การย่อยสลายของวัสดุภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้งในหลุมฝังกลบที่รับขยะเศษอาหาร

นางสาวปาณิศา ศิริบุรมย์

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 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Decomposition of single-use food container materials in a landfill receiving food waste

Miss Panisa Siriburom

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

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 2017
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การย่อยสลายของวัสดุภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้งในหลุมฝังกลบที่รับขยะเศษอาหาร
โดย	นางสาวปาณิศา ศิริบุรมย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตระการ ประภัสพงษา)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปาณิศา ศิริบุรมย์ : การย่อยสลายของวัสดุภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้งในหลุมฝังกลบที่รับขยะเศษอาหาร (Decomposition of single-use food container materials in a landfill receiving food waste) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์, 210 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาการย่อยสลายของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้งในสภาวะมีและไร้ออกซิเจนในช่วงเวลา 90 วัน รวมถึงผลการสลายตัวของวัสดุดังกล่าวต่อกระบวนการภายในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ ในช่วงเวลา 120 วัน แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุม ชุดวัสดุกระดาษ ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม และชุดวัสดุพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอ โดยทำการหมักร่วมกับขยะเศษอาหาร ผลการศึกษาพบว่าการสูญเสียน้ำหนักเป็นตัวชี้วัดที่สามารถใช้เปรียบเทียบการย่อยสลายในสภาวะมีและไร้ออกซิเจนของวัสดุกระดาษและวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอได้ โดยกระดาษมีการสูญเสียน้ำหนักใกล้เคียงกันในทั้งสองสภาวะ ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายของกระดาษ (K) เท่ากับ 0.005 และ 0.003 ต่อสัปดาห์ ในสภาวะมีออกซิเจนและไร้ออกซิเจนตามลำดับ ส่วนพีแอลเอเกิดการสูญเสียน้ำหนักในปริมาณและความเร็วที่ใกล้เคียงกันในทั้งสองสภาวะ โดยสัมประสิทธิ์การย่อยสลาย (K) ของสภาวะมีและไร้ออกซิเจนเท่ากับ 0.0006 และ 0.0007 ต่อสัปดาห์ตามลำดับ ส่วนโฟมไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายของวัสดุพอลิสไตรีนโฟม (K) ได้ เนื่องจากข้อมูลมีความแปรปรวนสูง จากปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ สำหรับลักษณะทางกายภาพพบว่าการเสียหายของวัสดุโฟมในสภาวะมีออกซิเจนมากจากความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่สูงกว่าสภาวะไร้ออกซิเจนถึง 4 เท่า โดยกรดอินทรีย์มีผลต่อความคงทนของพอลิสไตรีน สำหรับผลการศึกษาของวัสดุต่างๆต่อกระบวนการภายในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบพบว่าประเภทวัสดุส่งผลต่อการยุบตัวของขยะ สมบัติน้ำชะ และการเกิดแก๊สชีวภาพ โดยถังชุดควบคุมเกิดการยุบตัวมากที่สุดตามด้วยถังชุดวัสดุกระดาษ ถังชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม และถังชุดพลาสติกชีวภาพพีแอลเอที่ร้อยละ 43.42 40.79 34.29 และ 26.07 ตามลำดับ สอดคล้องกับปริมาณน้ำที่คงค้างในถังโดยในชุดควบคุมน้อยที่สุด ทั้งนี้พบว่าการกระจายน้ำส่งผลต่อการย่อยสลายในหลุมฝังกลบโดยถังที่มีวัสดุบรรจุอยู่เกิดการย่อยสลายได้ช้ากว่าและมีปริมาณน้ำคงค้างสูงกว่า ส่วนผลการย่อยสลายต่อชี้วัดของน้ำชะขยะและแก๊สชีวภาพพบว่าวัสดุมีผลโดยอ้อมกล่าวคือวัสดุสามารถขัดขวางการไหลของน้ำทำให้การกระจายน้ำต่ำ และปฏิกิริยาการย่อยเกิดได้ไม่เป็นไปตามทฤษฎี

ภาควิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อนิสิต	....
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก	....
ปีการศึกษา	2560		

5770441621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING
KEYWORDS: SINGLE-USE FOOD CONTAINER, DECOMPOSITION, LANDFILL

PANISA SIRIBUROM: Decomposition of single-use food container materials in a landfill receiving food waste. ADVISOR: ASSOC. PROF. PICHAYA RACHDAWONG, Ph.D., 210 pp.

The aim of this research was to study the decomposition of single-use food container materials in aerobic and anaerobic condition for a period of 90 days. In addition, the decomposition of these materials in simulated landfill reactors for a period of 120 days was studied. The experiment used four sets, the control unit with only food wastes, the paper, the polystyrene foam (PS-foam) and the bioplastic (PLA) reactors. Weight loss for the paper reactor was similar in both conditions. For paper, the coefficient of decomposition (K) was 0.005 and 0.003 wk-1, respectively. The speed of weight loss for PLA materials was similar in both conditions, with K values were 0.0006 and 0.0007 wk-1 in aerobic and anaerobic conditions, respectively. For PS foam, the K value cannot be found due to the high variability of the data set as a result of uncontrollable factors. Samples of were, PS foam more damaged due to the excessively high concentration of organic acid of than four times that in anaerobic condition. For the simulated landfill experiment types of materials affected the degree of degradation of the waste as shown by leachate and biogas parameters. The highest settlement was found in the control reactor and followed by the paper reactor the PS foam reactor and the PLA reactor, 43.42 40.79 34.29 and 26.07 percent, respectively. This corresponded to the remaining amount of water in all reactor. The reactors with exhibited slow degradation rate as compared to the control. Indirectly, materials inside obstructed the flow and distribution of water, resulting in low water uniformity. Degradation did not proceed according to the theoretical expectation.

Department:	Environmental Engineering	Student's Signature	....
		Advisor's Signature	....
Field of Study:	Environmental Engineering		
Academic Year:	2017		

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์อย่างดียิ่งจากหน่วยงานหลายหน่วยงาน และบุคคลหลายท่าน ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหน่วยงานและบุคคลดังต่อไปนี้

ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) โรงงานปทุมธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์หัวเชื้อจุลินทรีย์

รองศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง อีกทั้งช่วยแก้ไขสิ่งบกพร่องในการทำวิจัยและเล่มวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล ประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ และกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตระการ ประภัสพงษา ที่ให้เกียรติและสละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อีกทั้งให้ความรู้ คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่าน ที่ให้ความรู้ในทุกๆ รายวิชาตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

คุณจันทรวรรณ ตันเจริญ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความอนุเคราะห์สอนวิธีการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

คุณจิรายุ ไพริน เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการน้ำเสีย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความอนุเคราะห์สอนวิธีการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

คุณรามนรี เนตรวิเชียร เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการอาคารสี่ภาค คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์สอนวิธีการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

เพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคนในห้องปฏิบัติการวิจัย ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และดูแลกันมาโดยตลอดระยะเวลาที่ศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญตาราง .... ฎ

สารบัญรูปภาพ .... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 3

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 3

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5

2.1 ภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้ง 5

2.1.1 กระดาษ 6

2.1.1.1 องค์ประกอบกระดาษ 7

2.1.2 โฟม 9

2.1.3 พลาสติกชีวภาพ 11

2.2 การย่อยสลาย 16

2.2.1 การย่อยสลายวัสดุ 16

2.2.1.1 การย่อยสลายพอลิเมอร์ 16

2.2.1.2 การย่อยสลายกระดาษ 18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

2.2.1.3 การย่อยสลายพอลิสไตรีนโฟม 20
2.2.1.4 การย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ 22
2.2.2 การย่อยสลายวัสดุในหลุมฝังกลบ 24
2.2.2.1 การสลายตัวทางกายภาพ (Physical degradation) 24
2.2.2.2 การสลายตัวทางเคมี (Chemical decomposition) 24
2.2.2.3 การสลายตัวทางชีววิทยา (Biological decomposition) 24
2.2.3 ตัวชี้วัดการย่อยสลายของวัสดุ 27
2.2.3.1 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ 27
2.2.3.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี 28
2.3 หลุมฝังกลบ 30
2.3.1 การฝังกลบมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary Landfill) 30
2.3.2 องค์ประกอบขยะในหลุมฝังกลบ 32
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการในหลุมฝังกลบ 34
2.3.4 ตัวชี้วัดในหลุมฝังกลบ 35
2.3.4.1 น้ำชะขยะ (Leachate) 35
2.3.4.2 แก๊สจากหลุมฝังกลบ (Landfill gas) 38
2.3.5 ขั้นตอนการย่อยสลาย 39
2.4 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 41
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย 46
3.1 แผนงานวิจัย 46
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี 49
3.2.1 สารเคมี 49
3.2.2 วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์ 50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

3.3 วัสดุที่ใช้ทำการศึกษา 52
3.4 หัวเชื้อจุลินทรีย์ 52
3.5 ขยะสังเคราะห์ (Synthetic waste) 53
3.6 การเตรียมชุดการทดลองในการทดลองที่ 2 ทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน 54
3.7 การเตรียมชุดการทดลองในการทดลองที่ 3 ทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน 55
3.8 การเตรียมชุดการทดลองที่ 4 ทดสอบการย่อยสลายของวัสดุในหลุมฝังกลบ 56
3.8.1 เตรียมถังปฏิกรณ์ 56
3.8.2 เตรียมชุดวัดปริมาณก๊าซ 57
3.9 วิธีดำเนินงานวิจัย 58
3.9.1 สมบัติของหัวเชื้อจุลินทรีย์ 58
3.9.2 สมบัติของขยะสังเคราะห์ 59
3.9.3 การทดลองที่ 1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ 59
3.9.4 การทดลองที่ 2 ทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน 60
3.9.5 การทดลองที่ 3 ทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน 64
3.9.6 การทดลองที่ 4 ทดสอบการย่อยสลายของวัสดุในหลุมฝังกลบ 68
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการอภิปรายข้อมูล 73
4.1 สมบัติเบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์และขยะสังเคราะห์ 73
4.2 การทดลองที่ 1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ 75
4.2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุกระดาษก่อนการย่อยสลาย 75
4.2.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมก่อนการย่อยสลาย 77
4.2.3 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอก่อนการย่อยสลาย 80
4.3 การทดลองที่ 2 ผลทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน 83
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงวัสดุทดสอบในสภาวะมีออกซิเจน 83

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.3.1.1 การย่อยสลายวัสดุกระดาษในสภาวะมีออกซิเจน 83
4.3.1.2 การย่อยสลายวัสดุพอลิสไตรีนในสภาวะมีออกซิเจน 86
4.3.1.3 การย่อยสลายวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอในสภาวะมีออกซิเจน 90
ในสภาวะมีออกซิเจนเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ 94
4.3.2 การเปลี่ยนแปลงขยะสังเคราะห์ในสภาวะมีออกซิเจน 95
4.3.2.1 สมบัติน้ำชะขยะในสภาวะมีออกซิเจน 95
4.3.2.2 สมบัติขยะเศษอาหารในสภาวะมีออกซิเจน 98
4.4 การทดลองที่ 3 ผลทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน 99
4.4.1 การเปลี่ยนแปลงวัสดุทดสอบในสภาวะไร้ออกซิเจน 99
4.4.1.1 การย่อยสลายวัสดุกระดาษในสภาวะไร้ออกซิเจน 99
4.4.1.2 การย่อยสลายวัสดุพอลิสไตรีนโฟมในสภาวะไร้ออกซิเจน 103
4.4.1.3 การย่อยสลายวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอในสภาวะไร้ออกซิเจน 107
ในสภาวะไร้ออกซิเจนเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ 111
4.4.2 การเปลี่ยนแปลงขยะสังเคราะห์ในสภาวะไร้ออกซิเจน 112
4.4.2.1 สมบัติน้ำชะขยะในสภาวะไร้ออกซิเจน 112
4.4.3 แก๊สชีวภาพในสภาวะไร้ออกซิเจน 115
4.4.3.1 ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมในสภาวะไร้ออกซิเจน 115
4.4.3.2 องค์ประกอบแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน 116
4.4.4 % Biodegradation 117
4.4.5 สมบัติขยะเศษอาหารในสภาวะไร้ออกซิเจน 117
4.5 การทดลองที่ 4 ผลทดสอบการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ 118
4.5.1 การเปลี่ยนแปลงขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ 118
4.5.1.1 การยุบตัวของขยะ 118

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

4.4.1.2 สมบัติน้ำชะขยะ 122
4.5.2 ก๊าซชีวภาพ 132
4.5.2.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 132
4.5.2.1 องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ 133
4.5.3.2 สมบัติขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ 134
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ 136
5.1 สรุปผลการทดลอง 136
5.2 ข้อเสนอแนะ 138
รายการอ้างอิง 139
ภาคผนวก 147
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 210

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อกระดาษ 7
ตารางที่ 2-2 พลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดและการใช้ประโยชน์ 15
ตารางที่ 2-3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ 18
ตารางที่ 2-4 องค์ประกอบขยะมูลฝอย 33
ตารางที่ 2-5 สัดส่วนขยะเศษอาหารในขยะมูลฝอยชุมชนในแต่ละประเทศ 33
ตารางที่ 2-6 องค์ประกอบและความเข้มข้นของน้ำชะขยะ 37
ตารางที่ 2-7 องค์ประกอบแก๊สจากหลุมฝังกลบ 38
ตารางที่ 3-1 วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติหัวเชื้อจุลินทรีย์ 53
ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบขยะสังเคราะห์ 54
ตารางที่ 3-3 วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติหัวเชื้อจุลินทรีย์ 58
ตารางที่ 3-4 วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติของขยะสังเคราะห์ 59
ตารางที่ 3-5 วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ 60
ตารางที่ 3-6 ตัวชี้วัดและความถี่ที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลองที่ 2 63
ตารางที่ 3-7 ตัวแปรในการทดลองที่ 2 64
ตารางที่ 3-8 ตัวชี้วัดและความถี่ที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลองที่ 3 67
ตารางที่ 3-9 ตัวแปรในการทดลองที่ 3 68
ตารางที่ 3-10 ตัวชี้วัดและความถี่ที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลองที่ 4 71
ตารางที่ 3-11 ตัวแปรในการทดลองที่ 4 72
ตารางที่ 4-1 สมบัติทางเคมีของหัวเชื้อจุลินทรีย์และขยะเศษอาหารสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ 74
ตารางที่ 4-2 เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีของขยะเศษอาหารในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น 74
ตารางที่ 4-3 สมบัติทางเคมีของวัสดุกระดาษก่อนการย่อยสลาย 76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-4 เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีของวัสดุกระดาษก่อนการย่อยสลายกับงานวิจัยอื่น 77

ตารางที่ 4-5 สมบัติทางเคมีของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมก่อนการย่อยสลาย 79

ตารางที่ 4-6 สมบัติทางเคมีของวัสดุพลาสติกพีแอลเอก่อนการย่อยสลาย 81

ตารางที่ 4-7 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุกระดาษในการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน 85

ตารางที่ 4-8 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมในการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน 89

ตารางที่ 4-9 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอในการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน 93

ตารางที่ 4-10 สมบัติขยะเศษอาหารเมื่อสิ้นสุดการทดลองในสภาวะมีออกซิเจน 99

ตารางที่ 4-11 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุกระดาษในการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน 101

ตารางที่ 4-12 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมในการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน 105

ตารางที่ 4-13 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอในการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน 109

ตารางที่ 4-14 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน 117

ตารางที่ 4-15 สมบัติขยะเศษอาหารเปรียบเทียบก่อนและหลังในการทดลองต่างๆ 118

ตารางที่ 4-16 ร้อยละการยุบของขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์ 120

ตารางที่ 4-17 ปริมาณแก๊สมีเทนในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ 134

ตารางที่ 4-18 สมบัติขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ 135

Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

หน้า
รูปที่ 2-1 การรวมตัวของสไตรีนมอนอเนอร์เป็นสายโซ่พอลิเมอร์ 10
รูปที่ 2-2 ประเภทพลาสติกชีวภาพ.. 13
รูปที่ 2-3 กำลังการผลิตพลาสติกชีวภาพทั่วโลก 14
รูปที่ 2-4 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกภายใต้สภาวะมีออกซิเจน 22
รูปที่ 2-5 วัฎจักรพลาสติกชีวภาพ... 23
รูปที่ 2-6 กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic decomposition).................... 27
รูปที่ 2-7 วิธีฝังกลบบนพื้นราบ (Area Method).. 31
รูปที่ 2-8 วิธีฝังกลบแบบขุดร่อง (Trench Method).. 31
รูปที่ 2-9 องค์ประกอบแก๊สและสมบัติน้ำชะขยะในหลุมฝังกลบในแต่ละระยะการย่อยสลาย 41
รูปที่ 3-1 แผนผังแนวทางการดำเนินงานวิจัย 48
รูปที่ 3-2 (a) จานกระดาษ (b) จานพอลิสไตรีนโฟม และ (c) แก้วน้ำพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอ 52
รูปที่ 3-3 หัวเชื้อจุลินทรีย์.. 52
รูปที่ 3-4 ขยะสังเคราะห์ 53
รูปที่ 3-5 ชุดทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน... 55
รูปที่ 3-6 ชุดการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน 56
รูปที่ 3-7 ถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ... 57
รูปที่ 3-8 แก๊สเคาท์เตอร์ (Gas counter).. 58
รูปที่ 3-9 การทดลองที่ 2 การย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน 62
รูปที่ 3-10 การทดลองที่ 2 ทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน 66
รูปที่ 3-11 การทดลองที่ 4 ทดสอบการย่อยสลายของวัสดุในหลุมฝังกลบ 70

รูปที่ 4-1 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุกระดาษก่อนการทดลอง 76

รูปที่ 4-2 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุโฟมก่อนการทดลอง 78

รูปที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมก่อนการย่อยสลาย..... 79

รูปที่ 4-4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิสไตรีนโฟม 80

รูปที่ 4-5 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอก่อนการทดลอง 81

รูปที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอ 82

รูปที่ 4-7 โครงสร้างทางเคมีของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอ 82

รูปที่ 4-8 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุกระดาษในสภาวะมีออกซิเจน.............................. 84

รูปที่ 4-9 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุกระดาษเมื่อทดสอบการย่อยสลายในสภาวะ........... 86

รูปที่ 4-10 ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายวัสดุกระดาษ (K) ในสภาวะมีออกซิเจน 86

รูปที่ 4-11 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมในสภาวะมีออกซิเจน 88

รูปที่ 4-12 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของวัสดุพอลิสไตรีนโฟม........................... 89

รูปที่ 4-13 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมเมื่อทดสอบการย่อยสลาย 90

รูปที่ 4-14 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอในสภาวะมีออกซิเจน .. 92

รูปที่ 4-15 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของพลาสติกชีวภาพพีแอลเอด้วยเครื่อง FTIR (หลังการทดลองในสภาวะมีออกซิเจน) 93

รูปที่ 4-16 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอเมื่อทดสอบการย่อยสลาย... 94

รูปที่ 4-17 ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอ (K) ในสภาวะมีออกซิเจน.... 94

รูปที่ 4-18 ค่าความเป็นกรดด่างในสภาวะมีออกซิเจน 96

รูปที่ 4-19 ค่าโออาร์พีในสภาวะมีออกซิเจน 96

รูปที่ 4-20 ค่ากรดระเหยง่ายในสภาวะมีออกซิเจน 97

รูปที่ 4-21 ค่าปริมาณด่างในสภาวะมีออกซิเจน.. 97

รูปที่ 4-22 ค่าซีโอดีในสภาวะมีออกซิเจน 98

รูปที่ 4-23 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุกระดาษในสภาวะไร้ออกซิเจน 100

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4-24 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุกระดาษเมื่อทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ 102
รูปที่ 4-25 ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายวัสดุกระดาษ (K) ในสภาวะไร้ออกซิเจน 102
รูปที่ 4-26 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมก่อนการย่อยสลาย 104
รูปที่ 4-27 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของวัสดุพอลิสไตรีนโฟม 106
รูปที่ 4-28 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมเมื่อทดสอบการย่อยสลาย 107
รูปที่ 4-29 แสดงผนังที่เสียหายของวัสดุพอลิสไตรีนโฟม 107
รูปที่ 4-30 ลักษณธทางกายภาพของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอก่อนการย่อยสลาย 108
รูปที่ 4-31 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของวัสดุพอลิสไตรีนโฟม 110
รูปที่ 4-32 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอเมื่อทดสอบการย่อยสลาย 111
รูปที่ 4-33 ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอ (K) ในสภาวะไร้ออกซิเจน 111
รูปที่ 4-34 ค่าความเป็นกรดด่างในสภาวะไร้ออกซิเจน 112
รูปที่ 4-35 ค่ากรดระเหยง่ายในสภาวะไร้ออกซิเจน 113
รูปที่ 4-36 ค่าความเป็นด่างในสภาวะไร้ออกซิเจน 114
รูปที่ 4-37 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างในสภาวะไร้ออกซิเจน 114
รูปที่ 4-38 ค่าซีโอดีในสภาวะไร้ออกซิเจน 115
รูปที่ 4-39 ก๊าซชีวภาพสะสมในการทดลองที่ 3 ที่เวลา 12 สัปดาห์ 116
รูปที่ 4-40 การยุบตัวของขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบชุดควบคุม 120
รูปที่ 4-41 การยุบตัวของขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบวัสดุกระดาษ 121
รูปที่ 4-42 การยุบตัวของขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบวัสดุพอลิสไตรีนโฟม 121
รูปที่ 4-43 การยุบตัวของขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบวัสดุพีแอลเอ 122
รูปที่ 4-44 ค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ 123
รูปที่ 4-45 ค่าความเป็นกรดด่างในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ 126
รูปที่ 4-46 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ 127

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รูปที่ 4-47 เปรียบเทียบค่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายกับซีโอดีในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ......... 127

รูปที่ 4-48 เปรียบเทียบค่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายกับค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ 128

รูปที่ 4-49 ค่าความเป็นด่างในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ 129

รูปที่ 4-50 เปรียบเทียบค่าความเป็นด่างกับค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ 129

รูปที่ 4-51 ปริมาณแอนโมเนียไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ 130

รูปที่ 4-52 ปริมาณฟอสเฟตในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ.. 131

รูปที่ 4-53 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ.................................... 132

รูปที่ 4-54 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากถังปฏิกรณ์ 133

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้งมักพบในร้านอาหารประเภทร้านอาหารจานด่วน ร้านอาหารที่มีบริการซื้อกลับบ้าน ตามซุ้มอาหาร สถานที่จัดเลี้ยงหรือร้านอาหารริมบาทวิถี เป็นต้น โดยทั่วไปในปัจจุบันภาชนะประเภทนี้ทำจากวัสดุจำพวกกระดาษและพลาสติก (Foodservice Packaging Institute, 2007) แต่เนื่องจากภาชนะเหล่านี้มีหน้าที่บรรจุอาหาร ดังนั้นเมื่อเก็บรวบรวมจึงมักปะปนไปกับเศษอาหารและไม่สามารถนำมารีไซเคิลได้ส่งผลให้เกิดปัญหาขยะล้นเมือง เป็นการสิ้นเปลืองงบประมาณ และพื้นที่ในการกำจัด

กระดาษเป็นวัสดุธรรมชาติที่โดยปกติสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติเนื่องจากทำมาจากเส้นใยของพืชโดยขึ้นกับประเภทและองค์ประกอบของกระดาษ เศษกระดาษทั่วไปใช้เวลาในการย่อยสลายตามธรรมชาติราว 2 – 5 เดือน และถ้วยกระดาษเคลือบใช้เวลาในการย่อยสลายราว 5 ปี (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) สำหรับภาชนะกระดาษเป็นการนำกระดาษที่มีการปรับปรุงสมบัติของกระดาษให้ทนต่อไขมัน และความชื้นโดยอาจใช้วิธีการเติมแต่งหรือปรับสภาพผิวหน้ากระดาษมาทำการขึ้นรูปเป็นภาชนะต่างๆ ทั้งนี้ถึงแม้ขยะกระดาษส่วนใหญ่จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลแต่จากการศึกษาพบว่าอัตราการรีไซเคิลขยะประเภทกระดาษอยู่ที่ร้อยละ 75 (กำพล รุจิวิชชญ์, 2555) แสดงให้เห็นว่ายังคงมีกระดาษบางส่วนตกค้างอยู่ในหลุมฝังกลบในรูปที่ไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลได้เนื่องจากกระดาษมีลักษณะเปื่อยยุ่ยหรือติดอยู่กับบรรจุภัณฑ์อื่น ในส่วนของภาชนะโฟมได้เข้ามามีบทบาทในการดำเนินชีวิตประจำวันเป็นอย่างยิ่งด้วยคุณสมบัติด้านความแข็งแรง น้ำหนักเบา ราคาถูก จึงทำให้เป็นที่นิยมในกลุ่มผู้ประกอบร้านอาหารจำนวนมาก แต่ในทางกลับกันพบว่าภาชนะดังกล่าวเป็นสาเหตุของปัญหาทั้งในด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อม สำหรับปัญหาด้านขยะนั้นมีข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษระบุว่าในช่วง 5 ปีที่ผ่านมา ปริมาณขยะประเภทโฟมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจาก 56 ล้านใบต่อวัน เป็น 61 ล้านใบต่อวันในปี 2559 คิดเป็น 1.3 ล้านตันต่อปี หรือเฉลี่ยวันละ 3,704 ตันต่อวัน (สถานีข่าวTNN24, 2560) ซึ่งทราบกันดีว่าโฟมใช้เวลาย่อยสลายตามธรรมชาติราว 450 ปีหรือกล่าวได้ว่าไม่สามารถย่อยสลายได้ เป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาการอุดตันตามท่อระบายน้ำ เป็นอันตรายต่อ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สัตว์น้ำ และสิ้นเปลืองพื้นที่ในการฝังกลบ อีกทั้งยังมีต้นกำเนิดมาจากน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งจัดว่าเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปจึงถือเป็นการสิ้นเปลืองทรัพยากรอีกด้วย

จากปัจจัยดังกล่าวส่งผลให้มีการคิดค้นวัสดุทางเลือกอย่างพลาสติกชีวภาพที่มีสมบัติเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยพบว่าการใช้พลาสติกชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อพิจารณาจากกำลังการผลิตทั่วโลก ข้อมูลจากยูโรเปียนไบโอพลาสติกระบุว่าในปี 2016 ทั่วโลกมีปริมาณการผลิตพลาสติกชีวภาพกว่า 4.2 ล้านตัน และมีการคาดการณ์ว่าในปี 2021 จะมีกำลังการผลิตเพิ่มสูงขึ้นถึง 6.1 ล้านตัน (European-Bioplastics, 2017) ในกรณีของประเทศไทยถือว่ามีศักยภาพที่จะเป็นผู้ผลิตพลาสติกชีวภาพของภูมิภาคเอเชียเพราะมีความได้เปรียบเรื่องวัตถุดิบทางการเกษตรโดยสามารถผลิตอ้อยและมันสำปะหลังได้เกินความต้องการใช้ภายในประเทศ (สถาบันพลาสติก, 2556) สำหรับการใช้ประโยชน์จากพลาสติกชีวภาพส่วนใหญ่มักนำมาเป็นภาชนะหรือบรรจุภัณฑ์ที่มีอายุการใช้งานสั้นใช้แบบครั้งเดียวทิ้ง เป็นสารเคลือบกระดาษหรือโฟม ถุงขยะอินทรีย์ ฟิล์มคลุมดินทางการเกษตร รวมถึงวัสดุทางการแพทย์เนื่องจากคุณสมบัติในการย่อยสลายได้ในธรรมชาติเมื่อพิจารณาระบบการจัดขยะในประเทศไทยพบว่าขยะส่วนใหญ่ถูกกำจัดด้วยวิธีการกองทิ้ง (Open dumping) และการฝังกลบ (Landfilling) (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) ซึ่งกระบวนการสลายตัวของขยะอาศัยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพร่วมกัน โดยเฉพาะกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพที่ถือเป็นกระบวนการหลักที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของสารโดยจุลินทรีย์เช่น สารอินทรีย์เปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในสภาวะมีออกซิเจน หรือเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนในสภาวะไร้ออกซิเจน สำหรับช่วงแรกของการฝังกลบการย่อยสลายจะเกิดในสภาวะมีออกซิเจนเนื่องจากออกซิเจนยังคงเหลืออยู่จากตอนก่อนปิดหลุมจากนั้นจะเริ่มเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายในสภาวะไม่มีออกซิเจนหลังจากออกซิเจนภายในหลุมถูกใช้จนหมด ซึ่งการย่อยสลายสลายวัสดุชนิดเดียวกันในทั้งสองสภาวะดังกล่าวอาจจะมีผลที่แตกต่างกันจึงควรเลือกวิธีจัดการให้เหมาะสมกับวัสดุชนิดนั้น (Ishigaki และคณะ, 2004)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการย่อยสลายของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้งเพื่อตอบสนองต่อพฤติกรรมการอุปโภคบริโภคทั้งในปัจจุบันและที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตอันส่งผลให้ขยะที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบหลากหลายมากขึ้น ดังนั้นเมื่อองค์ประกอบขยะภายในหลุมฝังกลบมีการเปลี่ยนแปลงจึงมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาว่าการย่อยสลายภาชนะใส่อาหารแบบใช้แล้วทิ้งใน

หลุมฝังกลบจะมีผลอย่างไรต่อปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สและน้ำชะขยะรวมถึงปริมาณขยะ นอกจากนี้ยังทำการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายของภาชนะแต่ละชนิดวัสดุทั้งในสภาวะมีและไม่มีออกซิเจนเพื่อใช้เป็นแนวทางในการจัดการและเลือกใช้ภาชนะแบบใช้แล้วทิ้งต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการย่อยสลายของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้งก่อนและหลังการย่อยสลายในสภาวะมีและไม่มีออกซิเจน

1.2.2 เพื่อศึกษาผลการสลายตัวของวัสดุในข้างต้นต่อปริมาณขยะในหลุมฝังกลบรวมทั้งปริมาณและองค์ประกอบของน้ำชะขยะและแก๊สที่เปลี่ยนแปลงไป

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การศึกษางานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ สถานที่ทำการทดลองคือห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

1.3.1 วัสดุภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้งทำการศึกษาประกอบด้วยวัสดุกระดาษ (Paper) พอลิสไตรีนโฟม (Polystyrene foam) และพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอ (Poly Lactic Acid; PLA)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.3.2 ขยะสังเคราะห์เป็นขยะประเภทเศษอาหาร (Food waste)

1.3.3 ศึกษาสมบัติทางกายภาพโดยวิธีการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง และลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องกำลังขยายสูง

1.3.4 ศึกษาสมบัติทางเคมีโดยศึกษาชนิดของหมู่ฟังก์ชันในองค์ของสารของวัสดุด้วย Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) และปริมาณคาร์บอน (Carbon) ด้วย CHN analyzer

1.3.5 จำลองการย่อยสลายภาชนะแต่ละชนิดวัสดุในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบที่รองรับขยะเศษอาหาร โดยทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณขยะในหลุม รวมถึงปริมาณและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพและน้ำชะขยะที่เกิดขึ้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบถึงความสามารถในการสลายตัวของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะใส่อาหารแบบใช้แล้วทิ้งในสภาวะหลุมฝังกลบ

1.4.2 ทราบถึงผลของการสลายตัวของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะใส่อาหารแบบใช้แล้วทิ้งที่มีต่อขยะในหลุม แก๊ส และน้ำชะจากหลุมฝังกลบ

1.4.3 เป็นแนวทางในการจัดการและเลือกใช้ภาชนะใส่อาหารแบบใช้แล้วทิ้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้ง

ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 295 ปีพ.ศ.2548 ระบุว่าภาชนะบรรจุหมายถึงวัตถุที่ใช้บรรจุอาหารไม่ว่าจะเป็นด้วยการใส่ ห่อ หรือวิธีใดๆ โดยภาชนะบรรจุอาหารถือเป็นส่วนสำคัญสำหรับผู้ประกอบการร้านอาหารเนื่องจากการประกอบอาหารและการจำหน่ายจำเป็นต้องมีการใช้ภาชนะสำหรับบรรจุอาหารเพื่อใส่อาหารให้กับผู้บริโภค ปัจจุบันมีภาชนะบรรจุอาหารที่ช่วยเพิ่มความสะดวกในการรับประทานอาหารและใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ จาน ชาม แก้วน้ำ ทั้งที่เป็นวัสดุประเภทแก้ว เซรามิก พลาสติก หรือกระดาษ ซึ่งภาชนะบรรจุอาหารแต่ละชนิดจะมีสมบัติและส่วนประกอบของสารต่างๆแตกต่างกัน ดังนั้นการใช้ภาชนะบรรจุอาหารจึงควรเลือกให้เหมาะกับการใช้งานและประเภทของอาหาร (สำนักอนามัย กรุงเทพมหานคร, 2555)

ภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้ง (Single-use or Disposable food container) เริ่มนำมาใช้งานตั้งแต่ปีค.ศ. 1904 โดยเริ่มจากจานกระดาษที่ใช้ใส่ขนมเค้กแต่ยังไม่ได้รับความสนใจมากนักจนเมื่อมีการคิดแก้วกระดาษทรงกรวยจึงทำให้ภาชนะแบบใช้แล้วทิ้งเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลาย ภาชนะบรรจุอาหารประเภทนี้ส่วนมากพบในร้านอาหารประเภทร้านอาหารจานด่วน ร้านอาหารที่บริการซื้อกลับบ้าน ตามซุ้มอาหาร สถานที่จัดเลี้ยงหรือร้านอาหารริมบาทวิถี เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปภาชนะประเภทนี้มักทำจากวัสดุจำพวกกระดาษและพลาสติก (Foodservice Packaging Institute, 2007) โดยเฉพาะภาชนะสำหรับบรรจุอาหารชนิดใช้แล้วทิ้งที่ผลิตมาจากวัสดุโฟมหรือพลาสติกสังเคราะห์ซึ่งวัสดุทั้ง 2 ชนิดนี้ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติหรือถ้าย่อยสลายจะต้องใช้เวลาหลายร้อยปีก่อให้เกิดปัญหาขยะตามมา (มลสุดา ลิวไธสง, 2556) เช่นเดียวกับรายงานเรื่องการใช้และการกำจัดพอลิสไตรีนโฟมของหน่วยงานด้านการจัดการขยะในรัฐแคลิฟอร์เนียที่ระบุว่า พอลิสไตรีนโฟมเป็นขยะที่ใช้เวลาในการย่อยสลายหลายร้อยปีในหลุมฝังกลบแต่สามารถแตกออกเป็นชิ้นเล็กๆซึ่งส่งผลให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตอื่นได้ โดยในรัฐแคลิฟอร์เนียมีการใช้ภาชนะบรรจุอาหารที่เป็นพอลิสไตรีนกว่าหนึ่งแสนตันในแต่ละปีและเนื่องจากขยะประเภทนี้มักจะมีการสัมผัสและปนเปื้อนกับอาหารจึงไม่สามารถนำมารีไซเคิลได้ทำให้ส่วนใหญ่พอลิสไตรีนจะถูกกำจัดในหลุมฝังกลบ

(Snavely, 2007) สำหรับประเทศไทยพบว่ามีปริมาณขยะพลาสติกและโฟมมากถึง 2.7 ล้านตัน โดยในปี 2559 มีปริมาณขยะประเภทโฟมเกิดขึ้น ประมาณ 1.3 ล้านตันต่อปี เฉลี่ยวันละ 3,704 ตันต่อวัน รวมประมาณ 61 ล้านใบต่อวัน (สถานีข่าวTNN24, 2560) ซึ่งขยะเหล่านี้ใช้เวลาในการย่อยสลายตามธรรมชาตินานมากโดยพลาสติกใช้เวลาราว 450 ปี ส่วนโฟมไม่สามารถย่อยสลายได้ จึงทำให้เกิดปัญหาการอุดตันตามท่อระบายน้ำเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ และสิ้นเปลืองพื้นที่ในการฝังกลบ

2.1.1 กระดาษ

กระดาษเป็นวัสดุที่นำมาเป็นภาชนะบรรจุหลากหลายประเภท แต่ก็มีข้อจำกัดตรงที่ไม่ทนความชื้นซึ่งส่งผลให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลง จึงต้องมีการปรับปรุงสมบัติของกระดาษเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานไม่ว่าจะเป็นการเติมสารเติมแต่งหรือการปรับสภาพผิวหน้ากระดาษ โดยสามารถนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์หรือภาชนะได้หลายชนิดเช่น กล่องลูกฟูก กล่องนม ถุงกระดาษ จานชาม แก้วน้ำ เป็นต้น ในส่วนของวัสดุกระดาษที่มีการสัมผัสกับอาหารโดยตรงจะต้องนำมาเคลือบสารจำพวกแว็กซ์หรือเรซิ่นเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติให้มีสมบัติในการป้องกันการเสื่อมสภาพจากปัจจัยต่างๆทั้งอุณหภูมิ ความชื้น น้ำมันหรือไขมัน ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน (Marsh และ Bugusu, 2007)

การทำกระดาษเริ่มต้นตั้งแต่การนำไม้ไปทำเยื่อเพื่อให้ได้เส้นใยออกมา แล้วจึงนำเยื่อที่ได้ไปผสมกับสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่างๆเพื่อปรับสมบัติกระดาษให้ได้ตรงความต้องการใช้งาน (ฐานข้อมูลอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์, 2558) สำหรับเยื่อกระดาษสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทคือ เยื่อเชิงกล (Mechanical pulp) เยื่อเชิงเคมี (Chemical pulp) และเยื่อกึ่งเคมี (Semi-Chemical pulp) ซึ่งเยื่อแต่ละชนิดมีกระบวนการผลิตและองค์ประกอบแตกต่างกันแสดงในตารางที่ 2-1 อันส่งผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลาย (Wang และคณะ, 2015)

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบทางเคมีของเยื่อกระดาษ (Saloheimo และ Penttilä, 2006)

ประเภทเยื่อ	**องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละของน้ำหนักแห้ง)**			
	เซลลูโลส	**เฮมิเซลลูโลส**	**ลิกนิน**	**อื่นๆ**
เยื่อเชิงกล (ไม้เนื้อแข็ง)	39	25	27	9
เยื่อเชิงเคมี (ไม้เนื้ออ่อน)	74	19	6	1
เยื่อเชิงเคมี (ไม้เนื้อแข็ง)	63	32	4	1

2.1.1.1 องค์ประกอบกระดาษ

องค์ประกอบกระดาษสามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลักของกระดาษ ได้แก่ ส่วนที่เป็นเส้นใย (Fibrous material) ซึ่งเป็นโครงสร้างของแผ่นกระดาษ และส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย (Nonfibrous material) ซึ่งเป็นสารเติมแต่งใช้เติมผสมลงไปในส่วนเส้นใยเพื่อปรับปรุงสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน ในกระดาษทั่วไปจะมีส่วนเส้นใยผสมอยู่ในปริมาณร้อยละ 70 - 95 ของน้ำหนักกระดาษขึ้นอยู่กับชนิดของกระดาษที่ต้องการผลิต เส้นใยหรือที่เรียกว่าเยื่อที่ใช้ทำกระดาษส่วนมากจะเป็นเยื่อผสมของเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น ซึ่งได้จากไม้เนื้ออ่อน (Softwood) และไม้เนื้อแข็ง (Hardwood) ตามลำดับ (Double A Thailand, 2013)

<u>ส่วนที่เป็นเส้นใย</u>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1) เยื่อใยสั้นเคมีฟอก (Leaf Bleached Kraft Pulp: LBKP) เส้นใยสั้นผลิตจากไม้เนื้อแข็งเมืองร้อน ความยาวประมาณ 1 - 1.5 มิลลิเมตร มีคุณสมบัติช่วยให้เนื้อกระดาษแน่นสม่ำเสมอ เรียบ และมีความทึบแสงดี เนื่องจากเยื่อใยสั้นมีขนาดเล็กสามารถแทรกตัวตามร่องช่องว่างของเยื่อใยยาวได้ แต่มีข้อเสียคือไม่สร้างความแข็งแรงให้กับกระดาษทำให้กระดาษขาดง่าย

2) เยื่อใยยาวเคมีฟอก (Needle Bleached Kraft Pulp: NBKP) เส้นใยยาวเป็นเยื่อที่ผลิตจากไม้อ่อนจำพวกสน ความยาวประมาณ 3 - 3.5 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้มีความสามารถในการยึดเกี่ยวกันสูง ทำให้กระดาษมีความแข็งแรงดีขึ้น ทนต่อแรงดึง แรงฉีกขาด แต่มีมากเกินไปจะเกิดทำให้เกิดเป็นกระดาษไม่ดี เกิดเป็นกระจุดของเส้นใยเยื่อที่จับตัวเป็นกลุ่มก้อนเนื่องจากการกระจาย

ตัวของเยื่อไม่ดี เมื่อมองทะลุแผ่นกระดาษผ่านแสงจะเห็นเหมือนก้อนเมฆเป็นหย่อมๆในเนื้อกระดาษเป็นจำนวนมาก

<u>ส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย</u>

ส่วนมากเป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตโดยเติมลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน

1) ตัวเติม (Filler) สารเติมแต่งชนิดนี้จะเป็นผงแร่สีขาวได้แก่ ดินขาว (Kaolin clay) ไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide, TiO_2) และแคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, $CaCO_3$) โดยใส่ลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติด้านทัศนะศาสตร์และปรับปรุงสมบัติด้านการพิมพ์ของกระดาษ นอกจากนี้ยังใส่ลงไปเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตกระดาษอีกด้วยเพราะตัวเติมส่วนมากจะมีราคาถูกเมื่อเทียบกับเส้นใย ผงแร่ที่ใช้เป็นตัวเติมลงในกระดาษจะต้องมีขนาดเล็กละเอียดโดยจะช่วยเพิ่มเนื้อที่ผิวภายในกระดาษโดยเพิ่มพื้นที่ผิวระหว่างผงแร่กับอากาศและผงแร่กับเส้นใย ทำให้เพิ่มค่าการกระเจิงแสง (Light scattering) ของกระดาษ กระดาษจึงมีค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น และเนื่องจากมีขนาดเล็กกว่าเส้นใยมากเมื่อใส่ลงไปจะทำให้กระดาษมีผิวเรียบขึ้น

2) สารต้านการซึมน้ำ (Sizing-agent) สารเติมแต่งชนิดนี้เป็นสารเคมีที่ใส่ลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติด้านการต้านทานการซึมน้ำของกระดาษทำให้กระดาษต้านทานการเปียกน้ำได้ดีขึ้น สารต้านการซึมน้ำที่ใช้ในการทำกระดาษ ได้แก่ สารส้มและชันสน (Alum and Rosin) ไขผึ้ง (Wax) ยางมะตอย (Asphalt) อัลคิลคีทีนไดเมอร์ (Alkyl Ketene Dimmer, AKD) เนื่องจากกระดาษทำจากเส้นใยเซลลูโลสซึ่งมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้สูงกระดาษที่ไม่ได้ใส่สารต้านการซึมน้ำจึงเปียกน้ำและดูดซับน้ำได้ง่าย เช่น กระดาษชำระและกระดาษซับ การเติมสารต้านการซึมน้ำจะไปลดพื้นที่ผิวของการดึงดูดระหว่างเส้นใยและโมเลกุลของน้ำทำให้ลดอัตราการซึมน้ำเข้าสู่เนื้อกระดาษ การเติมสารต้านการซึมน้ำแบ่งเป็น 3 ระดับ และมีชื่อเรียกกระดาษที่เติมสารต้านการซึมน้ำแต่ละระดับ ดังนี้

- กระดาษที่ไม่ใส่สารต้านการซึมน้ำเลย (Water-leaf) เช่น กระดาษชำระ
- กระดาษที่ใส่สารต้านการซึมน้ำเล็กน้อย มีระดับการซึมน้ำปานกลาง (Slack-sized) เช่น กระดาษพิมพ์และเขียน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- กระดาษที่ใส่สารต้านการซึมน้ำในปริมาณสูงมาก มีระดับต้านการซึมน้ำสูง (Hard-sized) เช่น กระดาษทำถ้วย กระดาษทำกล่องนม

3) สารเพิ่มความเหนียว สารเติมแต่งชนิดนี้เป็นสารเคมีที่เติมลงไปเพื่อเพิ่มสมบัติด้านความเหนียวของกระดาษ โดยเฉพาะความต้านแรงดึงและความต้านแรงดันทะลุ นอกจากนี้ยังช่วยลดการหลุดลอกของเส้นใยที่ผิวกระดาษและเพิ่มพันธะแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นกระดาษแข็ง ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญมาก เพราะถ้าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นต่ำจะทำให้เกิดการแยกชั้นของกระดาษแข็งในระหว่างการพิมพ์ได้ สารเพิ่มความเหนียวที่ใช้คือแป้ง แบ่งเป็นแป้งธรรมชาติ (Native starch) และแป้งปรุงแต่งซึ่งเป็นแป้งที่ปรับให้เป็นประจุบวกกับพอลิอะคริลเอไมด์ (Modified starch) แต่ปัจจุบันนิยมใช้แป้งปรุงแต่งมากกว่า เนื่องจากสารเหล่านี้มีประจุบวกจึงสามารถจับกันได้ดีกับเส้นใยซึ่งมีประจุลบทำให้เพิ่มพันธะระหว่างเส้นใยในกระดาษส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรง

4) สารเพิ่มความขาวสว่าง (Optical Brightening Agent: OBA) โดยสารเติมแต่งชนิดนี้เป็นสารสีย้อมประเภทเรืองแสง (Fluorescent dye) เมื่อเติมลงไปจะช่วยให้กระดาษมีความขาวสว่าง (Brightness)

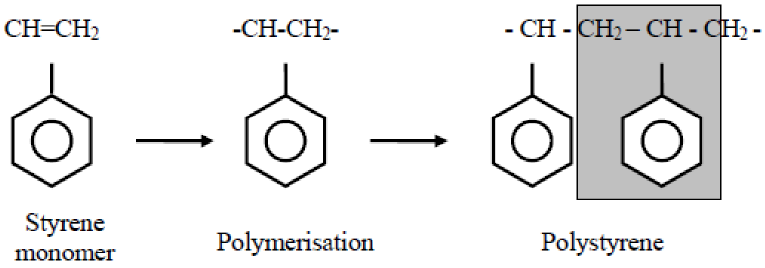
5) สารสีย้อม (Dyes) สารเติมแต่งชนิดนี้เป็นสารเคมีที่ใส่ลงไปในการทำกระดาษ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาโทนสีของกระดาษให้คงที่และชดเชยกับสีของลิกนินซึ่งมีสีเหลือง โดยปกติถ้ากระดาษสัมผัสกับความร้อนหรือแสงอาทิตย์ ลิกนินที่หลงเหลืออยู่ในเนื้อกระดาษจะแสดงสีของตัวเองออกมาทำให้กระดาษมีสีเหลือง สารสีย้อมยังใช้แต่งสีกระดาษขาวให้ได้ระดับคล้ำสีที่ต้องการหรือเพื่อให้ดูขาวขึ้น

6) สารควบคุมจุลชีวะ (Microbiological control agent หรือ Biocide) เป็นสารที่ช่วยควบคุมการเจริญเติบโตของจุลชีวะจำพวกเชื้อราหรือแบคทีเรียในระบบ เพื่อป้องกันการเกิดเมือกจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้กระดาษสกปรกและทำให้กระดาษขาดในระหว่างการผลิตได้ง่าย

2.1.2 โฟม

กล่องโฟมเป็นภาชนะที่นิยมนำมาใช้บรรจุอาหารอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเนื่องจากเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบา ราคาถูก หาได้ง่าย สะดวกในการใช้งาน พอลิสไตรีนโฟมหรือสไตโรโฟมทำมาจากเม็ด

พลาสติกชนิดพอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่เกิดจากการรวมตัวของสไตรีนมอนอเมอร์ดังรูปที่ 2-1 สามารถหลอมเหลวด้วยความร้อนและแข็งตัวเมื่อเย็นลง



รูปที่ 2-1 การรวมตัวของสไตรีนมอนอเนอร์เป็นสายโซ่พอลิเมอร์
ที่มา: (ชุติมา บุษบง, 2551)

พอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติโปร่งแสงและใส โดยพอลิสไตรีนที่ยังไม่ผ่านการผสมสารอื่นลงไปจะมีสมบัติแข็ง มีความยืดหยุ่นน้อยทำให้เปราะและแตกหักง่าย ไม่มีกลิ่น สามารถทำใส่สีและลวดลายต่างๆได้ ทนต่ออุณหภูมิร้อนเย็นอยู่ในช่วง -20 ถึง 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากพอลิสไตรีนเป็นสารไฮโดรคาร์บอนจึงดูดความชื้นได้ต่ำ สำหรับความคงทนต่อสารเคมีของพอลิสไตรีนพบว่าสามารถละลายได้ในตัวทำละลายจำพวกกรดเข้มข้น อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เอสเทอร์ คีโตน น้ำมันและไขมัน แต่ไม่ละลายในกรดเจือจาง แอลกอฮอล์ และอัลคาไลน์ สมบัติพิเศษอย่างหนึ่งที่ทำให้พอลิสไตรีนได้รับความสนใจในเชิงอุตสาหกรรมคือความง่ายต่อการนำไปแปรรูป โดยเมื่อพอลิสไตรีนผ่านกระบวนการเติมสารและผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยสารเติมแต่ง (Additives) เช่น สารเสริมสภาพพลาสติก (Plasticizer) สารปรับปรุงคุณภาพ (Modifier) สารคงสภาพ (Stabilizer) สารยับยั้งปฏิกิริยา (Inhibitor) สารหล่อลื่น (Lubricant) และผงสี สามารถนำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ที่มีประโยชน์มากมาย เช่น เป็นองค์ประกอบของเครื่องใช้ไฟฟ้า ด้ามปากกาลูกลื่น ไม้บรรทัด ภาชนะและบรรจุภัณฑ์ทำโฟม (Foam) เป็นต้น (ชุติมา บุษบง, 2551)

โฟมที่ผลิตจากพลาสติกพอลิสไตรีนแบ่งออกเป็น 2 ประเภท (ณัติฐพล ไข่แสงสี, 2552)

1) Expandable polystyrene (EPS) เป็นโฟมที่ใช้แก๊สเป็นสารที่ทำให้ขยายตัวโดยพลาสติกจะทำปฏิกิริยาเก็บแก๊สเอาไว้ภายใน เมื่อขยายตัวและได้รับความร้อนจากไอน้ำจะกลายเป็นเม็ดโฟม

ขาวจากนั้นนำไปขึ้นรูปตามลักษณะแม่พิมพ์เช่น กล่องใส่น้ำแข็ง บรรจุภัณฑ์ต่างๆ หรืออัดขึ้นรูปเป็นก้อนสี่เหลี่ยมแล้วนำมาตัดตามต้องการ โดยทั่วไปโฟม EPS ขยายตัวประมาณ 50 เท่าทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้นแต่น้ำหนักเบาจึงนิยมนำไปใช้ในการบรรจุสินค้า เป็นฉนวนรักษาความร้อนและเย็น

2) Paper polystyrene (PSP) เป็นโฟมที่ใช้แก๊สเป็นสารที่ทำให้เม็ดพลาสติกพอลิสไตรีนขยายตัวจากเดิมประมาณ 20 เท่า จากนั้นเข้าสู่กระบวนการฉีดเหมือนการฉีดพลาสติกทั่วไปโดยฉีดออกเป็นแผ่นแล้วม้วนคล้ายม้วนกระดาษแล้วจึงนำไปขึ้นรูปตามลักษณะแม่พิมพ์ นิยมทำเป็นภาชนะบรรจุอาหารเช่น กล่อง หรือถาดใส่อาหาร นอกจากนี้จากนำมาผลิตเป็นฉนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าและโทรคมนาคมที่ไม่รับการกระแทกมาก ขวดโหล ภาชนะขนาดเล็ก เครื่องเขียน เป็นต้น

การผลิตกล่องโฟมมีสารที่เป็นอันตรายรวมอยู่ด้วยแม้การผลิตจะผ่านขั้นตอนที่มีคุณภาพและได้มาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนดก็ตาม แต่หากมีการนำไปใช้งานที่ไม่เหมาะสมโดยเฉพาะตามร้านอาหารตามสั่งอาจทำให้สารสไตรีนซึ่งเป็นสารเคมีเคมีที่ก่อให้เกิดมะเร็งในกลุ่ม IIB ตามมาตรฐานของ International Agency for Research on Cancer (IARC) เข้าสู่ร่างกายได้ นอกจากนี้ยังพบว่าพลาสติกโฟมมักจะถูกทิ้งไปโดยไม่นิยมนำกลับมาใช้ใหม่ และในประเทศไทยก็ยังไม่มีอุตสาหกรรมรีไซเคิลโฟมที่แพร่หลาย โฟมจึงเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมเพราะเป็นขยะที่ใช้พื้นที่ในการฝังกลบมากและไม่ย่อยสลายตามธรรมชาติ ไม่สามารถทำปุ๋ยหมักได้ถ้านำไปเผาก็จะต้องใช้เตาเผาพิเศษที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้หน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อมจึงได้รณรงค์ให้เลิกใช้โฟมในการบรรจุอาหารแล้วหันมาใช้ภาชนะประเภทอื่นแทน (สุภิญญา บุญช่วย และวัชราภรณ์ คำนา, 2555)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.1.3 พลาสติกชีวภาพ

พลาสติกชีวภาพส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ (Polymer) ที่เกิดจากมอนอเมอร์ (Monomer) หน่วยย่อยประกอบกัน พอลิเมอร์ที่ใช้การพัฒนาพลาสติกชีวภาพมีทั้งที่มาจากธรรมชาติ (Natural sources) เช่น พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides) เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตในรูปแป้งเซลลูโลส ได้จากพืชจำพวกข้าวโพด อ้อย มันสำปะหลัง เป็นต้น และพอลิเมอร์ที่ได้จากวัตถุดิบสังเคราะห์ (Synthetic sources) ได้แก่ พอลิเมอร์สังเคราะห์จากชีวมวล (Bio-based synthetic polymer) พอลิเมอร์กลุ่มนี้ไม่ได้อยู่ในธรรมชาติแต่สามารถสังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการทางเคมีโดย

ใช้มอนอเมอร์หรือวัตถุดิบทางชีวภาพที่มีอยู่ในธรรมชาติ และพอลิเมอร์สังเคราะห์จากปิโตรเลียม (Petroleum-based synthetic polymer) (สาธินี ศิริวัฒน์, 2553) ปัจจุบันภาชนะสำหรับบรรจุอาหารชนิดใช้แล้วทิ้งส่วนใหญ่ผลิตมาจากวัสดุโฟมหรือพลาสติกสังเคราะห์ซึ่งวัสดุทั้งสองชนิดนี้ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติหรือถ้าสลายได้ก็อาจใช้เวลานานหลายร้อยปี ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาขยะตามมาจึงได้มีการคิดค้นวัสดุย่อยที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติซึ่งมีทั้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นกระดาษหรือเส้นใยจากพืชและพลาสติกชีวภาพ

เมื่อแบ่งพลาสติกชีวภาพตามประเภทวัสดุจะแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท (European-Bioplastics, 2017) ดังแสดงในรูปที่ 2-2

1) พลาสติกที่ทำจากวัสดุธรรมชาติหรือผสมวัสดุธรรมชาติบางส่วน (Biobased) แต่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น ไบโอโพลิโพรพิลีน (Bio Polypropylene, Bio-PP) ไบโอโพลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลต (Bio Poly(ethylene terephthalate), Bio-PET) ไบโอพอลิเอทธิลีน (Bio Polyethylene, Bio-PE) หรือพวกที่วัสดุทางชีวภาพเป็นพอลิเมอร์ เช่น พอลิไตรเมทธิลีนเทอเรพธาเลต (Poly Trimethylene Terephathalate, PTT)

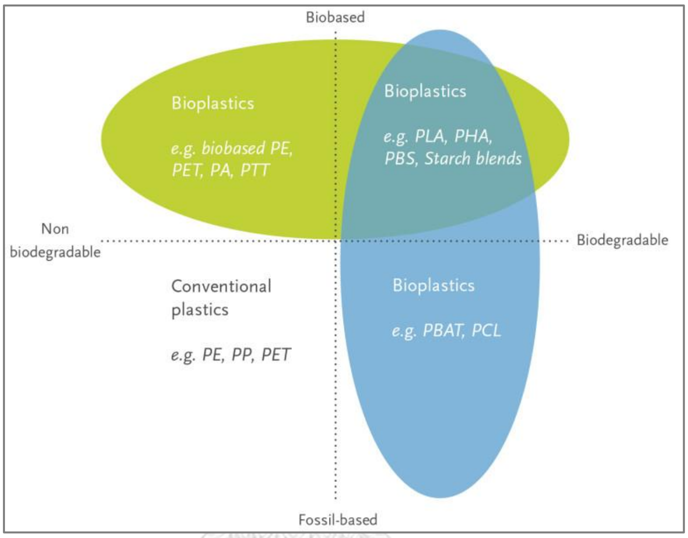
2) พลาสติกที่ทำจากวัสดุธรรมชาติ (Biobased) และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น พอลิแลคติกแอสิด (Poly Lactic Acid, PLA) พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Poly Hydroxyalkanoate, PHA) หรือ พอลิบิวธิลีนซัคซิเนต (Poly Butylene Succcinate, PBS)

3) พลาสติกที่ทำจากเชื้อเพลิงฟอสซิล (Fossil based) และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น พอลิบิวทิลีนอะดิเพตเทเรฟทาเลต (poly(butylene adipate terephthalate), PBAT)

เนื่องจากการจะย่อยสลายได้หรือไม่ได้นั้นไม่ขึ้นอยู่กับว่าพลาสติกนั้นทำมาจากวัสดุอะไรแต่ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีของวัสดุนั้นๆ (สาธินี ศิริวัฒน์, 2553) ปัจจุบันความต้องพลาสติกชีวภาพมีสูงขึ้นและมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน โดยจากการสำรวจของยูโรเปียน (European Bioplastics) พบว่าในปี 2016 ปริมาณการผลิตพลาสติกชีวภาพอยู่ที่ 4.2 ล้านตัน และมีการคาดการณ์ว่าจะเพิ่มขึ้นถึง 6.1 ล้านตัน ในปี 2021 (รูปที่ 2-3) ซึ่งกว่าร้อยละ 75 ของพลาสติกชีวภาพที่ผลิตขึ้นในปี 2016 เป็นพลาสติกที่ทำจากวัสดุธรรมชาติหรือผสมวัสดุธรรมชาติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

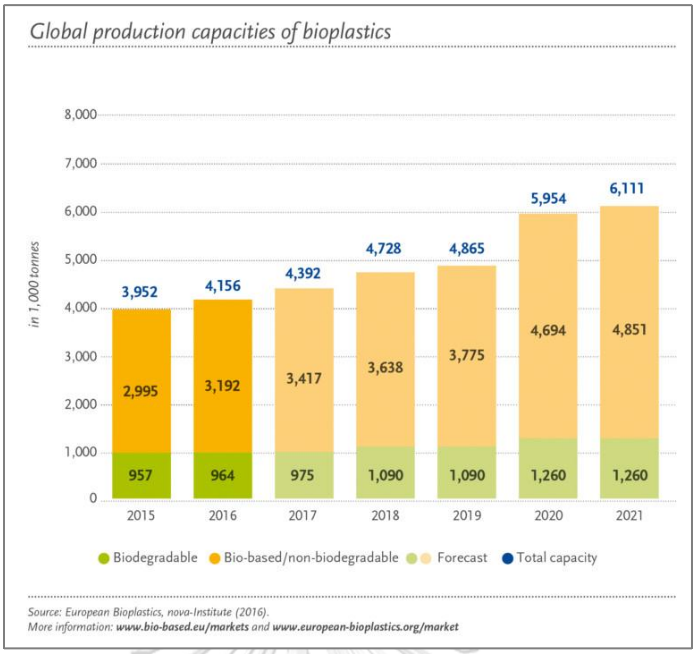
บางส่วนแต่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ ส่วนพลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้อย่างพีแอลเอและพีเอชเอพบว่ามีแนวโน้มเติบโตอย่างต่อเนื่องโดยมีปริมาณการผลิตอยู่ที่ 0.9 ล้านตันในปี 2016 และคาดว่าจะเพิ่มเป็น 1.3 ล้านตันในปี 2021 และหากแบ่งตามภูมิภาคพบว่าภูมิภาคเอเชียมีปริมาณการผลิตสูงที่สุดถึงร้อยละ 43.4 ของปริมาณพลาสติกชีวภาพที่ผลิตขึ้นทั้งหมด และแนวโน้มว่าจะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 45 ในปี 2021 (European-Bioplastics, 2017)



รูปที่ 2-2 ประเภทพลาสติกชีวภาพ

ที่มา: http://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

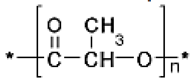
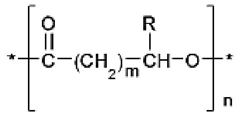
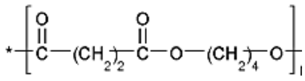


