่ใช้อยู่ในระดับสูงถึงอุณหภูมิหลอมเหลวของพอลิแลคติกแอซิด พอลิเมอร์หลอมเหลวจะไหลเข้าไปเติมเต็มช่องว่างในแม่พิมพ์ แล้วเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งและมีรูปร่างตามแบบแม่พิมพ์เมื่อเย็นตัวลง ดังนั้นการเข้าใจ



ถึงพฤติกรรมทางความร้อน การตกผลึกของพอลิเมอร์หลอมเย็นตัว และพฤติกรรมด้านกระแสวิทยา (Rheological behavior) จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการปรับการผลิตและควบคุมคุณภาพ ก่อนนำพอลิแลคติกแอซิดไปขึ้นรูปจำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการอบไล่ความชื้น ทั้งนี้เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของพอลิแลคติกแอซิดจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดต่ำลง รวมถึงป้องกันไม่ให้สมบัติทางกายภาพเปลี่ยนแปลงไป โดยทั่วไประดับความแห้งอยู่ในระดับที่น้อยกว่า 100 ส่วนในล้านส่วน (ppm) (ร้อยละ 0.01 โดยน้ำหนัก)

ก่อนนำเข้าสู่กระบวนการอัดรีด ในกรณีที่กรรมวิธีต้องใช้เวลาานาน (Long residence times) หรืออุณหภูมิสูงใกล้เคียง 240 องศาเซลเซียส ควรทำให้แห้งในระดับ 50 ส่วนในล้านส่วน เพื่อคงระดับน้ำหนักโมเลกุลสูงที่สุดไว้ พอลิแลคติกแอซิดที่ใช้กันทั่วไปในเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่มีความเป็นผลึก จึงนิยมทำแห้งที่อุณหภูมิสูงเพื่อลดเวลาการทำแห้งลง อุณหภูมิการทำแห้งอยู่ในช่วง 80-100 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเม็ดพลาสติกที่มีโครงสร้างอสัณฐานจำเป็นต้องทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิกลาสทรานสิชัน (น้อยกว่า 60 องศาเซลเซียส) เพื่อป้องกันการเหนียวติดกันเองและทำให้เครื่องทำแห้งอุดตัน ดังนั้นการเลือกเกรดพอลิแลคติกแอซิดให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตมีความสำคัญอย่างยิ่ง

#### *การเสื่อมสภาพของพอลิแลคติกแอซิด*

การเสื่อมสภาพของพอลิแลคติกแอซิดส่วนใหญ่เกิดจากการขาดของสายโซ่หลักหรือสายโซ่ด้านข้างของโมเลกุล ในธรรมชาติการเสื่อมสภาพเกิดจากการกระตุ้นด้วยความร้อน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส หรือกิจกรรมทางชีวภาพ (เช่น เอนไซม์) ปฏิกิริยาออกซิเดชัน การแตกสลายด้วยแสง (Photolysis) และการแตกสลายด้วยรังสี (Radiolysis) เนื่องจากการเสื่อมสภาพเกิดขึ้นทั้งจากกระบวนการทางชีวภาพและกายภาพ กลไกการเสื่อมสภาพจึงมักเกี่ยวโยงไปกับการเสื่อมสภาพจากสิ่งแวดล้อม (Environmental degradation) การเสื่อมสภาพของพอลิแลคติกแอซิดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิ น้ำหนักโมเลกุล ระดับความเป็นผลึก ความบริสุทธิ์ อุณหภูมิ สภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระดับความเข้มข้นของเกลือ (Salinity) การมีอยู่ของออกซิเจน หรือปริมาณอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในระบบ ดังนั้นในการทดสอบการเสื่อมสภาพของพอลิแลคติกแอซิดจึงจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยดังกล่าวประกอบด้วย นอกจากนี้การเสื่อมสภาพยังขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะทางเคมีและกายภาพ เช่น อัตราการแพร่ (Diffusivity) ความเป็นรูพรุน (Porosity) สัณฐาน (Morphology) และความแข็งแรงทางกล (Mechanical strength) เป็นต้น

พอลิแลคติกแอซิดสลายตัวให้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในสภาวะปุ๋ยหมักที่ถูกควบคุม (Controlled composting environment) ภายใน 90 วัน การเติมพอลิแลคติกแอซิดปริมาณ

เล็กน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก) ในของเสียจากการทำสวนที่ยังไม่ผ่านการหมัก (Pre-composted yard waste) ทำให้การหมักมีประสิทธิภาพ

พอลิแลคติกแอซิดถูกไฮโดรไลซ์ในน้ำเดือดหรือน้ำให้กรดแลคติกซึ่งสามารถนำกลับไปใช้เป็นมอนอเมอร์สำหรับสังเคราะห์พอลิเมอร์ขึ้นใหม่ พอลิ (แอล-แลคติกแอซิด) ถูกไฮโดรไลซ์ที่อุณหภูมิ 180-350 องศาเซลเซียส ในเวลา 30 นาที ได้กรดแอล-แลคติก การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) ของพอลิแลคติกแอซิดและโคพอลิเมอร์เกิดขึ้นได้จากเอนไซม์ประเภทเอสเทอร์เอสโปรติเอส และไลเปสที่ขับออกมาจากจุลินทรีย์ และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นหลังการแตกสลายด้วยน้ำทั้งหมดของพอลิแลคติกแอซิดสามารถถูกดูดซึมได้โดยจุลินทรีย์ เช่น เห็ดราและแบคทีเรีย

## 2.3 การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ

### 2.3.1 กลไกการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ

พลาสติกชีวภาพมีกลไกการย่อยสลายได้จากหลายปัจจัย แบ่งเป็น 5 ประเภทใหญ่ๆ คือ

#### กลไกที่ 1 การย่อยสลายได้โดยแสง (Photodegradation)

การย่อยสลายโดยแสงมักเกิดจากการเติมสารเติมแต่งที่มีความไวต่อแสงลงในพลาสติกหรือสังเคราะห์โคพอลิเมอร์ให้มีหมู่ฟังก์ชันหรือพันธะเคมีที่ไม่แข็งแรง แตกหักง่ายภายใต้รังสี (UV) เช่น หมู่คีโตน (Ketone group) อยู่ในโครงสร้าง เมื่อสารหรือหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวสัมผัสกับรังสียูวีจะเกิดการแตกของพันธะกลายเป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ซึ่งไม่เสถียร จึงเข้าทำปฏิกิริยาต่ออย่างรวดเร็วที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการขาดของสายโซ่ แต่การย่อยสลายนี้จะไม่เกิดขึ้นภายในบ่อฝังกลบขยะ กองคอมโพสท์ หรือสภาวะแวดล้อมอื่นที่มีมืด เนื่องจากพลาสติกจะไม่ได้สัมผัสกับรังสียูวีโดยตรง

#### กลไกที่ 2 การย่อยสลายทางกล (Mechanical Degradation)

โดยการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกเป็นชิ้นเล็ก ๆ

#### กลไกที่ 3 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidative Degradation)

การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันของพลาสติก เป็นปฏิกิริยาการเติมออกซิเจนลงในโมเลกุลของพอลิเมอร์ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองในธรรมชาติอย่างช้า ๆ โดยมีออกซิเจนและความร้อน แสงยูวี หรือแรงทางกลเป็นปัจจัยสำคัญ เกิดเป็นสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (hydroperoxide, ROOH) ในพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารเติมแต่งที่ทำหน้าที่เพิ่มความเสถียร (stabilizing additive) แสงและความร้อนจะทำให้ ROOH แตกตัวกลายเป็นอนุมูลอิสระ RO และ OH) ที่ไม่เสถียรและเข้าทำ

ปฏิกิริยาต่อที่พันธะเคมีบนตำแหน่งคาร์บอนในสายโซ่พอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลอย่างรวดเร็ว แต่ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นในปัจจุบันทำให้พอลิโอเลฟินเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนได้เร็วขึ้นภายในช่วงเวลาที่กำหนด โดยการเติมสารเติมแต่งที่เป็นเกลือของโลหะทรานสิชัน ซึ่งทำหน้าที่คะตะลิสต์เร่งการแตกตัวของสารประกอบไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide, ROOH) เป็นอนุมูลอิสระ (Free radical) ทำให้สายโซ่พอลิเมอร์เกิดการแตกหักและสูญเสียสมบัติเชิงกลรวดเร็วยิ่งขึ้น

#### *กลไกที่ 4 การย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytic Degradation)*

การย่อยสลายของพอลิเมอร์ที่มีหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์ เช่น แป้ง พอลิเอสเทอร์ พอลิแอนไฮดริค พอลิคาร์บอเนต และพอลิยูรีเทน ผ่านปฏิกิริยาก่อให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ใช้คะตะลิสต์ (Catalytic hydrolysis) และไม่ใช้คะตะลิสต์ (Non-Catalytic Hydrolysis) ซึ่งประเภทแรกยังแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์เร่งให้เกิดการย่อยสลาย (External Catalytic Degradation) และแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์เอง ในการเร่งให้เกิดการย่อยสลาย (Internal catalytic degradation) โดยคะตะลิสต์จากภายนอกมี 2 ชนิด คือ คะตะลิสต์ที่เป็นเอนไซม์ต่าง ๆ เช่น Depolymerase lipase esterase และ glycohydrolase ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางชีวภาพ และคะตะลิสต์ที่ไม่ใช่เอนไซม์ (Non-enzyme) เช่น โลหะแอลคาไลด์ (alkaline metal) ต่าง (base) และกรด (acid) ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ในกรณีนี้จัดเป็นการย่อยสลายทางเคมี สำหรับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสแบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายในโมเลกุลของพอลิเมอร์นั้นใช้หมู่คาร์บอกซิล (Carboxyl Group) ของหมู่เอสเทอร์ หรือเอไมด์บริเวณปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ในการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส

#### *กลไกที่ 5 การย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation)*

การย่อยสลายของพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากขนาดของสายพอลิเมอร์ยังมีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นตอนแรกของการย่อยสลายจึงเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดได้ทั้งแบบใช้ endo-enzyme หรือ เอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะภายในสายโซ่พอลิเมอร์อย่างไม่เป็นระเบียบ และแบบ exo-enzyme หรือเอนไซม์ที่ทำให้เกิดการแตกหักของพันธะที่ละหน่วยจากหน่วยซ้ำที่เล็กที่สุดที่อยู่ด้านปลายของสายโซ่พอลิเมอร์ เมื่อพอลิเมอร์แตกตัวจนมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ และเกิดการย่อยสลายต่อในขั้นตอนที่ 2 ได้ผลิตภัณฑ์ในขั้นสุดท้าย (ultimate

biodegradation) คือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่เสถียรในธรรมชาติ (Mineralization) เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน น้ำ เกลือ แร่ธาตุต่าง ๆ และมวลชีวภาพ (biomass)

### 2.3.2 กระบวนการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ

กระบวนการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ เกิดขึ้นโดยขั้นแรกจุลินทรีย์จะเจริญและสร้างโคโลนีบนพื้นผิวของพลาสติก และผลิตเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ซึ่งเอนไซม์จะไปจับกับพอลิเมอร์ และเร่งให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกค्लीเวจ (hydrolytic cleavage) ทำให้พอลิเมอร์มีขนาดและน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลง ปรากฏในรูปของไดเมอร์ (dimer) และมอนอเมอร์ (monomer) ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ คือ พลังงานและสารประกอบ ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน กรดแลคติก แร่ธาตุต่าง ๆ มวลชีวภาพ และน้ำ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อระบบนิเวศโดยรอบ เนื่องจากผลิตภัณฑ์เหล่านี้เป็นปัจจัยในการดำรงชีวิตและเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ โดยความแตกต่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพขึ้นอยู่กับรูปแบบของกลไกการย่อยสลาย

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติก

การย่อยสลายทางชีวภาพอย่างสมบูรณ์ของพลาสติกชีวภาพขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ซึ่งส่งผลต่อศักยภาพในการย่อยสลายและความเร็วในการย่อยสลาย โดยปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณา ได้แก่ โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ ชนิดของจุลินทรีย์ และสภาวะแวดล้อม (ชนาวดี ลี้จากภัย, 2555) ดังต่อไปนี้

#### 1) โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพจะมีโครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพหรือเอื้อต่อการทำงานของจุลินทรีย์ โดยพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพแต่ละประเภทมีผลต่อความสามารถในการทำงานของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่มักจะพบว่าไฮเทอโรอะตอม (hetero atom) เช่น อะตอมของธาตุดอกซิเจน หรือไนโตรเจนอยู่บนโครงสร้างหลักของสายโซ่พอลิเมอร์ หรือมีพันธะอีเทอร์ เอสเทอร์ หรือเอไมด์ ง่ายต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์ ส่งผลให้น้ำหนักโมเลกุลลดลงเรื่อย ๆ และทำให้ละลายน้ำได้ดี สามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ และยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ เช่น พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นกิ่งก้านจะย่อยสลายได้ช้ากว่า พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง เนื่องจากกิ่งก้านจะไปกีดขวางการเข้าสัมผัสบริเวณพื้นผิวพลาสติกของเอนไซม์และจุลินทรีย์ จากงานวิจัยของ (Tokiwa และ Suzuki, 1978) พบว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะย่อยสลายได้ง่าย เนื่องจากถูก

ส่งผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ง่ายกว่าพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ยิ่งไปกว่านั้น คุณสมบัติความเป็นผลึกของพอลิเมอร์จะส่งผลโดยตรงต่ออัตราการย่อยสลาย ซึ่งพบว่าอัตราการย่อยสลายจะลดลงตามความเป็นผลึกที่เพิ่มขึ้น (Tsuji และ Miyauchi, 2001)

## 2) ชนิดของจุลินทรีย์

ในธรรมชาติประกอบไปด้วยจุลินทรีย์หลากหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะสามารถสังเคราะห์เอนไซม์ที่มีความจำเพาะและเหมาะสมต่อการย่อยสลายพอลิเมอร์ประเภทใดประเภทหนึ่งโดยเฉพาะ การย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิเมอร์หรือพลาสติกชีวภาพไม่จำเป็นต้องเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดเดียวกัน สำหรับพอลิเมอร์ในธรรมชาติ เช่น พอลิแซ็กคาไรด์ และโปรตีน เป็นต้น จะเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์หรือพลาสติกเกิดจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลากหลายสายพันธุ์ ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่มีจุลินทรีย์การย่อยสลายทางชีวภาพแทบจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้เลย

## 3) สภาวะแวดล้อม

สภาวะแวดล้อม เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่ต้องพิจารณาสำหรับการเกิดกระบวนการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ผู้ย่อยสลาย ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพและความเร็วในการย่อยสลาย หากมีสภาวะแวดล้อมเหมาะสมกับการเจริญของจุลินทรีย์จะทำให้เกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็ว ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีรายละเอียด ดังนี้

### อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อทั้งกระบวนการทางเคมี ทางกายภาพหรือกิจกรรมของจุลินทรีย์ ถ้าในดินมีอุณหภูมิที่เหมาะสมจะส่งผลให้กระบวนการต่าง ๆ ดังกล่าวเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะช่วยเร่งอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพได้มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงอุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส จัดเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่พบได้ทั่วไปในธรรมชาติ

### ปริมาณออกซิเจน

ปริมาณออกซิเจนมีความสำคัญในการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน และจำเป็นสำหรับการย่อยสลายทางชีวภาพโดยจุลินทรีย์ หากการย่อยสลายเป็นแบบไม่ใช้ออกซิเจน กระบวนการย่อยสลายจะเกิดขึ้นช้าและเกิดกลิ่นเหม็น แต่ถ้าเป็นการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนจะทำให้การสร้างพลังงานมีประสิทธิภาพที่สุด ทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นได้รวดเร็วและสมบูรณ์ ดังนั้นสภาพการ

ระบายอากาศของดินจึงมีผลกระทบต่อกิจกรรมการย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยตรง ในดินที่อยู่ในสภาพขาดอากาศหรือน้ำขัง อัตราการย่อยสลายจะลดลงอย่างมากและเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ส่วนใหญ่จะเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และก๊าซมีเทน เป็นผลิตภัณฑ์

#### *ความชื้น*

น้ำและความชื้นมีส่วนช่วยในการเกิดการย่อยสลายผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและเป็นปัจจัยสำคัญของการย่อยสลายทางชีวภาพ น้ำและความชื้นมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ โดยช่วยละลายธาตุอาหารที่อยู่ในดิน ช่วยในการเคลื่อนที่ อีกทั้งยังเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยให้กับจุลินทรีย์ ดังนั้นปริมาณความชื้นในดินจึงส่งผลต่ออัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ หากดินมีความชื้นสูงเกินไป อัตราการย่อยสลายจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากขาดออกซิเจน และถ้าความชื้นของดินต่ำกว่าระดับที่เหมาะสม อัตราการย่อยสลายจะค่อย ๆ ลดลง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการทนสภาพแห้งแล้งของจุลินทรีย์ด้วย ในการทำคอมโพสต์ความชื้นที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายทางชีวภาพอย่างรวดเร็วที่ 45-55% แต่ถ้ากองคอมโพสต์แห้งเกินไป การย่อยสลายจะไม่มีประสิทธิภาพเนื่องจากจุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญและเพิ่มจำนวนได้ ในทางกลับกันหากกองคอมโพสต์มีน้ำมากเกินไปจะเกิดกลิ่นเหม็นจากการหมักแบบไร้ออกซิเจนได้เช่นกัน

#### *ขนาดวัตถุอินทรีย์ (particle size)*

ขนาดวัตถุอินทรีย์ยิ่งเล็กจะทำให้กระบวนการย่อยสลายเกิดเร็วขึ้น เนื่องจากมีพื้นที่ผิวที่จะทำให้จุลินทรีย์เข้าไปเกาะและทำการย่อยสลายได้มากขึ้น แต่ไม่ควรให้อัดแน่นเกินไป

#### *ความเป็นกรด-ด่าง (pH)*

โดยทั่วไปแล้วเมื่อ pH เป็นกลาง การสลายตัวจะเกิดขึ้นได้รวดเร็ว ดังนั้นการปรับ pH ของดินให้เป็นกลางจึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการสลายตัวของสารอินทรีย์ในดินไปด้วย ส่วนในช่วง pH ที่เป็นกรดค่อนข้างมาก กิจกรรมของแบคทีเรียส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในดินจะลดลง มีแต่เชื้อราที่สามารถทนอยู่ได้ จึงทำให้กิจกรรมการย่อยสลายที่เกิดขึ้นในดินเกิดจากเชื้อราเป็นส่วนใหญ่

#### *อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C: N ratio)*

จุลินทรีย์นำธาตุที่ได้จากสารอินทรีย์ไปใช้ในสร้างสารประกอบต่าง ๆ ของเซลล์ โดยธาตุคาร์บอนจะถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์สารประกอบที่เป็นโครงสร้างหลักของเซลล์ ส่วนธาตุไนโตรเจนซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของโปรตีน กรดอะมิโน และกรดนิวคลีอิกที่มีอยู่ปริมาณมากใน

เซลล์ของจุลินทรีย์ อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนจึงเป็นปัจจัยบ่งชี้ว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์นั้นจะมีธาตุคาร์บอนและไนโตรเจนเพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์และสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนที่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 20:1 ถึง 30:1

### 2.3.4 เทคนิคและวิธีพื้นฐานที่ใช้ในการทดสอบการย่อยสลาย

การพัฒนาวิธีการทดสอบให้ได้ตามมาตรฐานและเป็นที่ยอมรับ เป็นสิ่งสำคัญยิ่งต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ เนื่องจากการยืนยันว่าผลิตภัณฑ์หรือพลาสติกสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยมีการทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการประเมินความปลอดภัยระหว่างการใช้งานและการทิ้ง วิธีการทดสอบการย่อยสลายและความเป็นพิษภายหลังการย่อยสลายต่อระบบนิเวศและกำหนดเกณฑ์ทั่วไปสำหรับการใช้งานด้านต่าง ๆ รวมถึงการจัดการให้มีระบบการจัดการที่เหมาะสมสำหรับการจัดการขยะพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกย่อยสลายได้ให้ได้รับการยอมรับและมีการใช้งานอย่างกว้างขวางมากขึ้น

ปัจจุบันมีหลายองค์กรในระดับนานาชาติที่ทำการพัฒนามาตรฐานหรือดำเนินการทดสอบเพื่อประเมินการย่อยสลายพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ในดิน น้ำ ทะเล บ่อบำบัดน้ำเสีย และกองคอมโพสท์ ซึ่งองค์กรเหล่านี้ (ดังตารางที่ 2.4) เป็นองค์กรที่ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง

ตารางที่ 2.4 รายชื่อองค์กรที่ทำงานด้านมาตรฐานพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

ชื่อองค์กร/สถาบัน	ประเทศที่ใช้
ASTM (American Society for Testing and Materials)	สหรัฐอเมริกาและแคนาดา
CEN (Comite Europeen de Normalization หรือ European Committee for Standardization)	ยุโรป ไอร์แลนด์ นอร์เวย์ สวีตเซอร์แลนด์ และสาธารณรัฐเช็ก
DIN (Deutsches Institut Fur Normung eV)	เยอรมัน
ISO (International for Standardization)	นานาชาติ
JIS (Japanese Institute for Standardization)	ญี่ปุ่น

ที่มา : ธนาวดี ลีจากภัย (2555)

มาตรฐานการทดสอบแบบต่าง ๆ ได้ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีมาตรฐานที่ได้การยอมรับอย่างแพร่หลาย การเลือกวิธีการทดสอบการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิเมอร์หรือ

พลาสติกใด ๆ ก็ตาม ควรคำนึงถึงสภาวะการทดสอบที่มีความถูกต้องใกล้เคียงกับการที่สภาวะแวดล้อมที่พลาสติกชนิดนั้นภายหลังการใช้งานมากที่สุด เนื่องจากพอลิเมอร์หรือพลาสติกชนิดหนึ่ง อาจเกิดการย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วในสภาวะหนึ่ง แต่เกิดการย่อยสลายได้ช้าลงหรือไม่เกิดการย่อยสลายหากอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ต่างออกไป ซึ่งเทคนิคและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ศึกษาและติดตามการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของพอลิเมอร์หรือพลาสติกเบื้องต้นมีหลายวิธี ดังนี้

### 1) การวัดการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้

การวัดการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตเห็น เช่น ความขรุขระของพื้นผิวพลาสติก การเกิดรูหรือรอยฉีกขาด มีการแตกหักหรือแยกออกเป็นชิ้น ๆ การเปลี่ยนแปลงของสี และการเกิดไปโอฟิล์มที่ผิวของพลาสติก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะส่งผลต่อสมบัติทางทางเคมี ทางกายภาพ และทางกลของพอลิเมอร์หรือพลาสติก สามารถศึกษาได้โดยเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ เช่น เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และ Transmission Electron Microscope (TEM) ในการศึกษาลักษณะพื้นผิว เครื่อง Universal Tester ใช้ศึกษาสมบัติทางกายภาพ เครื่อง Differential Scanning Colorimeter (DSC) และเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) ใช้สำหรับศึกษาสมบัติทางความร้อน เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) และ X-Ray Diffraction (XRD) ใช้เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดหมู่ฟังก์ชันในโมเลกุลของพอลิเมอร์และศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลึก ตามลำดับ

### 2) การวัดค่าน้ำหนักที่หายไป

การวัดน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์เป็นวิธีการที่ง่ายและรวดเร็ว แต่ไม่ค่อยถูกต้อง โดยเฉพาะเมื่อพอลิเมอร์ถูกเก็บไว้กับจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดสอบเป็นเวลานาน และมีกลุ่มจุลินทรีย์สะสมอยู่ในเนื้อของพอลิเมอร์ เป็นสาเหตุทำให้ค่าน้ำหนักที่วัดได้มีค่าสูงเกินจริง วิธีนี้ไม่เหมาะสมกับพอลิเมอร์ที่สามารถดูดน้ำได้ โดยเฉพาะกลุ่มที่มีแปงเป็นองค์ประกอบ สิ่งที่ต้องให้ความสำคัญคือ การย่อยสลายมักจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของพอลิเมอร์ น้ำหนักที่หายไปจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพื้นที่ผิว ดังนั้นเพื่อความถูกต้องในการทดลอง จึงควรรายงานผลของอัตราส่วนของน้ำหนักพอลิเมอร์ที่หายไปต่อพื้นที่ผิวของพอลิเมอร์ที่ทดสอบมากกว่าหาค่าน้ำหนักที่หายไปของพอลิเมอร์เท่านั้น

### 3) การวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุล

การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถศึกษาได้โดยใช้เครื่อง Size Exclusion Chromatography (SEC) และเครื่อง Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization (MALDI) ในขณะที่ชนิดและปริมาณการเกิดสารประกอบขนาดเล็กที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถศึกษาได้โดยเทคนิคและเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์อื่น ๆ เช่น เครื่อง Nuclear Magnetic



Resonance (NMR) เครื่อง Gas Chromatography (GC) และเครื่อง Liquid Chromatography (LC) หรือใช้เครื่อง GC ที่ต่อเข้ากับเครื่อง Mass Spectrometry (GC-MS) ซึ่งวิธีหลังนี้ต้องผ่านการสกัดแยกสารโมเลกุลเล็กออกก่อน

4) การวัดปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือวัดปริมาณการใช้ก๊าซออกซิเจน ( $CO_2$  evolution/  $O_2$  consumption)

ในสภาวะที่มีอากาศ จุลินทรีย์จะนำก๊าซออกซิเจนไปใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมและปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักออกมา การวัดปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณการใช้ก๊าซออกซิเจนของจุลินทรีย์จัดเป็นตัวชี้วัดที่ดี เนื่องจากเป็นวิธีการวัดการย่อยสลายได้ทางชีวภาพโดยตรง (Hoffmann *et al.*, 1997) แต่ข้อเสียคือก๊าซออกซิเจนอาจถูกนำไปใช้ในกระบวนการอื่น ๆ ได้ เช่น nitrification หรือ chemical oxidation จึงต้องมีการศึกษาขั้นตอนและกลไกของการย่อยสลาย นอกจากนี้คาร์บอนในพอลิเมอร์ไม่ได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด บางส่วนกลายเป็นของเสีย (wastes) ดังนั้นการทดลองจึงควรทำในระยะเวลาที่จำกัดเพราะหากทิ้งไว้เป็นเวลานาน ของเสียเหล่านี้จะสลายได้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย

5) การติดฉลากด้วยธาตุไอโซโทปกัมมันตรังสี (radiolabeling)

การทดสอบจะใช้พอลิเมอร์ที่ติดธาตุไอโซโทปกัมมันตรังสี (radiolabelled polymer) ที่มี  $^{14}C$  เป็นวัสดุสำหรับการทดสอบ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการทดสอบจะทำการคำนวณปริมาณคาร์บอน  $^{17}$  ในพอลิเมอร์เทียบกับผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนในของเสีย แต่วัสดุทดสอบมักจะมีราคาแพงทำให้เป็นวิธีที่มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง

6) การเกิดวงใสบนอาหารแข็ง (Clear-zone formation)

การทดสอบการเกิดวงใส (Clear-zone) เป็นวิธีการทดสอบขั้นต้น โดยจะใช้อาหารวุ้นแข็งที่มีพอลิเมอร์ที่ต้องการทดสอบผสมอยู่ เมื่อทำการเพาะเชื้อจุลินทรีย์ลงไปจะเกิดวงใสล้อมรอบโคโลนีเป็นการบ่งชี้ว่าจุลินทรีย์สายพันธุ์นั้นสามารถย่อยสลายพอลิเมอร์ได้ (Nishida and Tokiwa, 1993)

## 2.4 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนหรือการย่อยสลายแบบแอนแอโรบิก (Anaerobic digestion) ประกอบด้วยการด้วยการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและการเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยแบคทีเรียหลายชนิดมาช่วยกัน

ย่อยสลายสารปนเปื้อน วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการทำให้สารปนเปื้อนในน้ำเสียและกากตะกอนการเกิดการย่อยสลายจนได้สารที่คงที่และไม่ย่อยสลายต่อไป (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2557)

#### 2.4.1 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน มีขั้นตอนหลักคือ การย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็ก และเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile fatty acid: VFA) หลังจากนั้นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน โดยในแต่ละขั้นตอนต้องอาศัยจุลินทรีย์หลายกลุ่ม ซึ่งกระบวนการเหล่านี้สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

##### ขั้นตอนที่ 1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

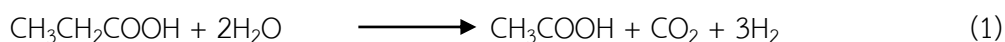
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสคือปฏิกิริยาที่ทำการเปลี่ยนสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ (สารคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน) ซึ่งมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่แบคทีเรียดูดซึมเข้าเซลล์ได้ ให้เป็นสารขนาดเล็ก (น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมัน) โดยแบคทีเรียกลุ่มที่เรียกว่า ไฮโดรไลซิงแบคทีเรียโดยผลิตเอนไซม์และปล่อยออกมาจากเซลล์แบคทีเรียกลุ่มดังกล่าวเพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส หลังจากนั้นสารอินทรีย์ขนาดเล็กจะสามารถถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์เมมเบรนของแบคทีเรียได้โดยตรง ในขั้นตอนนี้ยังไม่มีกำจัดซีโอติหรือบีโอติ เพราะเป็นเพียงการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลซับซ้อนให้เป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลอย่างง่าย

##### ขั้นตอนที่ 2 การเกิดกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Acidogenesis)

ปฏิกิริยาการเกิดกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile fatty acid: VFA) คือปฏิกิริยาการย่อยสลายโมเลกุลขนาดเล็ก (น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมัน) ด้วยกระบวนการหมักหรือ fermentation จะได้ผลผลิตส่วนใหญ่คือ กรดอินทรีย์ระเหยง่าย เช่น กรดอะซิติก กรดไพรูโพนิก กรดฟอร์มิก และกรดบิวทีริก จึงทำให้ปฏิกิริยานี้เรียกว่าเป็นปฏิกิริยาการเกิดกรดนั่นเอง นอกจากผลผลิตส่วนใหญ่ที่เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายแล้วนั้น ยังสามารถพบผลิตภัณฑ์ชนิดอื่น ๆ ปะปนออกมาโดยจะขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและสภาวะแวดล้อมของการเกิดปฏิกิริยา ยกตัวอย่างเช่น ก๊าซไฮโดรเจน กรดอะซิติก และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบคทีเรียกลุ่มที่มีความสำคัญในการสร้างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะอยู่ในกลุ่ม Fermentation bacteria หรือ Acid forming bacteria ซึ่งจะกล่าวในข้อหัวข้อต่อไป

### ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

ปฏิกิริยาการสร้างกรดอะซิติก คือ ปฏิกิริยาที่ย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากขั้นตอนการเกิดกรด โดยแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจนิก (แบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก) ซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญของการย่อยสลายในถังย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน เนื่องจากในขั้นตอนสุดท้ายซึ่งเป็นขั้นตอนที่ต่อจากขั้นตอนนี้จะสามารถใช้สารตั้งต้นที่มีปริมาณคาร์บอนจำนวน 1-2 คาร์บอนเท่านั้น (กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก เมทานอล และเมทิลามีน) และก๊าซไฮโดรเจนต้องการสภาวะที่มีความดันต่ำกว่า  $2 \times 10^{-3}$  บรรยากาศ และที่ย่อยสลายกรดบิวไทรกและกรดโพรไพโอนิกจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่มีความดันพาร์เซียลต่ำกว่า  $9 \times 10^{-3}$  บรรยากาศ ตามลำดับตั้งสมการที่ 1 และ 2



### ขั้นตอนที่ 4 การสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

ขั้นตอนนี้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนจะทำหน้าที่ย่อยสลายผลผลิต และทำการย่อยสารอินทรีย์ในขั้นตอนการสร้างกรด (Acidogenesis & Acetogenesis) อันได้แก่ กรดอินทรีย์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และอื่น ๆ โดยนำสารอินทรีย์เหล่านี้ไปเป็นอาหารและแหล่งพลังงาน การย่อยสลายกรดอินทรีย์ในขั้นตอนนี้จะเป็นการลดค่าซีโอทีในน้ำเสีย และเกิดก๊าซมีเทนขึ้น ประมาณว่าพลังงานเคมีที่อยู่ในรูปซีโอทีกว่าร้อยละ 90 จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปก๊าซมีเทน

ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดมาจากปฏิกิริยาชีวเคมีของการย่อยสลายกรดอะซิติก ดังสมการที่ 3

#### Acetate decarboxylation

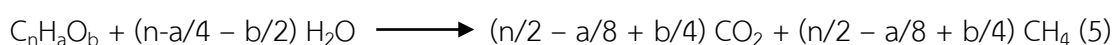


นอกจากนี้ก๊าซมีเทนยังมาจากปฏิกิริยาชีวเคมีระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วย ดังสมการที่ 4

#### Carbondioxide reduction



การย่อยสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนจนได้ก๊าซมีเทน ดังสมการที่ 5



จุลินทรีย์ที่สร้างมีก๊าซเทนสามารถเจริญได้ในช่วงพีเอชแคบ ๆ เท่านั้น และปัจจัยจากสิ่งแวดล้อมจะมีผลโดยตรงต่อการเจริญ โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น และสรุปได้ว่าก๊าซมีเทนเกิดจากขบวนการ Acetate decarboxylation และ Carbondioxide reduction โดยร้อยละ 70 ของก๊าซมีเทนเกิดขึ้นจากกระบวนการ Acetate decarboxylation โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methanogen)

#### 2.4.2 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน เกิดจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลากหลายชนิด เพื่อทำการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพ โดยสามารถแบ่งกลุ่มจุลินทรีย์ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ (สุภณชาติ นิมรัตน์, 2548) ดังนี้

##### แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria)

แบคทีเรียในกลุ่มนี้ ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ๆ ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย แอลกอฮอล์ แอมโมเนีย และซัลไฟด์ สามารถเจริญได้ดีในช่วงพีเอช 4.0 - 6.5 และส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียที่สามารถดำรงอยู่ได้ในสภาวะที่มีหรือไม่มีออกซิเจน (Facultative anaerobic bacteria) ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมได้ดี มีอัตราการเจริญสูง สามารถแบ่งกลุ่มย่อยได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

##### ก. อะซิโดเจนิคแบคทีเรีย (Acidogenic Bacteria)

อะซิโดเจนิคแบคทีเรียเป็นแบคทีเรียที่ย่อยสลายสารย่อยสลายสารจำพวกน้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน สามารถเจริญได้ทั้งที่มีและไม่มีออกซิเจนซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มใหญ่ที่สุดในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเนื่องจากสามารถใช้อาหารได้หลายชนิดและมีอัตราการเจริญเติบโตสูง

##### ข. อะซิโดเจนิคแบคทีเรีย (Acetogenic Bacteria)

แบคทีเรียชนิดนี้สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่าย และแอลกอฮอล์ได้เป็นอะซิเตท ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน แบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องการสภาวะที่มีความดันย่อยของไฮโดรเจน ( $H_2$  partial pressure) ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนที่สูงมีผลทำให้ปริมาณการเกิดกรดอะซิเตทลดลง โดยสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดไพรูโวนิก บิวทีริก และเอทานอลเพิ่มขึ้น ทำให้ระบบมีค่าพีเอชลดลงไม่เหมาะสมสำหรับ Acetogenic แต่ Methanogens สามารถดึงไฮโดรเจนไปใช้งานได้ ทำให้มีค่าความดันย่อยของไฮโดรเจนลดลง

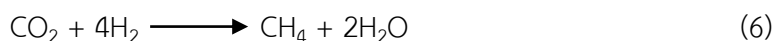
### จุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทน (*Methane producing archaea*)

แบคทีเรียกลุ่มที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน (*Methane producing archaea*) สามารถเจริญได้ดีในช่วงพีเอช 7.0-7.8 แบคทีเรียในกลุ่มนี้จัดเป็นพวกที่ต้องอยู่ในสภาวะไม่มีออกซิเจนเท่านั้น (Obligate anaerobic bacteria) มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมน้อยกว่าพวกแรก และมีอัตราการเติบโตช้ากว่า โดยเฉลี่ยต้องใช้เวลาประมาณ 3-5 วัน ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในการเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า

แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนสามารถใช้สารอาหารได้เพียงไม่กี่ชนิดแบคทีเรียกลุ่มนี้ สามารถแบ่งตามชนิดการใช้สารอาหารตั้งต้นได้ 2 กลุ่ม

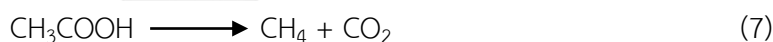
#### *Hydrogenotrophic Methanogens* หรือ *hydrogen utilizing chemolithotrophs*

เป็นกลุ่มที่สามารถเปลี่ยนไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซมีเทน ดังสมการที่ 6 ถือเป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่ลดความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนในระบบเพื่อให้เอื้อต่อแบคทีเรียกลุ่มอื่น ๆ



#### *Acetotrophic Methanogens* หรือ *acetate splitting bacteria*

เป็นกลุ่มที่ทำหน้าที่เปลี่ยนอะซิเตทเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังสมการที่ 7



ในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนนี้ แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมมาก และมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่น ๆ ดังนั้นการเจริญเติบโตและปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพและลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน

### 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพในสภาวะไร้ออกซิเจน

#### 1) ธาตุอาหาร

ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนอิสระต้องการธาตุอาหารในปริมาณไม่มาก จำนวนเซลล์ของแบคทีเรียที่เกิดขึ้นในระบบมีปริมาณน้อยกว่าระบบบำบัดแบบใช้ออกซิเจน แต่ธาตุอาหารก็ยังเป็นปัจจัยจำเป็นที่สำคัญต่อการเดินระบบ โดยอัตราส่วน C : N : P : S ในเซลล์ของแบคทีเรียมีค่าประมาณ 100 : 10 : 1 : 1 ถ้าอัตราส่วนสารอาหารในระบบน้อยกว่าที่ต้องการ จำเป็นต้องเติมธาตุอาหารลงไป ซึ่งสารที่นิยมใช้ในการเพิ่มธาตุอาหารเหล่านี้ คือ ยูเรีย และกรดฟอสฟอริก

นอกจากนี้ธาตุอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญของแบคทีเรียในกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนแต่ต้องการในปริมาณน้อย (trace element) ได้แก่ ซัลไฟด์ เหล็ก นิเกิล และโคบอลต์

## 2) สภาพไร้ออกซิเจน

ระบบบำบัดต้องอยู่ในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจนเพราะออกซิเจนอิสระไม่เอื้ออำนวยต่อสภาพการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ระบบบำบัดจึงต้องเป็นระบบปิด เช่น ในกรณีของถังหมัก ต้องมีวาล์วปิดเปิดอัตโนมัติสำหรับให้ก๊าซที่เกิดขึ้นดันออกสู่ภายนอกได้ แต่อากาศภายนอกเข้าไม่ได้ หรือในกรณีของบ่อหมัก (anaerobic lagoons) ต้องมีความลึกมากกว่า 2.50 เมตร เพื่อให้เกิดสภาพไร้ออกซิเจนอย่างแท้จริงที่ส่วนล่างของบ่อ

## 3) อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรีย โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีภายในเซลล์แบคทีเรียจะเพิ่มมากขึ้น สามารถแบ่งกลุ่มของแบคทีเรียตามช่วงอุณหภูมิที่แบคทีเรียทำงานได้ ดังนี้

ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) คือ ช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส

ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20-45 องศาเซลเซียส

ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 45 องศาเซลเซียส

ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนนี้ แบคทีเรียสามารถทำงานได้และสร้างก๊าซมีเทนได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม 2 ช่วง คือ ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) ที่อุณหภูมิ 30-37 องศาเซลเซียส และช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) ที่อุณหภูมิ 47-55 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าช่วงดังกล่าว แบคทีเรียทำงานได้ไม่ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดต่ำลง นอกจากนี้ข้อควรระวังของการเดินระบบในช่วงเทอร์โมฟิลิกคือ แบคทีเรียในกลุ่มนี้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้อยกว่าแบคทีเรียกลุ่มมีโซฟิลิก ทำให้มีความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของระบบสูง อีกทั้งการเดินระบบในช่วงอุณหภูมิสูงทำให้สิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์อีกด้วย

## 4) ค่าความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นปัจจัยสำคัญต่อระบบบำบัดทางชีวภาพ ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 5.2-6.2 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด สำหรับค่าในช่วง 6.6-7.4 เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน ถ้าน้ำมีความเป็นกรดหรือด่างมากไปจะส่งผลให้ระบบ

มีประสิทธิภาพการทำงานลดลง หรืออาจร้ายแรงถึงขั้นเป็นพิษทำให้ระบบล้มเหลวได้ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนนี้มักพบการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นประจำมีสาเหตุเกิดจากปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ถ้ามีการป้อนปริมาณสารอินทรีย์เข้าไปในระบบมากเกินไปจะทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดผลิตกรดไขมันระเหยง่ายออกมามากจนแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่สามารถใช้ได้ทันทั่วถึงเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย ภายในระบบส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างภายในระบบลดลง ดังนั้นในการควบคุมระบบแบบไร้ออกซิเจนจึงจำเป็นต้องมีการตรวจค่าความเป็นกรด-ด่างทุกวัน เพื่อควบคุมและป้องกันการล้มเหลวของระบบได้

#### 5) ค่าสภาพด่าง (Alkalinity : Alk)

ค่าสภาพด่างเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของระบบ ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง และบอกถึงความเสถียรของการเดินระบบ ถ้าระบบมีค่าความเป็นด่างสูง แสดงว่าระบบมีปริมาณบัฟเฟอร์สูง สามารถรักษาค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบให้คงตัวอยู่ได้นาน เนื่องจากระหว่างการเดินระบบค่าความเป็นกรด-ด่างจะเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเพิ่มขึ้นในระบบ โดยค่าสภาพด่างควรอยู่ในช่วง 1,000-3,000 มิลลิกรัมของ  $\text{CaCO}_3$ /ลิตร และค่าสภาพด่างในระบบการย่อยสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนไม่ควรต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัมของ  $\text{CaCO}_3$ /ลิตร เพื่อควบคุมให้ระบบทำงานได้ปกติ

#### 6) กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile fatty acid: VFA)

ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีความสำคัญในการตรวจสอบความเสถียรของระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน กรดอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทีริกและกรดโพลีโอนิก เป็นต้น เป็นผลผลิตของการย่อยสารอินทรีย์ของแบคทีเรียในกลุ่มผลิตกรด ถ้าพบว่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีปริมาณมาก (มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมของกรดอะซิติก/ ลิตร) มักเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบ ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 6.5 จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน หากยังไม่มีอาการแก้ไขจนค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำลงจนถึง 4.5 - 5.0 ก็จะทำให้ระบบเสียสมดุลและล้มเหลวได้ ในสภาวะปกติปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไม่ควรเกิน 2,000 มิลลิกรัมของกรดอะซิติก/ลิตร และในการเดินระบบควรควบคุมให้ค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อค่าความเป็นกรดต่างไม่ควรเกิน 0.3 - 0.4

#### 7) อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR)

อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ มีหน่วยเป็นน้ำหนักของซีโอดีที่อยู่ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดต่อปริมาตรของบ่อบำบัดต่อวัน ( $\text{kg COD/m}^3$  ต่อวัน) อัตราภาระการรับสารอินทรีย์มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด (Feeding rate) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด

ในการรักษาเสถียรภาพของระบบให้คงที่การเปลี่ยนอัตราการการรับสารอินทรีย์สามารถทำได้ 2 วิธีคือ

ก) ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด ซึ่งวิธีนี้จะมีผลต่อระยะเวลาการกักเก็บน้ำเสีย (Hydraulic retention time: HRT) ภายในระบบบำบัดด้วย

ข) การเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำเสีย ซึ่งวิธีนี้ค่อนข้างทำได้ยาก เนื่องจากน้ำทิ้งของโรงงานแต่ละประเภทมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน

ดังนั้นในทางปฏิบัติ การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดทำได้ง่ายกว่า โดยต้องมีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดให้สัมพันธ์กับระยะเวลาที่เหมาะสมในการสัมผัสกันระหว่างแบคทีเรียกับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เพื่อให้ระบบบำบัดสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

#### 8) สารพิษ (Toxic substance)

สารเคมีใด ๆ ที่เข้าสู่ระบบเมื่อมีความเข้มข้นถึงระดับหนึ่งแล้วมีผลให้ประสิทธิภาพหรือเสถียรภาพของระบบลดลงจัดเป็นสารพิษ (Toxic) ความเป็นพิษต่อระบบเกิดได้ตั้งแต่การยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ (Inhibition) จนถึงการทำลายจุลินทรีย์ และจะส่งผลให้ระบบล้มเหลว

ระบบการย่อยสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนได้แบ่งสารพิษที่มีผลต่อแบคทีเรียระดับความเข้มข้นของสารพิษที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน แสดงดังตารางที่ 2.5 เช่น พิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งมีผลต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน พิษของสารโลหะหนักชนิดต่าง ๆ พิษของแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) เป็นต้น สำหรับโลหะหนักบางชนิดเช่น นิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) นั้นจัดเป็นธาตุอาหาร (trace element) ที่จำเป็นต่อแบคทีเรียด้วย ซึ่งมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียมีความต้องการในปริมาณที่ต่ำมาก

**ตารางที่ 2.5** แสดงความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักที่มีผลต่อระบบย่อยสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน

สารพิษ	ความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Cu	1.0
Zn	5.0
$\text{Cr}^{6+}$	5.0
$\text{Cr}^{3+}$	2,000



สารพิษ	ความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)
Total chromium	5.0
Ni	2.0
Cd	0.02
S	100
SO <sup>2-</sup>	500
Ammonia	1,500
Na	3,500
K	2,500
Ca <sup>2+</sup>	2,500
Mg <sup>2+</sup>	1,000
Aerylonitrite	5.0
Benzene	50
CCl <sub>4</sub>	10
Chloroform	0.1
Pentachlorophenol	0.4
Cyanide	1.0

ที่มา : สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์ (2557)

## 2.5 การหมักร่วม (Co-digestion)

การหมักร่วม (Co-digestion) เป็นการนำสารอินทรีย์มากกว่าหนึ่งชนิดมาทำการย่อยสลายร่วมกัน (Wu, 2000) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากการหมักร่วมทำให้ได้สารอินทรีย์หรือธาตุอาหารที่ส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพในระบบเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายด้วยตัวเองได้ และช่วยปรับความชื้นให้เหมาะสมกับการย่อยสลายในระบบ

ในกระบวนการหมักร่วมสามารถนำของเสียหรือวัสดุตกค้างที่เป็นสารอินทรีย์จากภาคการเกษตร จำพวกของเสีย (wastes) หรือของเสียจากอุตสาหกรรมบางชนิด รวมไปถึงขยะอินทรีย์จากชุมชน มาใช้เป็นวัสดุในการหมักร่วมได้ (Bozano และคณะ, 2012) หลักพื้นฐานในการเลือกวัสดุในการหมักร่วมเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนคือ วัสดุหรือวัตถุดิบที่ใช้ต้องช่วยเพิ่มค่า C/N Ratio ให้สูงขึ้นกว่าการหมักด้วยวัตถุดิบเพียงชนิดเดียว ซึ่งค่า

C/N Ratio ช่วยยับยั้งการเปลี่ยนไนโตรเจนส่วนเกินไปเป็นแอมโมเนีย ซึ่งเป็นตัวยับยั้งการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบ โดยทั่วไปค่า C/N Ratio จะอยู่ในช่วง 8 – 23 ซึ่งการหมักร่วม (Co-digestion) มีทั้งข้อดีและข้อจำกัดหลายประการ ดังนี้ (Wu, 2000)

#### ข้อดีของการหมักร่วม

- ช่วยปรับเพิ่มสารอาหารและแร่ธาตุ และช่วยให้เกิดการย่อยสลายสมบูรณ์ขึ้น
- ทำให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสม และช่วยให้การวัสดุหมักไม่อัดแน่นจนเกินไป เช่น ของเสียที่มีความเข้มข้นสูง เมื่อผสมกับมูลวัวหรือกากตะกอน จะช่วยเจือจางความเข้มข้นของของเสียลงได้
- เพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ
- ช่วยลดของเสียที่ต้องนำไปบำบัด
- สามารถนำกากตะกอนที่ได้ไปใช้ในการบำรุงดิน (soil conditioner)
- นำวัสดุตกค้างหรือพีชของเสียจากภาคการเกษตร มาเปลี่ยนเป็นเป็นพลังงานทดแทนได้

#### ข้อจำกัดของการหมักร่วม

- เพิ่มค่า COD ในน้ำเสีย
- ต้องเพิ่มขั้นตอนในการเตรียมวัตถุดิบหรือปรับสภาพขั้นต้นก่อน
- ต้องเพิ่มการกวนผสม (mixing)
- มีความยุ่งยากในการเพิ่มขั้นตอนและเวลาในการเตรียมวัตถุดิบ อุปกรณ์
- ต้องมีการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม
- หากใช้พีชของเสียต้องดูความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ รวมถึงระยะการเพาะปลูกและค่าใช้จ่าย

### 2.5.1 วัสดุหมักร่วม

วัสดุที่สามารถนำมาหมักร่วมเพื่อเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพเป็นสารอินทรีย์ทุกชนิดที่ย่อยสลายได้ โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ ได้แก่ มูลสัตว์ ขยะจากชุมชน น้ำเสีย กากตะกอน และวัสดุเหลือทิ้งจากแปลงเกษตรและจากธรรมชาติ เป็นต้น

โดยในส่วนของงานวิจัยนี้สนใจวัสดุหมักร่วมขยะอินทรีย์ ได้แก่ ขยะเศษอาหาร (food waste) และขยะเศษผักสด ซึ่งได้มาจากโรงอาหารคณะวิศวกรรมจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและตลาดสดสามย่าน โดยรายละเอียดของวัสดุหมักร่วมมีดังนี้

#### *ขยะเศษอาหาร (food waste) และขยะเศษผักสด (Vegetable waste)*

ขยะเศษอาหาร (food waste) หมายถึง ส่วนที่เหลือทิ้งจากการประกอบอาหาร กระบวนการผลิตและการอุปโภค ประกอบไปด้วย เนื้อสัตว์ ข้าว ผลไม้ ผัก เป็นต้น ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นอินทรีย์วัตถุที่สามารถย่อยสลายเน่าเปื่อยได้ง่าย มีความชื้นสูง (moisture) ประมาณร้อยละ 75-78 เมื่อเกิดการบูดเน่าจะทำให้เกิดกลิ่นเหม็น เพราะมีส่วนประกอบของของแข็งระเหยง่ายสูงถึงร้อยละ 85-95 และขยะเศษผักสดก็จัดเป็นขยะเปียกซึ่งมีความชื้นสูง โดยส่วนทั่วไปจัดการขยะประเภทเศษอาหารและผักสดที่มีความชื้นปนอยู่มากกว่าร้อยละ 50 ส่วนใหญ่มักจะนำไปฝังกลบรวมกับของเสียอื่น เช่น กุ้งพลาสติก ไม้ เศษกระดาษ เป็นต้น โดยไม่ผ่านการคัดแยกออกมาก่อนทำให้เกิดปัญหากลิ่นเหม็นสร้างความรำคาญกับชุมชนโดยรอบ เป็นแหล่งเพาะแมลงและเชื้อโรค ดังนั้นปัจจุบันจึงมีเทคโนโลยีในการกำจัดขยะหลากหลายวิธี และวิธีที่สามารถทำได้คือการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) เนื่องจากขยะเศษอาหารเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถนำไปเป็นแหล่งอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในการหมักแบบไร้ออกซิเจนได้ ซึ่งจะได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ และสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตพลังงานได้ โดยข้อดีของวิธีนี้คือ เหมาะสมกับขยะที่มีสารอินทรีย์สูงและกากที่เหลือในการย่อยสลายสามารถใช้ประโยชน์เป็นวัสดุปรับปรุงดินได้ (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2551)

## 2.6 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ประมาณร้อยละ 50-70 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ประมาณร้อยละ 20-50 มีก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) แอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และมีความชื้นปนอยู่เล็กน้อย คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่ถูกกำหนดโดยก๊าซมีเทนซึ่งเป็นส่วนประกอบหลัก ก๊าซชีวภาพมีค่าของความร้อนประมาณ 4,500-5,000 กิโลแคลอรี/ม<sup>3</sup> (STP) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซมีเทนที่ผสมอยู่ เนื่องจากก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่ให้พลังงานความร้อนสูงจึงสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ ทั้งนี้ปริมาณและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพขึ้นกับวัตถุดิบหรือสารตั้งต้น และสภาวะที่ใช้ในการหมัก และการนำก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้ ต้องมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนมากกว่าร้อยละ 50

ตารางที่ 2.6 แสดงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบ	ความเข้มข้น
CH <sub>4</sub>	50 - 70 %(v/v)
CO <sub>2</sub>	20 - 50 %(v/v)
H <sub>2</sub> O (vapor)	0 - 10 %(v/v)
N <sub>2</sub>	0 - 5 %(v/v)
O <sub>2</sub>	0 - 2 %(v/v)
NH <sub>3</sub>	0 - 1 %(v/v)
H <sub>2</sub> S	50 - 10,000 ppm

ที่มา : สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย (2553)

ตารางที่ 2.7 แสดงสมบัติของก๊าซบางชนิดในก๊าซชีวภาพ

สมบัติต่าง ๆ	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
มวลโมเลกุล [กก./โมล]	16.04	44.01	34.08
ความหนาแน่น (@ 1.013 บาร์สมมบูรณ์, 15°ซ ) [กก./ลบ.ม.]	0.68	1.87	1.45
Critical Temperature [°ซ]	-82.7	31	100
Sp. Gr. (เทียบกับอากาศ = 1) (@ 1.013 บาร์สมมบูรณ์ , 15°ซ )	0.55	1.521	1.189
Specific volume (@ 1.013 บาร์สมมบูรณ์, 21°ซ ) [ลบ.ม./กก.]	1.48	0.547	0.699
Heat capacity at constant pressure (Cp) (@ 1.013 บาร์สมมบูรณ์, 25°ซ ) [ กิโลจูล/(โมล.เคลวิน)]	0.035	0.037	0.034
Heat capacity at constant volume (Cv) (@ 1.013 บาร์สมมบูรณ์, 25°ซ ) [ กิโลจูล/(โมล.เคลวิน)]	0.027	0.028	-

ที่มา : สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย (2553)

## 2.7 หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology; RSM)

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology , RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา

โดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นกับหลายตัวแปร และต้องการที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้ ตัวอย่างเช่น สมมติว่าวิศวกรเคมีต้องการหาระดับของอุณหภูมิ ( $x_1$ ) และความดัน ( $x_2$ ) ที่จะทำให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิและความดัน (ปารเมศ ชูติมา, 2545) กล่าวคือ

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (8)$$

โดยที่  $\varepsilon$  คือความผิดพลาดของผลตอบ  $y$  ที่เป็นผลมาจากการทดลอง หากกำหนดว่า  $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$  จะสามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (9)$$

ซึ่งจะเรียกว่า พื้นผิวดตอบสนอง (Response Surface)

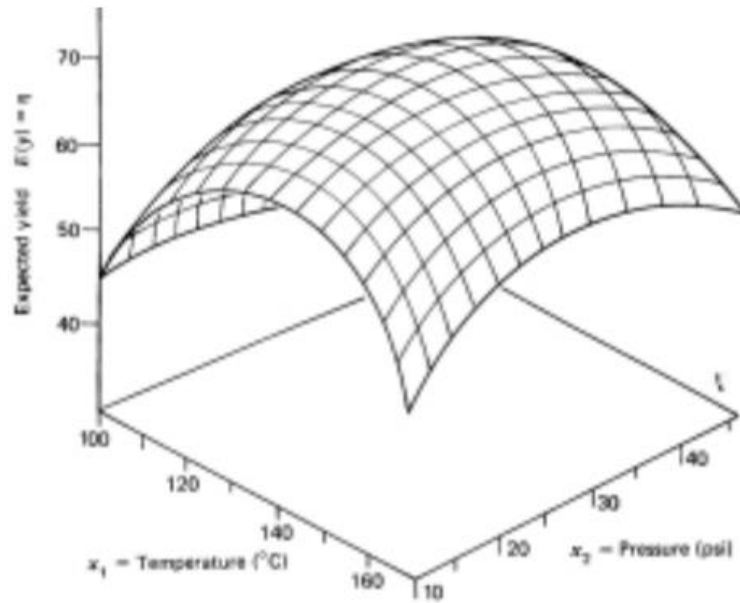
โดยทั่วไปการแสดงพื้นผิวดตอบสนองในกราฟฟิก ตัวอย่างดังภาพที่ 3.10 โดยที่  $\eta$  จะถูกพล็อตกับระดับของ  $x_1$  และ  $x_2$  เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวดตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ส่วนใหญ่จะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวดตอบสนองดังแสดงในรูปตัวอย่างในภาพที่ 3.11 ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบสนองที่จะถูกวาดอยู่ในระนาบ  $x_1$  และ  $x_2$  เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวดตอบสนองที่เท่ากันค่าหนึ่ง

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวดตอบสนองส่วนมาก จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ ดังนั้นในขั้นตอนแรกก็คือ การหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง  $y$  และเซตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำ ๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

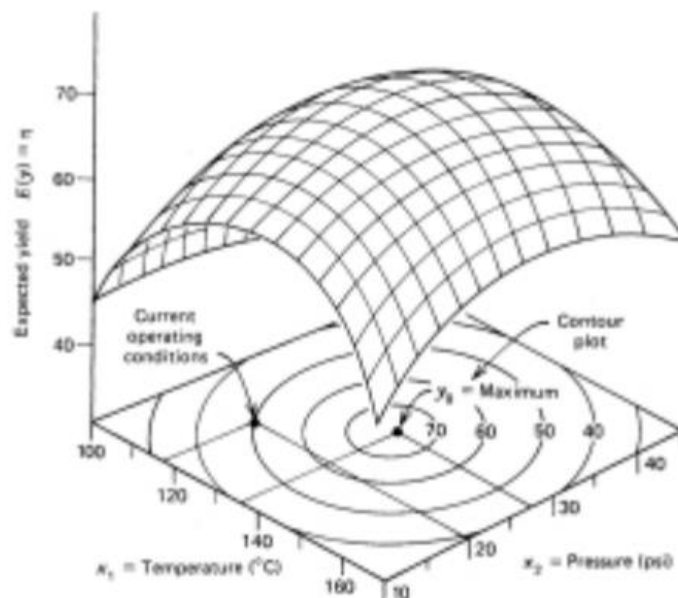
$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (10)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ จะต้องใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (11)$$



ภาพที่ 2.7 พื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติ  
ที่มา : ปารเมศ ชูติมา (2545)



ภาพที่ 2.8 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง  
ที่มา : ปารเมศ ชูติมา (2545)

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นที่ผิวตอบสนองส่วนมากจะใช้แบบจำลองหนึ่งในสองแบบที่กล่าวนี้ แบบจำลองพหุนามที่กล่าวมาไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่สามารถจำกัดพื้นที่ผิวที่สนใจอยู่ให้มีขนาดค่อนข้างเล็กแล้ว แบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดีพอสมควร

วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Squar Method) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบได้ดีเพียงพอ ดังนั้นการวิเคราะห์พื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นนี้จะสามารถประมาณได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริง พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลองสามารถถูกประมาณได้เป็นอย่างดี หากทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design)

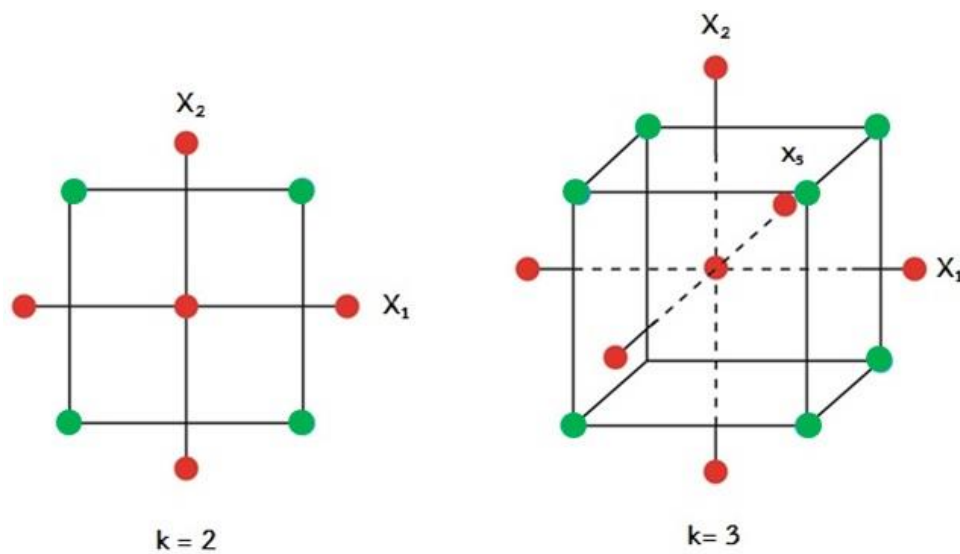
การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองเป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน บ่อยครั้งที่จุดบนพื้นผิวตอบสนองที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด โดยวัตถุประสงค์ในการออกแบบคือการนำการทดลองไปตามแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุดและอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อที่จะไปใกล้จุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด และเมื่ออาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้ว จะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อน เช่น แบบจำลองกำลังสอง เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ เพื่อให้ได้จุดที่ดีที่สุด สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองก็คือ การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดของระบบหรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยที่ก่อให้เกิดการทำงานอย่างน่าพอใจ

## 2.7 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) (ปารเมศ ชูติมา, 2545)

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง เป็นวิธีหนึ่งในการหาพื้นผิวตอบสนองที่นิยมใช้ในการหากระบวนการที่เหมาะสม สำหรับใช้ในการศึกษาหรือสร้างตัวแบบในลักษณะของโพลีโนเมียลดีกรี (Second-Order or Quadratic Model) มีความยืดหยุ่นในการใช้งานและมีประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับแผนการทดลองอื่นที่ใช้ในการศึกษาตัวแบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 ในการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง สามารถเลือกใช้ได้ทั้งส่วนที่เป็นการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ ( $2^k$  Full Factorial) และการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วนโครงสร้างซับซ้อนสำหรับ Resolution III หรือ IV ซึ่งสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับการทดลอง Fraction Factorial  $2^{k-p}$  และสามารถทดลองได้เป็นส่วน ๆ ตามลำดับคือ ทำการทดลองส่วนของ Factorial (Factorial Portion) และจุดศูนย์กลาง (Central Point) ก่อน จากนั้นทำการสร้างสมการตัวแปรแบบเชิงเส้นตรงสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ และพยากรณ์ส่วนกลางของจุดศูนย์กลาง (Central Point) ถ้าสมการใน

รูปเส้นตรงไม่เหมาะสม จึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนของจุดแกน (Axial Portion) จะได้สมการโพลีโนเมียลดีกรี 2 หรือ Quadratic Model

โดยทั่วไปส่วนประสมกลางจะประกอบด้วย  $2^k$  แฟกทอเรียลที่มี  $n_f$  รัน ซึ่ง  $2k$  รันในแนวแกนหรือรูปดาว และ  $n_c$  รันที่จุดศูนย์กลาง ดังภาพที่ 2.9 แสดงส่วนประสมกลางสำหรับ  $k = 2$  และ  $k = 3$  ปัจจัย



ภาพที่ 2.9 แสดงการออกแบบประสมส่วนกลางสำหรับ  $k = 2$  และ  $k = 3$  ปัจจัย

ที่มา : ปารเมศ ชูติมา (2545)

การพัฒนาของ CCD ในทางปฏิบัติส่วนมากจะเกิดขึ้นจากการทดลองแบบเป็นอันดับ เช่น การออกแบบ  $2^k$  ถูกนำมาใช้เพื่อพิตแบบจำลองที่หนึ่ง แล้วพบว่า แบบจำลองนี้ไม่เหมาะสมที่จะใช้กับข้อมูลนี้ ดังนั้นจึงได้เพิ่มในแนวแกน เพื่อให้สามารถใส่พจน์ควอดรากลในแบบจำลองได้ CCD เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากในการพิตแบบจำลองอันดับที่สอง มีพารามิเตอร์ 2 ตัว ในการออกแบบที่จะต้องถูกกำหนด นั่นคือ ระยะทาง  $\alpha$  ของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบ และจำนวนของจุดศูนย์กลาง  $n_c$  ความสำคัญของแบบจำลองอันดับที่สอง จะต้องสามารถพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณที่สนใจอยู่ แบบจำลองที่ดีจะต้องมีความเป็นเหตุเป็นผล และมีความแปรปรวนที่มีเสถียรภาพของผลตอบที่จุด  $x$  ซึ่งอยู่ในความสนใจ ความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์ที่บางจุด  $x$  คือ

$$V[\hat{y}(x)] = \sigma^2 x'(X'x)x \quad (12)$$



การออกแบบพื้นผิวตอบอันดับที่สองควรจะสามารถในการหมุน หมายความว่า  $V[\hat{y}(x)]$  คือ จุด  $x$  ทุกจุดที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน นั่นคือค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าคงตัวบนรูปทรงกลม

ความสามารถในการหมุนเป็นพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการเลือกการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง เพราะว่าวัตถุประสงค์ของ RSM คือ การหาค่าที่ดีที่สุด ซึ่งจะไม่เน้นว่าตำแหน่งใดเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุด ก่อนที่จะรันการทดลอง ดังนั้นจะมีเหตุผลที่ดีกว่าที่จะใช้การออกแบบที่ทำให้เกิดตัวประมาณที่มีความเที่ยงตรงเท่ากันในทุกทิศทาง ความสามารถในการหมุนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของรูปทรงกลม (Sphere) สำหรับบริเวณของทรงกลมที่เราสนใจนั้น ทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับ  $\alpha$  สำหรับการพยากรณ์ความแปรปรวนของการออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) ซึ่งกำหนดให้  $\alpha = \sqrt{k}$  การออกแบบเช่นนี้ เรียกว่า CCD รูปทรงกลม (Spherical CCD) ซึ่งกำหนดให้ทุกจุดที่อยู่ในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล และการออกแบบในแนวแกน ให้อยู่บนพื้นผิวของรูปทรงกลมซึ่งมีรัศมี  $\alpha$  การเลือก  $\alpha$  ใน CCD จะถูกกำหนดโดยบริเวณที่เราสนใจ เมื่อบริเวณนี้เป็นรูปทรงกลม การออกแบบจะต้องรวมเอาจุดศูนย์กลางของการรันเข้าไว้ด้วย ทั้งนี้เพื่อจะทำให้ค่าความแปรปรวนของผลตอบสนองที่พยากรณ์ได้มีเสถียรภาพอย่างเป็นที่ยอมรับได้

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

*งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายพลาสติกสลายตัวได้ทางชีวภาพ*

Itävaara และคณะ (2002) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการย่อยสลายฟิล์มพอลิแลคไทด์ชนิด PLLA (Poly L-lactide acid) ด้วยการหมักแบบมีออกซิเจน (Aerobic) และการหมักแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic) ที่อุณหภูมิ 37 และ 52 องศาเซลเซียส ทำการตัดฟิล์ม PLLA ขนาด  $2 \times 2$  ซม.<sup>2</sup> ทดสอบการย่อยสลายในขวดทดลองขนาด 500 มิลลิลิตร พบว่าการหมักที่อุณหภูมิสูง PLLA ถูกย่อยสลายได้เร็วขึ้น โดยการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 52 องศาเซลเซียส PLLA ย่อยสลายได้ร้อยละ 60 ภายใน 40 วัน ซึ่งเร็วกว่าการย่อยแบบมีออกซิเจนที่ระยะเวลาเดียวกัน นอกจากนี้ยังพบว่าที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส PLLA สามารถย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ให้ก๊าซมีเทน แต่ใช้ระยะเวลายาวนานถึง 100 วัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโครงสร้าง PLLA ที่เป็นผลึก มีความแข็งแรง จึงย่อยสลายได้ยาก

Yagi และคณะ (2009) ศึกษาการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพชนิด PLA ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนที่ 35 และ 55 องศาเซลเซียส ซึ่งมีค่าของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 2.24 และ 2.07 ตามลำดับ หัวเชื้อจุลชีพที่ใช้มีค่ามีร้อยละของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 1.11 และ 1.03 ตามลำดับ ในการทดลองใช้ตัวอย่าง PLA 10 กรัม ขนาด 125-250 ไมโครเมตร เตินระบบด้วยถังปฏิกรณ์ขนาด 1.5 ลิตร พร้อมติดตั้งระบบเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพและควบคุมอุณหภูมิ พบว่าที่อุณหภูมิ 55 องศา

เซลเซียส PLA ถูกย่อยสลายได้ร้อยละ 60 80 และถูกย่อยสลายได้สูงสุดถึงร้อยละ 90 ที่ระยะเวลา 30 40 และ 60 วัน ตามลำดับ โดยให้ก๊าซมีเทนสูงสุดร้อยละ 53.8 ภายในระยะเวลา 75 วัน

Yagi และคณะ (2010) ทำการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน โดยวิธี pre-incubation หัวเชื้อจุลินทรีย์ด้วยมูลวัวและขยะจำพวกเศษผักผลไม้ ทำการทดลองเปรียบเทียบระยะเวลาในการ pre-incubation ที่ 7 12 18 และ 40 วัน ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ตรวจวัดก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทน และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น พบว่าการทำ pre-incubation ในที่ 18 วัน ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดถึงร้อยละ 60 และ PLA ถูกย่อยสลายได้ดีที่สุด หลังจากนั้นในปี 2013 Yagi และคณะ ได้ทำการวิจัยสายพันธุ์จุลินทรีย์ย่อย PLA ที่อุณหภูมิสูงในสภาวะไร้ออกซิเจนได้ด้วยวิธี Denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE) ได้แก่ *Bacillus infernus* และ *Propionibacterium* sp.

ศิริวิมล สุขสวัสดิ์ (2556) ศึกษาการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคไทด์ (PLA) ด้วยแบคทีเรียและรา โดยศึกษาความสามารถของแอคติโนมัยซีสต์ 3 สายพันธุ์ ดังนี้ *Pseudonocardia alni* AS 4.1531T, *Saccharothrix* sp. MY1 และ *Amycolatopsis* sp. KMT1 และศึกษาการปรับสภาพขั้วตันพลาสติกชีวภาพชนิด PLA น้ำหนัก 50.0 มิลลิกรัม โดยวิธีการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟหรือ การนำไปผ่านน้ำยาล้างจาน หรือ การนำไปผ่านน้ำร้อน ซึ่ง PLA ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟนั้น พบว่า *Amycolatopsis* sp. KMT1 มีความสามารถในการย่อยสลายได้ดีที่สุด น้ำหนักแผ่นฟิล์มลดลงเหลือ  $0.8 \pm 0.4$  มิลลิกรัม (ร้อยละ 98.4) ขณะที่ PLA ที่ผ่านน้ำยาล้างจานนั้น *Saccharothrix* sp. MY1 สามารถย่อยสลายได้ดีที่สุด โดยน้ำหนักฟิล์มลดลงเหลือเพียง  $3.6 \pm 0.4$  มิลลิกรัม (ร้อยละ 92.9) และ PLA ที่ผ่านน้ำร้อน *Saccharothrix* sp. MY1 มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายได้ดีที่สุด พบว่าน้ำหนักฟิล์มพลาสติกลดลงเหลือเพียง  $33.0 \pm 5.7$  มิลลิกรัม (ร้อยละ 31.9) ดังนั้นจากงานวิจัยนี้จึงสรุปได้ว่าการปรับสภาพ PLA เบื้องต้นด้วยวิธีดังกล่าว สามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพของแบคทีเรียและราได้

สาธินี ศิริวัฒน์ (2553) ทำการวิจัยภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายทางชีวภาพของบรรจุภัณฑ์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดและเยื่อชานอ้อยและผลของการย่อยสลายต่อประชาคมแบคทีเรียในดินแบคทีเรียในดิน จากการทดลองแบบแฟคตอเรียล (Factorial Design) สำหรับ 3 ปัจจัย คือ บรรจุภัณฑ์ อุณหภูมิและปริมาณไนโตรเจน ระยะเวลาในการทดสอบ 30 วัน ตรวจวัดดัชนีการย่อยสลายทางชีวภาพของบรรจุภัณฑ์โดยการติดตามปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น พบว่าที่อุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียสและไม่เติมยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน มีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นสูงสุดสำหรับบรรจุภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิด เมื่อทำการศึกษาเป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่าน้ำหนักบรรจุภัณฑ์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดและเยื่อชานอ้อยลดลงร้อยละ 100 และ 96 ตามลำดับ และพบว่าการย่อยสลายทางชีวภาพไม่มีผลต่อความเป็นกรดต่างของดิน จากผลการศึกษาในงานวิจัยนี้สรุปได้ว่าการย่อยสลาย

ทางชีวภาพบรรจุภัณฑ์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดที่สภาวะควบคุมในห้องปฏิบัติการเกิดขึ้นเร็วกว่าการย่อยสลายในพื้นที่ฝังกลบจริงในสภาพธรรมชาติถึง 5 เท่า และยังพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะกำจัดบรรจุภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิด ด้วยวิธีฝังกลบแต่ต้องใช้เวลา นานกว่าการหมักที่อุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส

นาวิน เนสุสินธุ์ (2554) ทำการศึกษาการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพในดินจากบ่อฝังกลบขยะผสมกากตะกอนอัตราส่วนต่าง ๆ ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยทดสอบความสามารถในการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ 2 ชนิด คือ Poly(lactic acid; PLA) และ Poly(butylene-co-terephthalate; PBAT) พบว่า สภาวะที่เหมาะสม คือ ผสมกากตะกอนกับดินร้อยละ 30 ควบคุมอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และเติมน้ำ 45 มล. ติดตามผลการย่อยสลายทางชีวภาพจากน้ำหนักแห้งที่ลดลงของพลาสติกทดสอบ ตรวจวัดก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้น และศึกษาพื้นที่ผิวที่เปลี่ยนแปลงไป ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) จากการทดสอบพบว่าน้ำหนักแห้งพลาสติกลดลงเมื่อเวลาทดสอบเพิ่มขึ้น 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. ผลการทดลองบ่งชี้ว่า PLA สามารถย่อยสลายได้รวดเร็วกว่า PBAT ที่สภาวะควบคุมไร้ออกซิเจน

*งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มอัตราการย่อยสลายของพลาสติกสลายตัวได้ทางชีวภาพด้วยต่างและความร้อน*

Chauliac (2013) ทำการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของพอลิแลคติกแอซิดด้วยกระบวนการทางความร้อนและเคมี เพื่อให้ได้แอล-แลคติกแอซิด (L-lactic acid) และ ดี-แลคติกแอซิด (D-lactic acid) ที่มีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้น ในการทดลองใช้ตัวอย่างพลาสติกชีวภาพชนิด PLA รุ่น 4032D และรุ่น 3052D จากบริษัทเนเจอร์เวิร์ค ที่ใช้สำหรับการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์บรรจุอาหารขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตร ทำการให้เปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายโดยการแช่ PLA ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0-1 โมลาร์ เทียบกับน้ำ และเปรียบเทียบการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 และ 160 องศาเซลเซียส ในระยะเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าอัตราการย่อยสลายของ PLA กลายเป็นแลคติกแอซิดหรือ LA ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อนสูงกว่าเมื่อเทียบกับการแช่ในน้ำร่วมกับความร้อน จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเมื่อเทียบกับการน้ำ ซึ่งขนาดของอนุภาคก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลด้วย

Tsuiji และคณะ (2006) ศึกษาการเพิ่มอัตราการปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสพลาสติกชีวภาพชนิด PLA ด้วยการใช้ต่างหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เอนไซม์ (proteinase K) และสารละลาย

ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ทำการทดลองโดยนำ PLLA แซ่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ในอัตราส่วน 2.5 มิลลิตรต่อพื้นที่ผิวฟิล์มพลาสติก PLLA 100 มม.<sup>2</sup> บ่มและเขย่าที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง และศึกษาการใช้เอนไซม์ (proteinase K) โดยการแซ่ PLLA ในสารละลายบัฟเฟอร์ Tris-HCl ที่มีเอนไซม์ (proteinase K) 0.2 มิลลิกรัมต่อมิลลิตรของ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ในอัตราส่วน 2.5 มิลลิตรต่อ 100 มม.<sup>2</sup> ของพื้นที่ผิวฟิล์มพลาสติก PLLA บ่มและเขย่า ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 30 ชั่วโมง ทำการศึกษาเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ใช้ สารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ บ่มที่อุณหภูมิเดียวกัน เป็นระยะเวลา 6 เดือน หลังจากนั้นนำ PLLA ไป ตรวจวัดน้ำหนักที่หายไปและพื้นที่ผิวที่เปลี่ยนไปภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า PLA มีน้ำหนักลดลงเมื่อนำไปแซ่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเอนไซม์ (proteinase K) สูงสุดถึง 6 และ 7 ไมโครกรัมต่อพื้นที่ผิวฟิล์มพลาสติก PLLA 100 มม.<sup>2</sup> ซึ่งสอดคล้องกับผลของ การศึกษาการส่องภายใต้ SEM พบว่าผิวของ PLLA มีลักษณะขรุขระมากขึ้น และยังพบว่าการใช้ เอนไซม์และต่างมีผลต่อการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีและน้ำหนักโมเลกุลของ PLLA อีกด้วย

*งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักร่วมขยะอินทรีย์*

Wang และคณะ (2012) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักร่วม (co-digestion) พอลิแลคไทด์และขยะจากครัวเรือนในสภาวะไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิ 55 และ 80 องศาเซลเซียส โดยการเดินระบบถังหมักไร้อากาศ 2 ขั้นตอนแบบต่อเนื่องเปรียบเทียบกับระบบหมักแบบขั้นตอนเดียว ทำการทดลองโดยใช้ฟิล์มตัวอย่าง PLA มีความหนา 0.1 มิลลิเมตร และมีขนาด 2x2 มิลลิเมตร และ กำหนดค่าอัตราการระเหยอินทรีย์เริ่มต้นที่ 10.3 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน พบว่าระบบการหมักไร้อากาศแบบ 2 ขั้นตอนที่อุณหภูมิ 55 และ 80 องศาเซลเซียส ให้ก๊าซมีเทน 82.9% และ 80.8% ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าชุดทดลองที่เดินระบบแบบขั้นตอนเดียว จึงอาจสรุปได้ว่าการหมักร่วม ด้วยระบบไร้ออกซิเจน 2 ขั้นตอนที่อุณหภูมิสูง 80 องศาเซลเซียส สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต ก๊าซมีเทนให้สูงขึ้น

Saitawee และคณะ (2014) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมขยะอินทรีย์ ได้แก่ มูลวัว หล้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 และขยะเศษอาหาร ทำการศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพ การผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของวัสดุหมักร่วมและอุณหภูมิในการเดินระบบที่ 25 และ 45 องศาเซลเซียส พบว่าการหมักร่วมมูลวัว หล้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 และขยะเศษอาหาร ในอัตราส่วน 1:1:1 ที่อุณหภูมิสูง 45 องศาเซลเซียส ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพ 70 ลิตรต่อกรัมของแข็ง ระเหยง่าย และให้ก๊าซมีเทนสูงสุดคือร้อยละ 63 ตามลำดับ โดยจากการทดลองยังพบว่าการหมักที่ อุณหภูมิสูงช่วยเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพกว่าการหมักที่อุณหภูมิต่ำ และการหมักร่วมของเสียช่วยเพิ่ม

ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงถึงร้อยละ 12.5 และอาจสรุปได้ว่าอุณหภูมิเป็นปัจจัยสำคัญในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

อรรวรรณ วัฒนยมนาพร (2553) ทำการศึกษาการหมักร่วมขยะเศษอาหารกับกากตะกอนน้ำเสียชุมชน โดยการเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนในระดับห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย ถังหมักกรดและถังหมักก๊าซ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนหนึ่งศึกษาอัตราส่วนของปริมาณขยะเศษอาหารและกากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่อัตราส่วน 1:1 3:1 5:1 7:1 และขยะเศษอาหารเพียงอย่างเดียว จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 87.99-90.37 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 68.87-74.83 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 70.09-77.89 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 71.27-81.96 โดยที่อัตราส่วน 7:1 มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 90.37 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเท่ากับ 1,504 มิลลิตรต่อวัน โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 60.4 และขั้นตอนที่สองศึกษาผลของระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ โดยใช้อัตราส่วนของขยะเศษอาหารกับกากตะกอนน้ำเสียชุมชน 7:1 ที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 24 19 และ 16 วัน พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 85.42-88.67 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 68.03-73.11 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยทั้งหมดมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 71.03-73.68 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 69.52-71.94 โดยที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 24 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 88.67 ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเท่ากับ 1,029.17 ลิตรต่อวัน โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 64.3 ส่วนที่ระยะเวลาพักทางชลศาสตร์ 12 วัน มีประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีร้อยละ 87.40 แต่มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดสูงสุดเท่ากับ 1,704.59 ลิตรต่อวัน โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 48.4

## 2.9 สรุปผลการทบทวนเอกสารและแนวทางการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด พบว่าพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพสามารถย่อยสลายได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระ โดยการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระมีข้อดีคือ จุลินทรีย์จะย่อยสลายพลาสติกชีวภาพให้กลายเป็นก๊าซมีเทนซึ่งเป็นพลังงานทดแทนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการกำจัดพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งชนิดของพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีความน่าสนใจคือ พอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid); PLA) เนื่องด้วยนโยบายส่งเสริมและผลักดันของภาครัฐที่มีเป้าหมายให้ไทยเป็นผู้นำด้านอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ โดยพลาสติกชีวภาพที่มีสัดส่วนการผลิตสูงสุดคือพอลิแลคติกแอซิด จึงสนใจศึกษา

ทางเลือกใหม่ในการกำจัดพอลิแลคติกภายหลังการใช้งานนอกเหนือจากการนำไปกำจัดโดยวิธีทำปุ๋ยหรือการฝังกลบ โดยปัจจุบันมีหลายงานวิจัยสนับสนุนการกำจัดพลาสติกชีวภาพโดยการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนอิสระ เช่น Itävaara และคณะ (2002) พบว่า PLA สามารถย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนอิสระได้ก๊าซมีเทน ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลา 100 วัน

เนื่องจากพอลิแลคติกแอซิดเป็นพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงเพราะมีโครงสร้างแบบกึ่งผลึก (Semicrystalline polymer) และมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้มีข้อจำกัดคือไม่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติหรือเกิดการย่อยสลายน้อยมาก แต่เมื่อมีการปรับสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมจะส่งผลให้พอลิแลคติกแอซิดถูกย่อยสลายได้ดีและรวดเร็วขึ้น ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเสื่อมสภาพของพอลิแลคติกแอซิดมีหลายปัจจัย เช่น การกระตุ้นด้วยความร้อนและการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส เป็นต้น จากงานวิจัยของ Tsuji และคณะ (2006) พบว่า PLA มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและมีน้ำหนักโมเลกุลลดลงเมื่อนำไปแช่ในสารละลายต่างหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยพบว่าการแช่ PLA ในสารละลายต่างช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสด้วยการเร่งให้เกิดการแตกหักของสายโซ่พอลิเมอร์แบบที่ใช้คะตะลิสต์จากภายนอกโมเลกุลของพอลิเมอร์ (External Catalytic Degradation) นอกจากนี้ Yagi และคณะ (2010) ทำการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลาย PLA โดยการหมักที่อุณหภูมิสูง พบว่า PLA ถูกย่อยสลายได้ดีและรวดเร็วขึ้น และให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าชุดทดลองหมักที่อุณหภูมิต่ำ โดยให้ก๊าซมีเทนสูงสุดร้อยละ 53.8 ภายในระยะเวลาเพียง 75 วัน อย่างไรก็ตามการหมักแบบไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง มีข้อเสียคือสิ้นเปลืองพลังงาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจทำการปรับสภาพ PLA ขึ้นต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และความร้อนก่อนการนำไปหมักแบบไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิห้อง เพื่อลดระยะเวลาในการย่อยสลายของพอลิแลคติกแอซิดและเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพอีกด้วย

งานวิจัยนี้ยังสนใจเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักร่วม (Co-digestion) พอลิแลคติกกับขยะอินทรีย์ นอกจากการหมักร่วมขยะอินทรีย์จะช่วยเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพแล้วยังมีข้อดีหลายประการ เช่น ช่วยเพิ่มสารอาหารและแร่ธาตุส่งผลให้เกิดการย่อยสลายสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ลดระยะเวลาในการย่อยสลาย ช่วยลดของเสียที่ต้องนำไปบำบัด และเป็นการนำวัสดุคางหรือพืชของเสียจากภาคการเกษตรมาเปลี่ยนเป็นเป็นพลังงานทดแทน เป็นต้น ในส่วนของงานวิจัยนี้สนใจวัสดุหมักร่วมขยะอินทรีย์ที่เป็นของเสียจากกิจกรรมครัวเรือนและชุมชน ได้แก่ ขยะเศษอาหาร (food waste) และขยะเศษผักสด โดยงานวิจัยของ Wang และคณะ (2012) พบว่าการหมักร่วม พอลิแลคติกแอซิดและขยะจากครัวเรือนในสภาวะไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนให้สูงขึ้น เมื่อเทียบกับชุดควบคุมที่มีการหมักพอลิแลคติกเพียงชนิดเดียว

งานวิจัยนี้จึงเลือกพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิดเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการปรับสภาพขั้นต้นด้วยต่างสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และทำการศึกษการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการหมักร่วมวัสดุขยะอินทรีย์ ได้แก่ ขยะเศษอาหาร (food waste) และเศษผักสด (Vegetable waste) ในอัตราส่วนพอลิแลคติกแอซิดต่อขยะอินทรีย์ 1:1 ดังสรุปในตารางที่ 2.8