รูปที่ 2-3 กำลังการผลิตพลาสติกชีวภาพทั่วโลก

ที่มา: http://www.european-bioplastics.org/market

พลาสติกชีวภาพสามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายชนิดทั้งพลาสติกที่มีอายุการใช้งานสั้นหรือใช้ครั้งเดียวทิ้ง (Non-durable or Single use) เช่น ภาชนะบรรจุอาหาร ถุงหูหิ้ว หลอดดูดน้ำ บรรจุภัณฑ์ต่างๆ แสดงในตารางที่ 2-2 รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความคงทนแข็งแรง (Durable goods) เช่น เบาะรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือแผ่นดีวีดี เป็นต้น พลาสติกชีวภาพมีแนวโน้มเข้าไปแทนที่พลาสติกจากปิโตรเลียมในกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีอายุการใช้งานสั้นหรือใช้ครั้งเดียวทิ้งมากที่สุด โดยมีการคาดการณ์ว่าขวดบรรจุเครื่องดื่มจากพลาสติกไบโอโพลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตหรือไบโอเพท (bio-PET) จะเพิ่มขึ้นเป็น 5 ล้านตันในปี 2563 และในอนาคตจะเข้ามาแทนที่ขวดพลาสติกโพลิเอทธิลีนเทเรฟทาเลตหรือเพทจากปิโตรเคมีทั้งหมดตามมาด้วยโฟมพอลิแลคติกแอสิดหรือพีแอลเอ ซึ่งเข้ามามีส่วนแบ่งสูงมากในกลุ่มบรรจุภัณฑ์โดยคาดว่ากำลังการผลิตพอลิแลคติกแอสิดจะเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่าภายในปี 2563 การเติบโตของพลาสติกชีวภาพทั้งพีแอลเอและไบโอเพทในผลิตภัณฑ์กลุ่มบรรจุภัณฑ์ที่แตกต่างกันแสดงให้เห็นแนวโน้มที่สำคัญคือพลาสติกชีวภาพที่ย่อยสลายได้อย่างพีแอลเอจะไม่เข้าไปแทนที่พลาสติกที่มีกระบวนการรีไซเคิลรองรับอย่างขวดเครื่องดื่มเพท แต่จะเข้าไปแทนที่พลาสติกที่กระบวนการรีไซเคิลไม่สามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น ภาชนะหรือบรรจุภัณฑ์ที่ต้องปนเปื้อนกับเศษอาหารหรือขยะสด เป็นต้น (สถาบันพลาสติก, 2556)

ตารางที่ 2-2 พลาสติกชีวภาพแต่ละชนิดและการใช้ประโยชน์ (สำนักนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551)

ประเภทพอลิเมอร์	รายละเอียด	วัตถุดิบ	การใช้งาน
แป้งที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics Starch, TPS)	มีแป้งเป็นส่วนประกอบมากกว่าร้อยละ 70	แป้งได้จากวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนได้	บรรจุภัณฑ์อาหาร ภาชนะใช้แล้วทิ้ง ขวดน้ำ ช้อนส้อม
พอลิเมอร์ที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน (Cellulose-based polymers)	สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ	ได้จากเส้นใยที่มีการกำจัดลิกนิน	แผ่นฟิล์มสำหรับบรรจุอาหาร เช่น ขนมปัง ผลไม้ เนื้อ และ อาหารแห้ง
พอลิแลคติกแอสิด (Poly Lactic Acid, PLA) 	พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงมีกรดแลคติกหรือแลคไทด์เป็นมอนอเมอร์	ได้จากพืชชนิดที่ให้แป้งสามารถปลูกแทนได้	ถ้วย ชาม ขวดน้ำ ถุงพลาสติก แผ่นฟิล์ม
พอลิไฮดรอกซีอัลคาโนเอต (Poly Hydroxyalkanoate, PHA) 	พอลิเอสเทอร์แบบสายโซ่ตรงผลิตได้ทางธรรมชาติโดยแบคทีเรีย	ได้จากพืชชนิดที่ให้แป้งสามารถปลูกแทนได้	แผ่นฟิล์ม ภาชนะต่างๆ
พอลิบิวธิลีนซัคซิเนต (Poly Butylene Succcinate,PBS) 	พอลิเอสเทอร์สังเคราะห์แบบสายโซ่ตรงเตรียมได้จากมอนอเมอร์ 2 ชนิด คือ 1 , 4 -บิวเทนไดอล (BDO) และกรดซักซินิก	กรดซักซินิก และ BDO เตรียมได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีและวัตถุดิบที่ปลูกทดแทนใหม่ได้	ช้อนส้อมพลาสติกแบบใช้แล้วทิ้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2 การย่อยสลาย

การย่อยสลายหมายถึงกระบวนการที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางสมบัติทางกายภาพหรือเคมีอันเป็นผลมาจากสภาวะทางสิ่งแวดล้อม หรือหมายถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาใดเวลาหนึ่งของวัสดุหรือสารตั้งต้นนั้นๆ ในกระบวนการย่อยสลายมูลฝอยจำเป็นต้องใช้เวลาซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็น ความชื้น อุณหภูมิ ชนิดของมูลฝอย รวมถึงการบดอัดมูลฝอยที่ถือว่าสำคัญมากเพราะหากมีบดอัดมากเกินไปปฏิกิริยาอาจเกิดได้ช้า เป็นต้น

2.2.1 การย่อยสลายวัสดุ

การย่อยสลายวัสดุแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุนั้นเป็นสำคัญ รวมถึงระยะเวลาและสภาพแวดล้อมอีกด้วย

2.2.1.1 การย่อยสลายพอลิเมอร์

การย่อยสลายพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายประเภทซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยที่แตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 2-3 (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2550)

1) การสลายตัวด้วยแสง (Photodegradation) เป็นกระบวนการย่อยสลายของวัสดุที่มีความไวต่อแสง ซึ่งแสงถือเป็นหนึ่งในปัจจัยแรกๆที่ถูกนำมาพิจารณาเมื่อเกิดการทำลายพื้นผิวของพอลิเมอร์ในสภาวะบรรยากาศทั่วไป (Singh และ Sharma, 2008) โดยปกติพอลิเมอร์ไวต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ใกล้กับรังสียูวีในแสงอาทิตย์ประมาณ 290 – 400 นาโนเมตร ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดอายุการใช้งานกลางแจ้งของผลิตภัณฑ์ (Sheldrick และ Vogl, 1976) สำหรับความยาวคลื่นที่ทำลายพอลิเมอร์ได้ดีที่สุดขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์เนื่องจากแต่ละชนิดมีพันธะที่แตกต่างกัน เช่น ความยาวคลื่น 300 นาโนเมตรเหมาะกับพลาสติกพอลิเอทิลีน ความยาวคลื่น 370 นาโนเมตรเหมาะกับพลาสติกพอลิโพรพิลีน เป็นต้น

2) การสลายตัวด้วยความร้อน (Thermal degradation) เป็นการเสื่อมสภาพของโมเลกุลที่เป็นผลจากการได้รับความร้อนมากเกิน โดยที่อุณหภูมิสูงสายโซ่ยาวเส้นหลักของพอลิเมอร์จะเริ่มขาดออกและไปทำปฏิกิริยากับสารใดๆ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิเมอร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายทางความร้อนเป็นปฏิกิริยาที่ยุ่งยากซับซ้อนต้องอาศัยหลายปัจจัยเช่น อัตราความร้อน ความดัน ชนิดพอลิเมอร์ เป็นต้น ซึ่งพอลิเมอร์ที่ความเหนียวสูงจะมีความซับซ้อนมากจนไปขัดขวางการถ่ายเทมวลสารและความร้อน (Shah และคณะ, 2008)

3) การสลายตัวเชิงกล (Mechanical degradation) เป็นการให้แรงกระทำแก่ชิ้นพลาสติกทำให้ชิ้นส่วนพลาสติกแตกออกเป็นชิ้น ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้โดยทั่วไปในการทำให้พลาสติกแตกหรือฉีกขาดเป็นชิ้นเล็กๆ

4) การย่อยสลายทางชีววิทยา (Biodegradation) เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของสารโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์อาทิเช่น สารอินทรีย์เปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำในสภาวะมีออกซิเจน หรือเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนในสภาวะไร้ออกซิเจน (Shah และคณะ, 2008) การเกิดการสลายตัวในกระบวนการที่ไม่ใช่ชีวภาพอย่างการสลายตัวทางกายภาพของพอลิเมอร์ส่งผลให้การย่อยสลายทางชีวภาพเกิดได้ดีขึ้นเนื่องจากเป็นการลดน้ำหนักโมเลกุลและเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้กับจุลินทรีย์ (Palmisano และ Pettigrew, 1992) สำหรับตัวชี้วัดที่ใช้แสดงถึงการย่อยสลายทางชีวภาพนั้นแตกต่างกันออกไปตามสิ่งที่สนใจศึกษาไม่ว่าจะเป็นการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิว (Ishigaki และคณะ, 2004) น้ำหนักที่หายไปและปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น (นาวิน เนสุสินธุ์, 2554) ซึ่งความเร็วในการย่อยสลายของพอลิเมอร์แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็นสมบัติเอนไซม์สมบัติพอลิเมอร์ การสัมผัสของวัสดุกับเอนไซม์ เป็นต้น (Reich และ Stivala, 1971)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 2-3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ (Shah และคณะ, 2008)

ปัจจัย	การย่อยสลายด้วยแสง	การย่อยสลายด้วยความร้อน	การย่อยสลายทางชีววิทยา
ตัวเร่งปฏิกิริยา	แสงยูวี (UV) หรือรังสีที่มีพลังงานสูง	ความร้อน	จุลินทรีย์
ความต้องการความร้อน	ไม่ต้องการ	ความร้อนสูงกว่าสภาพอากาศปกติ	ไม่ต้องการ
อัตราการย่อยสลาย	เริ่มต้นช้าแต่แผ่ขยายอย่างรวดเร็ว	รวดเร็ว	ปานกลาง
การพิจารณาอื่นๆ	เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมหากไม่ได้รังสีพลังงานสูง	ไม่ได้รับการยอมรับทางสิ่งแวดล้อม	เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม
การยอมรับ	มีปัญหาเรื่องราคาแพง	ไม่ได้รับการยอมรับ	ได้รับการยอมรับ

2.2.1.2 การย่อยสลายกระดาษ

กระดาษจัดอยู่ในวัสดุที่ย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีววิทยาทั้งในสภาวะมีและไม่มีออกซิเจน เนื่องจากส่วนประกอบหลักในกระดาษคือเซลลูโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลและเป็นอาหารของจุลินทรีย์หลายชนิด โดยจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตโดยใช้น้ำตาลเป็นอาหารแล้วเกิดผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ทั้งนี้กระดาษบางชนิดอาจจะมีเฮมิเซลลูโลสและลิกนินซึ่งเป็นส่วนประกอบหนึ่งของพืชอยู่ด้วยและสามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์หลายชนิดเช่นกัน สำหรับอัตราการย่อยสลายของกระดาษนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการไม่ว่าจะเป็น ส่วนประกอบทางเคมี สารเติมแต่ง สภาวะแวดล้อมที่เอื้อต่อการย่อยสลาย ปริมาณของจุลินทรีย์ ออกซิเจน และความชื้น เป็นต้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Area และ Cheradame ที่ระบุว่าการสลายตัวของกระดาษอาศัยปัจจัยภายในต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นพีเอช ไอออนของโลหะ หรือปริมาณลิกนิน ซึ่งความแข็งแรงของกระดาษขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของเส้นใยและพันธะระหว่างเส้นใยเป็นสำคัญ นอกจากนี้พบว่ามีการรายงานถึงความสามารถในการย่อยสลายของกระดาษที่มีการเคลือบไขหรือพลาสติกใน

สภาวะหลุมฝังกลบว่าส่งผลทำให้การย่อยสลายของกระดาษเป็นไปได้ช้ามาก (Area และ Cheradame, 2011)

ปริมาณลิกนินเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยสลายกระดาษในหลุมฝังกลบซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของเยื่อกระดาษ งานวิจัยของ Wang และคณะ (2015) ที่ทำการศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนของผลิตภัณฑ์กระดาษในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบระดับห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วยกระดาษหนังสือพิมพ์ (Newsprint) กระดาษสำนักงาน (Copy paper) กระดาษนิตยสาร (Magazine) และผ้าอ้อมสำเร็จรูป (Diaper) จากการวิเคราะห์สมบัติของผลิตภัณฑ์กระดาษพบว่ากระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษสำนักงาน และผ้าอ้อมสำเร็จรูปพบว่ามีปริมาณลิกนินสูง ต่ำ และไม่พบตามลำดับ ส่วนกระดาษนิตยสารจะขึ้นอยู่กับประเภทของเยื่อกระดาษถ้าเป็นเยื่อเชิงกลจะมีลิกนินมาแต่ถ้าเป็นเยื่อเชิงเคมีจะมีลิกนินน้อย ผลการทดลองพบว่าเกิดปริมาณแก๊สมีเทนสูงสุดในถังปฏิกรณ์กระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษสำนักงาน นิตยสาร และผ้าอ้อมสำเร็จรูปอยู่ที่ 61.9 146.4 108.0 และ 26.6 มิลลิลิตรต่อกรัมน้ำหนักแห้งตามลำดับ ซึ่งปริมาณแก๊สมีเทนและอัตราการย่อยสลายขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็นชนิดของเยื่อกระดาษและการเวียนเชื้อจุลินทรีย์ กล่าวคือเยื่อกระดาษเชิงเคมีสามารถย่อยสลายได้มากกว่าเยื่อกระดาษเชิงกลเนื่องจากมีปริมาณลิกนินอยู่น้อยหรือไม่มีเลย (Wang และคณะ, 2015) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าที่ระบุว่าลิกนินมีส่วนในการยับยั้งการย่อยสลายเซลลูโลสในกระดาษหนังสือพิมพ์ โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างหนังสือพิมพ์ที่มีการบำบัดเบื้องต้นด้วยการกำจัดลิกนินกับที่ไม่กำจัดลิกนินพบว่ามีเซลลูโลสย่อยสลายร้อยละ 75 - 100 และร้อยละ 50 ตามลำดับ (Stinson และ Ham, 1995)

นอกจากการปรับสภาพด้วยการกำจัดลิกนินแล้วการปรับสภาพด้วยจุลินทรีย์ก็ส่งต่อผลการย่อยสลายเช่นกันเนื่องจากสารตั้งต้นสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายขึ้นหลังการปรับสภาพซึ่งหมายถึงระยะเวลาในการย่อยสลายที่สั้นลงอีกด้วย Yuan และคณะ (2012) ทำการศึกษาผลของการปรับสภาพกระดาษด้วยจุลินทรีย์ต่อการผลิตแก๊สมีเทนของของเสียจำพวกกระดาษประกอบด้วยกระดาษสำนักงาน (Office Paper) กระดาษหนังสือพิมพ์ (Newsprint) กระดาษแข็ง (Cardboard) และกระดาษกรอง (Filter Paper) ซึ่งทำหน้าที่เป็นชุดควบคุม โดยนำตัวอย่างกระดาษไปปรับสภาพด้วยจุลินทรีย์ MC1 ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายเซลลูโลสที่อุณหภูมิสูง พบว่าระยะเวลาในการปรับสรูปที่ดีที่สุดอยู่ที่ 7 วัน สำหรับผลทดสอบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

แสดงให้เห็นว่าชุดการทดลองที่ผ่านการปรับสภาพสามารถผลิตแก๊สมีเทนได้มากกว่าชุดที่ไม่ได้ปรับสภาพกล่าวคือ หลังจากการทดสอบผ่านไป 55 วัน ปริมาณแก๊สมีเทนจากกระดาษสำนักงาน กระดาษหนังสือพิมพ์ กระดาษแข็ง กระดาษกรองเท่ากับ 287 192 231 และ 277 มิลลิลิตร ในชุดการทดลองที่มีการปรับสภาพด้วยจุลินทรีย์ตามลำดับ ส่วนชุดที่ไม่ได้ปรับสภาพได้มีปริมาณแก๊สมีเทนเท่ากับ 208 75 96 และ 214 มิลลิลิตร ตามลำดับ (Yuan และคณะ, 2012) ขณะที่ Pommier และคณะ (2010) ศึกษาผลของขนาดต่อการย่อยสลายกระดาษชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนของตัวอย่างกระดาษสำนักงาน (Office paper) กระดาษหนังสือพิมพ์ (Newspaper) กล่องกระดาษลูกฟูก (corrugated carton) กระดาษแข็ง (Cardboard) และนิตยสาร (Magazine) ด้วยวิธี Biological Methane Potential (BMP) พบว่าปริมาณแก๊สมีแทนที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกันในตัวอย่างทุกขนาด จึงสามารถสรุปได้ว่าขนาดไม่มีผลประสิทธิภาพการเกิดแก๊สมีเทน (Pommier และคณะ, 2010)

2.2.1.3 การย่อยสลายพอลิสไตรีนโฟม

การย่อยสลายพอลิสไตรีนเกิดการสูญเสียสมบัติเชิงกลเมื่อได้รับแสงยูวีและความร้อนเนื่องจากยูวีผลิตอนุมูลอิสระซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการขาดออกของสายโซ่พอลิเมอร์ (Naima Atiq, 2011) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Gewert และคณะ (2015) ที่ระบุว่าพอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์มีความไวต่อสภาพอากาศกลางแจ้งเมื่อได้รับแสงยูวี สามารถย่อยสลายได้โดยแสงและความร้อนแต่ไม่เกิดย่อยสลายทางชีวภาพซึ่งผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการย่อยสลายคือสไตรีนมอนอเมอร์ (Gewert และคณะ, 2015) งานวิจัยของฤกษ์ฤทธิ์ เคนหาราช (2544) สรุปว่าในสภาวะแวดล้อมธรรมชาติการย่อยสลายของโฟมเกิดจากปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยแสง โดยทำการศึกษาการย่อยสลายพอลิสไตรีนโฟม (PS-Foam) ในสภาวะธรรมชาติประกอบด้วยสภาวะทิ้งกลางแจ้งให้สัมผัสกับสภาพอากาศธรรมชาติ สภาวะฝังกลบ สภาวะที่แช่ในน้ำเสียและน้ำทะเลเป็นระยะเวลา 6 เดือน โดยใช้การเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักโมเลกุลเป็นตัวชี้วัดพบว่าเมื่อพอลิสไตรีนโฟมสัมผัสกับแสงอาทิตย์ในสภาวะทิ้งกลางแจ้งจะเกิดการย่อยสลายอย่างรวดเร็วด้วยปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยแสงโดยที่กลไกในการย่อยสลายเกิดจากกระบวนการขาดออกจากกันของโซ่โมเลกุล ซึ่งพบว่าพอลิสไตรีนโฟมใช้ระยะเวลาน้อยกว่า 6 เดือนในการย่อยสลาย ส่วนการฝังกลบในดินไม่พบการย่อยสลายของโฟมในช่วงระยะเวลาที่ทำการทดลอง สำหรับสภาวะจำลองที่โฟมถูกทิ้งในแหล่งน้ำพบว่ามีอัตราการย่อยสลายช้ามากและกระบวนการย่อย

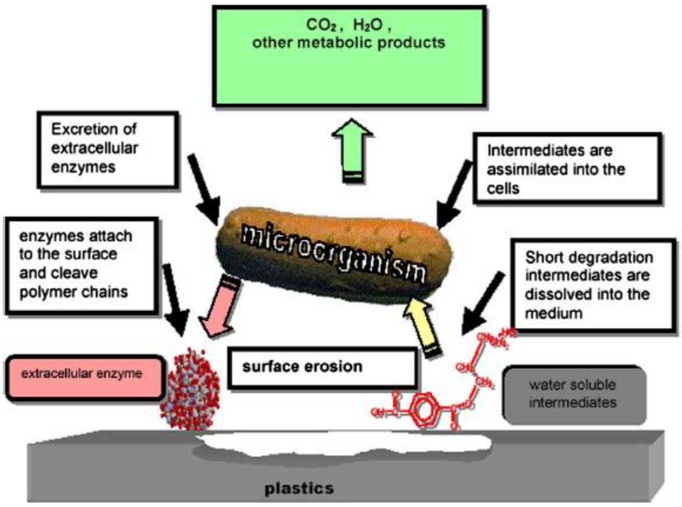
สลายไม่ส่งผลต่อค่าซีโอดีในแหล่งน้ำ จึงสามารถสรุปได้ว่าในสภาวะแวดล้อมตามธรรมชาติการย่อยสลายของโฟมจะเกิดจากปฏิกิริยาการสลายตัวด้วยแสง (ฤกษ์ฤทธิ์ เคนหาราช, 2544)

จากข้อมูลเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าพอลิสไตรีนสามารถย่อยสลายได้ด้วยแสงแต่ไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ทั้งนี้อาจมีการปรับปรุงสมบัติต่างๆ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น ใส่สารต้านอนุมูลอิสระ สารที่เพิ่มความคงทนต่อแสงยูวีเพื่อเป็นการลดความสามารถในการสลายตัว ผสมสารที่ไวต่อแสง หรือสารชีวภาพเช่นแป้งเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ เป็นต้น การศึกษาการย่อยสลายพอลิสไตรีนโฟมกันกระแทกที่มีปรับปรุงสมบัติเพื่อให้เพื่อสมบัติในการย่อยสลายทางชีวภาพโดยนำพอลิสไตรีนโฟมกันกระแทกผสมแป้ง (Starch-polystyrene loose-fill foams) ตัวอย่างประกอบด้วยพอลิสไตรีนต่อแป้งที่อัตราส่วน 30:70 และ 20:80 ทำการทดลองภายใต้ปุ๋ยหมักที่มีการเติมอากาศในถังปฏิกรณ์เป็นเวลา 39 วันที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส วัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น พบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นสูงสุดในวันที่ 15 และลดลงหลังจากนั้น ซึ่งอัตราการเกิดและปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นอยู่กับปริมาณแป้งที่ผสมโดยปริมาณแป้งมากขึ้นส่งผลให้อัตราและปริมาณแก๊สมากขึ้นตามไปด้วย นอกจากนี้ยังใช้ตัวชี้วัดอื่นประกอบการวิเคราะห์การย่อยสลายได้แก่ NMR (Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy) เพื่อศึกษาโครงสร้างของสารซึ่งพบว่ามีการเปลี่ยนแปลง และวิเคราห์หมู่ฟังก์ชันของสารด้วย FTIR (Fourier Transform Infrared Spectrometer) ซึ่งพบว่ามีการเปลี่ยนแปลงเมื่อสิ้นสุดการทเลองเช่นเดียวกัน (Pushpadass และคณะ, 2010) การศึกษาการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันด้วย FTIR เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมนำมาศึกษาการย่อยสลายพอลิสไตรีนโฟม ดังงานวิจัยของ Pinto และคณะ (2013) ศึกษาการย่อยสลายพอลิสไตรีนโฟมผสมสารที่ไวต่อแสงยูวีโดยให้สัมผัสแสงยูวีเป็นเวลา 132 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่าน้ำหนักโมเลกุลลดลง มีการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของสารเมื่อทดสอบด้วย FTIR และมีการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการดูดซับแสงยูวี สำหรับการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิสไตรีนที่ผสมสารชีวภาพมีตัวชี้วัดที่ใช้ชี้วัดการย่อยสลายใกล้เคียงกับการทดสอบการย่อยสลายด้วยแสง (Pinto และคณะ, 2013)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.1.4 การย่อยสลายพลาสติกชีวภาพ

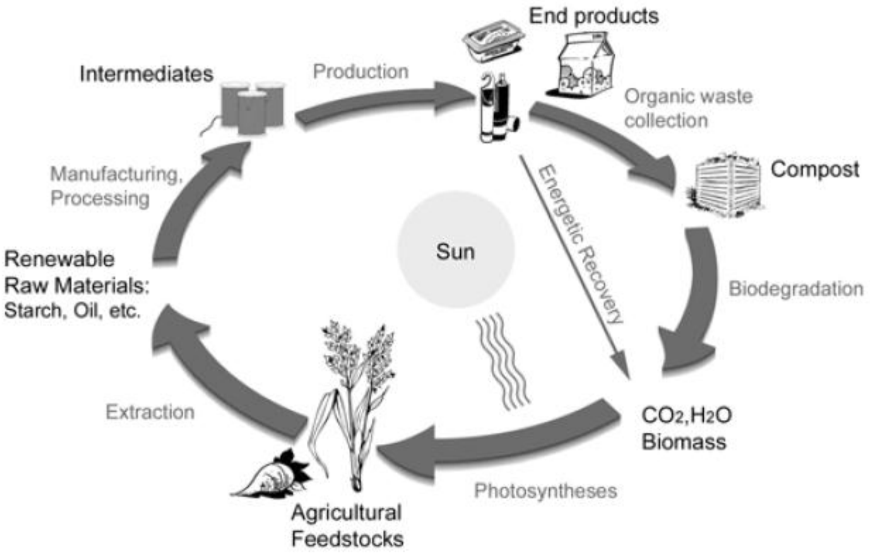
การย่อยสลายพอลิเมอร์จากการทำงานของจุลินทรีย์โดยทั่วไปมีกระบวนการ 2 ขั้นตอน เนื่องจากการของสายพอลิเมอร์ที่มีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำ ในขั้นแรกการย่อยสลายจะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยการปลดปล่อยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ทำให้พอลิเมอร์สามารถละลายน้ำได้ และมีขนาดเล็กพอจะแพร่ผ่านผนังเซลล์เข้าไปในเซลล์จนเกิดการย่อยสลายในขั้นตอนที่ 2 ได้เป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนสุดท้ายคือ พลังงานและสารประกอบขนาดเล็กที่สเถียรในธรรมชาติ (Minerlization) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน น้ำ แร่ธาตุ และมวลชีวภาพ (Biomass) ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมขณะเกิดการย่อยสลายกล่าวคือหากเป็นสภาวะที่มีออกซิเจนจุลินทรีย์ประเภทใช้ออกซิเจน (Aerobic microorganisms) จะทำหน้าที่ย่อยสลายสารประกอบต่างๆให้เป็น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มวลชีวภาพ และน้ำดังรูปที่ 2-4 แต่ถ้าเป็นในสภาวะไร้ออกซิเจนจุลินทรีย์กลุ่มไม่ใช้ใช้ออกซิเจน (Anaerobic microorganisms) จะทำหน้าที่ย่อยสลายเกิดผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และน้ำ (Shah และคณะ, 2008)



รูปที่ 2-4 กระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกภายใต้สภาวะมีออกซิเจน
ที่มา: (Shah และคณะ, 2008)

การย่อยสลายพลาสติกชีวภาพนั้นสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพหรือถูกหมักเป็นปุ๋ยได้ในสภาวะที่เหมาะสม โดยเริ่มจากชีวมวลที่ถูกผลิตขึ้นโดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชตามธรรมชาติซึ่งชีวมวลนี้นั้นจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลับสู่ธรรมชาติ

กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งสามารถนำมาหมุนเวียนใช้ในการสังเคราะห์แสงของพืชเพื่อใช้ในการผลิตชีวมวลใหม่ เกิดเป็นวัฏจักรของธรรมชาติอย่างครบวงจรโดยไม่จำเป็นต้องมีกระบวนกำจัดขยะเข้ามาเกี่ยวข้องจึงไม่ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมและไม่มีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นวัฏจักรของพลาสติกชีวภาพจึงมีจุดประสงค์ที่จะเลียนแบบวงจรของธรรมชาติ กล่าวคือหลังจากผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพถูกนำไปใช้งานโดยผู้บริโภคและถูกนำไปกำจัดโดยการย่อยเป็นปุ๋ยเพื่อให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปล่อยออกมานั้นจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชเป็นวงจรชีวิตของผลิตภัณฑ์ดังแสดงในรูปที่ 2-5 ดังนั้นวัฏจักรนี้ทำให้พลาสติกชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการใช้ทรัพยากรแบบอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมภายใต้ทรัพยากรที่ปลูกทดแทนได้ (Renewable resources) อีกทั้งยังไม่ก่อให้เกิดมลภาวะสิ่งแวดล้อมหลังจากหมดอายุการใช้งาน (สำนักนวัตกรรมแห่งชาติ, 2551)



รูปที่ 2-5 วัฏจักรพลาสติกชีวภาพ

ที่มา: http://news.bio-based.eu/media/news-images/2008120407/LCA_PositionPaper.pdf

2.2.2 การย่อยสลายวัสดุในหลุมฝังกลบ

ขยะที่ถูกฝังในหลุมฝังกลบจะเกิดการสลายตัวโดยอาศัยกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพร่วมกัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสลายตัวมีทั้งที่เป็นของแข็ง ของเหลว และแก๊สซึ่งต้องได้รับการจัดการต่อไป

กระบวนการย่อยสลายวัสดุในหลุมฝังกลบประกอบด้วย 3 กระบวนการ ดังนี้

2.2.2.1 การสลายตัวทางกายภาพ *(Physical degradation)*

เป็นผลมาจากการแตกออกและการเคลื่อนย้ายของขยะโดยอาศัยแรงกระกระทำจากภายนอกทำให้เกิดการฉีกขาดออกจากกัน รวมถึงการไหลของน้ำชะขยะตามแรงโน้มถ่วงซึ่งสามารถชะขยะจากบนลงสู่ด้านล่าง ซึ่งอัตราการไหลออกของขยะอันเป็นผลมาจากระดับความดันที่แตกต่างกัน และการแพร่เนื่องจากความเข้มข้นที่ไม่เท่ากัน ทั้งนี้เมื่อความชื้นของขยะเพิ่มขึ้นการไหลของขยะก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน

2.2.2.2 การสลายตัวทางเคมี *(Chemical decomposition)*

เป็นกระบวนการทางเคมีที่มีผลมาจากการสลายตัวของขยะประกอบด้วยการไฮโดรไลซิสการละลาย การตกตะกอน การดูดซับ การคายตัว และการแลกเปลี่ยนไอออน อันเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติของน้ำชะขยะและแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.2.2.3 การสลายตัวทางชีววิทยา (Biological decomposition) หรือการย่อยสลายทางชีวภาพ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน (ชมพูนุช ชุ่มพุดซา, 2554) คือ

1) การย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจน

การย่อยสลายนี้จะเกิดขึ้นในช่วงแรกของการทิ้งขยะลงในหลุมฝังกลบเนื่องจากยังคงมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ซึ่งจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ ความร้อน สารอินทรีย์ส่วนที่ย่อยสลายอย่างไม่สมบูรณ์ และคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณมากกว่าร้อยละ 90 ของแก๊สทั้งหมด ดังสมการที่ (2-1) และเนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์มีสมบัติละลายน้ำได้ค่อนข้างดี ดังนั้น

คาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนจึงละลายสู่น้ำส่งผลให้น้ำในกองขยะมีสภาวะเป็นกรด สำหรับแก๊สออกซิเจนจะมีปริมาณลดลงในขณะที่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น ส่วนแก๊สไนโตรเจนไม่มีการเปลี่ยนแปลงในทางทฤษฎี

กระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเนื่องจากมีการปล่อยพลังงานความร้อนจากจุลินทรีย์ในระหว่างกระบวนการย่อยสลายซึ่งมีผลทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นถึง 35 - 40 องศาเซลเซียส

$$\text{Organic matter} + O_2 \longrightarrow CO_2 + H_2O + \text{Biomass} + \text{Heat} + \text{Partially Organic matter} \quad (2\text{-}1)$$

2) การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (รูปที่ 2-6)

สารอินทรีย์สามารถย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนได้ โดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มไม่ใช้ออกซิเจน 2 กลุ่มคือ จุลินทรีย์เรียกลุ่มไม่ผลิตมีเทน (Non-Methanogenic microorganisms) และจุลินทรีย์เรียกลุ่มที่ผลิตมีเทน (Methannogenic microorgannism) โดยเริ่มจากการสลายโมเลกุลใหญ่ (Hydrolysis) การสร้างกรด (Acidogenesis) และการสร้างมีเทน (Methanogenesis) ตามลำดับ

<u>กระบวนการสลายโมเลกุลใหญ่ (Hydrolysis)</u>

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เป็นกระบวนการแตกสลายของสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนและอาจอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำเช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต ให้อยู่ในรูปสารประกอบอย่างง่ายเช่น กรดอะมิโน กรดไขมัน น้ำตาลกลูโคสตามลำดับ โดยกระบวนการดังกล่าวเกิดจากการที่จุลินทรีย์ขับเอนไซม์ออกมานอกเซลล์เพื่อทำให้โมเลกุลใหญ่แตกตัวออกมาเป็นโมเลกุลเล็ก เอ็นไซม์ดังกล่าวได้แก่ โพรติไลติค (Proteolytic) ลิโพไลติค (Lipolytic) เซลลูไลติค (Cellulytic) เป็นต้น

สำหรับความเร็วของกระบวนการย่อยสลายในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับเอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาจากจุลินทรีย์ ทั้งนี้เอนไซม์มีความเฉพาะเจาะจงมากการทำงานจึงขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นด้วยคือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ อุณหภูมิ ค่าพีเอช และการสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์

<u>กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis และ Acetogenesis)</u>

สารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงนี้จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลุ่มอะซิโดจินิก (Acidogenic microorganism) ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ พลังงานความร้อน และกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) ซึ่งส่วนใหญ่คือกรดอะซิติค (Acetic acid) และยังเกิดกรดโพรพิอิก (Propionic acid) กรดแลคติก (Lactic acid) กรดบิวทิริก (Butyric acid) อีกด้วย ส่งผลให้สภาพความเป็นกรดเพิ่มสูงขึ้น สำหรับผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันในขั้นตอนนี้มีสาเหตุมาจากจำนวนและชนิดของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง

นอกจากนี้กรดอินทรีย์ระเหยจะถูกเปลี่ยนเป็นอะซิเตท (Acetate) กรดฟอร์มิก (Fromic acid) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจน (H_2) โดยจุลินทรีย์กลุ่มอะซีโตเจนิก (Acetogenic bacteria) ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างมีเทน ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญมากเนื่องจากลดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายเพราะหากการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในปริมาณที่สูงสามารถยับยั้งกระบวนการสร้างมีเทนได้

สมการการเกิดกรดอะซิติกมีดังสมการที่ (2-2) และ (2-3)

$$C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 \quad (2\text{-}2)$$

$$2CH_3CH_2OH + CO_2 \longrightarrow CH_4 + 2CH_3COOH \quad (2\text{-}3)$$

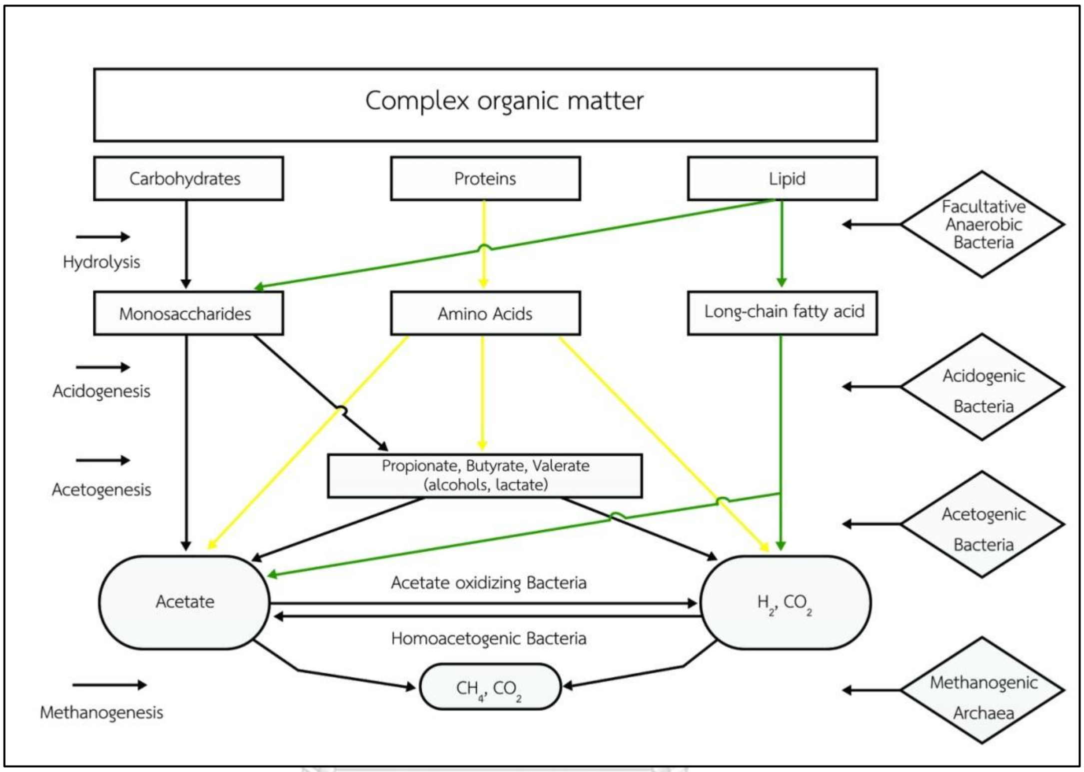
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

<u>กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)</u>

การย่อยสลายเริ่มต้นเมื่อปริมาณออกซิเจนถูกใช้ไปหมดแล้วจนเกิดสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งเหมาะกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenesis bacteria) โดยอาศัยกรดอินทรีย์จากกระบวนการก่อนหน้าเป็นแหล่งอาหารเป็นผลทำให้กรดอินทรีย์และปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงพีเอชจึงมีค่าสูงขึ้น (ดังสมการที่ 2-4 และ 2-5) ทั้งนี้จุลินทรีย์กลุ่มนี้เป็นจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตช้าและสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตค่อนข้างมากโดยต้องการอาหารที่ไม่มีโครงสร้างซับซ้อนและต้องอยู่ในสภาวะที่ค่าพีเอชเหมาะสมอยู่ระหว่าง 6.5 – 7.5 ในขั้นนี้จึงต้องมีการควบคุมระบบให้ดีเพราะหากเป็นปล่อยให้กรดมากไปจุลินทรีย์อาจตายได้ สำหรับระบบที่มีประสิทธิภาพดีอาจมีสัดส่วนของแก๊สมีเทนร้อยละ 60 – 70 เลยทีเดียว

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2 \quad (2\text{-}4)$$

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \quad (2\text{-}5)$$



รูปที่ 2-6 กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic decomposition)

ที่มา: (Merlin Christy และคณะ, 2014)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2.3 ตัวชี้วัดการย่อยสลายของวัสดุ

2.2.3.1 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ

การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเป็นการเปลี่ยนแปลงที่สามารถมองเห็นได้ โดยเกิดจากการถูกทำลายบริเวณพื้นผิวหรือภายนอกของวัสดุเป็นสำคัญ

1) ร้อยละน้ำหนักที่หายไป (% Weight loss) เป็นการเปรียบเทียบน้ำหนักก่อนและหลังการทดลองเพื่อหาน้ำหนักที่หายไประหว่างการย่อยสลาย ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-6) (สาธินี ศิริวัฒน์, 2553)

$$\% \text{ Weight loss} = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100 \qquad (2\text{-}6)$$

เมื่อ % Weight loss คือร้อยละของน้ำหนักที่ไป

W_0 คือน้ำหนักแห้งเริ่มต้น (ก่อนเกิดการย่อยสลาย)

W_t คือน้ำหนักแห้งที่ระยะเวลาต่างๆ สุดท้าย (หลังเกิดการย่อยสลาย)

การชั่งน้ำหนักทำได้โดยนำตัวอย่างที่เหลือจากการย่อยสลายมาทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น แล้วทิ้งให้แห้งในโถดูดความชื้นจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก (Ishigaki และคณะ, 1999)

2) พื้นผิววัสดุ (Material surface) ทำการทดสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM) โดยเปรียบเทียบพื้นผิวก่อนการทดลองกับพื้นผิวหลังการทดลอง ซึ่ง SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพจะทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากผิวหน้าตัวอย่างที่ทำการสำรวจ ซึ่งรูปที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย SEM จะเป็นภาพ 3 มิติ ดังนั้นจึงนำมาใช้ในการศึกษาโครงสร้างที่ผิวของวัสดุได้ 2 ลักษณะ คือ การศึกษาสภาพผิว เช่น ความเรียบ ความหยาบผิว รูพรุน หรือการเกาะตัวของ อนุภาคบนผิว เป็นต้น และการศึกษาโครงสร้างสัณฐานวิทยา (มหาวิทยาลัยมหิดล, 2559)

2.2.3.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมี

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถมองเห็นได้ แต่จะเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเป็นสำคัญ โดยเฉพาะกรณีที่การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเกิดขึ้นน้อยจนไม่สามารถสังเกตุเห็นได้

1) โครงสร้างทางเคมี (Chemical structure) ด้วย FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) เพื่อวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของวัสดุที่อาจเกิดขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดลอง

อินฟราเรดสเปกโทรสโกปีหรือ IR สเปกโทรสโกปี เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาพลังงานของแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีผลต่อการสั่นของพันธะโมเลกุล โดยโมเลกุลของสารอินทรีย์จะประกอบด้วยอะตอม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ที่ยึดเกาะกันด้วยพันธะเคมี ซึ่งโดยปกติแล้วอะตอมเหล่านี้จะมีการเคลื่อนไหวหรือสั่นอยู่ตลอดเวลา พลังงานหรือเลขคลื่น (Wave number) ในช่วงของ IR ระหว่าง 4000 – 400 ต่อเซนติเมตร จะมีผลต่อการสั่นของพันธะเคมีแต่ละชนิดแตกต่างกันไปเช่น พลังงานในช่วง 3800 – 3400 ต่อเซนติเมตร มีผลให้เกิดการสั่นของพันธะ O-H หรือพลังงานในช่วง 3000 – 2800 ต่อเซนติเมตร มีผลต่อพันธะ C-H เป็นต้น จากความแตกต่างของ พลังงานที่มีผลต่อการสั่นของพันธะเคมีแต่ละชนิด ทำให้สามารถจำแนกชนิดของหมู่ฟังก์ชันในองค์ประกอบของสารนั้นๆได้ โดยสามารถประยุกต์ใช้ได้กับตัวอย่างทั้งที่เป็นของแข็งและของเหลว (สมเดช กนกเมธากุล, 2547)

นาวิน เนสุสินธ์ (2554) ศึกษาการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในดินจากบ่อฝังกลบขยะผสมกากตะกอนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยใช้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของวัสดุด้วย FTIR เป็นตัวชี้วัดพบว่า ผลสเปกตรัมของพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอ (Polylactic Acid; PLA) มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงเลขคลื่น 2800 – 2000 ต่อเซนติเมตร แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงจากการย่อยสลายของพีแอลเอ ส่วนผลสเปกตรัมของพลาสติกชีวภาพชนิดพีบีเอที (Polybutylene adipate terephthalate, PBAT) ยอดสเปกตรัมต่างๆยังคงเหมือนเดิมแสดงว่าโครงสร้างทางเคมีหลังการย่อยสลายไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการย่อยสลายเกิดน้อยมากหรือไม่เกิดเลย สอดคล้องกับตัวชี้วัดอื่นอย่างลักษณะพื้นผิว น้ำหนักที่หายไป และแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอสามารถย่อยสลายได้เร็วกว่าพลาสติกชีวภาพพีบีเอทีที่สภาวะและเวลาดังกล่าว (นาวิน เนสุสินธุ์, 2554) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Pushpadass และคณะ (2010) ที่ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของโฟมกันกระแทกที่มีแป้งเป็นส่วนผสม (Starch-polystyrene loose-fill foams) ภายใต้ปุ๋ยหมัก พบว่าหลังการทดสอบในวันที่ 39 เกิดการย่อยสลายส่วนที่เป็นแป้ง เนื่องจากผลสเปกตรัมแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงบริเวณเลขคลื่น 1655 และ 990 ต่อเซนติเมตร โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองยอดสเปกตรัมมีความใกล้เคียงกับโฟมพอลิสไตรีนบริสุทธิ์เนื่องจากมีการย่อยสลายเฉพาะส่วนที่เป็นแป้งออกไป (Pushpadass และคณะ, 2010)

3) แก๊สชีวภาพ (Biogas)

การย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สชีวภาพที่อยู่ในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนเป็นหลัก โดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำด้วยแก๊สในการวัดปริมาณแก๊สที่

เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพ (% Biodegradation) ดังสมการที่ (2-2) ตามมาตรฐาน ASTM 5526-94 และ ASTM 7475-11 อีกด้วย

2.3 หลุมฝังกลบ

การฝังกลบ (Landfill) หมายความถึง กระบวนการในการนำขยะมูลฝอยไปฝังและกลบใต้ผิวดิน แต่ในปัจจุบันนี้การฝังกลบได้ขยายความรวมไปถึงการฝังกลบที่ถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary landfill) ซึ่งหมายถึงการออกแบบและการควบคุมการทำงานของการฝังกลบขยะมูลฝอย เพื่อทำให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุดสำหรับการฝังกลบขยะอันตรายจะเป็นการฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure landfill) สำหรับประเทศไทยการกำจัดขยะมีทั้งแบบถูกต้องและไม่ถูกต้อง สำหรับข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษระบุว่าในปี 2559 การกำจัดขยะที่ถูกต้องประกอบอันด้วยการฝังกลบ การเผา (Incineration) การทำปุ๋ยหมัก (Composting) และอื่นๆ ที่ร้อยละ 81.71 7.31 5.22 และ 5.75 (กรมควบคุมมลพิษ, 2560)

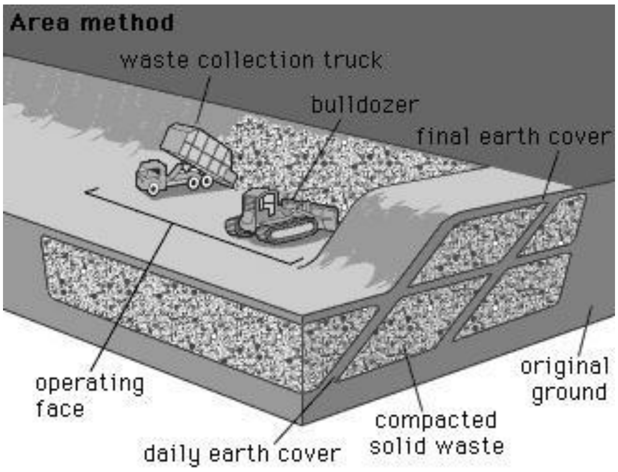
2.3.1 การฝังกลบมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary Landfill) (กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

การฝังกลบมูลฝอยอย่างถูกหลักสุขาภิบาล (Sanitary Landfill) เป็นการนำขยะมูลฝอยมาเทกองในพื้นที่ที่จัดเตรียมไว้สำหรับการฝังกลบโดยเฉพาะ ซึ่งจะมีการวางระบบต่างๆเพื่อป้องกันไม่ให้มีการปลดปล่อยมลสารออกสู่พื้นที่ภายนอก มีการบดอัดและปิดทับเพื่อป้องกันปัญหาด้านกลิ่น แมลงสัตว์พาหะ และน้ำชะล้างมูลฝอย ขณะที่สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในขยะมูลฝอยจะถูกย่อยสลายตามธรรมชาติโดยจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Decomposition)

<u>วิธีการฝังกลบขยะมูลฝอย</u>

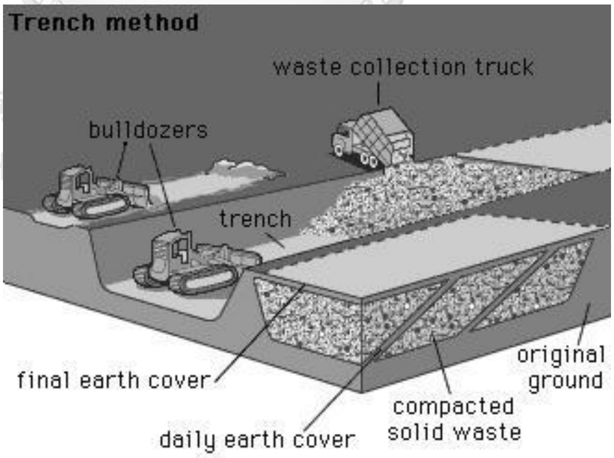
1) วิธีฝังกลบบนพื้นราบ (Area Method) เป็นวิธีฝังกลบที่เริ่มจากระดับดินเดิมโดยไม่มีการขุดดิน ทำการบดอัดขยะมูลฝอยตามแนวราบก่อน แล้วค่อยบดอัดทับในชั้นถัดไปจนได้ระดับที่กำหนด การฝังกลบขยะมูลฝอยโดยวิธีนี้จำเป็นต้องทำคันดิน (Embankment or Berm) ตามแนวขอบพื้นที่เพื่อทำหน้าที่เป็นผนัง และป้องกันน้ำเสียที่เกิดจากการย่อยสลายของขยะมูลฝอยไม่ให้ซึมออกด้านนอก ดังรูปที่ 2-7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 2-7 วิธีฝังกลบบนพื้นราบ (Area Method)
ที่มา: http://www.ben-harvey.org/UNHCR/WASH-Manual/Wiki/index.php/

2) วิธีฝังกลบแบบขุดร่อง (Trench Method) เป็นวิธีฝังกลบที่เริ่มจากระดับที่ต่ำกว่าระดับดินเดิม โดยทำการขุดดินลึกลงไปให้ได้ระดับตามที่กำหนดแล้วจึงเริ่มบดอัดมูลฝอยขึ้นไปให้เป็นชั้นๆ ซึ่งความลึกของการขุดขึ้นอยู่กับระดับน้ำใต้ดินในพื้นที่นั้นๆ การฝังกลบแบบขุดร่องไม่จำเป็นต้องทำคันดินเพราะสามารถใช้ผนังของร่องขุดเป็นกำแพงยันมูลฝอยที่จะบดอัดได้ ทำให้ไม่ต้องขนดินมาจากข้างนอกและยังสามารถใช้ดินที่ขุดออกแล้วนั้นกลับมากลบทับมูลฝอยได้อีก ดังรูปที่ 2-8



รูปที่ 2-8 วิธีฝังกลบแบบขุดร่อง (Trench Method)
ที่มา: http://www.ben-harvey.org/UNHCR/WASH-Manual/Wiki/index.php/

3) วิธีฝังกลบแบบหุบเขา (Canyon Method) เป็นวิธีฝังกลบพื้นที่ที่มีลักษณะเป็นแอ่งขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดขึ้นตามธรรมชาติ หรืออาจเกิดจากการขุด เช่น หุบเขา ห้วย บ่อ เหมือง ฯลฯ วิธีการในการฝังกลบและอัดขยะมูลฝอยในบ่อแต่ละแห่งอาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาพภูมิประเทศ

2.3.2 องค์ประกอบขยะในหลุมฝังกลบ

องค์ประกอบขยะของโลกในปี 2009 ประกอบด้วยขยะอินทรีย์ (เศษอาหาร ใบไม้ กิ่งไม้ ฯลฯ) กระดาษ โฟม/พลาสติก แก้ว และโลหะร้อยละ 46.0 17.0 10.0 5.0 และ 4.0 ตามลำดับ (World bank, 2012) เช่นเดียวกับองค์ประกอบขยะในประเทศไทยที่มีขยะอินทรีย์เป็นหลักอันมีเศษอาหารเป็นองค์ประกอบสำคัญ ข้อมูลจากโครงการสำรวจและวิเคราะห์องค์ประกอบขยะมูลฝอยชุมชนของเทศบาลทั่วประเทศเมื่อปี 2545 ที่จัดทำโดยกรมควบคุมมลพิษได้ทำการสำรวจข้อมูลของมูลฝอยชุมชน โดยพบว่าประกอบไปด้วย เศษอาหารหรือขยะอินทรีย์สารเป็นองค์ประกอบหลัก (กรมควบคุมมลพิษ, 2547) เช่นเดียวกับข้อมูลจากสถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ซึ่งสอดคล้องกับการสำรวจองค์ประกอบขยะที่สามารถจัดเก็บได้ในกรุงเทพมหานครของสำนักสิ่งแวดล้อมกรุงเทพมหานครที่ระบุว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่คือเศษอาหาร โฟม/พลาสติก และกระดาษที่ร้อยละ 42.10 27.31 และ 12.14 ตามลำดับ (สำนักสิ่งแวดล้อมกรุงเทพมหานคร, 2558) ดังแสดงตารางที่ 2-4

ขยะเศษอาหาร (Food waste) คืออาหารที่เหลือทิ้งจากการรับประทานหรือของเหลือจากการประกอบอาหารเป็นอินทรีย์วัตถุที่ย่อยสลายได้ง่ายมีความชื้นสูง และมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นไปในทิศทางเดียวกับการเติบโตทางเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของประชากร ซึ่งมีแหล่งที่มาจากโรงแรม ร้านอาหาร บ้านเรือน โรงอาหาร และบริษัทเป็นส่วนใหญ่ โดยขยะเศษอาหารถือเป็นสัดส่วนใหญ่ในองค์ประกอบมูลฝอยทั้งในประเทศที่พัฒนาแล้วและประเทศกำลังพัฒนา ดังแสดงในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-4 องค์ประกอบขยะมูลฝอย

องค์ประกอบ	ร้อยละ			
	ประเทศไทย[a]	ประเทศไทย[b]	กรุงเทพมหานคร[c]	ทั่วโลก[d]
• ขยะเศษอาหาร	64.31	37.00	42.10	46.00
• ใบไม้/กิ่งไม้		11.00	6.19	
• กระดาษ	8.19	3.00	12.14	17.00
• โฟม/พลาสติก	16.83	15.00	27.31	10.00
• แก้ว	3.47	2.00	3.42	5.00
• โลหะ	2.10	-	1.57	4.00
• หนัง/ยาง	0.50	7.00	1.12	-
• ผ้า/สิ่งทอ	1.37	8.00	4.16	-
• อื่นๆ	3.23	17.00	1.99	18.00
รวม	**100.00**	**100.00**	**100.00**	**100.00**

<u>*หมายเหตุ*</u> [a]*(กรมควบคุมมลพิษ, 2547)*

[b]*(ประชาชาติธุรกิจออนไลน์, 2557)*

[c]*(สำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร, 2558)*

[d]*(World bank, 2012)*

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 2-5 สัดส่วนขยะเศษอาหารในขยะมูลฝอยชุมชนในแต่ละประเทศ

ประเทศ	ฝรั่งเศส[a]	ญี่ปุ่น[a]	เกาหลีใต้[a]	อังกฤษ[a]	สิงคโปร์[a]	ลาว[b]	เวียดนาม[c]	กัมพูชา[d]
ร้อยละ	22.0	23.0	23.0	27.0	30.0	49.3	59.5	63.3

<u>*หมายเหตุ*</u> [a]*(Zhang และคณะ, 2014)*

[b]*(World bank, 2012)*

[c]*(URENCO, 2007)*

[d]*(JICA, 2005)*

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการในหลุมฝังกลบ

กระบวนการหลักที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบคือการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งต้องอาศัยจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างกรด (Acidogenic bacteria) และจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมปัจจัยต่างๆ เพื่อจะควบคุมให้ระบบมีประสิทธิภาพ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนดังกล่าวอาทิเช่น ค่าพีเอช อุณหภูมิ สารอาหาร สารยับยั้ง และความชื้น เป็นต้น

1) ค่าความเป็นกรด-ด่างหรือพีเอช (pH) ในสภาพปกติพีเอชจะอยู่ที่ 6.5 - 7.6 แต่พีเอชที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนควรอยู่ระหว่าง 7.0 - 7.2 (วิจารณ์ อินทรกำแหง, 2543) ทั้งนี้พีเอชถือปัจจัยตัวหนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในหลุมฝังกลบเนื่องจากในกระบวนการดังกล่าวมีกรดอินทรีย์เกิดขึ้นในระยะเกิดกรด ซึ่งเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนโดยอาจไปยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ทำให้ไม่สามารถผลิตมีเทนได้ ซึ่งเมื่อมีการทดสอบประสิทธิการผลิตแก๊สชีวภาพที่พีเอชต่างกันพบว่าที่พีเอชเท่ากับ 8 มีปริมาณแก๊สชีวภาพและสัดส่วนมีเทนมากที่สุด (Yang และคณะ, 2015) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Lee และคณะ (2009) ที่ระบุว่าช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตมีเทนมากที่สุดคือ 6.5 - 8.2 (Lee และคณะ, 2009)

2) อุณหภูมิ (Temperature) กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถส่วนใหญ่จะเกิดในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic) ประมาณ 30 – 38 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสูง (Thermophilic) ประมาณ 50 – 60 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับจุลินทรีย์แต่ละชนิดซึ่งจะไวต่ออุณหภูมิที่แตกต่างกัน (Ward และคณะ, 2008)

3) สารอาหาร (Nutrient) สารอาหารหลักที่จุลินทรีย์กลุ่มไม่ใช้ออกซิเจนต้องการคือ ไนโตรเจน (Nitrogen; N) ฟอสฟอรัส (Phosphorus; P) และสารอาหารรองอื่นๆที่ช่วยในการเจริญเติบโต เนื่องจากของเสียที่เข้าสู่ระบบมีสมบัติแตกต่างกันออกไปดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้เหมาะสมโดยการเติมอาหารเสริมลงไปให้เพียงพอกับความต้องการของจุลินทรีย์ (อาวาตีฟ มะแอ, 2553)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4) ความชื้น (Moisture) มีหน้าที่ส่งผ่านสารอาหารไปยังเซลล์และทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างจุลินทรีย์และสารตั้งต้น ความชื้นจึงถือว่ามีความสำคัญอย่างมากในกระบวนย่อยสลายในหลุมฝังกลบ สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าที่ทำการศึกษาผลการเวียนน้ำชะขยะร่วมกับการเติมน้ำต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนและการย่อยสลายขยะในหลุมฝังกลบเขตร้อน พบว่าในระบบที่มีการเวียนน้ำชะขยะร่วมกับการเติมน้ำเกิดแก๊สชีวภาพสะสมและอัตราการเกิดของแก๊สมีเทนมากกว่าอยู่ที่ 54.87 และ 0.58 ลิตรต่อกิโลกรัมน้ำแห้งขยะตามลำดับ รวมถึงใช้เวลาในการเข้าสู่ระยะสุดท้าย (Stabilization phase) น้อยที่สุด 180 วัน เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีการเวียนน้ำชะขยะ และระบบที่เวียนน้ำชะขยะเพียงอย่างเดียว (Sanphoti และคณะ, 2006) สำหรับปริมาณความชื้นต่ำสุดที่ต้องการเพื่อใช้ในการย่อยสลายอยู่ที่ร้อยละ 25 (อนรรฆ วิพลชัย, 2547)

5) ขนาด (Size) การลดขนาดเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้จุลินทรีย์สามารถสัมผัสกับสารตั้งต้นได้มากขึ้น ซึ่งหากมูลฝอยมีขนาดใหญ่นอกจากจะมีผลต่อการสัมผัสของจุลินทรีย์แล้วยังส่งผลให้ความชื้นไม่สามารถกระจายได้อย่างทั่วถึงอีกด้วย ซึ่งทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นช้าและไม่สมบูรณ์ (Yuen, 2001)

2.3.4 ตัวชี้วัดในหลุมฝังกลบ

2.3.4.1 น้ำชะขยะ *(Leachate)*

คุณภาพและปริมาณของน้ำชะขยะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยไม่ว่าจะเป็นชนิดของดิน องค์ประกอบขยะ การอัดแน่นของขยะ ปริมาณน้ำ ประเภทและอายุของหลุมฝังกลบ ซึ่งโดยปกติแล้วน้ำขยะชะขยะจะเกิดประมาณ 150 ลิตรต่อ 1 ตันขยะ (Agamuthu, 2001) องค์ประกอบน้ำชะขยะดังแสดงในตารางที่ 2-6

1) ค่าความเป็นกรด-ด่างหรือพีเอช (pH) เป็นตัวชี้วัดที่แสดงถึงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระยะต่างๆ ซึ่งค่าพีเอชของน้ำชะขยะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์และบัฟเฟอร์ ทั้งยังเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการควบคุมระบบเนื่องจากหากพีเอชต่ำเกินไปจะส่งผลต่อจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทนทำให้ระบบไม่สามารถเข้าสู่ระยะเกิดมีเทน (Methane fermentation phase) ได้

2) ค่าซีโอดี (COD) เป็นตัวแปรที่แสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำในรูปของปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ โดยเฉพาะกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นในระยะเกิดกรด (Acid formation phase)

3) ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) เป็นการแสดงถึงการมีอยู่ของกลุ่มคาร์บอเนตเช่น ไบคาร์บอเนต (HCO^{3-}) คาร์บอเนต (CO_3^{-2}) และ ไฮดรอกไซด์ (OH^{-}) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดระดับบัฟเฟอร์ของระบบเนื่องจากต้องป้องกันไม่ให้เกิดสภาพความเป็นกรดมากเกินไป

4) กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Fatty Acid; VFA) แสดงถึงปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยที่ละลายอยู่ในน้ำชะขยะ ซึ่งเกิดจากกระบวนการในระยะเกิดกรด (Acid formation phase) ของหลุมฝังกลบและเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง

5) การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น – รีดักชั่น (Oxidation-Reduction Potential, ORP) แสดงถึงสภาวะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นและรีดักชั่นโดยจะมีค่าเป็นบวกและลบตามลำดับ ซึ่งในสภาวะที่เกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยจุลินทรีย์ควรมีค่าเป็นลบ ทั้งนี้ค่าโออาร์พียังสามารถบ่งบอกถึงระยะต่างๆของหลุมฝังกลบกล่าวคือ ถ้าค่าอยู่ระหว่าง –50 ถึง -100 มิลลิโวลต์แสดงว่าอยู่ในระยะเปลี่ยนแปลงหรือระยะที่ 2 (Transition phase) ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะแก่การลดรูปซัลเฟตและไนเตรตไปเป็นแก๊สไนโตรเจนและไฮโดรเจน แต่ถ้าค่าอยู่ระหว่าง -150 ถึง -300 มิลลิโวลต์แสดงว่าอยู่ในระยะเกิดกรด (Acid formation phase) และระยะเกิดมีเทน (Methane fermentation phase) เนื่องจากจุลินทรีย์เปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน

ตารางที่ 2-6 องค์ประกอบและความเข้มข้นของน้ำชะขยะ (Tchobanoglous และคณะ, 1993)