**ตารางที่ 2.8** เหตุผลของการพิจารณาเลือกพลาสติกชีวภาพ วิธีการปรับสภาพขั้นต้นและชนิดของขยะอินทรีย์ในการหมักร่วม

ชนิดพลาสติกชีวภาพ	เหตุผล
พอลิแลคติกแอซิด	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่มีสัดส่วนการส่งเสริมการผลิตสูงสุดในแผนนำทางแห่งชาติการพัฒนากอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ ระยะที่ 2 (พ.ศ. 2554 - 2558) ของประเทศ</li> <li>- เป็นพลาสติกย่อยสลายได้ที่มีโครงสร้างแข็งแรงและเกิดการย่อยสลายได้ยาก เหมาะสมที่จะเป็นตัวแทนของพลาสติกย่อยสลายได้อื่น ๆ</li> <li>- เพื่อพัฒนาแนวทางเลือกในการกำจัดพลาสติกชีวภาพในอนาคต</li> <li>- เกิดการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนอิสระได้</li> </ul>
วิธีทางกายภาพ (ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพิ่มพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยาในการย่อยสลาย</li> </ul>
วิธีทางเคมี (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ : NaOH)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสส่งผลให้เกิดแตกหักของสายพอลิเมอร์</li> <li>- ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและทำให้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง</li> <li>- ทำให้ง่ายต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์</li> <li>- เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ</li> </ul>
วิธีทางความร้อน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของพอลิแลคติกแอซิด</li> </ul>
วัสดุของเสียที่นำมาหมักร่วม	เหตุผล
เศษอาหาร และขยะเศษผักสด	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพิ่มแหล่งอาหารสำหรับจุลินทรีย์ในการเดินระบบ</li> <li>- เพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพ</li> <li>- ช่วยให้เกิดการผสมอย่างทั่วถึง จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ดีขึ้น</li> <li>- ลดปริมาณขยะที่ต้องนำไปกำจัด</li> <li>- เป็นการนำของเสียไปใช้ประโยชน์โดยเปลี่ยนให้เป็นพลังงานทดแทน</li> </ul>



## บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายของ PLA फिल्मที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อน โดยการนำ PLA फिल्मที่ผ่านการปรับสภาพมาเป็นสารตั้งต้น และทำการหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ ได้แก่ ขยะเศษอาหาร และขยะเศษผักสด ด้วยการเดินระบบในสภาวะไร้ออกซิเจนด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบทช์ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของ PLA फिल्म เช่น ศึกษาลักษณะพื้นผิว PLA फिल्म โดยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) วัดค่าความชื้น น้ำหนักเริ่มต้นและค่าของแข็งทั้งหมด

2. ศึกษาสภาวะการปรับสภาพขั้นต้น PLA फिल्मด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยออกแบบการทดลองด้วยหลักการประสมส่วนกลาง (Central Composite Design: CCD) ซึ่งแบ่งชุดปรับสภาพ PLA फिल्मออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ดังนี้

#### 2.1 ชุดที่ 1 ศึกษา PLA फिल्मที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH และความร้อน

ปรับสภาพขั้นต้น PLA फिल्म ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยศึกษาผลกระทบของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อนที่มีต่อการย่อยสลาย PLA फिल्मโดยทำการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 ถึง 0.5 โมลาร์ ระยะเวลา 0 ถึง 48 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส ชุดทดลองทั้งหมด 20 ชุด ซึ่งในการทดลองนี้ นำเพียง PLA फिल्मที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ (ไม่ใช่สารละลายต่างในการทดลองวิธีบีเอ็มพี) มาศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี เป็นระยะเวลา 90 วัน

#### 2.2 ชุดที่ 2 ศึกษา PLA फिल्मที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH และสารละลาย NaOH

ปรับสภาพขั้นต้น PLA फिल्मด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ pH 7-12 และระยะเวลา 1 ถึง 3 วัน ชุดทดลองทั้งหมด 13 ชุด ซึ่งในชุดทดลองนี้ใช้สารละลายต่างที่ผ่านการปรับสภาพมาใช้ทดสอบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพีร่วมด้วย

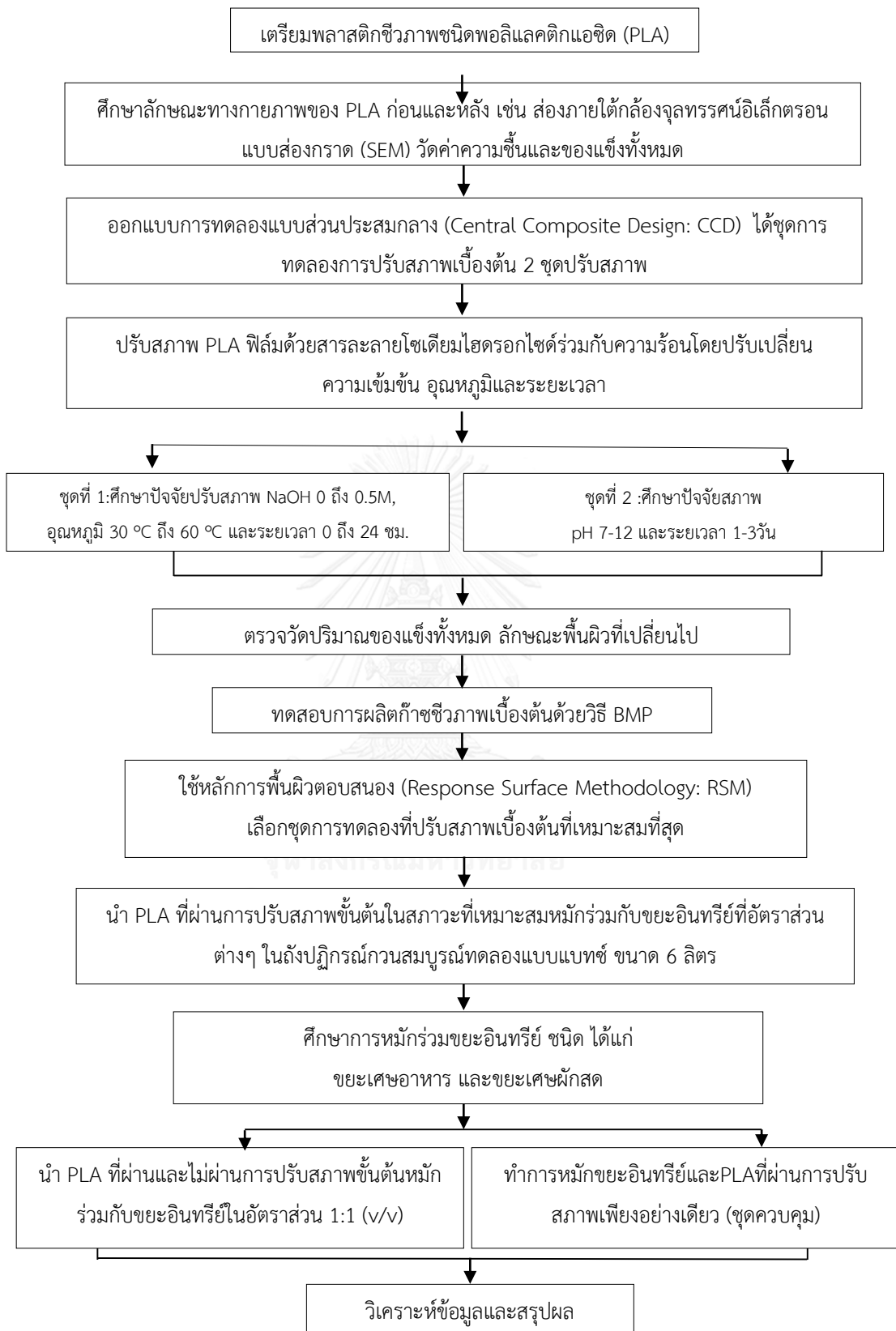
ทำการตรวจวัดร้อยละของน้ำหนัก PLA फिल्मที่หายไป (%Weight loss) และการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวที่เปลี่ยนไปของ PLA फिल्मหลังจากการปรับสภาพ

3. ศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมัก PLA ที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นที่สภาวะต่างๆด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP) โดยอาศัยหลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) พิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (Biogas production) ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%sCOD removal) และเปอร์เซ็นต์การย่อยสลาย (%Biodegradability)

4. ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายจากการหมักร่วม (co-digestion) PLA ฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ร่วมกับขยะอินทรีย์ ได้แก่ ขยะเศษอาหารและเศษผักจากตลาดสด ด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor: CSTR) แบบแบทช์ เป็นระยะเวลา 60 วัน

5. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการวิจัยเพื่อหารูปแบบการปรับสภาพ PLA ฟิล์มที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายสูงสุด

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังนี้ดังภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 ผังการไหลขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

## 3.2 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

### 3.2.1 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

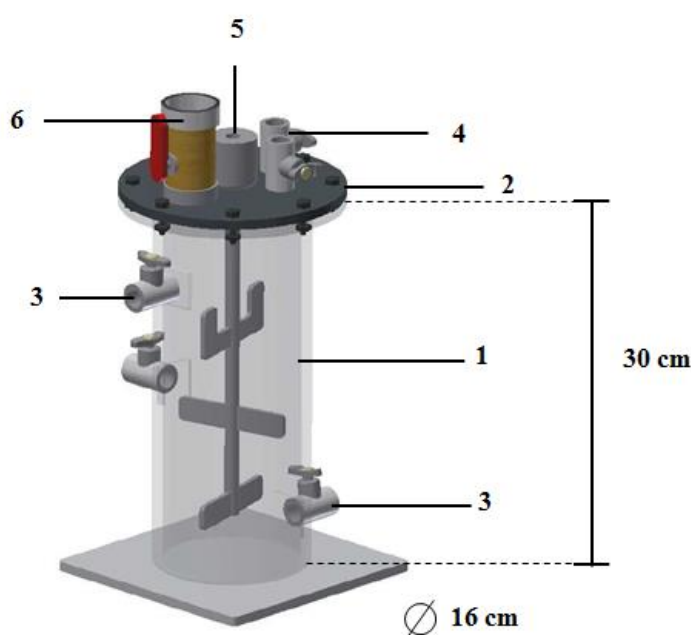
1. ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ ปริมาตร 6 ลิตร
2. อุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ (Gas counter)
3. เครื่องวัดพีเอช (pH-meter)
4. กระดาษกรอง GF/C
5. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer)
6. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance)
7. เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas chromatography)
8. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)
9. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ (Hot air oven) ที่ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส
10. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ (Hot air oven) ที่ 150 องศาเซลเซียส
11. เตาเผาควบคุมอุณหภูมิ (Hot air oven) ที่  $550 \pm 50$  องศาเซลเซียส
12. เตาแผ่น (hot plate)
13. เครื่องปั่นเหวี่ยงสาร (Centrifuge)
14. เครื่องปั่นกวน (Magnetic stirrer)
15. เครื่องเขย่าสาร (Shaker)
16. ขวดเซรามิกส์ขนาด 100 มิลลิลิตรและจุกยาง
17. เครื่องแก้วต่างๆ

### 3.2.2 ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์

ถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ทดลองแบบแบทช์ (Batch Completely Stirred Tank Reactor) ลักษณะเป็นถังทรงกระบอก ทำจากอะคริลิกใส มีปริมาตรรวม 6 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายในถึงเท่ากับ 16 เซนติเมตร ความลึกเท่ากับ 30 เซนติเมตร มีการติดตั้งใบพัดเป็นอุปกรณ์สำหรับกวนผสมสารละลายและเซ็นเซอร์ให้มีการผสมกันอย่างทั่วถึง ด้านบนของตัวถังมีการติดตั้งมอเตอร์ควบคุมความเร็วของใบพัดให้ทำงานสม่ำเสมอด้วยความเร็ว 70 รอบต่อนาที มีท่อนำก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักเพื่อไปวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ (Gas counter) มีท่อนำก๊าซเพื่อเก็บก๊าซไปศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ มีท่อสำหรับไล่ก๊าซออกซิเจน ท่อเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพกรด-ด่างในถังปฏิกรณ์ และมีการติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในถัง ส่วนด้านข้างของถังปฏิกรณ์มี

การเจาะช่องติดตั้งวาล์วปิดเปิดเพื่อเก็บตัวอย่างภายในถังปฏิกรณ์มาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆได้ โดยตำแหน่งของวาล์วจะอยู่สูงจากกันถึง 15 เซนติเมตร และมีฝาปิดที่ครอบไว้ไม่มีอากาศจากภายนอกเข้าไปในถังปฏิกรณ์ได้ ดังภาพที่ 3.2

ก่อนการนำถังปฏิกรณ์ไปใช้ในการทดลอง ต้องมีการตรวจสอบรอยรั่วบริเวณข้อต่อต่างๆเพื่อป้องกันก๊าซออกซิเจนเข้าสู่ระบบ โดยการใช้น้ำสบู่ทาบริเวณรอยต่อต่างๆ จากนั้นเป่าลมเข้าสู่ถังหมัก หากมีรอยรั่วฟองสบู่จะขยายตัวขึ้น ให้อุตรอยรั่วโดยใช้กาวซิลิโคน และตรวจสอบซ้ำอีกประมาณ 2-3 ครั้ง



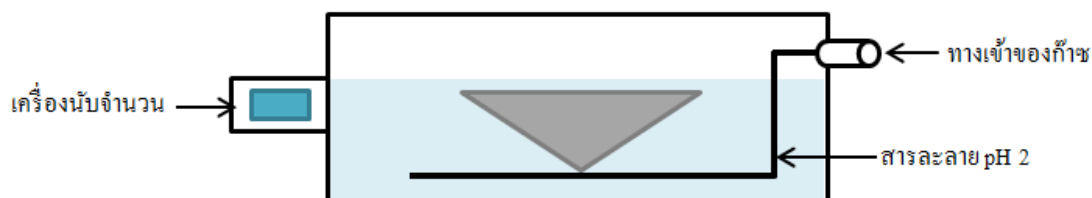
ภาพที่ 3.2 ถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบตช์ (Batch Completely Stirred Tank Reactor)

- (1) ถังปฏิกรณ์กวนผสม (2) ฝาปิดป้องกันอากาศเข้าออก (3) จุดเก็บตัวอย่างเพื่อการวิเคราะห์  
(4) จุดวัดอุณหภูมิ (5) มิเตอร์ควบคุมความเร็วของใบพัดกวน (6) ท่อนำก๊าซชีวภาพ

### 3.2.3 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ

การตรวจวัดก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์กวนผสมจากการหมักแบบไร้ออกซิเจน โดยชุดอุปกรณ์ตรวจวัดปริมาณก๊าซโดยใช้หลักการแบบแทนที่น้ำ ประกอบด้วยเครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas counter) ทำจากอะคริลิกใส ภายในติดตั้งระบบเซ็นเซอร์เพื่อวัดปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยตรวจวัดจากการนับจำนวนรอบการพลิกตัวของอุปกรณ์ ซึ่งภายในมีสารละลายที่ควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 2 เพื่อป้องกันการย้อนกลับของก๊าซลงสู่น้ำ เมื่อปริมาตรก๊าซเต็มในช่องเก็บ

ก๊าซ (ภาพที่ 3.3) การพลิกตัว 1 รอบของอุปกรณ์ สามารถวัดปริมาตรได้ 40 มิลลิลิตร โดยจำนวนปริมาตรที่ตรวจวัด จะสามารถนำมาคำนวณหาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นได้



ภาพที่ 3.3 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ (Gas counter)

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 การเตรียมวัสดุดิบ

1) เตรียมพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอซิด (poly(lactic acid); PLA) รุ่น ingeo 4043D จากบริษัทเนเจอร์เวิร์ค (Natureworks LLC) ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการ Blown Film Extrusion ด้วยเครื่องขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการเป่า รุ่น Blown film BL 180/400E ดังภาพที่ 3.4 ได้แผ่นฟิล์ม PLA ขนาด 150×150×0.80 มิลลิเมตร โดยมีสมบัติต่างๆดังตารางที่ 3.1 นำมาตัดเป็นแผ่นเล็กๆขนาด 2×2 ซม.<sup>2</sup> และนำไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของ PLA ก่อนและหลัง เช่น ส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) วัดน้ำหนักแห้ง วัดค่าความชื้น ปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด



ภาพที่ 3.4 เครื่องขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการเป่า รุ่น Blown film BL 180/400E

ตารางที่ 3.1 สมบัติของ PLA รุ่น ingeo 4043D ที่ผลิตเพื่อการค้า

สมบัติ	NatureWorks PLA	ASTM Method
ความหนาแน่น (กรัม/มล.)	1.24	D1505
$T_g$ (C°)	55-60	D3418
$T_m$ (C°)	145-160	D3418
Tensile strength (MPA)	53	D882
Elongation (%)	6	D882

ที่มา : NatureWorks LLC (2016)

2) เตรียมหัวเชื้อจุลชีพที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน บริษัท เสริมสุข จำกัด โดยนำมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด ปริมาณคาร์บอน ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณความชื้น และค่าความเป็นกรด-ด่าง

3) เตรียมขยะอินทรีย์ที่ใช้เป็นวัสดุหมักร่วม ซึ่งขยะเศษอาหารนำมาจากโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขยะเศษผักสดนำมาจากตลาดสดสามย่าน โดยนำมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด ปริมาณคาร์บอน ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ซีโอดีและปริมาณความชื้น

### 3.3.2 ออกแบบชุดทดลองการปรับสภาพขั้นต้น PLA ฟิล์ม ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อน

1) ออกแบบชุดทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ PLA ฟิล์ม โดยการใช้การสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลาต่างๆ ทำการออกแบบชุดทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) ซึ่งในแต่ละชุดทดลองทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมและระยะเวลาในการปรับสภาพที่แตกต่างกัน ดดยในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดปรับสภาพ ได้แก่

ชุดที่ 1: การศึกษา PLA ฟิล์ม ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และความร้อน

ศึกษาปัจจัยการปรับสภาพ PLA ฟิล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร่วมกับความร้อน 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้น NaOH อุณหภูมิ และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ ได้ชุดทดลองทั้งหมด 20 ชุดทดลอง

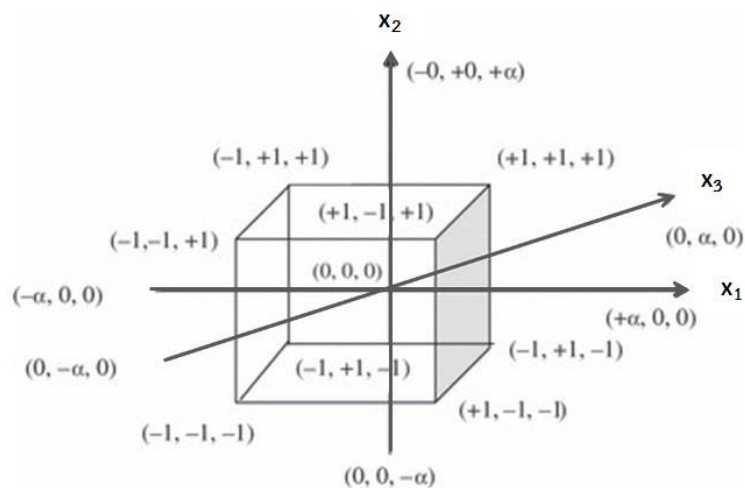
ชุดที่ 2: การศึกษา PLA ฟิล์ม ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ศึกษาปัจจัยการปรับสภาพ PLA ฟิล์ม ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ระยะเวลาต่างๆ 2 ปัจจัย ได้แก่ ค่าพีเอช และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ ได้ชุดทดลองทั้งหมด 13 ชุดทดลอง (ใช้สารละลาย NaOH ที่ผ่านการปรับสภาพในการทดลองปีเอ็มพีร่วมด้วย)

หลักการออกแบบชุดทดลองแบบส่วนประสมกลาง (CCD) เป็นการออกแบบที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัยห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบที่เท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลางดังภาพที่ 3.5 โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วยตำแหน่งทดลอง  $2^n$  Factorial Design โดย n ในที่นี้คือตัวแปรอิสระ 3 ตัว ดังนั้น  $2^3$  จะมีตำแหน่งศูนย์กลางของพื้นที่ทดลอง (Central Point) ทั้งหมด 8 ตำแหน่ง และตำแหน่งการทดลอง (Axial point) เพิ่มมาอีก 4 ตำแหน่ง และ Factorial Design ทั้งหมด 8 ตำแหน่ง ในกรณีที่มีตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร จึงมีตำแหน่งทดลองรวมทั้ง 20 ตำแหน่ง การออกแบบจึงครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการ ดังนั้นด้วยหลักการออกแบบชุดทดลองแบบ CCD เช่นเดียวกัน ในงานวิจัย



นี้สนใจตัวแปรศึกษาที่มี 3 ตัวแปร และ 2 ตัวแปร จึงได้ชุดทดลองทั้งหมด 20 และ 13 ชุดทดลองตามลำดับ



ภาพที่ 3.5 แผนการแสดงตำแหน่งการออกแบบชุดทดลองแบบส่วนประสมกลาง  
ที่มา : ปารเมศ ชูติมา (2545)

ในชุดปรับสภาพที่ 1 สามารถออกแบบชุดการทดลองแบบส่วนประสมกลาง 3 ปัจจัยอิสระ ได้ชุดการทดลองทั้งหมด 20 ชุดทดลอง โดยที่ค่า  $\alpha$  เท่ากับ 1.682 และกำหนดรหัสตำแหน่งของแต่ละชุดการทดลอง และค่าตัวแปรจริงได้ดังตารางที่ 3.2 และความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปรดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปร

ตัวแปร	ระดับตัวแปร	รหัสตัวแปร				
		-1.682	-1	0	+1	+1.682
ความเข้มข้น NaOH (M)	$X_1$	0*	0	0.25	0.50	0.67
อุณหภูมิที่ใช้ปรับสภาพ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$X_2$	20	30	45	60	70
ระยะเวลา (ชั่วโมง)	$X_3$	0*	0	12	24	32.2

หมายเหตุ \* เนื่องจากค่าที่คำนวณได้เป็นค่าติดลบซึ่งไม่สามารถเตรียมได้ จึงกำหนดให้เป็นศูนย์

ตารางที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปร

ชุด ทดลอง	ตัวแปร			รหัสตำแหน่ง		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	ปัจจัยที่ 1	ปัจจัยที่ 2	ปัจจัยที่ 3
1	0.50	60	0	1	1	-1
2	0	60	24	-1	1	1
3	0.25	45	12	0	0	0
4	0.25	45	12	0	0	0
5	0.25	45	12	0	0	0
6	0*	45	12	-1.682	0	0
7	0.25	45	12	0	0	0
8	0.25	45	0*	0	0	-1.682
9	0.25	20	12	0	-1.682	0
10	0	30	0	-1	-1	-1
11	0.25	45	12	0	0	0
12	0.25	45	32.2	0	0	1.682
13	0.25	45	12	0	0	0
14	0	60	0	-1	1	-1
15	0.50	30	24	1	0	1
16	0.50	60	24	1	1	1
17	0.67	45	12	1.682	0	0
18	0	30	24	-1	-1	1
19	0.50	30	0	1	0	1
20	0.25	70	12	0	1.682	0

หมายเหตุ \* เนื่องจากค่าที่คำนวณได้เป็นค่าติดลบซึ่งไม่สามารถเตรียมได้ จึงกำหนดให้เป็นศูนย์

ในชุดปรับสภาพที่ 2 สามารถออกแบบชุดการทดลองแบบส่วนประสมกลาง 2 ปัจจัยอิสระ ได้ชุดการทดลองทั้งหมด 13 ชุดทดลอง โดยที่ค่า  $\alpha$  เท่ากับ 1.414 และกำหนดรหัสตำแหน่งของแต่ละชุดการทดลอง และค่าตัวแปรจริงได้ดังตารางที่ 3.4 และความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปรดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปร

ตัวแปร	ระดับ ตัวแปร	รหัสตัวแปร				
		-1.414	-1	0	+1	+1.414
pH	$X_1$	6.0	7.0	9.5	12.0	13.0
ระยะเวลา (ชั่วโมง)	$X_2$	0.6	1.0	2.0	3.0	3.4

ตารางที่ 3.5 ความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปร

ชุดทดลอง	ตัวแปร		รหัสตำแหน่ง	
	$X_1$	$X_2$	ปัจจัยที่ 1	ปัจจัยที่ 2
1	6.00	2.00	-1.414	0
2	7.00	1.00	-1	-1
3	7.00	3.00	-1	1
4	9.50	0.60	0	-1.414
5	9.50	2.00	0	0
6	9.50	2.00	0	0
7	9.50	2.00	0	0
8	9.50	2.00	0	0
9	9.50	2.00	0	0
10	9.50	3.40	0	1.414
11	12.00	1.00	1	-1
12	12.00	3.00	1	1
13	13.00	2.00	1.414	0

2) ปรับสภาพเบื้องต้น PLA फिल्म โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียม-ไฮดรอกไซด์ ในช่วงความเข้มข้น 0 ถึง 0.5 โมลาร์ ปรับเปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพในช่วง 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส และปรับเปลี่ยนระยะเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 24 ชั่วโมง โดยออกแบบชุดทดลอง (ข้อ 3.3.2.1) ได้ทั้งหมด 20 ชุดทดลอง โดยทำการเปรียบเทียบกับชุดควบคุม PLA फिल्मที่ไม่ผ่านการ

ปรับสภาพขั้นต้น หลังจากปรับสภาพทำการปรับค่าพีเอชให้เป็นกลาง (ค่าพีเอชเท่า 7) ด้วยกรด ฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) ก่อนนำ PLA และสารละลายที่ผ่านการปรับสภาพไปใช้ในการทดสอบ BMP และการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมกับขยะอินทรีย์

3) วิเคราะห์ปริมาณซีโอดี ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย วัตต์น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพ และศึกษาลักษณะของพื้นผิว PLA फिल्म ที่เปลี่ยนไป ในชุดทดลอง PLA फिल्मที่ปรับสภาพด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) และคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งที่หายไป

สมการที่ 3.1 แสดงวิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งที่หายไป (%Weight loss)

$$\% \text{Weight loss} = \frac{W(\text{before}) - W(\text{after})}{W(\text{before})} \times 100 \quad (3.1)$$

โดยที่ %Weight loss คือ ร้อยละของน้ำหนักที่ลดลง

W (before) คือ น้ำหนักแห้งเริ่มต้น (มิลลิกรัม)

W (after) คือ น้ำหนักแห้งหลังการปรับสภาพ (มิลลิกรัม)

### 3.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential; BMP)

1) นำ PLA फिल्म ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อน (ข้อ 4.3.2) มาทดสอบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเบื้องต้นด้วยวิธีบีเอ็มพี

โดยการศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพตามวิธีการการของ Owen และคณะ (1979) ดังนี้

- 1.1) ใส่ตัวอย่าง PLA फिल्म ที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นโดยมีอัตราส่วนระหว่างสารตั้งต้น ต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์ 60:40 (v/v) ลงในขวดเซรัมสีขาขนาด 100 มล. โดยมีปริมาตรการทำงานเท่ากับ 80 มิลลิลิตร กำหนดค่าของแข็งระเหยเริ่มต้นร้อยละ 2 และกำหนดหัวเชื้อจุลินทรีย์ในระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ (VSS) ร้อยละ 2.5 โดยทำการทดลองเปรียบเทียบกับ PLA ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น (ชุดควบคุมคือ ขวดที่ใส่เพียงหัวเชื้ออย่างเดียว)

- 1.2) ปรับค่าพีเอชโดยใช้กรดฟอสฟอริก ( $H_3PO_4$ ) หรือโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $NaHCO_3$ ) ให้ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.8-7.2
- 1.3) ใส่ก๊าซออกซิเจนที่อยู่ภายในขวดด้วยก๊าซไนโตรเจน
- 1.4) นำขวดเซรามิกส์ไปเก็บไว้ในที่มืด อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งเขย่าด้วยอัตราเร็ว 165 รอบต่อนาที
- 1.5) ตรวจสอบปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น โดยทำการเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพสะสมทุกวัน ด้วยการใช้หลอดเก็บก๊าซ (Gas syringe) จนกว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมคงที่
- 1.6) บันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น และวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย และเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของ PLA फिल्मดังกล่าวที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ
- 1.7) เลือกชุดทดลองที่ปรับสภาพขั้นต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) เพื่อนำมาหมักด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบทช์ (Batch Completely Stirred Tank Reactor) โดยที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจะเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาที่เหมาะสม และค่าตอบสนอง (response variable) คือ ปริมาณก๊าซชีวภาพ และเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของ PLA ที่สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ (Montgomery, 1982)

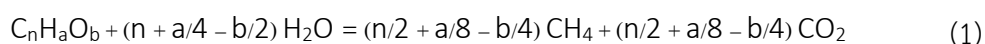
การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นด้วยหลอดเก็บก๊าซ โดยก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อกรัมของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกสลายไป ตลอดระยะเวลาในการเดินระบบจะทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจนกระทั่งระบบไม่มีการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น หรือมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมคงที่ (steady state) และคำนวณก๊าซชีวภาพทั้งหมดในหน่วยลิตรของก๊าซชีวภาพทั้งหมดต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยง่าย และในหน่วยลิตรของก๊าซชีวภาพทั้งหมดต่อกิโลกรัม PLA फिल्मเริ่มต้นที่ถูกย่อยสลายไป

สมการที่ 3.2 แสดงวิธีการคำนวณหาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

$$\text{ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น} = \frac{\text{ปริมาตรของก๊าซชุดทดลอง (ลิตร)} - \text{ปริมาตรของก๊าซชุดควบคุม (ลิตร)}}{\text{ปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (กิโลกรัม)}} \quad (3.2)$$

สมการที่ 3.3 แสดงวิธีการคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ (Yagi และคณะ, 2009)

สมการที่ 1 แสดงสมการคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลาย PLA ทางทฤษฎี



หมายเหตุ : ในงานวิจัยนี้สมมติให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลอง BMP มาจากการย่อยสลาย PLA พิล์ม ซึ่งเป็นสารอินทรีย์เพียงชนิดเดียวที่ใส่ลงในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยไม่พิจารณาการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปอยู่ในรูปของเซลล์จุลินทรีย์เนื่องจากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระบบไร้อากาศจะได้พลังงานน้อยจึงทำให้เซลล์ของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นใหม่มีจำนวนไม่มาก ดังนั้นจึงขอ นำปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้มาใช้ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพดังสมการที่ 2 ต่อไป

สมการที่ 2 แสดงวิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ (%Biodegradation)

$$\text{Biodegradation (\%)} = \frac{\sum V(s) - \sum V(c)}{V_{max}} \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่  $\sum V(s)$  คือ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากชุดตัวอย่าง (ลิตร)

$\sum V(c)$  คือ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากชุดควบคุม (ลิตร)

$V_{max}$  คือ ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ดังสมการที่ 2 (ลิตร)

**3.4.4 ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) จากการหมักร่วม PLA พิล์ม ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นกับของเสียในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบทช์ (Batch Completely Stirred Tank Reactor)**

1) หลังจากการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพขั้นต้น PLA โดยใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ตามขั้นตอนที่ 3.3.3 แล้ว จึงนำ PLA ที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นมาหมักร่วม (co-digestion) กับของเสีย ได้แก่ ขยะเศษอาหาร เหง้าเนเปียร์ และของเสียกลีเซอริน ในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบทช์ (Batch Completely Stirred Tank Reactor) ขนาด 6 ลิตร (ปริมาตรการทำงานทั้งหมด 5 ลิตร) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ระยะเวลา

อย่างน้อย 90 วัน โดยในการทดลองกำหนดค่าความเข้มข้นของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดทั้งหมดร้อยละ 2 และกำหนดหัวเชื้อจุลินทรีย์ในระบบมีค่าของแวนลอยระเหยง่ายเริ่มต้นร้อยละ 2.5 โดยมีชุดทดลอง ดังนี้

- ชุดที่ 1 ชุดควบคุม ขยะเศษอาหารชนิดเดียว
- ชุดที่ 2 ชุดควบคุม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพชนิดเดียว
- ชุดที่ 3 ขยะเศษอาหารหมักร่วม PLA ฟิล์ม ไม่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)
- ชุดที่ 4 ขยะเศษอาหาร หมักร่วม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพ (1:1)
- ชุดที่ 5 ขยะเศษผักสด หมักร่วม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพด้วย (1:1)

2) ปรับค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ในช่วง 6.8 ถึง 7.2 โดยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) เพื่อทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์

3) ไล่ก๊าซออกซิเจนออกภายในถังด้วยก๊าซไนโตรเจน

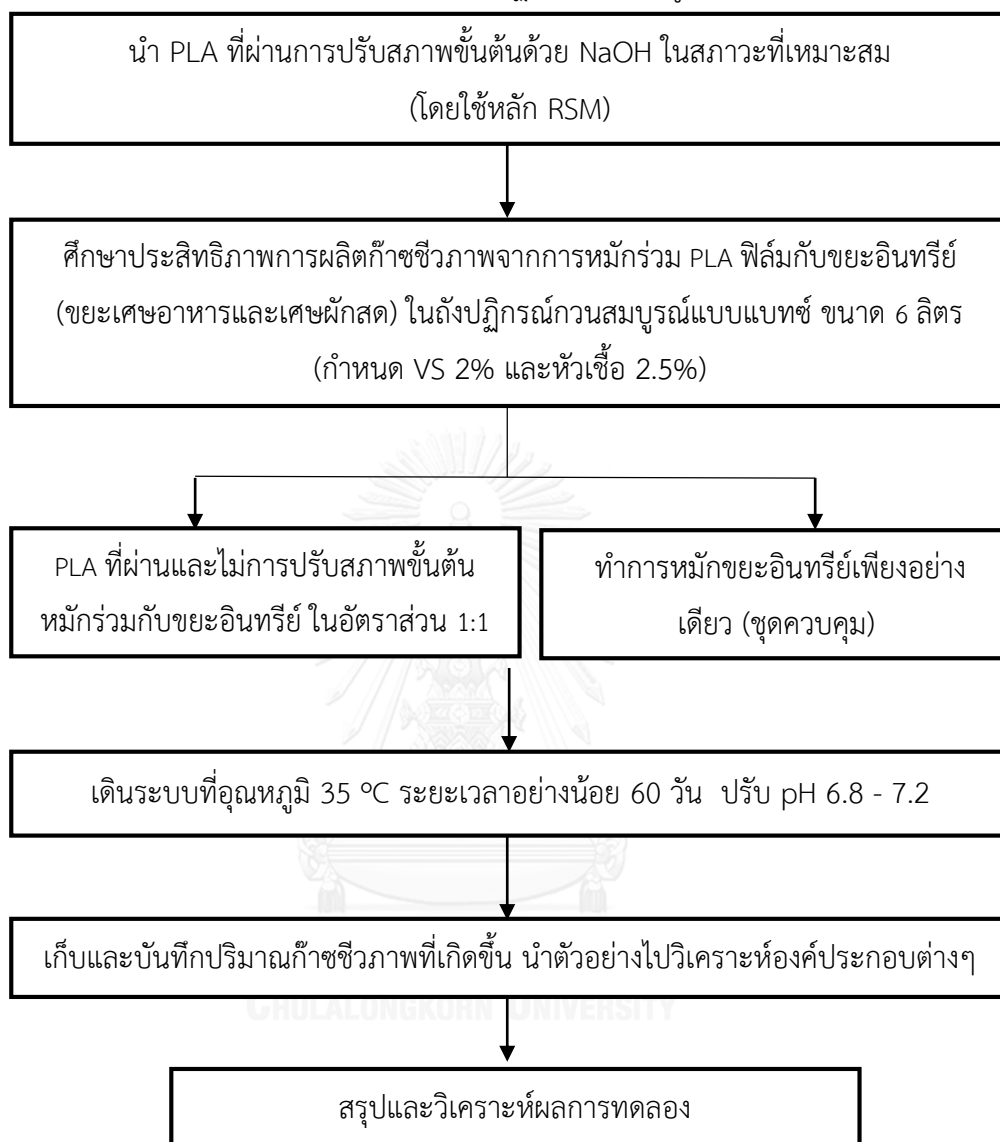
4) เก็บและบันทึกข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น รวมทั้งนำตัวอย่างไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ค่าพีเอช อุณหภูมิ กรดไขมันระเหยง่าย สภาพความเป็นต่าง ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด และร้อยละการผลิตก๊าซมีเทนตลอดช่วงระยะเวลาในการเดินระบบทั้งหมด 65 วัน โดยทำการเปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพกับชุดทดลองที่ไม่มีการปรับสภาพและไม่มีการหมักร่วม

6) ติดตามการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของ PLA ฟิล์มที่เปลี่ยนไป ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM)

5) สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง มหาวิทยาลัย



ภาพที่ 3.6 ชุดทดลองศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมขยะอินทรีย์และ PLA  
ฟิล์ม ด้วยการเดินระบบในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบทช์



ภาพที่ 3.7 การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วม PLA ฟิล์มและขยะอินทรีย์



ตารางที่ 3.6 ตัวแปรที่ใช้ในการปรับสภาพชั้นต้น PLA พิล์ม

ชนิดตัวแปร	รายละเอียด	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรอิสระ	ชุดปรับสภาพที่ 1 - ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ - ระยะเวลาในการสภาพชั้นต้น PLA - อุณหภูมิ	- 0 ถึง 0.5 โมลาร์ - 0 ถึง 24 ชั่วโมง - 30 ถึง 60°C
	ชุดปรับสภาพที่ 2 - pH - ระยะเวลาในการสภาพชั้นต้น PLA	- 7 ถึง 12 - 1 ถึง 3 วัน
ตัวแปรควบคุม	- ระยะเวลาการทดลอง - ความเข้มข้นสารตั้งต้น (substrate) - ความเข้มข้นหัวเชื้อจุลชีพ (seed)	- 90 วัน - 2% VS - 2.5% VS
ตัวแปรตาม	- ปริมาณก๊าซชีวภาพ - เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของ PLA - ปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด - กรดไขมันระเหย - สภาพต่าง (Alkalinity) - ของแข็งทั้งหมด - ของแข็งระเหย	

ตารางที่ 3.7 ตัวแปรที่ใช้ในการหมักร่วมพลาสติกชีวภาพชนิด PLA และขยะอินทรีย์

ชนิดตัวแปร	รายละเอียด	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ตัวแปรอิสระ	- ชนิดของของเสียที่ใช้ในการหมักร่วม (Co-digestion)	- ขยะเศษอาหาร - ขยะเศษผักสด
ตัวแปรควบคุม	- ระยะเวลาการทดลอง - ความเข้มข้นสารตั้งต้น (substrate) - ความเข้มข้นหัวเชื้อจุลชีพ (seed)	- 90 วัน - 2% VS - 2.5% VS
ตัวแปรตาม	- ปริมาณก๊าซชีวภาพ - องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ - ปริมาณซีโอดีที่ถูกกำจัด - กรดไขมันระเหย - สภาพต่าง (Alkalinity) - ของแข็งทั้งหมด - ของแข็งระเหย	

ตารางที่ 3.8 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์	ความถี่/ช่วงเวลา
C/N ratio	CHNS/O Analyser mode ธาตุ	ก่อนการทดลอง
ซีโอดีละลาย (Soluble COD)	มาตรฐานวิธีวิเคราะห์ # 5560 C (รีฟลักซ์แบบปิด)	ก่อนและหลังการทดลอง
ของแข็งทั้งหมด (Total solid)	มาตรฐานวิธีวิเคราะห์ # 2540B (เผา 103-105 °C)	ก่อนและหลังการทดลอง
ของแข็งระเหย (Volatile solids)	มาตรฐานวิธีวิเคราะห์ # 2540B (เผา 500-600 °C)	ก่อนและหลังการทดลอง
ความชื้น (moisture content)	มาตรฐานวิธีวิเคราะห์ # 2540B (เผา 103-105 °C)	ก่อนและหลังการทดลอง
กรดไขมันระเหย (VFA)	มาตรฐานวิธีวิเคราะห์ # 2320B (วิธีการไทเทรต)	3 ครั้งต่อสัปดาห์
พีเอช	pH meter	3 ครั้งต่อสัปดาห์
สภาพด่าง (Alkalinity)	มาตรฐานวิธีวิเคราะห์ # 2320B (วิธีการไทเทรต)	3 ครั้งต่อสัปดาห์
ปริมาณก๊าซชีวภาพ	Gas counter (ใช้หลักการแทนที่น้ำ)	ทุกวัน
องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ	Gas Chromatography	หลังการทดลอง
พื้นผิว PLA ฟิล์มที่เปลี่ยนไป	SEM analysis	หลังการทดลอง

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายของ PLA พิล์ม ที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และนำ PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพมาเป็นสารตั้งต้นในการหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ ได้แก่ เศษอาหารและเศษผักจากตลาดสด เติมน้ำในระบบในสภาวะไร้ออกซิเจนด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบทช์ โดยสามารถสรุปขั้นตอนการทดลองได้ดังนี้

1. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของ PLA พิล์ม เช่น ลักษณะพื้นผิว PLA พิล์มโดยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) วัดค่าความชื้น น้ำหนักเริ่มต้นและค่าของแข็งทั้งหมด

2. ศึกษาสภาวะการปรับสภาพขั้นต้น PLA ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยออกแบบการทดลองด้วยหลักการประสมส่วนกลาง (Central Composite Design: CCD) ซึ่งแบ่งชุดปรับสภาพ PLA พิล์มออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ดังนี้

ชุดที่ 1 ศึกษาการปรับสภาพ PLA พิล์มด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และความร้อน

การปรับสภาพขั้นต้น PLA พิล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยศึกษาผลกระทบของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อนที่มีต่อการย่อยสลาย PLA โดยทำการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 ถึง 0.5 โมลาร์ ระยะเวลา 0 ถึง 48 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส ชุดทดลองทั้งหมด 20 ชุด ซึ่งในการทดลองนี้ นำเพียง PLA พิล์มที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ (ไม่ใช่สารละลายต่างในการทดลองวิธีบีเอ็มพี) มาศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี เป็นระยะเวลา 90 วัน

ชุดที่ 2 ศึกษาการปรับสภาพ PLA พิล์ม ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ทำการปรับสภาพขั้นต้น PLA พิล์ม ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยทำการศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ pH 7-12 และระยะเวลา 1 ถึง 3 วัน ชุดทดลองทั้งหมด 13 ชุด หลังจากปรับสภาพทำการปรับค่าพีเอชให้เป็นกลาง (ค่าพีเอชเท่า 7) ด้วยกรดฟอสฟอริก (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) ก่อนนำ PLA และสารละลายที่ผ่านการปรับสภาพไปใช้ในการทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งในชุดทดลองนี้ ใช้สารละลายต่างที่ผ่านการปรับสภาพมาใช้ทดสอบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี ร่วมด้วย

ทำการตรวจวัดร้อยละของน้ำหนัก PLA พิล์มที่หายไป (%Weight loss) และการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวที่เปลี่ยนไปของ PLA พิล์มหลังจากการปรับสภาพ

3. ศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมัก PLA फिल्मที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นที่สภาวะต่างๆด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP) โดยอาศัยหลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) พิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (Biogas production) ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (%sCOD removal) และเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายทางชีวภาพ (%Biodegradability)

4. ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายจากการหมักร่วม PLA फिल्म ที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดร่วมกับขยะอินทรีย์ ได้แก่ ขยะเศษอาหารและเศษผักจากตลาดสด ด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor: CSTR) แบบแบทช์ เป็นระยะเวลา 60 วัน

5. วิเคราะห์ข้อมูลและสรุปผลการวิจัยเพื่อหารูปแบบการปรับสภาพ PLA फिल्म ที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายสูงสุด



#### 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของ PLA फिल्म

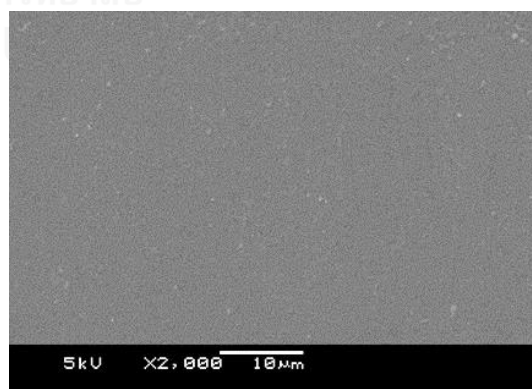
PLA फिल्मที่ใช้ในงานวิจัยเป็น PLA บริสุทธิ์ ผ่านกระบวนการขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มด้วยกระบวนการ Blown Film Extrusion ได้แผ่นฟิล์มที่มีความหนา 80 มิลลิเมตร และนำมาตัดให้มีขนาดเล็กกว่า  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) ปริมาณความชื้น (ตารางที่ 4.1) โดยพบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) มีค่าสูงถึงร้อยละ 99.78 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PLA फिल्मเป็นของแข็งที่มีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์สูง แต่เนื่องจาก PLA มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์กิ่งผลึกจึงทำให้ยากต่อการย่อยสลายในสภาวะแวดล้อมทั่วไป (อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล, 2554) และจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ PLA फिल्मก่อนเริ่มการทดลองภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) พบว่าพื้นผิวของ PLA फिल्मมีลักษณะเรียบ ไม่มีรอยขรุขระ ดังภาพที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของ PLA फिल्म

องค์ประกอบ	ค่าเฉลี่ย $\pm$ S.D.
ของแข็งทั้งหมด (TS)	99.78 $\pm$ 0.02
ความชื้น (Moister)	0.22 $\pm$ 0.02
ของแข็งระเหยง่าย (VS)	99.78 $\pm$ 0.03
เถ้า (Ash)	0.22 $\pm$ 0.03



ก)



ข)

ภาพที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของ PLA फिल्मที่ใช้ในงานวิจัย ก) PLA फिल्मที่ใช้ในงานวิจัย (หลังการบด) และ ข) ลักษณะพื้นผิวของ PLA फिल्मก่อนการทดลอง (วิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM กำลังขยาย 2,000 เท่า)

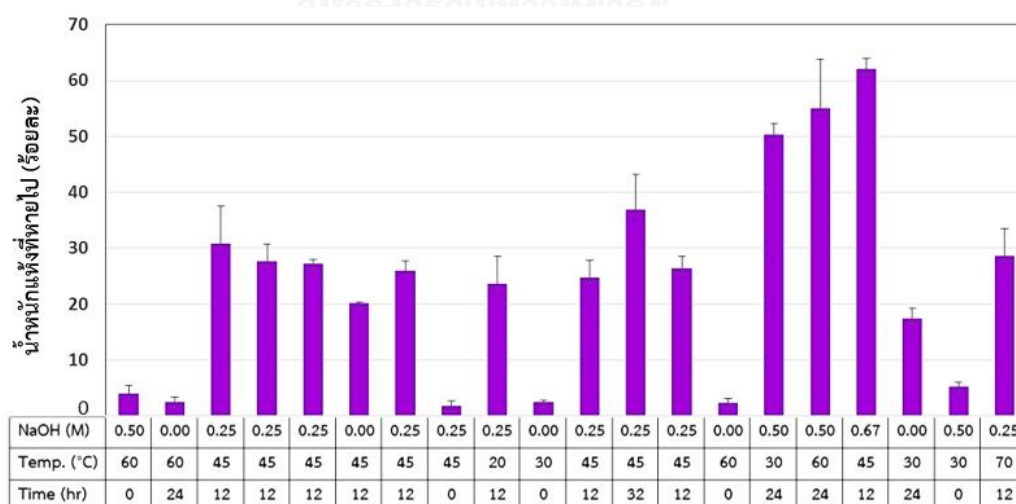
## 4.2 ผลการศึกษาการปรับสภาพขั้นต้น PLA พิล์ม โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

การปรับสภาพขั้นต้น PLA พิล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จากการออกแบบการทดลองโดยใช้หลักการประสมส่วนกลาง (Central Composite Design: CCD) โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและแบ่งการทดลองปรับสภาพออกเป็น 2 ชุดการทดลอง ได้ผลการทดลองปรับสภาพขั้นต้น PLA พิล์ม ตามสภาวะต่างๆ ที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรมทั้ง 2 ชุดปรับสภาพ ให้ผลการศึกษาดังนี้

### 4.2.1 ผลการศึกษาการปรับสภาพขั้นต้น PLA พิล์ม โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อนที่ระยะเวลาต่างๆ

#### 1) ผลการศึกษาร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (%Weight loss) ของ PLA พิล์ม

จากภาพที่ 4.2 แสดงผลการศึกษาร้อยละของน้ำหนักที่หายไป จากการปรับสภาพ PLA พิล์มทั้งหมด 20 ชุดทดลอง พบว่า %Weight loss ของ PLA พิล์ม มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นสารละลาย NaOH และระยะเวลาทำปฏิกิริยาสูงขึ้น ซึ่ง %Weight loss ของชุดปรับสภาพด้วย NaOH 0.67 โมลาร์ ที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง ให้ %Weight loss สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 62.02 ลำดับรองลงมาคือชุดปรับสภาพ PLA ที่ความเข้มข้น NaOH 0.5 โมลาร์ ที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ให้ %Weight loss เท่ากับร้อยละ 55.02 แสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อนช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลายของ PLA พิล์ม โดยการกระตุ้นด้วยความร้อนและการใช้สารละลายต่างจะช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้เกิดจากการขาดของสายโซ่หลักหรือสายโซ่ด้านข้างของโมเลกุล PLA พิล์มได้ (Tsuji และคณะ, 2006)



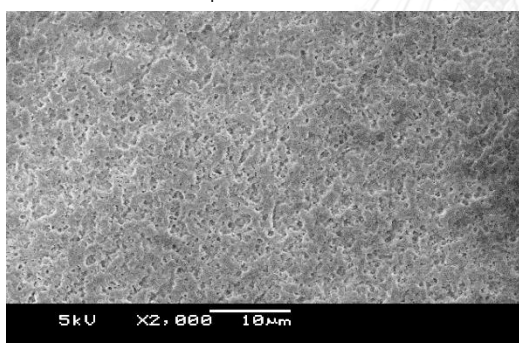
สภาวะในการปรับสภาพ

ภาพที่ 4.2 ร้อยละของน้ำหนักแห้งที่หายไปของ PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะต่างๆ

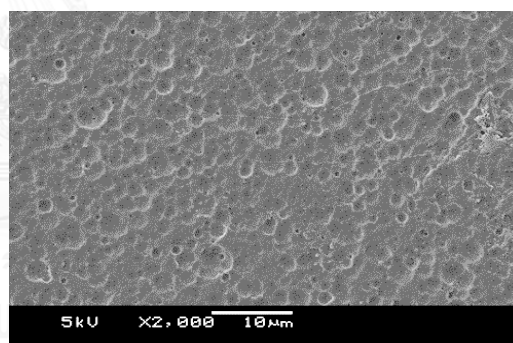
(ชุดที่ 1)

## 2) ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของ PLA พิล์ม โดยการส่อง ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

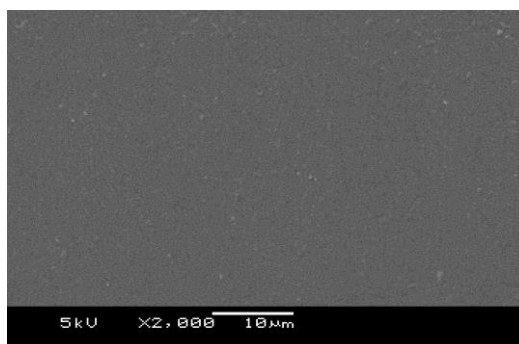
ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของ PLA พิล์ม ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ด้วยกำลังขยาย 2,000 เท่า (ภาพที่ 4.3) โดยคัดเลือกชุดปรับสภาพที่มีร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (% Weight loss) สูงที่สุดและลำดับรองลงมาศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว PLA พิล์ม ได้แก่ ชุดปรับสภาพด้วย NaOH 0.67 โมลาร์ ที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง (ก) ให้ %Weight loss สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 62.02 และลำดับรองลงมาคือชุดปรับสภาพ PLA ที่ความเข้มข้น NaOH 0.5 โมลาร์ ที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง (ข) ให้ %Weight loss เท่ากับร้อยละ 55.02 เปรียบเทียบกับชุดควบคุม PLA พิล์มก่อนการทดลอง (ค) ซึ่งผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและ %Weight loss มีความสอดคล้องกัน นั่นคือชุดทดลองที่ปรับสภาพด้วยต่างที่ความเข้มข้นสูงและมี %Weight loss สูง ส่งผลทำให้พื้นผิวของ PLA หลังการปรับสภาพมีลักษณะถูกกัดกร่อน ขรุขระมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม PLA พิล์มก่อนการทดลอง ที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ และไม่มีรอยขรุขระ



ก) ชุดปรับสภาพ PLA ด้วย NaOH 0.67 โมลาร์ ที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง



ข) ชุดปรับสภาพ PLA ที่ความเข้มข้น NaOH 0.5 โมลาร์ ที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง



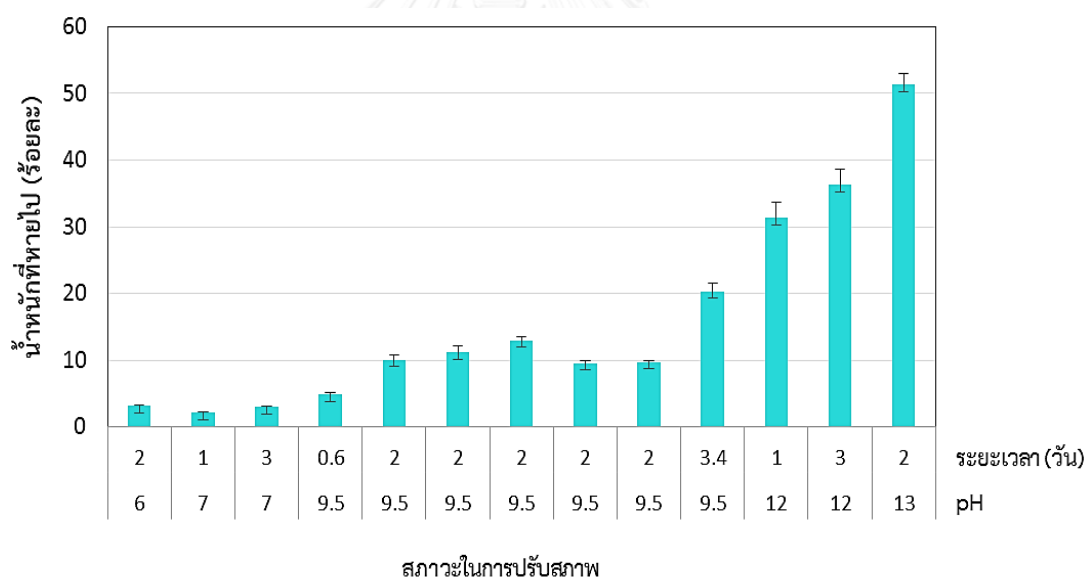
ค) PLA พิล์มก่อนการทดลอง

ภาพที่ 4.3 ลักษณะพื้นผิวของ PLA พิล์ม ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 2,000 เท่า

#### 4.2.2 ผลการศึกษาการปรับสภาพขั้นต้น PLA फिल्म โดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลาต่างๆ

##### 1) ผลการศึกษาร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (%Weight loss) ของ PLA फिल्म (ชุดที่ 2)

ผลการศึกษาร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (%Weight loss) จากการปรับสภาพ PLA फिल्म (ชุดที่ 2) โดยศึกษาปัจจัยพิเศษของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการปรับสภาพต่อการย่อยสลาย PLA फिल्म (ไม่มีการใช้ความร้อนร่วมด้วย) ทั้งหมด 13 ชุดทดลอง (ภาพที่ 4.4) พบว่า %Weight loss ของ PLA फिल्म มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เมื่อระดับ pH ของสารละลาย NaOH และระยะเวลาสูงขึ้น โดยพบว่าชุดทดลองที่มีระดับ pH สูงที่สุด ให้ %Weight loss สูงที่สุด เท่ากับร้อยละ 51.26 ได้แก่ ชุดปรับสภาพ PLA ที่ pH เท่ากับ 13 เป็นระยะเวลา 3 วัน ลำดับถัดมาคือชุดปรับสภาพ PLA ที่ pH เท่ากับ 12 เป็นระยะเวลา 3 วัน ให้ %Weight loss สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 36.28 แสดงให้เห็นว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้นไปช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลายของ PLA फिल्मได้

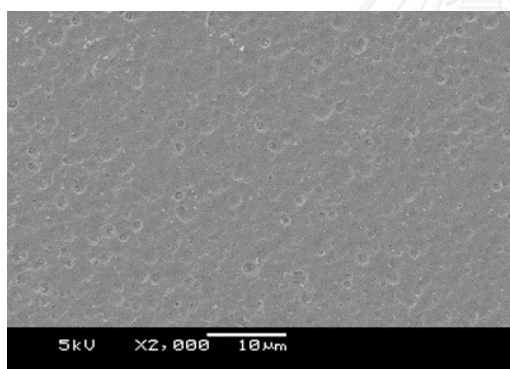


ภาพที่ 4.4 ร้อยละของน้ำหนักแห้งที่หายไปของ PLA फिल्मที่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะต่างๆ จาก (ชุดที่ 2)

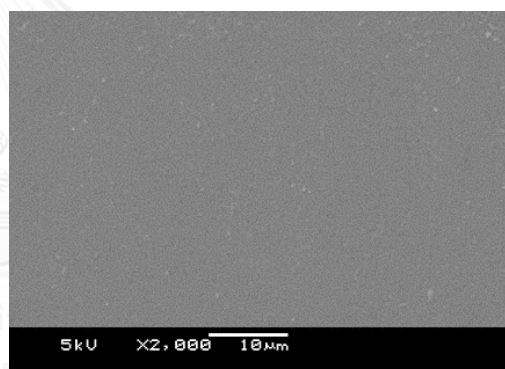


## 2) ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของ PLA फिल्म โดยการส่อง ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของ PLA फिल्म ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) ด้วยกำลังขยาย 2,000 เท่า จากชุดปรับสภาพที่ 2 (ภาพที่ 4.5) โดยคัดเลือกชุดปรับสภาพที่มีร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (%Weight loss) สูงที่สุด ได้แก่ ชุดปรับสภาพ PLA ที่ pH เท่ากับ 13 เป็นระยะเวลา 3 วัน ให้ %Weight loss สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 51.26 (ก) เปรียบเทียบกับชุดควบคุม PLA फिल्मก่อนการทดลอง (ข) ซึ่งผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของ PLA फिल्मหลังปรับสภาพ และ %Weight loss มีความสอดคล้องกัน และมีแนวโน้มเช่นเดียวกับชุดปรับสภาพที่ 1 นั่นคือชุดทดลองที่ปรับสภาพด้วยค่าความเข้มข้นสูงและมี %Weight loss สูง ส่งผลทำให้พื้นผิวของ PLA หลังการปรับสภาพมีลักษณะถูกกัดกร่อน ชรุขระมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม PLA फिल्मก่อนการทดลอง ที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบ และไม่มีรอยชรุขระ



ก) ชุดปรับสภาพ PLA ที่ pH เท่ากับ 13 เป็น  
ระยะเวลา 2 วัน



ข) PLA फिल्मก่อนการทดลอง

ภาพที่ 4.5 ลักษณะพื้นผิวของ PLA फिल्म ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ด้วยกำลังขยาย 2,000 เท่า

### 4.2.3 เปรียบเทียบผลการศึกษาการปรับสภาพขั้นต้น PLA फिल्मจากชุดที่ 1 และ 2

จากผลการศึกษาร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (%Weight loss) และการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของ PLA फिल्म ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าชุดปรับสภาพที่ 1 ที่ทำการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0 ถึง 0.5 โมลาร์ ระยะเวลา 0 ถึง 48 ชั่วโมง และอุณหภูมิ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส ชุดทดลองทั้งหมด 20 ชุด และชุดปรับสภาพที่ 2 ทำการปรับสภาพขั้นต้นพลาสติกชีวภาพชนิด PLA ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยทำการศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ pH 7-12 และระยะเวลา 1 - 3 วัน ชุดทดลองทั้งหมด 13 ชุด พบว่า

ผล %Weight loss และผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของ PLA พิล์ม มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน นั่นคือปัจจัยของระดับเข้มข้นของ NaOH มีผลมากกว่าปัจจัยของความร้อนและระยะเวลา โดยพบว่าที่ระดับ NaOH ความเข้มข้นสูงขึ้น จะส่งผลให้ %Weight loss และพื้นผิวของ PLA หลังการปรับสภาพมีลักษณะถูกกัดกร่อน ขรุขระมากขึ้น ซึ่งการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และความร้อนส่งผลให้ PLA ถูกไฮโดรไลซิสหรือเกิดการแตกของสายโซ่ของโมเลกุล PLA ทำให้มีโครงสร้างเล็กลง และผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้คือกรดแลคติกแอซิด (Tsuji และคณะ, 2006)

#### 4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีบีเอ็มพี

##### 4.3.1 ผลการศึกษา PLA พิล์ม ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และความร้อน

###### 1) ผลการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากผลการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA พิล์ม ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อนที่ระยะเวลาต่างๆ ทั้งหมด 20 ชุดทดลอง (ตารางที่ 4.2) พบว่าชุดทดลอง BMP ที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงที่สุด เมื่อสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 90 เท่ากับ 230.2 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยเริ่มต้น (L/KgVS<sub>added</sub>) คือชุดทดลองปรับสภาพ PLA พิล์ม ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.25 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 32.2 ชั่วโมง ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้สูงรองลงมาเท่ากับ 212.9 และ 168.3 L/KgVS<sub>added</sub> ได้แก่การปรับสภาพ PLA พิล์ม โดยใช้ความเข้มข้น NaOH 0.5 โมลาร์ ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 และ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้น NaOH อุณหภูมิ และระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาในการปรับสภาพเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องมาจากการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และความร้อนช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเมื่อเทียบกับการปรับสภาพด้วยน้ำและความร้อน ทำให้เกิดการกัดกร่อนที่ผิวหน้า PLA พิล์ม เพิ่มความเป็นรูพรุน (Porosity) มากขึ้น นอกจากนี้ขนาดของอนุภาคก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลด้วย ทำให้จุลินทรีย์และเอนไซม์สามารถเข้าย่อยสลาย PLA พิล์มได้ง่ายขึ้น (Chauliac, 2013)

จากตาราง ANOVA ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert (Trial version 9) เมื่อพิจารณาค่า Sum of Squares ของทั้ง 3 ปัจจัย พบว่าเมื่อเพิ่มปัจจัยของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลา ทำให้การผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น และการเพิ่มของระดับอุณหภูมิช่วยให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับ 2 ปัจจัยแรก และเมื่อพิจารณาค่า p-value ของปัจจัยความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ PLA พิล์มต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพพบว่ามีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แต่พบว่าค่า p-value ของปัจจัยอุณหภูมิมีค่ามากกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงให้เห็น

ว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการปรับสภาพ เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าการเปลี่ยนแปลงระดับ ปัจจัยของอุณหภูมิส่งผลต่อปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพอย่างไม่มีนัยสำคัญ นอกจากนี้ค่า Regression coefficients ( $R^2$ ) ของสมการทำนายเท่ากับ 0.8699 ซึ่งถือว่าสมการทำนายมีความเหมาะสมกับ ข้อมูล ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และ ระยะเวลา เป็นปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA फिल्म

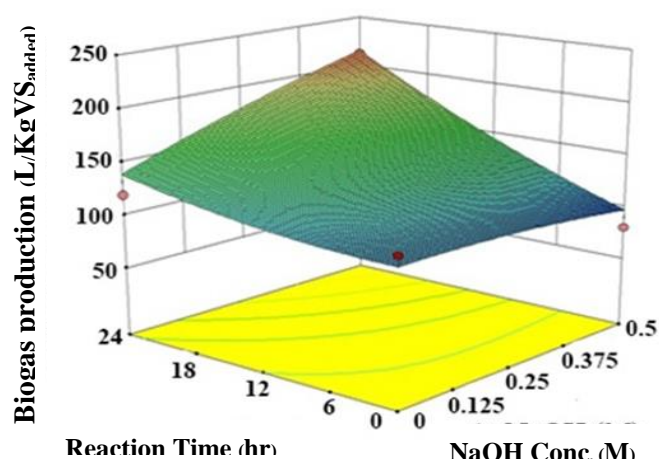
**ตารางที่ 4.2** ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (L/KgVS<sub>added</sub>) จากชุดทดลองปีเอ็มพีของชุดที่ 1 ซึ่งใช้ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร่วมกับความร้อนที่ระยะเวลาต่างๆ

ลำดับ	ชุดทดลองที่ 1			ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (L/KgVS <sub>added</sub> )
	NaOH (โมลาร์)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	
1	0.50	60.00	0.00	80.10±03.68
2	0.00	60.00	24.00	119.73±09.40
3	0.25	45.00	12.00	136.87±12.87
4	0.25	45.00	12.00	141.04±02.26
5	0.25	45.00	12.00	135.27±12.45
6	0.00	45.00	12.00	127.29±12.45
7	0.25	45.00	12.00	143.23±09.33
8	0.25	45.00	0.00	113.07±10.11
9	0.25	20.00	12.00	126.14±08.91
10	0.00	30.00	0.00	96.72±12.09
11	0.25	45.00	12.00	123.45±13.79
12	0.25	45.00	32.20	230.21±07.78
13	0.25	45.00	12.00	114.63±10.39
14	0.00	60.00	0.00	119.58±06.08
15	0.50	30.00	24.00	168.35±09.33
16	0.50	60.00	24.00	212.86±05.87
17	0.67	45.00	12.00	164.74±10.96
18	0.00	30.00	24.00	125.16±09.12
19	0.50	30.00	0.00	95.35±07.42
20	0.25	70.00	12.00	147.13±10.96
PLA ไม่ปรับสภาพ	-	-	-	58.28±0.49

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่อปริมาณก๊าซชีวภาพ (ชุดที่ 1)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F - value	p-value Prob > F
Model	21872.81	9	2430.31	7.43	0.0021
A-NaOH Conc.	2147.55	1	2147.55	6.57	0.0282
B-Reaction Time	11489.57	1	11489.57	35.14	0.0001
C-Temperature	492.40	1	492.40	1.51	0.2479
AB	3923.50	1	3923.50	12.00	0.0061
AC	17.47	1	17.47	0.053	0.8219
BC	123.87	1	123.87	0.38	0.5520
A <sup>2</sup>	140.84	1	140.84	0.43	0.5264
B <sup>2</sup>	460.49	1	460.49	1.41	0.2628
C <sup>2</sup>	143.77	1	143.77	0.44	0.5223
Residual	3269.81	10	326.98		
Lack of Fit	2653.97	5	530.79	4.31	0.0674
Pure Error	615.84	5	123.17		
Cor Total	25142.62	19			

การทดลองให้ผลในแนวเดียวกันเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ ระยะเวลา และอุณหภูมิในการปรับสภาพ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง พบว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลา ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอุณหภูมิ ส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.6 โดยมีความสัมพันธ์เชิงสมการ ดังสมการที่ 4.1

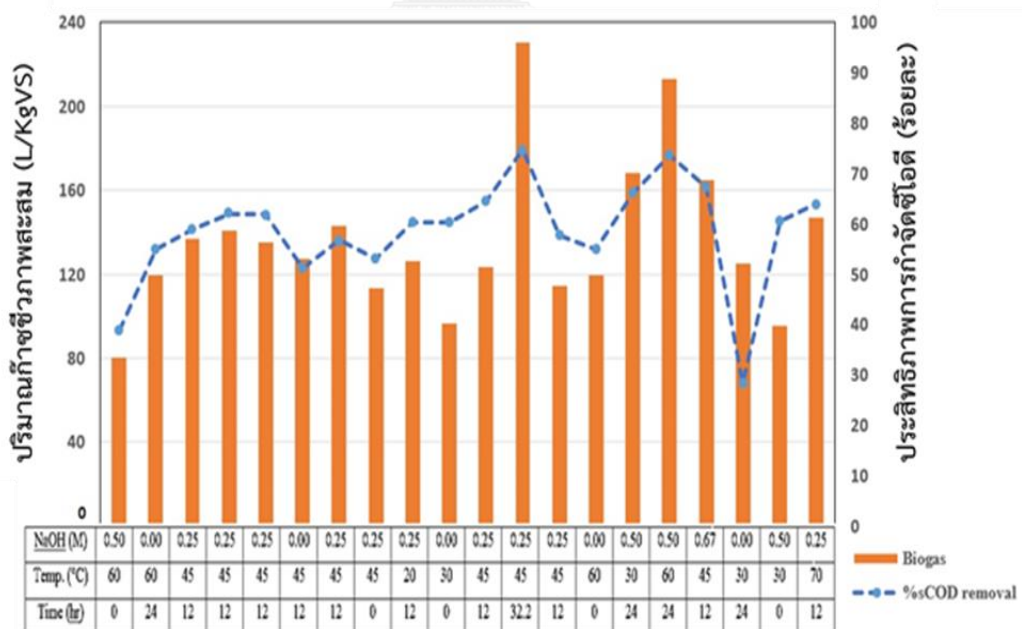


ภาพที่ 4.6 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของ PLA ฟิล์ม เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลา (ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)

$$\text{Biogas production (L/KgVSadded)} = 134.69 + 14.23 * \text{NaOH Conc.} + 6.03 * \text{Reaction time} + 32.93 * \text{Temperature} + 1.48 * \text{NaOH Conc.} * \text{Reaction time} + 22.15 * \text{NaOH Conc.} * \text{Temperature} + 3.94 * \text{Reaction time} * \text{Temperature} - 3.99 * \text{NaOH Conc.}^2 - 3.18 * \text{Reaction time}^2 + 7.20 * \text{Temperature}^2 \quad (4.1)$$

## 2) ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในรูปซีโอดีจากชุดที่ 1

จากการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA फिल्म ด้วยวิธีบีเอ็มพีของชุดที่ 1 แสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในภาพที่ 4.7 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและการผลิตก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มแปรผันตามกัน โดยพบว่าชุดทดลองที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์คือชุดปรับสภาพด้วย NaOH 0.25 โมลาร์ ที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 32.2 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 74.68 รองลงมาคือชุดปรับสภาพด้วย NaOH 0.5 โมลาร์ ที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับร้อยละ 73.70 โดยเปรียบเทียบกับชุด PLA फिल्म ที่ไม่ผ่านการสภาพ ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้เพียงร้อยละ 28.61 โดยจากผลการพบว่าที่อุณหภูมิเดียวกัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการปรับสภาพ จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงขึ้นด้วยเช่นกัน



ภาพที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของการทดลองบีเอ็มพี (ชุดที่ 1)

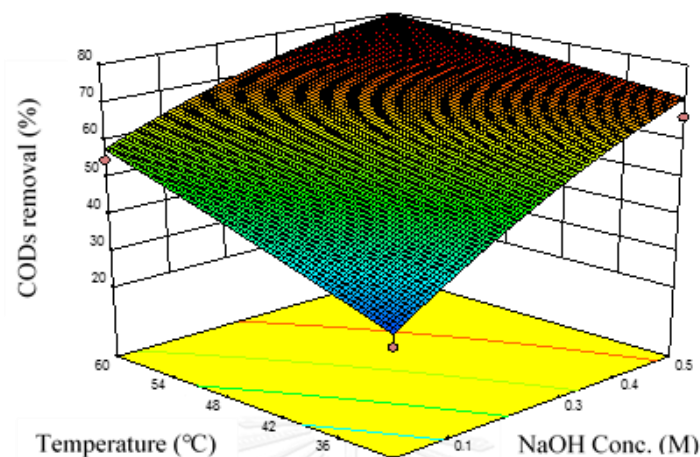
จากตาราง ANOVA (ตารางที่ 4.4) ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert (Trial version 9) ค่า p-value ของระดับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพ มีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่า Regression coefficients ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.8742 แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้น NaOH เป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ระดับความเข้มข้น NaOH ระยะเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง แสดงให้เห็นว่าการใช้ความเข้มข้น NaOH ระยะเวลา และอุณหภูมิในการปรับสภาพเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงขึ้น ดังที่แสดงในภาพที่ 4.8 โดยมีความสัมพันธ์เชิงสมการ ดังสมการที่ 4.2

$$\text{sCOD removal (\%)} = 60.12 + 6.27 * \text{NaOH Conc.} + 0.96 * \text{Reaction Time} + 3.21 * \text{Temperature} - 4.42 * \text{NaOH Conc.} * \text{Reaction Time} + 9.06 * \text{NaOH Conc.} * \text{Temperature} + 7.65 * \text{Reaction Time} * \text{Temperature} - 3.29 * \text{NaOH Conc.}^2 \quad (4.2)$$

**ตารางที่ 4.4** การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F - value	p-value Prob > F
Model	1869.67	9	207.74	7.72	0.0018
A-NaOH Conc.	417.22	1	417.22	15.50	0.0028
B-Reaction Time	108.82	1	108.82	4.04	0.0721
C-Temperature	12.60	1	12.60	0.47	0.5094
AB	657.06	1	657.06	24.41	0.0006
AC	155.93	1	155.93	5.79	0.0369
BC	467.53	1	467.53	17.37	0.0019
A <sup>2</sup>	95.75	1	95.75	3.56	0.0886
B <sup>2</sup>	2.25	1	2.25	0.084	0.7782
C <sup>2</sup>	2.22	1	2.22	0.083	0.7798
Residual	269.14	10	26.91	-	-
Lack of Fit	224.27	5	44.85	5.00	0.0510
Pure Error	44.87	5	8.97	-	-
Cor Total	2138.82	19	-	-	-

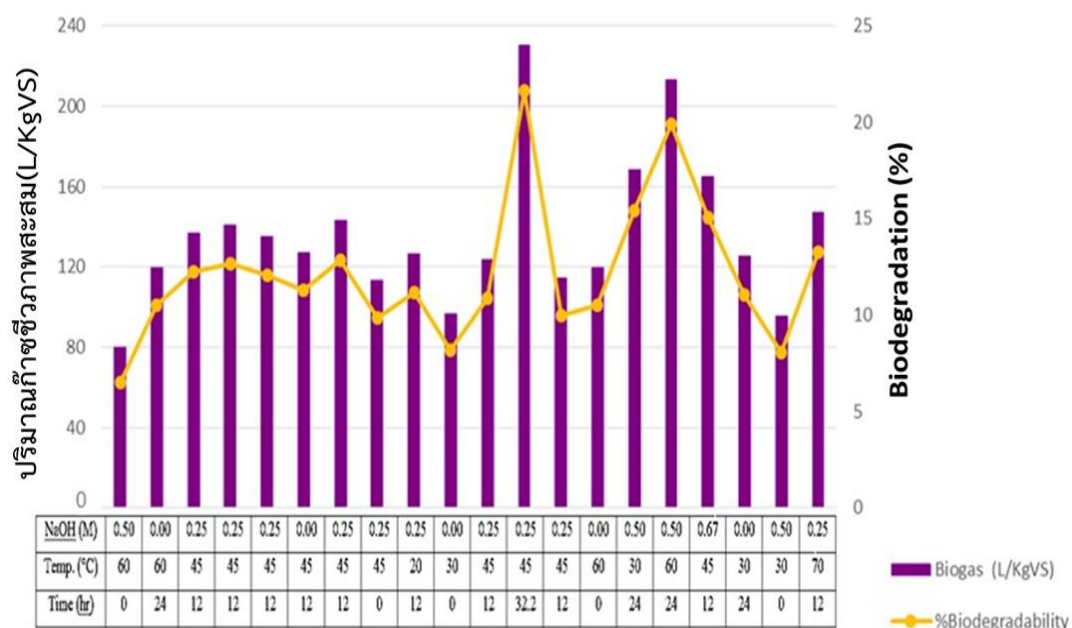


ภาพที่ 4.8 ประสิทธิภาพกำจัดซีโอดีของ PLA फिल्म เมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และอุณหภูมิ (ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง)

### 3) ประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพจากชุดที่ 1

จากการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (% Biodegradability) ของพลาสติกชีวภาพชนิด PLA ในรูปฟิล์ม พบว่าจากการทดสอบด้วยวิธีบีเอ็มพี ของชุดที่ 1 ดังแสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพในภาพที่ 4.9 พบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ การกำจัดซีโอดี และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมีแนวโน้มแปรผันตามกัน ซึ่งชุดทดลองที่มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมและเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีสูงสุด จะมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงที่สุดด้วย ได้แก่ ชุดทดลองปรับสภาพโดยใช้ NaOH 0.25 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 32.2 ชั่วโมง มี %Biodegradability เท่ากับร้อยละ 21.62 ในขณะที่ชุดควบคุม PLA ฟิล์มที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ มี %Biodegradability เพียงร้อยละ 4.32

จากตาราง ANOVA (ตารางที่ 4.5) ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert ( Trial version 9) ค่า p-value ของระดับความเข้มข้น NaOH ระยะเวลาในการปรับสภาพ มีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แต่การเปลี่ยนแปลงปัจจัยของอุณหภูมิมีค่า p-value มากกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่า Regression coefficients ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.8699 แสดงให้เห็นว่าระดับความเข้มข้น NaOH และระยะเวลา เป็นปัจจัยมีผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA ฟิล์ม อย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradability) ของชุดการทดลองปีเอ็มพี (ชุดที่ 1)

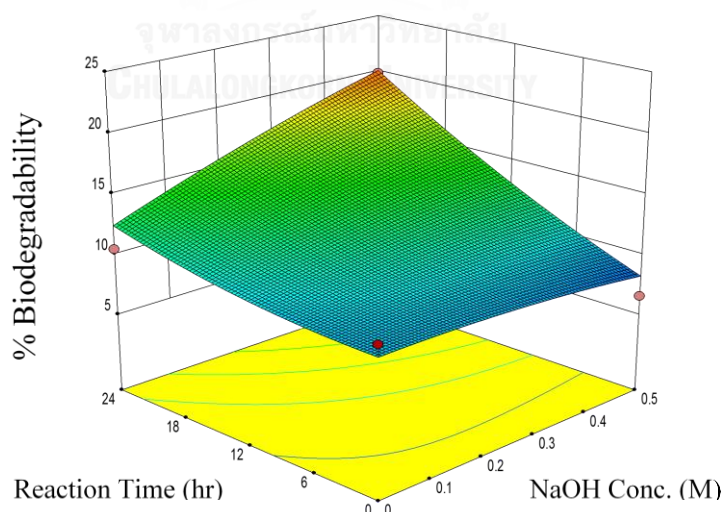
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของระดับความเข้มข้น NaOH ระยะเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง พบว่าการเพิ่มระยะเวลาในการปรับสภาพพร้อมกับการใช้ต่างและอุณหภูมิ จะมีแนวโน้มในการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.10 โดยมีความสัมพันธ์เชิงสมการ ดังสมการที่ 4.3

$$\text{Biodegradability (\%)} = 12.01 + 1.43 * \text{NaOH Conc.} + 0.61 * \text{Reaction Time} + 3.31 * \text{Temperature} + 0.15 * \text{NaOH} * \text{Reaction Time} + 2.23 * \text{NaOH Conc.} * \text{Reaction Time} + 0.40 * \text{Reaction Time} * \text{Temperature} - 0.40 * \text{NaOH Conc.}^2 - 0.32 * \text{Reaction Time}^2 + 0.72 * \text{Temperature}^2 \quad (4.3)$$



ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (%Biodegradability)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F – value	p-value Prob > F
Model	221.38	9	24.60	7.43	0.0021
A-NaOH Conc.	21.74	1	21.74	6.57	0.0282
B-Reaction Time	116.29	1	116.29	35.14	0.0001
C-Temperature	4.98	1	4.98	1.51	0.2479
AB	39.71	1	39.71	12.00	0.0061
AC	0.18	1	0.18	0.053	0.8219
BC	1.25	1	1.25	0.38	0.5520
A <sup>2</sup>	1.43	1	1.43	0.43	0.5264
B <sup>2</sup>	4.66	1	4.66	1.41	0.2628
C <sup>2</sup>	1.46	1	1.46	0.44	0.5223
Residual	33.09	10	3.31	-	-
Lack of Fit	26.86	5	5.37	4.31	0.0674
Pure Error	6.23	5	1.25	-	-
Cor Total	254.47	19	-	-	-



ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA फिल्मเมื่อปรับเปลี่ยนความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลา (ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส)

4) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพพลาสติกชีวภาพชนิด PLA  
ฟิล์ม โดยหลักการพื้นผิวตอบสนอง (ชุดที่ 1)

ตารางที่ 4.6 ค่าตอบสนองที่ใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพพลาสติกชีวภาพชนิด PLA ฟิล์มโดยได้จากการทดลองด้วยวิธีพีเอ็มพี (ชุดที่ 1)

ชุดที่	NaOH (โมลาร์)	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (ชม.)	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (L/KgVSadded)	ประสิทธิภาพ การกำจัดซีโอดี (%)	ประสิทธิภาพการ ย่อยสลายทาง ชีวภาพ (%)
1	0.50	60.00	0.00	80.10±03.68	38.84±03.68	06.52±0.37
2	0.00	60.00	24.00	119.73±09.40	54.85±10.86	10.51±0.95
3	0.25	45.00	12.00	136.87±12.87	58.88±04.22	12.23±1.29
4	0.25	45.00	12.00	141.04±02.26	62.01±06.29	12.65±0.23
5	0.25	45.00	12.00	135.27±12.45	61.96±06.29	12.07±1.30
6	0.00	45.00	12.00	127.29±12.45	51.17±04.83	11.27±1.25
7	0.25	45.00	12.00	143.23±09.33	56.69±04.87	12.87±0.94
8	0.25	45.00	0.00	113.07±10.11	53.08±04.99	09.84±1.02
9	0.25	20.00	12.00	126.14±08.91	60.33±07.31	11.15±0.90
10	0.00	30.00	0.00	96.72±12.09	60.36±07.31	08.19±1.22
11	0.25	45.00	12.00	123.45±13.79	64.55±02.90	10.88±1.39
12	0.25	45.00	32.20	230.21±07.78	74.68±01.43	21.62±0.78
13	0.25	45.00	12.00	114.63±10.39	57.83±01.06	09.99±1.05
14	0.00	60.00	0.00	119.58±06.08	55.00±05.57	10.49±0.61
15	0.50	30.00	24.00	168.35±09.33	66.14±06.03	15.40±0.94
16	0.50	60.00	24.00	212.86±05.87	73.70±02.92	19.87±0.59
17	0.67	45.00	12.00	164.74±10.96	67.39±02.73	15.03±1.10
18	0.00	30.00	24.00	125.16±09.12	28.39±02.90	11.05±0.92
19	0.50	30.00	0.00	95.35±07.42	60.62±1.78	8.05±8.05
20	0.25	70.00	12.00	147.13±10.96	64.04±5.43	13.26±1.10

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพ โดยใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ซึ่งออกแบบการทดลองแบบประสมส่วนกลาง (Central Composite Design: CCD) โดยโปรแกรม Design Expert (Trial version 9) เพื่อศึกษาผลของปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ ระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ระยะเวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพ PLA ฟิล์ม ก่อนนำไปทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยการวัดปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ (L/KgVS<sub>added</sub>) เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี และการ

ย่อยสลายทางชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี ในหัวข้อ 4.3.1 มาใช้เป็นค่าตอบสนองที่ป้อนกลับเข้าไปในโปรแกรม (ตารางที่ 4.6)

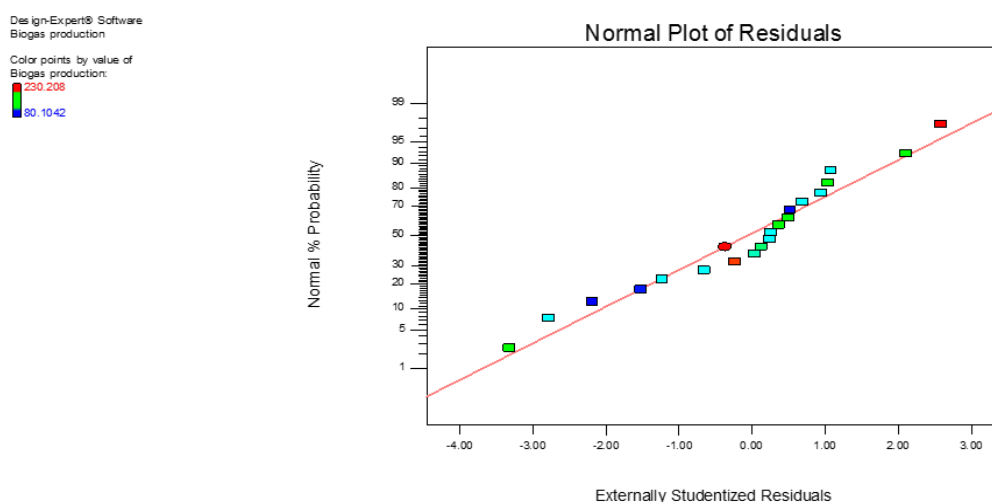
เมื่อนำค่าตอบสนองที่ได้จากทดลองไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ด้วยสมการถดถอยกำลังสอง (Quadratic model) ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยด้วยสมการกำลังหนึ่ง (First order) และสมการกำลังสอง (Second order) (Jim Frost, 2013)

### การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพข้อมูล ประกอบไปด้วยขั้นตอน ดังนี้ (ก) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal plot) (ข) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน และ (ค) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เมื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพและการผลิตก๊าซชีวภาพของ PLA พิล์ม โดยชุดทดลองปรับสภาพชุดที่ 1 ทั้งหมด 20 ชุดทดสอบ จึงนำผลการทดลองที่ได้มาตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ ด้วยการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง หากข้อมูลมีความเหมาะสม หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square:  $R^2$ )

#### (ก) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal plot)

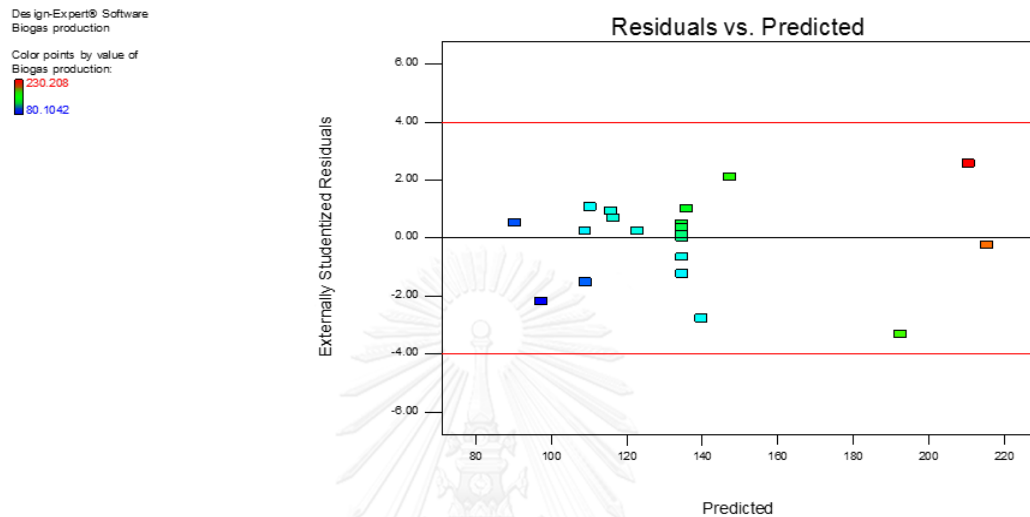
การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ เป็นการพิจารณาส່วนตกค้างของข้อมูล (Residuals) ว่ามีการกระจายแบบแจกแจงปกติหรือไม่ โดยหากมีการกระจายแบบแจกแจงปกติค่าส่วนตกค้างจะมีการกระจายตัวเป็นแนวเส้นตรง ซึ่งจากภาพที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างจากการทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพมีการกระจายตัวเป็นแนวเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 4.11 กราฟการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal plot)