องค์ประกอบ	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ช่วงค่าความเข้มข้น	ความเข้มข้นโดยทั่วไป
บีโอดี (BOD)	2,000 – 30,000	10,000
ทีโอซี (TOC)	1,500 – 20,000	6,000
ซีโอดี (COD)	3,000 – 45,000	18,000
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	200 – 1,000	500
อินทรีย์ไนโตรเจน	10 – 600	200
แอมโมเนีย	10 – 800	200
ไนเตรต	5 – 40	25
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	1 – 70	30
ออโธฟอสเฟต	1 – 50	20
สภาพความเป็นด่าง	1,000 – 10,000	3,000
พีเอช (ไม่มีหน่วย)	5.3 – 8.5	6
ค่าความกระด้าง	300 – 10,000	3,500
แคลเซียม	200 – 3,000	1,000
แมกนีเซียม	50 – 1,500	250
โพแทสเซียม	200 – 2,000	300
โซเดียม	200 – 2,000	500
คลอไรด์	100 – 3,000	500
ซัลเฟต	100 – 1,500	300
เหล็ก	50 – 600	60

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.3.4.2 แก๊สจากหลุมฝังกลบ *(Landfill gas)*

จากปฏิกิริยาย่อยสลายของจุลินทรีย์ในขยะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊ส ซึ่งอัตราการผลิตแก๊สดังกล่าวขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยอาทิเช่น องค์ประกอบขยะ อายุของขยะและหลุมฝังกลบ ความชื้น อุณหภูมิ สารอาหาร ปริมาณสารอินทรีย์ ค่าพีเอช ค่าความเป็นด่าง รวมถึงความเป็นพิษที่มีอยู่ในขยะนั้นๆ สำหรับปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นตามทฤษฎีจะอยู่ที่ 0.25 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมขยะอินทรีย์ซึ่งปริมาณมีเทนที่สามารถเกิดได้จริงจะอยู่ที่หนึ่งในสี่ของปริมาณมีเทนตามทฤษฎี ทั้งนี้การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนสามารถทำได้โดยการปรับปรุงปัจจัยในหลุมฝังกลบกล่าวคือ เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ คัดแยกสิ่งเป็นพิษหรือสิ่งอันตรายที่มีผลต่อการยับยั้งการย่อยสลาย เติมสารอาหารเสริม หรือการลดขนาดขยะมูลฝอย สำหรับปริมาณสารอินทรีย์สามารถเพิ่มได้โดยเติมตะกอนน้ำเสียและการกำจัดโลหะหนักออกจากมูลฝอยถือเป็นการลดความเป็นพิษในกระบวนการเกิดแก๊สในหลุมฝังกลบได้ (Agamuthu, 2001) โดยองค์ประกอบหลักของแก๊สจากหลุมฝังกลบประกอบด้วยมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์แสดงในตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 องค์ประกอบแก๊สจากหลุมฝังกลบ

องค์ประกอบ	**ร้อยละโดยปริมาตร**			
	(Agamuthu, 2001)[a]	(Tchobanoglous, และคณะ, 1993)	(Themelis และ Ulloa, 2007)[b]	(Rasi และคณะ, 2014)
มีเทน	63.8	45 – 60	50	54.2
คาร์บอนไดออกไซด์	33.6	40 – 60	45	42.1
ออกซิเจน	0.16	0.1 – 1.0	-	-
ไนโตรเจน	2.4	2 – 5	5	3.7
ไฮโดรเจน	0.05	0 – 0.2	-	-
คาร์บอนมอนอกไซด์	0.001	0 – 0.2	-	-
อื่นๆ	0.00005	0.01 – 1.0	-	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

[a] *อ้างอิงจาก DOE; U.S. Department of Energy อ้างอิงจาก Agamuthu P., 2001*

[b] *อ้างอิงจาก Energy Information Administration. US Department of Energy. Growth of the landfill gas industry, 1996*

2.3.5 ขั้นตอนการย่อยสลาย

กระบวนการที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบเกิดสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับถังปฏิกรณ์ทางชีวเคมี โดยเริ่มจากการที่มีขยะมูลฝอยและน้ำถูกใส่ไปในเป็นสารตั้งต้นจนเกิดการย่อยสลายทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สชีวภาพและน้ำชะขยะ ซึ่งกระบวนดังกล่าวภายในหลุมฝังกลบสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ระยะ (รูปที่ 2-9) ดังนี้

1) ระยะปรับตัว (Initial adjustment phase) เป็นระยะเริ่มแรกที่ขยะถูกฝังลงในหลุม โดยในระยะนี้จะประกอบด้วยแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนอันเป็นองค์ประกอบของอากาศเป็นหลัก แต่แก๊สดังกล่าวมีปริมาณลดลงเนื่องจากเกิดการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ภายในหลุมฝังกลบ สำหรับการย่อยสลายที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณเล็กน้อย

2) ระยะเปลี่ยนแปลง (Transition phase) เป็นระยะที่แก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนเริ่มหมด ทำให้การย่อยสลาย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเริ่มเกิดขึ้น โดยตัวรับอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนจากออกซิเจนไปเป็นไนเตรตและซัลเฟต ซึ่งเราสามารถตรวจสอบการเกิดสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนในระยะแรกได้จากการวัดค่าการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นรีดักชั่นหรือโออาร์พี (Oxidation-Reduction Potential, ORP) ของมูลฝอย ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวอยู่ที่ประมาณ -50 ถึง -100 มิลลิโวลต์ (อนรรฆ วิพลชัย, 2547)

3) ระยะเกิดกรด (Acid formation phase) เป็นระยะที่เกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนและจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เพิ่มมากขึ้น (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2558) โดยกระบวนการของจุลินทรีย์จะเริ่มตั้งแต่การเปลี่ยนสารโมเลกุลใหญ่ไปเล็ก (Hydrolysis) ตามด้วยการเปลี่ยนสารโมเลกุลเล็กให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Acidogenesis) สำหรับที่ระยะนี้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนจะลดลงจนหมด ซึ่งแก๊สที่เกิดขึ้นประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลักและมีเทนก็

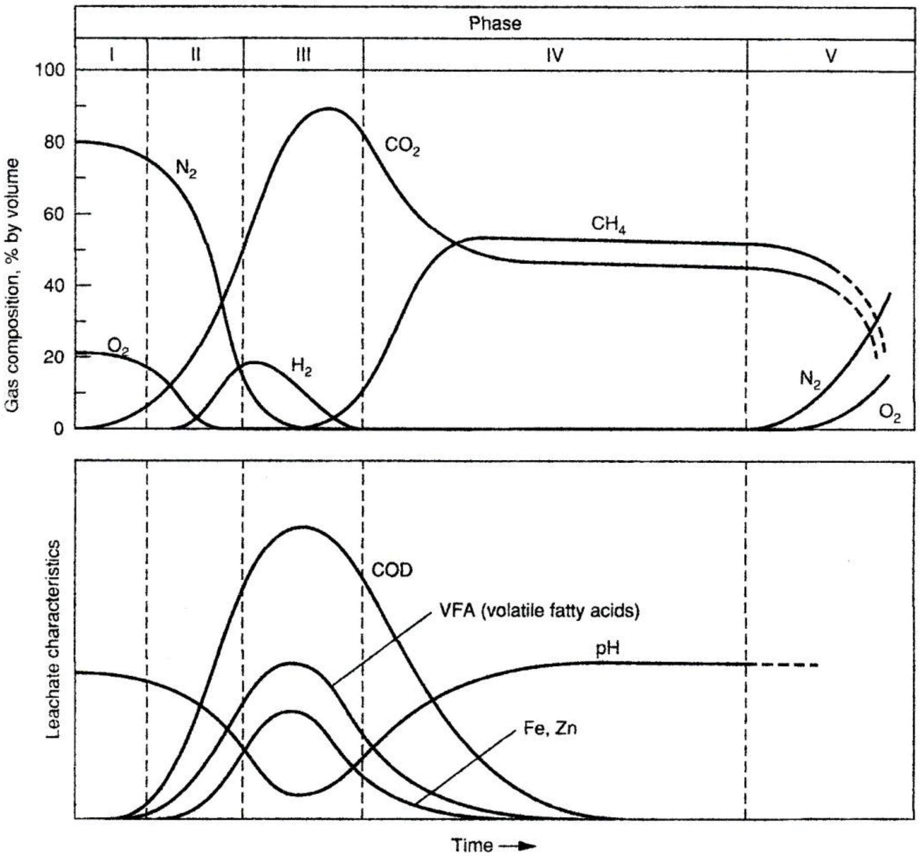
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เริ่มเกิดขึ้นเช่นกันแต่เกิดในปริมาณน้อยมากเนื่องจากเป็นระยะที่จุลินทรีย์กลุ่มไม่ผลิตมีเทน (Non-methanoginic) มีบทบาทมากกว่า ในระยะนี้มีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชลดต่ำลงกลายเป็นสภาวะที่เป็นกรดมีการผลิตกรดอินทรีย์เกิดขึ้น สอดคล้องกันกับค่าพีเอชของน้ำชะขยะที่ลดลง จากนั้นค่าซีโอดีและค่าการนำไฟฟ้าในน้ำชะขยะจะสูงขึ้นเนื่องจากเกิดการละลายของสารอาหารปะปนออกมานั่นเอง

4) ระยะเกิดมีเทน (Methane fermentation phase) เป็นระยะที่กรดอินทรีย์ถูกย่อยสลายกลายเป็นมีเทนโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทน (Methanogenic microorganism) ส่งผลให้แก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ในระยะนี้มีปริมาณมากขึ้น ในขณะเดียวกันปริมาณแก๊สลดลงจนหมดไปโดยบางส่วนกลายไปเป็นมีเทน ในระยะนี้มีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้นจนอยู่ในสภาวะที่เป็นกลางเนื่องจากกรดอินทรีย์ถูกย่อยสลายไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนมากขึ้นเช่นเดียวกันกับค่าพีเอชของน้ำชะขยะ นอกจากนั้นค่าซีโอดีและค่าการนำไฟฟ้าในน้ำชะขยะจะลดต่ำลงที่เพราะที่ค่าพีเอชสูงๆจะมีส่วนประกอบของสารอนินทรีย์หลงเหลืออยู่ในสารละลายเล็กน้อย

5) ระยะสุดท้าย (Final Maturation phase) เป็นระยะที่สารอาหารถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายจนหมด ซึ่งสามารถสังเกตได้จากปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนที่ลดต่ำลงเรื่อยๆจนไม่มีแก๊สดังกล่าวในที่สุดเช่นเดียวกับค่าซีโอดีในน้ำชะขยะที่ลดต่ำลงจนมีค่าเป็นศูนย์ ทั้งนี้จะเริ่มพบปริมาณแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2-9 องค์ประกอบแก๊สและสมบัติน้ำชะขยะในหลุมฝังกลบในแต่ละระยะการย่อยสลาย
ที่มา: (Tchobanoglous, Theisen และ Vigil, 1993)

2.4 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้งมักพบเป็นขยะปะปนอยู่ในหลุมฝังกลบเนื่องจากขยะประเภทนี้ส่วนใหญ่จะปนเปื้อนกับเศษอาหารจึงไม่นิยมนำมารีไซเคิล เมื่อพิจารณาถึงวัสดุที่นำมาผลิตภาชนะดังกล่าวพบว่าส่วนใหญ่ทำจากวัสดุจำพวกโฟมและกระดาษ ทั้งยังมีแนวโน้มจะพัฒนาไปเป็นพลาสติกชีวภาพในอนาคตส่งผลให้เกิดความหลากหลายขององค์ประกอบขยะมากขึ้น ดังนั้นเมื่อองค์ประกอบขยะในหลุมฝังกลบมีความหลากหลายมากขึ้นจึงจำเป็นต้องศึกษาผลของสภาวะในหลุมฝังกลบที่มีต่อวัสดุเพื่อหาสภาวะที่วัสดุชนิดนั้นๆสามารถย่อยสลายได้ดี และศึกษาผลของวัสดุที่มีต่อน้ำชะขยะ แก๊สชีวภาพ รวมถึงปริมาณขยะในหลุมฝังกลบเพื่อเป็นแนวทางในการจัดการและเลือกใช้ภาชนะดังกล่าว

เมื่อพิจารณาจากสภาวะในหลุมฝังกลบพบว่าช่วงแรกหลังการปิดหลุมเป็นระยะที่ยังมีออกซิเจนคงเหลืออยู่จุลินทรีย์ชนิดใช้ออกซิเจนทำหน้าที่ในการย่อยสลายขยะในหลุมฝังกลบได้ผลิตภัณฑ์เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) จากงานวิจัยของ สาธินีย์ ศิริวัฒน์ (2553) ที่ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายทางชีวภาพของบรรจุภัณฑ์จากวัสดุพอลิแลคติกแอสิดหรือพีแอลเอ (Polylactic acid, PLA) และบรรจุภัณฑ์จากเยื่อชานอ้อย ใช้เวลาทดสอบ 30 วันโดยมีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวชี้วัด พบว่าที่อุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียสและไม่มีการเติมยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนในดินมีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นสูงสุดสำหรับบรรจุภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิด เมื่อนำผลการศึกษาดังกล่าวมาขยายเวลาศึกษาเป็น 90 วัน โดยนำดินผสมกับวัสดุทดสอบที่อัตราส่วน 400 ต่อ 1 ใส่ในขวดแก้วขนาดแก้วขนาด 24 ออนซ์แล้วปิดฝาด้วยจุกยางที่เชื่อมต่อท่อเข้ากับเครื่องวัดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide analyzer) พบว่าปริมาณแก๊สเกิดขึ้นสูงสุดในวันที่ 45 แล้วลดลงในช่วงเวลาต่อมา นอกจากนี้ยังมีการใช้ตัวชี้วัดอื่นประกอบการศึกษาการย่อยสลายได้แก่ลักษณะทางกายภาพและน้ำหนักที่หายไป กล่าวคือวัสดุพีแอลเอเริ่มมีรอยแตกในวันที่ 30 เกิดพื้นผิวขรุขระเนื่องจากผิวหน้าหลุดออกในวันที่ 60 และไม่พบชิ้นวัสดุในวันที่ 90 ปริมาณน้ำหนักหายไปร้อยละ 100 ส่วนวัสดุชานอ้อยมีลักษณะเป็นเส้นใยเห็นได้ชัดเจนโดยพบว่าในวันที่ 30 เส้นใยถูกย่อยสลายบางส่วนแต่ยังเหลือส่วนที่สมบูรณ์อยู่ วันที่ 60 เส้นใยถูกย่อยสลายจนเกือบหมด และวันที่ 90 ไม่มีเส้นใยคงเหลืออยู่มีเพียงผิวเรียบของเยื่อบางๆเท่านั้น ปริมาณน้ำหนักหายไปร้อยละ 96 (สาธินี ศิริวัฒน์, 2553)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

นอกจากนี้ Pushpadass H. M. และคณะ (2010) ทำการศึกษาการย่อยสลายพอลิสไตรีนโฟมกันกระแทกผสมแป้ง (Starch-polystyrene loose-fill foams) ในสภาวะมีออกซิเจน ตัวอย่างทดสอบประกอบด้วยพอลิสไตรีนต่อแป้งที่อัตราส่วน 30 ต่อ 70 และ 20 ต่อ 80 ทำการทดลองภายใต้ปุ๋ยหมักที่มีการเติมอากาศในถังปฏิกรณ์เป็นเวลา 39 วันที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เติมอากาศที่อัตรา 80 มิลลิลิตรต่อนาที ใช้ตัวชี้วัดเป็นปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของตัวอย่างโดยวิเคราะห์ด้วย Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) พบว่าหมู่ฟังก์ชันของแป้งหายไปเนื่องจากเกิดการย่อยสลาย ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นสูงสุดในวันที่ 15 และลดลงหลังจากนั้น ซึ่งอัตราการเกิดและปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

ขึ้นอยู่กับปริมาณแป้งที่ผสมโดยปริมาณแป้งมากขึ้นส่งผลให้อัตราและปริมาณแก๊สมากขึ้นตามไปด้วย (Pushpadass และคณะ, 2010)

หลังจากออกซิเจนถูกใช้จนหมดหลุมฝังกลบจะเริ่มเข้าสู่สภาวะไร้ออกซิเจนซึ่งจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจนจะทำหน้าที่ย่อยสลายขยะได้เป็นแก๊สมีเทน (CH_4) และคาร์บอนไดออกไซด์ งานวิจัยของ นาวิน เนสุสินธ์ (2554) ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายทางชีวภาพเพื่อประเมินความสามารถในการย่อยสลายของพลาสติกชีวภาพ 2 ชนิดคือพอลิแลคติกแอสิดหรือพีแอลเอ (Poly Lactic Acid, PLA) และพอลิบิวทิลีนอะดิเพตเทเรฟทาเลตหรือพีบีเอที (Polybutylene adipate terephthalate, PBAT) ด้วยดินจากบ่อฝังกลบขยะผสมกากตะกอนที่อัตราส่วนต่างๆภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมคือผสมดินกับกากตะกอนที่อัตราส่วน 70 ต่อ 30 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และเติมน้ำ 45 ใช้ปริมาณน้ำหนักที่หายไปของวัสดุและแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นตัวชี้วัดการย่อยสลายประกอบกับวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของพลาสติกชีวภาพภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยพบว่าน้ำหนักของพีแอลเอลดลงร้อยละ 2 8 57 และ 67 ส่วนน้ำหนักของพีบีเอทีลดลงร้อยละ 3 5 6 และ 7 ในวันที่ 15 30 45 และ 60 ตามลำดับ ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมในวันที่ 60 ของพีแอลเอและพีบีเอทีอยู่ที่ 760 และ 500 มิลลิลิตร ตามลำดับ (นาวิน เนสุสินธุ์, 2554)

การศึกษาการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถนำมาตรฐาน ASTM D5526-94 (Standard Test Method for Determining Anaerobic Biodegradation of Plastic Materials Under Accelerated Landfill Conditions) มาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยได้โดยในงานของ Mohee และคณะ (2008) ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุพลาสติกภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ตัวอย่างที่ทำการศึกษาเป็นพลาสติกอีพีไอ (Environmental Product Inc., EPI) และพลาสติกเอ็มบี (Mater-Bi, MB) และมีกระดาษกรองเซลลูโลสเป็นชุดควบคุม ใช้ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากการแทนที่ของน้ำเป็นตัวชี้วัด ผลปรากฏว่าอัตราการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุดของกระดาษกรองเซลลูโลสและพลาสติกเอ็มบีเกิดขึ้นในวันที่ 17 ปริมาตร 220.8 และ 160.5 มิลลิลิตรตามลำดับ สำหรับแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์สะสมมีค่าอยู่ที่ 246.8 245 มิลลิลิตรและ 4.406 2.198 ลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ส่วนในพลาสติกอีพีไอไม่พบแก๊สมีเทนเกิดขึ้น (Mohee และคณะ, 2008) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Kolstad และคณะ (2012) ประเมินการย่อยสลายทางชีวภาพภายใต้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สภาวะหลุมฝังกลบแบบเร่งของพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอสิดหรือพีแอลเอ (Poly Lactic Acid, PLA) ภายใต้ขยะจากสวน ผัก และผลไม้ เนื่องจากเป็นขยะที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดีในกลุ่มขยะชุมชน จากการทดลองพบว่าอัตราการเกิดแก๊สชีวภาพสูงสุดในตัวอย่างเท่ากับ 433.4 66.3 และ 586.5 ลิตรต่อกิโลกรัมตัวอย่าง ปริมาณแก๊สมีเทนเท่ากับ 157 37 และ 331 ลิตรต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งตัวอย่าง ที่ความชื้นขยะเป็นร้อยละ 49 55 และ 65 ตามลำดับ (Kolstad และคณะ, 2012)

นอกจากนี้ยังสามารถทดสอบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนด้วยเทคนิคบีเอ็มพี (BMP; Biochemical Methane Potential) โดยใช้แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นนตัวชี้วัดอีกด้วย (Stinson และ Ham, 1995)งานวิจัยของ Pommier S. และคณะ (2010) ทำการศึกษาผลของขนาดต่อการย่อยสลายกระดาษชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนของตัวอย่างกระดาษสำนักงาน (Office paper) กระดาษหนังสือพิมพ์ (Newspaper) กล่องกระดาษลูกฟูก (corrugated carton) กระดาษแข็ง (Cardboard) และนิตยสาร (Magazine) พบว่าปริมาณแก๊สมีเทนที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกันในตัวอย่างทุกขนาด จึงสามารถสรุปได้ว่าขนาดไม่มีผลประสิทธิภาพการเกิดแก๊สมีเทน (Pommier, Llamas และ Lefebvre, 2010) เช่นเดียวการทดสอบการย่อยสลายพลาสติกชีวภาพชนิด Thermoplastic starch: Polyvinyl alcohol blends (TPS:PVOH) ที่อัตราส่วน 90 ต่อ 10 75 ต่อ 25 50 ต่อ 50 และ 0 ต่อ 100 พบว่าเมื่ออัตราส่วนแป้งในพลาสติกเพิ่มขึ้นการย่อยสลายก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยใช้แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัวอย่าง และ Extent of Solubilisation เป็นตัวชี้วัด (Russo และคณะ, 2009) รวมถึงงานวิจัยของ Cho และคณะ (2011) ที่ทำการศึกษาความสามารถและอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของพลาสติกพีบีเอส (PBS; Poly(butylene succinate)) และพีซีแอลสตาร์ช (PCL-starch; Poly(caprolactone)-starch blend) ด้วยวิธีทดสอบบีเอ็มพีที่อาศัยการประสิทธิภาพการเกิดแก๊สมีเทนหรือแก๊สชีวภาพจากอินทรีย์วัตถุเป็นตัวชี้วัดการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน พบว่าพลาสติกพีซีแอลสตาร์ชและพลาสติกพีบีเอสที่มีการย่อยสลายทางชีวภาพ (% Biodegradation) ร้อยละ 83 และ 2 สามารถผลิตมีเทนได้ 544 และ 11 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวของพลาสติกที่เกิดขึ้นเมื่อวิเคราะห์ด้วย Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) (Cho และคณะ, 2011)

สำหรับการศึกษาผลการย่อยสลายของขยะในหลุมฝังกลบจะดำเนินการโดยถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ ซึ่งมีการออกแบบด้านบนของถังปฏิกรณ์มีการติดตั้งท่อเวียนน้ำชะขยะ จุดเก็บตัวอย่างแก๊สและท่อวัดปริมาณแก๊สโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำด้วยแก๊ส ภายในถังประกอบด้วยขยะอินทรีย์และหัวเชื้อจุลินทรีย์ แต่มีการเพิ่มในส่วนของวัสดุที่ต้องการทดสอบการย่อยสลายผสมกับขยะและเชื้อด้วยงานวิจัยของพิพัฒน์ ธีระจักร (2553) จำลองถังปฏิกรณ์เพื่อศึกษากระบวนการเวียนน้ำชะขยะในระบบการย่อยสลายขยะอินทรีย์แบบไร้อากาศ ภายในถังประกอบด้วยขยะอินทรีย์ 2.5 กิโลกรัมผสมกับตะกอนจุลินทรีย์ชนิดไม่ต้องการออกซิเจนปริมาณ 0.20 ลิตร ดำเนินการทดลองเป็นเวลา 160 วัน พบว่าปริมาณแก๊สชีวภาพและมีเทนสูงสุดเท่ากับ 11,170 มิลลิลิตรในถังที่การเวียนน้ำชะขยะรายวัน 9,800 มิลลิกรัมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อวัน ค่าซีโอของน้ำชะขยะลดลงจาก 64,736 เป็น 28,000 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อสิ้นสุดการทดลอง (พิพัฒน์ ธีระจักร, 2553) เช่นเดียวกับงานวิจัยก่อนหน้าของ Sanphoti N. และคณะ (2006) ที่ทำการศึกษาผลของการเวียนน้ำชะขยะและการเติมน้ำเพิ่มต่อการผลิตแก๊สมีเทนและการย่อยสลายขยะในหลุมฝังกลบชุมชน พบว่าถังที่มีการเวียนน้ำชะขยะและเติมน้ำเพิ่มมีปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ 54.871 ลิตรต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งขยะและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุดเป็น 0.58 ลิตรต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งขยะต่อวัน ซึ่งมากกว่าถังไม่มีการเวียนน้ำชะขยะ สำหรับระยะเวลาในการเข้าสู่ระยะเสถียร (Stabilization phase) พบว่าใช้เวลาน้อยที่สุดอยู่ที่ 180 วันตามสามารถกำจัดซีโอดีได้ถึงร้อยละ 90 (Sanphoti และคณะ, 2006)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 3
แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

การศึกษางานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ สถานที่ทำการทดลองคือ ห้องปฏิบัติการวิจัยและบัณฑิตภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย อาคารปฏิบัติการรวม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 แผนงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการย่อยสลายของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้งในสภาวะมีและไม่มีออกซิเจนซึ่งเป็นสภาวะที่เกิดขึ้นในหลุมฝังกลบ ตัวอย่างที่นำมาทดลองประกอบด้วยวัสดุ 3 ประเภทได้แก่ วัสดุกระดาษ (Paper) วัสดุพอลิสไตรีนโฟม (Polystyrene foam) และวัสดุพลาสติกชีวภาพชนิดพอลิแลคติกแอสิดหรือพีแอลเอ (Polylactic acid, PLA) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 การทดลอง ดังนี้ (แสดงในรูปที่ 3-1)

การทดลองที่ 1 ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุก่อนย่อยสลายเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานประกอบการทำงานวิจัย วิเคราะห์ และสรุปผลการทดลอง

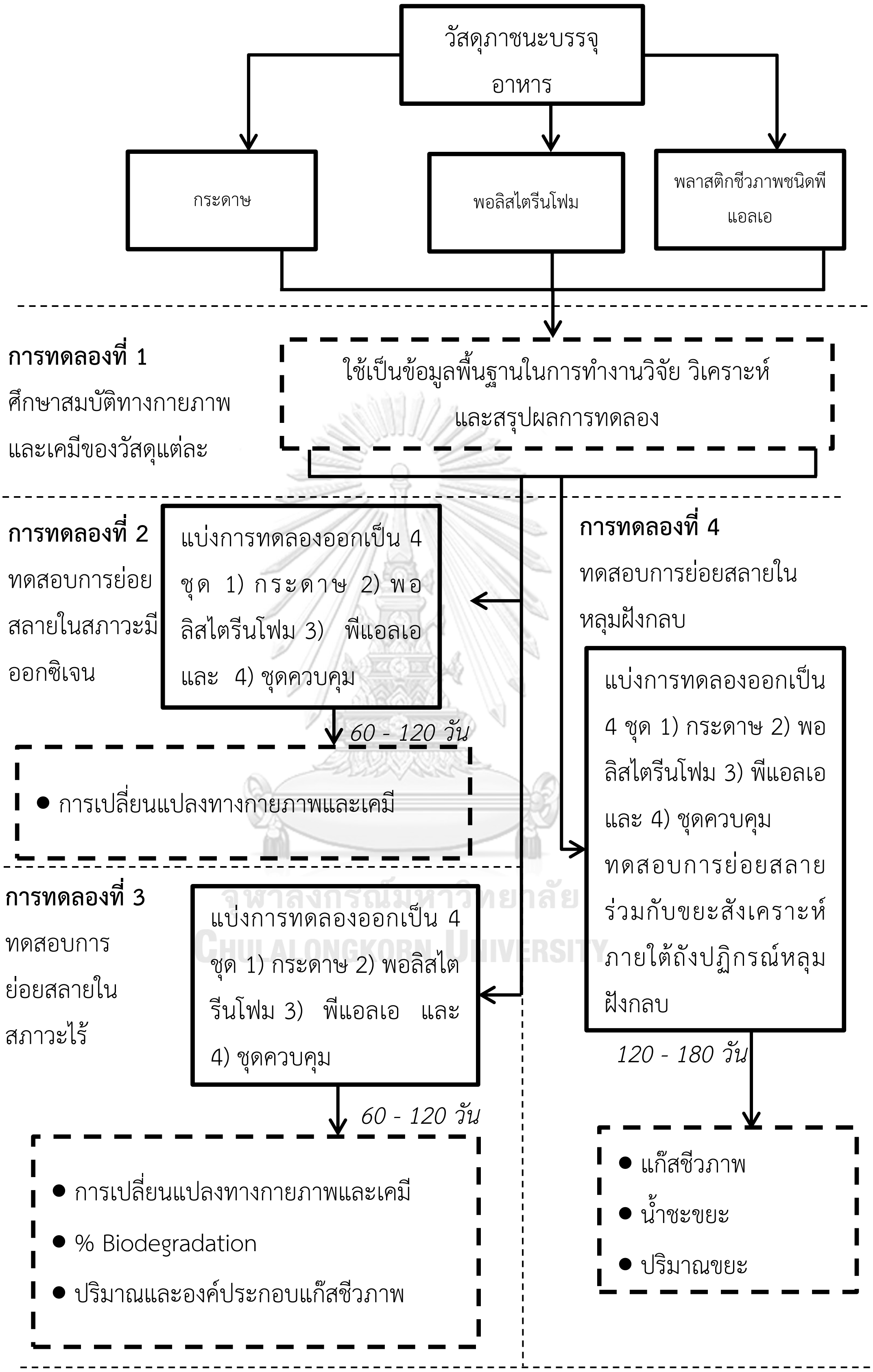
การทดลองที่ 2 ทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการโดยทำการย่อยสลายวัสดุแต่ละชนิดในของเสียสังเคราะห์ เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่เกิดขึ้นในสภาวะมีออกซิเจน โดยเปรียบเทียบวัสดุก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลาย สำหรับสมบัติทางกายรูปที่ทำการศึกษาประกอบด้วยลักษณะพื้นผิววัสดุ (Surface) และร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (% Weight loss) หมู่ฟังก์ชันของสารในองค์ประกอบของวัสดุ (Functional group) และปริมาณคาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) และไนโตรเจน (Nitrogen) ของวัสดุ

การทดลองที่ 3 ทดสอบการย่อยสลายของวัสดุในสภาวะไร้ออกซิเจน ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการโดยทำการย่อยสลายวัสดุแต่ละชนิดในของเสียสังเคราะห์ที่มีการไล่แก๊สออกซิเจนด้วยแก๊สไนโตรเจน เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่เกิดขึ้นในสภาวะ

ไร้ออกซิเจน สำหรับสมบัติทางกายภาพที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ลักษณะพื้นผิววัสดุ (Surface) และร้อยละของน้ำหนักที่หายไป (% Weight loss) หมู่ฟังก์ชันของสารในองค์ประกอบของวัสดุ (Functional group) และปริมาณคาร์บอน (Carbon) ไฮโดรเจน (Hydrogen) และไนโตรเจน (Nitrogen) ของวัสดุ นอกจากนี้ทำการศึกษาร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพ (% Biodegradation) รวมถึงปริมาณและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วย

การทดลองที่ 4 ทดลองการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ (Landfill reactor) ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทดสอบผลการย่อยสลายของวัสดุแต่ละชนิดในหลุมฝังกลบต่อปริมาณขยะ รวมทั้งปริมาณและองค์ประกอบแก๊สและน้ำชะขยะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3-1 แผนผังแนวทางการดำเนินงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.2.1 สารเคมี

3.2.1.1 ซีโอดี (Chemical oxygen demand; COD)

1) โปแตสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$)

2) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)

3) เมอคิวริกซัลเฟต ($HgSO_4$)

4) ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4)

5) 1,10-ฟีแนนโทรลีนโมโนไฮเดรต ($C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$)

6) เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)

7) เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$)

3.2.1.2 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid; VFA) และความเป็นด่าง (Alkalinity)

1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

2) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)

3.2.1.3 แอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia Nitrogen)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

2) โซเดียมเตตระบอเรต ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$)

3) กรดบอริค (H_3BO_3)

4) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)

3.2.1.4 ฟอสเฟต (Phosphate)

1) กรดไนตริก (HNO_3)

2) กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)

3) ฟีนอล์ฟธาลีน ($C_{20}H_{14}O_4$)

4) เอทธานอล (C_2H_5OH)

5) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

6) กรดไฮโดรคลอริก (HCl)

7) แอมโมเนียมโมลิบเดท ($(NH_4)6Mo_7O_{24}•4H_2O$)

8) แอมโมเนียมเมตะวานาเดต (NH_4VO_3)

9) โปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)

3.2.2 วัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือวิเคราะห์

3.2.2.1 ความเป็นกรด – ด่าง หรือพีเอช (pH)

พีเอชมิเตอร์ (pH meter)

3.2.2.2 ความต่างศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชัน (ORP)

โออาร์พีมิเตอร์ (ORP meter)

3.2.2.3 ของแข็งทั้งหมด (Total Solids) และของแข็งระเหย (Volatile Solids)

1) ชามระเหย (Evaporating dish)

2) โถดูดความชื้น (Desiccator)

3) ตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่ 103-105 องศาเซลเซียส (Dry oven)

4) เครื่องชั่งดิจิตอล 4 ตำแหน่ง (Analytical balance)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5) เตาเผาควบคุมอุณหภูมิที่ 550±50 องศาเซลเซียส (Furnace)

3.2.2.4 ทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน

1) กระป๋องพลาสติก

2) ถุงตาข่าย

3) สายยางขนาดเล็ก

4) ชุดเติมอากาศ

5) ถุงตาข่ายสำหรับบรรจุตัวอย่าง

3.2.2.5 ทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน

1) ขวดเซรั่มขนาด 125 มิลลิลิตร

2) จุกยางพร้อมฝาอะลูมิเนียม

3) ก๊าซไนโตรเจนความเข้มข้นร้อยละ 99.99

4) ชุดวัดปริมาณก๊าซ

5) ถุงตาข่ายสำหรับบรรจุตัวอย่าง

3.2.2.6 ทดสอบการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

1) ถังปฏิกรณ์ทำจากท่อพีวี

2) ชุดวัดปริมาณก๊าซ

3) ถุงเก็บก๊าซ

4) หินกรวด

5) ถุงตาข่ายสำหรับบรรจุตัวอย่าง

3.2.2.7 ลักษณะพื้นที่ผิว (Surface)

1) กล้องกำลังขยายสูง ยี่ห้อ Dino – Lite Digital Microscope

2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM) ยี่ห้อ HITACHI SU3500

3.2.2.8 ปริมาณคาร์บอน (Carbon content)

Elemental analyzer รุ่น LECO CHN628 Series

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.2.2.9 หมู่ฟังก์ชันของสาร (Functional group)

Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR) รุ่น Perkin Elmer, Spectrum One

3.2.2.10 ปริมาณลิกนิน (Lignin content) ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 222 om-15

3.2.2.11 ปริมาณโฮโลเซลลูโลส ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI Section

3.2.2.12 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (Gas compositions)

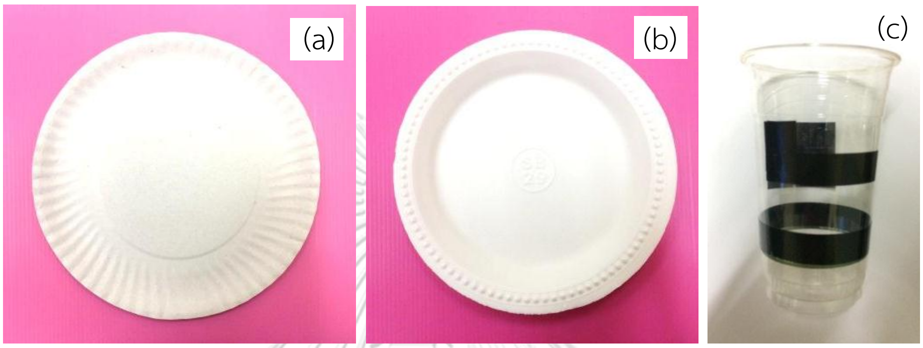
Gas Chromatograph รุ่น GC - 2010

3.3 วัสดุที่ใช้ทำการศึกษา

3.3.1 จานกระดาษ (Paper) (รูปที่ 3-2a)

3.3.2 จานพอลิสไตรีนโฟม (Polystyrene foam) (รูปที่ 3-2b)

3.3.3 แก้วน้ำพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอ (Poly Lactic Acid; PLA) (รูปที่ 3-2c)



รูปที่ 3-2 (a) จานกระดาษ (b) จานพอลิสไตรีนโฟม และ (c) แก้วน้ำพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอ

3.4 หัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองเป็นหัวเชื้อจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศจากบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) โรงงานปทุมธานี รูปที่ 3-3 โดยนำมาวิเคราะห์สมบัติดังพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3-1

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3-3 หัวเชื้อจุลินทรีย์

ตารางที่ 3-1 วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติหัวเชื้อจุลินทรีย์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids; TS)	Standard Method #2540B (APHA, 2006)
ของแข็งระเหย (Volatile Solids; VS)	Standard Method #2540E (APHA, 2006)
พีเอช (pH)	Electronic pH meter
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP)	Electronic ORP Meter

3.5 ขยะสังเคราะห์ **(Synthetic waste)**

ขยะสังเคราะห์เป็นขยะประเภทเศษอาหาร (Food waste) ประกอบด้วยข้าวและเส้นก๋วยเตี๋ยวร้อยละ 54.3 ผักและผลไม้ร้อยละ 23.1 เนื้อสัตว์ร้อยละ 13.1 และอื่นๆร้อยละ 9.5 ดังรูปที่ 3-4 และตารางที่ 3-2 (ศูนย์การเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล, 2557)

รูปที่ 3-4 ขยะสังเคราะห์

ตารางที่ 3-2 องค์ประกอบขยะสังเคราะห์ (ศูนย์การเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล, 2557)

อาหาร	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ข้าวและเส้นก๋วยเตี๋ยว	**54.3**
• ข้าวเจ้าหุงสุก	27.15
• เส้นก๋วยเตี๋ยวเส้น	27.15
ผักและผลไม้	**23**
• ผักบุ้งจีน	5.75
• ผักกาดหอม	5.75
• กล้วย	5.75
• ส้ม	5.75
เนื้อสัตว์	**13.1**
• เนื้อหมู	6.55
• เนื้อไก่	6.55
ส่วนที่รับประทานไม่ได้	**9.5**
รวม	100

3.6 การเตรียมชุดการทดลองในการทดลองที่ 2 ทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน

Chulalongkorn University

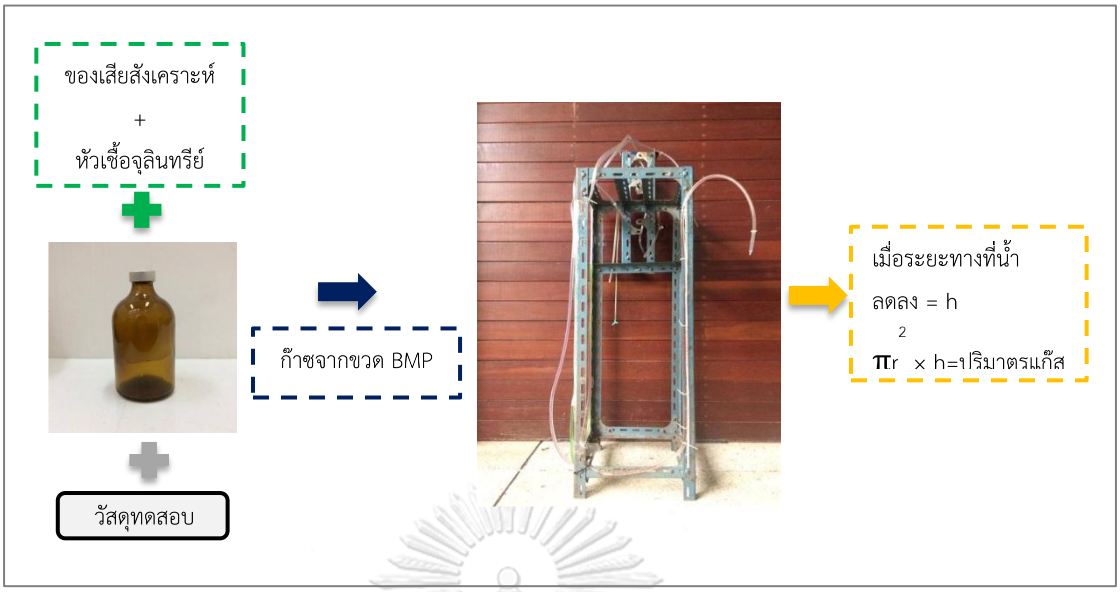
นำของเสียสังเคราะห์ใส่ในภาชนะกระป๋องพลาสติกจำนวนสามกระป๋องต่อ 1 ชุดการทดลอง จากนั้นเจาะรูด้านบนของฝากระป๋องจำนวน 2 รูเพื่อให้เป็นช่องอากาศเข้าและออก สำหรับชุดเติมอากาศประกอบด้วย สายยาง หัวฟู่ ปั๊มเติมอากาศ และขวดรูปชมพู่บรรจุน้ำ จากนั้นประกอบชุดเติมอากาศเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3-5

รูปที่ 3-5 ชุดทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน

3.7 การเตรียมชุดการทดลองในการทดลองที่ 3 ทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน

การเตรียมชุดการทดลองในการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ขวดสีชาสำหรับทดสอบการย่อยสลาย โดยนำของเสียสังเคราะห์ปริมาณ กรัม หัวเชื้อจุลินทรีย์ปริมาณ กรัม และสารอาหาร มิลลิลิตร อีกส่วนหนึ่งคือการเตรียมชุดวัดปริมาณก๊าซชีวภาพโดยนำสายวัดที่มีสเกลบอกชัดเจนติดเข้ากับเหล็กฉาก จากนั้นนำสายยางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในขนาด 4 มิลลิลิตร ติดบนสายวัดโดยทำสายเป็นรูปตัวยูไปยังอีกด้านของเหล็กฉากเพื่อป้องกันน้ำไหลออก แล้วบรรบรรจุน้ำที่มีการปรับพีเอชให้ต่ำกว่า 3 ด้วย 20% Na_2SO_4 ใน 5% H_2SO_4 ลงในสายยาง ดังแสดงในรูปที่ 3-6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

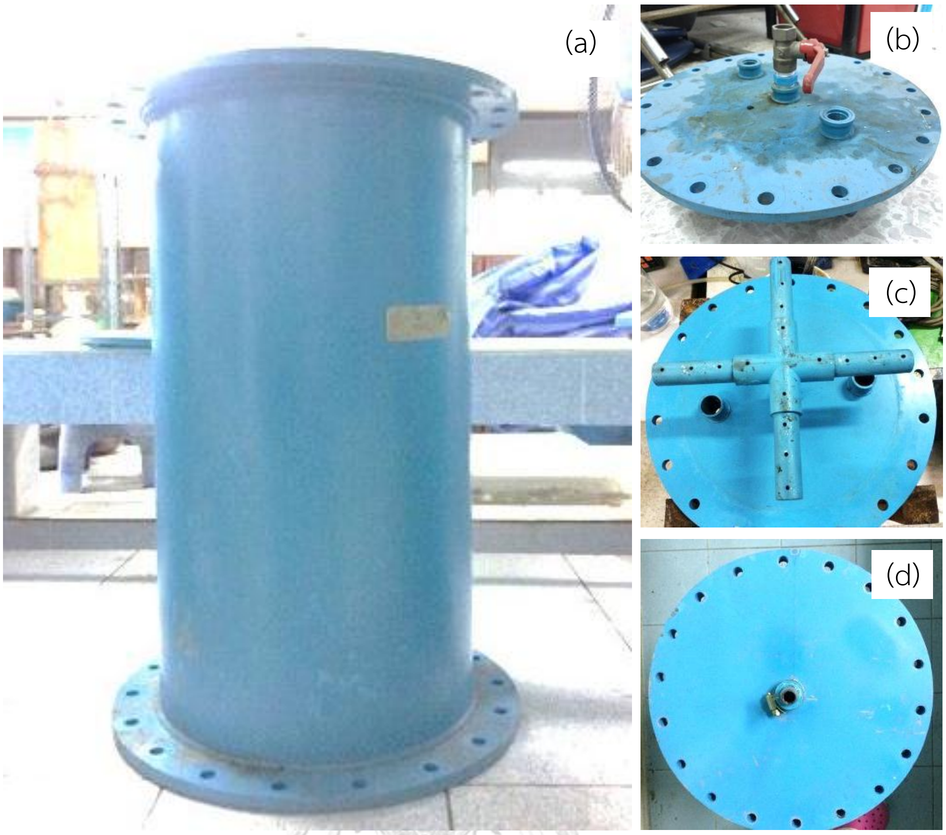


รูปที่ 3-6 ชุดการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน

3.8 การเตรียมชุดการทดลองที่ 4 ทดสอบการย่อยสลายของวัสดุในหลุมฝังกลบ

3.8.1 เตรียมถังปฏิกรณ์

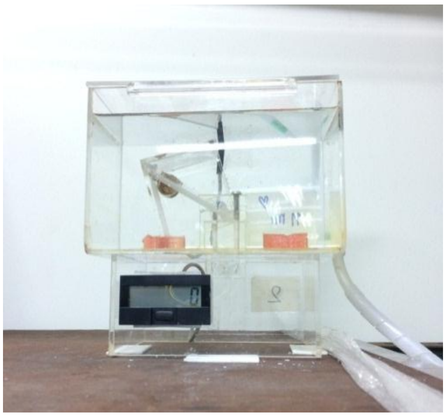
ถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบทำจากท่อพีวีซีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.25 เมตร สูง 0.50 เมตร ปริมาตรถัง 24.5 ลิตร บริเวณฝาติดตั้งท่อจำนวน 3 จุด ทำหน้าที่วัดปริมาณแก๊สชีวภาพ เวียนน้ำชะขยะ และเก็บตัวอย่างแก๊สชีวภาพ โดยช่องที่ใช้เวียนน้ำชะขยะต้องทำการติดตั้งระบบกระจายน้ำชะขยะด้วย และมีท่อระบายน้ำชะขยะบริเวณด้านล่างของถังปฏิกรณ์ รูปที่ 3-7 ภายในถังใช้ตระแกรงพลาสติกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางรูตาข่าย 1.0 เซนติเมตร ปิดตรงทางออกน้ำชะขยะ ปิดทับด้วยกรวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 เซนติเมตร เพื่อป้องการอุดตันการไหลของน้ำชะ



รูปที่ 3-7 ถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ (a) ตัวถัง (b) ด้านบนของถัง (c) ท่อกระจายน้ำ และ (d) ช่องทางออกน้ำชะขยะ

3.8.2 เตรียมชุดวัดปริมาณก๊าซ

การวัดปริมาณก๊าซชีวภาพวัดโดยใช้ก๊าซเคาท์เตอร์ (Gas counter) ซึ่งภายในบรรจุน้ำกลั่นที่ปรับพีเอชให้ต่ำกว่า 3 ด้วย 20% Na_2SO_4 ใน 5% H_2SO_4 ดังรูปที่ 3-8 โดยอาศัยการที่อากาศดันเข้าไปในก๊าซเคาท์เตอร์จนถึงปริมาตรของกล่องภายในแล้วกล่องก็จะพลิกทำให้แม่เหล็กผ่านเซ็นเซอร์ ซึ่งจำนวนครั้งที่เซ็นเซอร์นับได้จะถูกนำมาคำนวณหาปริมาตรแก๊สอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 3-8 แก๊สเคาท์เตอร์ (Gas counter)

3.9 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.9.1 สมบัติของหัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนำมาวิเคราะห์สมบัติต่างๆได้แก่ ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย พีเอช และความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน ตามตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3-3 วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติหัวเชื้อจุลินทรีย์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids; TS)	Standard Method #2540B (APHA, 2006)
ของแข็งระเหย (Volatile Solids; VS)	Standard Method #2540E (APHA, 2006)
พีเอช (pH)	Electronic pH meter
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP)	Electronic ORP Meter

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.9.2 สมบัติของขยะสังเคราะห์

ขยะสังเคราะห์ทำการวิเคราะห์ความชื้น (Moisture content) และปริมาณของแข็งระเหย (Volatile solid; VS) ของขยะสังเคราะห์หลังผสม ตามตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติของขยะสังเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids; TS)	Standard Method #2540B (APHA, 2006)
ของแข็งระเหย (Volatile Solids; VS)	Standard Method #2540E (APHA, 2006)

3.9.3 การทดลองที่ 1 วิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของวัสดุจะทำการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิว (Surface) และวิเคราะห์สมบัติทางเคมีได้แก่ ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS) ความชื้น (Moisture) ของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS) เถ้า (Liu และคณะ) ปริมาณคาร์บอน (Carbon content) และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ของสาร (Functional group) ในวัสดุโฟมและพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอ ดังแสดงในตารางที่ 3-5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3-5 วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ

วัสดุ	สมบัติทางกายภาพ/เคมี	วิธี/เครื่องมือวิเคราะห์
วัสดุทุกชนิด	ลักษณะพื้นที่ผิว	Scanning Electron Microscopy (SEM)
	ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	Standard Method #2540B (APHA, 2006)
	ความชื้น (Moisture)	Standard Method #2540B (APHA, 2006)
	ของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS)	Standard Method #2540E (APHA, 2006)
	เถ้า (Liu และคณะ)	Standard Method #2540E (APHA, 2006)
	ปริมาณคาร์บอน (Carbon content)	Elemental analyzer
โฟมและพลาสติกชีวภาพ	โครงสร้างทางเคมี (Chemical structure)	Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.9.4 การทดลองที่ 2 ทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุที่เกิดจากการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลองประกอบด้วยวัสดุ 3 ประเภทได้แก่ วัสดุกระดาษ วัสดุพอลิสไตรีนโฟม วัสดุพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอ และชุดควบคุมซึ่งมีเพียงของเสียสังเคราะห์เท่านั้น กำหนดระยะเวลาในการทดลอง 90 วัน (รูปที่ 3-9) ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-7

1) เตรียมตัวอย่างให้มีขนาดเท่ากับ 2×2 เซนติเมตร บรรจุใส่ถุงตาข่ายขนาดรู 1 มิลลิเมตร ที่ทำจากวัสดุไฟเบอร์กลาส จำนวน 36 ชิ้นต่อชุดการการทดลอง (3 ซ้ำต่อวัสดุแต่ละชนิด) แล้วบันทึกน้ำหนัก (น้ำหนักก่อนการทดลอง)

2) นำถุงตาข่ายที่มีการบรรจุตัวอย่างแล้ว ใส่ลงในของเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้ตามตำแหน่งและประกอบรวมกับชุดเติมอากาศ

3) วิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไประหว่างการย่อยสลาย โดยถุงตาข่ายมาแกว่งล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วทิ้งให้แห้งในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (น้ำหนักหลังการทดลอง)

4) คำนวณหาน้ำหนักที่หายไป (% Weight loss) จากสมการที่ (3-1)

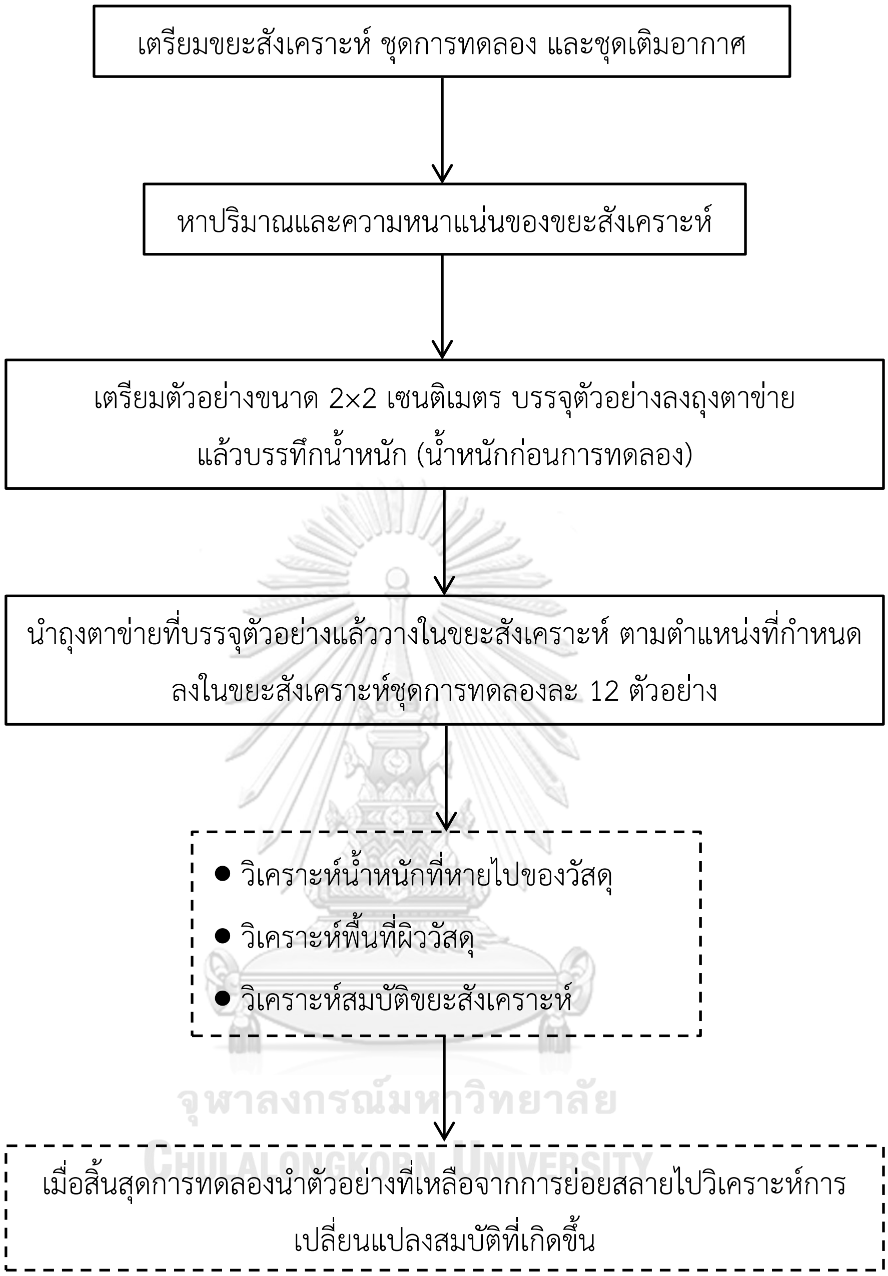
$$\%\ \text{Weight loss} = \frac{A - B}{A} \times 100 \qquad (3\text{-}1)$$

เมื่อ A = น้ำหนักก่อนการทดลอง

B = น้ำหนักหลังการทดลอง

5) เมื่อสิ้นสุดการทดลองวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างที่เหลือจากการย่อยสลายและสมบัติขยะสังเคราะห์ ดังตารางที่ 3-6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3-9 การทดลองที่ 2 การย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน

ตารางที่ 3-6 ตัวชี้วัดและความถี่ที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลองที่ 2

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง		
ตัวชี้วัด	**วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์**	**ความถี่ในการวิเคราะห์**
น้ำหนักที่หายไป	(Ishigaki และคณะ, 1999)	1 ครั้ง/สัปดาห์
ลักษณะพื้นที่ผิว	Scanning Electron Microscopy (SEM)	เริ่มและสิ้นสุดการทดลอง
ปริมาณคาร์บอน	CHN analyzer	เริ่มและสิ้นสุดการทดลอง
ปริมาณลิกนิน	TAPPI T 222 om-15	เริ่มและสิ้นสุดการทดลอง
ปริมาณโฮโลเซลลูโลส	TAPPI section	เริ่มและสิ้นสุดการทดลอง
โครงสร้างทางเคมี	Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)	เริ่มและสิ้นสุดการทดลอง
วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของขยะสังเคราะห์		
ตัวชี้วัด	**วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์**	**ความถี่ในการวิเคราะห์**
พีเอช	Electronic pH meter	1 ครั้ง/วัน
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน	Electronic ORP Meter	1 ครั้ง/วัน
ซีโอดี	Standard Method#5220C	1 ครั้ง/สัปดาห์
ความเป็นด่าง	Standard Method#2320B	1 ครั้ง/สัปดาห์
ของแข็งระเหย	Standard Method#2540E	เริ่มและสิ้นสุดการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3-7 ตัวแปรในการทดลองที่ 2

ตัวแปรต้น	**ตัวแปรควบคุม**	**ตัวแปรตาม**
1) ชนิดวัสดุ • โฟมพอลิสไตรีน • กระดาษ • พลาสติกชีวภาพ 2) สภาวะมีออกซิเจน	1) ปริมาณขยะสังเคราะห์ 2) ความหนาแน่นขยะสังเคราะห์ 3) องค์ประกอบขยะสังเคราะห์ 4) ขนาดตัวอย่าง 2×2 เซนติเมตร 5) ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง	1) สมบัติทางกายภาพได้แก่ น้ำหนักที่หายไปและลักษณะพื้นผิว 2) สมบัติทางเคมีได้แก่ โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

3.9.5 การทดลองที่ 3 ทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน

เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของวัสดุที่เกิดจากการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลองประกอบด้วย วัสดุกระดาษ วัสดุพอลิสไตรีนโฟม วัสดุพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอ และชุดควบคุมซึ่งมีเพียงของเสียสังเคราะห์เท่านั้น กำหนดระยะเวลาในการทดลอง 90 วัน (รูปที่ 3-10) ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-9

1) เตรียมตัวอย่างให้มีขนาดเท่ากับ 1×1 เซนติเมตร บรรจุลงถุงตาข่ายขนาดรู 1 มิลลิเมตรที่ทำจากวัสดุไฟเบอร์กลาส แล้วบันทึกน้ำหนักของถุงตาข่ายก่อนนำไปบรรจุตัวอย่าง (น้ำหนักก่อนการทดลอง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2) นำถุงตาข่ายที่บรรจุลงตัวอย่างแล้ว ลงในขวดเซรั่มสีชาที่ใส่ของเสียสังเคราะห์ หัวเชื้อจุลินทรีย์ และสารอาหารเสริมแล้ว จากนั้นปรับให้เป็นสภาวะไร้ออกซิเจนโดยการเติมแก๊สไนโตรเจน ปิดด้วยจุกยางและฝาครอบอะลูมิเนียมทันที

3) นำชุดการทดลองไปบ่มในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง และวัดปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น

4) วิเคราะห์หาน้ำหนักที่หายไประหว่างการย่อยสลาย โดยถุงตาข่ายมาแกว่งล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วทิ้งให้แห้งในโถดูดความชื้นเป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (น้ำหนักหลังการทดลอง5) คำนวณหาน้ำหนักที่หายไป (% Weight loss) จากสมการที่ (4-1)

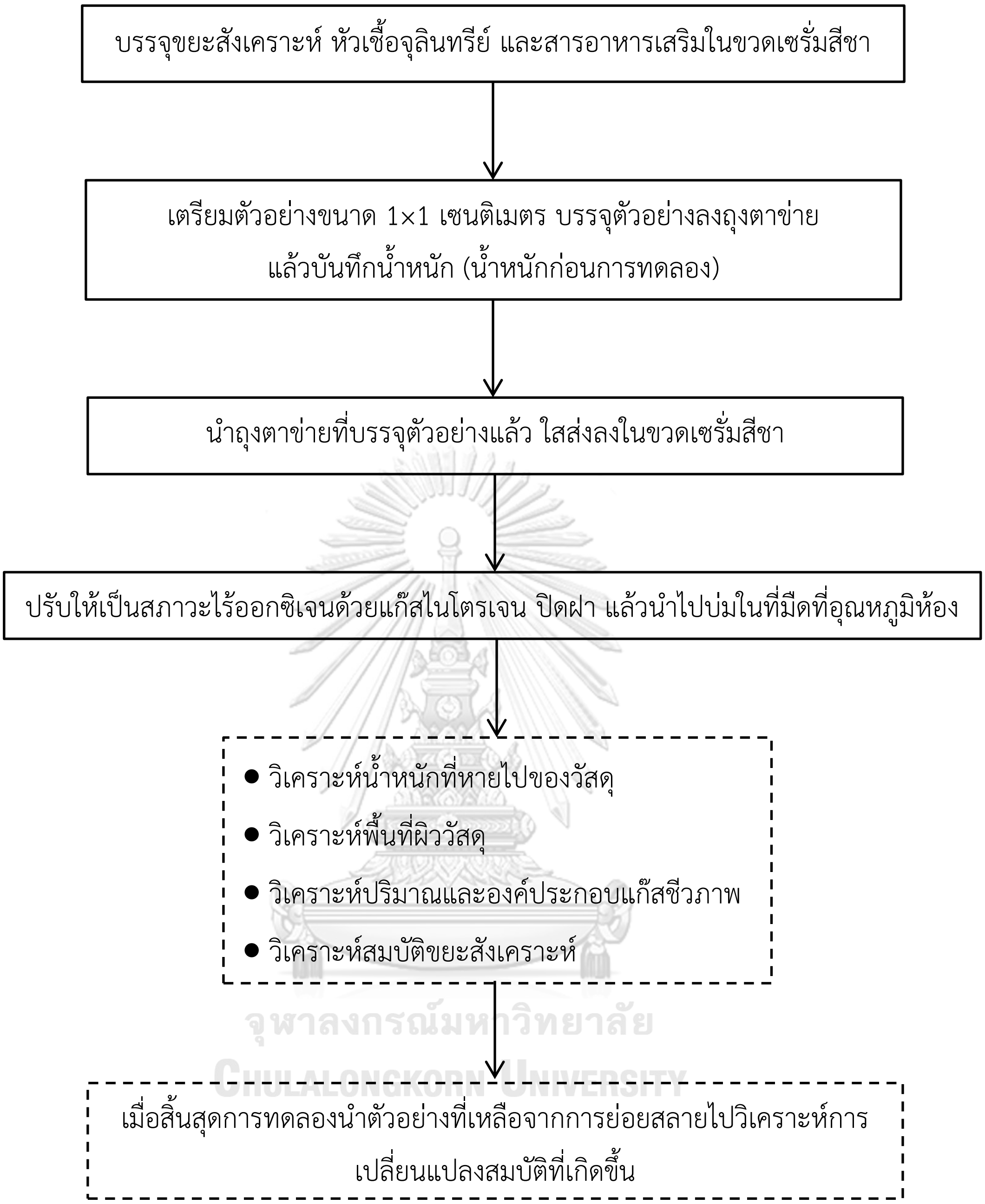
5) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างที่เหลือจากการย่อยสลายดังตารางที่ 3-8 แล้วคำนวณร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation rate) ดังสมการที่ 4-2

$$\%\ \text{Biodegradation} = \frac{\text{mean } C_g(\text{test}) - \text{mean } C_g(\text{blank})}{C_i} \times 100 \qquad (4\text{-}2)$$