### (ข) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

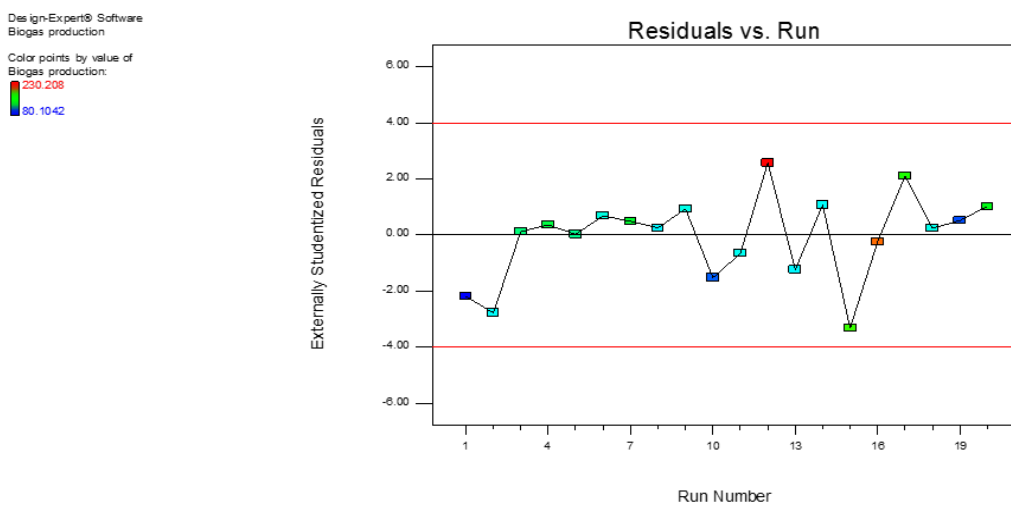
ภาพการกระจายของส่วนตกค้างในแต่ละระดับปัจจัย สามารถนำมาตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนได้ ดังภาพที่ 4.12 จากผลการทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดปรับสภาพ PLA फिल्मชุดที่ 1 พบว่าส่วนตกค้างกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในแกนบวกและลบ ซึ่งสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพที่ 4.12 การกระจายส่วนตกค้างในแต่ละชุดทดลอง

### (ค) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล สามารถทำได้โดยการสังเกตการณ์กระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนภาพว่ามีรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกันหรือไม่ จากผลการทดลองส่วนตกค้างที่ได้จากการผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดปรับสภาพ PLA फिल्म ชุดที่ 1 (ดังภาพที่ 4.13) พบว่าค่าส่วนตกค้างมีลักษณะที่ไม่แน่นอน ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน แสดงว่ามีความเป็นอิสระของข้อมูล



ภาพที่ 4.13 การกระจายของส่วนตกค้างกับลำดับชุดทดลอง

### (ง) ค่าความแปรปรวน (Analysis of variance)

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of variance) เป็นวิธีตรวจสอบการแปรผันของแบบจำลองที่มีการแจกแจงแบบปกติ โดยจากผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดปรับสภาพ PLA फिल्मชุดที่ 1 จากตารางที่ 4.7 พบว่าค่า P-value ของปัจจัยความเข้มข้น NaOH และระยะเวลาในการปรับสภาพมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดที่พื้นผิวตอบสนอง ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการแบบจำลองกำลังสองสำหรับทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพได้

ตารางที่ 4.7 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปริมาณก๊าซชีวภาพจากชุดที่ 1

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F - value	p-value Prob > F
Model	21872.81	9	2430.31	7.43	0.0021
A-NaOH Conc.	2147.55	1	2147.55	6.57	0.0282
B-Reaction Time	11489.57	1	11489.57	35.14	0.0001
C-Temperature	492.40	1	492.40	1.51	0.2479
AB	3923.50	1	3923.50	12.00	0.0061
AC	17.47	1	17.47	0.053	0.8219
BC	123.87	1	123.87	0.38	0.5520
A <sup>2</sup>	140.84	1	140.84	0.43	0.5264
B <sup>2</sup>	460.49	1	460.49	1.41	0.2628
C <sup>2</sup>	143.77	1	143.77	0.44	0.5223
Residual	3269.81	10	326.98		
Lack of Fit	2653.97	5	530.79	4.31	0.0674
Pure Error	615.84	5	123.17		
Cor Total	25142.62	19			

### (จ) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ

การตรวจสอบตัวแบบหรือสมการพยากรณ์ว่ามีความเหมาะสมสำหรับการไปใช้กับข้อมูลชุดนั้นๆหรือไม่ โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) หรือค่า R-Squared ถ้าหากค่า R-Squared ยังมีค่าเปอร์เซ็นต์มาก หมายความว่าตัวแบบสามารถคำนวณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าสังเกตมาก ในทางทฤษฎีถ้าตัวแบบสามารถอธิบายความแปรปรวนได้เท่ากับ 100%

หมายความว่า ค่าที่คำนวณได้จากสมการพยากรณ์จะมีค่าเท่ากับค่าที่สังเกตได้ ดังนั้นค่าข้อมูลที่สังเกตได้จะอยู่บนเส้นตรงของตัวแบบคณิตศาสตร์ทุกจุด

จากผลการวิเคราะห์ ในตารางที่ 4.8 พบว่าค่า R-Squared มีค่าเท่ากับ 0.8699 หมายความว่าตัวแปรอิสระ (ระดับความเข้มข้น NaOH ระยะเวลา และอุณหภูมิ) สามารถอธิบายความผันแปรหรือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม (ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม) ได้ร้อยละ 86.99 แสดงว่าแบบจำลองสามารถนำไปสร้างสมการเพื่อทำนายค่าผลตอบได้อย่างถูกต้องและมีความเหมาะสม

#### 5) การสร้างสมการทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพจากการปรับสภาพ PLA พิล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อนที่ระยะเวลาต่างๆ (ชุดที่ 1)

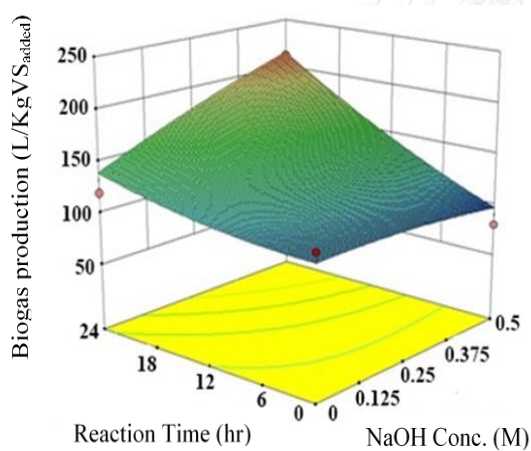
การสร้างสมการทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพจากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยมาเขียนให้อยู่ในรูปสมการ (ตารางที่ 4.8) และเมื่อพิจารณาค่า p-value ของ lack of fit ของสมการทำนายค่าตอบสนองทั้ง 2 ค่า ในตารางที่ 4.7 พบว่ามีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงให้เห็นจากสมการที่สร้างขึ้น ค่า lack of fit ที่ได้ไม่มีนัยสำคัญ สามารถอธิบายได้ว่าแบบจำลองนี้มีความเหมาะสมที่นำไปใช้

ตารางที่ 4.8 สมการและค่าทางสถิติที่ได้จากโปรแกรม

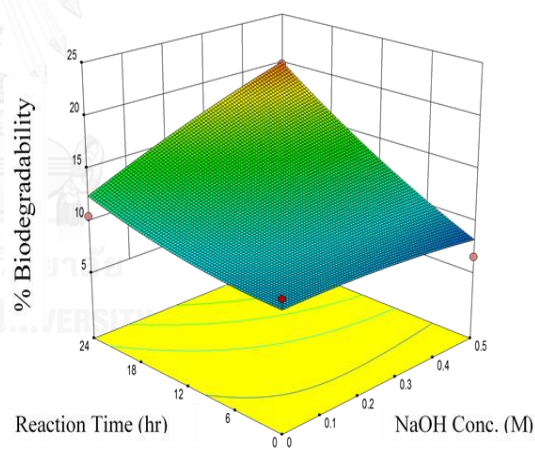
	Model Equations	R <sup>2</sup>	Adj R <sup>2</sup>	p-value
ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (L/KgVSadded)	$134.69 + 14.23 * \text{NaOH Conc.} + 6.03 * \text{Reaction time} + 32.93 * \text{Temperature} + 1.48 * \text{NaOH Conc.} * \text{Reaction time} + 22.15 * \text{NaOH Conc.} * \text{Temperature} + 3.94 * \text{Reaction time} * \text{Temperature} - 3.99 * \text{NaOH Conc.}^2 - 3.18 * \text{Reaction time}^2 + 7.20 * \text{Temperature}^2$	0.8699	0.7529	0.0021
Biodegradability (%)	$12.01 + 1.43 * \text{NaOH Conc.} + 0.61 * \text{Reaction Time} + 3.31 * \text{Temperature} + 0.15 * \text{NaOH} * \text{Reaction Time} + 2.23 * \text{NaOH Conc.} * \text{Reaction Time} + 0.40 * \text{Reaction Time} * \text{Temperature} - 0.40 * \text{NaOH Conc.}^2 - 0.32 * \text{Reaction Time}^2 + 0.72 * \text{Temperature}^2$	0.8699	0.7529	0.0021

6) การสร้างพื้นผิวตอบสนองของปริมาณก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพจากการปรับสภาพ PLA พิล์ม ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อนที่ระยะเวลาต่างๆ (ชุดที่ 1)

สมการทำนายที่ได้จากข้อ 5 ถูกนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองปริมาณก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลาย ดังภาพที่ 4.14 พบว่าเมื่อมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน เนื่องจากประสิทธิภาพการย่อยสลายของ PLA พิล์มได้มาจากการคำนวณด้วยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ดังนั้นจะพบว่าเมื่อปรับสภาพ PLA พิล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยระยะเวลาที่นานขึ้น จะสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพได้ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือความร้อนจะช่วยเสริมให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย จากผลการสร้างสมการทำนายพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพจะสูงที่สุดเมื่อปรับสภาพ PLA ด้วย NaOH 0.5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยให้ก๊าซชีวภาพจากการทำนายสูงสุดเท่ากับ 215.48 L/KgVS<sub>added</sub>



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.14 พื้นผิวตอบ (ก) ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ข) ประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Experimental) และค่าที่ได้จากสมการ (Predicted)

ชุด ที่	สภาวะการปรับสภาพ			ค่าตอบสนองต่อปัจจัย					
	NaOH (โมลาร์)	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (ชม.)	Biogas production (L/KgVSadded)		sCOD removal (%)		Biodegradability (%)	
				ค่าเฉลี่ยจากการ ทดลอง	สมการ ทำนาย	ค่าเฉลี่ยจากการ ทดลอง	สมการ ทำนาย	ค่าเฉลี่ยจาก การทดลอง	สมการ ทำนาย
1	0.50	60.00	0.00	80.10±03.68	97.44	38.84±03.68	39.72	06.52±0.37	8.26
2	0.00	60.00	24.00	119.73±09.40	139.76	54.85±10.86	57.74	10.51±0.95	12.52
3	0.25	45.00	12.00	136.87±12.87	134.69	58.88±04.22	60.12	12.23±1.29	12.01
4	0.25	45.00	12.00	141.04±02.26	134.69	62.01±06.29	60.12	12.65±0.23	12.01
5	0.25	45.00	12.00	135.27±12.45	134.69	61.96±06.29	60.12	12.07±1.30	12.01
6	0.00	45.00	12.00	127.29±12.45	99.47	51.17±04.83	40.27	11.27±1.25	8.47
7	0.25	45.00	12.00	143.23±09.33	134.69	56.69±04.87	60.12	12.87±0.94	12.01
8	0.25	45.00	0.00	113.07±10.11	99.67	53.08±04.99	54.72	09.84±1.02	8.48
9	0.25	20.00	12.00	126.14±08.91	115.55	60.33±07.31	58.51	11.15±0.90	10.08
10	0.00	30.00	0.00	96.72±12.09	109.10	60.36±07.31	58.68	08.19±1.22	9.44
11	0.25	45.00	12.00	123.45±13.79	134.69	64.55±02.90	60.12	10.88±1.39	12.01
12	0.25	45.00	32.20	230.21±07.78	210.45	74.68±01.43	65.52	21.62±0.78	19.61
13	0.25	45.00	12.00	114.63±10.39	134.69	57.83±01.06	60.12	09.99±1.05	12.01
14	0.00	60.00	0.00	119.58±06.08	110.32	55.00±05.57	54.14	10.49±0.61	9.56
15	0.50	30.00	24.00	168.35±09.33	207.21	66.14±06.03	75.37	15.40±0.94	19.30
16	0.50	60.00	24.00	212.86±05.87	215.48	73.70±02.92	79.67	19.87±0.59	20.14
17	0.67	45.00	12.00	164.74±10.96	147.34	67.39±02.73	61.36	15.03±1.10	13.28
18	0.00	30.00	24.00	125.16±09.12	122.78	28.39±02.90	31.68	11.05±0.92	10.80
19	0.50	30.00	0.00	95.35±07.42	207.21	60.62±1.78	75.37	8.05±8.05	19.30
20	0.25	70.00	12.00	147.13±10.96	135.84	64.04±5.43	61.73	13.26±1.10	12.13

จากตารางที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง (Experimental) และค่าที่ได้จากสมการ (Predicted) พบว่าได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน

### 7) การเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ (Optimization) จากชุดที่ 1

Optimization เป็นการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่อค่าตอบสนองโดยการใช้หลักการพื้นผิวตอบสนองมาช่วยในการคัดเลือกสภาวะที่ดีที่สุดในการปรับสภาพ PLA ฟิล์ม ซึ่งใช้ฟังก์ชัน Optimization ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ Design Expert และใช้วัดความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Desirability) โดยในส่วนของงานวิจัยนี้สนใจค่าตอบสนอง (ปริมาณก๊าซชีวภาพ และประสิทธิภาพการย่อยสลาย) สูงสุด โดยมีปัจจัย (ระดับความเข้มข้น NaOH ระยะเวลา และ



อุณหภูมิ) ซึ่งโปรแกรมจะประมวลผลจากสมการก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลาย (ตารางที่ 8) จึงสามารถคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดได้ดังตารางที่ 4.10

**ตารางที่ 4.10** สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ PLA फिल्म (ชุดที่ 1) จากโปรแกรม Design Expert

NaOH (โมลาร์)	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (°C)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (L/KgVS <sub>added</sub> )	ประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (%)	ค่าความพึงพอใจ (Desirability)
0.5	24	60	215.48	20.14	0.904

ผลการทดสอบการปรับสภาพ PLA फिल्म ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อน (ชุดที่ 1) โดยมีปัจจัยที่ต้องการศึกษา 3 ปัจจัย ได้แก่ ระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ระยะเวลา และอุณหภูมิหรือความร้อน ซึ่งพารามิเตอร์ชี้วัดหรือค่าตอบสนองที่เป็นตัวแปรตามคือ ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม และประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (% Biodegradability) จะมีค่าสูงสุด เมื่อปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 0.5 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง โดยให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสะสมและ %Biodegradability สูงสุดเท่ากับ 215.48 L/KgVS<sub>added</sub> และ 20.14% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 0.904 แสดงว่าผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจ

จากการทดลองการปรับสภาพ PLA फिल्म ด้วยชุดปรับสภาพที่ 1 เป็นการนำเพียง PLA फिल्म ที่ผ่านการปรับสภาพ (ไม่ใช่สารละลายต่างที่ผ่านปรับสภาพ) มาศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและย่อยสลายทางชีวภาพเท่านั้น โดยมีสมมติฐานว่า PLA फिल्मจะถูกย่อยสลายได้ในระยะเวลาที่สั้นลงและให้ก๊าซชีวภาพได้ เนื่องจากพื้นผิวของฟิล์มที่เปลี่ยนไปทำให้ง่ายต่อการเข้าย่อยสลายด้วยเอนไซม์จากแบคทีเรีย แต่จากผลการทดลองปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมความร้อนพบว่าน้ำหนักแห้งของ PLA หลังจากการปรับสภาพ ลดลงสูงสุดถึง 62.02% เมื่อปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.67 โมลาร์ ที่ 45 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง และหลังจากปรับสภาพสารละลาย NaOH มีค่า pH ลดลง จึงเป็นที่น่าสนใจว่าสารละลาย NaOH ที่ผ่านการปรับสภาพจะละลายกรดแลคติกที่เป็นมอนอเมอร์ของ PLA ออกมาอยู่ในรูปสารละลาย ซึ่งยืนยันได้ด้วยผลการทดสอบร้อยละของน้ำหนักแห้งของ PLA ที่ลดลงจากการปรับสภาพสูงสุดถึงร้อยละ 62.02 (ข้อ 4.2) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาต่อโดยการใช้สารละลาย NaOH ที่ผ่านการปรับสภาพแล้วมาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและย่อยสลายทางชีวภาพต่อไป

#### 4.3.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากPLA พิล์ม ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ชุดที่ 2)

##### 1) ผลการผลิตก๊าซชีวภาพ

ในการทดลองปรับสภาพ PLA พิล์มในชุดที่ 2 ต้องการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระยะต่างๆ โดยใช้สารละลายต่างที่ผ่านการปรับสภาพพร้อมด้วย (อัตราส่วนเท่ากับ PLA พิล์ม 1 กรัมต่อสารละลาย NaOH ปริมาตร 5 มล.) ในส่วนการทดลองนี้จะไม่นำปัจจัยเรื่องความร้อนเข้ามาศึกษาด้วย เนื่องจากผลการทดลองในข้อ 4.3.1 พบว่าอุณหภูมิไม่มีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ดังนั้นการทดลองนี้จึงศึกษาเพียง 2 ปัจจัย คือค่าพีเอช (7-12) และระยะในการปรับสภาพ (1-3 วัน) แปรผันรวมทั้งหมด 13 ชุดทดลอง จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.11 พบว่าชุดทดลอง BMP มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงที่สุด คือชุดทดลองที่มีค่าพีเอช สูงที่สุด ได้แก่ ชุดปรับสภาพที่ 13 ซึ่งปรับสภาพ PLA พิล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่พีเอชเท่ากับ 13 เป็นระยะเวลา 2 วัน (เนื่องจากการออกแบบชุดทดลองแบบประสมส่วนกลาง จึงมีค่าคลอบคลุมปัจจัยที่เราสนใจ นั่นคือ ชุดปรับสภาพที่ค่าพีเอชเท่ากับ 13) เมื่อสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 65 เท่ากับ 443.3 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยเริ่มต้น ( $L/KgVS_{added}$ ) คือ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้สูงรองลงมาเท่ากับ 331.1 และ 277.1  $L/KgVS_{added}$  ได้แก่ ชุดทดลองปรับสภาพ PLA พิล์ม ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่พีเอชเท่ากับ 12 เป็นระยะเวลา 3 วัน และที่พีเอชเท่ากับ 9.5 เป็นระยะเวลา 3.4 วัน ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับชุด PLA พิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายต่างให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเพียง 43.89  $L/KgVS_{added}$  โดย Chauliac (2013) รายงานว่าอัตราการย่อยสลายของ PLA กลายเป็นกรดแลคติกในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงกว่าเมื่อเปรียบกับการใช้น้ำ ซึ่งจุลินทรีย์สามารถนำกรดแลคติกไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นด้วย

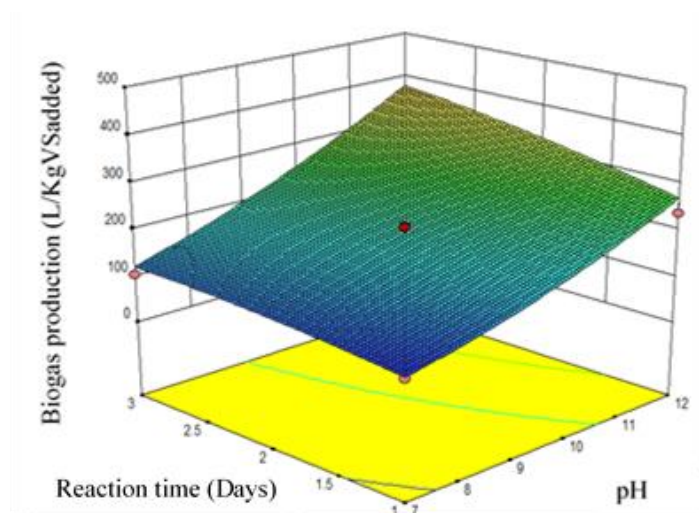
จากตารางที่ ANOVA ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert (Trial version 9) ค่า p-value ของระดับความเข้มข้นของสารละลายต่างที่ค่าพีเอชและระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ PLA พิล์ม มีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่า Regression coefficients ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9323 แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอช และระยะเวลาในการปรับสภาพเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อพิจารณาค่า Sum of Squares (SS) พบว่าปัจจัยของค่าพีเอชมีค่าสูงที่สุด รองลงมาคือปัจจัยของระยะเวลา จึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มระดับ pH และระยะเวลาของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพ PLA พิล์ม ส่งผลให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุด

ตารางที่ 4.11 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (L/KgVS<sub>added</sub>) จากชุดทดลองปีเอ็มพีของชุดที่ 2 ซึ่งใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ค่าพีเอชและระยะเวลาต่างๆ

ชุดทดลอง	ชุดทดลองปรับสภาพที่ 2		ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (L/KgVS <sub>added</sub> )
	ค่าพีเอช	ระยะเวลา (วัน)	
1	6.00	2.00	91.88
2	7.00	1.00	84.73
3	7.00	3.00	103.85
4	9.50	0.60	153.23
5	9.50	2.00	193.36
6	9.50	2.00	204.76
7	9.50	2.00	200.18
8	9.50	2.00	207.05
9	9.50	2.00	210.12
10	9.50	3.40	277.12
11	12.00	1.00	236.86
12	12.00	3.00	331.12
13	13.00	2.00	443.30
PLA (ไม่ปรับสภาพ)	-	-	43.89

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่อปริมาณก๊าซชีวภาพ (ชุดที่ 2)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F - value	p-value Prob > F
Model	1.108E+005	5	22164.76	19.29	0.0006
A-pH	95871.22	1	95871.22	83.45	< 0.0001
B-Reaction time	10387.45	1	10387.45	9.04	0.0197
AB	1411.65	1	1411.65	1.23	0.3043
A <sup>2</sup>	2483.77	1	2483.77	2.16	0.1849
B <sup>2</sup>	387.89	1	387.89	0.34	0.5794
Residual	8041.55	7	1148.79		
Lack of Fit	7870.49	3	2623.50	61.35	0.0008
Pure Error	171.06	4	42.77		
Cor Total	1.189E+005	12			



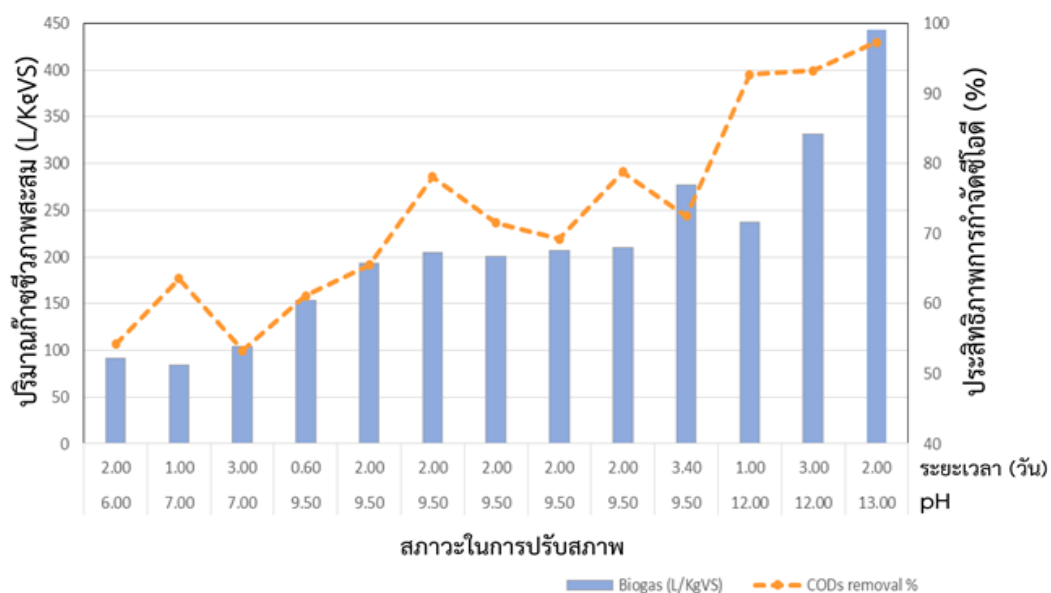
ภาพที่ 4.15 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของ PLA ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยนพีเอชและระยะเวลา

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยในชุดที่ 2 ได้แก่ ค่าพีเอชและระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง พบว่าเมื่อค่าพีเอชและระยะเวลาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงเพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.15 โดยมีความสัมพันธ์เชิงสมการ ดังสมการที่ 4.4

$$\text{Biogas production (L/Kg VSadded)} = 203.52 + 110.02v \cdot \text{pH} + 36.22 \cdot \text{Reaction Time} + 18.79 \cdot \text{pH} \cdot \text{Reaction Time} + 19.17 \cdot \text{pH}^2 - 7.58 \cdot \text{Reaction Time}^2 \quad (4.4)$$

## 2) ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในรูปซีโอดีจากชุดที่ 2

จากการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA ฟิล์ม ด้วยวิธีบีเอ็มพีของชุดที่ 2 ดังแสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีในภาพที่ 4.16 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและการผลิตก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มแปรผันตามกัน โดยพบว่าชุดทดลองที่ผ่านปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ค่าพีเอชสูงสุด มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุด นั่นคือชุดปรับสภาพด้วย NaOH ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 13 เป็นระยะเวลา 2 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 97.3 รองลงมาคือชุดปรับสภาพด้วย NaOH ที่ ค่าพีเอชเท่ากับ 12 ระยะเวลา 3 และ 1 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับร้อยละ 93.3 และ 92.7 ตามลำดับ โดยเปรียบเทียบกับชุด PLA ฟิล์ม ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีได้เพียงร้อยละ 11.92



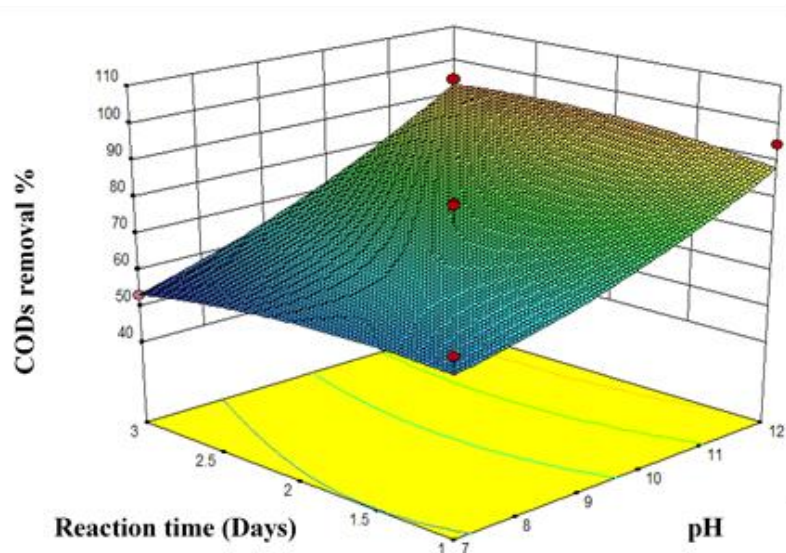
ภาพที่ 4.16 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองบีเอ็มพี (ชุดที่ 2)

จากตาราง ANOVA (ตารางที่ 4.13) ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert (Trial version 9) ค่า p-value ของ pH ของสารละลายต่าง มีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่า Regression coefficients ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9076 แสดงให้เห็นว่า pH ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในการปรับสภาพ PLA ฟิล์มเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

ตารางที่ 4.13 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F - value	p-value Prob > F
Model	2495.11	5	499.02	13.75	0.0017
A-pH	2307.48	1	2307.48	63.59	< 0.0001
B-Reaction time	0.40	1	0.40	0.011	0.9196
AB	27.10	1	27.10	0.75	0.4161
A <sup>2</sup>	90.82	1	90.82	2.50	0.1577
B <sup>2</sup>	50.68	1	50.68	1.40	0.2759
Residual	254.01	7	36.29		
Lack of Fit	122.84	3	40.95	1.25	0.4032
Pure Error	131.17	4	32.79		
Cor Total	2749.12	12			

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัย ได้แก่ ค่าพีเอชและระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง แสดงให้เห็นว่าเมื่อ pH ของสารละลาย NaOH และระยะเวลาในการปรับสภาพเพิ่มขึ้น มีแนวโน้มส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงขึ้น ดังที่แสดงในภาพที่ 4.17 โดยมีความสัมพันธ์เชิงสมการ ดังสมการที่ 4.5

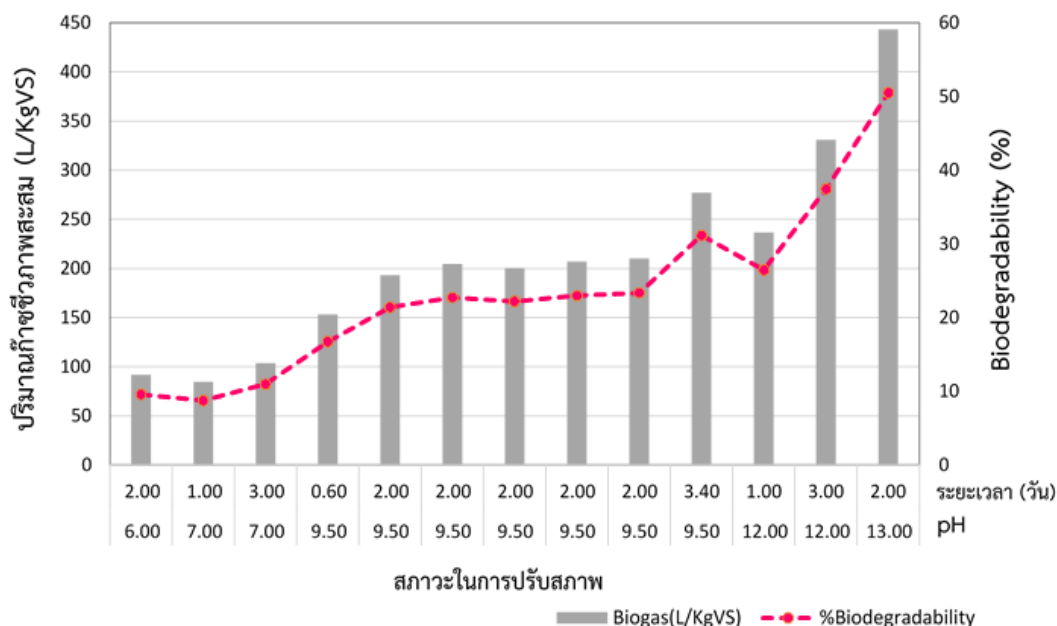


ภาพที่ 4.17 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของ PLA ร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยนพีเอชและระยะเวลา

$$\text{sCOD removal (\%)} = 72.59 + 17.07 * \text{pH} - 0.22 * \text{Reaction Time} + 2.60 * \text{pH} * \text{Reaction Time} + 3.67 * \text{pH}^2 - 2.74 * \text{Reaction Time}^2 \quad (4.5)$$

### 3) ประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพของชุดที่ 2

จากการทดลองการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (% Biodegradability) ของ PLA ฟิล์ม พบว่าจากการทดสอบด้วยวิธีบีเอ็มพีของชุดที่ 2 ดังแสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพในภาพที่ 4.18 พบว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพการกำจัดซีโอดี และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมีแนวโน้มแปรผันตามกัน ซึ่งชุดทดลองที่มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมและเปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดีสูงสุด จะมีประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงที่สุดด้วย ได้แก่ ชุดทดลองปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH ที่ ค่าพีเอชเท่ากับ 13 เป็นระยะเวลา 2 วัน ให้ผล %Biodegradability สูงสุดเท่ากับร้อยละ 50.5 ในขณะที่ชุดควบคุม PLA ฟิล์มที่ไม่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ มี %Biodegradability เพียงร้อยละ 3.99



ภาพที่ 4.18 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (%Biodegradability) ของชุดการทดลองบีเอ็มพี (ชุดที่ 2)

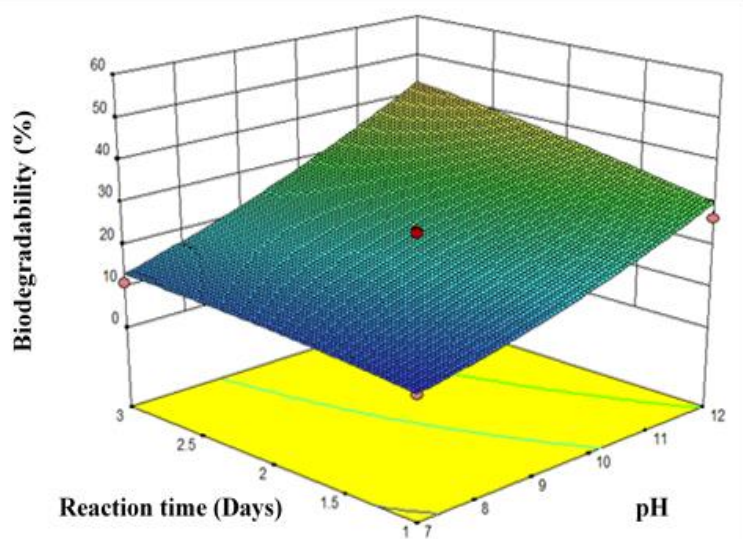
จากตาราง ANOVA (ตารางที่ 4.14) ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert ( Trial version 9) ค่า p-value ของปัจจัย pH และระยะเวลาในการปรับสภาพ มีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และค่า Regression coefficients ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9323 แสดงให้เห็นว่า pH และระยะเวลา เป็นปัจจัยมีผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA พิล์ม อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (%Biodegradability)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F – value	p-value Prob > F
Model	1502.67	5	300.53	19.29	0.0006
A-pH	1299.93	1	1299.93	83.45	< 0.0001
B-Reaction time	140.84	1	140.84	9.04	0.0197
AB	19.14	1	19.14	1.23	0.3043
A <sup>2</sup>	33.68	1	33.68	2.16	0.1849
B <sup>2</sup>	5.26	1	5.26	0.34	0.5794
Residual	109.04	7	15.58		
Lack of Fit	106.72	3	35.57	61.35	0.0008
Pure Error	2.32	4	0.58		
Cor Total	1611.70	12			

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของ ค่าพีเอชและระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ PLA फिल्म ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง พบว่าการเพิ่มระดับค่าพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการปรับสภาพ จะมีแนวโน้มในการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.19 โดยมีความสัมพันธ์เชิงสมการ ดังสมการที่ 4.6

$$\text{Biodegradability (\%)} = 22.58 + 12.81 * \text{pH} + 4.22 * \text{Reaction time} + 2.19 * \text{pH} * \text{Reaction time} + 2.23 * \text{pH}^2 - 0.88 * \text{Reaction time}^2 \quad (4.6)$$



ภาพที่ 4.19 ประสิทธิภาพการย่อยสลายของ PLA ร่วมกับ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อปรับเปลี่ยนพีเอชและระยะเวลา

#### 4) การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ PLA फिल्म โดยหลักการพื้นผิวตอบสนอง (ชุดที่ 2)

การศึกษหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพ โดยใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) ซึ่งออกแบบการทดลองแบบประสมส่วนกลาง (Central Composite Design: CCD) โดยโปรแกรม Design Expert (Trial version 9) เพื่อศึกษาผลของปัจจัย 2 ปัจจัย ได้แก่ ค่าพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาที่ใช้ในการปรับสภาพ PLA फिल्म ก่อนนำไปทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยการวัดปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ ( $L/KgVS_{added}$ ) เปอร์เซ็นต์การกำจัดซีโอดี และการย่อยสลายทางชีวภาพ ด้วยวิธีบีเอ็มพี นำผลการทดลองที่ได้มาใช้เป็นค่าตอบสนองที่ป้อนกลับเข้าไปในโปรแกรม (ตารางที่ 4.15) เมื่อนำค่าตอบสนองที่ได้จากทดลองไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัย ด้วย



สมการถดถอยกำลังสอง (Quadratic model) ซึ่งอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยด้วยสมการกำลังหนึ่ง (First order) และสมการกำลังสอง (Second order)

**ตารางที่ 4.15** ค่าตอบสนองที่ใช้ในการหาสถานะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ PLA ฟิล์มโดยได้จากการทดลองด้วยวิธีพีเอ็มพี (ชุดที่ 2)

ชุดทดลอง	ปัจจัย		ปริมาณก๊าซชีวภาพ (L/KgVSadded)	ประสิทธิภาพ การกำจัดซีโอดี (%)	ประสิทธิภาพการย่อย สลายทางชีวภาพ (%)
	pH	เวลา (วัน)			
1	6.00	2.00	91.88	54.23	9.58
2	7.00	1.00	84.73	63.60	8.75
3	7.00	3.00	103.85	53.28	10.98
4	9.50	0.60	153.23	61.13	16.73
5	9.50	2.00	193.36	65.55	21.40
6	9.50	2.00	204.76	78.12	22.73
7	9.50	2.00	200.18	71.53	22.19
8	9.50	2.00	207.05	69.19	22.99
9	9.50	2.00	210.12	78.78	23.35
10	9.50	3.40	277.12	72.50	31.15
11	12.00	1.00	236.86	92.71	26.46
12	12.00	3.00	331.12	93.26	37.44
13	13.00	2.00	443.30	97.30	50.50
PLA	-	-	43.89	11.92	3.99

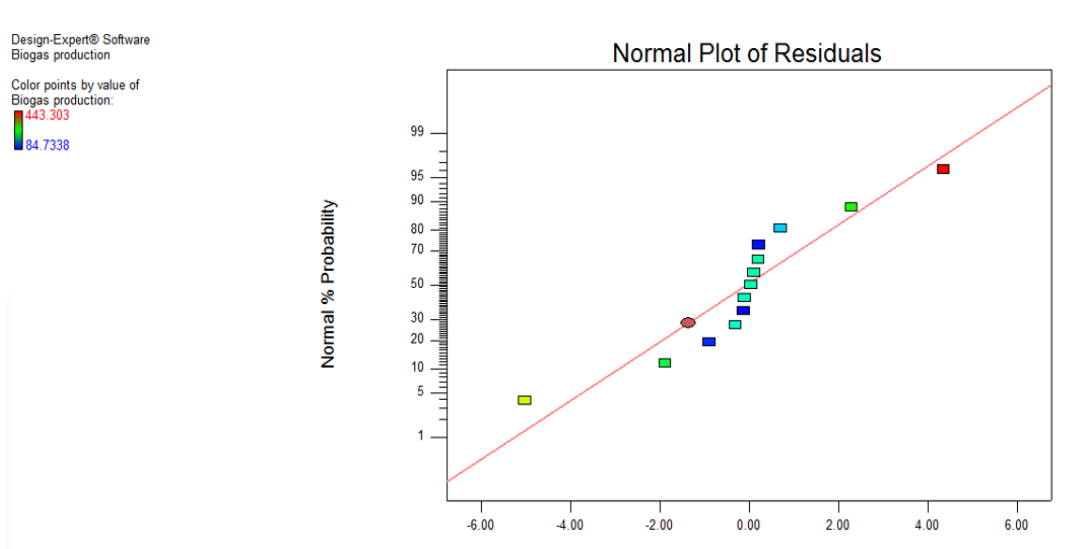
#### การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพข้อมูล ประกอบไปด้วยขั้นตอน ดังนี้ (ก) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal plot) (ข) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน และ (ค) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เมื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพและการผลิตก๊าซชีวภาพของ PLA ฟิล์ม โดยชุดทดลองปรับสภาพชุดที่ 1 ทั้งหมด 20 ชุดทดสอบ จึงนำผลการทดลองที่ได้มาตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลว่ามีความเหมาะสมหรือไม่ ด้วยการวิเคราะห์ความถูกต้องของแบบจำลอง หากข้อมูลมีความเหมาะสม หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square:  $R^2$ )

#### (ก) การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal plot)

การตรวจสอบการกระจายแบบแจกแจงปกติ เป็นการพิจารณาส่วนตกค้างของข้อมูล (Residuals) ว่ามีการกระจายแบบแจกแจงปกติหรือไม่ โดยหากมีการกระจายแบบแจกแจงปกติค่า

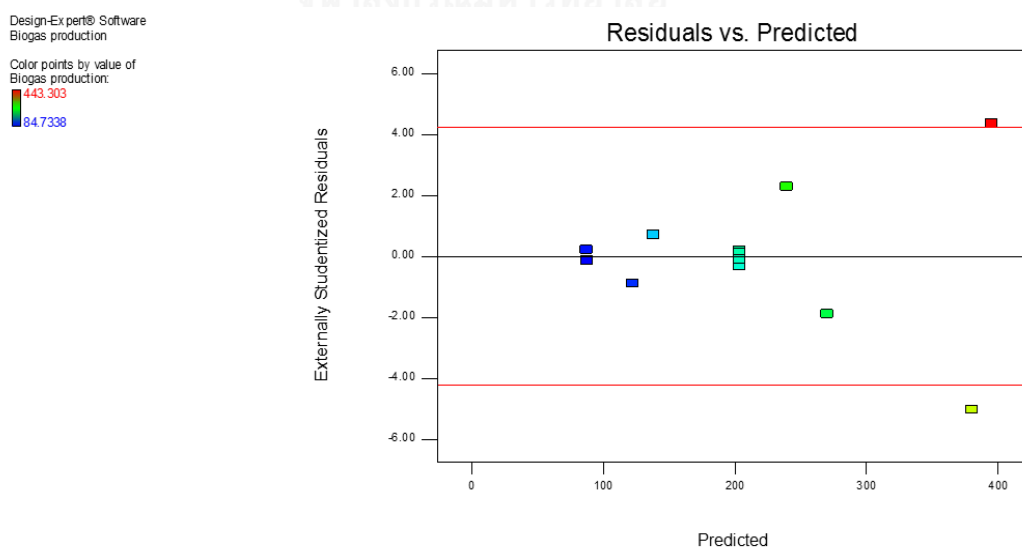
ส่วนตกค้างจะมีการกระจายตัวเป็นแนวเส้นตรง ซึ่งจากภาพที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างจากผลการทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพมีการกระจายตัวเป็นแนวเส้นตรง จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



ภาพที่ 4.20 กราฟการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal plot)

### (ข) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน

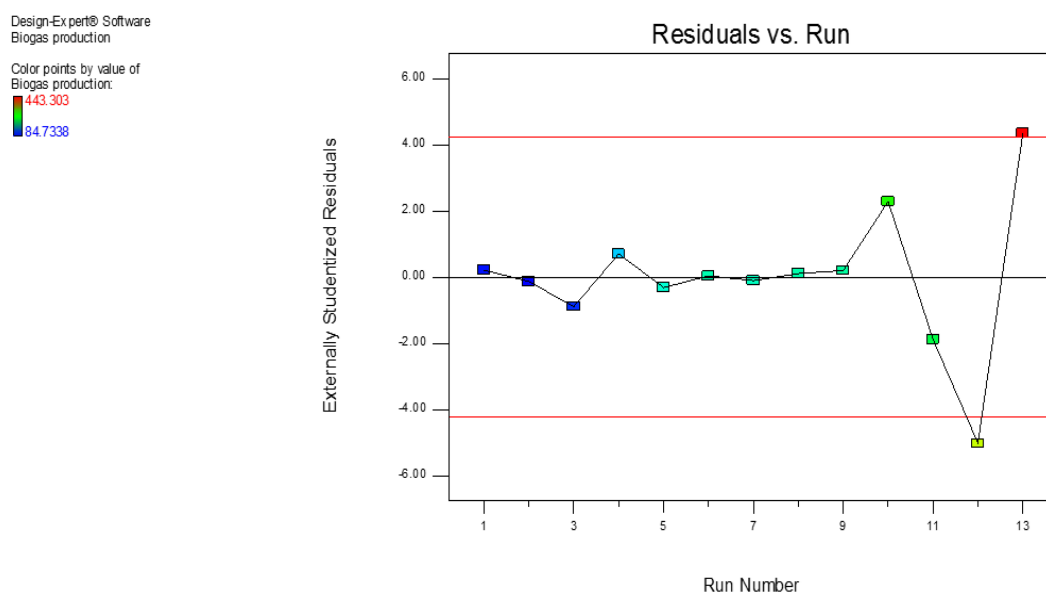
ภาพการกระจายของส่วนตกค้างในแต่ละระดับปัจจัย สามารถนำมาตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวนได้ ดังภาพที่ 4.21 จากผลการทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดปรับสภาพ PLA ฟิล์มชุดที่ 2 พบว่าส่วนตกค้างกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในแกนบวกและลบ ซึ่งสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน



ภาพที่ 4.21 การกระจายส่วนตกค้างในแต่ละชุดทดลอง

### (ค) การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล สามารถทำได้โดยการสังเกตการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนภาพว่ามีรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกันหรือไม่ จากผลการทดลองส่วนตกค้างที่ได้จากการผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดปรับสภาพ PLA ฟิล์ม ชุดที่ 2 (ดังภาพที่ 4.22) พบว่าค่าส่วนตกค้างมีลักษณะที่ไม่แน่นอน ไม่มีรูปแบบที่ชัดเจน แสดงว่ามีความเป็นอิสระของข้อมูล



ภาพที่ 4.22 การกระจายของส่วนตกค้างกับลำดับชุดทดลอง

### (ง) ค่าความแปรปรวน (Analysis of variance)

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of variance) เป็นวิธีตรวจสอบการแปรผันของแบบจำลองที่มีการแจกแจงแบบปกติ โดยจากผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดปรับสภาพ PLA ฟิล์มชุดที่ 2 จากตารางที่ 4.16 พบว่าค่า P-value ของปัจจัย pH และระยะเวลาในการปรับสภาพมีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 แสดงว่ามีส่วนโค้งเกิดที่พื้นผิวตอบสนอง ดังนั้นจึงสามารถใช้สมการแบบจำลองกำลังสองสำหรับทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพได้

ตารางที่ 4.16 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรต่อปริมาณก๊าซชีวภาพ (ชุดที่ 2)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F - value	p-value Prob > F
Model	1.108E+005	5	22164.76	19.29	0.0006
A-pH	95871.22	1	95871.22	83.45	< 0.0001
B-Reaction time	10387.45	1	10387.45	9.04	0.0197
AB	1411.65	1	1411.65	1.23	0.3043
A <sup>2</sup>	2483.77	1	2483.77	2.16	0.1849
B <sup>2</sup>	387.89	1	387.89	0.34	0.5794
Residual	8041.55	7	1148.79		
Lack of Fit	7870.49	3	2623.50	61.35	0.0008
Pure Error	171.06	4	42.77		
Cor Total	1.189E+005	12			

#### (จ) ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ

การตรวจสอบตัวแบบหรือสมการพยากรณ์ว่ามีความเหมาะสมสำหรับการไปใช้กับข้อมูลชุดนั้นๆหรือไม่ โดยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination) หรือค่า R-Squared ถ้าหากค่า R-Squared ยิ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์มาก หมายความว่าตัวแบบสามารถคำนวณค่าได้ใกล้เคียงกับค่าสังเกตมาก ในทางทฤษฎีถ้าตัวแบบสามารถอธิบายความแปรปรวนได้เท่ากับ 100% หมายความว่า ค่าที่คำนวณได้จากสมการพยากรณ์จะมีค่าเท่ากับค่าที่สังเกตได้ ดังนั้นค่าข้อมูลที่สังเกตได้จะอยู่บนเส้นตรงของตัวแบบคณิตศาสตร์ทุกจุด

จากผลการวิเคราะห์ ในตารางที่ 4.17 พบว่าค่า R-Squared มีค่าเท่ากับ 0.9323 หมายความว่าตัวแปรอิสระ (ค่า pH ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลา) สามารถอธิบายความผันแปรหรือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม (ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม) ได้ร้อยละ 93.23 แสดงว่าแบบจำลองสามารถนำไปสร้างสมการเพื่อทำนายหาค่าผลตอบได้อย่างถูกต้องและมีความเหมาะสม

#### 5) การสร้างสมการทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพจากการปรับสภาพ PLA ฟิล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าพีเอชและระยะเวลาต่างๆ (ชุดที่ 2)

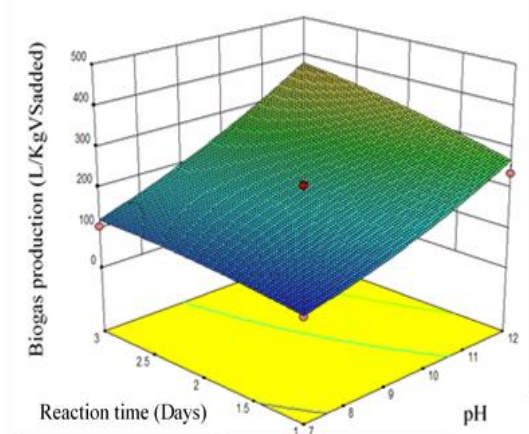
การสร้างสมการทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพจากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยมาเขียนให้อยู่ในรูปสมการ (ตารางที่ 4.17 )

ตารางที่ 4.17 สมการและค่าทางสถิติที่ได้จากโปรแกรม

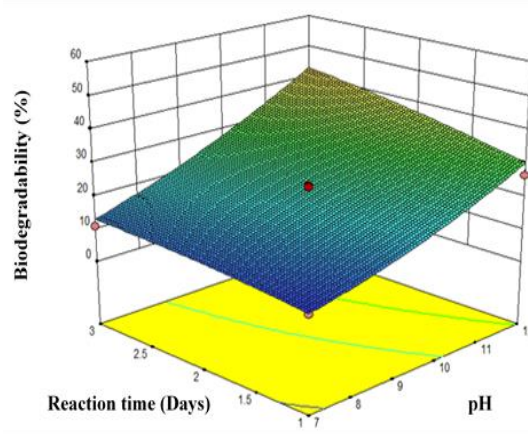
	Model Equations	R <sup>2</sup>	Adj R <sup>2</sup>	p-value
ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (L/KgVSadded)	$102.28564 - 29.29634 \cdot \text{pH} - 4.86866 \cdot \text{Reaction Time} + 7.51438 \cdot \text{pH} \cdot \text{Reaction Time} + 3.06719 \cdot \text{pH}^2 - 7.57566 \cdot \text{Reaction Time}^2$	0.9323	0.8840	0.0006
Biodegradability (%)	$10.79379 - 3.41137 \cdot \text{pH} - 0.56692 \cdot \text{Reaction time} + 0.87500 \cdot \text{pH} \cdot \text{Reaction time} + 0.35715 \cdot \text{pH}^2 - 0.88214 \cdot \text{Reaction time}^2$	0.9323	0.8840	0.0006

6) การสร้างพื้นผิวตอบสนองของปริมาณก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพจากการปรับสภาพ PLA फिल्म ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าพีเอชและระยะเวลาต่างๆ (ชุดที่ 2)

สมการทำนายที่ได้จากข้อ (5) ถูกนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนองปริมาณก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลาย ดังภาพที่ 4.23 พบว่าเมื่อมีแนวโน้มเช่นเดียวกัน เนื่องจากประสิทธิภาพการย่อยสลายของ PLA फिल्म ได้มาจากการคำนวณด้วยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ดังนั้นจะพบว่าเมื่อปรับสภาพ PLA फिल्म ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH และระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น จะสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพได้ ซึ่งจากผลการสร้างสมการทำนายพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพจะสูงที่สุดเมื่อปรับสภาพ PLA ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 13 เป็นระยะเวลา 2.5 วัน โดยให้ก๊าซชีวภาพจากการทำนายสูงสุดเท่ากับ 443.3 L/KgVS<sub>added</sub>



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4.23 พื้นผิวตอบ (ก) ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ข) ประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ

จากตารางที่ 4.18 เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง (Experimental) และค่าที่ได้จากสมการ (Predicted) พบว่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน

**ตารางที่ 4.18** เปรียบเทียบค่าตอบสนองที่ได้จากการทดลอง (Experimental) และค่าที่ได้จากสมการ (Predicted)

ชุดทดลอง	สภาวะการปรับสภาพ		ค่าตอบสนองต่อปัจจัย					
	พีเอช	เวลา (วัน)	Biogas production (L/KgVSadded)		sCOD removal (%)		Biodegradability (%)	
			ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง	สมการทำนาย	ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง	สมการทำนาย	ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง	สมการทำนาย
1	6.0	2.0	91.88	300.65	54.23	55.79	9.58	8.93
2	7.0	1.0	84.73	288.91	63.60	59.27	8.75	9.09
3	7.0	3.0	103.85	288.91	53.28	53.63	10.98	13.15
4	9.5	0.6	153.23	271.82	61.13	67.42	16.73	14.85
5	9.5	2.0	193.36	313.54	65.55	72.59	21.40	22.58
6	9.5	2.0	204.76	313.54	78.12	72.59	22.73	22.58
7	9.5	2.0	200.18	313.54	71.53	72.59	22.19	22.58
8	9.5	2.0	207.05	313.54	69.19	72.59	22.99	22.58
9	9.5	2.0	210.12	313.54	78.78	72.59	23.35	22.58
10	9.5	3.4	277.12	324.95	72.50	66.80	31.15	26.79
11	12.0	1.0	236.86	323.77	92.71	88.21	26.46	30.33
12	12.0	3.0	331.12	398.93	93.26	92.97	37.44	43.15
13	13.0	2.0	443.30	403.08	97.30	104.06	50.50	45.15

#### 7) การเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ (Optimization) จากชุดที่ 2

งานวิจัยนี้สนใจค่าตอบสนอง (ปริมาณก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลาย) โดยมีปัจจัยคือ ค่าพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาในการปรับสภาพ PLA ฟิล์ม ซึ่งโปรแกรมจะประมวลผลจากสมการก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลาย (ตารางที่ 4.18) จึงสามารถคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดได้ดังตารางที่ 4.19

**ตารางที่ 4.19** สภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ PLA พิล์ม (ชุดที่ 2) จากโปรแกรม Design Expert

ค่าพีเอช	ระยะเวลา (วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (L/KgVS <sub>added</sub> )	ประสิทธิภาพการ ย่อยสลายทาง ชีวภาพ (%)	ค่าความพึงพอใจ (Desirability)
13	2.5	429.3	48.87	0.974

ผลการทดสอบการปรับสภาพ PLA พิล์ม ด้วยสารละลาย NaOH ที่ระยะเวลาต่างๆ (ชุดที่ 2) โดยมีปัจจัยที่ต้องการศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ ค่าพีเอชของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ ระยะเวลาที่ใช้ปรับสภาพ ซึ่งพารามิเตอร์ชี้วัดหรือค่าตอบสนองที่เป็นตัวแปรตามคือ ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม และประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพจะมีค่าสูงสุด เมื่อปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 13 (NaOH 0.5 โมลาร์) เป็นระยะเวลา 2.5 วัน โดยให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสะสมและ %Biodegradability สูงสุดเท่ากับ 429.3 L/KgVS<sub>added</sub> และ 48.87% ตามลำดับ ซึ่งมีค่าความพึงพอใจ (Desirability) เท่ากับ 0.974 แสดงว่าผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจ

#### 4.3.3 ผลการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ PLA พิล์ม

จากการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและย่อยสลายทางชีวภาพจาก PLA พิล์ม (ชุดที่ 2) โดยใช้ PLA ที่ผ่านการปรับสภาพและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมด้วย (อัตราส่วนเท่ากับ PLA พิล์ม 1 กรัมต่อสารละลาย NaOH ปริมาตร 5 มล.) โดยพบว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ ค่าพีเอชและระยะเวลาเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA พิล์มเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดที่ 1 และ 2 พบว่าในชุดที่ 2 ที่ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมด้วยให้ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดมากกว่าชุดที่ 1 อยู่ประมาณ 1.92 เท่า โดยผลทดลองก๊าซชีวภาพสูงสุดของชุดที่ 1 และ 2 เท่ากับ 230.21 และ 443.3 L/KgVS<sub>added</sub> ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ปรับสภาพ PLA พิล์ม ที่สภาวะคัดเลือก นั่นคือการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 13 (NaOH 0.5 โมลาร์) เป็นระยะเวลา 2.5 วัน จะให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุด โดยเมื่อนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการปรับสภาพ PLA ที่สภาวะคัดเลือก ไปวิเคราะห์ปริมาณกรด แลคติก พบว่ามีปริมาณกรดแลคติกเท่ากับ 18,200 mg/L ซึ่งแสดงให้เห็นว่า PLA พิล์มที่ปรับสภาพถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดแลคติก และกรดแลคติกถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก หลังจากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจึงสามารถนำไปผลิตก๊าซชีวภาพได้ ดังนั้น PLA

ฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงมีคุณสมบัติที่จะเป็นสารตั้งต้นในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนร่วมกับขยะอินทรีย์อื่นๆ (co-digestion) ได้ต่อไป

#### 4.4 การศึกษาการหมักร่วมPLA ฟิล์มกับขยะอินทรีย์

การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายจากการหมักร่วมพลาสติกชีวภาพชนิด PLA ที่ผ่านการปรับสภาพขั้นต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดร่วมกับขยะอินทรีย์ ได้แก่ ขยะเศษอาหารและเศษผักจากตลาดสด ซึ่งการศึกษานี้ได้ใช้ PLA ฟิล์ม ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ค่าเอชเท่ากับ 13 (NaOH 0.5 โมลาร์) เป็นระยะเวลา 2.5 วัน (ใช้สารละลายปรับสภาพร่วมด้วย) ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองในข้อ 4.2 โดยเดินระบบที่อุณหภูมิห้อง ด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor; CSTR) แบบแบทช์ เป็นระยะเวลา 60 วัน ซึ่งมีรายละเอียดชุดทดลองและผลการทดลอง ดังนี้

**ชุดที่ 1** ชุดควบคุม ขยะเศษอาหาร

**ชุดที่ 2** ชุดควบคุม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH (0.5 โมลาร์) ที่ pH เท่ากับ 13 เป็นระยะเวลา 2.5 วัน

**ชุดที่ 3** ขยะเศษอาหาร หมักร่วม PLA ฟิล์ม ไม่ผ่านการปรับสภาพ อัตราส่วน (1:1)

**ชุดที่ 4** ขยะเศษอาหาร หมักร่วม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH (0.5 โมลาร์) ที่ pH เท่ากับ 13 เป็นระยะเวลา 2.5 วัน อัตราส่วน (1:1)

**ชุดที่ 5** ขยะเศษผักสด หมักร่วม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH (0.5 โมลาร์) ที่ pH เท่ากับ 13 เป็นระยะเวลา 2.5 วัน อัตราส่วน (1:1)

##### 4.4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของขยะอินทรีย์หมักร่วม

###### 1) ขยะอินทรีย์

ขยะเศษอาหารและขยะเศษผักจากตลาดสดที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ขยะเศษอาหาร นำมาจากโรงอาหารคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขยะเศษผักจากตลาดสด นำมาจากตลาดสดสามย่าน โดยนำมาบดละเอียดด้วยเครื่องปั่น ก่อนการนำไปศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักร่วมพลาสติกชีวภาพชนิด PLA ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีตามตารางที่ 4.20 และมีสมบัติเริ่มต้นของสารตั้งต้นในการทดลองดังตารางที่ 4.21



ตารางที่ 4.20 องค์ประกอบทางเคมีของขยะเศษอาหารและเศษผักสด

องค์ประกอบทางเคมี	ขยะเศษอาหาร	ขยะเศษผักสด
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ร้อยละน้ำหนักเปียก)	35.29	9.37
ปริมาณความชื้น (ร้อยละน้ำหนักเปียก)	64.71	90.74
ปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (ร้อยละของน้ำหนักเปียก)	33.83	5.61
ค่าซีโอดีทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	148,732	41,239
pH	4.95	5.68
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)	31.15	14.01

ตารางที่ 4.21 สมบัติเริ่มต้นของสารตั้งต้นในแต่ละชุดทดลอง

ชุดทดลอง	TVS สารตั้งต้นเริ่มต้น (%)	TVS (%)	%C	%N	C/N ratio
ชุดควบคุม ขยะเศษอาหารชนิดเดียว	2	2.88	33.56	1.08	31.15
ชุดควบคุม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพชนิดเดียว	2	2.56	39.98	-	-
ขยะเศษอาหารหมักร่วม PLA ฟิล์ม ไม่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)	2	2.67	36.77	1.08	34.13
ขยะเศษอาหาร หมักร่วม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพ (1:1)	2	2.65	36.77	1.08	34.13
ขยะเศษผักสด หมักร่วม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพด้วย (1:1)	2	2.54	30.01	1.43	21.02
หัวเชื้อ	2.5	-	-	-	8.51

หมายเหตุ : TVS หมายถึง ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายของสารตั้งต้นและหัวเชื้อ

- หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

#### 4.4.2 การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วม PLA กับขยะอินทรีย์

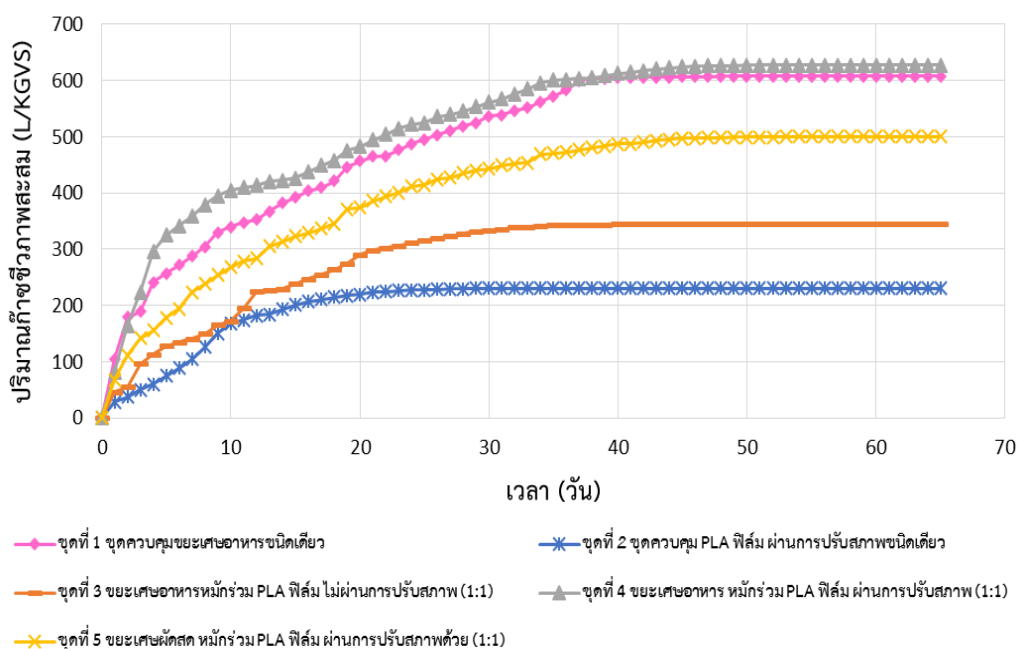
##### (1) ชุดควบคุมที่ใช้ขยะเศษอาหารและ PLA ที่ผ่านการปรับสภาพอย่างเดียว

ชุดควบคุมในการทดลองนี้คือ ชุดควบคุมขยะเศษอาหารเพียงอย่างเดียว และชุดควบคุม PLA ฟิล์ม (ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ที่ pH เท่ากับ 13 เป็นระยะเวลา 2.5 วัน) ให้

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 607.44 และ 230.51 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย (L/KgVSadded) ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.21 และภาพที่ 4.22

## (2) ชุดหมักร่วม

จากผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมขยะเศษอาหารและ PLA พิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพ อัตราส่วน (1:1) ให้ผลการผลิตปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 346.04 และ 627.41 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย (L/KgVSadded) แสดงให้เห็นว่าชุดหมักร่วม PLA ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าร้อยละ 55.15 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลอง PLA ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ และการหมักร่วมขยะเศษผักและ PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพ อัตราส่วน (1:1) ให้ผลการผลิตปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 500.45 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย (L/KgVSadded) ซึ่งมีค่ามากกว่าชุดหมักร่วมขยะเศษอาหารและ PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพ และจากผลการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมขยะอินทรีย์กับ PLA พิล์ม ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการหมักร่วม ดังตารางที่ 4.22 และภาพที่ 4.24



ภาพที่ 4.24 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมในแต่ละชุดทดลอง

จากผลการศึกษากการผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุม จากภาพที่ 4.25 พบว่าชุดทดลองที่ให้ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดคือ ชุดทดลองที่ทำการหมักร่วม PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพกับขยะเศษอาหาร แสดงให้เห็นว่าการหมักร่วมช่วยเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1.03 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่หมักเพียงขยะเศษอาหารเพียงอย่างเดียว และพบว่าการปรับสภาพ PLA พิล์ม ด้วย

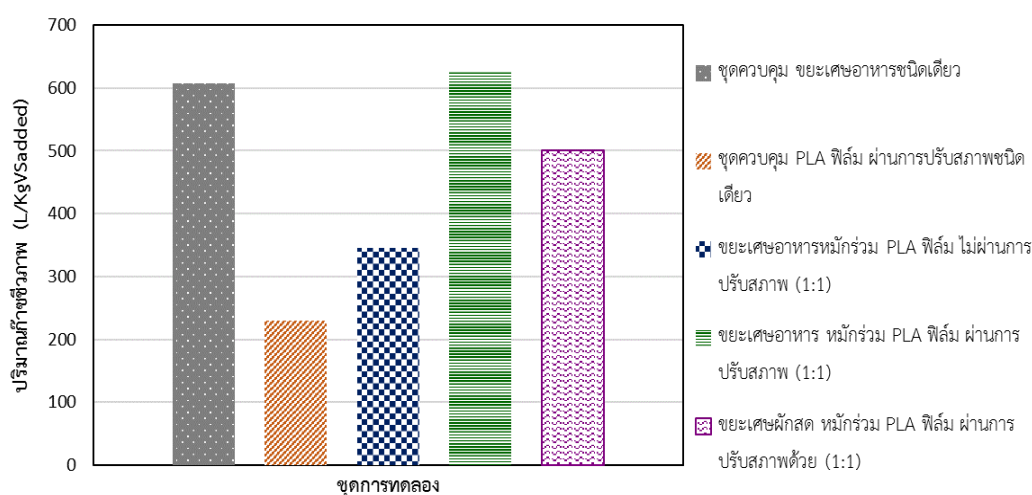
สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ค่าพีเอชเท่ากับ 13 (NaOH 0.5 โมลาร์) เป็นระยะเวลา 2.5 วัน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดย Gorrasi และคณะ ในปี 2013 พบว่าสารละลายต่าง (OH) เพิ่มอัตราการปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้โครงสร้างของ PLA มีขนาดเล็กลง ซึ่งถูกสลายให้อยู่ในรูปสารละลายกรดแลคติกซึ่งแลคติกเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ และการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยให้ผิวหน้าของ PLA ฟิล์มถูกกัดกร่อน ทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การย่อยสลายโดยแบคทีเรียและเอนไซม์เข้าถึงได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น

ตารางที่ 4.22 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA ฟิล์มหมักร่วมขยะอินทรีย์และชุดควบคุม

ลำดับ	ชุดการทดลอง	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (L/KgVS <sub>added</sub> )	ปริมาณก๊าซมีเทน (L/KgVS <sub>added</sub> )
1	ชุดควบคุม ขยะเศษอาหารชนิดเดียว	607.44	129.84
2	ชุดควบคุม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพชนิดเดียว	230.51	148.31
3	ขยะเศษอาหารหมักร่วม PLA ฟิล์ม ไม่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)	346.04	97.21
4	ขยะเศษอาหาร หมักร่วม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพ (1:1)	627.41	211.59
5	ขยะเศษผักสด หมักร่วม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพด้วย (1:1)	500.45	282.67

จากผลการศึกษารวมการผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA ฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุม จากภาพที่ 4.25 พบว่าชุดทดลองที่ให้ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดคือ ชุดทดลองที่ทำการหมักร่วม PLA ฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพกับขยะเศษอาหาร แสดงให้เห็นว่าการหมักร่วมช่วยเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1.03 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่หมักเพียงขยะเศษอาหารเพียงอย่างเดียว และพบว่าการปรับสภาพ PLA ฟิล์ม ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ pH เท่ากับ 13 เป็นระยะเวลา 2.5 วัน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดย Gorrasi และคณะ ในปี 2013 พบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (OH) เพิ่มอัตราการปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้โครงสร้างของ PLA มีขนาดเล็กลง ซึ่งถูกสลายให้อยู่ในรูปสารละลายกรดแลคติกซึ่งกรดแลคติกเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพทำให้ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การหมักร่วมพลาสติกและขยะอินทรีย์ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ

การผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดย Wang และคณะ (2011) พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลาย PLA ได้ด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจนได้โดยการหมักที่อุณหภูมิและความดันเหมาะสม และในสภาวะที่มีแอมโมเนีย ซึ่งได้มาจากการย่อยสลายสารประกอบประเภทโปรตีนหรือการหมักร่วมเศษผักและเศษอาหาร



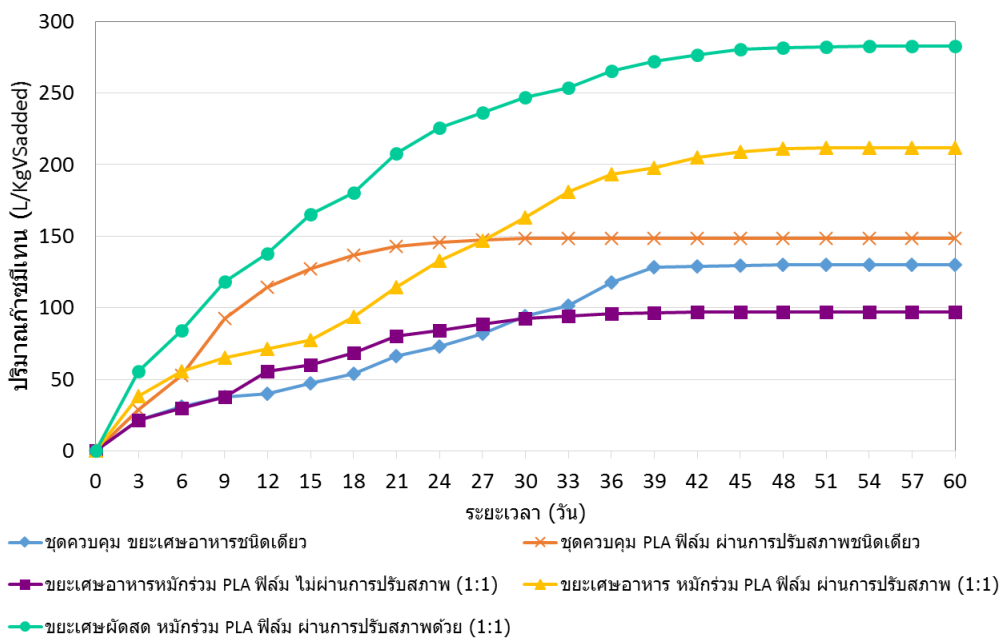
ภาพที่ 4.25 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของชุดทดลองหมักร่วม PLA फिल्मกับขยะอินทรีย์

จากผลการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA फिल्मที่ผ่านการปรับสภาพหมักร่วมกับขยะอินทรีย์ โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุม จากภาพที่ 4.25 พบว่าชุดทดลองที่ให้ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดคือ ชุดทดลองที่ทำการหมักร่วม PLA फिल्मที่ผ่านการปรับสภาพกับขยะเศษอาหาร แสดงให้เห็นว่าการหมักร่วมช่วยเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 1.03 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่หมักเพียงขยะเศษอาหารเพียงอย่างเดียว และพบว่าการปรับสภาพ PLA फिल्म ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ pH เท่ากับ 13 เป็นระยะเวลา 2.5 วัน ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดย Gorrasi และคณะ ในปี 2013 พบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (OH<sup>-</sup>) เพิ่มอัตราการปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้โครงสร้างของ PLA มีขนาดเล็กลง ซึ่งถูกสลายให้อยู่ในรูปสารละลายกรดแลคติกซึ่งกรดแลคติกเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพทำให้ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การหมักร่วมพลาสติกและขยะอินทรีย์ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดย Wang และคณะ (2011) พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลาย PLA ได้ด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจนได้โดยการหมักที่อุณหภูมิและความดันเหมาะสม และในสภาวะที่มีแอมโมเนีย ซึ่งได้มาจากการย่อยสลายสารประกอบประเภทโปรตีนหรือการหมักร่วมเศษผักและเศษอาหาร

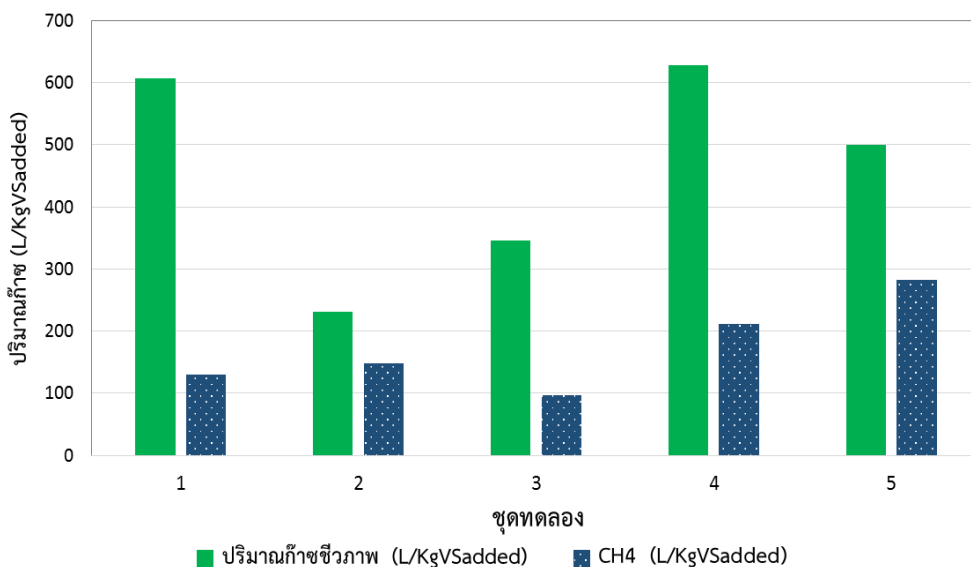
#### 4.4.3 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพของชุดทดลองต่างๆ

การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในชุดทดลองต่างๆ ตรวจวัดด้วยเครื่อง Gas Chromatography ที่มีคอลัมน์เป็น Thermal Conductivity Detector (TCD) โดยทำการวิเคราะห์ตลอดระยะเวลาการทดลอง เป็นระยะเวลา 60 วัน ดังภาพที่ 4.26 โดยพบว่าก๊าซชีวภาพที่ได้จากชุดทดลองหมักเศษอาหารเพียงอย่างเดียวมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบสูงสุดเท่ากับร้อยละ 50.95 (วันที่ 33) เมื่อนำขยะเศษอาหารหมักร่วมกับ PLA फिल्मที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพแล้ว พบว่าก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 68.42 และ 76.58 ตามลำดับ (วันที่ 45 และ 27 ตามลำดับ) และเมื่อทำการหมักร่วม PLA ที่ผ่านการปรับสภาพกับขยะเศษผักสด พบว่าก๊าซชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่สูงถึงร้อยละ 68.99 ภายในระยะ 15 วัน นอกจากนี้ชุดควบคุมที่ทำการหมักเพียง PLA ที่ผ่านการปรับสภาพเพียงอย่างเดียวพบว่าให้ก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 60 ตั้งแต่วันที่ 6 ของการเดินระบบหมักแบบแบทช์ และให้ก๊าซมีเทนสูงที่สุดถึงร้อยละ 75.59 ในวันที่ 30 ของการเดินระบบหมัก ซึ่งก๊าซชีวภาพควรมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 50 จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

จากภาพที่ 4.27 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่ได้จากแต่ละชุดทดลอง พบว่าชุดที่ทำการหมักร่วม PLA ที่ผ่านการปรับสภาพกับขยะเศษผักสดให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงที่สุดเท่ากับ  $282.7 \text{ L/KgVS}_{\text{added}}$  ลำดับรองลงมาคือชุดหมักร่วม PLA ที่ผ่านการปรับสภาพกับขยะเศษอาหารให้ปริมาณก๊าซมีเทนเท่ากับ  $211.6 \text{ L/KgVS}_{\text{added}}$  ซึ่งชุดทดลองหมักร่วมมีปริมาณก๊าซมีเทนสูงกว่าชุดควบคุมที่หมักเพียงขยะเศษอาหารและ PLA ที่ผ่านการปรับสภาพเพียงเดียว และชุดที่ทำการหมักร่วม PLA ที่ผ่านการปรับสภาพกับขยะเศษอาหารให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงกว่าชุดควบคุมที่ทำการหมักขยะเศษอาหารเพียงชนิดเดียวถึง 1.63 เท่า ( $129.8 \text{ L/KgVS}_{\text{added}}$ ) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการหมักร่วม PLA फिल्मที่ผ่านการปรับสภาพกับขยะอินทรีย์ ช่วยเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนจากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ และเมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้จากชุดหมัก PLA फिल्म ที่ผ่านการปรับสภาพชนิดเดียว พบว่าให้ปริมาณก๊าซมีเทนเท่ากับ  $148.3 \text{ L/KgVS}_{\text{added}}$  ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมที่ทำการหมักขยะเศษอาหารเพียงชนิดเดียว ( $129.8 \text{ L/KgVS}_{\text{added}}$ ) โดยเป็นผลมาจาก PLA ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ถูกไฮโดรไลซ์และแตกตัวเป็นกรดแลคติกที่อยู่ในรูปสารละลาย ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดสามารถเปลี่ยนกรดแลคติกเป็นกรดอะซีติกได้ และถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทนได้ง่ายและเร็วขึ้น ส่งผลให้ชุดทดลองที่ทำการหมัก PLA ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH มีร้อยละของก๊าซมีเทนสูงตั้งแต่ช่วงแรกของการเดินระบบ จึงทำให้มีปริมาณก๊าซมีเทนสูงกว่าชุดควบคุมที่ทำการหมักขยะอินทรีย์เพียงอย่างเดียว



ภาพที่ 4.26 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากชุดทดลองเดินระบบหมักไร้อากาศแบบแบทช์ที่ อุณหภูมิห้อง ภายในระยะเวลา 60 วัน

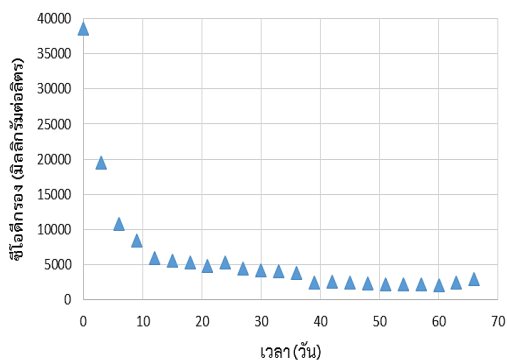


ภาพที่ 4.27 เปรียบเทียบปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน ในแต่ละชุดทดลอง

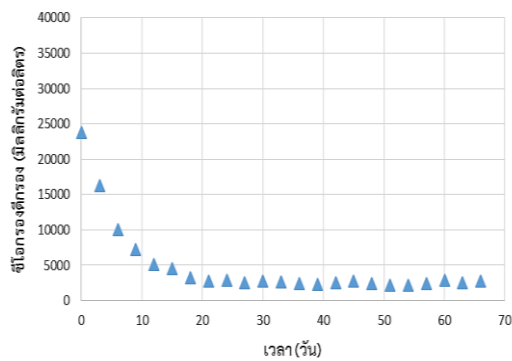
- หมายเหตุ
- ชุดที่ 1 ชุดควบคุม ขยะเศษอาหารชนิดเดียว
  - ชุดที่ 2 ชุดควบคุม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพชนิดเดียว
  - ชุดที่ 3 ขยะเศษอาหารหมักรวม PLA ฟิล์ม ไม่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)
  - ชุดที่ 4 ขยะเศษอาหาร หมักรวม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพ (1:1)
  - ชุดที่ 5 ขยะเศษผักสด หมักรวม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพด้วย (1:1)

#### 4.4.4 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดทดลอง

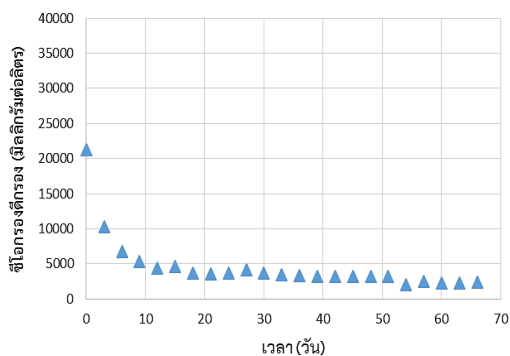
จากภาพที่ 4.28 แสดงประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกรอง (sCOD) ของชุดทดลองต่างๆ ตลอดระยะเวลาทดลอง 66 วัน โดยการเดินระบบหมักแบบแบทช์ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าชุดควบคุมขยะเศษอาหารมีค่าซีโอดีกรองเริ่มต้นเท่ากับ 38,535 มิลลิกรัมต่อลิตร (มก./ล.) ในช่วง 9 วันแรก ค่าซีโอดีลดลงอย่างรวดเร็วจนถึง 8,400 มก./ล. ในวันที่ 9 และลดลงจนถึงสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 2,990 มก./ล. มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 92.24 ในขณะที่ชุดควบคุมที่ทำการหมัก PLA ฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพเพียงอย่างเดียว มีค่าซีโอดีเริ่มต้น เท่ากับ 23,776 มก./ล. ซึ่งค่าซีโอดีมาจากการปรับสภาพ PLA ฟิล์มด้วยสารละลาย NaOH ซึ่งจะละลายอยู่ในรูปของแลคเตท และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าซีโอดีเท่ากับ 2,765 มก./ล. มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 88.37 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่ทำการหมักร่วม PLA ที่ผ่านการปรับสภาพกับเศษอาหาร พบว่ามีค่าซีโอดีกรองเริ่มต้นเท่ากับ 39,580 มิลลิกรัมต่อลิตร (มก./ล.) ในช่วง 9 วันแรก ค่าซีโอดีลดลงอย่างรวดเร็วจนถึง 2,375 มก./ล. ในวันที่ 9 และลดลงจนถึงสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 2,250 มก./ล. มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 94.32 ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงกว่าชุดทดลองที่ทำการหมักร่วม PLA ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับเศษอาหาร ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 88.80 โดยค่าซีโอดีกรองเริ่มต้นเท่ากับ 21,250 มิลลิกรัมต่อลิตร (มก./ล.) และลดลงจนถึงสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 2,380 มก./ล. และพบว่าประสิทธิภาพของชุดหมักร่วม PLA ที่ผ่านการปรับสภาพกับขยะเศษผักสดมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการหมักร่วมขยะเศษอาหาร นั่นคือ ค่าซีโอดีกรองเริ่มต้นเท่ากับ 35,235 มิลลิกรัมต่อลิตร (มก./ล.) ค่าซีโอดีลดลงอย่างรวดเร็วจนถึง 3,340 มก./ล. ในวันที่ 21 และลดลงจนถึงสิ้นสุดการทดลองเท่ากับ 3,933 มก./ล. มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 90.51



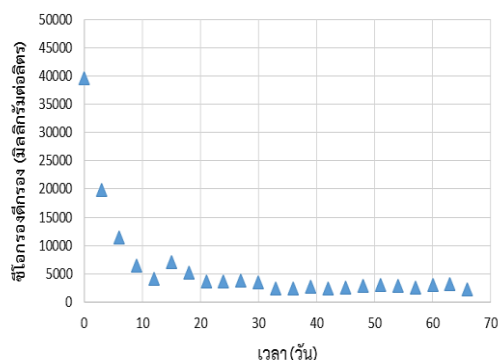
ก) ชุดควบคุม ขยะเศษอาหารชนิดเดียว



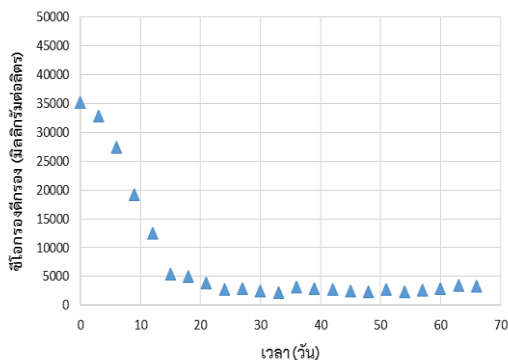
ข) ชุดควบคุม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพชนิดเดียว



ค) ขยะเศษอาหารหมักร่วม PLA ฟิล์ม ไม่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)



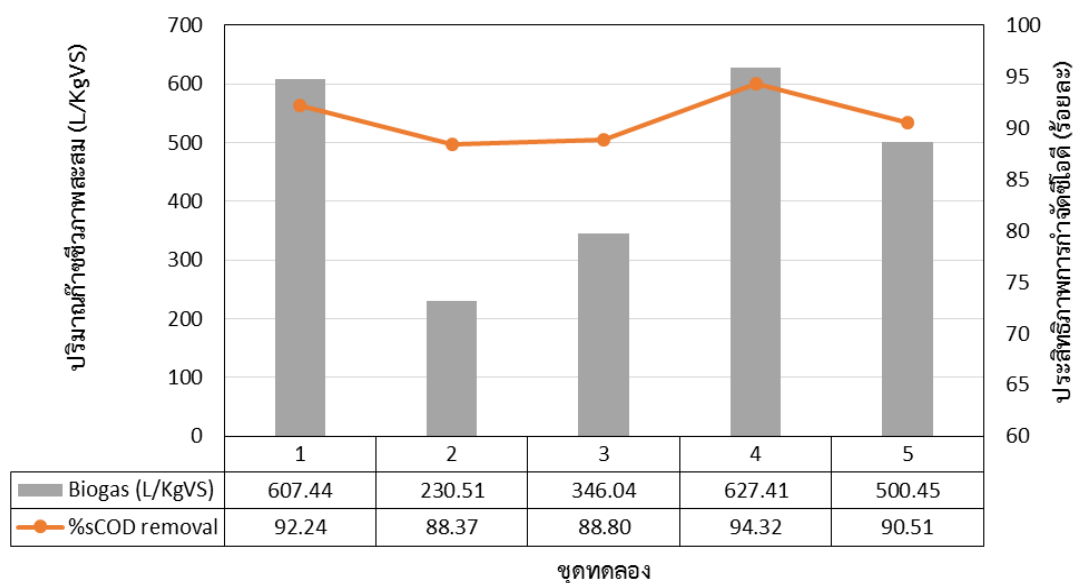
ง) ขยะเศษอาหาร หมักร่วม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพ (1:1)



จ) ขยะเศษผักสด หมักร่วม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพด้วย (1:1)