เมื่อ C_g คือปริมาณแก๊สคาร์บอนที่ผลิตได้ (กรัม)

C_i คือปริมาณคาร์บอนในตัวอย่าง (กรัม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3-10 การทดลองที่ 2 ทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน

ตารางที่ 3-8 ตัวชี้วัดและความถี่ที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลองที่ 3

วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของตัวอย่าง		
ตัวชี้วัด	**วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์**	**ความถี่ในการวิเคราะห์**
ปริมาณแก๊สชีวภาพ	Water displacement	2 ครั้ง/สัปดาห์
น้ำหนักที่หายไป	(Ishigaki และคณะ, 1999)	1 ครั้ง/สัปดาห์
ลักษณะพื้นที่ผิว	Scanning Electron Microscopy (SEM)	1 ครั้ง/เดือน
องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ	Gas analyzer	1 ครั้ง/เดือน
ปริมาณคาร์บอน	CHN analyzer	เริ่มและสิ้นสุดการทดลอง
ปริมาณลิกนิน	TAPPI T 222 om-15	เริ่มและสิ้นสุดการทดลอง
ปริมาณโฮโลเซลลูโลส	TAPPI section	เริ่มและสิ้นสุดการทดลอง
โครงสร้างทางเคมี	Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR)	เริ่มและสิ้นสุดการทดลอง
วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของขยะสังเคราะห์		
ตัวชี้วัด	**วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์**	**ความถี่ในการวิเคราะห์**
พีเอช	Electronic pH meter	1 ครั้ง/วัน
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน	Electronic ORP Meter	1 ครั้ง/วัน
กรดอินทรีย์ระเหย	Standard Method#2310B	1 ครั้ง/สัปดาห์
ความเป็นด่าง	Standard Method#2320B	1 ครั้ง/สัปดาห์
ซีโอดี	Standard Method #5220C	1 ครั้ง/สัปดาห์
ของแข็งทั้งหมด	Standard Method#2540B	เริ่มและสิ้นสุดการทดลอง
ของแข็งระเหย	Standard Method#2540E	เริ่มและสิ้นสุดการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 3-9 ตัวแปรในการทดลองที่ 3

ตัวแปรต้น	ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรตาม
1) ชนิดวัสดุ • โฟมพอลิสไตรีน • กระดาษ • พลาสติกชีวภาพ 2) สภาวะไร้ออกซิเจน	1) ปริมาณขยะสังเคราะห์ 2) องค์ประกอบขยะสังเคราะห์ 3) อัตราส่วนระหว่างขยะสังเคราะห์กับหัวเชื้อจุลินทรีย์เท่ากับ 6:1 4) ขนาดตัวอย่าง 2×2 เซนติเมตร 5) ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง	1) สมบัติทางกายภาพได้แก่ น้ำหนักที่หายไปและลักษณะพื้นผิว 2) สมบัติทางเคมีได้แก่ โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ 3) ปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพ

3.9.6 การทดลองที่ 4 ทดสอบการย่อยสลายของวัสดุในหลุมฝังกลบ

เพื่อศึกษาผลการย่อยสลายของวัสดุแต่ละชนิดในหลุมฝังกลบปริมาณขยะในหลุมฝังกลบ ต่อปริมาณและองค์ประกอบน้ำชะขยะและแก๊สในหลุมฝังกลบ โดยจำลองการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ กำหนดระยะเวลาในการทดลอง 120 วัน (รูปที่ 3-11) ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1) การผสมของเสียสังเคราะห์และตัวอย่างทดสอบ

เตรียมตัวอย่างให้มีขนาดประมาณ 25 - 50 มิลลิเมตร (Prechthai และคณะ, 2008) ผสมของเสียสังเคราะห์ปริมาณ 2.5 กิโลกรัมให้เข้ากันกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ปริมาตร 0.2 ลิตร (พิพัฒน์ ธีระจักร, 2553) และผสมของเสียสังเคราะห์และหัวเชื้อจุลินทรีย์กับตัวอย่างที่อัตราส่วนเท่ากับ 42:1 (สำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร, 2558)

2) ถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

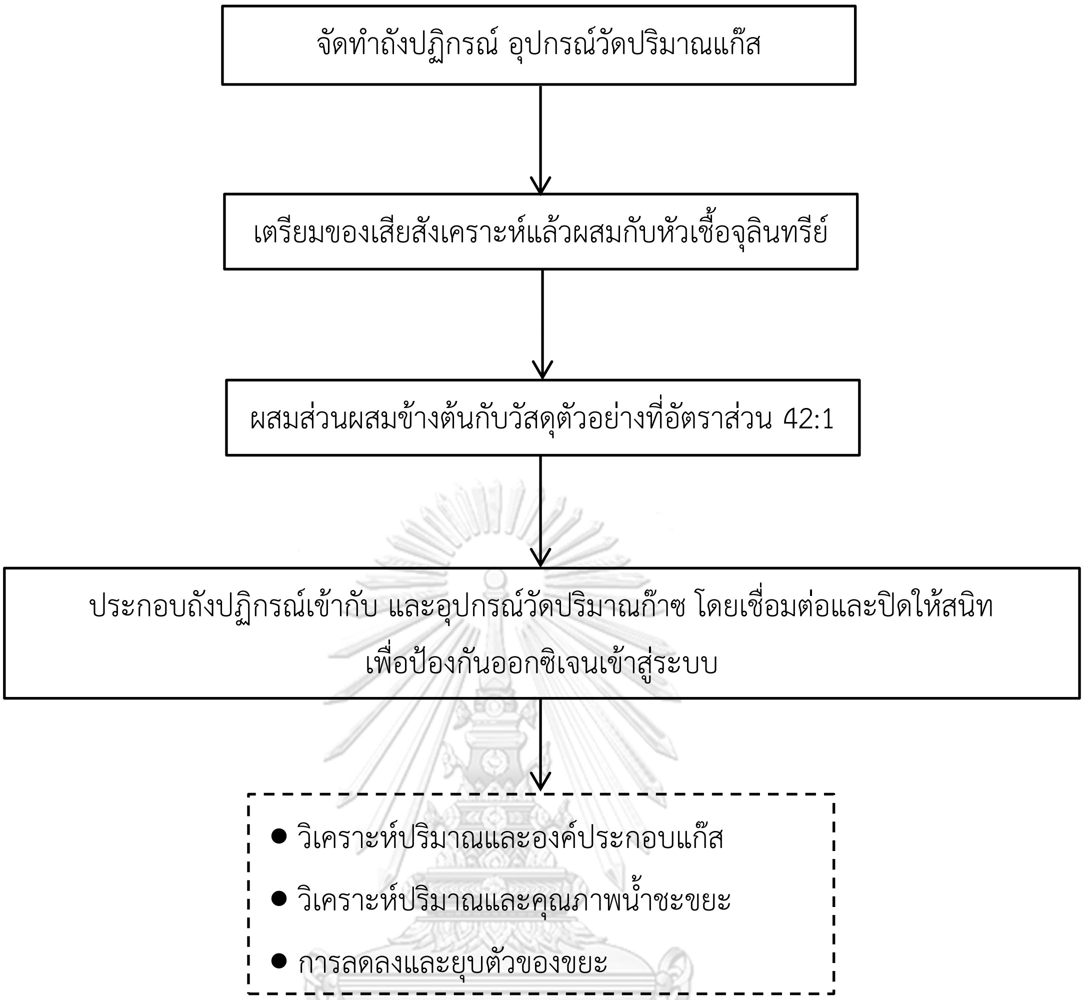
การทดสอบการย่อยสลายวัสดุในหลุมฝังกลบทำโดยใช้ถังปฏิกรณ์จำนวน 4 ถัง แยกตามชนิดวัสดุประกอบด้วยภาชนะจากวัสดุกระดาษ พอลิสไตรีนโฟม พลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอ และชุดควบคุมไม่มีตัวอย่างมีเพียงขยะสังเคราะห์ ภายในถังประกอบด้วยตะแกรงพลาสติกขนาด

เส้นผ่าศูนย์กลางรูตาข่าย 1.0 เซนติเมตร วางอยู่ชั้นล่างสุดถัดขึ้นมาเป็นกรวดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 เซนติเมตร เพื่อป้องการอุดตันการไหลของน้ำชะ ชั้นบนสุดเป็นของเสียสังเคราะห์และหัวเชื้อจุลินทรีย์ผสมกับตัวอย่างในถังที่ 1 2 3 และของเสียสังเคราะห์ผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ปราศจากตัวอย่างทดสอบในถังที่ 4 การวัดปริมาณแก๊สชีวภาพวัดโดยใช้ก๊าซเคาท์เตอร์ (Gas counter) ซึ่งภายในบรรจุน้ำกลั่นที่ปรับพีเอชให้ต่ำกว่า 3 ด้วย 20% Na_2SO_4 ใน 5% H_2SO_4 วิเคราะห์แก๊สและน้ำชะขยะดังตัวชี้วัดในตารางที่ 3-10 ต่อเข้าจุดวัดก๊าซชีวภาพบริเวณด้านบนของฝาถังปฏิกรณ์

3) การเวียนน้ำชะขยะ

เติมน้ำเข้าสู่ถังปฏิกรณ์เพื่อเพิ่มความชื้นที่ปริมาตร 237 มิลลิลิตรต่อวัน ช่วงเริ่มต้นเดินระบบเพื่อให้สอดคล้องกับระบบจริงที่มีความชื้นเนื่องมาจากการไหลซึมของน้ำฝนที่ตกมาในอัตราเฉลี่ย 1,622 มิลลิลิตรต่อปี (สำนักระบายน้ำกรุงเทพมหานคร, 2558) จนกว่าปริมาณน้ำที่ออกจากถังปฏิกรณ์จะเท่ากับปริมาณที่เติมเข้าไปต่อวันแล้วจึงเริ่มเวียนน้ำชะขยะ ซึ่งในการทดลองที่ใช้เวลา 2 วัน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3-11 การทดลองที่ 4 ทดสอบการย่อยสลายของวัสดุในหลุมฝังกลบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3-10 ตัวชี้วัดและความถี่ที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลองที่ 4

ตัวชี้วัด	**วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์**	**ความถี่ในการวิเคราะห์**
ปริมาณแก๊สชีวภาพ	Water displacement	ทุกวัน
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน	Electronic ORP Meter	ทุกวัน
พีเอช	Electronic pH meter	ทุกวัน
ค่าความเป็นด่าง	Standard Method#2320B	1 ครั้ง/สัปดาห์
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย	Standard Method#2310B	1 ครั้ง/สัปดาห์
ซีโอดี	Standard Method #5220C	2 ครั้ง/สัปดาห์
แอมโมเนียไนโตรเจน	Standard Method #4500-NH3	1 ครั้ง/เดือน
ฟอตเฟต	Standard Method #4500-P	1 ครั้ง/เดือน
องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ	Gas Chromatography	1 ครั้ง/เดือน
ของแข็งทั้งหมด	Standard Method#2540B	เริ่มและสิ้นสุดการทดลอง
ของแข็งระเหย	Standard Method#2540E	เริ่มและสิ้นสุดการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 3-11 ตัวแปรในการทดลองที่ 4

ตัวแปรต้น	ตัวแปรควบคุม	ตัวแปรตาม
ชนิดวัสดุ • โฟมพอลิสไตรีน • กระดาษ • พลาสติกชีวภาพ	1) ปริมาณขยะสังเคราะห์ 2.5 กิโลกรัม 2) องค์ประกอบขยะสังเคราะห์ 3) ปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์ 0.2 ลิตร 4) อัตราส่วนขยะสังเคราะห์กับหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุเท่ากับ 42:1 6) ถังปฏิกรณ์ปริมาตร 24.5 ลิตร 8) ทดสอบที่อุณหภูมิห้อง	1) ปริมาณและองค์ประกอบแก๊สชีวภาพ 2) ปริมาณและคุณภาพน้ำชะขยะ 3) การยุบตัวของขยะ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
ผลการทดลอง และการอภิปรายข้อมูล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการย่อยสลายของวัสดุภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้งในหลุมฝังกลบที่รับขยะเศษอาหาร โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 การทดลอง ดังนี้ (1) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุก่อนย่อยสลายเพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานประกอบการทำงานวิจัย วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง (สถานีข่าวTNN24) ศึกษาการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่เกิดขึ้นในสภาวะดังกล่าว โดยเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของวัสดุก่อนและหลังการย่อยสลาย (3) ศึกษาการย่อยสลายของวัสดุในสภาวะไร้ออกซิเจน เพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่เกิดขึ้นในสภาวะไร้ออกซิเจน รวมถึงทำการศึกษาร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพ (% Biodegradation) ปริมาณองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ และ (สถานีข่าวTNN24) ศึกษาการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ (Landfill reactor) เพื่อศึกษาผลการย่อยสลายของวัสดุแต่ละชนิดในหลุมฝังกลบต่อปริมาณขยะรวมทั้งปริมาณและองค์ประกอบแก๊สและน้ำชะขยะ

4.1 สมบัติเบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์และขยะสังเคราะห์

ผลการศึกษาสมบัติหัวเชื้อจุลินทรีย์และขยะสังเคราะห์ในตารางที่ 4-1 พบว่าหัวเชื้อจุลินทรีย์มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหย (VS) คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และไนโตรเจน (N) ร้อยละ 9.55 92.58 47.89 6.56 และ 5.91ตามลำดับ ขณะที่ขยะสังเคราะห์ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ขยะเศษอาหารมีปริมาณของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย คาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ร้อยละ 24.95 98.62 48.90 7.16 และ 2.60 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นดังแสดงในตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-1 สมบัติทางเคมีของหัวเชื้อจุลินทรีย์และขยะเศษอาหารสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้

สมบัติทางเคมี	**ขยะเศษอาหาร**	**หัวเชื้อจุลินทรีย์**
ของแข็งทั้งหมด (% DW)	24.95	9.55
ความชื้น (%)	75.05	90.45
ของแข็งระเหย (% TS)	98.62	92.58
เถ้า (%)	1.38	7.42
คาร์บอน (%)	48.90	47.89
ไฮโดรเจน (%)	7.16	6.56
ไนโตรเจน (%)	2.60	5.91
พีเอช	ND	6.89
โออาร์พี (mV)	ND	-231

ตารางที่ 4-2 เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีของขยะเศษอาหารในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น

สมบัติทางเคมี	งานวิจัยนี้	(Browne และ Murphy, 2013)	(Jabeen และคณะ, 2015)	(Curry และ Pillay, 2012)
ของแข็งทั้งหมด (% DW)	24.95	29.40	27.45	28 – 29
ความชื้น (%)	75.05	70.6	72.55	72 – 71
ของแข็งระเหย (% TS)	98.62	95.30	91.99	20 – 95
เถ้า (%)	1.38	4.70	8.01	5 - 80
คาร์บอน (%)	48.90	49.58	51.01	48.00
ไฮโดรเจน (%)	7.16	7.32	-	6.40
ไนโตรเจน (%)	2.60	3.53	3.04	2.60

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

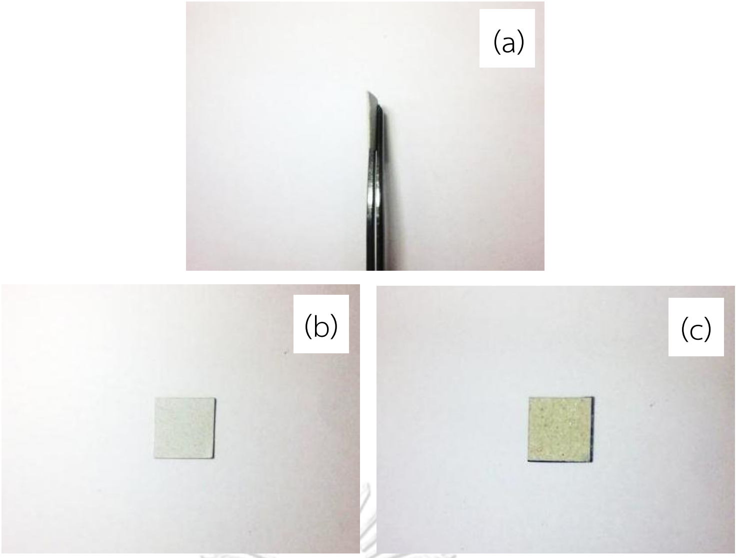
4.2 การทดลองที่ 1 ผลการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ

4.2.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุกระดาษก่อนการย่อยสลาย

จากการศึกษาสมบัติทางกายภาพของวัสดุกระดาษพบว่า วัสดุที่นำมาทำภาชนะบรรจุอาหารมีสองด้านด้วยกันได้แก่ ด้านที่สัมผัสอาหารและด้านที่ไม่ได้สัมผัสอาหาร สำหรับด้านที่สัมผัสอาหารจะมีลักษณะมันวาวเนื่องจากผิวหน้าถูกเคลือบด้วยสารปรุงแต่ง ส่วนมากภาชนะกระดาษที่สัมผัสอาหารจะมีการเคลือบสารที่ป้องกันความชื้นและน้ำมัน (Marsh และ Bugusu, 2007) เช่นตัวอย่างจานกระดาษยี่ห้อหนึ่งเคลือบด้วยดินขาว (Kaolin) และอะคริลิค (Acrylic) ร้อยละ 80 และ 20 ตามลำดับ ส่วนจานกระดาษอีกยี่ห้อหนึ่งเคลือบด้วยดินขาว ลาเท็กซ์ (Synthetic latex) แคลเซียมคาร์บอเนต (Calcium carbonate, $CaCO_3$) (Eco-Cycle, 2016) แสดงให้เห็นว่าการเติมแต่งขึ้นอยู่กับสมบัติการใช้งาน ส่วนด้านที่ไม่ได้สัมผัสอาหารมีลักษณะคล้ายเยื่อกระดาษถูกอัดจนแน่นผิวสัมผัสลื่นเป็นระนาบเดียวกัน และเมื่อพิจารณาจากด้านข้างของวัสดุพบว่ามีลักษณะซ้อนอัดกันอยู่หลายชั้น ดังรูปที่ (4-1a) (4-1b) และ (4-1c)

พารามิเตอร์ที่ใช้ทำการศึกษาสมบัติทางเคมีของวัสดุกระดาษประกอบด้วยของแข็งทั้งหมด ความชื้น ของแข็งระเหย เถ้า โดยมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 95.34 4.66 85.74 และ 14.26 ตามลำดับ ใกล้เคียงกับกระดาษในงานวิจัยของ Yuan และคณะ (2012) ปริมาณของแข็งทั้งหมดของกระดาษแข็งเท่ากับร้อยละ 95.40 ปริมาณของแข็งระเหยเท่ากับร้อยละ 87.2 (Yuan และคณะ, 2012) แสดงให้เห็นว่าวัสดุกระดาษมีความชื้นค่อนข้างน้อย และมีปริมาณสารอินทรีย์ค่อนข้างมาก นอกจากนี้ปริมาณคาร์บอน และไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับร้อยละ 37.19 และ 5.50 ตามลำดับ แต่ไม่พบธาตุไนโตรเจนในตัววัสดุ สำหรับองค์ประกอบหลักของกระดาษอย่างลิกนิน เซลลูโลส และโฮโลเซลลูโลสพบว่ามีปริมาณเท่ากับร้อยละ 15.40 และ 85.20 ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4-3 และมีสมบัติใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น ดังตารางที่ 4-4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4-1 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุกระดาษก่อนการทดลองที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (a) ด้านข้าง (b) ด้านที่สัมผัสอาหาร และ (c) ด้านที่ไม่ได้สัมผัสอาหาร

ตารางที่ 4-3 สมบัติทางเคมีของวัสดุกระดาษก่อนการย่อยสลาย

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง
ของแข็งทั้งหมด (%)	95.34
ความชื้น (%)	4.66
ของแข็งระเหย (% น้ำหนักแห้ง)	85.74
เถ้า (%)	14.26
ปริมาณคาร์บอน (%)	37.19
ปริมาณไฮโดรเจน (%)	5.50
ปริมาณไนโตรเจน (%)	0.00
ปริมาณลิกนิน (%)	15.40
ปริมาณโฮโลเซลลูโลส (%)	85.20

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4-4 เปรียบเทียบสมบัติทางเคมีของวัสดุกระดาษก่อนการย่อยสลายกับงานวิจัยอื่น

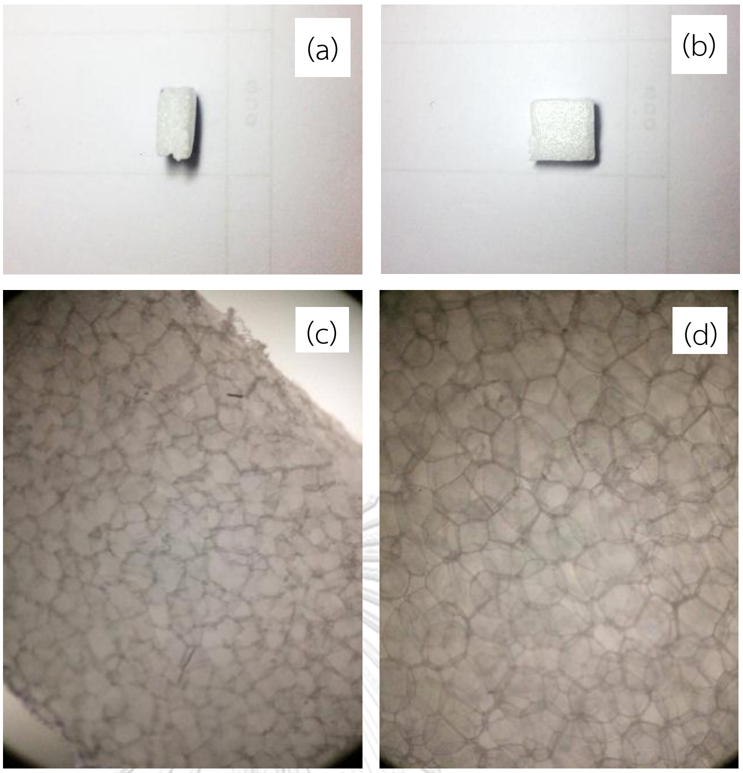
สมบัติทางเคมี	งานวิจัยนี้	(Eleazer และคณะ, 1997)[a]	(Yuan และ คณะ, 2012)[b]	(Wan และ คณะ, 2013)[c]	(Wang และคณะ, 2013)[d]
ของแข็งทั้งหมด (%)	95.34	-	95.40	91.00	-
ของแข็งระเหย (% น้ำหนักแห้ง)	85.74	74.30	87.20	90.7	88.1
คาร์บอน (%)	37.19	-	-	41.50	39.10
ไฮโดรเจน (%)	5.50	-	-	-	-
ไนโตรเจน (%)	0.00	-	-	0.24	-
ลิกนิน (%)	15.40	15.00	17.8	-	0.6
โฮโลเซลลูโลส (%)	85.20	51.70	67.60	-	86.6

หมายเหตุ [a]กระดาษเคลือบ (Coated paper) [b]กระดาษแข็ง (Cardboard) [c]ขยะเศษกระดาษ (Paper waste)
[d]กระดาษพิมพ์งาน (Copy paper)

4.2.2 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมก่อนการย่อยสลาย

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมพบว่า เมื่อสังเกตผิวด้านบนของวัสดุด้วยตาเปล่าพบว่าวัสดุมีลักษณะพื้นผิวราบเรียบผิวสัมผัสลื่น ส่วนด้านข้างของวัสดุจะสังเกตเห็นช่องว่างขนาดเล็ก ดังรูปที่ 4-2 ความหนาของวัสดุ 4 มิลลิเมตร และเมื่อพิจารณาภาพถ่ายจากกล้องกำลังขยายสูงก็จะเห็นช่องว่างในวัสดุอย่างชัดเจน ซึ่งเกิดจากกระบวนผลิตพอลิสไตรีนโฟมโดย เม็ดพลาสติกพอลิสไตรีนถูกทำให้ขยายตัวด้วยแก๊สบิวเทนประมาณ 20 เท่า (ณัติฐพล ไข่แสงสี, 2552) การศึกษาสมบัติทางเคมีของวัสดุพอลิสไตรีนโฟม (ตารางที่ 4-5) พบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมด ความชื้น ของแข็งระเหย และเถ้ามีค่าเท่ากับร้อยละ 99.88 0.12 99.75 และ 0.25 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวัสดุโฟมมีลักษณะแห้งมากแทบไม่มีความชื้นในตัววัสดุเลย ทั้งยังพบว่าวัสดุเป็นสารอินทรีย์เกือบทั้งสิ้นสอดคล้องกับปริมาณคาร์บอนในวัสดุที่พบสูงถึงร้อยละ 92.10 ตามด้วยไฮโดรเจนร้อยละ 7.47 และไม่พบไนโตรเจนในตัววัสดุ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

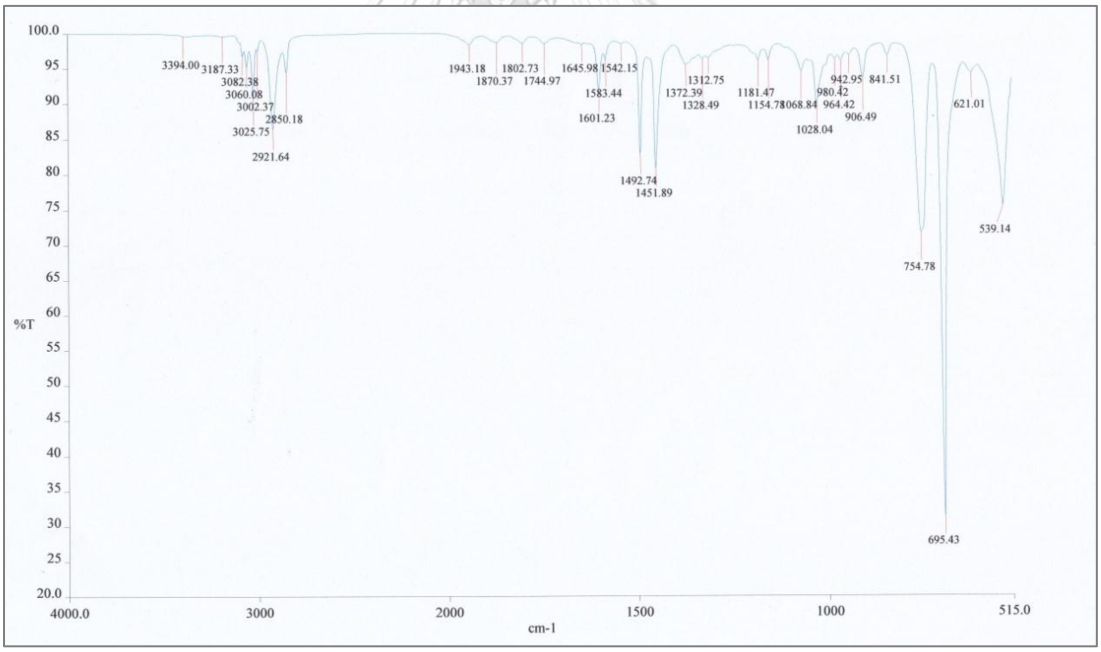


รูปที่ 4-2 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุโฟมก่อนการทดลองที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (a) ด้านข้าง (b) ด้านบน และที่กำลังขยาย 50 เท่า (c) ด้านข้าง และ (d) ด้านบน

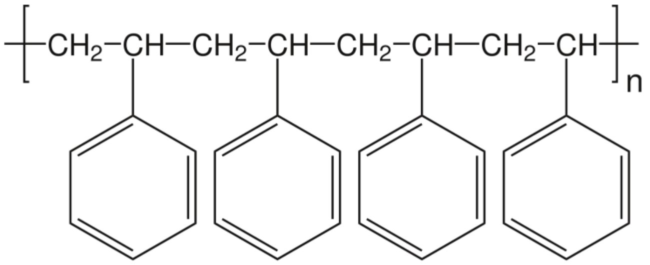
รูปที่ 4-3 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของโฟมด้วยเทคนิค FTIR พบว่าเกิดพีคในช่วงการดูดกลืนแสง 539 – 754 ต่อเซนติเมตร โดยเฉพาะที่ 695.43 ต่อเซนติมเตร เกิดพีคที่เข้มที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาร่วมกับค่าความถี่การดูดกลืนรังสีอินฟาเรดของหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ในการพิสูจน์โครงสร้างของสารอินทรีย์ที่ระบุไว้ว่าช่วงการดูดกลืนแสงที่ 900 – 690 ต่อเซนติเมตร พบพันธะ C – H งอออก (bending) นอกระนาบของวงแหวนเบนซีนซึ่งเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์จำนวนและตำแหน่งของหมู่แทนที่ในวงอะโรมาติก โดยช่วงเลขคลื่น 770 – 730 และ 720 – 680 ต่อเซนติเมตร เป็น Monosubstituted คือมีหมู่แทนที่ไฮโดรเจหมู่เดียวไม่ได้ระบุตำแหน่งแทนที่ (สมเดช กนกเมธากุล, 2547) ดังนั้นพีคจากผลการทดลองที่ได้จึงสอดคล้องกับโครงสร้างทางเคมีของพอลิสไตรีนโฟม นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันยังพบพีคในช่วง 3300 – 2700 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการยืด (stretching) ของพันธะ C – H ที่ต่อออกมาจากวงแหวนอะโรมาติกดังรูปที่ 4-4

ตารางที่ 4-5 สมบัติทางเคมีของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมก่อนการย่อยสลาย

พารามิเตอร์	ผลการทดลอง
ของแข็งทั้งหมด (%)	99.88
ความชื้น (%)	0.12
ของแข็งระเหย (% น้ำหนักแห้ง)	99.75
เถ้า (%)	0.25
ปริมาณคาร์บอน (%)	92.10
ปริมาณไฮโดรเจน (%)	7.47
ปริมาณไนโตรเจน (%)	0.00



รูปที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมก่อนการย่อยสลาย



รูปที่ 4-4 โครงสร้างทางเคมีของพอลิสไตรีนโฟม

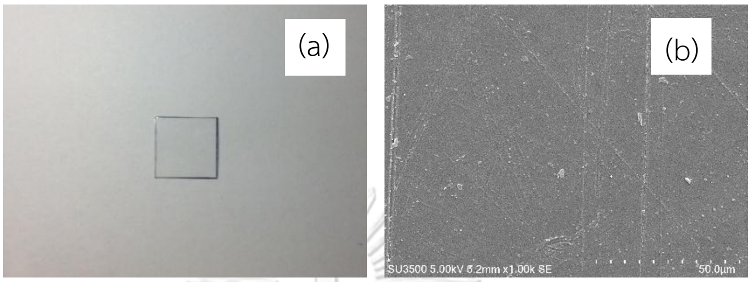
ที่มา : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polystyrene_linear.svg

4.2.3 สมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอก่อนการย่อยสลาย

จากรูปที่ 4-5 พบว่าลักษณะพื้นผิวของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอหรือพีแอลเอ มีลักษณะแข็ง ใส พื้นผิวราบลื่น และเมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าพื้นผิวไม่ได้มีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวแต่มีรอยเส้นบนพื้นผิว สำหรับตารางที่ 4-6 แสดงถึงผลการศึกษาสมบัติทางเคมีของวัสดุ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ความชื้น ของแข็งระเหย เถ้า โดยมีปริมาณเท่ากับร้อยละ 99.69 0.31 99.92 และ 0.08 ตามลำดับ ปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนเท่ากับร้อยละ 49.94 และ 5.49 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Kolstad และคณะ (2012) ที่ระบุสมบัติทางเคมีของพลาสติกพีแอลเอว่ามีปริมาณของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย และคาร์บอนเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.87 100.00 และ 51.67 ตามลำดับ (Kolstad และคณะ, 2012) ใกล้เคียงกับปริมาณคาร์บอนในพีแอลเอดังงานวิจัยของ Massardier-Nageotte และคณะ (2006) ที่ระบุว่ามีปริมาณอยู่ร้อยละ 43.9 (Massardier-Nageotte และคณะ, 2006)

ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอด้วย FTIR ในรูปที่ 4-6 เกิดพีคหลักในช่วงความยาวคลื่น 1180.46 – 1043.71 ต่อเซนติเมตร โดยพีคที่เด่นที่สุดในช่วงความยาวคลื่นดังกล่าวคือที่ 1080.30 ซึ่งพบว่าเป็นพีคที่แสดงการดูดกลืนของพันธะ C – O (ช่วงคลื่น 1150 – 1070) และเมื่อพิจารณาที่ช่วงความยาวคลื่น 1900 – 1500 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (Carbonyl group; C = O) พีคของพันธะ C = O ยืดจะพบในลักษณะเข้ม โดยพันธะ C = O ของสารประกอบคาร์บอนิลทุกชนิดจะปรากฏพีคในช่วงความยาวคลื่น 1800 – 1650 ต่อเซนติเมตร ค่าการดูดกลืนของพันธะ C = O ไม่อาจกำหนดเป็นค่าแน่นอนได้แต่จะแปรเปลี่ยนไปตามสภาพสิ่งแวดล้อมของกลุ่มต่างๆ ที่ต่ออยู่กับหมู่คาร์บอนิลนั้นๆ ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าเกิดพีค

ความเข้มข้นสูงที่ความยาวคลื่น 1747.81 ต่อเซนติเมตร แสดงว่ามีหมู่เอสเทอร์ (Ester group) อยู่กับหมู่คาร์บอนิล นอกจากนี้ยังพบพีคในช่วงความยาวคลื่น 3300 – 2700 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นตัวชี้วัดถึงการยืดของพันธะ C – H (สมเดช กนกเมธากุล, 2547) สอดคล้องกับโครงสร้างของพลาสติกชีวภาพพีแอลเอดังรูปที่ 4-7

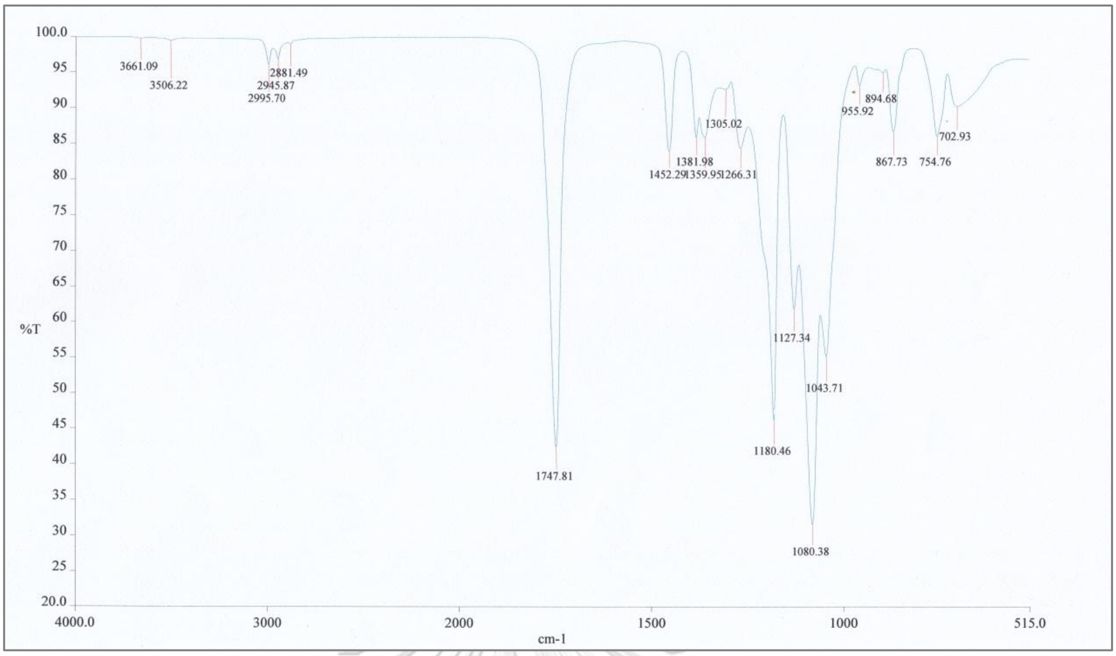


รูปที่ 4-5 ลักษณะพื้นผิวของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอก่อนการทดลอง (a) มองด้วยตาเปล่า และ (b) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

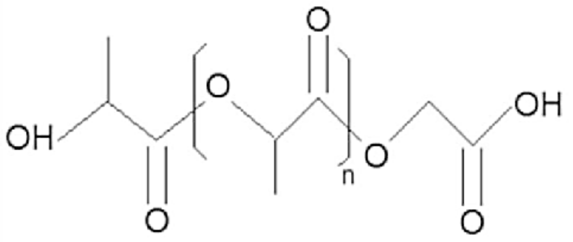
ตารางที่ 4-6 สมบัติทางเคมีของวัสดุพลาสติกพีแอลเอก่อนการย่อยสลาย

พารามิเตอร์	**ผลการทดลอง**
ของแข็งทั้งหมด (%)	99.69
ความชื้น (%)	0.31
ของแข็งระเหย (% น้ำหนักแห้ง)	99.92
เถ้า (%)	0.08
ปริมาณคาร์บอน (%)	49.94
ปริมาณไฮโดรเจน (%)	5.49
ปริมาณไนโตรเจน (%)	0.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4-6 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอ ก่อนการย่อยสลาย



รูปที่ 4-7 โครงสร้างทางเคมีของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอ

ที่มา : https://www.researchgate.net/figure/282075585_fig1_Figure-1-Molecular-structure-of-Polylactic-Acid-PLA

4.3 การทดลองที่ 2 ผลทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน

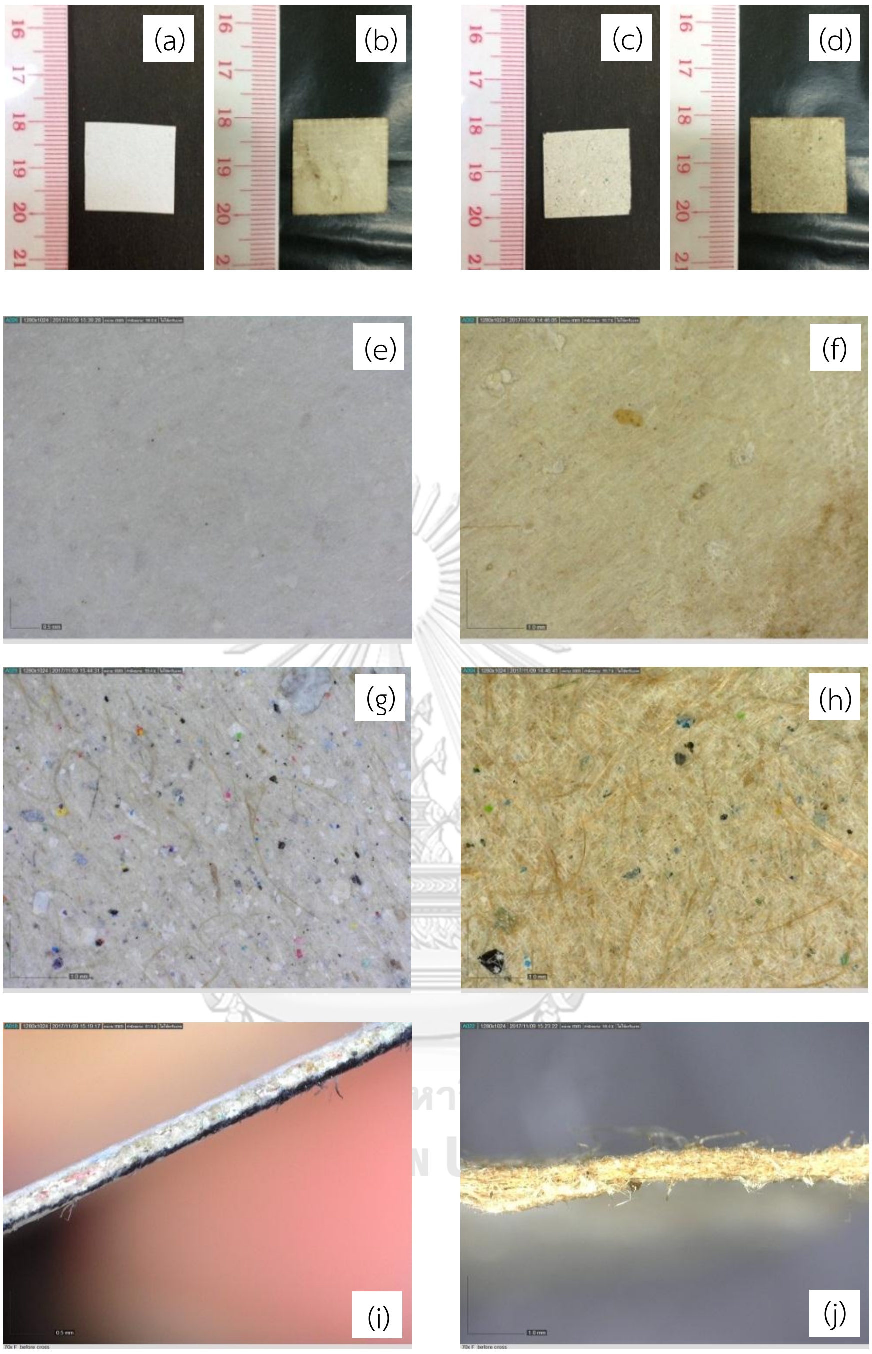
4.3.1 การเปลี่ยนแปลงวัสดุทดสอบในสภาวะมีออกซิเจน

4.3.1.1 การย่อยสลายวัสดุกระดาษในสภาวะมีออกซิเจน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุกระดาษเมื่อนำไปทดสอบในสภาวะมีออกซิเจนเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ (90 วัน) พบว่าชิ้นวัสดุมีการดูดซึมน้ำขยะเกิดความเปียกชื้น สีของวัสดุเปลี่ยนไปจากสีขาวเป็นสีน้ำตาล สำหรับวัสดุด้านที่มีการเคลือบผิวหน้าในรูปที่ 4-8(a) และ 4-8(b) ส่วนที่เคลือบบริเวณผิวเริ่มหลุดลอกออกบางส่วน สำหรับด้านที่ไม่ได้เคลือบผิวหน้าไม่พบการเปลี่ยนแปลงมากนักมีเพียงสีที่เปลี่ยนเป็นสีเหลืองที่สามารถสังเกตได้ รูปที่ 4-8(c) และ 4-8(d) แสดงวัสดุกระดาษที่กำลังขาย 50 เท่า จะเห็นว่าก่อนการทดสอบด้านที่เคลือบผิวมีผิวเรียบ แต่หลังการย่อยสลายจะพบเส้นใยและร่องรอยของสารเคลือบตกค้างอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4-8(e) 4-8(f) 4-8(g) และ 4-8(h) ขณะเดียวกันด้านข้างของวัตถุก่อนย่อยสลายที่กำลังขยาย 50 เท่า พบกระดาษอัดตัวกันแน่นและหลังการย่อยสลายจะเกิดการยุ่ยจนเห็นเส้นใยและสามารถหลุดลอกได้เป็นแผ่นๆ เมื่อสิ้นสุดการทดลองในรูปที่ 4-9(i) และ 4-9(j)

เมื่อศึกษาสมบัติทางเคมีของวัสดุกระดาษหลังการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจนพบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และของแข็งระเหย (VS) ปริมาณคาร์บอน และไฮโดรเจนมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.68 3.35 14.62 และ 14.33 ตามลำดับ ทั้งนี้ยังพบไนโตรเจนร้อยละ 0.53 เมื่อสิ้นสุดการทดลองอีกด้วย แสดงในตารางที่ 4-7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

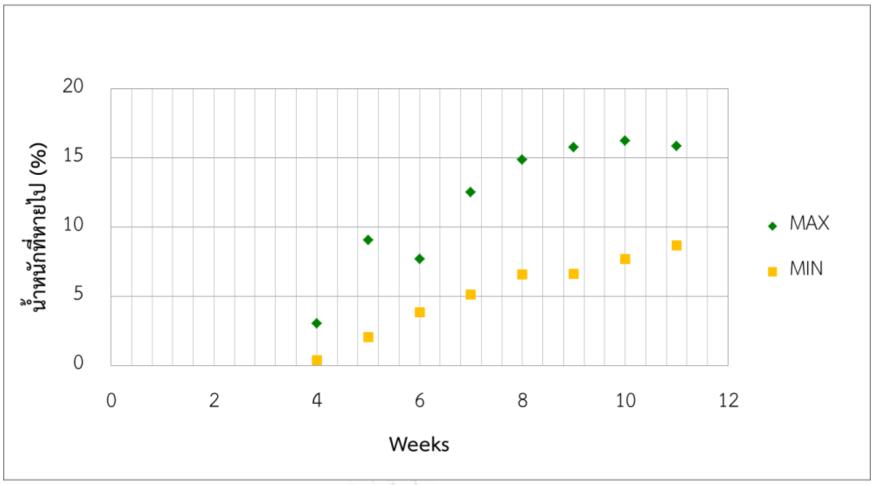


รูปที่ 4-8 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุกระดาษในสภาวะมีออกซิเจน
เมื่อมองด้วยตาเปล่า: (a) และ (b) ด้านที่เคลือบผิวก่อนและหลังย่อยสลาย
(c) และ (d) ด้านที่ไม่เคลือบผิวก่อนและหลังย่อยสลาย, ที่กำลังขยาย 50 เท่า: (e) และ (f) ด้านที่เคลือบผิวก่อนและหลังย่อยสลาย (g) และ (h) ด้านที่ไม่เคลือบผิวก่อนและหลังย่อยสลาย
(i) และ (j) ด้านข้างของวัสดุ

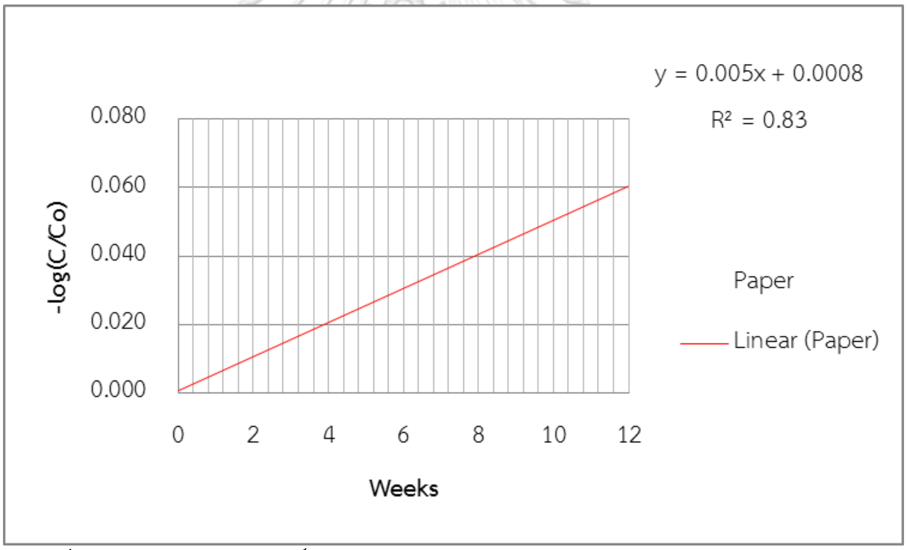
ตารางที่ 4-7 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุกระดาษในการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน

ตัวอย่าง	เริ่มต้นการทดลอง	สิ้นสุดการทดลอง	การเปลี่ยนแปลง (%)
ของแข็งทั้งหมด (%)	95.34	95.99	เพิ่มขึ้น 0.68
ความชื้น (%)	4.66	4.01	ลดลง 13.95
ของแข็งระเหย (%)	85.74	88.71	เพิ่มขึ้น 3.35
เถ้า (%)	14.26	11.72	ลดลง 17.81
ปริมาณคาร์บอน (%)	37.19	43.56	เพิ่มขึ้น 14.62
ปริมาณไฮโดรเจน (%)	5.50	6.42	เพิ่มขึ้น 14.33
ปริมาณไนโตรเจน (%)	0.00	0.53	-

จากการวิเคราะห์ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปโดยนำตัวอย่างไปวางไว้ในโถอบความชื้นเป็นเวลา 1 สัปดาห์พบว่าค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปของวัสดุในช่วงสัปดาห์ที่ 0 – 4 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้ชัดเจน คาดว่าในสภาวะมีออกซิเจนมีปริมาณน้ำค่อนข้างน้อยเนื่องจากยังไม่เกิดการย่อยสลายของขยะเศษอาหารซึ่งน้ำจะทำให้เกิดแนวโน้มการสูญเสียน้ำหนักของวัสดุกระดาษเริ่มชัดเจนในสัปดาห์ที่ 4 เป็นต้นไป เนื่องจากน้ำในระบบเพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้มีการชะเอาสารเติมแต่งออกมาซึ่งสอดคล้องกับปริมาณเถ้าหรือสารอนินทรีย์ที่ลดลงเมื่อสิ้นสุดการทดลอง โดยในสัปดาห์ที่ 11 มีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วง 11.67 – 15.86 ดังแสดงในรูปที่ 4.9 สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายวัสดุกระดาษ (K) มีค่าเท่ากับ 0.005 ต่อสัปดาห์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4-9 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุกระดาษเมื่อทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจนในสัปดาห์ที่ 4-11



รูปที่ 4-10 ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายวัสดุกระดาษ (K) ในสภาวะมีออกซิเจน

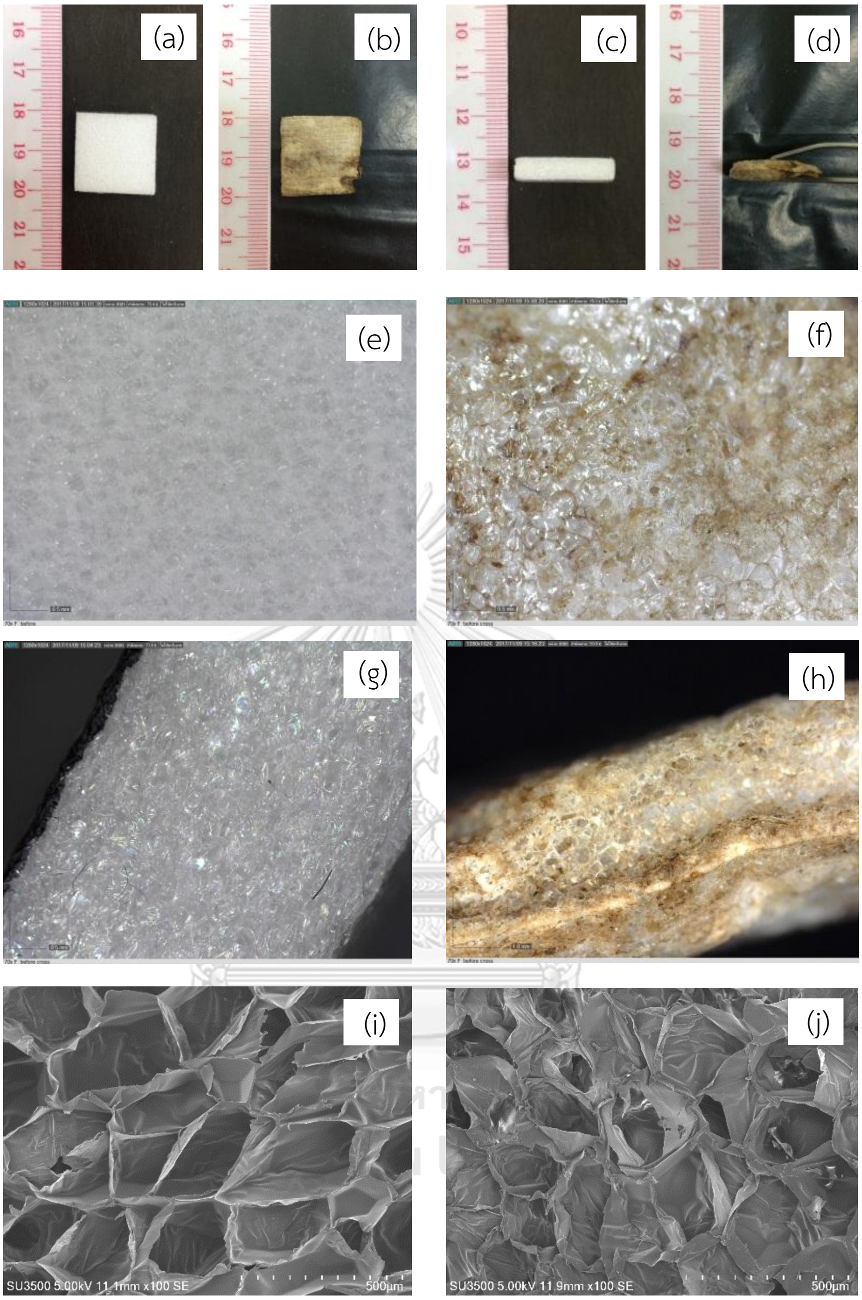
4.3.1.2 การย่อยสลายวัสดุพอลิสไตรีนในสภาวะมีออกซิเจน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมเมื่อนำไปทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจนเป็นเวลา 12 สัปดาห์ (90 วัน) เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดคือ สีเปลี่ยนจากสีขาวกลายเป็นสีเหลืองอมน้ำตาล โฟมมีการขาดแหว่งเป็นรู บริเวณด้านข้างของวัสดุเกิดการลีบแบนโดยความหนาวัสดุลดลงเหลือ 2 มิลลิเมตร จากเดิม 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4-11(a) 4-11(b) 4-11(c) และ 4-11(d) ส่วนที่กำลังขยาย 70 เท่า พบ

พื้นผิวถูกทำลายที่ผิวหน้ามีรอยขาดคล้ายการเจาะ มีการแทรกอยู่ของน้ำขยะ และสิ่งแปลกปลอมด้านข้างของวัสดุเกิดการเปลี่ยแปลงของสี เนื้อโฟมถูกทำลาย มีความลีบหดตัวเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4-11(e) 4-11(f) 4-11(g) และ 4-11(h) และเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่าช่องว่างภายในลดลง เนื้อโฟมที่กั้นระหว่างช่องว่างมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไปโดยพบความเสียหายหลังการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4-11(i) และ 4-11(j) จากตารางที่ 4-8 แสดงให้เห็นว่าวัสดุพอลิสไตรีนโฟมมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดของแข็งระเหย และคาร์บอนโดยลดลงร้อยละ 0.87 2.54 และ 13.21 ส่วนปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 12.94

รูปที่ 4-12 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของโฟมด้วยเทคนิค FTIR หลังการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน พบว่าหมู่ฟังก์ชันหลักที่ความยาวคลื่น 695 ต่อเซนติเมตร บ่งบอกถึงโครงสร้างวงแหวนเบนซีนว่ายังคงอยู่ เช่นเดียวกับพีคที่ความยาวคลื่น 3300 – 2700 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงการสั่นของพันธะ C – H ที่ต่อออกมาจากวงแหวนอะโรมาติก ผลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างหลักที่เป็นพอลิสไตรีนโฟมยังคงอยู่ แต่เมื่อพิจารณาที่ความยาวคลื่นช่วง 1900 – 1500 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นย่านการดูดกลืนของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (Carbonyl group, C=O) โดยพบพีคที่เกิดที่ความยาวคลื่น 1710 ต่อเซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบการสั่นของพันธะ O-H ที่ความยาวคลื่น 3200 และ 1276 ต่อเซนติเมตร ซึ่งการพบหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิลร่วมกับพันธะ O-H แสดงให้เห็นว่ามีกรดคาร์บอกซิลิกเพิ่มเข้ามาในวัสดุโฟมหลังการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน (สมเดช กนกเมธากุล, 2547)

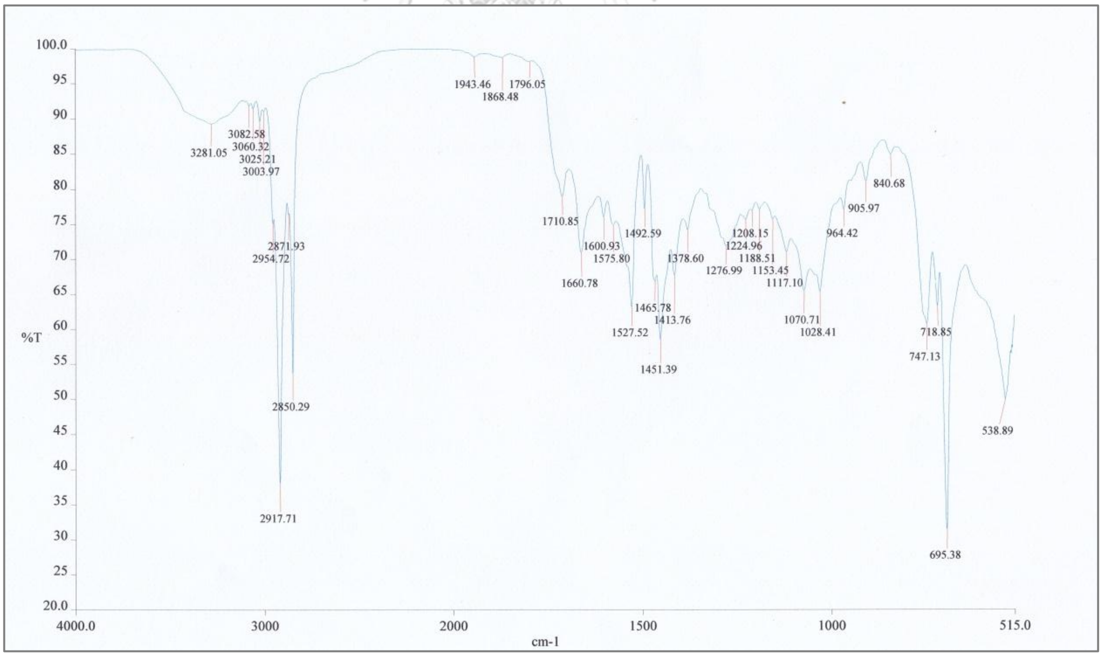
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4-11 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมในสภาวะมีออกซิเจน เมื่อมองด้วยตาเปล่า: (a) และ (b) ด้านบนก่อนและหลังย่อยสลาย (c) และ (d) ด้านข้างก่อนและหลังย่อยสลาย, ที่กำลังขยาย 70 เท่า: (e) และ (f) ด้านบนก่อนและหลังย่อยสลาย (g) และ (h) ด้านข้างก่อนและหลังย่อยสลาย, ที่กำลังขยาย 100 เท่า: (i) และ (j) ช่องว่างภายในวัสดุก่อนและหลังการย่อยสลาย

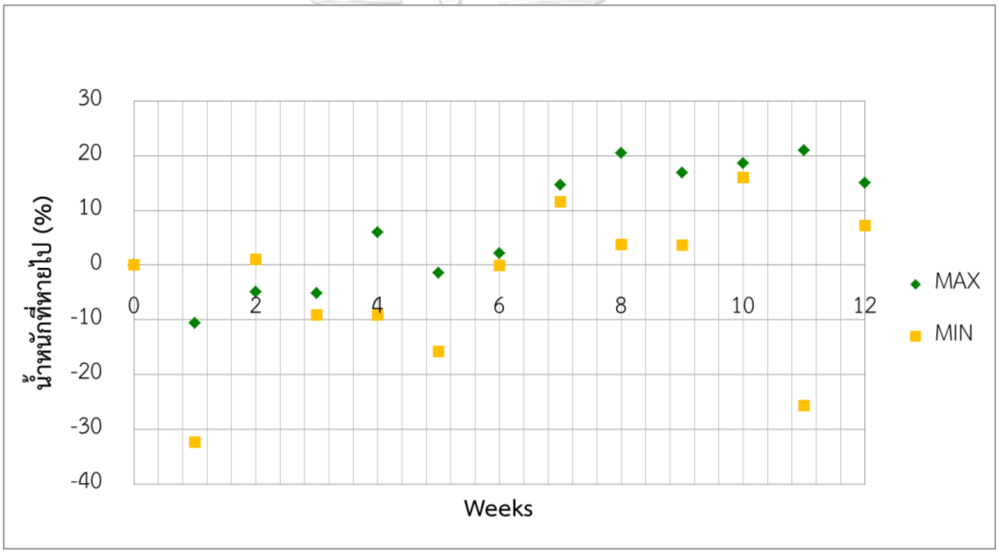
ตารางที่ 4-8 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมในการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน

ตัวอย่าง	เริ่มต้นการทดลอง	สิ้นสุดการทดลอง	การเปลี่ยนแปลง (%)
ของแข็งทั้งหมด (%)	99.88	99.01	ลดลง 0.87
ความชื้น (%)	0.12	0.99	เพิ่มขึ้น 87.88
ของแข็งระเหย (%)	99.75	97.22	ลดลง 2.54
เถ้า (%)	0.25	2.78	เพิ่มขึ้น 92.00
ปริมาณคาร์บอน (%)	92.10	79.93	ลดลง 13.21
ปริมาณไฮโดรเจน (%)	7.47	8.58	เพิ่มขึ้น 12.94
ปริมาณไนโตรเจน (%)	0.00	0.56	-



รูปที่ 4-12 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของวัสดุพอลิสไตรีนโฟม (หลังการทดลองในสภาวะมีออกซิเจน)