ภาพที่ 4.28 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของชุดทดลอง





ภาพที่ 4.29 ผลวิเคราะห์ค่าซีโอดีกรองของชุดทดลอง

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีไปควบคู่กัน ดังภาพที่ 4.29 พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน นั่นคือชุดที่มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมในปริมาณสูง จะมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกรองสูงตามไปด้วย แต่เนื่องจากชุดควบคุมที่ทำการหมัก PLA ที่ผ่านการปรับสภาพเพียงเดียว จะมีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพค่อนข้างต่ำ เนื่องจากสารตั้งต้นอยู่ในรูปของแข็ง และต้องใช้ระยะเวลาในการย่อยสลาย ทำให้ค่าซีโอดีกรองในช่วงแรกลดลงไปอย่างรวดเร็วทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีกรองสูง

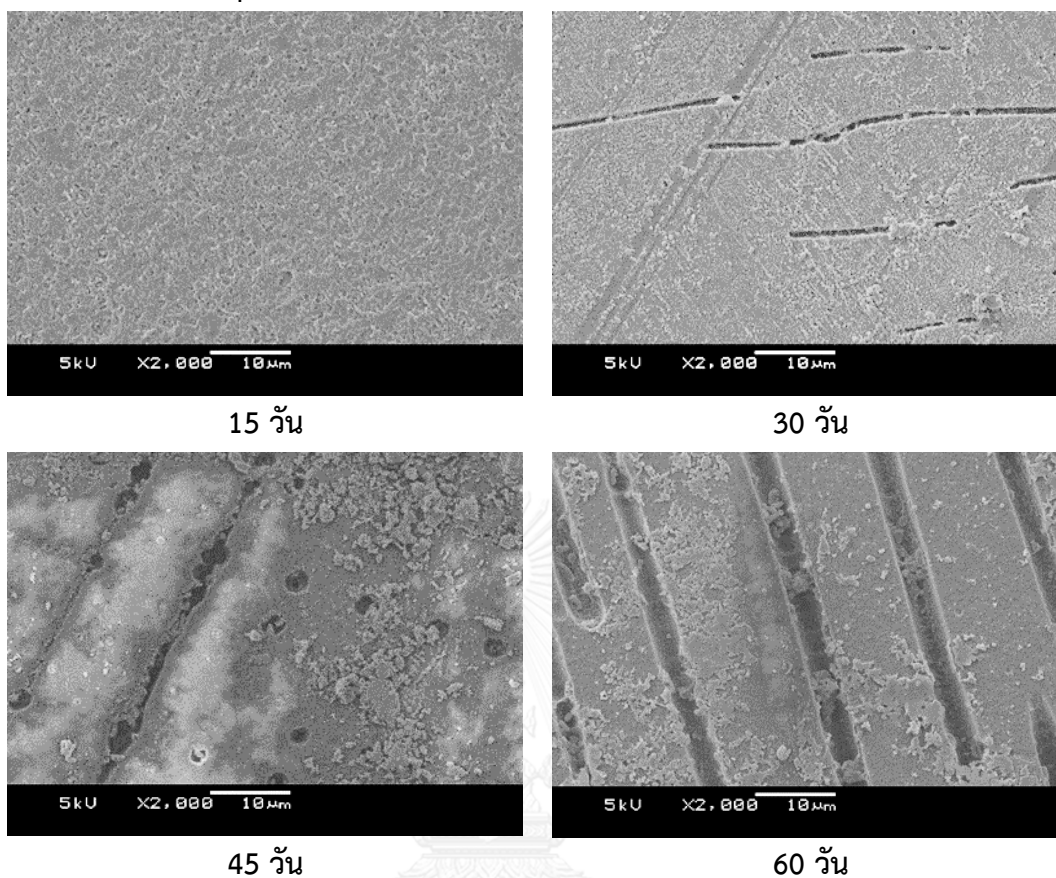
#### 4.4.5 ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางพื้นผิวของ PLA พิล์มจากการหมักร่วมด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของ PLA พิล์ม ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy: SEM) กำลังขยาย 2,000 เท่า (ดังภาพที่ 4.30) ซึ่งประกอบด้วยชุดทดลอง PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพเพียงอย่างเดียว ชุดทดลองหมักร่วมขยะอินทรีย์ได้แก่ ชุดทดลองหมักร่วมขยะเศษอาหารกับ PLA ที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพ และชุดทดลองหมักร่วมขยะเศษผักสดกับ PLA ที่ผ่านการปรับสภาพ โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ทำการหมัก PLA พิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเพียงชนิดเดียว โดยก่อนการนำ PLA พิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพไปทำการหมักแบบไร้ออกซิเจนพบว่า ((จ) ชุดควบคุม PLA พิล์ม ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ) พบว่าพื้นผิวของ PLA พิล์มมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ และเมื่อถึงวันที่ 60 พบว่าพื้นผิวถูกกัดกร่อนเพียงเล็กน้อย แต่เมื่อทำการปรับสภาพ PLA ด้วยสารละลาย NaOH พบว่าวันที่ 15 พื้นผิว PLA

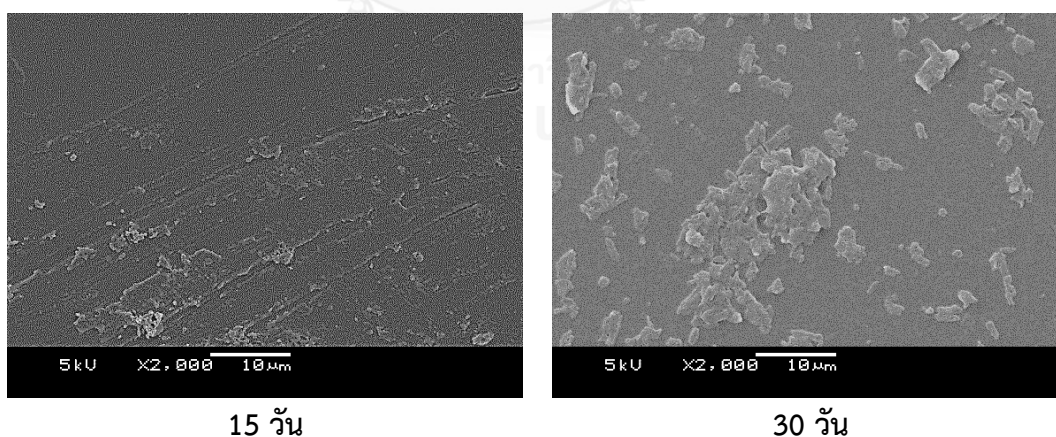
ฟิล์มมีรอยขรุขระเพิ่มขึ้น และเมื่อระยะเวลาผ่านไป 60 วัน พบว่าพื้นผิวถูกกัดกร่อนมากขึ้น เกิดเป็นโพรงเห็นได้อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพ PLA ฟิล์มด้วยสารละลาย NaOH ช่วยเพิ่มการย่อยสลายทางชีวภาพ โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนทำให้จุลินทรีย์และเอนไซม์สามารถเข้าย่อยสลายได้ง่ายขึ้น (อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล, 2553)

จากผลทดลองการหมักร่วม PLA ฟิล์มร่วมกับขยะอินทรีย์ พบว่าชุดทดลองหมักร่วมขยะเศษอาหารกับ PLA ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH (ข) จะเห็นได้ว่าตลอดระยะเวลาการเดินระบบ 60 วัน พื้นที่ผิวมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับชุดทดลองที่ทำการหมักร่วมเศษอาหารกับ PLA ที่ผ่านการปรับสภาพ (ค) ในวันที่ 15 จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิว PLA ฟิล์มได้ชัดเจน โดยพบว่าพื้นผิวขรุขระ และมีรูพรุน ซึ่งเมื่อระยะเวลาผ่านไปจนถึงวันที่ 60 พบว่าผิวหน้าส่วนใหญ่ของ PLA ถูกทำลายเกิดเป็นรูพรุนและโพรงขนาดใหญ่ โดยพบว่าผลการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับชุดทดลองหมักร่วมขยะเศษผักกับ PLA ที่ผ่านการปรับสภาพ (ง) จึงอาจสรุปได้ว่าการหมักร่วมขยะอินทรีย์กับ PLA ด้วยที่ผ่านการปรับสภาพสารละลาย NaOH ช่วยเพิ่มการย่อยสลายทางชีวภาพของ PLA ฟิล์มได้

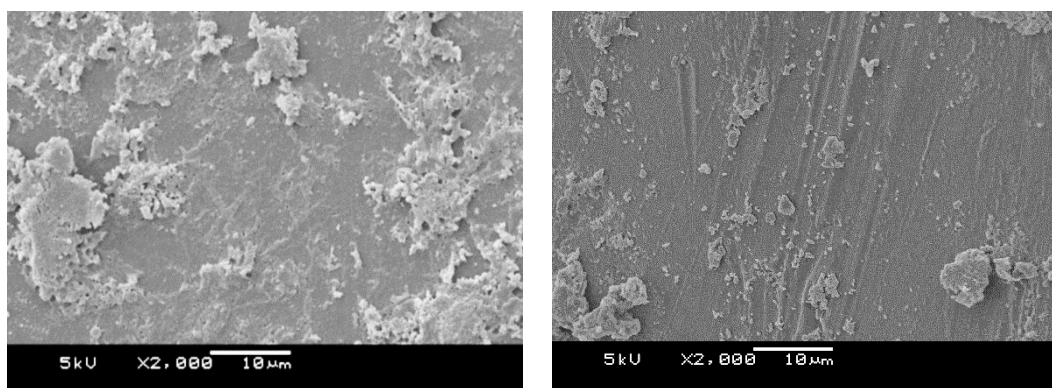
ก) ขูดทดลอง PLA फिल्मที่ผ่านการปรับสภาพเพียงอย่างเดียว



ข) ขยะเศษอาหารหมักกร่วม PLA फिल्म ไม่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)



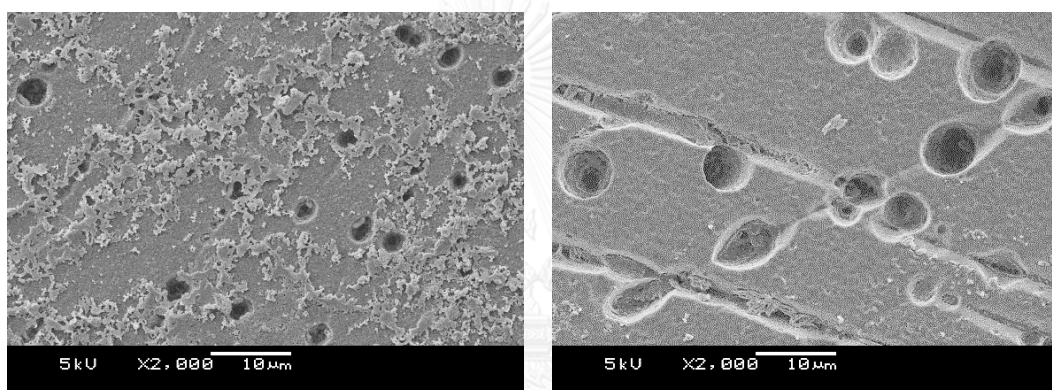
ภาพที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของ PLA फिल्मหลังจากการเดินระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนที่ระยะเวลาต่างๆ ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า



45 วัน

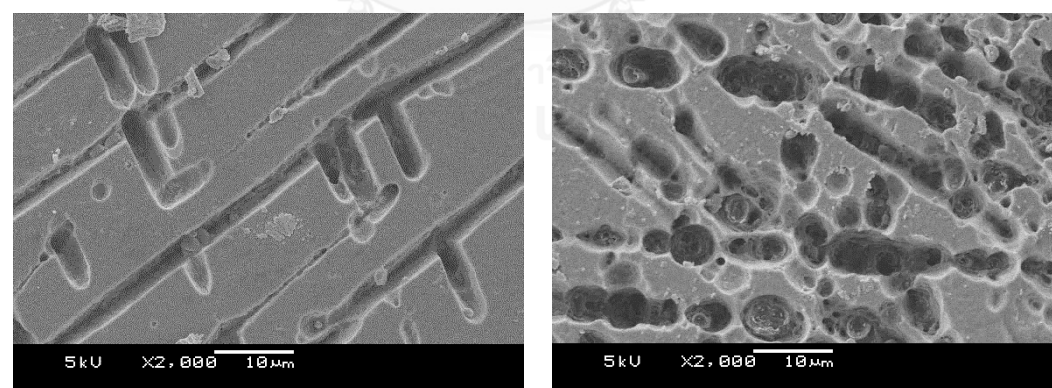
60 วัน

ค) ขยะเศษอาหารหมักพร้อม PLA फिल्म ที่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)



15 วัน

30 วัน

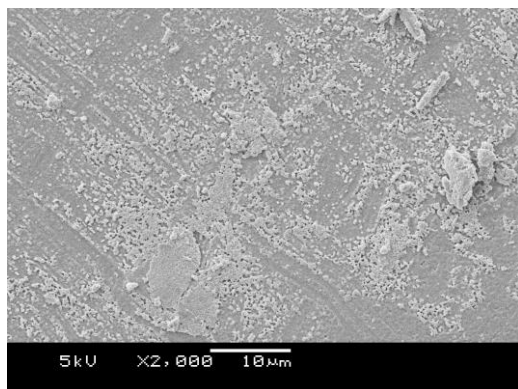


45 วัน

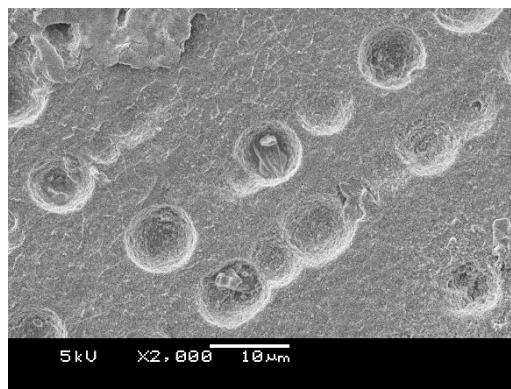
60 วัน

ภาพที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของ PLA फिल्म หลังจากการเดินระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนที่ระยะเวลาต่างๆ ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)

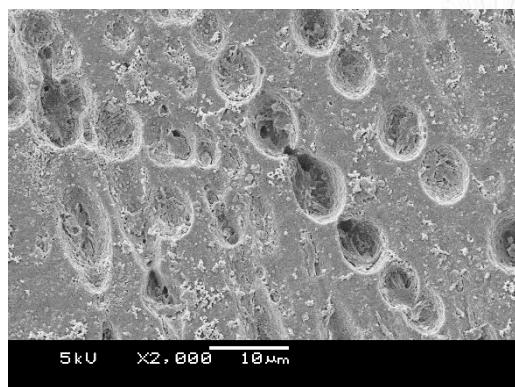
ง) ขยะเศษผักสดหมักพร้อม PLA फिल्म ที่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)



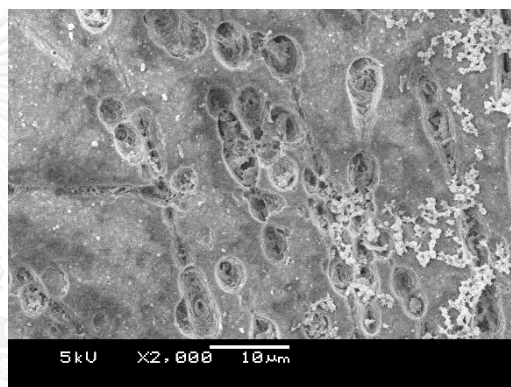
15 วัน



30 วัน

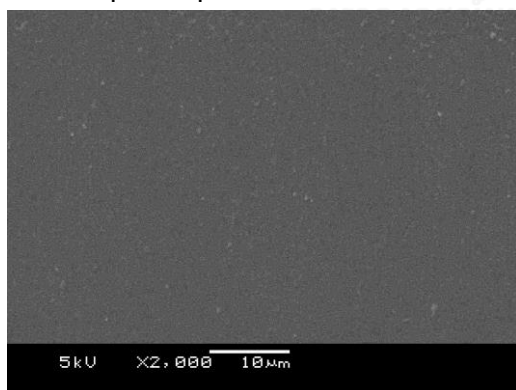


45 วัน

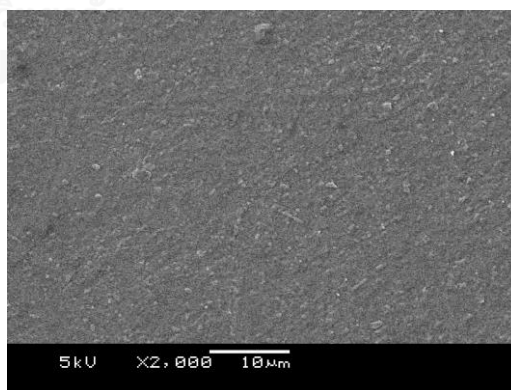


60 วัน

จ) ชุดควบคุม PLA फिल्म ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (จากการทดลอง BMP ในข้อ 4.3)



0 วัน



60 วัน

ภาพที่ 4.30 การเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นผิวของ PLA फिल्मหลังจากการเดินระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนที่ระยะเวลาต่างๆ ด้วยการส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า (ต่อ)

#### 4.4.6 สภาวะการทำงานของระบบ

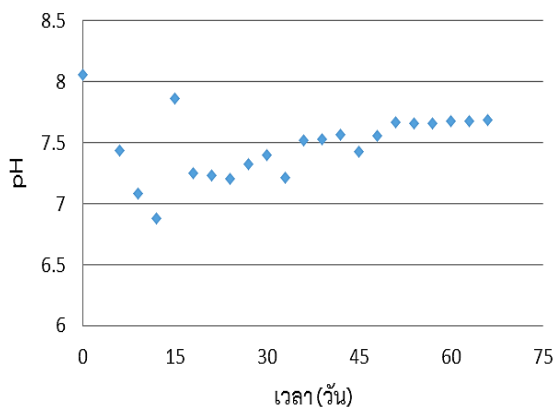
กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนหรือการย่อยสลายแบบแอนแอโรบิก (Anaerobic digestion) ประกอบด้วยการด้วยการเปลี่ยนแปลงสารประกอบอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและการเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วจะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยแบคทีเรียหลายชนิดมาช่วยกันย่อยสลายสารปนเปื้อน โดยสามารถแบ่งกลุ่มจุลินทรีย์ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria) ซึ่งมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน จึงต้องมีการติดตามและควบคุมสภาวะภายในถังปฏิกรณ์ให้มีความเหมาะสมกับการเจริญร่วมกันของแบคทีเรียสองกลุ่มนี้

##### 1) พีเอช และอุณหภูมิ

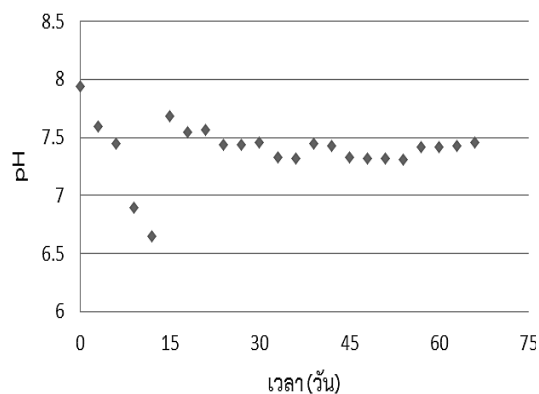
การเดินระบบหมักไร้อากาศแบบไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิห้อง (30-35 องศาเซลเซียส) และเพื่อรักษาระดับพีเอชไม่ให้ต่ำลงเนื่องจากกระบวนการผลิตกรดไขมันระเหยของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดในช่วงแรก จึงทำการปรับพีเอชเริ่มต้นให้มีค่าประมาณ 7.5-8 ตลอดการศึกษาพบว่าชุดทดลองสามารถควบคุมพีเอช และอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง และองศาเซลเซียส ตามลำดับ (ดังตารางที่ 4.23 และ ภาพที่ 4.31)

ตารางที่ 4.23 ค่าพีเอชและอุณหภูมิของชุดทดลอง

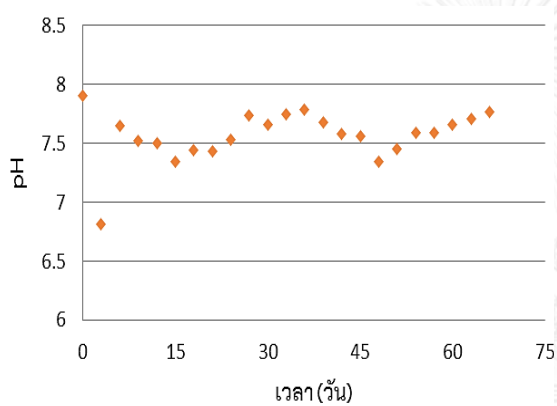
ลำดับ	ชุดการทดลอง	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)
1	ชุดควบคุม ขยะเศษอาหารชนิดเดียว	5.80 – 8.05	29.9 – 34.9
2	ชุดควบคุม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพชนิดเดียว	6.65 – 7.94	30.7 – 34.6
3	ขยะเศษอาหารหมักร่วม PLA फिल्म ไม่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)	6.81 – 7.90	30.0 – 33.2
4	ขยะเศษอาหาร หมักร่วม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพ (1:1)	6.78 – 7.82	29.7 – 34.7
5	ขยะเศษผักสด หมักร่วม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพ ด้วย (1:1)	6.90 – 7.96	30.7 – 34.9



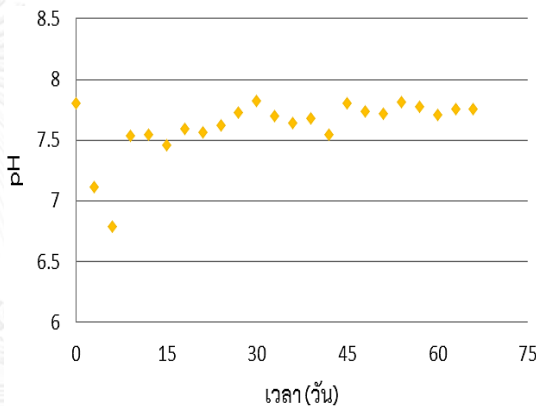
ก) ชุดควบคุม ขยะเศษอาหารชนิดเดียว



ข) ชุดควบคุม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพ  
ชนิดเดียว



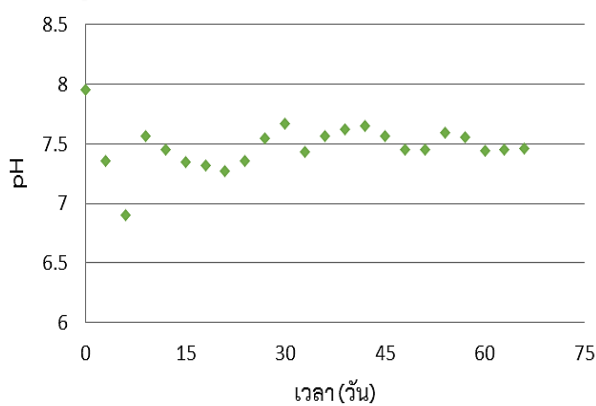
ค) ขยะเศษอาหารหมักร่วม PLA फिल्म ไม่ผ่าน



ง) ขยะเศษอาหาร หมักร่วม PLA फिल्म ผ่านการ

การปรับสภาพ (1:1)

ปรับสภาพ (1:1)



จ) ขยะเศษผักสด หมักร่วม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพด้วย (1:1)

ภาพที่ 4.31 ค่าพีเอชของชุดทดลอง

จากการทดลองเดินระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนพบว่าค่าพีเอช อยู่ในช่วง 5.8 - 8.05 ซึ่งถือว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสม เนื่องจากค่าพีเอชเป็นปัจจัยสำคัญต่อระบบบำบัดทางชีวภาพ ในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 5.2-6.2 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด สำหรับค่าในช่วง 6.6-7.4 เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน ถ้าระบบมีความเป็นกรดหรือต่างมากไปจะส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพการทำงานลดลง หรืออาจร้ายแรงถึงขั้นเป็นพิษทำให้ระบบล้มเหลวได้ (สับนิตติ นิมรัตน์, 2548) นอกจากนี้อุณหภูมิก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียเช่นกัน พบว่าแบคทีเรียสามารถทำงานได้และสร้างก๊าซมีเทนได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม 2 ช่วง คือ ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) ที่อุณหภูมิ 20-45 องศาเซลเซียส และช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) ที่อุณหภูมิ 47-55 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าช่วงดังกล่าวแบคทีเรียทำงานได้ไม่ดี ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบลดต่ำลง และจากผลการตรวจวัดอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการเดินระบบพบว่าอุณหภูมิที่วัดได้อยู่ในช่วง 29.7-34.9 องศาเซลเซียส ซึ่งถือว่าเป็นสภาวะที่เหมาะสม

## 2) กรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid)

### 2.1) ผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยของชุดทดลอง

จากภาพที่ 4.32 แสดงผลการตรวจวัดปริมาณกรดไขมันระเหยในแต่ละชุดทดลองตลอดระยะเวลาการเดินระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน พบว่าชุดควบคุมที่ทำการหมักเศษอาหารเพียงอย่างเดียว มีค่ากรดไขมันระเหยสูงที่สุด ในวันที่ 9 มีค่าเท่ากับ 2,808 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซีติก และพบว่าที่ชุดทดลองหมักร่วมเศษอาหารและ PLA ที่ผ่านมีค่ากรดไขมันระเหยสูงกว่าชุดหมักร่วม PLA ฟิล์มที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยมีค่ากรดไขมันระเหยสูงที่สุดเท่ากับ 2,688 และ 2,160 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซีติก ในวันที่ 6 และ 9 ตามลำดับ แสดงว่าการปรับสภาพ PLA ฟิล์ม ด้วยสารละลาย NaOH ช่วยให้จุลินทรีย์และเอนไซม์สามารถเข้าย่อยสลายได้ง่ายขึ้น ทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดเข้าย่อยสลาย PLA และเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยได้เร็วกว่าชุด PLA ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล, 2553) นอกจากนี้ชุดหมักร่วม PLA ที่ผ่านการปรับสภาพกับขยะเศษผักสด มีค่ากรดไขมันระเหยสูงที่สุดเท่ากับ 2,160 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซีติก ในวันที่ 18 ในขณะที่ชุดควบคุมที่ทำการหมัก PLA ที่ผ่านการปรับเพียงอย่างเดียวมีค่ากรดไขมันระเหยสูงที่สุดเพียง 980 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซีติก ในวันที่ 3 จากชุดทดลองทั้งหมดพบว่ามีค่ากรดไขมันระเหยอยู่ในช่วง 250-2,808 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซีติก โดยทั่วไปปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในถังหมักแบบไร้ออกซิเจนไม่ควรเกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซีติก แต่ระบบอาจทนได้ถึง 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซีติก (กระทรวงพลังงาน, 2556) จึงถือว่าปริมาณกรดไขมันระเหยในแต่ละชุดทดลองอยู่ในช่วงที่เหมาะสม



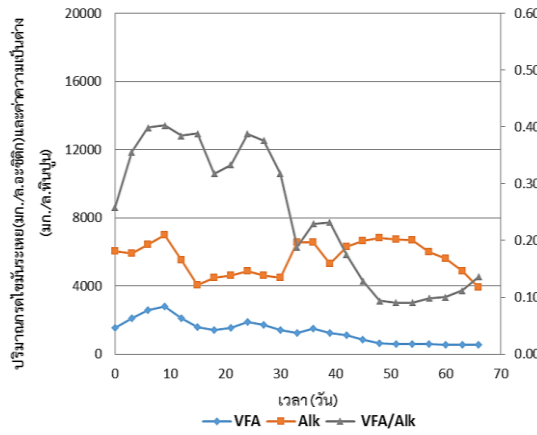
### 3) สภาพต่าง (Alkalinity) และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง

#### (Volatile fatty acid/Alkalinity: VFA/ALK)

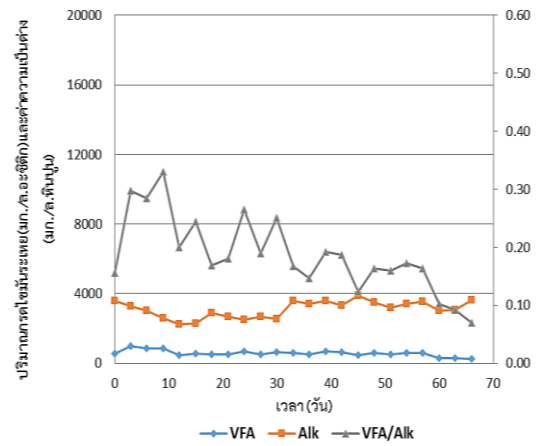
ในการเดินระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนควรควบคุมให้ค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง (VFA/ALK) ไม่ควรเกิน 0.40 ถ้ามีค่าสูงเกิน ก็จะทำให้ระบบเสียสมดุลและล้มเหลวได้ และจากผลการตรวจวัดค่าสภาพต่างและอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง (VFA/ALK) ในแต่ละชุดทดลอง (ดังภาพที่ 4.32 และตารางที่ 4.24) พบว่าทุกชุดทดลองมีค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง (VFA/ALK) อยู่ในช่วง 0.05–0.40 แสดงให้เห็นว่าระบบมีความเสถียร และผลการตรวจวัดค่าสภาพต่าง (Alkalinity) ในแต่ละชุดทดลองมีค่าสูงกว่า 1,000 มิลลิกรัมของ  $\text{CaCO}_3$ /ลิตร ซึ่งค่าสภาพต่างเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของระบบ ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง และบอกถึงความเสถียรของการเดิน โดยค่าสภาพต่างควรอยู่ในช่วง 1,000–3,000 มิลลิกรัมของ  $\text{CaCO}_3$ /ลิตร และค่าสภาพต่างในระบบการย่อยสลายอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนไม่ควรต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัมของ  $\text{CaCO}_3$ /ลิตร เพื่อควบคุมให้ระบบทำงานได้ปกติ (สันทัต ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2557)

ตารางที่ 4.24 สภาพต่างและอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างในแต่ละชุดทดลอง

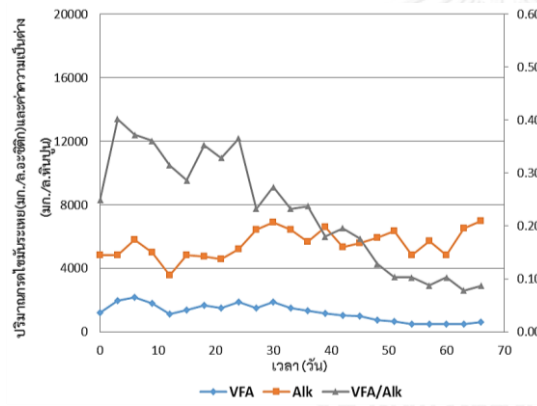
ชุดทดลอง	สภาพต่าง (Alk) (mg/l $\text{CaCO}_3$ )	กรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง (VFA/ALK)
ชุดควบคุม ขยะเศษอาหารชนิดเดียว	3,928-6,980	0.09-0.40
ชุดควบคุม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพชนิดเดียว	2,250-3,890	0.07-0.33
ขยะเศษอาหารหมักร่วม PLA फिल्म ไม่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)	3,650-6,964	0.08-0.39
ขยะเศษอาหาร หมักร่วม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพ (1:1)	4,000-7,522	0.07-0.39
ขยะเศษผักสด หมักร่วม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพด้วย (1:1)	3,845-6024	0.05-0.37



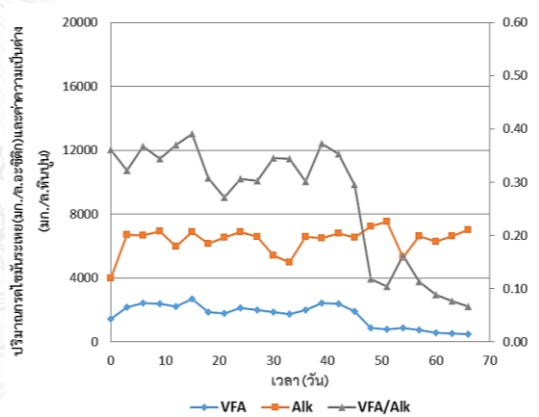
ก) ชุดควบคุม ขยะเศษอาหารชนิดเดียว



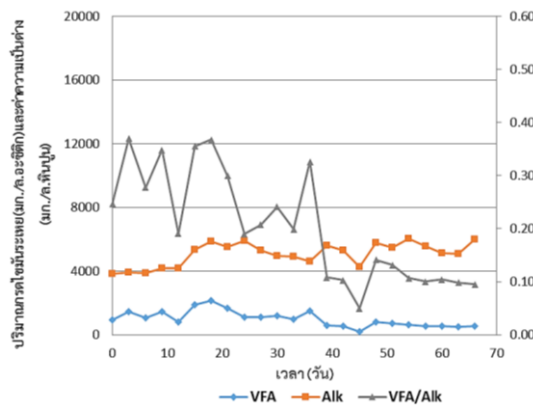
ข) ชุดควบคุม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพ ชนิดเดียว



ค) ขยะเศษอาหารหมักร่วม PLA ฟิล์ม ไม่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)



ง) ขยะเศษอาหาร หมักร่วม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพ (1:1)

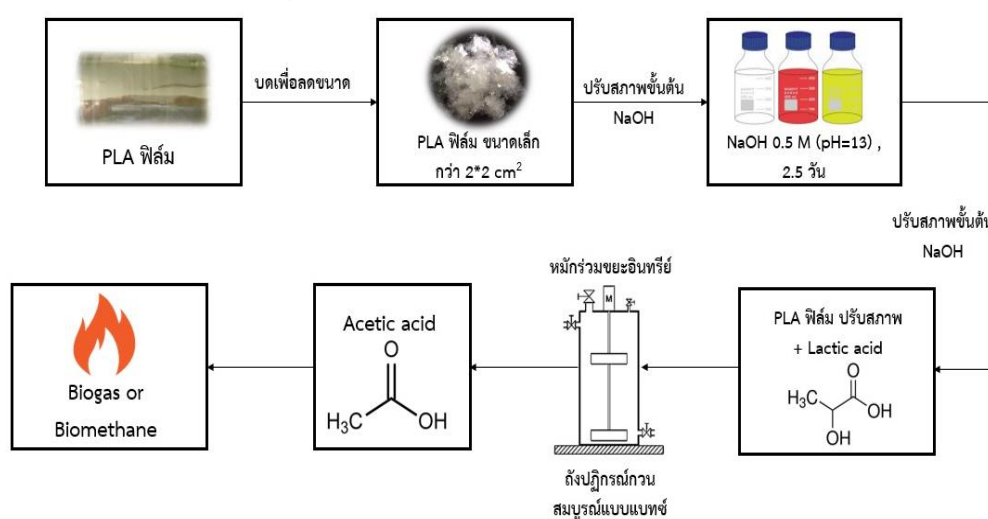


ง) ขยะเศษผักสด หมักร่วม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพด้วย (1:1)

ภาพที่ 4.32 กรดไขมันระเหยง่าย (VFA) สภาพต่าง (Alkalinity) และอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง (Volatile fatty acid/Alkalinity: VFA/ALK)

จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายของ PLA फिल्मในชุดทดลองต่างๆกับงานวิจัยที่ผ่านมา (ตารางที่ 4.25 และ 4.26) พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA फिल्मที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มีประสิทธิภาพสูงกว่าการย่อยสลาย PLA ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิปานกลาง (mesophilic condition) แต่พบว่ายังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการย่อยสลาย PLA ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิสูง (thermophilic condition) ดังตารางที่ 4.26 ซึ่งการเดินระบบที่อุณหภูมิห้องมีข้อดีคือสูญเสียพลังงานในการเดินระบบน้อยกว่า ซึ่งมีข้อจำกัดคือการสิ้นเปลืองสารเคมีเนื่องจากการนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาใช้ร่วมด้วย

จากงานวิจัยนี้พบว่าการปรับสภาพชั้นต้น PLA फिल्मด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ pH 13 (NaOH 0.5 โมลาร์) เป็นระยะเวลา 2.5 วัน ส่งผลให้ PLA फिल्मถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดแลคติก และเมื่อเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนกรดแลคติกจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติกแอสิด ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน นอกจากนี้การปรับสภาพ PLA फिल्मด้วย NaOH ส่งผลให้พื้นผิวของ PLA फिल्मถูกทำลาย ทำให้เกิดรูพรุน (porosity) ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการเข้าย่อยสลายด้วยเอนไซม์และแบคทีเรีย และจากผลศึกษาการหมักร่วม PLA फिल्मด้วยสารละลาย NaOH ร่วมกับขยะอินทรีย์ (ขยะเศษอาหารและขยะเศษผักสด) ช่วยเพิ่มร้อยละของก๊าซมีเทนซึ่งเป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการปรับสภาพ PLA फिल्मด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายของ PLA फिल्मเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถแสดงผังการไหลของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วม PLA फिल्मที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับขยะอินทรีย์ได้ดังภาพที่ 4.32



ภาพที่ 4.33 ผังการไหลการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วม PLA फिल्मที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับขยะอินทรีย์

ตารางที่ 4.25 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายของ PLA ฟิล์ม ด้วยการปรับสภาพขั้นต้น (Pretreatment) และการหมักร่วม (Co-digestion)

งานวิจัย	สารตั้งต้น	การปรับสภาพ	ผลการศึกษา	
			%Weight loss	Lactic acid (mmoles)
ศิริวิมล สุขสวัสดิ์ (2556)	PLA	-ปรับสภาพด้วยไมโครเวฟ, น้ำยาล้างจาน และน้ำร้อน -Aerobic Digestion ที่ 37°C	98.4 , 92.9 และ 31.9 ตามลำดับ	-
Chauliac (2013)	PLA	- NaOH 1 M -ความร้อน (60,160°C) -ระยะเวลา 0.5 ชม.	-	10 และ 18 mmoles/1gPLA ที่ 60 และ 160°C ตามลำดับ
Tsuji และคณะ (2006)	PLLA	- ปรับสภาพด้วย NaOH 0.1 M, ระยะเวลา 5 ชม. - 37°C	5.88%	-
งานวิจัยนี้	PLA	-ปรับสภาพด้วย NaOH 0.5 M (pH=13) , ระยะเวลา 2.5 วัน	38.5%	7.6 mmoles/1gPLA ที่ 30°C

หมายเหตุ : (-) หมายถึง ไม่ได้ทำการทดลอง

**ตารางที่ 4.26** เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายของ PLA ฟิล์ม การหมักร่วม (Co-digestion)

งานวิจัย	สารตั้งต้น	ระบบที่ใช้ศึกษา	ผลการศึกษา	
			ก๊าซชีวภาพ/ก๊าซมีเทน	Biodegradability (%)
นาวิน เนสุสินธุ์ (2554)	PLA	-AD ใช้ดินจากหลุมฝังกลบ - ที่ 55°C - 60วัน	ก๊าซชีวภาพ 505.8 L/KgVS, ก๊าซมีเทน 105.9 L/KgVS, 20% CH <sub>4</sub>	-
Wang และคณะ (2012)	PLA	-AD (ระบบหมัก 2 ขั้นตอน) -ที่ 55°C และ 80°C	ก๊าซมีเทน 82.9% และ 80.8%	-
Yagi และคณะ (2009)	PLA	-AD (แบบแบทช์) -ที่ 35 และ 55°C -ระยะเวลา 75 วัน	-ที่ 35°C ก๊าซชีวภาพ 130 L/KgVS -ที่ 55°C ก๊าซชีวภาพ 904 L/KgVS , 56% CH <sub>4</sub>	-ที่ 35°C , 22% -ที่ 55°C , 92%
งานวิจัยนี้	PLA	การทดลอง BMP -PLA 1.12 g ปรับสภาพที่ pH 13 (NaOH 0.5 M) ,2.5 วัน	429.3 L/KgVS	48.87%
	PLA	การทดลองหมักร่วม ด้วยถังปฏิกรณ์ควบคุมแบบแบทช์ 65วัน		
		-ขยะเศษอาหาร	607.44 L/KgVS , 50.9 %CH <sub>4</sub>	-
		-PLA ฟิล์ม ปรับสภาพ	230.51 L/KgVS , 75.6 %CH <sub>4</sub>	-
		-ขยะเศษอาหารหมักร่วม PLA ฟิล์ม ไม่ปรับสภาพ (1:1)	346.04 L/KgVS , 68.4 %CH <sub>4</sub>	-
		-ขยะเศษอาหาร หมักร่วม PLA ฟิล์ม ปรับสภาพ (1:1)	627.41 L/KgVS , 76.6 %CH <sub>4</sub>	-
		-ขยะเศษผักสด หมักร่วม PLA ฟิล์มปรับสภาพด้วย (1:1)	500.45 L/KgVS , 69.0 %CH <sub>4</sub>	-

หมายเหตุ : AD หมายถึง การย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)

(-) หมายถึง ไม่ได้ทำการทดลอง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการย่อยสลายทางชีวภาพจาก PLA พิล์ม โดยการปรับสภาพขั้นต้นด้วยตัวสลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และการหมักร่วม (Co-digestion) กับขยะอินทรีย์ ได้แก่ ขยะเศษอาหาร และเศษผักจากตลาดสด สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1) ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพ PLA พิล์ม ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยวิธีบีเอ็มพี โดยใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (RSM)

ผลการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพขั้นต้น PLA พิล์มด้วย NaOH โดยใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (RSM) จากชุดทดลองบีเอ็มพี ซึ่งเมื่อพิจารณาชุดทดลองที่ให้ผลการผลิตก๊าซชีวภาพและประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (%Biodegradability) สูงที่สุด คือ ชุดทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพด้วย PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH และสารละลาย NaOH พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความถูกต้องและเหมาะสมเพื่อนำไปวิเคราะห์ ANOVA และสมการความสัมพันธ์ของปัจจัย (พีเอชและระยะเวลา) กับค่าตอบสนอง (ปริมาณก๊าซชีวภาพและ %Biodegradability) เมื่อใช้สมการพิจารณาระดับของปัจจัยที่ให้ค่าตอบสนองสูงที่สุด คือ การปรับสภาพ PLA พิล์มด้วย NaOH ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ (ค่าพีเอชเท่ากับ 13) เป็นระยะเวลา 2.5 วัน ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพและ %Biodegradability เท่ากับ 429.3 L/KgVS<sub>added</sub> และ 48.87% ตามลำดับ โดยสามารถสร้างสมการทำนายปริมาณก๊าซชีวภาพและ %Biodegradability (ตารางที่ 5.1) ซึ่งถูกนำมาสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยค่าพีเอชและระยะเวลาในการปรับสภาพ PLA พิล์มได้ แสดงให้เห็นว่าการใช้ NaOH ที่ระดับพีเอชและระยะเวลาในการปรับสภาพเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพ และ %Biodegradability เพิ่มขึ้น ซึ่งยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์ปริมาณกรดแลคติกในสารละลาย NaOH ที่ผ่านการปรับสภาพ PLA พิล์ม ที่สภาวะคัดเลือกพบว่าปริมาณกรดแลคติกเท่ากับ 18,200 mg/L แสดงให้เห็นว่า PLA พิล์มที่ปรับสภาพถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดแลคติกและถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนสามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพได้

ตารางที่ 5.1 สมการแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่อค่าตอบสนองทางสถิติ

	Model Equations	R <sup>2</sup>	Adj R <sup>2</sup>	p-value
ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (L/KgVSadded)	$102.28564 - 29.29634 * \text{pH} - 4.86866 * \text{Reaction Time} + 7.51438 * \text{pH} * \text{Reaction Time} + 3.06719 * \text{pH}^2 - 7.57566 * \text{Reaction Time}^2$	0.9323	0.8840	0.0006
Biodegradability (%)	$10.79379 - 3.41137 * \text{pH} - 0.56692 * \text{Reaction time} + 0.87500 * \text{pH} * \text{Reaction time} + 0.35715 * \text{pH}^2 - 0.88214 * \text{Reaction time}^2$	0.9323	0.8840	0.0006

2) การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของ PLA फिल्म โดยการหมักร่วม (co-digestion) และขยะอินทรีย์ (Organic wastes)

จากการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วม PLA फिल्म ที่ผ่านการสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.5 โมลาร์ (ค่าพีเอชเท่ากับ 13) เป็นระยะเวลา 2.5 วัน (สภาวะที่เหมาะสมได้จากหลักการ RSM) ทำการหมักร่วมขยะอินทรีย์ ได้แก่ ขยะเศษอาหารและเศษผักสด เติมน้ำในระบบที่อุณหภูมิห้องด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบทช์ เป็นระยะเวลา 65 วัน สามารถสรุปผลได้ดังนี้

- การหมักร่วม PLA फिल्म ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH และขยะอินทรีย์ ไม่ส่งผลกระทบต่อ การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยพบว่า การหมักร่วมขยะเศษอาหารกับ PLA फिल्म ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ในอัตราส่วน 1:1 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด เท่ากับ 627.4 L/KgVS<sub>added</sub> ซึ่งสูงกว่าการหมักขยะเศษอาหารเพียงอย่างเดียว 1.03 เท่า (607.4 L/KgVS<sub>added</sub>) และสูงกว่าการหมัก PLA ที่ผ่านการปรับสภาพเพียงอย่างเดียวถึง 2.7 เท่า (230.51 L/KgVS<sub>added</sub>)
- เมื่อเปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพจาก PLA फिल्म ที่ผ่านการปรับสภาพและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH หมักร่วมกับขยะอินทรีย์ พบว่าการหมักร่วม PLA फिल्म ที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับขยะเศษอาหารในอัตราส่วน 1:1 ให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าถึง 1.81 เท่า (627.4 L/KgVS<sub>added</sub>) เมื่อเปรียบเทียบกับ การหมักร่วม PLA ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพกับขยะเศษอาหารในอัตราส่วน 1:1 (346.0 L/KgVS<sub>added</sub>)

- การหมักร่วม PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH และขยะอินทรีย์ สามารถเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ โดยส่งผลให้ก๊าซชีวภาพมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ สูงถึงร้อยละ 68-77 และการหมักร่วม PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH กับขยะเศษอาหารและเศษผักสด ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงถึง 211.6 และ 282.7 L/KgVS<sub>added</sub> ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า PLA พิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลาย NaOH มีคุณสมบัติเพียงพอที่จะนำไปใช้เป็นวัสดุหมักร่วมกับขยะอินทรีย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1) เป็นที่น่าสนใจในการนำ PLA ที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH ไปใช้เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบนำร่องขนาดเล็กเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะครัวเรือนหรือโรงอาหาร เนื่องจากช่วยให้ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนสูงขึ้น

2) ในงานวิจัยนี้ทำการปรับค่าพีเอชหลังการสภาพขั้นต้น PLA ด้วยสารละลาย NaOH เนื่องจากยังมีค่าพีเอชสูง จึงต้องใช้กรดฟอสฟอริกปรับให้ค่าพีเอชเป็นกลางก่อนการนำไปใช้ในขั้นตอนการหมักร่วมขยะอินทรีย์ ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจต่อการศึกษาถึงปริมาณ NaOH ที่พอดีต่อการเป็นสารละลายบัฟเฟอร์ในระบบหมัก ซึ่งจะช่วยลดขั้นตอนการใช้กรด และทำให้เกิดความคุ้มค่าในการนำไปใช้ต่อไป



## รายการอ้างอิง

### ภาษาอังกฤษ

- Bozano, P., Nosiglia, V., and Vitali, G. 2012. Co-digestion of biowaste and commercial waste with agricultural residues–Experiences from Castelleone (Italy).
- Chauliac, D. S. (2013). Development of a thermochemical process for hydrolysis of polylactic acid polymers to l-lactic acid and its purification using an engineered microbe. University of Florida.
- European bioplastics. Bioplastic materials. [online] . 2015. Available from: <http://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials> [5 October 2015 2015]
- Itävaara, M., Karjomaa, S., and Selin, J.-F. 2002. Biodegradation of polylactide in aerobic and anaerobic thermophilic conditions. Chemosphere. 46(6): 879-885.
- Madhavan Nampoothiri, K., Nair, N. R., and John, R. P. 2010. An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research. Bioresour Technol. 101(22): 8493-8501.
- Montgomery, D. C. (1982). Design and analysis of experiments. Wiley New York.
- NatureWorks LLC. Ingeo™ Biopolymer 4043D Technical Data Sheet. [online]. 2016. Available from: [http://www.natureworkslc.com/~media/Technical\\_Resources/Technical\\_Data\\_Sheets/TechnicalDataSheet\\_4043D\\_films\\_pdf.pdf](http://www.natureworkslc.com/~media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/TechnicalDataSheet_4043D_films_pdf.pdf) [17 October 2015 2016]
- Owen, W., Stuckey, D., Healy, J., Young, L., and McCarty, P. 1979. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. Water research. 13(6): 485-492.
- Saitawee, L., Teekasap, S., and Cheamsawat, N. 2014. Biogas production from anaerobic co-digestion of cow dung and organic wastes (Napier Pak Chong i and food waste) in Thailand: Temperature effect on biogas product. American Journal of Environmental Sciences. 10(2): 129.
- Tokiwa, Y., Calabia, B. P., Ugwu, C. U., and Aiba, S. 2009. Biodegradability of plastics. International journal of molecular sciences. 10(9): 3722-3742.