จากรูปที่ 4-13 แสดงถึงผลการวิเคราะห์ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุโฟมในสภาวะมีออกซิเจน ตลอดระยะเวลาทดลองพบว่าสามารถแบ่งผลการทดลองออกเป็นสองช่วงคือช่วงที่ค่าติดลบซึ่งหมายถึงน้ำหนักของวัสดุเพิ่มสูงขึ้นในช่วงครึ่งแรกของการทดลองคาดว่าเกิดจากการที่ภายในวัสดุมีช่องว่างอากาศ ทำให้สามารถดูดซับน้ำชะขยะเข้าไปภายในตัววัสดุได้ถึงแม้ว่าจะมีการทำให้แห้งก่อนนำไปชั่งน้ำหนักก็ตาม สำหรับช่วงที่ร้อยละของน้ำหนักลดลงเกิดจากการทดลองในสภาวะมีออกซิเจนซึ่งเป็นระบบเปิดสามารถเกิดหนอนแมลงวันได้ ซึ่งพบว่าหนอนสามารถกัดแทะชิ้นส่วนโฟมได้โดยเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ ทั้งนี้ส่งผลให้ไม่สามารถหาค่าน้ำหนักที่หายไปได้



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4-13 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมเมื่อทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจนเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์

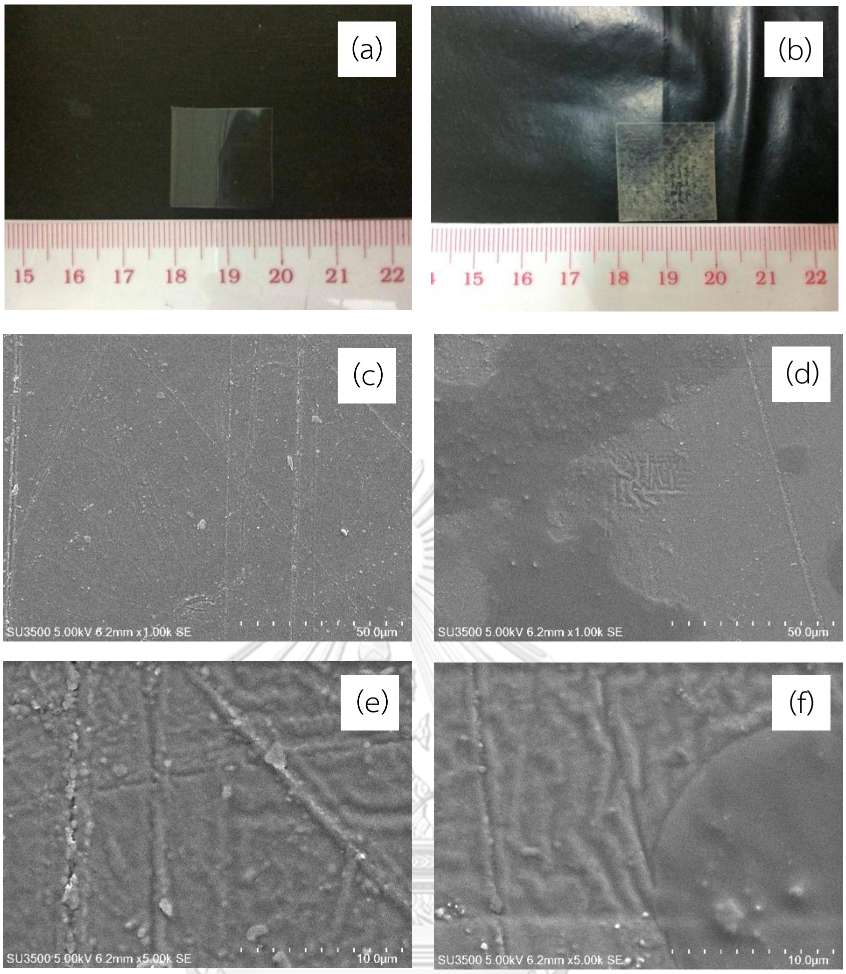
4.3.1.3 การย่อยสลายวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอในสภาวะมีออกซิเจน

การศึกษาการย่อยสลายวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอด้วยตาเปล่า พบว่าหลังการย่อยสลายวัสดุมีลักษณะคงเดิมไม่เปลี่ยนรูป พื้นผิวราบเรียบ แต่มีการเกาะติดของสิ่งแปลกปลอมบนพื้นผิว ดังรูปที่ 4-14(a) และ 4-14(b) เมื่อนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า พบว่าเกิดลักษณะคล้ายการบวมจากการซึมของน้ำ ส่วนพื้นผิวบริเวณอื่นไม่ได้ต่างจากก่อนการทดลอง เช่นเดียวกับที่กำลังขยาย 5000 เท่า ดังรูปที่ 4-14(c) 4-14(d) 4-14(e) และ 4-14(f) การ

ย่อยสลายวัสดุพีแอลเอในสภาวะมีออกซิเจนพบว่ามีลดลงของของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย ปริมาณคาร์บอน และไฮโดรเจนที่ร้อยละ 0.04 0.60 0.32 และ 0.55 ตามลำดับ ทั้งมีค่าร้อยละการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วง 0.99 ถึง 2.96 ดังแสดงในตาราง 4-9

จากรูปที่ 4-15 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอด้วย FTIR โดยพบพีคหลักที่แสดงถึงการดูดกลืนของพันธะ C – O ที่ความยาวคลื่น 1086.61 ต่อเซนติเมตร และพีคที่แสดงการยืดของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (Carbonyl group; C = O) ที่ความยาวคลื่น 1752.40 ต่อตารางเซนติเมตร ยังคงอยู่ นอกจากนี้ยังพบพีคในช่วงความยาวคลื่น 3300 – 2700 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นตัวชี้วัดถึงการยืดของพันธะ C – H ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าไม่เกิดการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของวัสดุพลาสติกชีวภาพชพีแอลเอเมื่อทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน และจากการวิเคราะห์ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปในสภาวะมีออกซิเจนของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอดังแสดงในรูปที่ 4-16 พบว่าค่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองเกิดการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 2.57 และค่า K ของการย่อยสลายวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอเท่ากับ 0.0006 ต่อสัปดาห์ ดังแสดงในรูปที่ 4-17

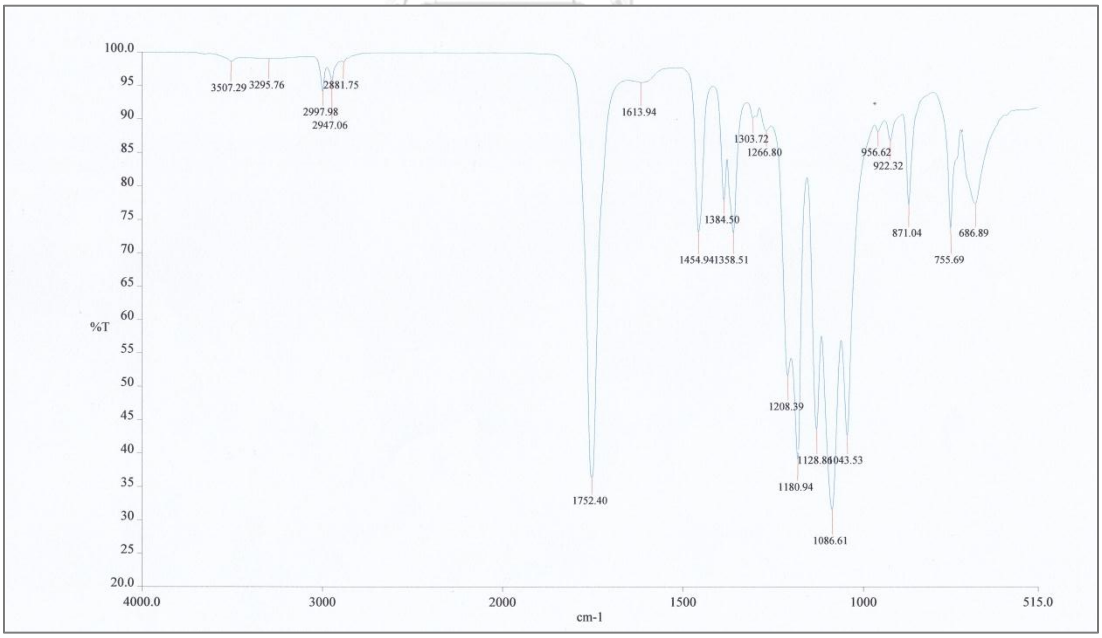
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



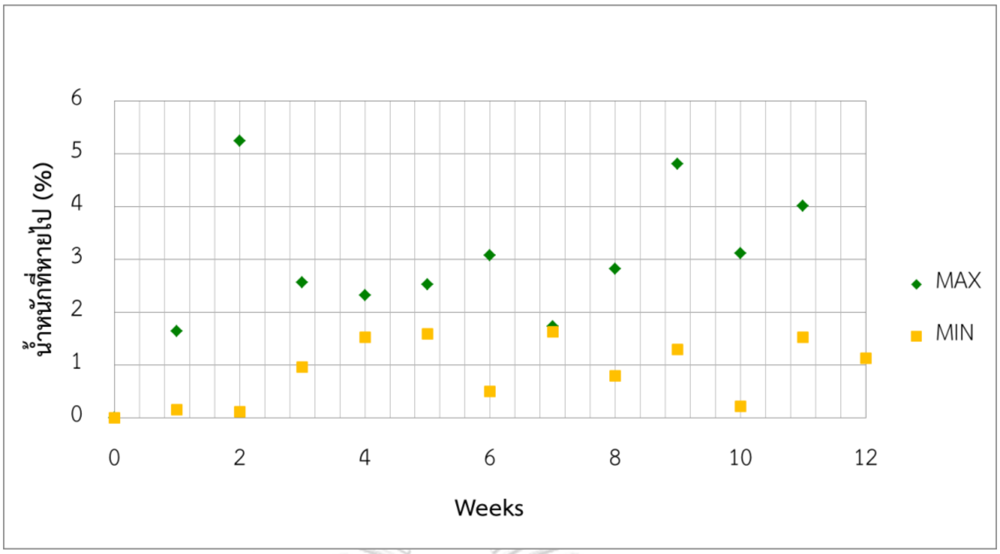
รูปที่ 4-14 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอในสภาวะมีออกซิเจน เมื่อมองด้วยตาเปล่า: (a) และ (b) ก่อนและหลังย่อยสลาย, ที่กำลังขยาย 1000 เท่า: (c) และ (d) ด้านบนก่อนและหลังย่อยสลาย, ที่กำลังขยาย 5000 เท่า: (e) และ (f) ก่อนและหลังย่อยสลาย

ตารางที่ 4-9 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอในการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน

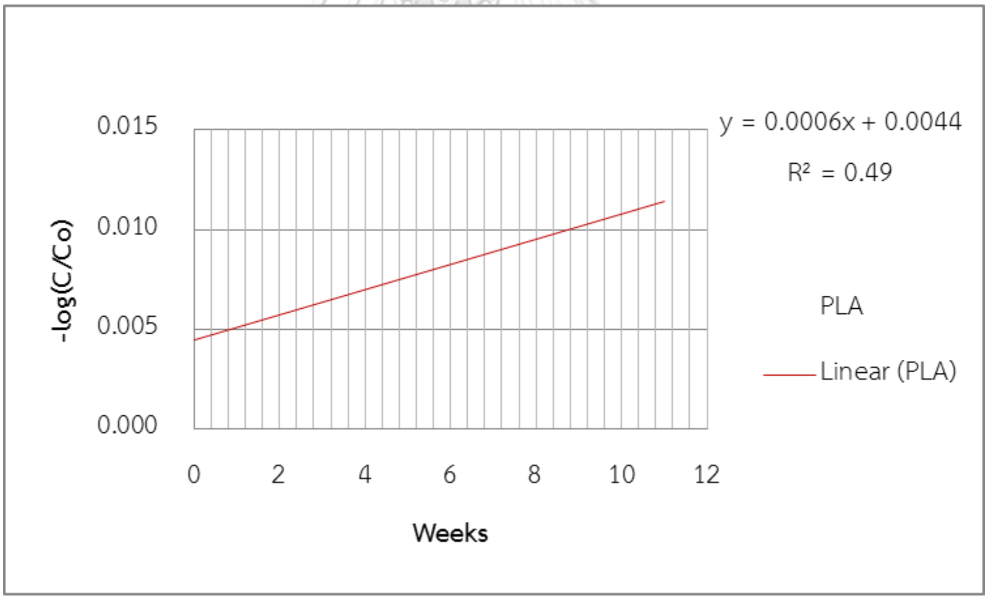
ตัวอย่าง	เริ่มต้นการทดลอง	สิ้นสุดการทดลอง	การเปลี่ยนแปลง (%)
ของแข็งทั้งหมด (%)	99.69	99.65	ลดลง 0.04
ความชื้น (%)	0.31	0.35	เพิ่มขึ้น 11.43
ของแข็งระเหย (%)	99.92	99.32	ลดลง 0.60
เถ้า (%)	0.08	0.68	เพิ่มขึ้น 88.24
ปริมาณคาร์บอน (%)	49.94	49.78	ลดลง 0.32
ปริมาณไฮโดรเจน (%)	5.49	5.46	ลดลง 0.55
ปริมาณไนโตรเจน (%)	0.00	0.00	-



รูปที่ 4-15 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของพลาสติกชีวภาพพีแอลเอด้วยเครื่อง FTIR
(หลังการทดลองในสภาวะมีออกซิเจน)



รูปที่ 4-16 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอเมื่อทดสอบการย่อยสลาย *ในสภาวะมีออกซิเจนเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์*



รูปที่ 4-17 ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอ (K) ในสภาวะมีออกซิเจน

4.3.2 การเปลี่ยนแปลงขยะสังเคราะห์ในสภาวะมีออกซิเจน

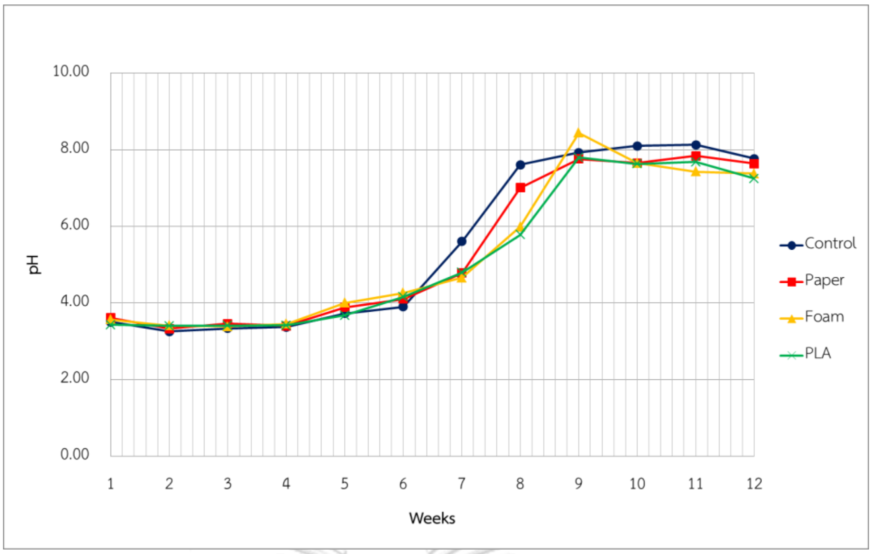
4.3.2.1 สมบัตินํ้าชะขยะในสภาวะมีออกซิเจน

1) ความเป็นกรดด่าง หรือค่าพีเอช (pH) และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชัน (ORP)

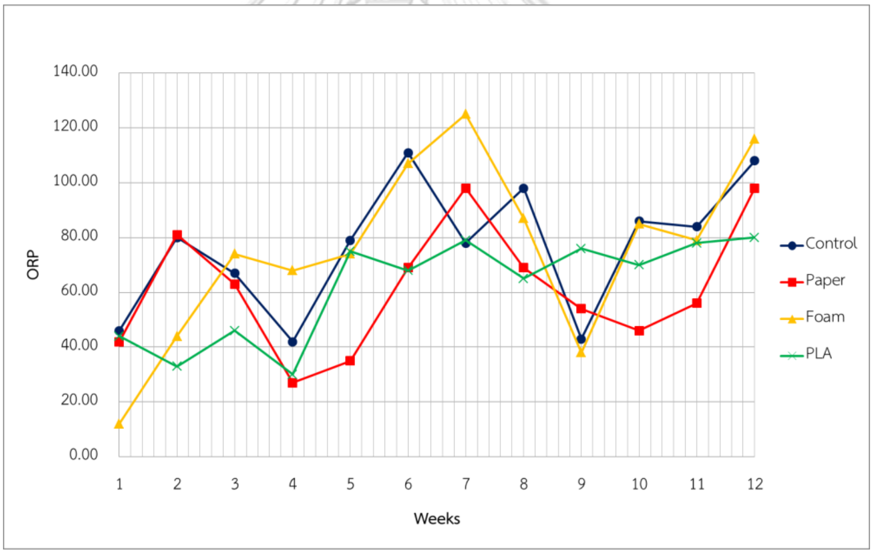
จากรูปที่ 4-18 ค่าพีเอชในทุกชุดการทดลองมีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้ง 3 ชนิดไม่มีผลต่อค่าพีเอช โดยชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยพีเอชตลอดการทดลองมากที่สุดเท่ากับ 5.56±2.00 ตามด้วยชุดวัสดุกระดาษ วัสดุพอลิสไตรีนโฟม และวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอโดยมีค่าเฉลี่ยเป็นร้อยละ 5.52±1.86 5.44±1.82 และ 5.38±1.84 ตามลำดับ โดยพีเอชมีค่าต่ำทำให้ระบบอยู่ในสภาวะเป็นกรด เนื่องจากการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เมื่อละลายกับน้ำจะส่งผลให้ความเป็นกรดสูงขึ้น (ชมพูนุช ชุ่มพุดซา, 2554) ทั้งนี้พบว่าพีเอชเริ่มเพิ่มสูงขึ้นในสัปดาห์ที่ 6 และคงที่ในสัปดาห์ที่ 9 ของการทดลอง ซึ่งเป็นผลจากการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นสารอนินทรีย์โดยค่าพีเอชค่อยๆเพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าพีเอชดังกล่าวเหมาะสมกับกิจกรรมของจุลินทรีย์ โดยอาจสัมพันธ์กับปริมาณแอมโมเนีย และกรดอินทรีย์ที่ลดลง (Mohee และคณะ, 2008)

สำหรับค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชัน (ORP) ของแต่ละชุดการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 76.83±23.63 61.50±22.88 75.75±32.76 และ 62.00±18.56 ในชุดควบคุม ชุดวัสดุกระดาษ ชุดพอลิสไตรีนโฟม และชุดวัสดุพีแอลเอตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าโออาร์พีมีค่าเป็นบวกตลอดการทดลองแสดงว่าในระบบคงอยู่ในสภาวะมีออกซิเจน ดังแสดงในรูปที่ 4-19

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4-18 ค่าความเป็นกรดด่างในสภาวะมีออกซิเจน

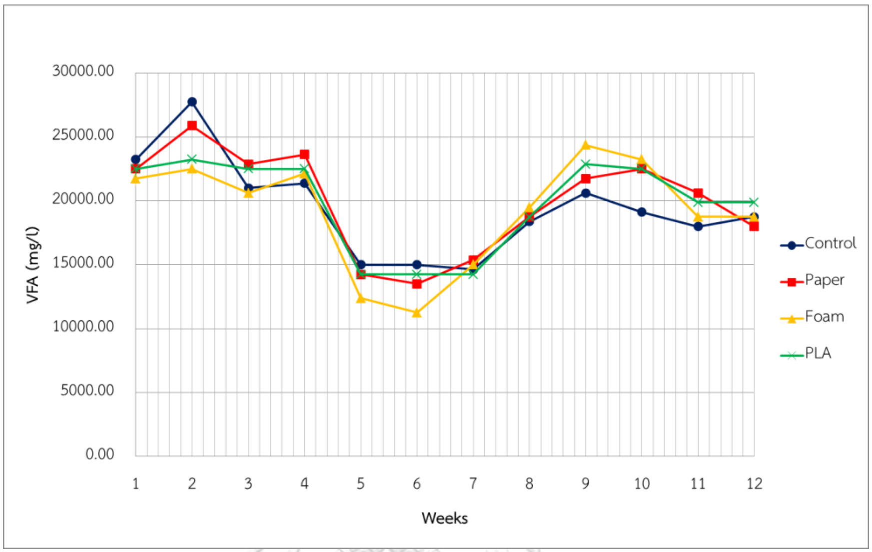


รูปที่ 4-19 ค่าโออาร์พีในสภาวะมีออกซิเจน

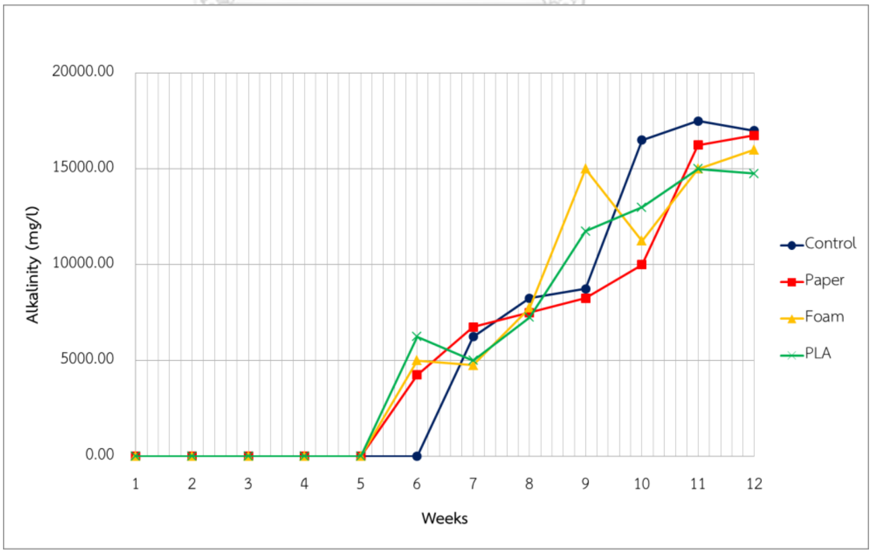
2) กรดอินทรีย์ระเหยง่าย และค่าความเป็นด่าง (VFA and Alkalinity)

ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายตลอดการทดลองอยู่ระหว่าง 14,625 – 27,750 13,500 – 25,875 11,250 – 24,375 และ 14,250 – 23,250 มิลลิกรัมต่อลิตร ในชุดควบคุม ชุดย่อยสลายวัสดุกระดาษ วัสดุโฟม และวัสดุพีแอลเอตามลำดับ ส่วนค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) อยู่ระหว่าง 0 –

17,500 0 – 16,750 0 – 16,000 0 – 15,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในชุดควบคุม ชุดย่อยสลายวัสดุกระดาษ วัสดุโฟม และวัสดุพีแอลเอตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4-20 และ 4-21 โดยในช่วงแรกการทดลองไม่พบค่าความเป็นด่างเนื่องจากมีเกิดกรดมากในระบบอันเป็นผลจากการย่อยสลายที่เกิดขึ้น จากนั้นค่าเริ่มเพิ่มขึ้นในช่วงที่ปริมาณกรดลดลงในสัปดาห์ที่ 5



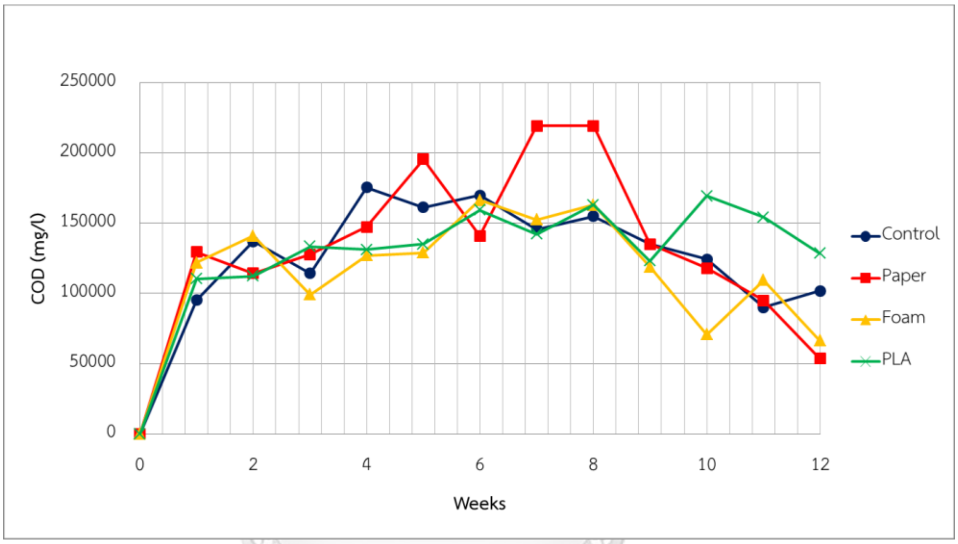
รูปที่ 4-20 ค่ากรดระเหยง่ายในสภาวะมีออกซิเจน



รูปที่ 4-21 ค่าปริมาณด่างในสภาวะมีออกซิเจน

3) ค่าซีโอดี (COD)

ค่าซีโอดีเป็นตัวแปรที่แสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยในชุดควบคุม ชุดวัสดุกระดาษ วัสดุโฟม และวัสดุพีแอลเอมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 90,000 – 175,462 53,571.43 – 219,280.58 66,428.57 – 166,330.94 และ 110,476.19 – 169,285.71 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4-22 ซึ่งใกล้เคียงกันในทุกชุดการทดลอง โดยมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและมีแนวโน้มลดต่ำลงเมื่อใกล้สิ้นสุดการทดลอง



รูปที่ 4-22 ค่าซีโอดีในสภาวะมีออกซิเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.3.2.2 สมบัติขยะเศษอาหารในสภาวะมีออกซิเจน

เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าในทุกชุดการทดลองปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหยมีค่าลดลง โดยในชุดควบคุมมีค่าลดลงร้อยละ 32.74 และ 83.71 ตามลำดับ ชุดวัสดุกระดาษมีค่าลดลงร้อยละ 35.26 และ 83.62 ตามลำดับ ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟมมีค่าลดลงร้อยละ 32.37 และ 82.59 ตามลำดับ ชุดวัสดุพีแอลเอมีค่าลดลงร้อยละ 31.71 และ 82.83 ตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่าวัสดุที่นำไปทดสอบไม่มีผลต่อการย่อยสลายขยะเศษอาหาร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมีค่าใกล้เคียงกันกับชุดการทดลองควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 4-10

ตารางที่ 4-10 สมบัติขยะเศษอาหารเมื่อสิ้นสุดการทดลองในสภาวะมีออกซิเจน

ตัวอย่าง	ตัวชี้วัด			
	ของแข็งทั้งหมด (%)	ความชื้น (%)	ของแข็งระเหย (%)	เถ้า (%)
เริ่มต้นการทดลอง	**24.16**	**75.84**	**98.43**	**1.57**
สิ้นสุดการทดลอง				
ชุดควบคุม	16.25	83.75	16.03	83.97
ชุดวัสดุกระดาษ	15.64	84.36	16.12	83.88
ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม	16.34	83.66	17.14	82.86
ชุดวัสดุพีแอลเอ	16.50	83.50	16.90	83.10

4.4 การทดลองที่ 3 ผลทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน

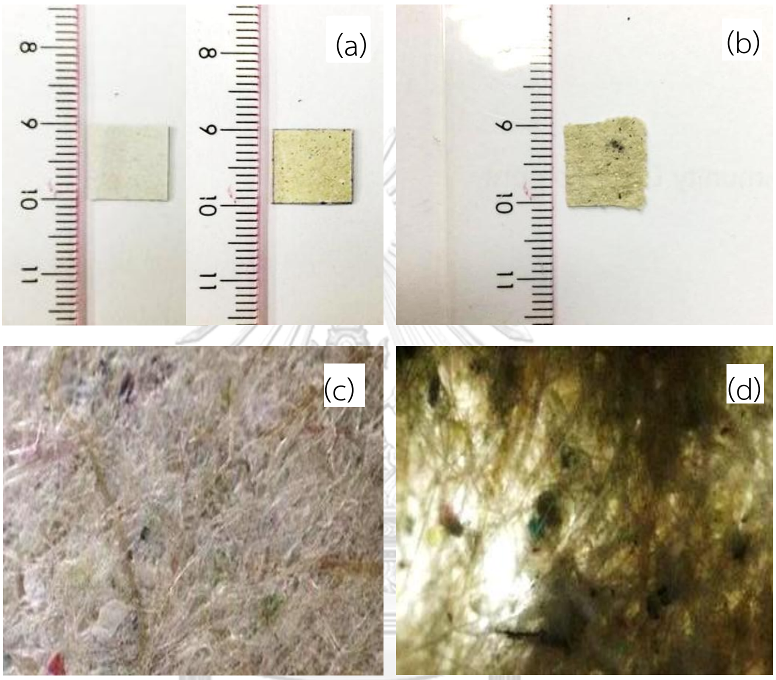
4.4.1 การเปลี่ยนแปลงวัสดุทดสอบในสภาวะไร้ออกซิเจน

4.4.1.1 การย่อยสลายวัสดุกระดาษในสภาวะไร้ออกซิเจน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุกระดาษเมื่อนำไปทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน พบว่าหลังย่อยสลายเป็นเวลา 12 สัปดาห์ (90 วัน) วัสดุมีลักษณะเปื่อยยุ่ยส่วนที่เคลือบด้วยสีขาวหลุดลอกเหลือเฉพาะส่วนสีเป็นที่น้ำตาลที่คาดว่าคือส่วนที่เป็นเส้นใย เมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าดังรูปที่ 4-23(a) และ 4-23(b) และเมื่อพิจารณาที่ภาพกำลังขยาย 50 เท่าในรูปที่ 4-23(c) และ 4-23(d) พบว่าก่อนการย่อยสลายกระดาษมีลักษณะคล้ายเส้นใยเล็กๆ ถูกเคลือบอัดเป็นแผ่น และหลังการย่อยสลายจะสังเกตเห็นเส้นใยชัดเจนขึ้น เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของกระดาษพบว่าประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นเส้นใย (Fibrous material) ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างของแผ่นกระดาษ และส่วนที่ไม่ใช่เส้นใย (Nonfibrous material) ซึ่งเป็นสารเติมแต่งใช้เติมผสมลงไปในส่วนเส้นใยเพื่อปรับปรุงสมบัติ โดยเฉพาะวัสดุกระดาษที่มีการสัมผัสกับอาหารโดยตรงจะต้องมีการเคลือบสารจำพวกแว็กซ์หรือเรซิ่นเพื่อเป็นการปรับปรุงสมบัติให้มีสมบัติในการป้องกันการเสื่อมสภาพจากปัจจัยต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิ ความชื้น น้ำมันหรือไขมัน ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

งาน (Marsh และ Bugusu, 2007) ดังนั้นเมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายคาดว่าสิ่งที่หายไปจากการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนคือสารเติมแต่งที่ใส่เข้าไปเพื่อเพิ่มคุณสมบัติด้านการยึดเกาะเส้นใยให้แก่กระดาษ ส่วนที่เป็นเส้นใยที่ย่อยสลายยากโดยในที่นี้อาจเป็นลิกนินซึ่งถือเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยสลายกระดาษ (Wang และคณะ, 2015)



รูปที่ 4-23 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของวัสดุกระดาษในสภาวะไร้ออกซิเจน
(a) วัสดุกระดาษก่อนย่อยสลายเมื่อมองด้วยตาเปล่าด้านหน้าและด้านหลัง (b) วัสดุกระดาษหลังย่อยสลายเมื่อมองด้วยตาเปล่า (c) วัสดุกระดาษก่อนย่อยสลายที่กำลังขยาย 50 เท่า และ
(d) วัสดุกระดาษหลังย่อยสลายที่กำลังขยาย 50 เท่า

เมื่อศึกษาสมบัติทางเคมีของวัสดุกระดาษหลังการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนพบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และของแข็งระเหย (VS) มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.23 และ 4.81 ตามลำดับ สอดคล้องกับปริมาณคาร์บอน และไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นอีกร้อยละ 11.01 และ 8.33 ตามลำดับ ทั้งนี้ยังพบไนโตรเจนร้อยละ 0.24 เมื่อสิ้นสุดการทดลองอีกด้วย นอกจากนี้ข้อมูลจากตารางที่ 4-11 แสดงให้เห็นถึงปริมาณเถ้าหรือสารอนินทรีย์ที่ลดลงร้อยละ 30.36 และเมื่อพิจารณา

ร่วมการสันนิษฐานผลทางกายภาพข้างต้นที่ระบุว่าสิ่งที่หายไปในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนคือสารเติมแต่ง ซึ่งมีหลายรูปแบบสารเติมแต่งหลักๆที่พบคือ สารเติมแต่งแบบเปียกและเติมเข้าไปผสมกับเส้นใย (Wet End Addition) ส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์ เช่น ดินขาว (Clay or Kaolin) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) เป็นต้น ซึ่งสารพวกนี้มีวัตถุหลักเพื่อไปปิดช่องว่างและเชื่อมระหว่างเส้นใย โดยมีอัตราส่วนถึงร้อยละ 40 ในกระดาษ (Rawski และ Bhuiyan, 2017) จึงเป็นไปได้ว่าสารอนินทรีย์ที่หายไปสารเป็นเติมแต่งหรือเถ้านั่นเอง

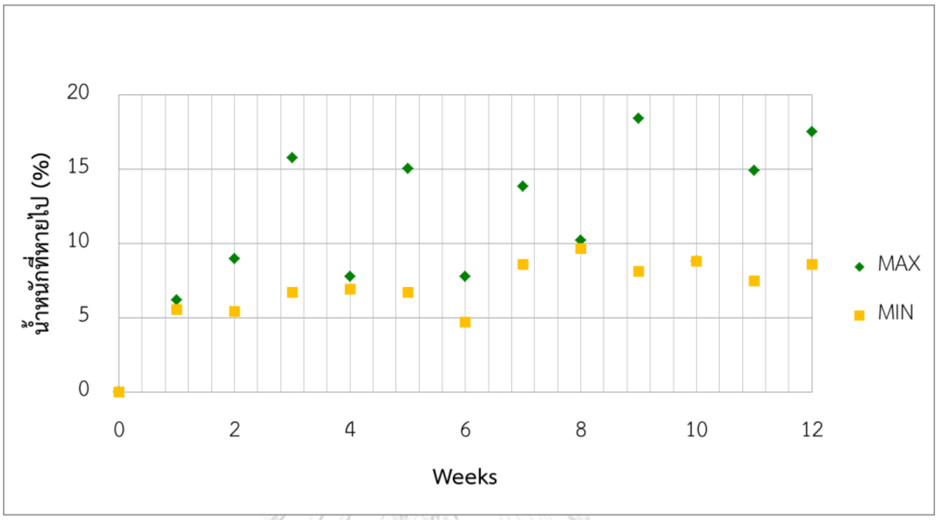
ตารางที่ 4-11 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุกระดาษในการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน

ตัวอย่าง	เริ่มต้นการทดลอง	สิ้นสุดการทดลอง	การเปลี่ยนแปลง (%)
ของแข็งทั้งหมด (%)	95.34	96.53	เพิ่มขึ้น 1.23
ความชื้น (%)	4.66	3.47	ลดลง 25.54
ของแข็งระเหย (%)	85.74	90.07	เพิ่มขึ้น 4.81
เถ้า (%)	14.26	9.93	ลดลง 30.36
ปริมาณคาร์บอน (%)	37.19	42.13	เพิ่มขึ้น 11.01
ปริมาณไฮโดรเจน (%)	5.50	6.00	เพิ่มขึ้น 8.33
ปริมาณไนโตรเจน (%)	0.00	0.24	-

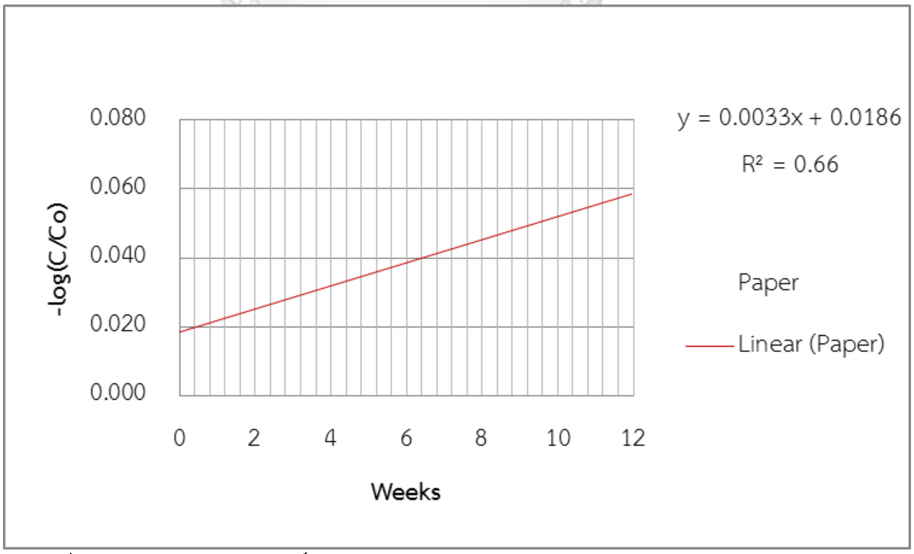
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จากการวิเคราะห์ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปดังแสดงในรูปที่ 4-24 พบว่าค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ทั้งนี้ค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุกระดาษสูงสุดเมื่อสิ้นสุดการทดลองในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงร้อยละ 8.58 – 17.54 ซึ่งต่างจากงานวิจัยของ Yuan และคณะ (2012) ที่มีค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปเป็น 49.7 ในระยะเวลา 20 วัน เนื่องจากมีการบำบัดเบื้องต้น (Pretreatment) ด้วยจุลินทรีย์ก่อนการทดลองทำให้กระดาษเกิดการย่อยสลายมากขึ้น โดยองค์ประกอบหลักของกระดาษอย่างลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสต้องการการบำบัดขั้นต้นเพื่อความสามารถในการย่อยสลายไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของวัสดุ การลดความเป็นระเบียบของโครงสร้างเซลลูโลส (Decrystallization) การกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ด้วยการบด ปรับ

สภาพด้วยกรดอนินทรีย์ น้ำอุณหภูมิสูง และใช้สารละลายด่างความเข้มข้นสูง (Yang และคณะ, 2015) ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายวัสดุกระดาษ (K) ในสภาวะไร้ออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 0.003 ต่อสัปดาห์ ดังแสดงในรูปที่ 4-25



รูปที่ 4-24 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุกระดาษเมื่อทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์



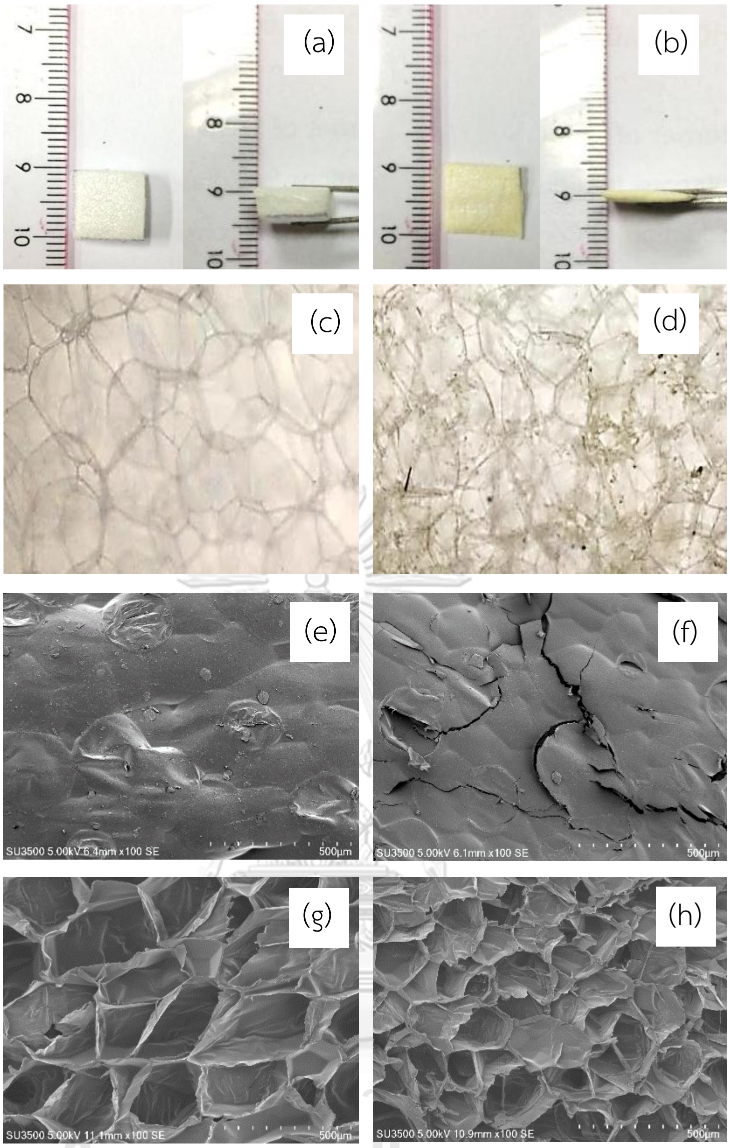
รูปที่ 4-25 ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายวัสดุกระดาษ (K) ในสภาวะไร้ออกซิเจน

4.4.1.2 การย่อยสลายวัสดุพอลิสไตรีนโฟมในสภาวะไร้ออกซิเจน

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมเมื่อนำไปทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนเป็นเวลา 12 สัปดาห์ (90 วัน) พบว่าด้านข้างของวัสดุด้วยมีลักษณะคล้ายฟองอากาศเล็กๆ ความหนาวัสดุประมาณ 4 มิลลิลิตร และความหนาลดลงเมื่อเกิดสิ้นสุดการทดลองเหลือ 1 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 4-26(a) และ 4-26(b) เช่นเดียวกันที่กำลังขยาย 50 เท่า พบว่าช่องว่างอากาศภายในวัสดุพอลิสไตรีนโฟมมีขนาดเล็กลง และพบว่ามีสิ่งแปลกปลอมอยู่ภายใน ดังรูปที่ 4-26(c) และ 4-26(d) เมื่อพิจารณาการกระบวนการผลิตพบว่าโฟมบรรจุอาหารเป็นโฟมประเภทพีเอสพี (PSP ; Polystyrene Paper) คือพอลิสไตรีนโฟมที่ใช้ก๊าซบิวเทน (Butane ;C_4H_{10}) เป็นสารที่ทำให้ขยายตัว จึงเป็นไปได้ว่าการย่อยสลายทำให้ผนังภายในโฟมเกิดการเสียหายจนเกิดช่องว่างทำให้สามารถเกิดการดูดซับหรือเกาะติดของสิ่งปฏิกูลจากสภาวะการทดสอบ

ทั้งนี้เมื่อนำวัสดุไปส่องพื้นผิวด้านบนที่กำลังขยาย 100 เท่า (รูปที่ 4-26(e) และ 4-26(f)) พบว่าก่อนการย่อยสลายพื้นผิววัสดุโดยรวมมีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกันรวมถึงสังเกตเห็นร่องรอยของช่องว่างของโฟมแต่มีพื้นผิวตรงช่องว่างบางส่วนที่แตกออก และเมื่อหลังการย่อยสลายสังเกตเห็นการปริแตกออกของพื้นผิวโฟมอย่างชัดเจน ในขณะที่มุมด้านข้างของวัสดุที่กำลังขยาย 100 เท่า พบว่ารูปที่ 4-26(g) ก่อนการทดลองมีช่องว่างภายในที่ใหญ่กว่าและช่องว่างนั้นจะเล็กลงเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ดังแสดงในภาพ 4-26(h)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4-26 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมก่อนการย่อยสลาย ; (a) มองด้วยตาเปล่า (c) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (e) พื้นผิวที่กำลังขยาย 100 เท่า (g) ด้านข้างที่กำลังขยาย 100 เท่า และหลังการย่อยสลาย ; (b) มองด้วยตาเปล่า (d) พื้นผิวที่กำลังขยาย 50 เท่า (f) พื้นผิวที่กำลังขยาย 100 เท่า (h) ด้านข้างที่กำลังขยาย 100 เท่า

จากตารางที่ 4-12 แสดงให้เห็นว่าวัสดุพอลิสไตรีนโฟมมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งทั้งหมดน้อยมากหรือแทบไม่เปลี่ยนแปลงเลยโดยเมื่อเริ่มต้นการทดลองมีปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ที่ร้อยละ 99.88 และร้อยละ 98.77 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง คือลดลงเพียงร้อยละ 1.11 สอดคล้องกับปริมาณคาร์บอนลดลงร้อยละ 5.97 ส่วนปริมาณเถ้าหรือสารอนินทรีย์มีค่าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 88.04

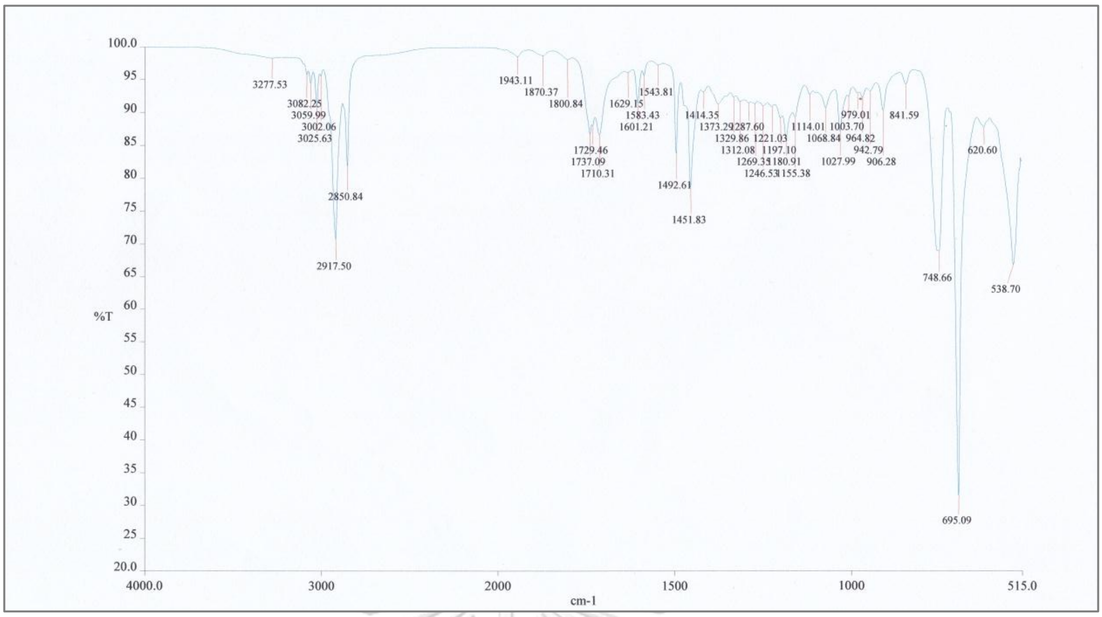
ดังนั้นคาดว่าเนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอมไปปะปนอยู่ภายในโฟมดังรูปที่ 4-22

รูปที่ 4-27 แสดงผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของโฟมด้วยเทคนิค FTIR หลังการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของหมู่ฟังก์ชัน โดยหมู่ฟังก์ชันหลักของโครงสร้างวงแหวนเบนซีนที่ความยาวคลื่น 695 ต่อเซนติเมตรยังคงอยู่ เช่นเดียวกับการสั่นของพันธะ C-H ที่เกิดพีคที่ความยาวคลื่น 2800 – 2900 ต่อเซนติเมตร ทั้งนี้พบพีคที่เพิ่มขึ้นมาหลังการทดสอบในช่วงความยาวคลื่น 1710 ต่อเซนติเมตร แสดงถึงพันธะ C=O ซึ่งเมื่อเกิดร่วมกับพีคที่ความยาวคลื่น 3277 ต่อเซนติเมตรของพันะ O-H แสดงให้เห็นว่าพบกรดคาร์บอกซิลิกเพิ่มเข้ามาหลังการทดลอง ทั้งนี้มีการพบพีค ณ จุดเดิมกับผลการทดลองก่อนการย่อยสลายอีกด้วยโดยพีคดังกล่าวความเข้มสูงกว่า แต่เนื่องจากการวิเคราะห์ FTIR ให้ผลในรูปเชิงคุณภาพเท่านั้นจึงไม่สามารถระบุความเข้มข้นได้ (สมเดช กนกเมธากุล, 2547)

ตารางที่ 4-12 การเปลี่ยนแปลงสมบัติของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมในการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน

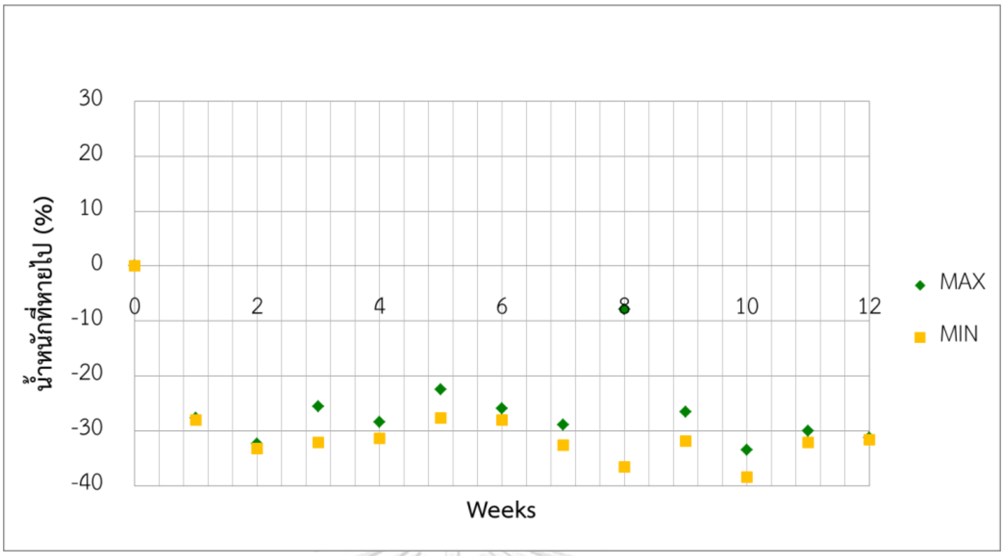
ตัวอย่าง	เริ่มต้นการทดลอง	สิ้นสุดการทดลอง	การเปลี่ยนแปลง (%)
ของแข็งทั้งหมด (%)	99.88	98.77	ลดลง 1.11
ความชื้น (%)	0.12	0.25	เพิ่มขึ้น 52
ของแข็งระเหย (%)	99.75	97.70	ลดลง 2.06
เถ้า (%)	0.25	2.09	เพิ่มขึ้น 88.04
ปริมาณคาร์บอน (%)	92.10	86.60	ลดลง 5.97
ปริมาณไฮโดรเจน (%)	7.47	8.07	เพิ่มขึ้น 7.43
ปริมาณไนโตรเจน (%)	0.00	0.12	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

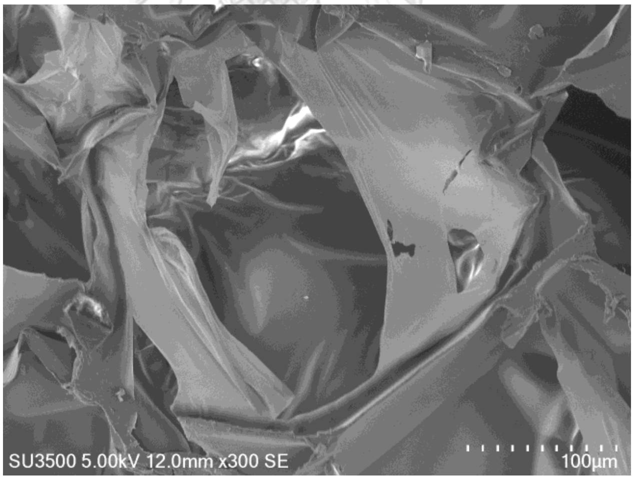


รูปที่ 4-27 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของวัสดุพอลิสไตรีนโฟม (หลังการทดลองในสภาวะไร้ออกซิเจน)

จากรูปที่ 4-28 แสดงถึงผลการวิเคราะห์ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุโฟมในสภาวะไร้ออกซิเจนพบว่ามีค่าติดลบตลอดการทดลองซึ่งหมายถึงน้ำหนักของวัสดุเพิ่มสูงขึ้น แม้จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพอย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือเกิดการลีบแบนของวัสดุซึ่งน่าจะมาจากการเสียหายของผนัง (รูปที่ 4-29) แต่สาเหตุที่ไม่ทำให้น้ำหนักของวัสดุลดลงเนื่องจากมีสิ่งแปลกปลอมปะปนที่คาดว่าเป็นสารอนินทรีย์ที่เผาไหม้ไม่ได้มาอยู่ภายในช่องว่างของวัสดุ ทั้งนี้จากงานวิจัยของ ฤกษ์ฤทธิ์ เคนหาราช (2544) พบว่าโฟมไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ไม่ว่าจะเป็นการนำไปฝังดิน หรือทิ้งในแหล่งน้ำ แต่จะสามารถสลายตัวได้ด้วยแสงในสภาวะธรรมชาติ (ฤกษ์ฤทธิ์ เคนหาราช, 2544) เช่นเดียวกับงานวิจัยนี้ที่พบว่าโฟมไม่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพในสภาวะไร้อากาศที่ทำการทดลอง แต่พิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพกลับพบการลีบแบนลงของโฟมอันจากการเสียหายของผนังวัสดุ ซึ่งเมื่อพิจารณาสมบัติทางเคมีพบว่าปริมาณเถ้า เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันกับน้ำหนักของวัสดุ สารอนินทรีย์ในองค์ประกอบน้ำชะขยะอาจจะเข้าไปในตัววัสดุได้มากขึ้นเมื่อผนังกั้นภายในวัสดุถูกทำลายทำให้เกิดช่องว่างมากขึ้น



รูปที่ 4-28 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุพอลิสไตรีนโฟมเมื่อทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์

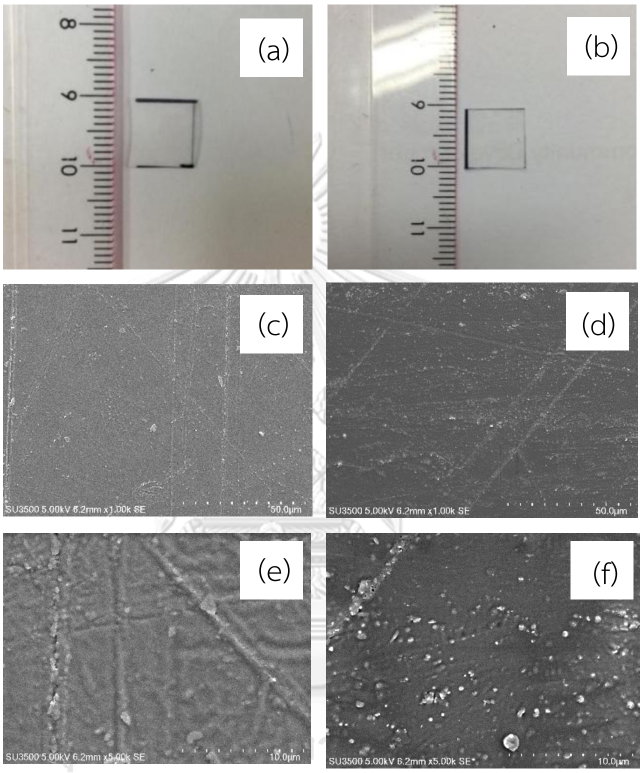


รูปที่ 4-29 แสดงผนังที่เสียหายของวัสดุพอลิสไตรีนโฟม

4.4.1.3 การย่อยสลายวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอในสภาวะไร้ออกซิเจน

การศึกษาการย่อยสลายวัสดุพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอด้วยตาเปล่า พบว่าหลังการย่อยสลายวัสดุมีลักษณะคงเดิมไม่เปลี่ยนรูป พื้นผิวราบเรียบ ไม่พบการเปลี่ยนแปลงที่กำลังขยายนี้ดังแสดงในรูปที่ 4-30(a) และ 4-30(b) เช่นเดียวกับการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง

กราดที่กำลังขยาย 1000 เท่า วัสดุพีแอลเอหลังการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนพื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้น ประกอบกับที่ภาพถ่ายกำลังขยาย 5000 เท่า ปรากฏรูพรุนบนพื้นผิววัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 4-30(c) 4-30(d) 4-30(e) และ 4-30(f) แสดงให้เห็นว่าพลาสติกชีวภาพพีแอลเอเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพแต่เกิดขึ้นในระดับน้อยมาก



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 4-30 ลักษณธทางกายภาพของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอก่อนการย่อยสลาย ;
(a) มองด้วยตาเปล่า (c) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (e) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า และหลังการย่อยสลาย;
(b) มองด้วยตาเปล่า (c) ที่กำลังขยาย 1000 เท่า (e) ที่กำลังขยาย 5000 เท่า

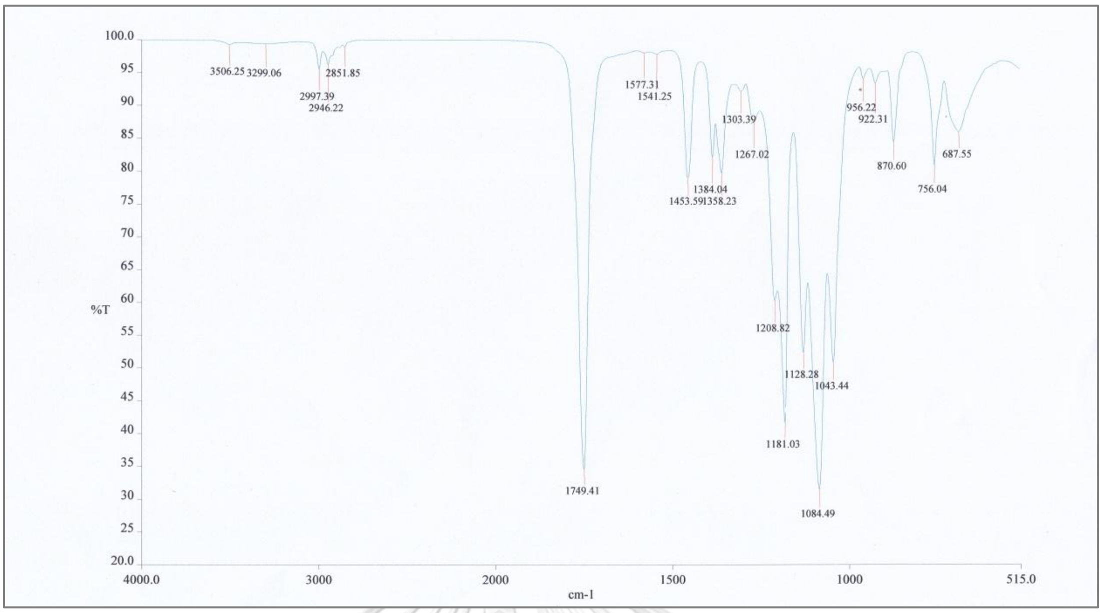
การย่อยสลายวัสดุพีแอลเอในสภาวะไร้ออกซิเจนพบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดมีค่าลดลงเช่นเดียวกับปริมาณของแข็งระเหย ปริมาณคาร์บอน และไนโตรเจนที่ร้อยละ 1.29 0.45 0.56 และ 0.55 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าเกิดการเปลี่ยนในระดับเคมีน้อยมากสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ FTIR ที่เมื่อทำการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ของพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอด้วย FTIR พบว่าไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหมู่ฟังก์ชันของวัสดุ โดยสังเกตได้จากพีคหลักที่บ่งบอกถึงความเป็นพีแอลเออย่างพีค

ในช่วงความยาวคลื่น 1084 ต่อตารางเซนติเมตร ที่แสดงถึงการดูดกลืนของพันธะ C – O และพีคที่เกิดความยาวคลื่น 1749 ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงการดูดกลืนหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (C = O) ทั้งยังพบพันธะ C – H และ O – H ที่ช่วงความยาวคลื่น 2851 – 2997 และ 3299 – 3506 ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4-31

ตารางที่ 4-13 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอในการทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน

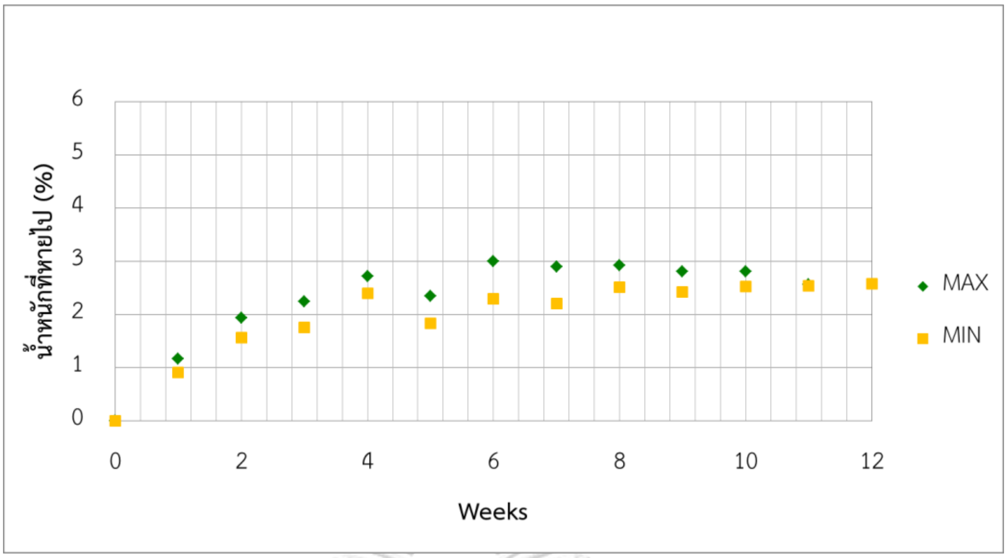
ตัวอย่าง	เริ่มต้นการทดลอง	สิ้นสุดการทดลอง	การเปลี่ยนแปลง (%)
ของแข็งทั้งหมด (%)	99.69	99.64	ลดลง 1.29
ความชื้น (%)	0.31	0.36	เพิ่มขึ้น 13.88
ของแข็งระเหย (%)	99.92	99.47	ลดลง 0.45
เถ้า (%)	0.08	0.53	เพิ่มขึ้น 84.91
ปริมาณคาร์บอน (%)	49.94	49.66	ลดลง 0.56
ปริมาณไฮโดรเจน (%)	5.49	5.46	ลดลง 0.55
ปริมาณไนโตรเจน (%)	0.00	0.00	-