- Tokiwa, Y., and Suzuki, T. 1978. Hydrolysis of polyesters by *Rhizopus delemar* lipase. Agricultural and Biological Chemistry. 42(5): 1071-1072.
- Tsuji, H., and Miyauchi, S. 2001. Poly (L-lactide): VI Effects of crystallinity on enzymatic hydrolysis of poly (L-lactide) without free amorphous region. Polymer degradation and stability. 71(3): 415-424.
- Tsuji, H., Ogiwara, M., Saha, S. K., and Sakaki, T. 2006. Enzymatic, alkaline, and autocatalytic degradation of poly (L-lactic acid): effects of biaxial orientation. Biomacromolecules. 7(1): 380-387.
- Wang, F., Hidaka, T., Tsuno, H., and Tsubota, J. 2012. Co-digestion of polylactide and kitchen garbage in hyperthermophilic and thermophilic continuous anaerobic process. Bioresource technology. 112: 67-74.
- Wu, W. 2000. Anaerobic co-digestion of biomass for methane production: recent research achievements. Optimization. 1:1.
- 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. Polymer Degradation and Stability. 94(9): 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.

## ภาษาไทย

- คณะกรรมการส่งเสริมและสนับสนุนอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ. พลาสติกชีวภาพ อุตสาหกรรมคลื่นลูกใหม่ ทางเลือกเพื่อสิ่งแวดล้อม [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: [http://www.tbia.or.th/Knowledge/Industry%20Focus\\_18-19\\_Bio.pdf](http://www.tbia.or.th/Knowledge/Industry%20Focus_18-19_Bio.pdf). [มีนาคม 2556]
- จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. งานวิจัยและสิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาบรรจุภัณฑ์ จากพลาสติกชีวภาพชนิด PLA [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/interestingarticle.php>. [6 มิถุนายน 2558]
- ธนาวดี ลี้จากภัย. (2555). พลาสติกย่อยสลายได้เพื่อสิ่งแวดล้อม (พิมพ์ครั้งที่ 2.). บริษัทไทยเอฟเฟคท์สตูดิโอ จำกัด: ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค).
- นาวิน เนสุสินธุ์. 2554. การย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในดินจากบ่อฝังกลบขยะผสมกากตะกอนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4421. กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ข้อกำหนดพลาสติกสลายตัวได้ [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: <http://www.ratchakitcha.soc.go.th/DATA/PDF/2555/E/118/7.PDF>. [6 มิถุนายน 2558]
- ปารเมศ ชูติมา. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 1.). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิสุทธิ เลิศวิไล. พลาสติกชีวภาพ "ผลิตภัณฑ์เพื่อสิ่งแวดล้อม" [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: [http://thaihotels.org/wp-content/uploads/2012/11/TBIA\\_Presentation-for-Thai-Hotel-Association.2.pdf](http://thaihotels.org/wp-content/uploads/2012/11/TBIA_Presentation-for-Thai-Hotel-Association.2.pdf). [15 พฤศจิกายน 2558]
- ศิริวิมล สุขสวัสดิ์. 2556. การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพพอลิแลกไทด์ที่ผ่านการใช้งานโดยแอคติโนมัยซีสต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาจุลชีววิทยาประยุกต์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ศุภชัย หล่อโลหการ. พลาสติกชีวภาพ อุตสาหกรรมคลื่นลูกใหม่ (New Wave Industry) และโอกาสไทย [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: <http://measwatch.org/news/1392>. [5 พฤศจิกายน 2558]
- ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. พลาสติกย่อยสลายได้ [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: [http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable\\_plastic/type\\_de\\_plas.html](http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html). [3 ธันวาคม 2558]

- สถาบันพลาสติก. Bioplastics [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: [http://www.thaiplastics.org/content\\_attachment/attach/plastics\\_foresight\\_vol.8\\_.pdf](http://www.thaiplastics.org/content_attachment/attach/plastics_foresight_vol.8_.pdf). [3 ธันวาคม 2559]
- สันทนต์ ศิริอนันต์ไพบูลย์. (2557). ระบบบำบัดน้ำเสีย. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด.
- สาธินี ศิริวัฒน์. 2553. ภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายทางชีวภาพของบรรจุภัณฑ์ชนิดพอลิเกรดแลคติกและเชื้อขานอ้อยและผลของการย่อยสลายต่อประชาคมแบคทีเรียในดิน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบการผลิตการควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: [http://www.diw.go.th/km/safety/pdf/biogas\\_2.pdf](http://www.diw.go.th/km/safety/pdf/biogas_2.pdf). [15 ตุลาคม 2558]
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. พลังงานจากขยะ [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/engy/Load/ET13.pdf>. [3 ธันวาคม 2558]
- สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. แผนที่นำทางแห่งชาติการพัฒนาก่อสร้างอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ (พ.ศ. 2551 - 2555) [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: [http://www.nia.or.th/bioplastics/download/bioplast\\_roadmap.pdf](http://www.nia.or.th/bioplastics/download/bioplast_roadmap.pdf). [1 มีนาคม 2559]
- สุทธิเกตุดี ทัดพิทักษ์กุล. พลาสติกชีวภาพ อุตสาหกรรมแห่งอนาคต [ออนไลน์]. 2556. แหล่งที่มา: [http://www.boi.go.th/upload/content/AllPages\\_February\\_56\\_70317.pdf](http://www.boi.go.th/upload/content/AllPages_February_56_70317.pdf). [22 ธันวาคม 2558]
- สุภัฒิต นิมรรัตน์. (2548). จุลชีววิทยาของน้ำเสีย (พิมพ์ครั้งที่ 1.). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อมรรรัตน์ เลิศวรสิริกุล. พอลิแลคติกแอซิด : พอลิเอสเทอร์จากทรัพยากรที่สร้างทดแทนใหม่ได้ [ออนไลน์]. 2554. แหล่งที่มา: <http://research.rdi.ku.ac.th/forest>. [20 มิถุนายน 2558]
- อรรวรรณ วัฒนยมนาพร. 2553. การหมักร่วมของขยะเศษอาหารกับกากตะกอนน้ำเสียชุมชนโดยใช้ถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

**ภาคผนวก ก**  
**วิธีการคำนวณ**

**1. การคำนวณประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (%Biodegradation)**

1.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

สมการที่ 1 แสดงสมการคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลาย PLA ทางทฤษฎี

$$C_nH_aO_b + (n + a/4 - b/2) H_2O = (n/2 + a/8 - b/4) CH_4 + (n/2 + a/8 - b/4) CO_2 \quad (1)$$

จะได้  $C_3H_4O_2 + H_2O = 1.5CH_4 + 1.5CO_2$

ดังนั้น 1 โมลของกรดแลคติก ( $C_3H_4O_2$ ) จะทำให้ได้ 3 โมลของก๊าซชีวภาพ

หมายเหตุ : ในงานวิจัยนี้สมมติให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลอง BMP มาจากการย่อยสลาย PLA ฟิล์ม ซึ่งเป็นสารอินทรีย์เพียงชนิดเดียวที่ใส่ลงในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยไม่พิจารณาการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปอยู่ในรูปของเซลล์จุลินทรีย์เนื่องจากปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระบบไร้อากาศจะได้พลังงานน้อยจึงทำให้เซลล์ของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นใหม่มีจำนวนไม่มาก ดังนั้นจึงขอ นำปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้มาใช้ในการคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพดังสมการที่ 2 ต่อไป

สมการที่ 2 แสดงวิธีการคำนวณเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ(% Biodegradation)

$$\text{Biodegradation (\%)} = \frac{\sum v(s) - \sum v(c)}{v_{max}} \times 100\% \quad (2)$$

โดยที่  $\sum v(s)$  คือ ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากชุดตัวอย่าง (ลิตร)

$\sum v(c)$  คือ ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากชุดควบคุม (ลิตร)

$v_{max}$  คือ ปริมาตรก๊าซชีวภาพสูงสุดที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี ดังสมการที่

2 (ลิตร)

จาก  $M_w$  of Lactic acid = 72g/mol และน้ำหนัก PLA เริ่มต้น = 0.96 g ทำการทดลองที่ 30 องศาเซลเซียส จะได้  $V_{max} = (0.96/72) \times 3 \times 24.86 = 0.994 = 994$  มล.

1.2 จากผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธี BMP

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากชุดทดลอง PLA ฟิล์มที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH 0.5 โมลาร์ (pH = 13) เป็นระยะเวลา 2 วัน เท่ากับ 513 มล. และชุดควบคุม (หัวเชื้อเพียงอย่างเดียว) เท่ากับ 11.1 มล.

จะได้ Biodegradability (%) =  $((513-11.1)/994) \times 100 = 50.5\%$

ภาคผนวก ข  
ผลการวิเคราะห์ ANOVA

ตารางที่ ข - 1 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของตัวแปรต่อปริมาณก๊าซชีวภาพ (ชุดที่ 1)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F - value	p-value Prob > F
Model	21872.81	9	2430.31	7.43	0.0021
A-NaOH Conc.	2147.55	1	2147.55	6.57	0.0282
B-Reaction Time	11489.57	1	11489.57	35.14	0.0001
C-Temperature	492.40	1	492.40	1.51	0.2479
AB	3923.50	1	3923.50	12.00	0.0061
AC	17.47	1	17.47	0.053	0.8219
BC	123.87	1	123.87	0.38	0.5520
A <sup>2</sup>	140.84	1	140.84	0.43	0.5264
B <sup>2</sup>	460.49	1	460.49	1.41	0.2628
C <sup>2</sup>	143.77	1	143.77	0.44	0.5223
Residual	3269.81	10	326.98		
Lack of Fit	2653.97	5	530.79	4.31	0.0674
Pure Error	615.84	5	123.17		
Cor Total	25142.62	19			

ตารางที่ ข - 2 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ชุดที่ 1)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F - value	p-value Prob > F
Model	1869.67	9	207.74	7.72	0.0018
A-NaOH Conc.	417.22	1	417.22	15.50	0.0028
B-Reaction Time	108.82	1	108.82	4.04	0.0721
C-Temperature	12.60	1	12.60	0.47	0.5094
AB	657.06	1	657.06	24.41	0.0006
AC	155.93	1	155.93	5.79	0.0369
BC	467.53	1	467.53	17.37	0.0019
A <sup>2</sup>	95.75	1	95.75	3.56	0.0886
B <sup>2</sup>	2.25	1	2.25	0.084	0.7782
C <sup>2</sup>	2.22	1	2.22	0.083	0.7798
Residual	269.14	10	26.91	-	-
Lack of Fit	224.27	5	44.85	5.00	0.0510
Pure Error	44.87	5	8.97	-	-
Cor Total	2138.82	19	-	-	-



ตารางที่ ข - 3 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (ชุดที่ 1)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F - value	p-value Prob > F
Model	221.38	9	24.60	7.43	0.0021
A-NaOH Conc.	21.74	1	21.74	6.57	0.0282
B-Reaction Time	116.29	1	116.29	35.14	0.0001
C-Temperature	4.98	1	4.98	1.51	0.2479
AB	39.71	1	39.71	12.00	0.0061
AC	0.18	1	0.18	0.053	0.8219
BC	1.25	1	1.25	0.38	0.5520
A <sup>2</sup>	1.43	1	1.43	0.43	0.5264
B <sup>2</sup>	4.66	1	4.66	1.41	0.2628
C <sup>2</sup>	1.46	1	1.46	0.44	0.5223
Residual	33.09	10	3.31	-	-
Lack of Fit	26.86	5	5.37	4.31	0.0674
Pure Error	6.23	5	1.25	-	-
Cor Total	254.47	19	-	-	-

ตารางที่ ข - 4 สมการและค่าทางสถิติที่ได้จากโปรแกรม (ชุดที่1)

	Model Equations	R <sup>2</sup>	Adj R <sup>2</sup>	p-value
ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (L/KgVSadded)	$134.69 + 14.23 * \text{NaOH Conc.} + 6.03 * \text{Reaction time} + 32.93 * \text{Temperature} + 1.48 * \text{NaOH Conc.} * \text{Reaction time} + 22.15 * \text{NaOH Conc.} * \text{Temperature} + 3.94 * \text{Reaction time} * \text{Temperature} - 3.99 * \text{NaOH Conc.}^2 - 3.18 * \text{Reaction time}^2 + 7.20 * \text{Temperature}^2$	0.8699	0.7529	0.0021
Biodegradability (%)	$12.01 + 1.43 * \text{NaOH Conc.} + 0.61 * \text{Reaction Time} + 3.31 * \text{Temperature} + 0.15 * \text{NaOH} * \text{Reaction Time} + 2.23 * \text{NaOH Conc.} * \text{Reaction Time} + 0.40 * \text{Reaction Time} * \text{Temperature} - 0.40 * \text{NaOH Conc.}^2 - 0.32 * \text{Reaction Time}^2 + 0.72 * \text{Temperature}^2$	0.8699	0.7529	0.0021

ตารางที่ ข - 5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของตัวแปรต่อปริมาณก๊าซชีวภาพ (ชุดที่ 2)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F - value	p-value Prob > F
Model	1.108E+005	5	22164.76	19.29	0.0006
A-pH	95871.22	1	95871.22	83.45	< 0.0001
B-Reaction time	10387.45	1	10387.45	9.04	0.0197
AB	1411.65	1	1411.65	1.23	0.3043
A <sup>2</sup>	2483.77	1	2483.77	2.16	0.1849
B <sup>2</sup>	387.89	1	387.89	0.34	0.5794
Residual	8041.55	7	1148.79		
Lack of Fit	7870.49	3	2623.50	61.35	0.0008
Pure Error	171.06	4	42.77		
Cor Total	1.189E+005	12			

ตารางที่ ข - 6 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (ชุดที่ 2)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F - value	p-value Prob > F
Model	2495.11	5	499.02	13.75	0.0017
A-pH	2307.48	1	2307.48	63.59	< 0.0001
B-Reaction time	0.40	1	0.40	0.011	0.9196
AB	27.10	1	27.10	0.75	0.4161
A <sup>2</sup>	90.82	1	90.82	2.50	0.1577
B <sup>2</sup>	50.68	1	50.68	1.40	0.2759
Residual	254.01	7	36.29		
Lack of Fit	122.84	3	40.95	1.25	0.4032
Pure Error	131.17	4	32.79		
Cor Total	2749.12	12			

ตารางที่ ข - 7 ผลการวิเคราะห์ ANOVA ของตัวแปรต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพ (ชุดที่ 2)

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F - value	p-value Prob > F
Model	1502.67	5	300.53	19.29	0.0006
A-pH	1299.93	1	1299.93	83.45	< 0.0001
B-Reaction time	140.84	1	140.84	9.04	0.0197
AB	19.14	1	19.14	1.23	0.3043
A <sup>2</sup>	33.68	1	33.68	2.16	0.1849
B <sup>2</sup>	5.26	1	5.26	0.34	0.5794
Residual	109.04	7	15.58		
Lack of Fit	106.72	3	35.57	61.35	0.0008
Pure Error	2.32	4	0.58		
Cor Total	1611.70	12			

ตารางที่ ข - 8 สมการและค่าทางสถิติที่ได้จากโปรแกรม (ชุดที่2)

	Model Equations	R <sup>2</sup>	Adj R <sup>2</sup>	p-value
ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (L/KgVSadded)	$102.28564 - 29.29634 * \text{pH} - 4.86866 * \text{Reaction Time} + 7.51438 * \text{pH} * \text{Reaction Time} + 3.06719 * \text{pH}^2 - 7.57566 * \text{Reaction Time}^2$	0.9323	0.8840	0.0006
Biodegradability (%)	$10.79379 - 3.41137 * \text{pH} - 0.56692 * \text{Reaction time} + 0.87500 * \text{pH} * \text{Reaction time} + 0.35715 * \text{pH}^2 - 0.88214 * \text{Reaction time}^2$	0.9323	0.8840	0.0006

**ภาคผนวก ค**  
**ผลการวิเคราะห์ข้อมูล**

**ตารางที่ ค - 1 ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองปีเอ็มพีและค่าที่ได้จากสมการทำนาย (ชุดที่ 1)**

ชุดที่	สภาวะการปรับสภาพ			ค่าตอบสนองต่อปัจจัย					
	NaOH (โมลาร์)	อุณหภูมิ (°C)	ระยะเวลา (ชม.)	Biogas production (L/KgVSadded)		sCOD removal (%)		Biodegradability (%)	
				ค่าเฉลี่ยจากการ ทดลอง	สมการ ทำนาย	ค่าเฉลี่ยจากการ ทดลอง	สมการ ทำนาย	ค่าเฉลี่ยจาก การทดลอง	สมการ ทำนาย
1	0.50	60.00	0.00	80.10±03.68	97.44	38.84±03.68	39.72	06.52±0.37	8.26
2	0.00	60.00	24.00	119.73±09.40	139.76	54.85±10.86	57.74	10.51±0.95	12.52
3	0.25	45.00	12.00	136.87±12.87	134.69	58.88±04.22	60.12	12.23±1.29	12.01
4	0.25	45.00	12.00	141.04±02.26	134.69	62.01±06.29	60.12	12.65±0.23	12.01
5	0.25	45.00	12.00	135.27±12.45	134.69	61.96±06.29	60.12	12.07±1.30	12.01
6	0.00	45.00	12.00	127.29±12.45	99.47	51.17±04.83	40.27	11.27±1.25	8.47
7	0.25	45.00	12.00	143.23±09.33	134.69	56.69±04.87	60.12	12.87±0.94	12.01
8	0.25	45.00	0.00	113.07±10.11	99.67	53.08±04.99	54.72	09.84±1.02	8.48
9	0.25	20.00	12.00	126.14±08.91	115.55	60.33±07.31	58.51	11.15±0.90	10.08
10	0.00	30.00	0.00	96.72±12.09	109.10	60.36±07.31	58.68	08.19±1.22	9.44
11	0.25	45.00	12.00	123.45±13.79	134.69	64.55±02.90	60.12	10.88±1.39	12.01
12	0.25	45.00	32.20	230.21±07.78	210.45	74.68±01.43	65.52	21.62±0.78	19.61
13	0.25	45.00	12.00	114.63±10.39	134.69	57.83±01.06	60.12	09.99±1.05	12.01
14	0.00	60.00	0.00	119.58±06.08	110.32	55.00±05.57	54.14	10.49±0.61	9.56
15	0.50	30.00	24.00	168.35±09.33	207.21	66.14±06.03	75.37	15.40±0.94	19.30
16	0.50	60.00	24.00	212.86±05.87	215.48	73.70±02.92	79.67	19.87±0.59	20.14
17	0.67	45.00	12.00	164.74±10.96	147.34	67.39±02.73	61.36	15.03±1.10	13.28
18	0.00	30.00	24.00	125.16±09.12	122.78	28.39±02.90	31.68	11.05±0.92	10.80
19	0.50	30.00	0.00	95.35±07.42	207.21	60.62±1.78	75.37	8.05±8.05	19.30
20	0.25	70.00	12.00	147.13±10.96	135.84	64.04±5.43	61.73	13.26±1.10	12.13

ตารางที่ ค - 2 ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองบีเอ็มพีและค่าที่ได้จากสมการทำนาย (ชุดที่ 2)

ชุดทดลอง	สภาวะการปรับสภาพ		ค่าตอบสนองต่อปัจจัย					
	พีเอช	เวลา (วัน)	Biogas production (L/KgVSadded)		sCOD removal (%)		Biodegradability (%)	
			ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง	สมการทำนาย	ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง	สมการทำนาย	ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง	สมการทำนาย
1	6.0	2.0	91.88	300.65	54.23	55.79	9.58	8.93
2	7.0	1.0	84.73	288.91	63.60	59.27	8.75	9.09
3	7.0	3.0	103.85	288.91	53.28	53.63	10.98	13.15
4	9.5	0.6	153.23	271.82	61.13	67.42	16.73	14.85
5	9.5	2.0	193.36	313.54	65.55	72.59	21.40	22.58
6	9.5	2.0	204.76	313.54	78.12	72.59	22.73	22.58
7	9.5	2.0	200.18	313.54	71.53	72.59	22.19	22.58
8	9.5	2.0	207.05	313.54	69.19	72.59	22.99	22.58
9	9.5	2.0	210.12	313.54	78.78	72.59	23.35	22.58
10	9.5	3.4	277.12	324.95	72.50	66.80	31.15	26.79
11	12.0	1.0	236.86	323.77	92.71	88.21	26.46	30.33
12	12.0	3.0	331.12	398.93	93.26	92.97	37.44	43.15
13	13.0	2.0	443.30	403.08	97.30	104.06	50.50	45.15

ตารางที่ ค - 3 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบตช์

วันที่	ชุดที่ 1 ชุดควบคุมขยะเศษอาหารชนิดเดียว			ชุดที่ 2 ชุดควบคุม PLA พิล์ม ผ่านการปรับสภาพชนิดเดียว		
	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
0	0	0	0.00	0	0	0.00
1	158	6320	105.35	43	1720	28.73
2	269	10760	179.36	56	2240	37.42
3	284	11360	189.37	75	3000	50.11
4	361	14440	240.71	89	3560	59.46
5	385	15400	256.71	112	4480	74.83
6	407	16280	271.38	133	5320	88.86
7	431	17240	287.38	156	6240	104.23
8	457	18280	304.72	189	7560	126.28
9	494	19760	329.39	225	9000	150.33
10	509	20360	339.39	250	10000	167.03
11	521	20840	347.39	261	10440	174.38
12	528	21120	352.06	273	10920	182.40
13	551	22040	367.40	275	11000	183.74
14	573	22920	382.06	289	11560	193.09
15	588	23520	392.07	301	12040	201.11
16	605	24200	403.40	309	12360	206.45
17	615	24600	410.07	315	12600	210.46
18	632	25280	421.40	321	12840	214.47
19	669	26760	446.07	325	13000	217.14
20	685	27400	456.74	329	13160	219.82
21	697	27880	464.74	334	13360	223.16
22	699	27960	466.08	336	13440	224.49
23	715	28600	476.75	339	13560	226.50
24	731	29240	487.42	340	13600	227.17
25	743	29720	495.42	340	13600	227.17
26	755	30200	503.42	342	13680	228.50
27	766	30640	510.75	343	13720	229.17
28	778	31120	518.75	344	13760	229.84
29	787	31480	524.75	345	13800	230.51
30	805	32200	536.76	345	13800	230.51
31	808	32320	538.76	345	13800	230.51
32	820	32800	546.76	345	13800	230.51

หมายเหตุ \* เครื่องตรวจวัดปริมาณก๊าซนับ 1 ครั้ง เท่ากับ 40 มิลลิลิตร

ตารางที่ ค - 3 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์แบบแบตช์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 1 ชุดควบคุมขยะเศษอาหารชนิดเดียว			ชุดที่ 2 ชุดควบคุม PLA ฟิล์ม ผ่านการปรับสภาพชนิดเดียว		
	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
33	827	33080	551.43	345	13800	230.51
34	844	33760	562.76	345	13800	230.51
35	858	34320	572.10	345	13800	230.51
36	875	35000	583.43	345	13800	230.51
37	899	35960	599.43	345	13800	230.51
38	906	36240	604.10	345	13800	230.51
39	906	36240	604.10	345	13800	230.51
40	907	36280	604.77	345	13800	230.51
41	908	36320	605.44	345	13800	230.51
42	909	36360	606.10	345	13800	230.51
43	909	36360	606.10	345	13800	230.51
44	909	36360	606.10	345	13800	230.51
45	910	36400	606.77	345	13800	230.51
46	910	36400	606.77	345	13800	230.51
47	910	36400	606.77	345	13800	230.51
48	911	36440	607.44	345	13800	230.51
49	911	36440	607.44	345	13800	230.51
50	911	36440	607.44	345	13800	230.51
51	911	36440	607.44	345	13800	230.51
52	911	36440	607.44	345	13800	230.51
53	911	36440	607.44	345	13800	230.51
54	911	36440	607.44	345	13800	230.51
55	911	36440	607.44	345	13800	230.51
56	911	36440	607.44	345	13800	230.51
57	911	36440	607.44	345	13800	230.51
58	911	36440	607.44	345	13800	230.51
59	911	36440	607.44	345	13800	230.51
60	911	36440	607.44	345	13800	230.51
61	911	36440	607.44	345	13800	230.51
62	911	36440	607.44	345	13800	230.51
63	911	36440	607.44	345	13800	230.51
64	911	36440	607.44	345	13800	230.51
65	911	36440	607.44	345	13800	230.51

หมายเหตุ \* เครื่องตรวจวัดปริมาณก๊าซนับ 1 ครั้ง เท่ากับ 40 มิลลิลิตร



ตารางที่ ค - 3 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบตช์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 3 ขยะเศษอาหารหมักรวม PLA พิล์ม ไม่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)			ชุดที่ 4 ขยะเศษอาหาร หมักรวม PLA พิล์ม ผ่านการปรับสภาพ (1:1)		
	จำนวนนับจากเครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตรต่อกก. ของแห้งระเหย)	จำนวนนับจากเครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตรต่อกก. ของแห้งระเหย)
0	0	0	0.00	0	0	0.00
1	69	2760	46.01	122	4880	81.34
2	82	3280	54.67	247	9880	164.69
3	145	5800	96.68	335	13400	223.36
4	169	6760	112.68	444	17760	296.04
5	192	7680	128.02	487	19480	324.71
6	202	8080	134.68	512	20480	341.38
7	211	8440	140.68	537	21480	358.05
8	225	9000	150.02	568	22720	378.72
9	248	9920	165.35	592	23680	394.72
10	259	10360	172.69	607	24280	404.72
11	292	11680	194.69	614	24560	409.39
12	336	13440	224.03	620	24800	413.39
13	339	13560	226.03	630	25200	420.05
14	344	13760	229.36	634	25360	422.72
15	358	14320	238.70	640	25600	426.72
16	371	14840	247.37	656	26240	437.39
17	382	15280	254.70	673	26920	448.72
18	395	15800	263.37	687	27480	458.06
19	412	16480	274.70	713	28520	475.40
20	435	17400	290.04	724	28960	482.73
21	448	17920	298.71	742	29680	494.73
22	453	18120	302.04	757	30280	504.73
23	460	18400	306.71	772	30880	514.73
24	466	18640	310.71	783	31320	522.07
25	474	18960	316.04	788	31520	525.40
26	478	19120	318.71	803	32120	535.40
27	484	19360	322.71	810	32400	540.07
28	492	19680	328.04	819	32760	546.07
29	498	19920	332.04	830	33200	553.41
30	501	20040	334.04	842	33680	561.41
31	504	20160	336.04	851	34040	567.41
32	508	20320	338.71	865	34600	576.74

หมายเหตุ \* เครื่องตรวจวัดปริมาณก๊าซนับ 1 ครั้ง เท่ากับ 40 มิลลิลิตร

ตารางที่ ค - 3 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบตช์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 3 ขยะเศษอาหารหมักรวม PLA फिल्म ไม่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)			ชุดที่ 4 ขยะเศษอาหาร หมักรวม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพ (1:1)		
	จำนวนนับจากเครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)	จำนวนนับจากเครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
33	509	20360	339.38	878	35120	585.41
34	513	20520	342.04	894	35760	596.08
35	514	20560	342.71	901	36040	600.74
36	515	20600	343.38	903	36120	602.08
37	515	20600	343.38	906	36240	604.08
38	516	20640	344.04	907	36280	604.75
39	516	20640	344.04	913	36520	608.75
40	517	20680	344.71	919	36760	612.75
41	518	20720	345.38	922	36880	614.75
42	518	20720	345.38	927	37080	618.08
43	518	20720	345.38	931	37240	620.75
44	519	20760	346.04	933	37320	622.08
45	519	20760	346.04	936	37440	624.08
46	519	20760	346.04	938	37520	625.41
47	519	20760	346.04	939	37560	626.08
48	519	20760	346.04	940	37600	626.75
49	519	20760	346.04	940	37600	626.75
50	519	20760	346.04	941	37640	627.41
51	519	20760	346.04	941	37640	627.41
52	519	20760	346.04	941	37640	627.41
53	519	20760	346.04	941	37640	627.41
54	519	20760	346.04	941	37640	627.41
55	519	20760	346.04	941	37640	627.41
56	519	20760	346.04	941	37640	627.41
57	519	20760	346.04	941	37640	627.41
58	519	20760	346.04	941	37640	627.41
59	519	20760	346.04	941	37640	627.41
60	519	20760	346.04	941	37640	627.41
61	519	20760	346.04	941	37640	627.41
62	519	20760	346.04	941	37640	627.41
63	519	20760	346.04	941	37640	627.41
64	519	20760	346.04	941	37640	627.41
65	519	20760	346.04	941	37640	627.41

หมายเหตุ \* เครื่องตรวจวัดปริมาณก๊าซนับ 1 ครั้ง เท่ากับ 40 มิลลิลิตร

ตารางที่ ค - 3 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบตช์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 5 ขยะเศษผักสด หมักร่วม PLA พิล์ม ผ่านการปรับสภาพ ด้วย (1:1)		
	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
0	0	0	0.00
1	102	4080	67.97
2	167	6680	111.29
3	212	8480	141.27
4	234	9360	155.93
5	267	10680	177.92
6	291	11640	193.92
7	336	13440	223.90
8	358	14320	238.56
9	381	15240	253.89
10	402	16080	267.89
11	418	16720	278.55
12	425	17000	283.21
13	458	18320	305.20
14	470	18800	313.20
15	485	19400	323.20
16	493	19720	328.53
17	506	20240	337.19
18	518	20720	345.19
19	557	22280	371.17
20	562	22480	374.51
21	579	23160	385.84
22	591	23640	393.83
23	602	24080	401.16
24	618	24720	411.82
25	622	24880	414.49
26	637	25480	424.49
27	641	25640	427.15
28	653	26120	435.15
29	660	26400	439.81
30	665	26600	443.14
31	674	26960	449.14
32	679	27160	452.47

หมายเหตุ \* เครื่องตรวจวัดปริมาณก๊าซนับ 1 ครั้ง เท่ากับ 40 มิลลิลิตร

ตารางที่ ค - 3 ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบตช์ (ต่อ)

วันที่	ชุดที่ 1 ชุดควบคุมขยะเศษอาหารชนิดเดียว		
	จำนวนนับจาก เครื่องวัดก๊าซ*	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (มล)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ สะสม (ลิตรต่อกก. ของแข็งระเหย)
33	681	27240	453.81
34	704	28160	469.13
35	706	28240	470.47
36	709	28360	472.46
37	715	28600	476.46
38	721	28840	480.46
39	726	29040	483.79
40	731	29240	487.13
41	732	29280	487.79
42	736	29440	490.46
43	740	29600	493.12
44	744	29760	495.79
45	746	29840	497.12
46	747	29880	497.79
47	748	29920	498.45
48	748	29920	498.45
49	749	29960	499.12
50	750	30000	499.79
51	750	30000	499.79
52	750	30000	499.79
53	751	30040	500.45
54	751	30040	500.45
55	751	30040	500.45
56	751	30040	500.45
57	751	30040	500.45
58	751	30040	500.45
59	751	30040	500.45
60	751	30040	500.45
61	751	30040	500.45
62	751	30040	500.45
63	751	30040	500.45
64	751	30040	500.45
65	751	30040	500.45

หมายเหตุ \* เครื่องตรวจวัดปริมาณก๊าซนับ 1 ครั้ง เท่ากับ 40 มิลลิลิตร

ตารางที่ ค - 4 อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์กวนผสมรูปทรงแบบแบดซ์

วัน	อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ (องศาเซลเซียส)				
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5
0	31.0	30.1	31.0	31.2	31.2
1	30.9	29.9	30.5	30.8	31.1
2	30.4	30.2	30.4	30.7	31.4
3	31.2	30.0	30.6	31.1	31.2
4	30.7	30.3	30.7	31.3	31.3
5	29.8	30.5	29.8	31.1	31.1
6	29.9	30.4	29.7	31.5	31.6
7	30.0	30.8	29.6	31.9	31.9
8	30.1	30.6	30.6	31.7	31.7
9	31.2	30.3	31.2	32.5	32.5
10	30.8	30.5	31.0	32.2	32.3
11	30.5	30.3	31.1	31.9	31.9
12	31.0	30.4	31.2	32.2	31.6
13	31.3	30.4	31.3	32.1	32.1
14	31.1	30.7	31.1	32.5	31.8
15	31.2	30.8	31.6	32.2	32.2
16	31.9	30.6	31.9	32.3	32.3
17	31.7	30.3	31.7	32.4	32.6
18	32.5	30.8	32.5	32.4	32.4
19	32.2	31.3	32.2	31.1	31.1
20	31.9	31.5	31.9	31.8	32.5
21	32.0	31.0	32.5	32.3	32.3
22	32.1	31.2	32.1	32.1	32.3
23	32.2	30.4	32.7	31.5	31.8
24	32.2	30.7	32.2	31.9	31.4
25	32.3	39.6	32.3	32.9	32.5
26	31.8	29.8	32.1	32.2	32.8
27	31.9	30.2	31.7	33.2	33.1
28	31.1	30.5	31.1	31.9	31.6
29	31.2	30.4	31.8	31.4	31.8
30	32.3	31.2	32.3	31.6	31.5
31	32.1	31.1	32.1	31.8	31.4
32	31.5	31.2	31.5	32.3	32.5

ตารางที่ ค - 4 อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์กวนผสมรูปทรงแบบแบดซ์ (ต่อ)

วัน	อุณหภูมิในถังปฏิกรณ์ (องศาเซลเซียส)				
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5
33	31.9	31.5	31.9	32.8	32.6
34	32.9	31.3	32.9	32.5	32.1
35	32.2	31.1	32.2	30.5	30.5
36	33.2	31.2	33.2	30.7	30.7
37	31.9	31.9	31.9	30.4	30.4
38	30.3	31.7	31.8	31.5	31.3
39	31.0	32.5	31.3	32.4	32.2
40	31.2	32.4	31.6	33.4	33.1
41	32.3	31.9	32.4	34.3	34.2
42	32.2	32.6	32.2	34.3	34.3
43	32.4	32.1	32.6	33.9	33.6
44	30.5	32.4	30.5	34.1	34.2
45	30.7	32.2	30.5	34.3	34.2
46	30.4	32.3	30.8	34.1	33.8
47	31.5	32.4	31.3	34.5	34.2
48	32.4	31.8	32.6	34.2	34.2
49	33.4	31.1	33.5	34.1	33.8
50	34.3	31.4	34.2	33.8	33.6
51	34.3	32.3	34.1	33.9	34.2
52	33.9	32.1	34.1	33.6	33.8
53	34.1	31.5	34.2	34.8	34.5
54	34.3	31.9	34.5	34.9	34.6
55	34.2	32.9	34.7	34.2	34.5
56	34.6	32.2	34.5	34.3	34.2
57	34.2	33.2	34.5	34.1	34.1
58	34.8	31.9	34.2	34.2	34.1
59	34.5	32.2	34.2	34.1	33.9
60	33.8	32.6	33.6	34.2	34.1
61	34.3	32.2	34.6	34.5	34.3
62	34.5	32.3	34.4	34.2	34.1
63	34.9	32.6	34.7	34.1	33.9
64	34.1	32.4	34.5	34.2	33.8
65	34.2	30.5	34.4	34.3	34.1

หมายเหตุ

ชุดที่ 1 ชุดควบคุม ขยะเศษอาหารชนิดเดียว

ชุดที่ 2 ชุดควบคุม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพชนิดเดียว

ชุดที่ 3 ขยะเศษอาหารหมักร่วม PLA फिल्म ไม่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)

ชุดที่ 4 ขยะเศษอาหาร หมักร่วม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพ (1:1)

ชุดที่ 5 ขยะเศษผักสด หมักร่วม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพด้วย (1:1)



ตารางที่ ค - 5 ค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบแบตช์

วัน	ค่าพีเอช				
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5
0	8.05	7.90	7.80	7.96	7.94
3	5.80	6.81	7.11	7.36	7.59
6	7.44	7.64	6.78	6.90	7.45
9	7.08	7.52	7.53	7.57	6.89
12	6.88	7.50	7.54	7.46	6.65
15	7.87	7.35	7.46	7.34	7.68
18	7.25	7.45	7.59	7.32	7.55
21	7.23	7.43	7.57	7.27	7.57
24	7.20	7.53	7.62	7.36	7.43
27	7.32	7.74	7.73	7.54	7.43
30	7.40	7.65	7.82	7.67	7.46
33	7.21	7.75	7.70	7.43	7.33
36	7.52	7.78	7.64	7.56	7.32
39	7.53	7.68	7.68	7.62	7.45
42	7.57	7.57	7.55	7.65	7.43
45	7.43	7.56	7.80	7.57	7.33
48	7.56	7.34	7.73	7.46	7.32
51	7.67	7.45	7.72	7.45	7.32
54	7.66	7.59	7.81	7.59	7.31
57	7.66	7.59	7.78	7.56	7.42
60	7.68	7.66	7.71	7.44	7.42
63	7.68	7.70	7.75	7.45	7.42
66	7.69	7.76	7.76	7.46	7.45

หมายเหตุ

ชุดที่ 1 ชุดควบคุม ขยะเศษอาหารชนิดเดียว

ชุดที่ 2 ชุดควบคุม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพชนิดเดียว

ชุดที่ 3 ขยะเศษอาหารหมักร่วม PLA फिल्म ไม่ผ่านการปรับสภาพ (1:1)

ชุดที่ 4 ขยะเศษอาหาร หมักร่วม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพ (1:1)

ชุดที่ 5 ขยะเศษผักสด หมักร่วม PLA फिल्म ผ่านการปรับสภาพด้วย (1:1)



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุทิสรา สมิตธิเวชรงค์ เกิดเมื่อวันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2532 ที่จังหวัด ประจวบคีรีขันธ์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนประจวบวิทยาลัย จ. ประจวบคีรีขันธ์ ในปี 2549 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2559

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์แบบบรรยายในที่ประชุมนานาชาติ

Sutisa Samitthwetcharong and Orathai Chavalparit. “ Anaerobic biodegradation of polylactic acid under mesophilic condition using thermal-alkaline pretreatment” The proceedings of the 2nd International Conference on Energy Materials and Applications, YMCA, Hiroshima, Japan. 10-12 May, 2017.