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

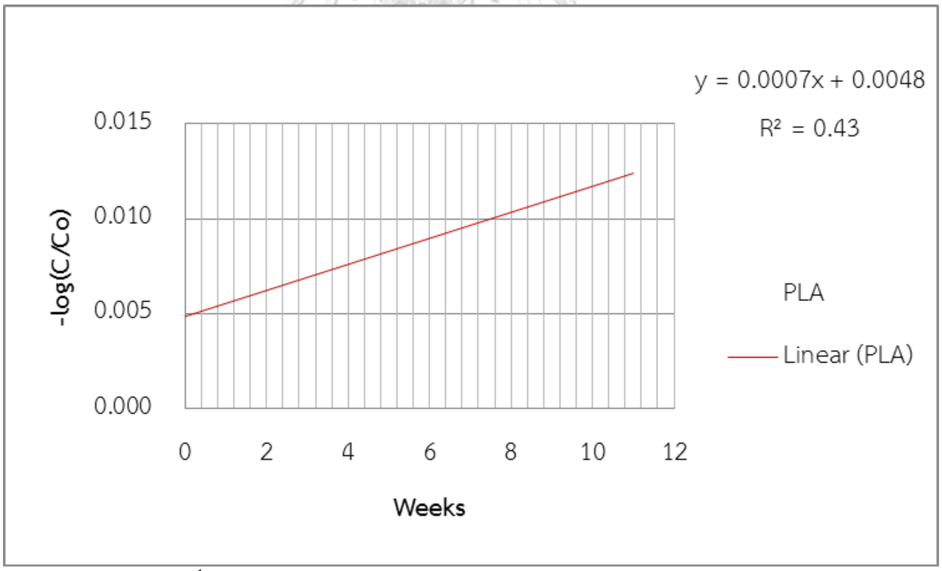


รูปที่ 4-31 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเครื่อง FTIR ของวัสดุพอลิสไตรีนโฟม
(หลังการทดลองในสภาวะไร้ออกซิเจน)

จากการวิเคราะห์ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปในสภาวะไร้ออกซิเจนของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอดังแสดงในรูปที่ 4-32 พบว่าค่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยโดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองเกิดการสูญเสียน้ำหนักอยู่ในช่วงร้อยละ 2.57 - 2.59 โดยค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอ (K) ในสภาวะไร้ออกซิเจนมีค่าเท่ากับ 0.0007 ต่อสัปดาห์ ดังแสดงรูปที่ 4-33 ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Massardier-Nageotte V. และคณะ (2009) ที่ทำการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มพอลิเมอร์ โดยพบว่าพีแอลไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในระยะเวลาทดลอง 28 วัน (Massardier-Nageotte และคณะ, 2006) ทั้งนี้ร้อยละน้ำหนักที่หายไปเป็นตัวชี้วัดหนึ่งที่สามารถใช้ประกอบการศึกษาการย่อยสลายได้ โดยหากอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมพีแอลเอสามารถย่อยสลายได้สูงถึงร้อยละ 100 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (สาธินี ศิริวัฒน์, 2553) โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อการทดลองเป็นอย่างมากคืออุณหภูมิ เนื่องจากผู้วิจัยทำการทดลองที่อุณภูมิห้องเช่นเดียวกับ งานวิจัยของ Massardier-Nageotte และคณะ (2009) ที่ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4-32 ร้อยละของน้ำหนักที่หายไปของวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอเมื่อทดสอบการย่อยสลาย *ในสภาวะไร้ออกซิเจนเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์*



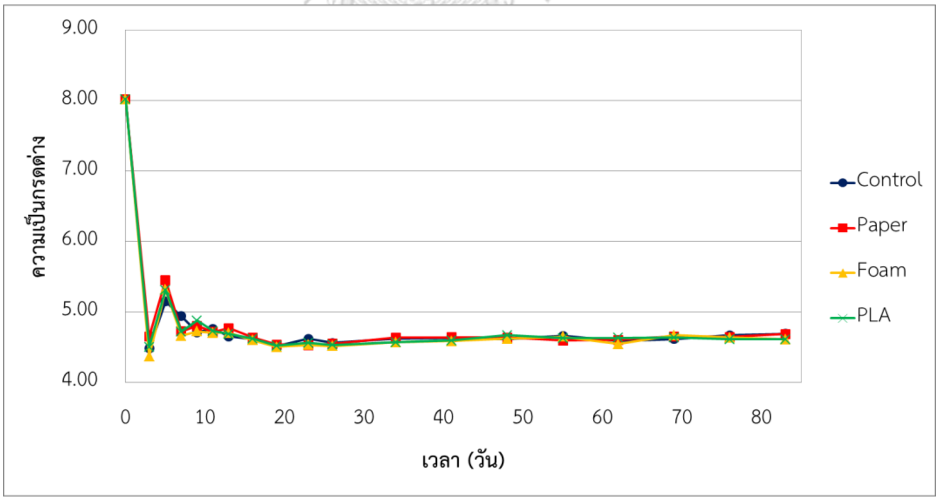
รูปที่ 4-33 ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอ (K) ในสภาวะไร้ออกซิเจน

4.4.2 การเปลี่ยนแปลงขยะสังเคราะห์ในสภาวะไร้ออกซิเจน

4.4.2.1 สมบัติน้ำชะขยะในสภาวะไร้ออกซิเจน

1) ความเป็นกรดด่าง หรือค่าพีเอช (pH)

จากรูปที่ 4-34 ค่าพีเอชในทุกชุดการทดลองมีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าวัสดุทั้ง 3 ชนิดไม่มีผลต่อค่าพีเอชแต่ตัวที่ส่งผลต่อค่าพีเอชคือขยะเศษอาหาร เนื่องจากค่าจากทุกชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุมมาก โดยในวันที่ 0 ค่าพีเอชอยู่ที่ 8.02 เนื่องจากมีการเติมสารละลายบัฟเฟอร์เมื่อเริ่มต้นการทดลอง จากนั้นค่าลดลงอยู่ที่ประมาณ 4 จนสิ้นสุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าภายในระบบอยู่ในระยะเกิดกรด (Acid formation phase) ซึ่งเป็นระยะที่เกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนและจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เพิ่มมากขึ้น โดยระยะนี้จุลินทรีย์กลุ่มไม่ผลิตมีเทน (Non - methanogenic) จะมีบทบาทมากกว่าเนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทน (Methanogenic microorganism) จะทำงานได้ดีที่ค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วง 6.5 - 8.2 (Lee และคณะ, 2009)

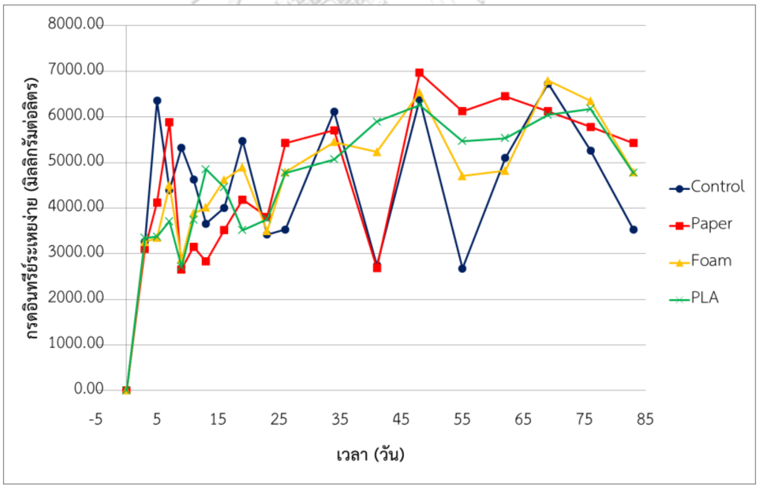


รูปที่ 4-34 ค่าความเป็นกรดด่างในสภาวะไร้ออกซิเจน

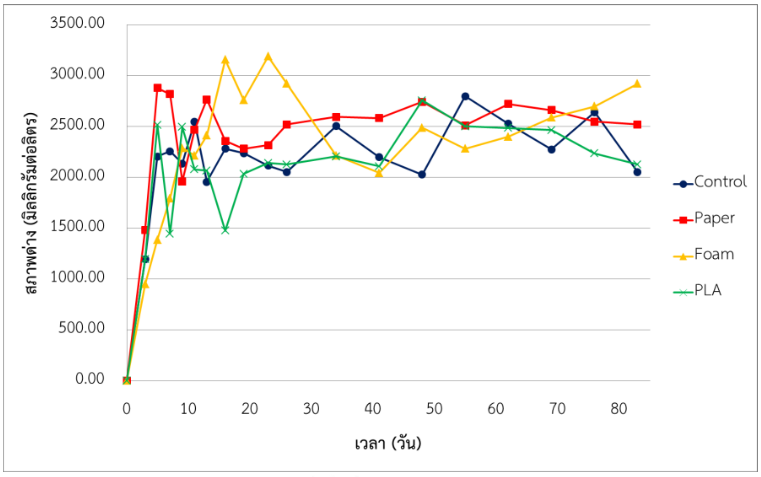
2) กรดไขมันระเหยง่าย และค่าความเป็นด่าง (VFA and Alkalinity)

กรดไขมันระเหยง่ายหรือ VFA แสดงถึงปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยที่ละลายอยู่ในน้ำชะขยะ ซึ่งเกิดจากกระบวนการในระยะเกิดกรด (Acid formation phase) ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง โดยเมื่อพิจารณาพบว่าทุกชุดการทดลองมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายอยู่ระหว่าง

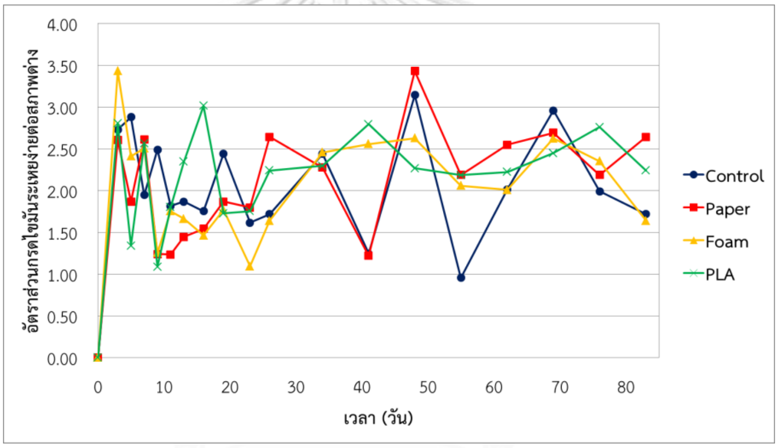
2,675 – 6,731.25 2,655 – 6,966.67 2,875 – 6,793 และ 2,715 – 6,258 มิลลิกรัมต่อลิตร ในชุดควบคุม ชุดย่อยสลายวัสดุกระดาษ วัสดุโฟม และวัสดุพีแอลเอตามลำดับ จากรูปที่ 4-35 แสดงให้เห็นว่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายมีค่าเพิ่มสูงในช่วงแรกและเริ่มลดลงในช่วงสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่ทำให้เราทราบว่าระบบย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนยังอยู่ในระยะเกิดกรดแต่กำลังจะเข้าสู่ระยะเกิดมีเทน (Methane fermentation phase) สำหรับค่าความเป็นด่างมีค่าอยู่ระหว่าง 1,195 – 2,800 1,483.33 – 2,879.17 950 – 3,191.67 และ 1,193.33 – 2,758.33 มิลลิกรัมต่อลิตร ในชุดควบคุม ชุดย่อยสลายวัสดุกระดาษ วัสดุโฟม และวัสดุพีแอลเอตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4-36 ทั้งนี้ระบบไร้อากาศควรมีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อค่าความเป็นด่างน้อยกว่า 0.4 และหากมีค่ามากกว่า 0.8 ค่าความเป็นกรดด่างจะลดลงอย่างรวดเร็ว (มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) สำหรับการทดลองนี้มีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่างอยู่ที่ 0.96 - 4.37 ดังรูปที่ 4-37 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าบัฟเฟอร์ในขวดไม่เพียงพอสอดคล้องกับค่าความเป็นกรดด่างที่ต่ำ ซึ่งอาจเป็นผลมากจากการย่อยสลายของขยะเศษอาหารซึ่งเป็นเป็นองค์ประกอบหลักในการทดลอง



รูปที่ 4-35 ค่ากรดระเหยง่ายในสภาวะไร้ออกซิเจน



รูปที่ 4-36 ค่าความเป็นด่างในสภาวะไร้ออกซิเจน



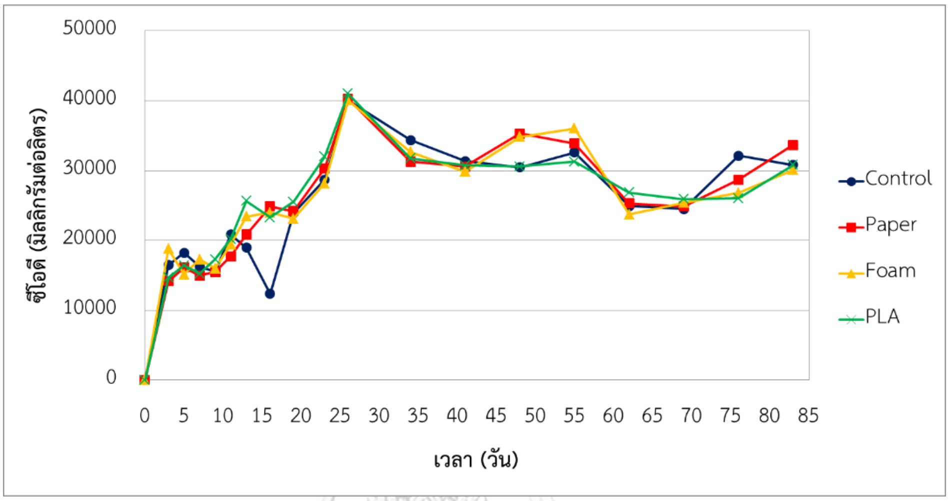
รูปที่ 4-37 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพด่างในสภาวะไร้ออกซิเจน

Chulalongkorn University

3) ค่าซีโอดี (COD)

ค่าซีโอดีเป็นตัวแปรที่แสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยในชุดควบคุม ชุดวัสดุกระดาษ วัสดุโฟม และวัสดุพีแอลเอมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 12,355.56 - 40,059.26 14,143.21 - 40,296.30 15,170.37 - 40,059.26 และ 14,696.30 - 41,007.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรูปที่ 4-38 ซึ่งใกล้เคียงกันในทุกชุดการทดลอง ซึ่งในทุกชุดการทดลองใกล้เคียงกันโดยมีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและสูงสุดในวันที่ 26 จากนั้นลดต่ำลงเรื่อยๆ และคงที่จนสิ้นสุดการทดลอง ทั้งนี้อาจสันนิษฐานได้ว่าวัสดุทั้ง 3 ชนิดไม่มีผลต่อค่าซีโอดีเนื่องจากค่าซีโอดีจากทุกชุดสอบการย่อยสลายวัสดุ

มีค่าใกล้เคียงกับชุดควบคุมมาก เมื่อพิจารณาร่วมกับสมบัติน้ำชะขยะในแต่ละขั้นการย่อยสลาย (Tchobanoglous, Theisen และ Vigil, 1993) พบว่าช่วงที่เกิดพีคซีโอดีเป็นช่วงที่ระบบอยู่ในระยะเกิดกรด (วันที่ 26) และยังไม่พบช่วงที่ค่าซีโอดีลดต่ำลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบยังไม่เข้าสู่ระยะการเกิดมีเทน



รูปที่ 4-38 ค่าซีโอดีในสภาวะไร้ออกซิเจน

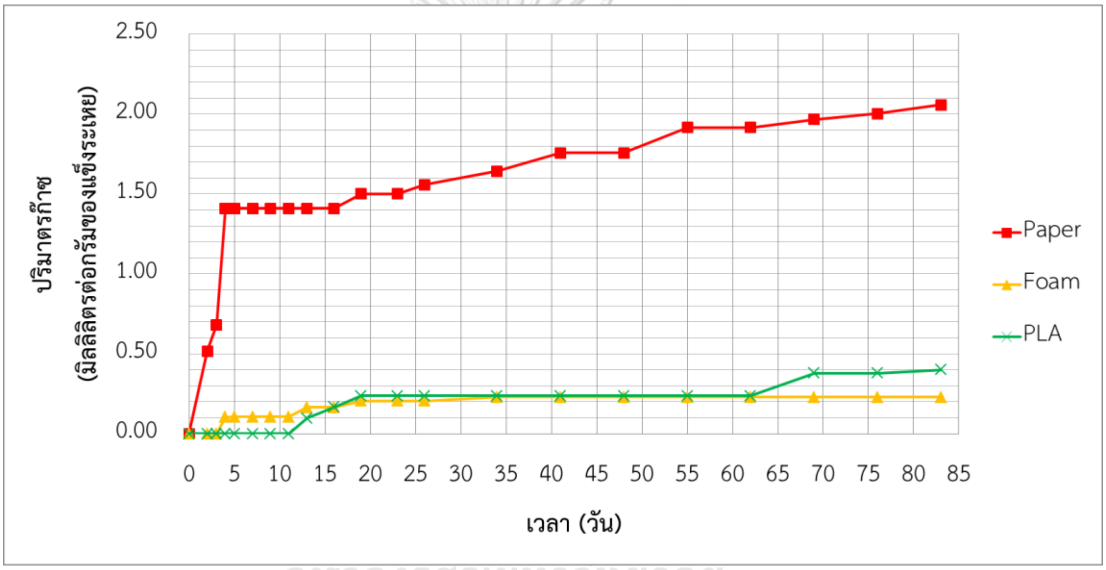
4.4.3 แก๊สชีวภาพในสภาวะไร้ออกซิเจน

4.4.3.1 ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมในสภาวะไร้ออกซิเจน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ปริมาณแก๊ซชีวภาพสะสมในชุดการทดลองควบคุมมีปริมาณเท่ากับ 23.37 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย ส่วนปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมชุดการทดลองวัสดุกระดาษ โฟม และพีแอลเอหลังหักปริมาณก๊าซจากชุดควบคุมแล้วมีค่าเท่ากับ 2.06 0.23 และ 0.40 มิลลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4-39 คาดว่าในชุดวัสดุกระดาษเกิดการย่อยสลายเร็วที่สุดโดยช่วงที่กราฟชันขึ้นสูงเกิดขึ้นในวันที่ 3 และเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปแต่กราฟค่อยๆ สูงขึ้นทีละน้อย แสดงให้เห็นว่ากระดาษมีส่วนที่ย่อยสลายได้เร็วและช้าเนื่องจากหลังจากพีคแรกแล้วยังมีแนวโน้มเกิดก๊าซต่อไปแม้สิ้นสุดการทดลองแต่เกิดในปริมาณน้อย เนื่องจากกระดาษจัดอยู่ในวัสดุที่ย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีววิทยาทั้งในสภาวะมีและไม่มีออกซิเจน และต้องอาศัยปัจจัยภายในต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นความเป็นกรดด่าง ไอออนของโลหะ หรือปริมาณลิกนิน นอกจากนี้พบว่ามีการรายงานถึง

ความสามารถในการย่อยสลายของกระดาษที่มีการเคลือบไขหรือพลาสติกในสภาวะหลุมฝังกลบว่าง ผลทำให้การย่อยสลายของกระดาษเป็นไปได้ช้ามาก (Area และ Cheradame, 2011) ส่วนพีแอลเอเกิดช่วงที่กราฟสูงชันขึ้นในวันที่ 13 จากนั้นก็ไม่เกิดแก๊สอีกหรือเกิดแต่น้อยมาก แสดงให้เห็นว่าที่สภาวะการทดลองของระบบไร้อากาศดังกล่าวพีแอลเอสามารถเกิดการย่อยสลายได้แต่น้อยและช้า แต่หากอยู่ในสภาวะที่มีการควบคุมพบว่าภายใต้ขยะจากสวน ผัก และผลไม้ พีแอลเอสามารถย่อยสลายและผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงสุด 586.5 ลิตรต่อกิโลกรัมตัวอย่าง (Kolstad และคณะ, 2012) สำหรับวัสดุโฟมพบว่าเกิดแก๊สชีวภาพน้อยมากหรือแทบไม่เกิดเลย



รูปที่ 4-39 ก๊าซชีวภาพสะสมในการทดลองที่ 3 ที่เวลา 12 สัปดาห์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4.3.2 องค์ประกอบแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน

จากการศึกษาองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน พบว่าในชุดการทดลองวัสดุกระดาษมีปริมาณมีเทนมากที่สุดเท่ากับร้อยละ 56.79 รองลงมาคือชุดวัสดุพีแอลเอ ชุดควบคุม และชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟมที่ร้อยละ 26.80 23.12 และ 56.79 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราวที่ 4-14

ตารางที่ 4-14 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน

ตัวอย่าง	มีเทน (CH_4)
ชุดควบคุม	23.12
วัสดุกระดาษ	56.79
วัสดุโฟม	14.02
วัสดุพีแอลเอ	26.80

4.4.4 % Biodegradation

การศึกษาร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพ (% Biodegradation) พบว่ามีเพียงวัสดุกระดาษเท่านั้นที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยพิจารณาจากปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ซึ่งวัสดุพอลิสไตรีนโฟม และพลาสติกชีวภาพชนิดพีแอลเอผลิตแก๊สได้น้อยกว่าชุดควบคุม ส่วนกระดาษสามารถผลิตแก๊สได้มากกว่าชุดควบคุมที่ 25.17 และ 23.37 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย เมื่อนำมาคำนวณหาร้อยละการย่อยสลายทางชีวภาพพบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 1.90 ซึ่งถือว่าน้อยมาก

4.4.5 สมบัติขยะเศษอาหารในสภาวะไร้ออกซิเจน

เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าในทุกชุดการทดลองปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหยมีค่าลดลง โดยในชุดควบคุมมีค่าลดลงร้อยละ 70.28 และ 93.29 ตามลำดับ ชุดวัสดุกระดาษมีค่าลดลงร้อยละ 69.99 และ 93.35 ตามลำดับ ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟมมีค่าลดลงร้อยละ 69.66 และ 93.17 ตามลำดับ ชุดวัสดุพีแอลเอมีค่าลดลงร้อยละ 69.91 และ 93.24 ตามลำดับ ซึ่งให้เห็นว่าวัสดุที่นำไปทดสอบไม่มีผลต่อการย่อยสลายขยะเศษอาหาร เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงมีค่าใกล้เคียงกันกับชุดการทดลองควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 4-15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-15 สมบัติขยะเศษอาหารเปรียบเทียบก่อนและหลังในการทดลองต่างๆ

ตัวอย่าง	ตัวชี้วัด			
	ของแข็งทั้งหมด (%)	ความชื้น (%)	ของแข็งระเหย (%)	เถ้า (%)
เริ่มต้นการทดลอง	**24.16**	**75.84**	**98.43**	**1.57**
สิ้นสุดการทดลอง				
ชุดควบคุม	7.18	92.82	6.60	93.40
ชุดวัสดุกระดาษ	7.25	92.75	6.55	93.45
ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม	7.33	92.67	6.72	93.28
ชุดวัสดุพีแอลเอ	7.27	92.73	6.65	93.35

4.5 การทดลองที่ 4 ผลทดสอบการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

4.5.1 การเปลี่ยนแปลงขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

4.5.1.1 การยุบตัวของขยะ

การสลายตัวของขยะในหลุมฝังกลบเกิดได้จากหลายกระบวนการประกอบกันทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว และแก๊ส ทั้งนี้ทุกกระบวนการต่างส่งผลให้ขยะเกิดการเปลี่ยนแปลงรวมถึงการยุบตัวของขยะในหลุมฝังกลบด้วย ซึ่งการยุบตัวเป็นหนึ่งในผลการย่อยสลายที่ควรทำการศึกษาเนื่องจากสามารถนำไปพิจารณาการเพิ่มพื้นที่ในหลุมฝังกลบได้ จากตารางที่ 4-16 แสดงให้เห็นว่าขยะภายในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมเกิดการยุบตัวสูงสุดรองลงมาคือถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษ ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม และชุดวัสดุพีแอลเอที่ร้อยละ 43.42 40.79 34.29 และ 26.07 ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาจากกระบวนการย่อยสลายขยะในหลุมฝังกลบพบว่าน้ำเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการย่อยสลายและยุบตัวของขยะ จากการดำเนินการทดลองในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบพบว่ามีประเภทของน้ำเกี่ยวข้องในระบบนี้สามประเภทกล่าวคือ น้ำที่เข้าสู่ระบบ น้ำที่ดึงออกมาได้ และน้ำคงค้างในถัง (Remaining Water; RW สำหรับน้ำที่เข้าสู่ระบบหมายถึงปริมาณน้ำจริงที่เติมเข้าสู่ระบบซึ่งหมายรวมถึงปริมาณน้ำชะขยะที่เวียนกลับเข้าไปด้วย ส่วนน้ำที่ดึงออกมาได้หมายถึงน้ำที่เก็บออกจากการจุดเก็บตัวอย่างที่ก้นถัง และน้ำคงค้างน้ำคือน้ำที่คงอยู่ในถังและไม่สามารถดึง

ออกมาได้ ทั้งนี้สามารถคำนวณปริมาณน้ำที่ผลิตได้จากดังสมการที่ (4-1) โดยพบว่าถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมมีปริมาณน้ำคงค้าง (RW_C) เท่ากับ 405 มิลลิลิตร ตามด้วยถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษ (RW_P) ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม (RW_F) และชุดวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอ (RW_L) เท่ากับ 1,501 1,989 และ 2,492 มิลลิลิตรตามลำดับ แสดงในตารางที่ 4-16

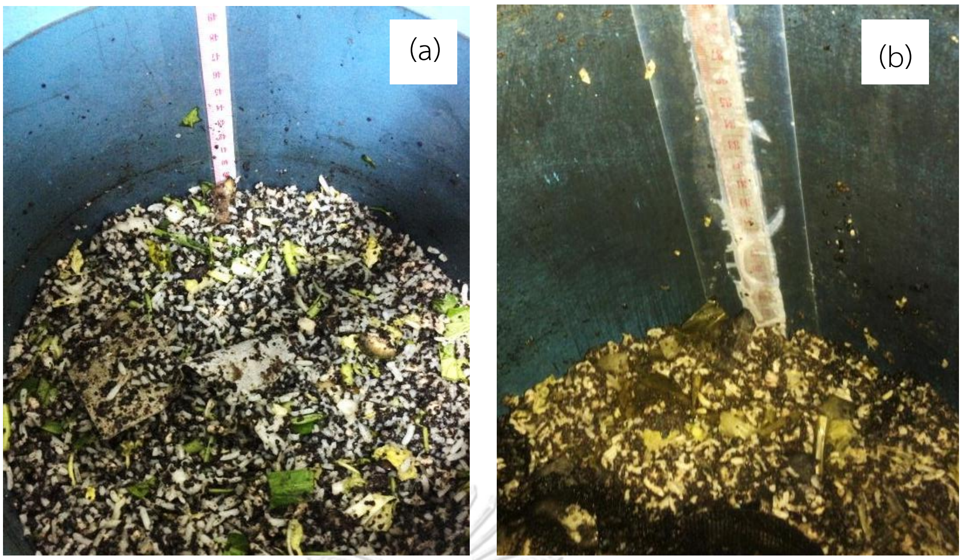
น้ำเข้าสู่ระบบ - น้ำที่ดึงออกมาได้= น้ำคงค้างในถังปฏิกรณ์ สมการที่ (4-1)

จากการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมเกิดการยุบตัวสูงสุดเนื่องจากภายในถังมีเพียงขยะเศษอาหารเท่านั้น เมื่อมีการเติมหรือเวียนน้ำจากบริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์น้ำจะไหลลงสู่ด้านล่าง และเมื่อพิจารณาจากค่า RW_C จะเห็นว่ามีน้ำคงค้างในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมต่ำสุดซึ่งแสดงถึงการไหลเวียนที่ดีของน้ำ เนื่องจากภายในถังมีการแพร่กระจายน้ำเป็นไปอย่างทั่วถึง การกระจายของน้ำเกิดขึ้นดีกว่าส่งผลให้เกิดการย่อยสลายได้มากกว่า โดยขยะเศษอาหารภายในถังมีการเปลี่ยนทางกายภาพอย่างชัดเจน คือเปลี่ยนเป็นสีดำ ไม่พบเศษข้าว หรือชิ้นผักคงรูปอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4-35 ส่วนถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเช่นกันแต่ไม่เท่ากับในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม โดยสีของขยะเศษอาหารกลายเป็นสีเหลืองอมน้ำตาล ทั้งนี้เมื่อพิจารณาค่า RW_P พบว่าการไหลและแพร่กระจายของน้ำเกิดได้ดีกว่าแต่น้อยกว่าถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมเพราะมีน้ำคงค้างในถังมากกว่า เนื่องจากการมีอยู่ของวัสดุกระดาษที่สามารถดูดซับน้ำได้สูง (Double A Thailand, 2013) แต่ไม่ได้ขวางทางเดินของน้ำจึงทำให้การแพร่กระจายน้ำยังเกิดได้ดีต่างจากถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพอลิสไตรีนที่มีค่า RW_F มากเป็นลำดับสามแสดงให้เห็นว่ามีการเก็บกักและขวางการไหลของน้ำภายในถัง คาดว่าเกิดจากการที่วัสดุโฟมมีช่องว่างภายในน้ำจึงคงค้างอยู่ในวัสดุได้ ขณะที่ร้อยละการยุบตัวของขยะในถังปฏิกรณ์นี้อยู่ที่ร้อยละ 34.29 ในส่วนของถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพีแอลเอมีการยุบตัวต่ำสุดและค่า RW_L สูงสุด เนื่องจากมีการขวางการไหลของน้ำทำให้การยุบตัวเกิดได้น้อยสุด ซึ่งอาจเป็นมาจากวัสดุพีแอลเอที่บรรจุในถังปฏิกรณ์มีความทนต่อน้ำประกอบกับมีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำเพียงร้อยละ 0.5 (Van de Velde และ Kiekens, 2002) ซึ่งส่งผลให้การกระจายน้ำในถังเกิดได้ไม่ทั่วถึงการย่อยสลายหรือการยุบตัวของขยะจึงเกิดได้น้อย

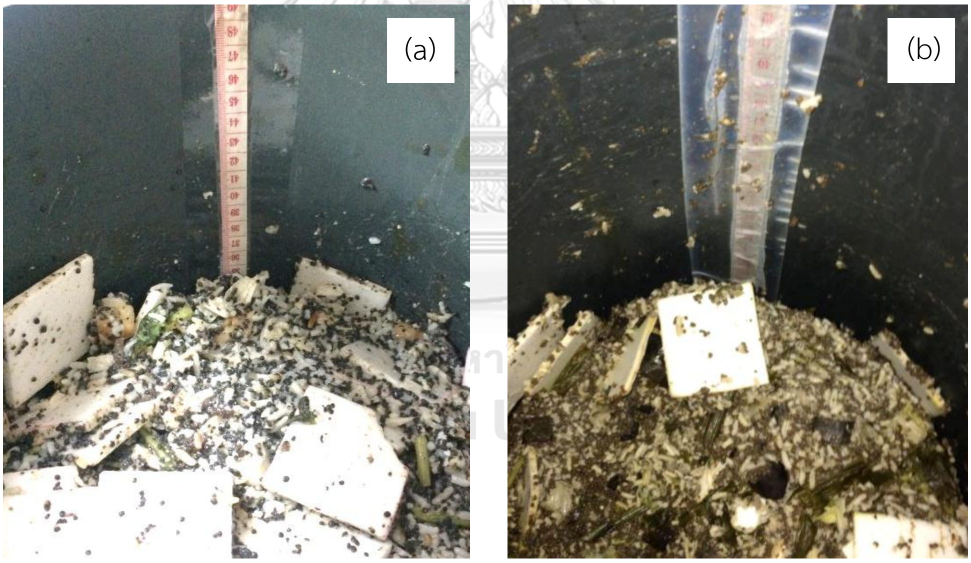
ตารางที่ 4-16 ร้อยละการยุบของขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์

ตัวอย่าง	ความสูง (เซนติเมตร)		การยุบตัว (%)	ปริมาณน้ำคงค้าง
	เริ่มการทดลอง	สิ้นสุดการทดลอง		(RW, มิลลิลิตร)
ชุดควบคุม	38	20	43.42	405
วัสดุกระดาษ	38	22.5	40.79	1,501
วัสดุโฟม	35	23	34.29	1,989
วัสดุพีแอลเอ	23	17	26.07	2,492

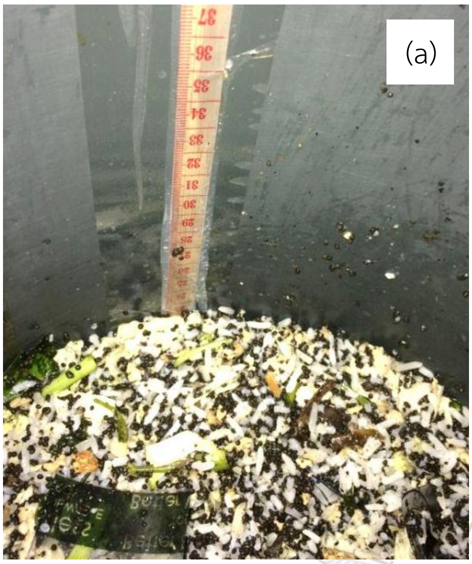
รูปที่ 4-40 การยุบตัวของขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบชุดควบคุม (a) เริ่มต้นการทดลอง และ (b) สิ้นสุดการทดลอง

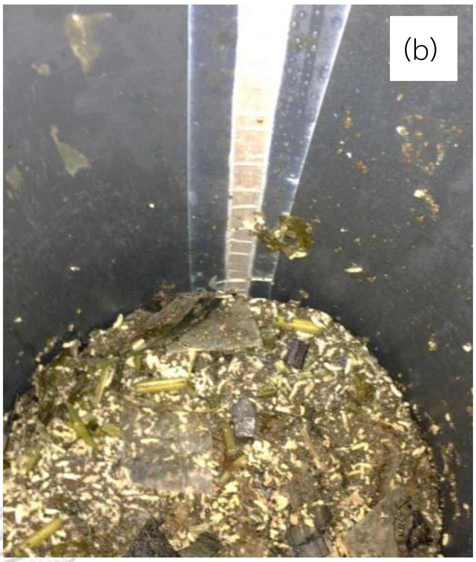


รูปที่ 4-41 การยุบตัวของขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบวัสดุกระดาษ (a) เริ่มต้นการทดลอง และ (b) สิ้นสุดการทดลอง



รูปที่ 4-42 การยุบตัวของขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบวัสดุพอลิสไตรีนโฟม (a) เริ่มต้นการทดลอง และ (b) สิ้นสุดการทดลอง





รูปที่ 4-43 การยุบตัวของขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบวัสดุพีแอลเอ
(a) เริ่มต้นการทดลอง และ (b) สิ้นสุดการทดลอง

4.4.1.2 สมบัติน้ำชะขยะ

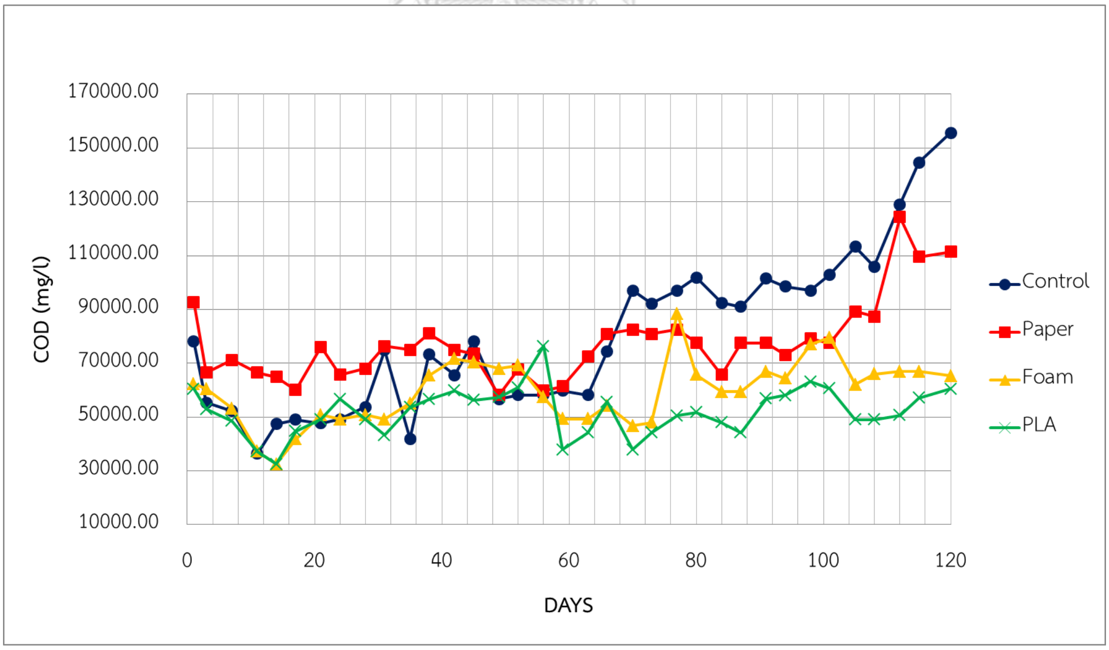
1) ซีโอดี (COD)

ค่าซีโอดีสามารถบ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ ซึ่งส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซชีวภาพ จากการวิเคราะห์ค่าซีโอดีตลอดการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 36,395.60 – 155,692.31 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามด้วยชุดวัสดุกระดาษ วัสดุพอลิสไตรีนโฟม และวัสดุพีแอลเอที่ 58,229.51 – 124,307.69 32,524.59 – 88,421.05 และ 32,524.59 – 76,327.87และ มิลลิกรัมตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4-44 จะเห็นว่าในทุกถังปฏิกรณ์มีแนวโน้มของค่าซีโอดีที่ใกล้เคียงกัน คือค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ทั้งนี้สามารถแบ่งช่วงของค่าซีโอดีได้เป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่ค่าซีโอดีคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าภายในถังอยู่ในระยะปรับตัวและระยะเปลี่ยนแปลง (Initial adjustment phase and Transition phase) เป็นระยะเริ่มแรกที่ขยะถูกฝังลงในหลุม โดยในระยะนี้จะประกอบด้วยแก๊สไนโตรเจนและออกซิเจนอันเป็นองค์ประกอบของอากาศเป็นหลัก และปริมาณเริ่มลดลงเนื่องจากเกิดการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนของจุลินทรีย์ภายในหลุมฝังกลบ และช่วงที่ 2 เป็นช่วงที่ค่าซีโอดีเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งพบในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมกับชุดวัสดุกระดาษเป็นไปใน

ทิศทางเดียวกันคือมีค่าเพิ่มสูงขึ้น เป็นผลจากการย่อยของสลายอินทรีย์ที่เกิดได้มากกว่าอีกสองถังที่เหลือ จึงคาดว่าระบบเริ่มเข้าสู่ระยะเกิดกรด (Acid formation phase)

จากผลการทดลองดังกล่าวสันนิษฐานได้ว่าวัสดุแต่ละชนิดมีผลต่อค่าซีโอดี ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าค่าซีโอดีสามารถบ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำชะขยะที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ โดยหนึ่งในปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าซีโอดีคือการเวียนน้ำชะขยะเนื่องจากน้ำชะขยะจะทำหน้านำเอาสารอินทรีย์และสารอาหารที่ถูกชะออกมากลับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์เพื่อเป็นการเพิ่มปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้ไปเป็นกรดอินทรีย์มากขึ้น ทำให้ความเป็นกรดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำชะขยะเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน เมื่อพิจารณาจากปริมาณน้ำคงค้างในระบบพบว่า ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมมีค่าต่ำสุด ตามด้วยถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษ ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม และชุดวัสดุพลาสติกพีแอลเอตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมมีการเวียนน้ำชะขยะที่ดีกว่าทำให้การนำสารอาหารกลับเข้าระบบเกิดได้มากกว่าส่งผลกับค่าซีโอดีที่สูงที่สุด สอดคล้องกับค่าปริมาณกรดอินทรีย์ที่สูงสุดและค่าพีเอชที่ต่ำที่สุดอีกด้วย



รูปที่ 4-44 ค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

2) ความเป็นกรดด่าง หรือพีเอช (pH)

ค่าความเป็นกรดด่างหรือพีเอชในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ มีค่าเฉลี่ยของแต่ละถังปฏิกรณ์เท่ากับ 4.17±0.35 4.47±0.58 4.77±0.73 และ 5.17±0.41 ในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม ชุดวัสดุกระดาษ ชุดวัสดุพอลิสไตรีน และชุดวัสดุพีแอลเอตามลำดับ ซึ่งถือเป็นค่าพีเอชที่ค่อนข้างต่ำและไม่เอื้อต่อจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตมีเทน (Methanogenesis) ทั้งนี้เนื่องจากขยะเศษอาหารมีความชื้นสูง (ปทุมมาศ ชิวหา, 2546)

ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมมีค่าพีเอชเริ่มต้นในวันที่ 1 เท่ากับ 4.84 แล้วลดต่ำลงเป็น 3 ตั้งแต่วันที่ 3 ถึงวันที่ 26 จากนั้นจึงค่อยๆเพิ่มขึ้นกลับมาอยู่ในช่วงพีเอช 4 ตั้งแต่วันที่ 26 ถึงวันที่ 100 และพีเอชเข้าสู่ช่วง 5 ในวันที่ 100 จนสิ้นสุดการทดลอง ส่วนของถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษมีค่าพีเอชเริ่มต้นอยู่ที่ 4.78 แล้วลดต่ำลงเป็น 3 จนถึงวันที่ 42 จึงค่อยๆเพิ่มกลับมาอยู่ในช่วงพีเอช 4 จนสิ้นสุดการทดลองและมีค่าพีเอชตลอดระยะเวลาทดลองเท่ากับ 3.69 – 5.54 สำหรับถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟมเริ่มต้นมีค่าพีเอชอยู่ที่ 4.26 แล้วลดต่ำลงอยู่ในช่วงพีเอช 3 ในวันที่ 17 – 31 แล้วกลับมาเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดตั้งแต่วันที่ 32 โดยเพิ่มไปจนถึงพีเอช 6.30 จากนั้นเริ่มมีแนวโน้มลดลงตั้งแต่วันที่ 43 และคงที่ในวันที่ 90 จนสิ้นสุดการทดลอง สุดท้ายคือถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพีแอลเอมีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.31 จากนั้นลดลงเรื่อยๆแล้วกลับมามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่ 30 แล้วเริ่มคงที่ที่ 6 ในวันที่ 63 จากนั้นลดลงและคงที่อยู่ในช่วง 5.54 – 5.81 ตั้งแต่วันที่ 90 จนสิ้นสุดการทดลองและมีค่าพีเอชตลอดระยะเวลาทดลองเท่ากับ 3.70 – 6.21 ดังแสดงในรูปที่ 4-40 หากสังเกตค่าพีเอชจะพบว่าแนวโน้มของค่าพีเอชเหมือนกันทุกชุดการทดลองคือ ลดต่ำลงในช่วงแรก ลดต่ำลงในช่วงแรก จากนั้นพีเอชปรับตัวสูงขึ้นสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งลักษณะดังกล่าวเป็นไปตามกระบวนการย่อยสลายที่เกิดขึ้น คือช่วงแรกการย่อยสลายจะเกิดขึ้นในสภาวะที่ยังมีแก๊สออกซิเจนหลงเหลืออยู่ เกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอนไดออกไซด์เมื่อละลายน้ำจะเกิดเป็นกรด (ชมพูนุช ชุ่มพุดซา, 2554) เมื่อจุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนจนหมดระบบจะเข้าสู่สภาวะไร้ออกซิเจน การย่อยสลายขั้นนี้เริ่มจากย่อยสารโมเลกุลใหญ่เป็นเล็กให้อยู่ในรูปสารประกอบอย่างง่ายอย่างกรดอินทรีย์ จากนั้นจุลินทรีย์ก็จะนำกรดอินทรีย์ส่วนนี้ไปใช้ส่งผลให้พีเอชเพิ่มสูงขึ้นและคงที่ในที่สุด (Merlin Christy, Gopinath และ Divya, 2014)

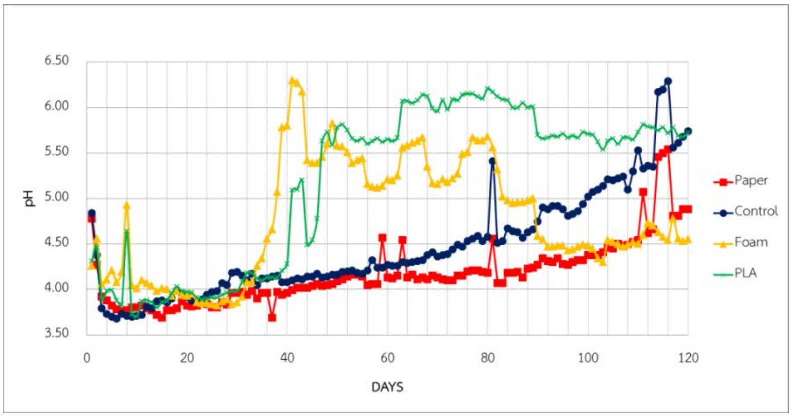
จากการวิเคราะห์ค่าพีเอชของน้ำชะขยะที่ได้จากทดสอบการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบแสดงให้เห็นว่าค่าเฉลี่ยทั้ง 4 ถัง ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ซึ่งจากรูปที่ 4-45 จะพบว่า

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สามารถแบ่งการวิเคราะห์ข้อมูลออกได้เป็นสองชุดคือ ชุดแรกคือถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมและชุดวัสดุกระดาษโดยค่าพีเอชของสองถังนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆแม้จนสิ้นสุดการทดลองก็ยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid; VFA) ส่งผลให้ค่าพีเอชต่ำในช่วงแรก จากนั้นค่าเริ่มเพิ่มขึ้นสูงอย่างชัดเจนในวันที่ 80 ของการทดลอง เนื่องจากกรดอินทรีย์เริ่มถูกนำไปใช้ระบบและกำลังเข้าสู่ระยะเกิดมีเทน (Methane fermentation phase) แต่ยังไม่สมบูรณ์ภายในระยะเวลาทดลอง เพราะพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดมีเทนอยู่ที่ 6.8 – 7.2 (Yang และคณะ, 2015) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Erses A. S. และคณะ (2008) ที่ต้องใช้ระยะเวลนานกว่าค่าพีเอชจะปรับสูงขึ้น โดยมีค่าพีเอชคงที่ตั้งแต่เริ่มต้นการทดลองจนถึงวันที่ 445 เฉลี่ยเท่ากับ 5.83 จากนั้นจึงเข้าสู่พีเอชช่วงที่เป็นกลาง (Erses และคณะ, 2008)

ส่วนค่าพีเอชของถังปฏิกรณ์พอลิสไตรีนโฟมและพลาสติกชีวภาพพีแอลเอพบว่าในช่วงเริ่มต้นมีการลดลงของพีเอชอย่างรวดเร็วเช่นกัน แต่ในสองถังนี้พบช่วงที่พีเอชเพิ่มขึ้นสูงอย่างชัดเจนประกอบกับมีช่วงที่พีเอชคงที่ในช่วงท้ายของการทดลอง แสดงให้เห็นว่าถังปฏิกรณ์ที่บรรจุวัสดุสองชนิดถูกยับยั้งไม่ให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลาย โดยจะมีเกิดกรดไปเรื่อยๆจากการกระจายตัวของน้ำที่ไม่ทั่วทั้งถังและยากต่อการเปลี่ยนไปเป็นมีเทน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jianguo J. และคณะ (2007) ที่การลดลงของพีเอชในช่วงสัปดาห์แรกและเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนในช่วงสัปดาห์ที่ 5 ของการทดลอง (Jianguo และคณะ, 2007) ซึ่งรูปแบบการเปลี่ยนพีเอชดังกล่าวไม่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์สองถังแรก ทั้งนี้เมื่อพิจารณาร่วมกับสมบัติน้ำชะขยะในหลุมฝังกลบในแต่ละระยะการย่อย สำหรับพีเอชถือปัจจัยตัวหนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในหลุมฝังกลบเนื่องจากในกระบวนการดังกล่าวมีค่าพีเอชที่ต่ำซึ่งเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนโดยอาจไปยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ทำให้ไม่สามารถผลิตมีเทนได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

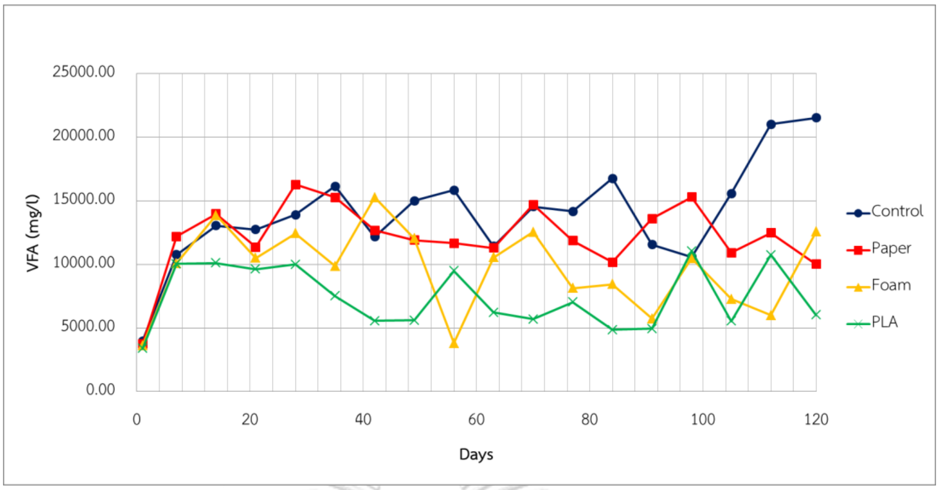


รูปที่ 4-45 ค่าความเป็นกรดด่างในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

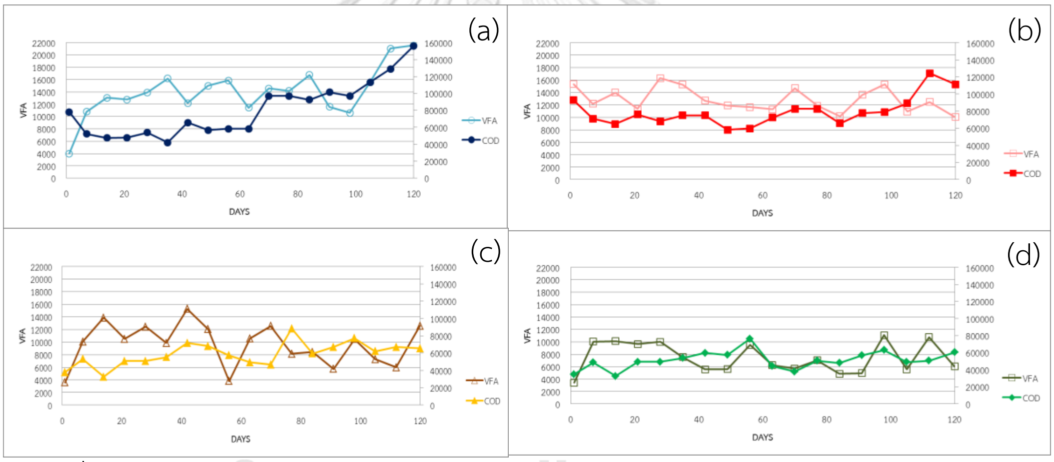
3) ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) และค่าความเป็นด่าง (Alkalinity)

ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม ชุดวัสดุกระดาษ ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม และชุดวัสดุพีแอลเอมีค่าอยู่ในช่วง 3993.75 - 21543.75 3750.00 - 16287.50 3600.00 - 15281.25 และ 3393.75 - 11062.50 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ โดยในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนชุดวัสดุกระดาษ ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟมและชุดวัสดุพีแอลเอมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4-46

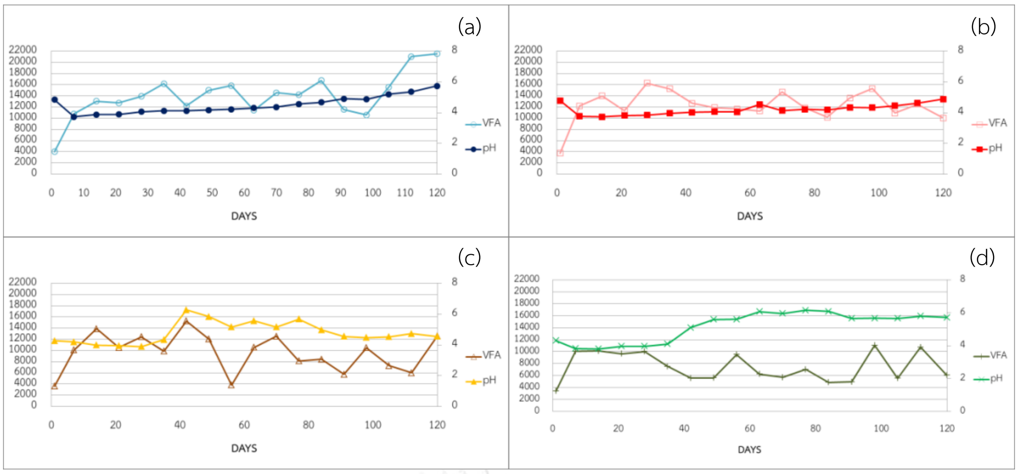
ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมมีค่าเฉลี่ยปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายระเหยสูงสุด และพบว่าช่วงท้ายของการทดลองปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มขึ้นในวันที่ 108 ซึ่งสอดคล้องกับค่าพีเอชในช่วงวันดังกล่าวทั้งนี้เนื่องจากชุดควบคุมเกิดการยุบตัวของขยะและแพร่กระจายน้ำได้มากที่สุด ทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นได้ดีสอดคล้องกับค่าซีโอดี ดังรูปที่ 4-47 ขณะที่ถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษมีลักษณะการเกิดปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายใกล้เคียงกับชุดควบคุม เพียงแต่ในช่วงท้ายค่าเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับค่าพีเอชที่คงที่ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาภายในถังเกิดในลักษณะเดียวกันแต่เกิดได้ช้ากว่า สำหรับถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟมและวัสดุพลาสติกภาพพีแอลเอมีแนวโน้มปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยใกล้เคียงกัน คือค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลองโดยระบบจะผลิตกรดไปเรื่อยๆเนื่องจากการกระจายตัวของความชื้น ทั้งนี้ค่าพีเอชต่ำจะยับยั้งการเกิดของจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทน และเมื่อพิจารณาร่วมกับค่าพีเอชพบว่ามีความสัมพันธ์กัน คือเมื่อพีเอชมีค่าลดลงปริมาณกรดอินทรีย์ควรมีค่าเพิ่มสูงขึ้น โดยรูปที่ 4-48 จะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์อย่างชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากการย่อยสารอินทรีย์ในกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดอินทรีย์ส่งผลให้ค่าพีเอชลดต่ำลง



รูปที่ 4-46 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ



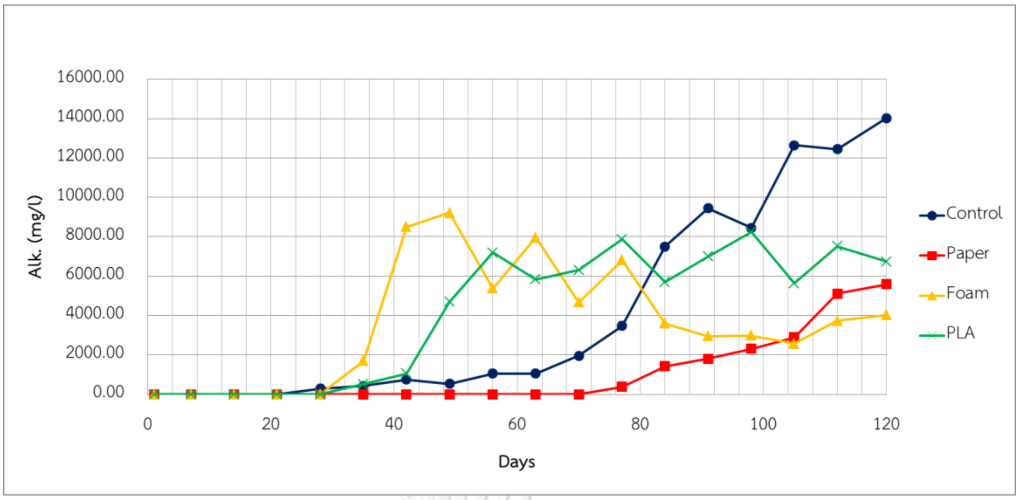
รูปที่ 4-47 เปรียบเทียบค่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายกับซีโอดีในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ ; (a) ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (b) ถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษ (c) ถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม และ (d) ถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพีแอลเอ



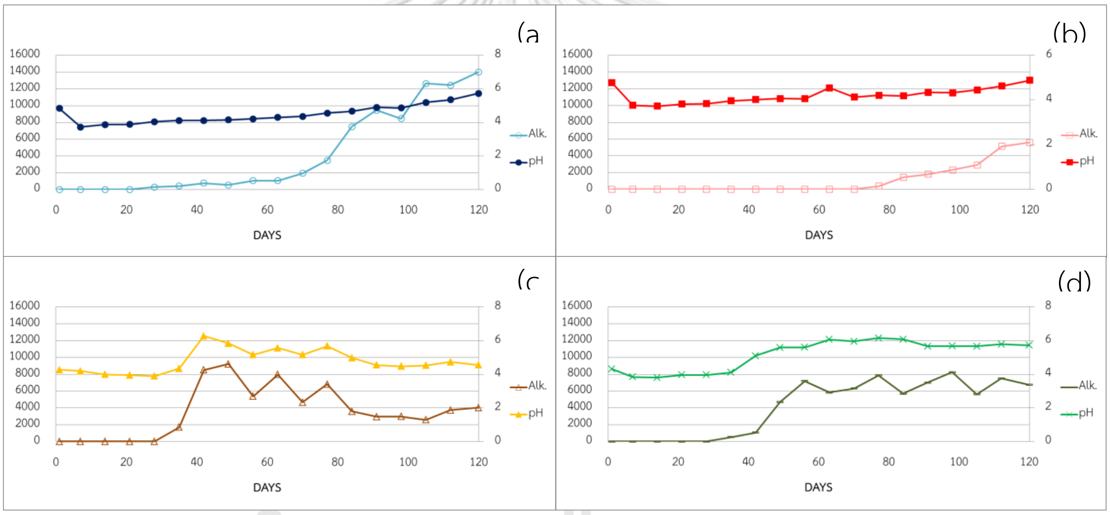
รูปที่ 4-48 เปรียบเทียบค่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายกับค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ ; (a) ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (b) ถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษ (c) ถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม และ (d) ถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพีแอลเอ

ค่าความเป็นด่างเป็นการแสดงถึงการมีอยู่ของกลุ่มคาร์บอเนตเช่น ไบคาร์บอเนต (HCO^{3-}) คาร์บอเนต (CO_3^{-2}) และ ไฮดรอกไซด์ (OH^-) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดระดับบัฟเฟอร์ของระบบ โดยหากบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอจะทำให้เกิดกรดมากเกินไปซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มไม่ใช้ออกซิเจน จากรูปที่ 4-49 แสดงถึงค่าความเป็นด่างของแต่ละถังปฏิกรณ์มีค่าอยู่ในช่วง 0.00 - 14025.00 0.00 - 5587.50 0.00 - 9212.50 และ 0.00 - 8237.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในชุดการทดลองควบคุม ชุดวัสดุกระดาษ ชุดวัสดุพอลิสไตรีน และชุดวัสดุพีแอลเอตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นในทุกถังปฏิกรณ์ โดยช่วงแรกของทดลองไม่พบค่าความเป็นด่างเนื่องจากค่าพีเอชในระบบต่ำมาก และเริ่มพบค่าดังกล่าวในช่วงเวลาต่อมา โดยในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมเริ่มพบค่าความเป็นด่างเร็วที่สุดในช่วงวันที่ 28 ของการทดลอง สอดคล้องกับค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นช่วงที่พีเอชของระบบเพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 4 ส่วนชุดวัสดุกระดาษพบค่าความเป็นด่างเกิดขึ้นช้าที่สุดในวันที่ 77 ของการทดลองเนื่องจากค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์นี้มีค่าโดยเฉลี่ยต่ำสุดเมื่อเทียบกับถังอื่นที่ 4.17 และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4-50 พบว่าค่าความเป็นด่างของทุกถังปฏิกรณ์มีความสอดคล้องกับค่าพีเอชอย่างชัดเจนคือเมื่อค่าพีเอชเพิ่มขึ้นค่าความเป็นด่างดลลง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4-49 ค่าความเป็นด่างในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ



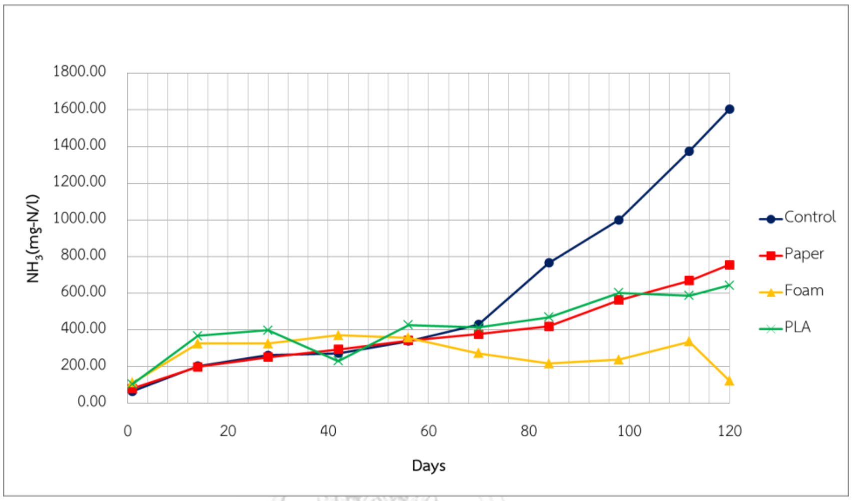
รูปที่ 4-50 เปรียบเทียบค่าความเป็นด่างกับค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

; (a) ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม (b) ถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษ (c) ถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม และ (d) ถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพีแอลเอ

4) แอมโมเนียไนโตรเจน (NH_3-N)

ไนโตรเจนเป็นหนึ่งในสารอาหารที่จุลินทรีย์ต้องการในการย่อยสลายซึ่งอยู่ในรูปของแอมโมเนีย จากการทดลองพบว่าปริมาณแอมโมเนียในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม ถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษ ถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม และชุดวัสดุพีแอลเอมีค่าอยู่ในช่วง 66.50 – 1,603.00 80.50 - 756.00 112.00 - 371.00 และ 105.00 - 644.00 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จากรูปที่ 4-

51 แสดงให้เห็นว่าปริมาณแอมโมเนียในช่วงต้นของการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันจนเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงประมาณวันที่ 70 ของการทดลองซึ่งกราฟแสดงผลสอดคล้องกับค่าซีโอดีที่คงที่และค่อยๆเพิ่มขึ้นในช่วงนี้เช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าในชุดควบคุมมีปริมาณแอมโมเนียที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากมีระบบหมุนเวียนน้ำชะขยะที่ดีกว่าทำให้สามารถดึงเอาสารอาหารออกมาได้มากกว่า

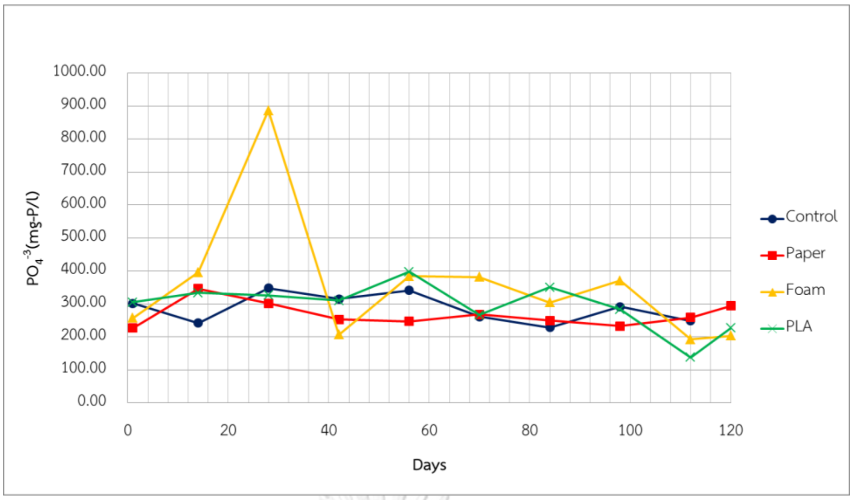


รูปที่ 4-51 ปริมาณแอนโมเนียไนโตรเจนในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

5) ฟอสเฟต (Phosphate)

ฟอสเฟตคือสารอาหารในกลุ่มฟอสฟอรัสที่อยู่ในน้ำชะขยะซึ่งทำหน้าที่เช่นเดียวแอมโมเนียคือช่วยให้จุลินทรีย์นำไปประโยชน์ได้ โดยปริมาณฟอสเฟตในแต่ละถังปฏิกรณ์มีค่าอยู่ในช่วง 229.09 - 348.18 227.27 - 346.36 192.73 - 396.36 และ 138.18 - 398.18 มิลลิกรัมต่อลิตร ในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม ถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษ ถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม และชุดวัสดุพีแอลเอตามลำดับ โดยในการทดลองนี้พบว่าจุลินทรีย์มีสารอาหารเพียงพอ ไม่ได้เกิดการยับยั้งปฏิกิริยาจากฟอสเฟต ดังแสดงในรูปที่ 4-52

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



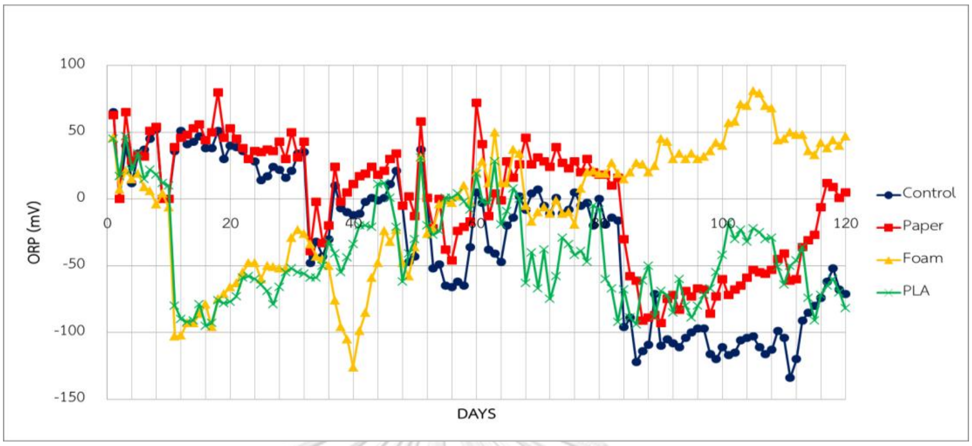
รูปที่ 4-52 ปริมาณฟอสเฟตในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

6) ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือโออาร์พี (ORP)

โดยปกติในสภาวะที่เกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยจุลินทรีย์ควรมีค่าเป็นลบ โดยในงานวิจัยนี้พบว่าค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน – รีดักชันของแต่ละถังปฏิกรณ์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ -30.42±55.64 -1.19±45.09 -4.67±48.31 และ -39.21±38.44 ในชุดควบคุม ชุดวัสดุกระดาษ ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม และชุดวัสดุพีแอลเอตามลำดับ

ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมในช่วง 30 วัน แรกของการทดลองโออาร์พีมีค่าเป็นบวกเนื่องจากยังคงมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ภายใน จากนั้นเริ่มมีค่าเป็นลบสลับกับบวกจนสิ้นสุดการทดลอง โดยค่าเป็นลบสามารถสังเกตได้ชัดเจนในช่วงวันที่ 84 เป็นต้นไป ต่อมาในถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษมีค่าเป็นบวกตั้งแต่วันแรกจนถึงวันที่ 83 ของการทดลอง ส่วนถังปฏิกรณ์ชุดพอลิสไตรีนโฟมมีค่าเป็นลบตั้งแต่วันที่ 10 ของการทดลองแต่กลับมีแนวโน้มเป็นบวกจนสิ้นสุดการทดลอง โดยค่าโออาร์พีเป็นบวกชัดเจนในวันที่ 77 สำหรับถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพีแอลเอมีค่าเป็นลบตั้งแต่วันที่ 10 จนสิ้นสุดการทดลอง จากรูปที่ 4-53 จะเห็นว่าในช่วงวันที่ 80 ของการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่าโออาร์พีอย่างเห็นได้ชัด โดยถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟมมีค่าโออาร์พีเพิ่มขึ้นเป็นบวกแสดงให้เห็นว่าอาจมีการรั่วซึมของออกซิเจนเข้าสู่ระบบซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้า ในขณะที่ถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม ชุดวัสดุกระดาษ และชุดวัสดุพลาสติกชีวภาพมีค่าโออาร์พีลดต่ำลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบเข้าสู่สภาวะไร้ออกซิเจน ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ (ปทุมมาศ ชิวหา, 2546) ที่ค่าโออาร์พีลดลงเป็นลบในช่วงวันที่ 99 แต่ทั้งนี้พิจารณาตัวชี้วัดอื่นร่วมด้วยพบว่าระบบยังไม่ได้เข้าสู่ระเกิดมีเทนเต็มที่แต่เป็นระยะ

เริ่มแรกของเฟสเท่านั้นเนื่องจากค่าซีโอดี และกรดอินทรีย์ระเหยง่ายยังไม่ลดต่ำลง ส่งผลให้พีเอชยังต่ำอยู่แก๊สมีเทนจึงไม่สามารถเกิดได้



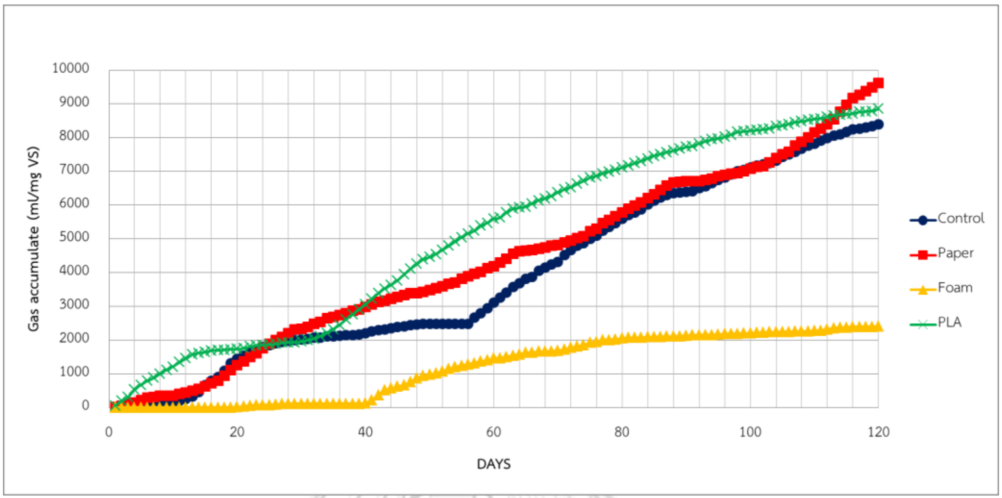
รูปที่ 4-53 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชันในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

4.5.2 ก๊าซชีวภาพ

4.5.2.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม

จากการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมพบว่าในถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษมีปริมาณแก๊สสูงสุด ตามด้วยชุดวัสดุพีแอลเอ ชุดควบคุม และชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม โดยมีปริมาณเท่ากับ 9.62 8.86 8.40 2.40 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4-54 พบว่าทั้งสามถังปฏิกรณ์ได้แก่ชุดวัสดุกระดาษ ชุดวัสดุพีแอลเอ และชุดควบคุมมีค่าเกาะกลุ่มกันโดยมีแนวโน้มใกล้เคียงกันไปในทิศทางเดียวกัน พบว่าถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษมีแนวโน้มการเกิดแก๊สชีวภาพค่อยๆเพิ่มขึ้นเช่นกันแม้ปริมาณแก๊สสะสมสูงสุดแต่ความเร็วในการเกิดต่ำกว่าชุดวัสดุพีแอลเอ ทั้งนี้สอดคล้องกับความเข้มข้นของค่าซีโอดี กรดอินทรีย์ระเหย ที่ยังคงเหลือและยังไม่สามารถถูกแปรรูปไปเป็นมีเทนได้ สำหรับชุดวัสดุพีแอลเอแนวโน้มของแก๊สเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับค่าซีโอดีและกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ทั้งนี้มีค่าเฉลี่ยต่ำที่สุดเนื่องจากจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้มากสุด ส่งผลให้ค่าพีเอชในถังนี้สูงขึ้นไปด้วย สำหรับถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมที่มียุบตัวของขยะสูงสุดซึ่งควรจะเกิดแก๊สมากที่สุด ปริมาณกรดอาจจะมากจนเกินพอสำหรับจุลินทรีย์ ทำให้ไม่สามารถแปรรูปเป็นแก๊สได้

สำหรับถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟมพบว่ามีปริมาณแก๊สชีวภาพน้อยที่สุด สอดคล้องกับการยุบตัวน้อยที่สุด ทั้งนี้พบว่าการย่อยสลายเกิดน้อยตั้งแต่ระยะผลิตกรด เนื่องจากค่าเฉลี่ยซีโอดีและปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่าต่ำสุดเมื่อเทียบกับถังปฏิกิริยาอื่น



รูปที่ 4-54 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากถังปฏิกรณ์

4.5.2.1 องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ

การวัดองค์ประกอบแก๊สชีวภาพเป็นออกเป็น 2 ครั้ง โดยในครั้งแรกที่ 60 วัน พบมีเทนในตัวอย่างแก๊สชีวภาพจากถังปฏิกรณ์วัสดุพีแอลเอที่ร้อยละ 4.42 ส่วนในวันที่ 120 พบมีเทนในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุม ชุดวัสดุกระดาษ และชุดวัสดุพีแอลเอร้อยละ 34.95 21.98 และ 24.39 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4-17 ซึ่งค่าดังกล่าวไม่สามารถยืนยันได้ว่าระบบเข้าสู่ระยะการเกิดมีเทน (Methane fermentation phase) ภายในระยะเวลาทดลองที่กำหนดไว้ เมื่อพิจารณาจากตัวชี้วัดต่างๆของน้ำชะขยะแสดงให้เห็นชัดเจนว่าภายในทุกทั้งปฏิกรณ์อยู่ในระยะเกิดกรดและกำลังเข้าสู่ระยะเกิดมีเทน ซึ่งตัวชี้วัดที่สำคัญที่สุดคือพีเอช โดยพีเอชที่จุลินทรีย์จะสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดเป็นแก๊สมีเทนได้นั้นต้องมีค่าอยู่ช่วง 6.8 – 7.2 (วิจารณ์ อินทรกำแหง, 2543) (Lee และคณะ, 2009) และ (Yang และคณะ, 2015) ซึ่งในการทดลองนี้พีเอชยังต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมเช่นเดียวกับค่าซีโอดีที่ยังไม่มีแนวโน้มลดลงที่แสดงถึงการนำไปใช้ของจุลินทรีย์ ขณะที่ค่าโออาร์พีลดไม่ต่ำกว่า -150 มิลลิโวลต์ ซึ่งค่าโออาร์พีที่เหมาะสมต้องอยู่ในช่วงระหว่าง -150 ถึง -300 มิลลิโวลต์ จึงจะเข้าสู่ระยะเกิดมีเทน (Agamuthu, 2001)

ตารางที่ 4-17 ปริมาณแก๊สมีเทนในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

ตัวอย่าง	**ร้อยละมีเทน (CH_4)**	
	วันที่ 60	**วันที่ 120**
ชุดควบคุม	0.00	34.95
วัสดุกระดาษ	0.00	21.98
วัสดุโฟม	0.00	0.00
วัสดุพีแอลเอ	4.42	24.39

4.5.3.2 สมบัติขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าในทุกชุดการทดลองปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหยมีค่าลดลง โดยในชุดควบคุมมีค่าลดลงร้อยละ 35.64 และ 86.02 ตามลำดับ ชุดวัสดุกระดาษมีค่าลดลงร้อยละ 30.79 และ 83.66 ตามลำดับ ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟมมีค่าลดลงร้อยละ 18.50 และ 80.93 ตามลำดับ ชุดวัสดุพีแอลเอมีค่าลดลงร้อยละ 17.47 และ 80.37 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุที่นำไปทดสอบส่งผลต่อการย่อยสลายขยะเศษอาหาร โดยชุดควบคุมสูญเสียปริมาณของแข็งและของระเหยมากที่สุดเป็นผลมาจากถังปฏิกรณ์ชุดนี้เกิดการย่อยสลายที่ดีสอดคล้องกับการยุบตัวของขยะ เนื่องจากถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมมีเพียงขยะเศษอาหารเท่านั้น การยุบตัวของขยะ การกระจายรวมถึงการไหลของน้ำชะจึงเกิดขึ้นได้ดีที่สุด ในทางตรงกันข้ามถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพีแอลเอมีการยุบตัวน้อยที่สุดสอดคล้อง แสดงถึงการกระจายตัวของน้ำที่ต่ำที่สุด ดังแสดงในตารางที่ 4-18

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4-18 สมบัติขยะสังเคราะห์ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

ตัวอย่าง	ตัวชี้วัด ของแข็งทั้งหมด (%)	ความชื้น (%)	ของแข็งระเหย (%)	เถ้า (%)
เริ่มต้นการทดลอง	**24.16**	**75.84**	**98.43**	**1.57**
สิ้นสุดการทดลอง				
ชุดควบคุม	15.55	84.45	13.76	86.24
ชุดวัสดุกระดาษ	16.72	83.28	16.08	83.92
ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม	19.69	80.31	18.77	81.23
ชุดวัสดุพีแอลเอ	19.94	80.06	19.32	80.68

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการย่อยสลายของวัสดุภาชนะบรรจุอาหารแบบใช้แล้วทิ้งประกอบ วัสดุกระดาษ วัสดุพอลิสไตรีนโฟม และวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอ ในหลุมฝังกลบที่รับขยะเศษอาหาร โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 การทดลอง ดังนี้ (1) ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุก่อนย่อยสลาย (สถานีข่าวTNN24) ทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน (3) ทดสอบการย่อยสลายของวัสดุในสภาวะไร้ออกซิเจน และ (สถานีข่าวTNN24) ทดลองการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ (Landfill reactor) โดยทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของตัววัสดุในทั้งสองสภาวะ และผลของการย่อยสลายวัสดุนั้นๆ ในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

5.1 สรุปผลการทดลอง

<u>ผลต่อตัววัสดุ</u>

5.1.1 การเปรียบเทียบการย่อยสลายของวัสดุกระดาษในทั้งสองสภาวะสามารถใช้ค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปเป็นตัวชี้วัดได้ โดยในสภาวะมีออกซิเจนเกิดการเปลี่ยนแปลงร้อยละน้ำหนักของวัสดุกระดาษอย่างเห็นได้ชัดในสัปดาห์ที่ 4 เป็นต้นไป ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายของวัสดุกระดาษ (K) 0.005 ต่อสัปดาห์ และ 0.003 ต่อสัปดาห์ในสภาวะไร้ออกซิเจน แสดงให้เห็นว่าในสภาวะไร้ออกซิเจนเกิดปฏิกิริยาได้ช้ากว่าและมีค่าร้อยละน้ำหนักที่หายไปในสัปดาห์ที่ 11 ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากการย่อยสลายเกิดจากการชะละลายเป็นหลักในสภาวะที่มีออกซิเจนมีความเข้มข้นกรดอินทรีย์สูงกว่าการชะละลายจึงเกิดได้รวดเร็วกว่า ขณะที่ในสภาวะไร้ออกซิเจนมีความชื้นมากกว่ากรดอินทรีย์มีความเข้มข้นน้อยกว่าถึง 4 เท่าตัว กระบวนการการชะของน้ำจึงเกิดช้า สำหรับลักษณะทางกายภาพของวัสดุกระดาษในสภาวะมีและไม่มีออกซิเจนต่างเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือส่วนที่เชื่อมและเคลือบระหว่างเส้นใยหายไปคงเหลือเฉพาะส่วนที่เป็นเส้นใยสอดคล้องกับสมบัติทางเคมีที่มีการลดลงของปริมาณเถ้าเกิดขึ้น

5.1.2 ไม่สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลายของวัสดุพอลิสไตรีนโฟม (K) ได้ เนื่องจากมีการแปรปรวนของข้อมูลมากอันเนื่องจากปัจจัยภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ แต่พบความเสียของวัสดุในสภาวะมีออกซิเจนเกิดขึ้นมากกว่าในสภาวะไร้ออกซิเจนซึ่งเกิดขึ้นบริเวณที่กั้นระหว่างช่องว่างภายใน เนื่องจากพอลิสไตรีนสามารถถูกทำลายในสภาพที่กรดได้ ทั้งนี้ในสภาวะมีออกซิเจนมีความเข้มข้นของกรดอินทรีย์สูงกว่าในสภาวะไร้ออกซิเจนถึง 4 เท่า ส่งผลให้มีการดูดซับน้ำชะขยะที่ตัววัสดุทำให้ตรวจพบกรดคาร์บอกซิลิกเมื่อทดสอบด้วย FTIR

5.1.3 วัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอมีค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสลาย (K) ในสภาวะและไร้ออกซิเจนเท่ากับ 0.0006 และ 0.0007 ต่อสัปดาห์ตามลำดับ โดยมีค่าร้อยละของน้ำหนักที่หายไปใกล้เคียงกัน และพบการเปลี่ยนแปลงที่พื้นผิวของวัสดุเกิดขึ้นในระดับที่เล็กมาก แสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายเกิดขึ้นจริงแต่ในช่วงระยะเวลาทดลองที่ 90 วัน สามารถเกิดได้น้อยมาก และไม่พบการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเคมีของวัสดุหลังการทดสอบการย่อยสลายที่แตกต่างกันในทั้งสองสภาวะ

ผลกระบวนการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

5.1.4 สำหรับการทดลองช่วงถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ การยุบตัวของขยะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใส่ลงไป โดยในถังปฏิกรณ์ชุดควบคุมเกิดการยุบตัวมากที่สุด ตามด้วยวัสดุกระดาษ พอลิสไตรีนโฟม และพีแอลเอที่ร้อยละ 43.42 40.79 34.29 และ 26.07 ตามลำดับ สอดคล้องกับปริมาณน้ำที่คงค้างในถังที่ในชุดควบคุมมีปริมาณน้ำน้อยที่สุดเท่ากับ 405 มิลลิลิตร ตามด้วยชุดวัสดุกระดาษ พอลิสไตรีนโฟม และพีแอลเอที่ 1,501 1,989 และ 2,492 มิลลิลิตรตามลำดับ โดยพบว่าการกระจายตัวของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการย่อยสลาย คือหากน้ำเกิดการกระจายหรือไหลได้มากกว่าการย่อยสลายและการยุบตัวจะเกิดได้ดีกว่า

5.1.5 ในช่วงถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบพบว่าสมบัติของน้ำชะขยะ มีสาเหตุจากการขัดขวางการกระจายของน้ำทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นในอัตราที่แตกต่างกัน โดยพบว่าในถังที่มีการแพร่กระจายน้ำดีเช่น ชุดควบคุมและชุดวัสดุกระดาษ น้ำชะขยะที่ออกมามีค่าซีโอดี และปริมาณกรดอินทรีย์สูงทำให้ค่าพีเอชต่ำ ซึ่งสมบัติของชุดควบคุมและชุดวัสดุกระดาษมีค่าใกล้เคียงกับคือมีแนวโน้มซีโอดี กรดอินทรีย์สูงขึ้น เนื่องจากหากน้ำแพร่กระจายได้ดีเกิดการชะ (Leaching) ที่มาก ส่งผลให้ง่ายต่อการเกิดไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และการหมัก (Fermentation) โดยถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุกระดาษจะมี

ลักษณะกระบวนการใกล้เคียงกับชุดควบคุมแต่ก็ปฏิกิริยาเกิดช้ากว่า ส่วนถังปฏิกรณ์ชุดวัสดุพอลิสไตรีนโฟม และวัสดุพลาสติกชีวภาพพีแอลเอนั้นปฏิกิริยาในระบบจะเกิดช้ากว่ามาก เนื่องจากน้ำไม่กระจายตัวพอ กรดอินทรีย์จะถูกผลิตออกมาอย่างต่อเนื่องทีละน้อยทำให้ช่วงกรดเกิดขึ้นและคงอยู่ยาวนาน

5.1.6 ถังปฏิกรณ์ทุกชุดการทดลองยังไม่เข้าสู่ระยะการเกิดมีเทน (Methane fermentation phase) ที่สมบูรณ์ ภายในระยะเวลาการทดลอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาสมบัติของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปแต่ละประเภทอย่างละเอียด

5.2.2 ควรศึกษาภายใต้สภาพน้ำชะขยะที่หลากหลายและเหมือนจริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

Agamuthu, P. (2001). *Solid Waste: Principles and Management : with Malaysian Case Studies*: Insitute of Biological Sciences, University of Malaya.

APHA. (2006). *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater* (22th ed.).

Area, M. C., and Cheradame, H. (2011). Paper anging and degradation: Recent findings and research method. *BioResource, 6*(4), 5307-5337.

Browne, J. D., and Murphy, J. D. (2013). Assessment of the resource associated with biomethane from food waste. *Applied Energy, 104*(Supplement C), 170-177. doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.017

Cho, H. S., Moon, H. S., Kim, M., Nam, K., and Kim, J. Y. (2011). Biodegradability and biodegradation rate of poly(caprolactone)-starch blend and poly(butylene succinate) biodegradable polymer under aerobic and anaerobic environment. *Waste Management, 31*(3), 475-480. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.029

Curry, N., and Pillay, P. (2012). Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. *Renewable Energy, 41*(Supplement C), 200-209. doi: https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.10.019

Double A Thailand. (2013). องค์ประกอบของกระดาษ. from https://www.doubleapaper.com/th/assets/media/paperknowledge/paper_element1.pdf

Eco-Cycle, I. a. W. E. L., Inc.,. (2016). Should Plastic-Coated Paper Products be Allowed in Materials Collected for Composting ?   , 2017, from https://ecocycle.org/files/pdfs/microplastics_in_compost_presentation.pdf

Eleazer, W. E., Odle, W. S., Wang, Y.-S., and Barlaz, M. A. (1997). Biodegradability of Municipal Solid Waste Components in Laboratory-Scale Landfills. *Environmental Science & Technology, 31*(3), 911-917. doi: 10.1021/es9606788

European-Bioplastics. (2017). Bioplastics market data. 2017, from http://www.european-bioplastics.org/market/

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Foodservice Packaging Institute, I. (2007). *SINGLE-USE FOODSERVICE PACKAGING: A TUTORIAL*. Washington: Foodservice Packaging Institute, Inc. .

Gewert, B., Plassmann, M. M., and MacLeod, M. (2015). Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environmental Science: Processes & Impacts, 17*(9), 1513-1521. doi: 10.1039/C5EM00207A

Ishigaki, T., Kawagoshi, Y., Ike, M., and Fujita, M. (1999). Biodegradation of a polyvinyl alcohol-starch blend plastic film. *World Journal of Microbiology and Biotechnology, 15*(3), 321-327. doi: 10.1023/a:1008919218289

Ishigaki, T., Sugano, W., Nakanishi, A., Tateda, M., Ike, M., and Fujita, M. (2004). The degradability of biodegradable plastics in aerobic and anaerobic waste landfill model reactors. *Chemosphere, 54*(3), 225-233. doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00750-1

Jabeen, M., Zeshan, Yousaf, S., Haider, M. R., and Malik, R. N. (2015). High-solids anaerobic co-digestion of food waste and rice husk at different organic loading rates. *International Biodeterioration & Biodegradation, 102*(Supplement C), 149-153. doi: https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.03.023

JICA. (2005). THE STUDY ON SOLID WASTE MANAGEMENT IN THE MUNICIPALITY OF PHNOM PENH IN THE KINGDOM OF CAMBODIA (pp. 163).

Kolstad, J. J., Vink, E. T. H., De Wilde, B., and Debeer, L. (2012). Assessment of anaerobic degradation of Ingeo™ polylactides under accelerated landfill conditions. *Polymer Degradation and Stability, 97*(7), 1131-1141. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2012.04.003

Lee, D. H., Behera, S. K., Kim, J. W., and Park, H.-S. (2009). Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: A lab-scale study. *Waste Management, 29*(2), 876-882. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2008.06.033

Liu, G., Zhang, R., El-Mashad, H. M., and Dong, R. (2009). Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes. *Bioresource Technology, 100*(21), 5103-5108. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.081

Marsh, K., and Bugusu, B. (2007). Food Packaging—Roles, Materials, and Environmental Issues. *JOURNAL OF FOOD SCIENCE, 72*. doi: 10.1111/j.1750-3841.2007.00301.x

Massardier-Nageotte, V., Pestre, C., Cruard-Pradet, T., and Bayard, R. (2006). Aerobic and anaerobic biodegradability of polymer films and physico-chemical characterization. *Polymer Degradation and Stability, 91*(3), 620-627. doi: https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.02.029

Merlin Christy, P., Gopinath, L. R., and Divya, D. (2014). A review on anaerobic decomposition and enhancement of biogas production through enzymes and microorganisms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 34*, 167-173. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.010

Mohee, R., Unmar, G. D., Mudhoo, A., and Khadoo, P. (2008). Biodegradability of biodegradable/degradable plastic materials under aerobic and anaerobic conditions. *Waste Management, 28*(9), 1624-1629. doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.07.003

Naima Atiq. (2011). *Biodegradability of Synthetic Plastics Polystyrene and Styrofoam by Fungal Isolates.* (Doctor of Philosophy in microbiology), Quaid-i-Azam University.

Palmisano, A. C., and Pettigrew, C. A. (1992). Biodegradability of Plastics. *BioScience, 42*(9), 680-685. doi: 10.2307/1312174

Pinto, L. F. A., Goi, B. E., Schmitt, C. C., and Neumann, M. G. (2013). Photodegradation of Polystyrene Films Containing UV-Visible Sensitizers. *Journal of Research Updates in Polymer Science, 2*, 39-47.

Pommier, S., Llamas, A. M., and Lefebvre, X. (2010). Analysis of the outcome of shredding pretreatment on the anaerobic biodegradability of paper and cardboard materials. *Bioresource Technology, 101*(2), 463-468. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.034

Prechthai, T., Padmasri, M., and Visvanathan, C. (2008). Quality assessment of mined MSW from an open dumpsite for recycling potential. *Resources, Conservation and Recycling, 53*(1–2), 70-78. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.09.002

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Pushpadass, H. A., Weber, R. W., Dumais, J. J., and Hanna, M. A. (2010). Biodegradation characteristics of starch–polystyrene loose-fill foams in a composting medium. *Bioresource Technology, 101*(19), 7258-7264. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.04.039

Rasi, S., Läntelä, J., and Rintala, J. (2014). Upgrading landfill gas using a high pressure water absorption process. *Fuel, 115*, 539-543. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.082

Rawski, D. P., and Bhuiyan, M. S. H. (2017). Pulp and Paper: Nonfibrous Components. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*: Elsevier.

Reich, L., & Stivala, S. S. (1971). *Elements of Polymer Degradation*: McGraw-Hill.

Russo, M. A. L., O'Sullivan, C., Rounsefell, B., Halley, P. J., Truss, R., and Clarke, W. P. (2009). The anaerobic degradability of thermoplastic starch: Polyvinyl alcohol blends: Potential biodegradable food packaging materials. *Bioresource Technology, 100*(5), 1705-1710. doi: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.09.026

Saloheimo, M., and Penttilä, M. (2006). Method of treatment of pulp useful for papermaking: Google Patents.

Sanphoti, N., Towprayoon, S., Chaiprasert, P., and Nopharatana, A. (2006). The effects of leachate recirculation with supplemental water addition on methane production and waste decomposition in a simulated tropical landfill. *Journal of Environmental Management, 81*(1), 27-35. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.10.015

Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., and Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances, 26*(3), 246-265. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005

Sheldrick, G. E., and Vogl, O. (1976). Induced photodegradation of styrene polymers: A survey. *Polymer Engineering & Science, 16*(2), 65-73. doi: 10.1002/pen.760160202

Singh, B., and Sharma, N. (2008). Mechanistic implications of plastic degradation. *Polymer Degradation and Stability, 93*(3), 561-584. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008

Snavely, M. J. (2007). Responsible Purchasing Guide for Food Services.

Stinson, J. A., and Ham, R. K. (1995). Effect of Lignin on the Anaerobic Decomposition of Cellulose as Determined Through the Use of a Biochemical Methane Potential Method. *Environmental Science & Technology, 29*(9), 2305-2310. doi: 10.1021/es00009a023

Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S. (1993). *Integrated solid waste management*. New York: McGraw-Hill.

Themelis, N. J., and Ulloa, P. A. (2007). Methane generation in landfills. *Renewable Energy, 32*(7), 1243-1257. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.020

URENCO. (2007). THE DEVELOPMENT OF E-WASTE INVENTORY IN VIETNAM (pp. 175).

Van de Velde, K., and Kiekens, P. (2002). Biopolymers: overview of several properties and consequences on their applications. *Polymer Testing, 21*(4), 433-442. doi: https://doi.org/10.1016/S0142-9418(01)00107-6

Wang, X., De la Cruz, F. B., Ximenes, F., and Barlaz, M. A. (2015). Decomposition and carbon storage of selected paper products in laboratory-scale landfills. *Science of The Total Environment, 532*, 70-79. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.132

Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., and Jones, D. L. (2008). Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology, 99*(17), 7928-7940. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044

World bank. (2012). WHAT A WASTE: A Global Review of Solid Waste Management. *Urban Development Series Knowledge Papers*(15).

Yang, L., Huang, Y., Zhao, M., Huang, Z., Miao, H., Xu, Z., and Ruan, W. (2015). Enhancing biogas generation performance from food wastes by high-solids thermophilic anaerobic digestion: Effect of pH adjustment. *International Biodeterioration & Biodegradation, 105*, 153-159. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.09.005

Yuan, X., Cao, Y., Li, J., Wen, B., Zhu, W., Wang, X., and Cui, Z. (2012). Effect of pretreatment by a microbial consortium on methane production of waste paper and cardboard. *Bioresource Technology, 118*, 281-288. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.058

Yuen, S. T. S. (2001). *Bioreactor landfills: Do they work?* Paper presented at the 2nd ANZ Conference on Environmental Geotechnics, Newcastle, Australia.

Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., and Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 38*, 383-392. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038

ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ. (2547). รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการสำรวจและวิเคราะห์องค์ประกอบขยะมูลฝอยชุมชนของเทศบาลทั่วประเทศ.

กรมควบคุมมลพิษ. (2552). กำจัดมูลฝอยแบบฝังกลบอย่างถูกสุขาภิบาล (Sanitary Landfill).

กรมควบคุมมลพิษ. (2558). สถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศไทยปีพ.ศ.2557.

กรมควบคุมมลพิษ. (2560). ระยะเวลาที่ขยะแต่ละชนิดย่อยสลายตามธรรมชาติ. 2556, from http://www.pcd.go.th/info_serv/waste_rubbish.htm

กำพล รุจิวิชชญ์. (2555). ศึกษาการพัฒนาระบบการจัดการขยะรีไซเคิลอย่างยั่งยืนที่เหมาะสมกับประเทศไทย (ระยะที่ *1).* สถาบันวิจัยและให้คำปรึกษาแห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

ชมพูนุช ชุ่มพุดซา. (2554). ผลของปุ๋ยหมักชีวภาพและตำแหน่งการวางของปุ๋ยหมักชีวภาพต่อการผลิตก๊าซในหลุมฝังกลบจำลอง. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ชุติมา บุษบง. (2551). การเปรียบเทียบผลกระทบสิ่งแวดล้อมตลอดวัฏจักรชีวิตของกระทงที่ประดิษฐ์จากใบตอง โฟม และผลิตภัณฑ์เคยูกรีน. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ฐานข้อมูลอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์. (2558). การผลิตและการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์กระดาษ. from http://packaging.oie.go.th/admin_control/file/4175036298.pdf

ณัติฐพล ไข่แสงสี. (2552). การพัฒนาบรรจุภัณฑ์ย่อยสลายได้จากไคโตแซนร่วมกับพอลิเมอร์จากธรรมชาติสำหรับทดแทนโฟม. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ธเรศ ศรีสถิตย์. (2558). วิศวกรรมการจัดการมูลฝอยชุมชน. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

นาวิน เนสุสินธุ์. (2554). การย่อยสลายพลาสติกชีวภาพในดินจากบ่อฝังกลบขยะผสมกากตะกอนใต้สภาวะไร้ออกซิเจน. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปทุมมาศ ชิวหา. (2546). ผลกระทบของนิกเกิลและสังกะสีต่อการย่อยสลายของขยะในหลุมฝังกลบ. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ประชาชาติธุรกิจออนไลน์. (2557). จัดการขยะรีไซเคิล สร้างมูลค่าเพิ่มให้ชุมชน. from http://m.prachachat.net/news_detail.php?newsid=1410953361

พิพัฒน์ ธีระจักร. (2553). การพัฒนากระบวนการเวียนน้ำชะขยะอย่างเหมาะสมในระบบการย่อยสลายขยะอินทรีย์แบบไร้อากาศ. (ดุษฎีบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มลสุดา ลิวไธสง. (2556). การผลิตภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากกาบกล้วย. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

มหาวิทยาลัยมหิดล, ส. (2559). กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน. from http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. (2542). วิศวกรรมการประปา. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ฤกษ์ฤทธิ์ เคนหาราช. (2544). การย่อยสลายพอลิสไตรีนโฟมในสิ่งแวดล้อม. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

วิจารณ์ อินทรกำแหง. (2543). การประเมินอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากหลุมฝังกลบมูลฝอยชุมชน. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต).

ศูนย์การเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล. (2557). โครงการประเมินพลังงานของเศษอาหารเหลือทิ้งของศูนย์อาหารศูนย์การเรียนรู้มหิดลมหาวิทยาลัยมหิดล (ศาลายา). from http://www.op.mahidol.ac.th/oppe/img/mu_eco/12%E0%B8%A7%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%97%E0%B8%B5%E0%B9%88%203.2%20no%20food%20waste.pdf

ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. (2550). ประเภทของพลาสติกย่อยสลายได้. from http://www2.mtec.or.th/th/special/biodegradable_plastic/type_de_plas.html

สถานีข่าวTNN24. (2560). เปิดข้อมูล 5ปี ปริมาณขยะโฟมเพิ่มขึ้น61ล้านใบ. 2560, from http://www.tnnthailand.com/news_detail.php?id=132980&t=news_special

สถาบันพลาสติก. (2556). ไบโอพลาสติกพอลิเมอร์แห่งอนาคต. *Plastics Foresight, 08 - 02*.

สมเดช กนกเมธากุล. (2547). สเปกโตรสโกปี ในการพิสูจน์โครงสร้างสารอินทรีย์ (1 ed.). ขอนแก่น: ขอนแก่นการพิมพ์.

สาธินี ศิริวัฒน์. (2553). ภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายทางชีวภาพของบรรจุภัณฑ์ชนิดพอลิแลคติกแอซิดและเยื่อชานอ้อยและผลของการย่อยสลายต่อประชาคมแบคทีเรียในดิน. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สำนักนวัตกรรมแห่งชาติ. (2551). แผนที่นำทางแห่งชาติ การพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพ.

สำนักระบายน้ำกรุงเทพมหานคร. (2558). สรุปสถานการณ์ประจำเดือนธันวาคม พ.ศ. 2558.

สำนักสิ่งแวดล้อม กรุงเทพมหานคร. (2558). รายงานสถานการณคุณภาพสิ่งแวดล้อมกรุงเทพมหานคร 2556-2557.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สำนักอนามัย กรุงเทพมหานคร. (2555). หลักสูตรการสุขาภิบาล: ภาชนะและอุปกรณ์. from http://www.foodsanitation.bangkok.go.th/FoodSanitation/online_examination/ch_4.pdf

สุภิญญา บุญช่วย และวัชราภรณ์ คำนา. (2555). กล่องโฟมภัยใกล้ตัว. วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ, *61*(191).

อนรรฆ วิพลชัย. (2547). การหาจุดยุติของการบำบัดน้ำชะขยะในช่วงสุดท้ายของการทำเสถียรในหลุมฝังกลบ. (วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อาวาตีฟ มะแอ. (2553). การประเมินและใช้ประโยชน์ก๊าซมีเทนจากหลุมฝังกลบมูลฝอยแบบสุขาภิบาล กรณีศึกษาพื้นที่เทศบาลนครหาดใหญ่และเทศบาลเมืองบ้านพรุ. (วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต), มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์การทดสอบการย่อยสลายในสภาวะมีออกซิเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-1 ค่าพีเอช

วัน	พีเอช				วัน	พีเอช			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
1	4.84	4.71	4.56	4.51	23	3.33	3.78	3.90	3.81
2	4.62	4.87	4.61	4.60	24	3.37	3.54	3.93	3.31
3	4.62	4.60	4.70	4.54	25	3.40	4.00	3.28	3.28
4	4.71	4.67	4.65	4.67	26	3.43	3.89	3.48	3.39
5	4.42	4.56	4.42	4.44	27	3.36	3.45	3.68	3.50
6	4.10	4.78	4.07	4.64	28	3.37	3.40	3.45	3.42
7	3.50	3.61	3.57	3.43	29	3.40	3.22	3.65	3.86
8	3.71	3.87	3.66	3.38	30	3.37	3.33	3.45	4.12
9	3.99	3.76	3.46	3.35	31	3.42	3.84	3.85	3.34
10	3.84	3.62	3.39	3.40	32	3.56	3.67	4.03	3.45
11	3.66	3.55	3.33	3.51	33	3.60	4.11	3.34	3.53
12	3.54	3.52	3.40	3.40	34	3.66	4.16	3.77	3.60
13	3.32	3.45	3.37	3.36	35	3.73	3.89	4.00	3.68
14	3.26	3.33	3.41	3.40	36	3.69	4.13	4.10	3.85
15	3.40	3.34	3.56	3.35	37	3.68	4.00	4.10	3.97
16	3.33	3.50	3.76	3.26	38	3.73	3.56	3.98	3.94
17	3.41	3.65	3.68	3.33	39	3.71	3.68	3.76	3.74
18	3.38	3.63	3.88	3.50	40	3.66	3.88	3.55	3.72
19	3.39	3.48	3.88	3.66	41	3.75	4.05	3.60	3.84
20	3.36	3.56	3.73	3.71	42	3.90	4.10	4.26	4.16
21	3.34	3.46	3.39	3.41	43	4.20	4.34	4.56	4.35
22	3.33	3.90	3.87	4.00	44	4.47	4.50	4.76	4.26

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-1 ค่าพีเอช (ต่อ)

วัน	พีเอช				วัน	พีเอช			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
45	4.51	4.65	4.68	4.33	68	8.17	8.09	7.76	7.66
46	4.58	4.63	4.88	4.50	69	8.14	7.87	7.78	7.60
47	4.58	4.48	4.87	4.66	70	8.10	7.65	7.65	7.63
48	4.62	4.56	4.73	4.71	71	7.86	7.70	7.66	7.57
49	5.61	4.78	4.66	4.80	72	7.99	7.87	7.60	7.55
50	5.76	4.90	4.87	5.00	73	7.65	7.65	7.52	7.58
51	6.29	5.18	4.90	5.11	74	7.79	7.34	7.50	7.68
52	6.43	5.54	4.93	5.31	75	7.53	7.48	7.30	7.75
53	6.65	6.00	5.28	5.28	76	7.66	7.72	7.38	7.70
54	6.87	6.45	5.48	5.39	77	8.13	7.84	7.43	7.68
55	7.33	6.89	5.68	5.50	78	7.72	7.65	7.50	7.62
56	7.61	7.01	5.99	5.78	79	7.56	7.54	7.64	7.57
57	7.90	7.90	7.80	8.10	80	7.68	7.56	7.55	7.55
58	7.77	7.91	7.84	8.09	81	8.00	7.41	7.56	7.58
59	7.78	8.04	7.92	8.03	82	7.88	7.50	7.43	7.43
60	7.88	8.06	8.00	7.87	83	7.90	7.53	7.48	7.37
61	8.05	8.12	8.16	7.99	84	7.77	7.64	7.38	7.25
62	8.28	7.88	8.23	7.84	85	7.87	7.50	7.33	7.30
63	7.93	7.76	8.44	7.80	86	7.67	7.61	7.30	7.18
64	8.14	7.98	8.30	7.73	87	7.33	7.53	7.22	7.34
65	8.26	7.84	8.21	7.75	88	7.18	7.60	7.16	7.25
66	8.41	7.95	8.00	7.78	89	7.40	7.57	7.00	7.22
67	8.21	8.10	7.98	7.70	90	7.21	7.40	6.89	7.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-2 ค่าโออาร์พี

วัน	โออาร์พี				วัน	โออาร์พี			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
1	65	65	58	49	23	57	15	45	44
2	80	81	44	33	24	58	20	50	40
3	83	60	69	46	25	71	27	48	47
4	50	46	69	38	26	70	26	48	38
5	34	20	59	53	27	81	20	36	53
6	30	21	84	25	28	42	27	68	30
7	32	19	81	45	29	68	42	42	47
8	36	19	70	43	30	56	57	38	35
9	67	63	74	46	31	35	49	58	50
10	40	19	44	34	32	54	46	72	63
11	57	15	45	44	33	68	30	52	47
12	58	20	50	40	34	82	48	66	66
13	71	27	48	47	35	79	35	74	75
14	70	26	48	38	36	85	46	83	69
15	81	20	36	53	37	92	58	93	72
16	42	27	68	30	38	64	67	65	78
17	68	42	42	47	39	73	69	78	88
18	56	57	38	35	40	75	85	86	89
19	35	49	58	50	41	89	72	76	75
20	54	46	72	63	42	111	69	107	68
21	68	30	52	47	43	118	75	100	75
22	82	48	66	66	44	99	87	89	69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-2 ค่าโออาร์พี (ต่อ)

วัน	โออาร์พี				วัน	โออาร์พี			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
45	89	65	95	58	68	75	65	61	69
46	78	72	117	68	69	76	57	78	66
47	88	88	95	75	70	86	46	85	70
48	95	94	117	66	71	98	58	78	64
49	78	98	98	79	72	90	64	82	65
50	88	76	110	85	73	75	55	88	59
51	75	79	88	77	74	83	68	93	73
52	69	83	84	83	75	90	72	76	66
53	84	76	92	85	76	90	65	70	70
54	92	59	100	73	77	84	56	79	78
55	87	66	96	79	78	98	62	85	87
56	98	69	87	65	79	75	70	76	79
57	86	76	78	72	80	65	65	80	80
58	77	79	64	75	81	78	77	71	63
59	81	85	68	68	82	80	90	88	66
60	92	68	66	83	83	94	87	92	76
61	78	72	57	68	84	108	98	116	80
62	65	70	45	77	85	92	85	99	76
63	43	54	38	76	86	87	76	94	68
64	57	69	48	85	87	77	88	87	70
65	62	73	57	68	88	67	67	77	84
66	68	65	66	71	89	82	74	79	64
67	84	74	48	75	90	74	62	69	82

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-3 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย

สัปดาห์	กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (mg/l)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
1	23250.0	22500.0	21750.0	22500.0
2	27750.0	25875.0	22500.0	23250.0
3	21000.0	22875.0	20625.0	22500.0
4	21375.0	23625.0	22125.0	22500.0
5	15000.0	14250.0	12375.0	14250.0
6	15000.0	13500.0	11250.0	14250.0
7	14625.0	15375.0	15000.0	14250.0
8	18375.0	18750.0	19500.0	18750.0
9	20625.0	21750.0	24375.0	22875.0
10	19125.0	22500.0	23250.0	22500.0
11	18000.0	20625.0	18750.0	19875.0
12	18750.0	18000.0	18750.0	19875.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ก-4 ค่าความเป็นด่าง

สัปดาห์	ค่าความเป็นด่าง (mg/l)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	4250.0	5000.0	6250.0
7	6250.0	6750.0	4750.0	5000.0
8	8250.0	7500.0	7750.0	7250.0
9	8750.0	8250.0	15000.0	11750.0
10	16500.0	10000.0	11250.0	13000.0
11	17500.0	16250.0	15000.0	15000.0
12	17000.0	16750.0	16000.0	14750.0

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ก-5 ค่าซีโอดี

สัปดาห์	ค่าซีโอดี (mg/l)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
1	95238.1	129523.8	121904.8	110476.2
2	137142.9	114285.7	140952.4	112230.2
3	114285.7	127769.8	99047.6	133333.3
4	175462.2	147226.9	127058.8	131092.4
5	161344.5	195630.3	129075.6	135126.1
6	169784.2	141007.2	166330.9	159424.5
7	145611.5	219280.6	152518.0	142158.3
8	154820.1	219280.6	162877.7	162877.7
9	135126.1	135126.1	118991.6	123025.2
10	124285.7	117857.1	70791.4	169285.7
11	90000.0	94964.0	109285.7	154285.7
12	101870.5	53571.4	66428.6	128571.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์การทดสอบการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-1 ค่าพีเอช

สัปดาห์	พีเอช			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
0	8.02	8.02	8.02	8.02
3	4.48	4.65	4.37	4.50
5	5.15	5.45	5.32	5.31
7	4.94	4.72	4.66	4.72
9	4.71	4.80	4.72	4.88
11	4.76	4.71	4.70	4.73
13	4.65	4.77	4.70	4.68
16	4.61	4.64	4.60	4.62
19	4.52	4.54	4.50	4.52
23	4.62	4.53	4.53	4.56
26	4.56	4.55	4.51	4.53
34	4.62	4.63	4.57	4.57
41	4.63	4.64	4.59	4.59
48	4.62	4.63	4.62	4.67
55	4.66	4.60	4.65	4.63
62	4.59	4.60	4.54	4.63
69	4.62	4.65	4.67	4.64
76	4.67	4.65	4.64	4.61
83	4.69	4.69	4.61	4.61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ข-2 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย

สัปดาห์	ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย(mg/l)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
3	3262.50	3112.50	3260.00	3350.00
5	6356.25	4125.00	3346.88	3375.00
7	4396.88	5887.50	4500.00	3710.00
9	5325.00	2655.00	2875.00	2715.00
11	4631.25	3150.00	3887.50	3743.75
13	3656.25	2831.25	4012.50	4850.00
16	4006.25	3522.92	4620.83	4454.17
19	5471.88	4187.50	4893.75	3514.58
23	3418.75	3804.17	3495.83	3758.33
26	3531.25	5429.17	4787.50	4770.83
34	6118.75	5704.17	5450.00	5066.67
41	2743.75	2687.50	5229.17	5895.83
48	6381.25	6966.67	6541.67	6258.33
55	2675.00	6125.00	4704.17	5470.83
62	5100.00	6450.00	4820.83	5531.25
69	6731.25	6125.00	6793.75	6043.75
76	5262.50	5781.25	6350.00	6175.00
83	3531.25	5429.17	4787.50	4770.83

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-3 ค่าความเป็นด่าง

สัปดาห์	ค่าความเป็นด่าง (mg/l)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
3	1195.00	1483.33	950.00	1193.33
5	2206.25	2879.17	1387.50	2516.67
7	2256.25	2820.83	1793.33	1446.67
9	2137.50	1960.00	2290.00	2495.00
11	2550.00	2468.75	2216.67	2079.17
13	1956.25	2766.67	2412.50	2066.67
16	2283.33	2358.33	3158.33	1477.78
19	2239.58	2283.33	2762.50	2034.72
23	2116.67	2316.67	3191.67	2141.67
26	2054.17	2522.22	2920.83	2127.78
34	2506.25	2594.44	2216.67	2205.56
41	2200.00	2583.33	2044.44	2108.33
48	2029.17	2744.44	2488.89	2758.33
55	2800.00	2512.50	2283.33	2502.78
62	2529.17	2722.22	2400.00	2487.50
69	2275.00	2662.50	2587.50	2466.67
76	2641.67	2550.00	2700.00	2237.50
83	2054.17	2522.22	2920.83	2127.78

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข-4 ค่าซีโอดี

สัปดาห์	ค่าซีโอดี(mg/l)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
3	16474.07	14143.21	18804.94	14696.3
5	18251.85	16118.52	15170.37	16434.57
7	16258.06	14967.74	17290.32	15225.81
9	15483.87	15483.87	16000.00	17290.32
11	20857.14	17714.29	19428.57	20190.48
13	18976.74	20837.21	23441.86	25674.42
16	12355.56	24888.89	24000.00	23288.89
19	23911.11	24177.78	23111.11	25511.11
23	28681.48	30340.74	28207.41	32000
26	40059.26	40296.3	40059.26	41007.41
34	34370.37	31288.89	32711.11	31762.96
41	31377.78	30577.78	29866.67	30755.56
48	30459.26	35318.52	34844.44	30577.78
55	32592.59	33896.3	36029.63	31288.89
62	24913.04	25304.35	23739.13	26869.57
69	24507.94	24888.89	25396.83	25904.76
76	32126.98	28698.41	26793.65	26031.75
83	30814.81	33659.26	30103.7	30814.81

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การคำนวณ %Biodegradation (ASTM D5526-94)

คำนวณจากปริมาณแก๊สคาร์บอนสูงสุดที่ผลิตได้ตามทฤษฎี ดังสมการ

$$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$$

เมื่อ 1 มิลลิโมลของสารอินทรีย์คาร์บอนเท่ากับ 12 มิลลิกรัม

1 มิลลิโมลของแก๊สจึงเท่ากับ 22.4 มิลลิลิตร ที่ STP

ดังนั้น แก๊ส 22.4 มิลลิลิตร = 12 มิลลิกรัมคาร์บอน

ตารางที่ ข-5 คำนวณ %Biodagradation

ชุดการทดลอง	**คาร์บอนในตัวอย่าง (mg)**	**มีเทน (%)**	**ปริมาณแก๊ส (มิลลิลิตร)**	**ปริมาณคาร์บอนในแก๊ส (g)**
ชุดควบคุม	4890.00	23.12	23.37	12.52
กระดาษ	88.55	56.79	25.17	13.48
พอลิสไตรีนโฟม	219.29	14.02	20.98*	11.24
พีแอลเอ	118.91	26.8	18.85*	10.10

**ปริมาณแก๊สน้อยกว่าชุดควบคุมไม่สามารถนำมาคำนวณได้*

$$\%\ Biodegradation = \frac{mean\ C_g(test) - mean\ C_g(blank)}{C_i} \times 100$$

เมื่อ Cg คือปริมาณแก๊สคาร์บอนที่ผลิตได้ (กรัม)

Ci คือปริมาณคาร์บอนในตัวอย่าง (กรัม)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

<u>%Biodegradation ของวัสดุกระดาษ</u>

$$\%Biodegradation = \frac{13.84-12.52}{88.55} \times 100$$

$$= 1.90$$

ภาคผนวก ค

ผลการวิเคราะห์การทดสอบการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-1 ค่าซีโอดี

สัปดาห์	ค่าซีโอดี(mg/l)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
1	78101.69	92745.76	62362.20	60472.44
3	55384.62	66461.54	60472.44	52913.39
7	52219.78	71208.79	53161.29	48516.13
11	36395.60	66461.54	37245.90	37245.90
14	47472.53	64879.12	32524.59	32524.59
17	49054.95	60131.87	41782.38	44766.84
21	47751.30	76103.63	50735.75	49243.52
24	49243.52	65658.03	49243.52	56704.66
28	53802.20	68043.96	50735.75	49243.52
31	74838.71	76387.10	49243.52	43274.61
35	41967.21	75016.39	55138.46	53661.54
38	73290.32	81032.26	65476.92	56615.38
42	65573.77	75016.39	71606.56	59803.28
45	78163.93	73442.62	70426.23	56262.30
49	56655.74	58229.51	68065.57	57442.62
52	58229.51	67672.13	69245.90	60983.61
56	58229.51	59803.28	57442.62	76327.87
59	59803.28	61377.05	49263.16	37894.74
63	58229.51	72393.44	49263.16	44210.53
66	74426.97	80898.88	54315.79	55578.95
70	97078.65	82516.85	46736.84	37894.74
73	92224.72	80898.88	48000.00	44210.53
77	97078.65	82516.85	88421.05	50526.32
80	101932.58	77662.92	65684.21	51789.47
84	92518.13	65658.03	59368.42	48000.00
87	91025.91	77595.85	59368.42	44210.53

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-1 ค่าซีโอดี (ต่อ)

สัปดาห์	ค่าซีโอดี(mg/l)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
91	101471.50	77595.85	66947.37	56842.11
94	98487.05	73119.17	64421.05	58105.26
98	96994.82	79088.08	77052.63	63157.89
101	102963.73	77595.85	79578.95	60631.58
105	113230.77	89230.77	62040.82	48979.59
108	105846.15	87384.62	65954.20	48979.59
112	128965.52	124307.69	66938.78	50612.24
115	144615.38	109538.46	66938.78	57142.86
120	155692.31	111384.62	65306.12	60408.16

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-2 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย

สัปดาห์	กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (mg/l)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
1	3993.75	3750.00	3600.00	3393.75
7	10775.00	12200.00	10087.50	10050.00
14	13050.00	13987.50	13875.00	10106.25
21	12750.00	11362.50	10500.00	9637.50
28	13912.50	16287.50	12450.00	10012.50
35	16162.50	15281.25	9862.50	7518.75
42	12187.50	12675.00	15281.25	5568.75
49	15000.00	11906.25	12037.50	5606.25
56	15843.75	11662.50	3806.25	9506.25
63	11437.50	11287.50	10556.25	6225.00
70	14550.00	14700.00	12543.75	5700.00
77	14175.00	11868.75	8137.50	7031.25
84	16762.50	10181.25	8437.50	4856.25
91	11568.75	13612.50	5737.50	4950.00
98	10593.75	15300.00	10481.25	11062.50
105	15581.25	10931.25	7275.00	5550.00
112	21037.50	12487.50	6000.00	10743.75
120	21543.75	10031.25	12562.50	6037.50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-3 ค่าความเป็นด่าง

สัปดาห์	ค่าความเป็นด่าง (mg/l)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
1	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00
14	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.00	0.00	0.00	0.00
28	291.67	0.00	0.00	0.00
35	425.00	0.00	1700.00	512.50
42	750.00	0.00	8500.00	1050.00
49	537.50	0.00	9212.50	4700.00
56	1050.00	0.00	5375.00	7187.50
63	1050.00	0.00	7962.50	5825.00
70	1950.00	0.00	4662.50	6300.00
77	3475.00	375.00	6812.50	7862.50
84	7500.00	1412.50	3587.50	5687.50
91	9450.00	1800.00	2950.00	7000.00
98	8450.00	2312.50	2975.00	8237.50
105	12650.00	2887.50	2575.00	5625.00
112	12450.00	5112.50	3737.50	7512.50
120	14025.00	5587.50	4025.00	6737.50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-4 ค่าพีเอช

วัน	พีเอช				วัน	พีเอช			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
1	4.84	4.78	4.26	4.31	23	3.89	3.85	3.85	3.89
2	4.38	4.27	4.56	4.46	24	3.94	3.84	3.85	3.90
3	3.79	3.92	4.06	3.90	25	3.97	3.80	3.84	3.91
4	3.73	3.88	4.11	3.98	26	3.98	3.80	3.82	3.91
5	3.70	3.82	4.21	3.99	27	4.07	3.86	3.87	3.94
6	3.68	3.78	4.08	3.88	28	4.05	3.83	3.89	3.96
7	3.73	3.76	4.19	3.83	29	4.18	3.96	3.84	3.98
8	3.71	3.77	4.93	4.64	30	4.19	3.96	3.86	3.98
9	3.70	3.80	4.05	3.73	31	4.15	3.97	3.92	4.08
10	3.71	3.80	4.01	3.70	32	4.10	3.94	4.08	4.18
11	3.72	3.82	4.10	3.87	33	4.17	3.98	4.08	4.18
12	3.81	3.79	4.07	3.88	34	4.05	3.90	4.26	4.12
13	3.79	3.77	4.04	3.86	35	4.12	3.96	4.34	4.10
14	3.87	3.72	3.98	3.80	36	4.12	3.96	4.56	4.13
15	3.88	3.69	4.01	3.86	37	4.14	3.69	4.66	4.13
16	3.86	3.77	4.00	3.87	38	4.15	3.97	5.07	4.13
17	3.90	3.77	3.93	3.96	39	4.08	3.94	5.78	4.21
18	3.99	3.79	3.98	4.03	40	4.08	3.96	5.80	4.28
19	3.95	3.87	3.94	3.98	41	4.10	3.99	6.30	5.09
20	3.92	3.82	3.93	3.97	42	4.12	4.02	6.27	5.10
21	3.88	3.81	3.95	3.96	43	4.11	4.02	6.18	5.20
22	3.87	3.82	3.86	3.91	44	4.14	4.02	5.42	4.49

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-4 ค่าพีเอช (ต่อ)

วัน	พีเอช				วัน	พีเอช			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
45	4.14	4.04	5.39	4.54	67	4.32	4.13	5.67	6.14
46	4.17	4.06	5.39	4.78	68	4.38	4.11	5.35	6.12
47	4.13	4.04	5.46	5.63	69	4.41	4.15	5.17	5.99
48	4.14	4.05	5.60	5.73	70	4.36	4.13	5.16	5.96
49	4.16	4.06	5.83	5.59	71	4.38	4.11	5.21	6.08
50	4.16	4.09	5.58	5.78	72	4.39	4.10	5.18	5.98
51	4.19	4.11	5.57	5.81	73	4.44	4.10	5.22	6.09
52	4.20	4.14	5.51	5.75	74	4.49	4.15	5.27	6.08
53	4.21	4.16	5.39	5.66	75	4.47	4.15	5.49	6.14
54	4.18	4.16	5.42	5.63	76	4.53	4.20	5.51	6.15
55	4.17	4.14	5.44	5.66	77	4.56	4.21	5.67	6.15
56	4.21	4.05	5.16	5.60	78	4.59	4.21	5.64	6.12
57	4.32	4.06	5.13	5.63	79	4.53	4.19	5.64	6.10
58	4.24	4.06	5.12	5.66	80	4.58	4.18	5.68	6.21
59	4.24	4.57	5.14	5.62	81	5.41	4.56	5.56	6.17
60	4.27	4.13	5.21	5.65	82	4.51	4.07	5.32	6.12
61	4.26	4.12	5.20	5.63	83	4.53	4.07	5.02	6.09
62	4.26	4.15	5.25	5.67	84	4.67	4.18	4.98	6.08
63	4.30	4.54	5.56	6.07	85	4.64	4.18	4.95	6.00
64	4.29	4.13	5.58	6.07	86	4.63	4.19	4.96	6.00
65	4.30	4.16	5.61	6.05	87	4.57	4.13	4.96	6.05
66	4.31	4.11	5.63	6.08	88	4.63	4.23	4.98	6.00

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-4 ค่าพีเอช (ต่อ)

วัน	พีเอช				วัน	พีเอช			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
89	4.66	4.24	5.00	6.01	111	5.33	5.07	4.60	5.81
90	4.75	4.27	4.59	5.70	112	5.36	4.62	4.73	5.79
91	4.90	4.34	4.55	5.66	113	5.35	4.66	4.70	5.78
92	4.88	4.31	4.47	5.67	114	6.17	5.46	4.63	5.75
93	4.92	4.30	4.47	5.69	115	6.20	5.50	4.58	5.78
94	4.92	4.34	4.48	5.68	116	6.29	5.54	4.54	5.72
95	4.88	4.28	4.48	5.71	117	5.56	4.81	4.78	5.78
96	4.81	4.27	4.43	5.67	118	5.61	4.81	4.56	5.69
97	4.83	4.30	4.44	5.69	119	5.68	4.88	4.53	5.68
98	4.86	4.32	4.47	5.67	120	5.74	4.88	4.55	5.72
99	4.94	4.32	4.49	5.73					
100	5.02	4.38	4.48	5.71					
101	5.07	4.38	4.45	5.70					
102	5.10	4.38	4.34	5.62					
103	5.14	4.41	4.30	5.54					
104	5.21	4.46	4.54	5.63					
105	5.20	4.45	4.52	5.66					
106	5.22	4.50	4.50	5.60					
107	5.24	4.48	4.47	5.67					
108	5.10	4.49	4.49	5.67					
109	5.30	4.52	4.52	5.65					
110	5.53	4.54	4.50	5.73					

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-5 แอมโมเนียไนโตรเจน

สัปดาห์	แอมโมเนียไนโตรเจน (mg/l)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
1	66.50	80.50	112.00	105.00
14	203.00	199.50	325.50	367.50
28	262.50	252.00	325.50	399.00
42	273.00	294.00	371.00	231.00
56	339.50	343.00	357.00	427.00
70	430.50	378.00	280.00	413.00
84	766.50	420.00	210.00	469.00
98	1001.00	563.50	245.00	602.00
112	1375.50	668.50	217.00	588.00
120	1603.00	756.00	217.00	644.00

ตารางที่ ค-6 ฟอสเฟต

สัปดาห์	ฟอสเฟต (mg/l)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
1	301.82	227.27	257.27	305.45
14	242.73	346.36	396.36	333.64
28	348.18	301.82	886.36	326.36
42	315.45	253.64	207.27	310.00
56	341.82	247.27	384.55	398.18
70	261.82	268.18	381.82	266.36
84	229.09	250.00	304.55	350.91
98	291.82	232.73	370.91	283.64
112	249.09	259.09	192.73	138.18
120	286.36	294.55	203.64	227.27

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-7 โออาร์พี

วัน	โออาร์พี				วัน	โออาร์พี			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
1	65	63	46	45	23	30	30	-48	-58
2	50	62	7	17	24	28	36	-48	-60
3	40	65	21	47	25	14	35	-60	-64
4	12	29	15	22	26	17	37	-50	-69
5	34	33	19	34	27	24	36	-51	-79
6	37	32	9	15	28	22	43	-52	-66
7	45	51	6	22	29	16	30	-52	-55
8	52	54	-4	18	30	21	50	-29	-52
9	50	52	4	12	31	34	31	-23	-55
10	44	49	-6	10	32	35	43	-26	-56
11	36	39	-103	-80	33	-48	-39	-34	-59
12	51	46	-102	-90	34	-32	-2	-43	-59
13	41	48	-93	-92	35	-43	-33	-45	-50
14	43	53	-93	-91	36	-30	-20	-50	-32
15	47	56	-86	-79	37	10	24	-76	-41
16	38	44	-79	-95	38	-7	-2	-96	-55
17	38	50	-96	-93	39	-10	5	-105	-44
18	51	80	-75	-76	40	-12	11	-126	-34
19	30	46	-71	-78	41	-11	17	-99	-20
20	40	53	-66	-77	42	-2	19	-85	-20
21	39	45	-63	-73	43	1	24	-59	-21
22	36	38	-55	-59	44	-1	18	-48	11

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-7 โออาร์พี (ต่อ)

วัน	โออาร์พี				วัน	โออาร์พี			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
45	1	21	-24	12	67	2	26	34	0
46	11	30	-32	1	68	-8	46	-5	-63
47	21	34	-23	-21	69	4	26	-17	-40
48	-5	-5	-48	-62	70	7	31	-10	-67
49	-47	2	-58	-41	71	-5	28	-6	-38
50	-43	-13	-36	-30	72	-11	24	-11	-75
51	37	58	31	31	73	1	39	-1	-58
52	1	1	-26	-20	74	-11	27	-11	-29
53	-52	-22	-22	-27	75	-8	23	-10	-34
54	-49	0	-4	-24	76	5	28	-19	-42
55	-65	-38	-1	1	77	-5	20	8	-39
56	-66	-46	-3	1	78	-3	30	20	-47
57	-62	-24	2	4	79	-20	20	21	-5
58	-65	-21	10	-2	80	0	18	19	-8
59	-36	-17	-2	-8	81	-19	18	19	-60
60	5	72	20	19	82	-14	10	27	-67
61	-3	41	28	-2	83	-16	16	19	-92
62	-38	-13	12	-3	84	-96	-30	15	-68
63	-41	4	50	28	85	-89	-58	20	-89
64	-47	-1	12	-19	86	-122	-61	27	-94
65	-20	28	12	-9	87	-114	-91	26	-61
66	-14	16	37	8	88	-109	-89	20	-50

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-7 โออาร์พี (ต่อ)

วัน	โออาร์พี				วัน	โออาร์พี			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
89	-71	-87	25	-88	111	-134	-61	50	-50
90	-110	-93	45	-69	112	-120	-60	48	-46
91	-105	-75	43	-72	113	-91	-36	48	-36
92	-108	-72	30	-85	114	-85	-31	36	-74
93	-111	-83	34	-60	115	-80	-27	33	-91
94	-104	-69	30	-80	116	-74	-6	42	-72
95	-100	-73	34	-89	117	-62	12	38	-65
96	-97	-67	30	-80	118	-52	9	44	-60
97	-97	-68	32	-72	119	-68	1	40	-70
98	-116	-86	36	-67	120	-71	5	47	-82
99	-120	-73	42	-55					
100	-111	-60	40	-42					
101	-117	-72	57	-18					
102	-115	-68	58	-30					
103	-106	-65	71	-23					
104	-104	-59	70	-32					
105	-103	-53	81	-22					
106	-111	-55	79	-25					
107	-116	-56	70	-30					
108	-113	-53	68	-29					
109	-99	-45	44	-51					
110	-104	-41	45	-64					

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-8 แก๊สชีวภาพรายวัน

วัน	แก๊สชีวภาพรายวัน (ml/g VS)				วัน	แก๊สชีวภาพรายวัน (ml/g VS)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
1	0.00	3.50	0.00	77.76	23	69.92	105.61	21.28	50.75
2	0.00	38.51	0.00	189.09	24	80.08	149.38	0.00	14.73
3	0.00	60.10	0.00	153.07	25	54.38	132.46	4.09	22.92
4	4.78	43.18	0.00	331.52	26	53.79	114.95	32.74	26.19
5	45.42	65.94	0.00	180.09	27	43.03	103.86	5.73	43.38
6	72.91	79.36	0.00	173.54	28	39.44	110.87	16.37	13.92
7	20.32	24.51	0.00	120.33	29	26.89	103.28	0.00	4.91
8	20.92	22.17	0.00	177.63	30	10.76	19.26	0.00	34.38
9	0.00	0.00	0.00	148.16	31	19.12	58.93	0.00	52.39
10	0.00	0.00	0.00	136.70	32	28.09	93.36	0.00	67.12
11	40.04	53.68	0.00	194.82	33	16.73	56.02	0.00	103.14
12	54.38	49.01	0.00	148.98	34	19.72	114.37	0.00	127.70
13	58.57	47.85	0.00	162.08	35	16.14	33.26	0.00	160.44
14	129.09	56.60	0.00	62.21	36	12.55	60.10	0.00	187.45
15	218.73	77.02	0.00	38.47	37	8.37	51.35	0.00	233.29
16	123.11	98.61	0.00	71.22	38	8.96	71.77	0.00	194.00
17	121.32	71.77	0.00	16.37	39	23.31	40.26	0.00	203.01
18	185.26	153.46	0.00	5.73	40	29.88	71.19	8.19	219.38
19	209.76	150.54	0.00	29.47	41	54.38	76.44	151.93	230.84
20	139.25	155.21	2.46	6.55	42	40.64	60.68	196.46	224.29
21	89.64	106.20	40.93	31.92	43	17.93	39.09	218.72	198.10
22	102.19	133.62	29.47	70.40	44	40.04	65.35	58.94	162.90

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-8 แก๊สชีวภาพรายวัน (ต่อ)

วัน	แก๊สชีวภาพรายวัน (ml/g VS)				วัน	แก๊สชีวภาพรายวัน (ml/g VS)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
45	37.05	59.52	75.96	171.90	67	177.49	49.01	33.40	135.88
46	14.34	53.68	73.34	254.58	68	98.61	40.85	2.62	81.86
47	48.41	42.60	115.26	237.39	69	85.46	39.68	14.41	104.78
48	11.95	9.34	165.03	208.74	70	85.46	25.09	30.12	144.07
49	8.37	44.35	98.23	187.45	71	200.80	80.52	35.36	123.61
50	0.00	53.68	57.30	92.99	72	151.80	50.18	69.42	96.59
51	0.00	42.60	44.20	113.13	73	130.28	79.94	56.32	135.88
52	2.99	71.19	87.75	185.00	74	65.14	58.35	62.87	125.24
53	0.00	71.19	96.92	166.99	75	130.28	134.79	91.68	130.15
54	0.60	27.42	90.37	184.18	76	93.83	84.02	40.60	72.85
55	0.00	113.78	52.39	175.18	77	153.59	156.38	74.65	108.05
56	0.00	70.02	48.46	148.16	78	111.16	97.45	9.17	78.58
57	181.08	78.19	55.01	117.88	79	111.76	116.70	23.58	73.67
58	140.44	58.93	72.03	207.10	80	133.27	113.20	34.05	87.59
59	151.80	103.86	39.29	126.06	81	100.40	107.95	26.19	88.41
60	156.58	61.85	74.65	159.62	82	83.67	99.20	9.17	95.77
61	157.77	102.70	13.10	58.94	83	95.62	85.78	6.55	86.77
62	149.41	124.87	57.63	219.38	84	136.86	132.46	11.79	104.78
63	158.97	147.63	51.08	144.89	85	107.57	109.70	13.10	101.50
64	112.95	72.35	47.15	44.20	86	109.96	123.70	1.31	85.13
65	130.28	19.26	68.11	49.11	87	65.14	133.62	12.28	73.67
66	58.57	8.75	18.34	121.97	88	59.16	85.78	3.93	68.76

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-8 แก๊สชีวภาพรายวัน (ต่อ)

วัน	แก๊สชีวภาพรายวัน (ml/g VS)				วัน	แก๊สชีวภาพรายวัน (ml/g VS)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
89	17.33	22.17	14.41	81.86	111	93.23	114.37	19.65	21.28
90	16.73	21.01	17.03	79.40	112	76.50	119.04	47.15	65.49
91	13.15	2.33	11.79	27.01	113	63.95	149.38	57.63	60.57
92	89.64	7.00	13.10	105.60	114	41.24	224.07	5.24	31.92
93	71.71	19.84	2.62	92.50	115	71.71	208.31	18.34	17.19
94	82.47	46.68	6.55	80.22	116	72.31	210.06	19.65	37.65
95	94.42	68.27	18.34	45.02	117	23.90	81.69	2.62	58.12
96	72.91	36.76	20.96	57.30	118	41.24	123.70	2.62	25.38
97	92.03	39.09	6.55	99.87	119	34.06	109.70	5.24	23.74
98	96.22	18.09	5.24	112.96	120	50.80	121.37	6.55	91.68
99	36.45	57.18	6.55	20.46					
100	82.47	82.86	19.65	24.56					
101	50.80	45.51	13.10	27.01					
102	41.24	30.93	11.79	34.38					
103	28.69	100.36	9.17	40.93					
104	78.29	128.95	5.24	81.86					
105	102.79	114.95	7.86	31.11					
106	73.51	76.44	6.55	63.85					
107	86.65	180.30	5.24	78.58					
108	83.67	109.70	3.93	42.57					
109	87.25	128.95	9.17	47.48					
110	69.32	156.38	13.10	40.93					

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ ค-9 แก๊สชีวภาพสะสม

วัน	แก๊สชีวภาพสะสม (ml/g VS)				วัน	แก๊สชีวภาพสะสม (ml/g VS)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
1	0	4	0	78	23	1706	1596	94	2577
2	0	42	0	267	24	1786	1746	94	2592
3	0	102	0	420	25	1840	1878	98	2615
4	5	145	0	751	26	1894	1993	131	2641
5	50	211	0	932	27	1937	2097	137	2684
6	123	291	0	1105	28	1976	2208	153	2698
7	143	315	0	1225	29	2003	2311	153	2703
8	164	337	0	1403	30	2014	2331	153	2737
9	164	337	0	1551	31	2033	2389	153	2790
10	164	337	0	1688	32	2061	2483	153	2857
11	204	391	0	1883	33	2078	2539	153	2960
12	259	440	0	2032	34	2098	2653	153	3088
13	317	488	0	2194	35	2114	2686	153	3248
14	446	544	0	2256	36	2126	2747	153	3436
15	665	621	0	2294	37	2135	2798	153	3669
16	788	720	0	2366	38	2144	2870	153	3863
17	910	792	0	2382	39	2167	2910	153	4066
18	1095	945	0	2388	40	2197	2981	161	4285
19	1305	1096	0	2417	41	2251	3058	313	4516
20	1444	1251	2	2424	42	2292	3118	510	4740
21	1533	1357	43	2456	43	2310	3157	728	4938
22	1636	1491	73	2526	44	2350	3223	787	5101

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-9 แก๊สชีวภาพสะสม (ต่อ)

วัน	แก๊สชีวภาพสะสม (ml/g VS)				วัน	แก๊สชีวภาพสะสม (ml/g VS)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
45	2387	3282	863	5273	67	4049	4709	2322	8612
46	2401	3336	937	5528	68	4147	4750	2325	8694
47	2450	3378	1052	5765	69	4233	4790	2339	8799
48	2462	3388	1217	5974	70	4318	4815	2369	8943
49	2470	3432	1315	6161	71	4519	4896	2405	9066
50	2470	3486	1372	6254	72	4671	4946	2474	9163
51	2470	3528	1417	6368	73	4801	5026	2531	9299
52	2473	3600	1504	6553	74	4866	5084	2593	9424
53	2473	3671	1601	6720	75	4997	5219	2685	9554
54	2474	3698	1692	6904	76	5091	5303	2726	9627
55	2474	3812	1744	7079	77	5244	5459	2800	9735
56	2474	3882	1793	7227	78	5355	5557	2810	9814
57	2655	3960	1848	7345	79	5467	5673	2833	9887
58	2795	4019	1920	7552	80	5600	5787	2867	9975
59	2947	4123	1959	7678	81	5701	5895	2893	10063
60	3103	4185	2034	7838	82	5784	5994	2903	10159
61	3261	4288	2047	7897	83	5880	6080	2909	10246
62	3411	4412	2104	8116	84	6017	6212	2921	10351
63	3570	4560	2155	8261	85	6124	6322	2934	10452
64	3683	4632	2202	8305	86	6234	6445	2935	10537
65	3813	4652	2271	8354	87	6300	6579	2948	10611
66	3871	4660	2289	8476	88	6359	6665	2951	10680

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ค-9 แก๊สชีวภาพสะสม (ต่อ)

วัน	แก๊สชีวภาพสะสม (ml/g VS)				วัน	แก๊สชีวภาพสะสม (ml/g VS)			
	ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ		ชุดควบคุม	กระดาษ	โฟม	พีแอลเอ
89	6376	6687	2966	10762	111	7920	8273	3199	12017
90	6393	6708	2983	10841	112	7996	8392	3246	12082
91	6406	6710	2995	10868	113	8060	8541	3304	12143
92	6496	6717	3008	10974	114	8101	8765	3309	12175
93	6567	6737	3010	11066	115	8173	8974	3327	12192
94	6650	6784	3017	11146	116	8245	9184	3347	12229
95	6744	6852	3035	11191	117	8269	9265	3350	12287
96	6817	6889	3056	11249	118	8311	9389	3352	12313
97	6909	6928	3063	11349	119	8345	9499	3357	12337
98	7005	6946	3068	11462	120	8395	9620	3364.02	12428.29
99	7042	7003	3075	11482					
100	7124	7086	3094	11507					
101	7175	7132	3107	11534					
102	7216	7163	3119	11568					
103	7245	7263	3128	11609					
104	7323	7392	3134	11691					
105	7426	7507	3141	11722					
106	7500	7583	3148	11786					
107	7586	7764	3153	11864					
108	7670	7873	3157	11907					
109	7757	8002	3166	11954					
110	7826	8159	3179	11995					

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ง

ผลการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน

ส่งวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

628 SERIES

ปาณิศา/sample

Name	Mass	Method	Analysis Date	Nitrogen %	Carbon %	Hydrogen %
Seed	0.1340	Master 3625	10/4/2017 11:07:15 AM	5.9122	47.887	6.5593
FW	0.1230	Master 3625	10/4/2017 11:15:42 AM	2.5996	48.902	7.1635
FWS	0.1389	Master 3625	10/4/2017 11:24:09 AM	3.0988	47.708	6.8126
P1	0.1307	Master 3625	10/4/2017 11:32:35 AM	-0.09572	37.188	5.5003
P2	0.1302	Master 3625	10/4/2017 11:41:03 AM	0.23978	42.125	6.0081
P3	0.1206	Master 3625	10/4/2017 11:49:31 AM	0.52670	43.560	6.4281
L1	0.1280	Master 3625	10/4/2017 11:57:59 AM	-0.16841	49.938	5.4902
L2	0.1071	Master 3625	10/4/2017 12:06:27 PM	-0.16528	49.664	5.4589
L3	0.1209	Master 3625	10/4/2017 12:14:53 PM	-0.08503	49.779	5.4636
F3	0.1186	Master 3625	10/4/2017 12:23:20 PM	0.56059	79.926	8.5815

Element	Average	Std. Deviation	RSD	Count
Mass	0.1252	0.009	7.261	10
Nitrogen %	1.2423	2.01664	162.3	10
Carbon %	49.668	11.4174	22.99	10
Hydrogen %	6.3466	1.00350	15.81	10

628 SERIES

ปาณิศา/sample

Name	Mass	Method	Analysis Date	Nitrogen %	Carbon %	Hydrogen %
F1	0.1174	Master 3625	10/17/2017 12:22:03 PM	-0.08558	92.104	7.4659
F2	0.1082	Master 3625	10/17/2017 12:30:17 PM	0.12160	86.604	8.0662

Element	Average	Std. Deviation	RSD	Count
Mass	0.1128	0.007	5.767	2
Nitrogen %	0.01801	0.146499	813.6	2
Carbon %	89.354	3.8895	4.353	2
Hydrogen %	7.7660	0.42449	5.466	2

ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณลิกนิน และโฮโลเซลลูโลส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ที่ วท 0307/ 14623

ถึง ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กรมวิทยาศาสตร์บริการขอส่งรายงานผลการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ ตัวอย่าง ภาชนะบรรจุอาหาร (Sample name : PAPER – B) หมายเลขปฏิบัติการ L60/06873.2 จำนวน 1 ตัวอย่าง ตามคำร้อง เลขรับ L60/06873 วันที่ 16 ตุลาคม 2560

พร้อมนี้ได้แนบผลการตรวจ วิเคราะห์ ทดสอบ มาเพื่อทราบ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

8 พฤศจิกายน 2560

กองวัสดุวิศวกรรม
โทร. 0 2201 7130
โทรสาร 0 2201 7127
E-mail : physics@dss.go.th

แบบ วศ.1

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

รายงานการทดสอบ

ชื่อวัตถุตัวอย่าง	เครื่องหมาย / ตรา	หมายเลขปฏิบัติการ
ภาชนะบรรจุอาหาร (Sample name : PAPER – B)	-	L60/06873.2

ผลการทดสอบ

	ร้อยละของน้ำหนักตัวอย่างอบแห้ง
ลิกนิน	15.4
โฮโลเซลลูโลส	85.2

ชื่อผู้ใช้บริการ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ผู้ใช้บริการ	ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
ลักษณะตัวอย่าง	กระดาษ ขนาดประมาณ 1x 1 นิ้ว น้ำหนัก 100 กรัม บรรจุในถุงพลาสติก
วันที่ทดสอบ	19 ตุลาคม – 6 พฤศจิกายน 2560
วิธีทดสอบ	1. ลิกนิน ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI T 222 om-15 2. โฮโลเซลลูโลส ทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI Section

ผู้รับรอง	ผู้รายงาน
(นางสาวภูวดี ตู้จินดา)	(นางสาวสุวิมล เหล็กหมื่นไวย)
นักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ	นักวิทยาศาสตร์

รายงานนี้รับรองเฉพาะวัตถุตัวอย่างที่ได้ทดสอบ/สอบเทียบเท่านั้น ไม่รับรองวัตถุหรือสินค้าที่ใช้รายงานนี้ในการโฆษณาหรืออ้างถึง
ห้ามคัดถ่ายใบรับรองหรือรายงานผลแต่เพียงบางส่วน โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการเป็นลายลักษณ์อักษร
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ถนนพระรามที่ 6 ราชเทวี กรุงเทพฯ 10400 ประเทศไทย

ภาคผนวก ฉ
ผลการองค์ประกอบแก๊สชีวภาพ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

GC-2010

Method Shimadzu

<Analytical Line 1>

[Injection Port SPL2]

Injection Mode	: Direct
Temperature	: 150.0 C
Carrier Gas	: He
Flow Control Mode	: Pressure
Pressure	: 100.0 kPa
Column Flow	: 10.00 mL/min
Linear Velocity	: 0.0 cm/sec
Purge Flow	: 3.0 mL/min

[Column Oven]

Initial Temperature	: 80.0 C
Equilibration Time	: 3.0 min

=Column Oven Temperature Program=

Total Program Time : 2.50 min

Rate(C/min)	Temperature(C)	Hold Time(min)
------	80.0	2.50

[Column Information]

Column Name	: MS-5A
Serial Number	:
Film Thickness	: 0.00 um
Column Length	: 2.0 m
Inner Diameter	: 3.00 mm ID
Column Max Temp	: 400 C
Description	: PQS

[Detector Channel 1 TCD1]

Temperature	: 200.0 C
Signal Acquire	: Yes
Sampling Rate	: 40 msec
Stop Time	: 2.50 min
Delay Time	: 0.00 min
Subtract Detector	: None
Current	: 80 mA
Polarity	: +
Makeup Gas	: He
Makeup Flow	: 20.0 mL/min

[General]

< Ready Check Heat Unit >
- Column Oven : Yes
- SPL2 : Yes
- TCD1 : Yes

< Ready Check Detector (FTD) >

< Ready Check Baseline Drift >
- TCD1 : No

< Ready Check Injection Flow >
- SPL2 Carrier : Yes
- SPL2 Purge : Yes

< Ready Check Add. Flow >

< Ready Check Detector APC Flow >
- TCD1 Makeup : Yes

External Wait : No
Auto Flame On : No
Auto Flame Off : Yes
Reignite : No
Auto Zero After Ready : Yes

[Peak Integration Parameters - Channel 1]

Width	: 3 sec	Slope	: 1000 uV/min
Drift	: 0 uV/min	T.DBL	: 1000 min
Min.Area/Height	: 1000 counts		

[Quantitative Parameters - Channel 1]
=Quantitative Parameters=

Quantitative Method	: External Standard		
Calculated by	: Area	Calibration Level#	: 1
Calibration Curve	: Linear	Through Origin	: Not through
Weight Regression	: None	Unit	: ppm

=Identification Parameters=

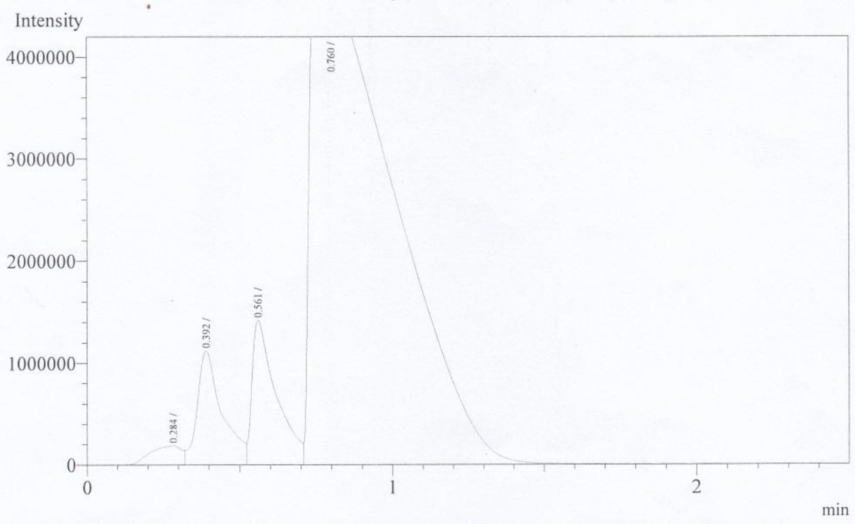
Window/Band	: Window	Window	: 5 %
Default Band Time	: ---	Identification Method	: Absolute
Peak Select	: All Peaks	Grouping	: None
Correction RT	: No Change		

[Column Performance Parameters - Channel 1]

Calc. Method	: JP	Column Length	: 0 mm
Time of Unretained Peak	: Time of 1st Peak	Set Time	: ---
Calculated for Identified Peak	: OFF		

Analysis Date & Time : 31/10/2560 10:30:59
User Name : Admin
Vial# : 0
Sample Name : F1
Sample ID :
Sample Type : Unknown
Injection Volume :
ISTD Amount :

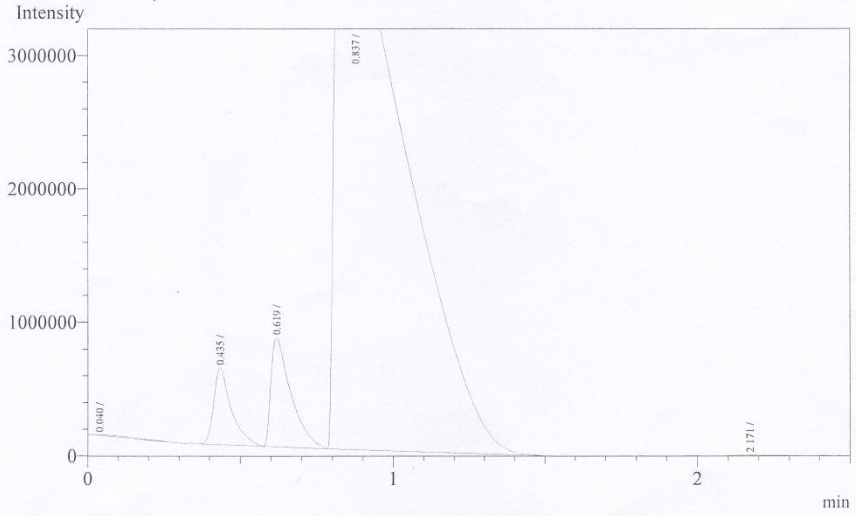
Data Name : C:\GCsolution\Data\Project1\air TCD662.gcd
Method Name : C:\GCsolution\Data\Project1\Packed column (TCD)-CO2.gcm



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.284	1404901	194294	0.000				
2	0.392	6362529	1126288	0.000		V		
3	0.561	7857121	1419913	0.000		V		
4	0.760	93073618	5118554	0.000		SV		
Total		108698169	7859049					

Analysis Date & Time : 31/10/2560 10:23:09
User Name : Admin
Vial# : 0
Sample Name : P-1
Sample ID :
Sample Type : Unknown
Injection Volume :
ISTD Amount :

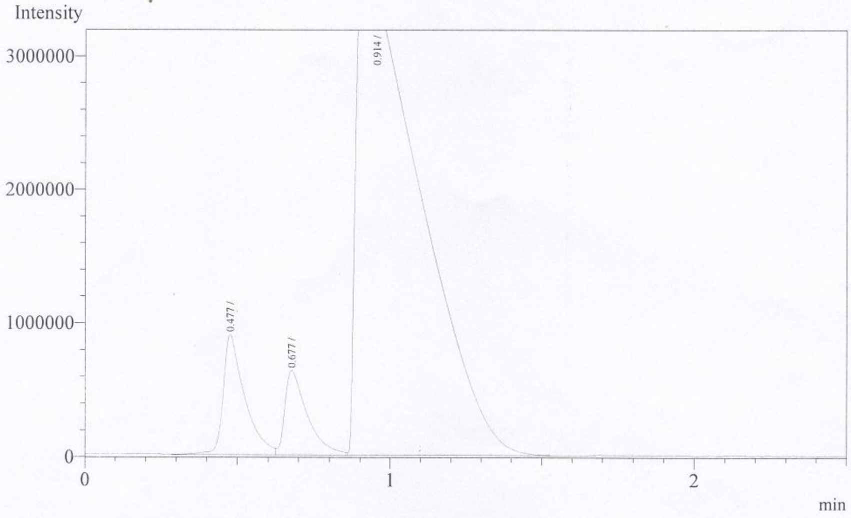
Data Name : C:\GCsolution\Data\Project1\air TCD660.gcd
Method Name : C:\GCsolution\Data\Project1\Packed column (TCD)-CO2.gcm



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.040	58690	3265	0.000				
2	0.435	2285363	573409	0.000				
3	0.619	3707576	816439	0.000				
4	0.837	67011445	4340576	0.000				
5	2.171	108478	12667	0.000		V		
Total		73171552	5746356					

Analysis Date & Time : 31/10/2560 10:18:17
User Name : Admin
Vial# : 0
Sample Name : C-1
Sample ID :
Sample Type : Unknown
Injection Volume :
ISTD Amount :

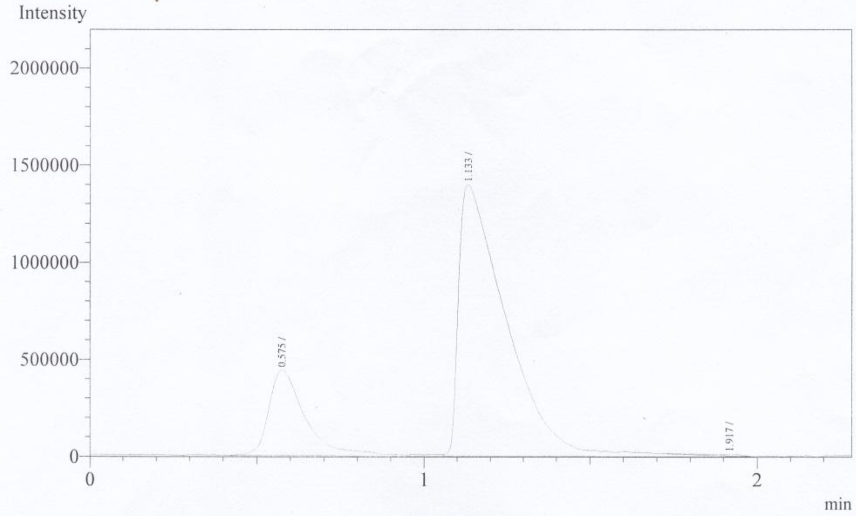
Data Name : C:\GCsolution\Data\Project1\air TCD659.gcd
Method Name : C:\GCsolution\Data\Project1\Packed column (TCD)-CO2.gcm



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.477	4385448	893738	0.000				
2	0.677	3198565	627820	0.000		V		
3	0.914	53508646	3817019	0.000		V		
Total		61092659	5338577					

Analysis Date & Time : 11/10/2560 10:25:02
User Name : Admin
Vial# : 0
Sample Name : PLA-120
Sample ID :
Sample Type : Unknown
Injection Volume :
ISTD Amount :

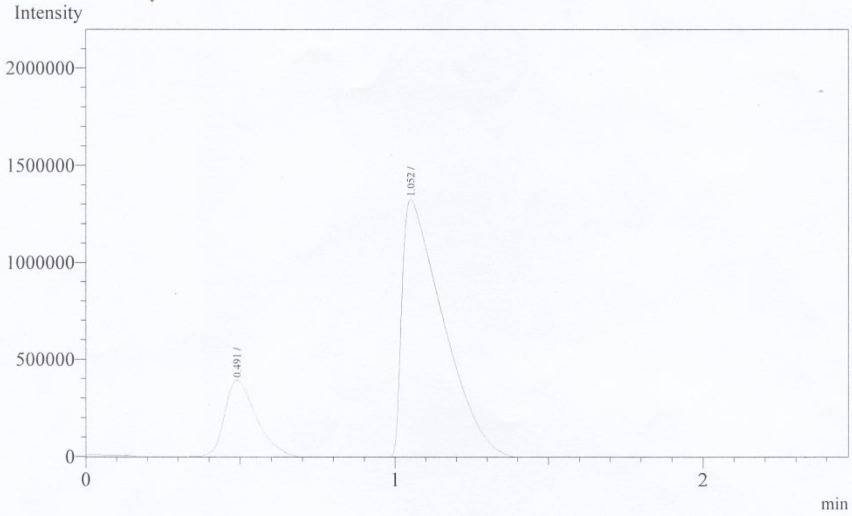
Data Name : C:\GCsolution\Data\Project1\air TCD655.gcd
Method Name : C:\GCsolution\Data\Project1\Packed column (TCD)-CO2.gcm



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.575	3374858	441234	0.000		S		
2	1.133	14008735	1398520	0.000		SV		
3	1.917	68020	7008	0.000		TV		
Total		17451613	1846762					

Analysis Date & Time : 11/10/2560 10:28:26
User Name : Admin
Vial# : 0
Sample Name : PAPER-120
Sample ID :
Sample Type : Unknown
Injection Volume :
ISTD Amount :

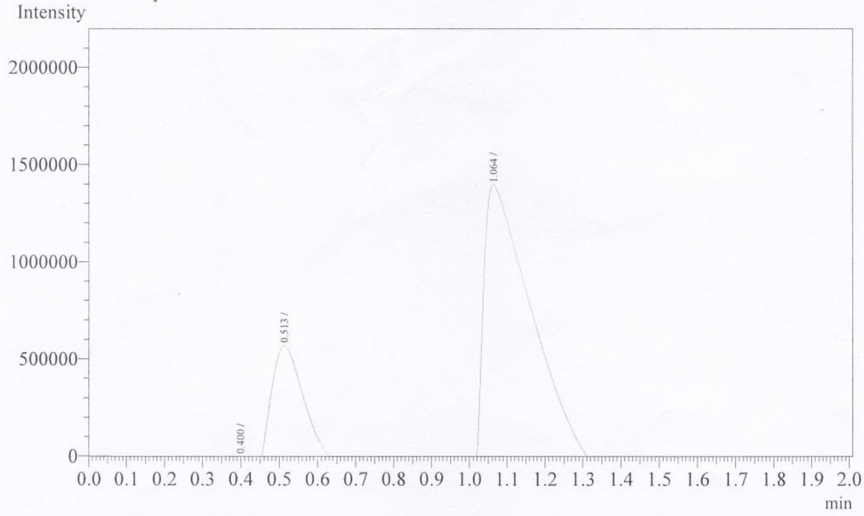
Data Name : C:\GCsolution\Data\Project1\air TCD656.gcd
Method Name : C:\GCsolution\Data\Project1\Packed column (TCD)-CO2.gcm



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.491	3041040	403480	0.000		V		
2	1.052	12802601	1343709	0.000		SV		
Total		15843641	1747189					

Analysis Date & Time : 11/10/2560 10:14:49
User Name : Admin
Vial# : 0
Sample Name : CONT-120
Sample ID :
Sample Type : Unknown
Injection Volume :
ISTD Amount :

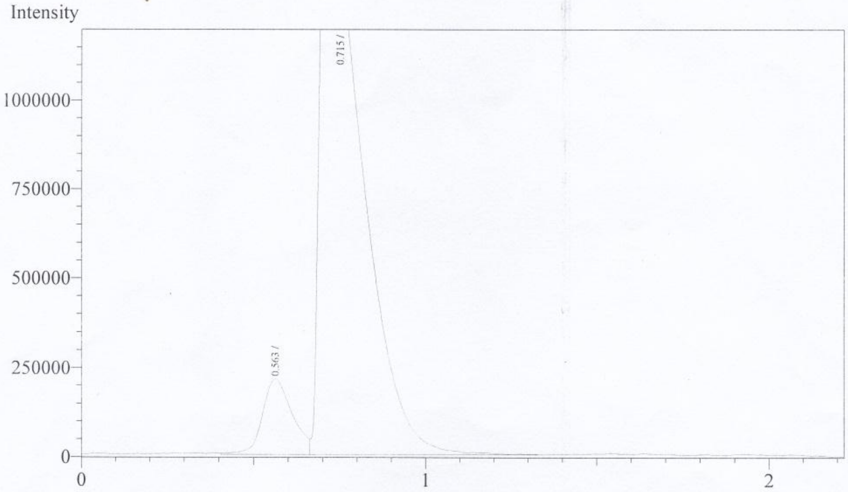
Data Name : C:\GCsolution\Data\Project1\air TCD652.gcd
Method Name : C:\GCsolution\Data\Project1\Packed column (TCD)-CO2.gcm



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.400	108671	20062	0.000				
2	0.513	4835315	693058	0.000		V		
3	1.064	15364891	1555942	0.000		S		
Total		20308877	2269062					

Analysis Date & Time : 11/10/2560 10:07:38
User Name : Admin
Vial# : 0
Sample Name : STD-CH4
Sample ID :
Sample Type : Unknown
Injection Volume :
ISTD Amount :

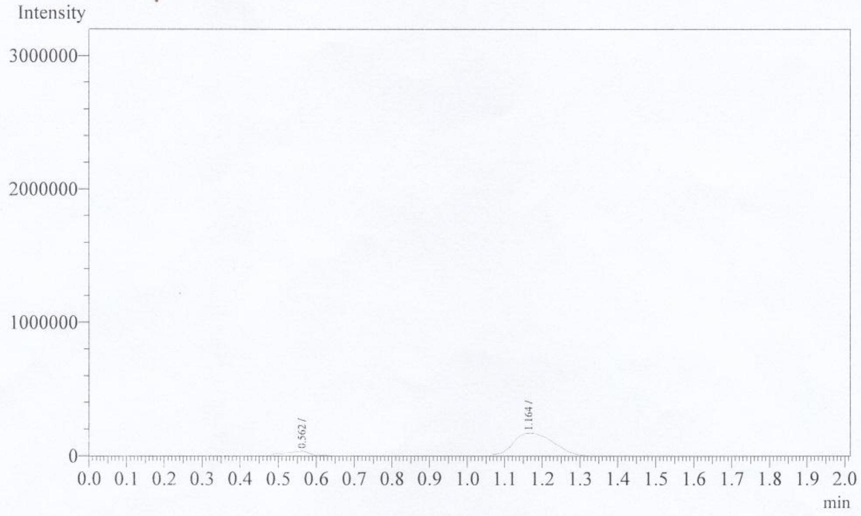
Data Name : C:\GCsolution\Data\Project1\air TCD650.gcd
Method Name : C:\GCsolution\Data\Project1\Packed column (TCD)-CO2.gcm



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.563	1272889	211965	0.000		V		
2	0.715	13820964	1734587	0.000		SV		
Total		15093853	1946552					

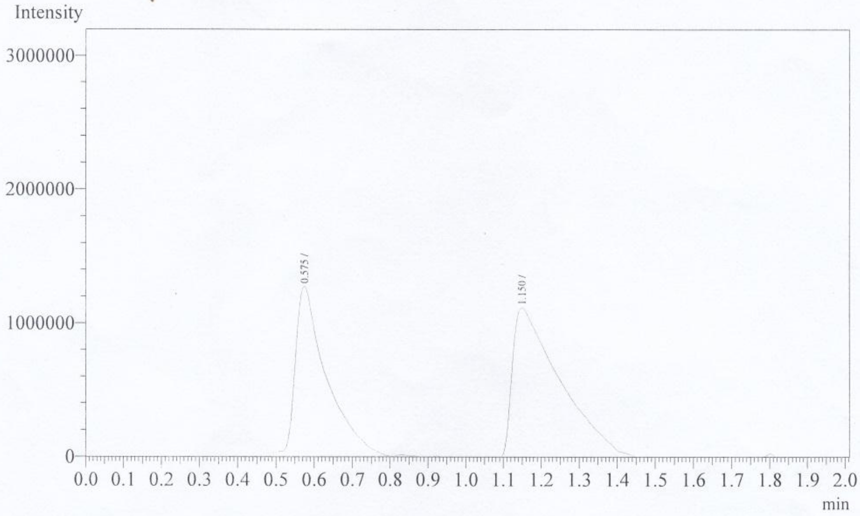
Analysis Date & Time : 24/8/2560 10:46:09
User Name : Admin
Vial# : 0
Sample Name : PLA-60
Sample ID :
Sample Type : Unknown
Injection Volume :
ISTD Amount :

Data Name : C:\GCsolution\Data\Project1\air TCD645.gcd
Method Name : C:\GCsolution\Data\Project1\Packed column (TCD)-CO2.gcm



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.562	553301	64188	0.000				
2	1.164	1783879	201054	0.000		V		
Total		2337180	265242					

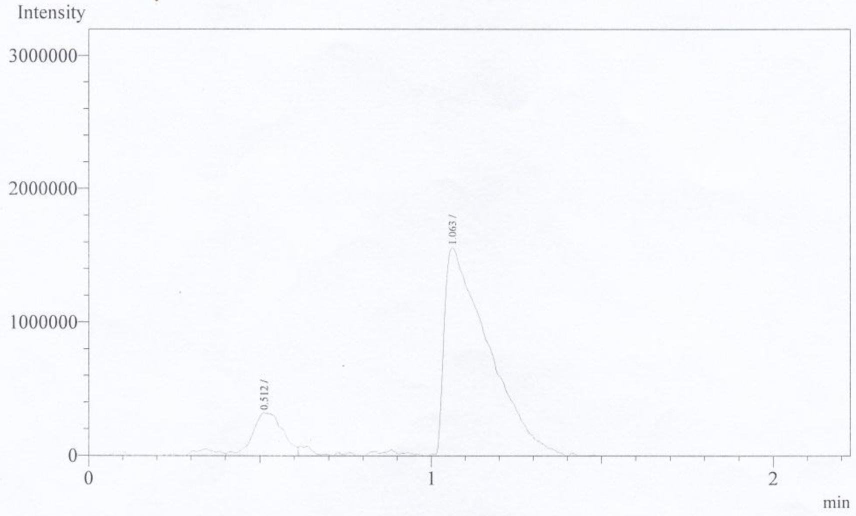
Analysis Date & Time	: 24/8/2560 10:49:23
User Name	: Admin
Vial#	: 0
Sample Name	: FOAM-60
Sample ID	:
Sample Type	: Unknown
Injection Volume	:
ISTD Amount	:
Data Name	: C:\GCsolution\Data\Project1\air TCD646.gcd
Method Name	: C:\GCsolution\Data\Project1\Packed column (TCD)-CO2.gcm



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.575	8322425	1302611	0.000		SV		
2	1.150	10544587	1151277	0.000		V		
Total		18867012	2453888					

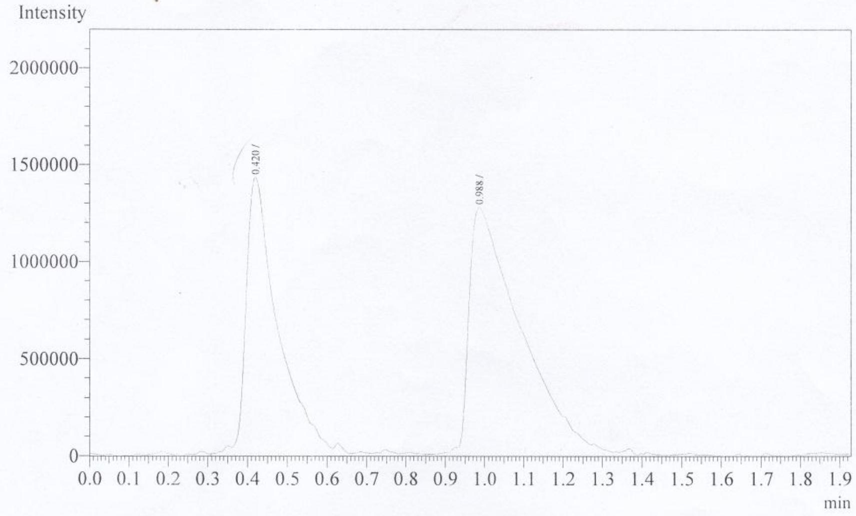
Analysis Date & Time	: 24/8/2560 10:38:58
User Name	: Admin
Vial#	: 0
Sample Name	: PAPER-60
Sample ID	:
Sample Type	: Unknown
Injection Volume	:
ISTD Amount	:

Data Name	: C:\GCsolution\Data\Project1\air TCD644.gcd
Method Name	: C:\GCsolution\Data\Project1\Packed column (TCD)-CO2.gcm



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.512	2671199	378310	0.000		V		
2	1.063	14449503	1608829	0.000		SV		
Total		17120702	1987139					

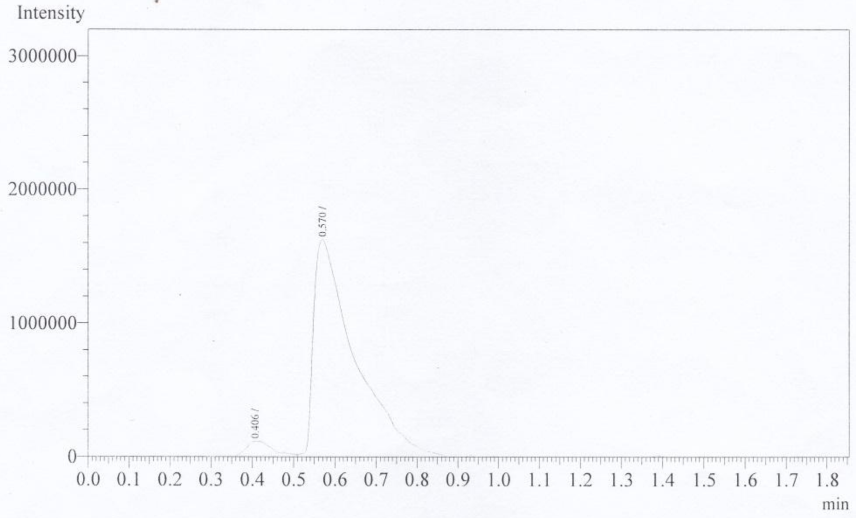
Analysis Date & Time	: 24/8/2560 10:52:39
User Name	: Admin
Vial#	: 0
Sample Name	: CONTROL-60
Sample ID	:
Sample Type	: Unknown
Injection Volume	:
ISTD Amount	:
Data Name	: C:\GCsolution\Data\Project1\air TCD647.gcd
Method Name	: C:\GCsolution\Data\Project1\Packed column (TCD)-CO2.gcm



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.420	8474480	1436162	0.000		SV		
2	0.988	12403901	1290148	0.000		SV		
Total		20878381	2726310					

Analysis Date & Time : 24/8/2560 11:01:06
User Name : Admin
Vial# : 0
Sample Name : STD-CH4
Sample ID :
Sample Type : Unknown
Injection Volume :
ISTD Amount :

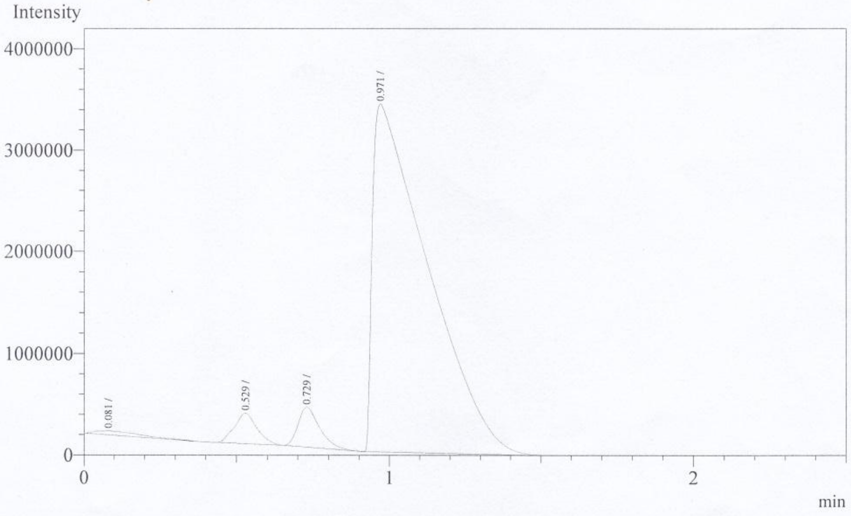
Data Name : C:\GCsolution\Data\Project1\air TCD649.gcd
Method Name : C:\GCsolution\Data\Project1\Packed column (TCD)-CO2.gcm



Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.406	891948	148664	0.000		V		
2	0.570	12498121	1656863	0.000		SV		
Total		13390069	1805527					

Analysis Date & Time : 31/10/2560 10:27:07
User Name : Admin
Vial# : 0
Sample Name : L1
Sample ID :
Sample Type : Unknown
Injection Volume :
ISTD Amount :

Data Name : C:\GCsolution\Data\Project1\air TCD661.gcd
Method Name : C:\GCsolution\Data\Project1\Packed column (TCD)-CO2.gcm

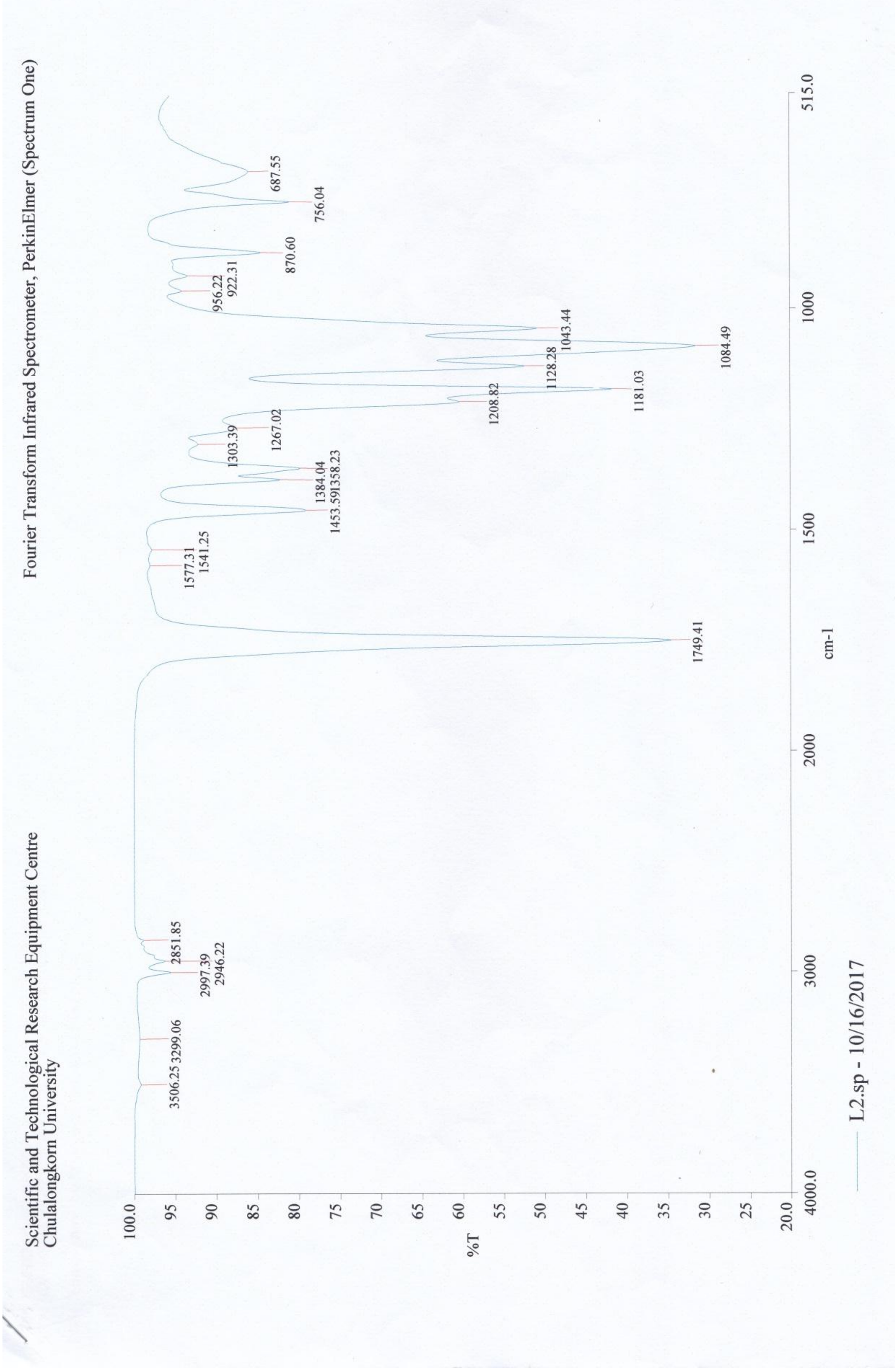


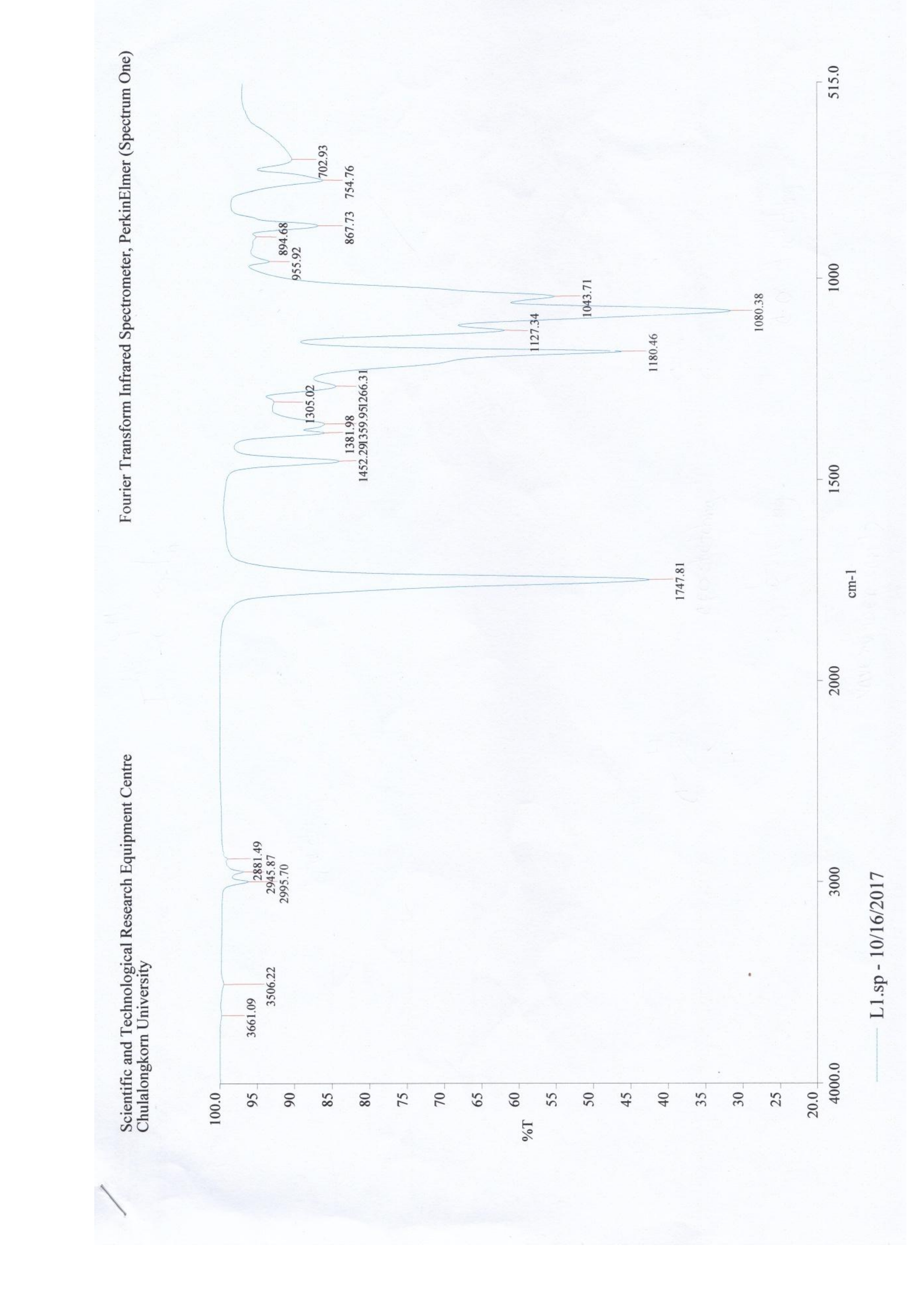
Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0.081	423642	39445	0.000				
2	0.529	1539082	302079	0.000				
3	0.729	1940236	394172	0.000				
4	0.971	43557410	3426204	0.000				
Total		47460370	4161900					

ภาคผนวก ช

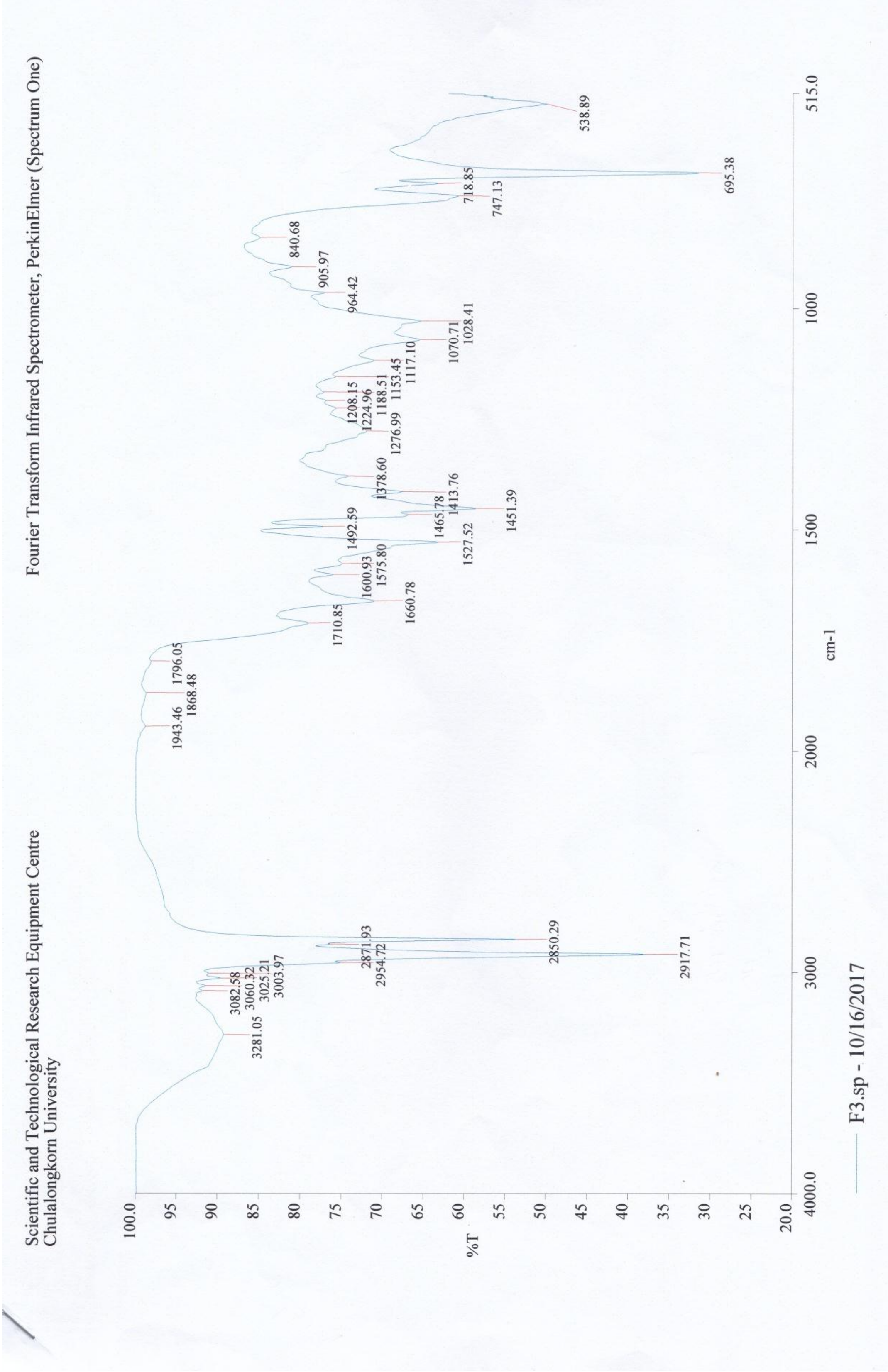
ผลวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของวัสดุ

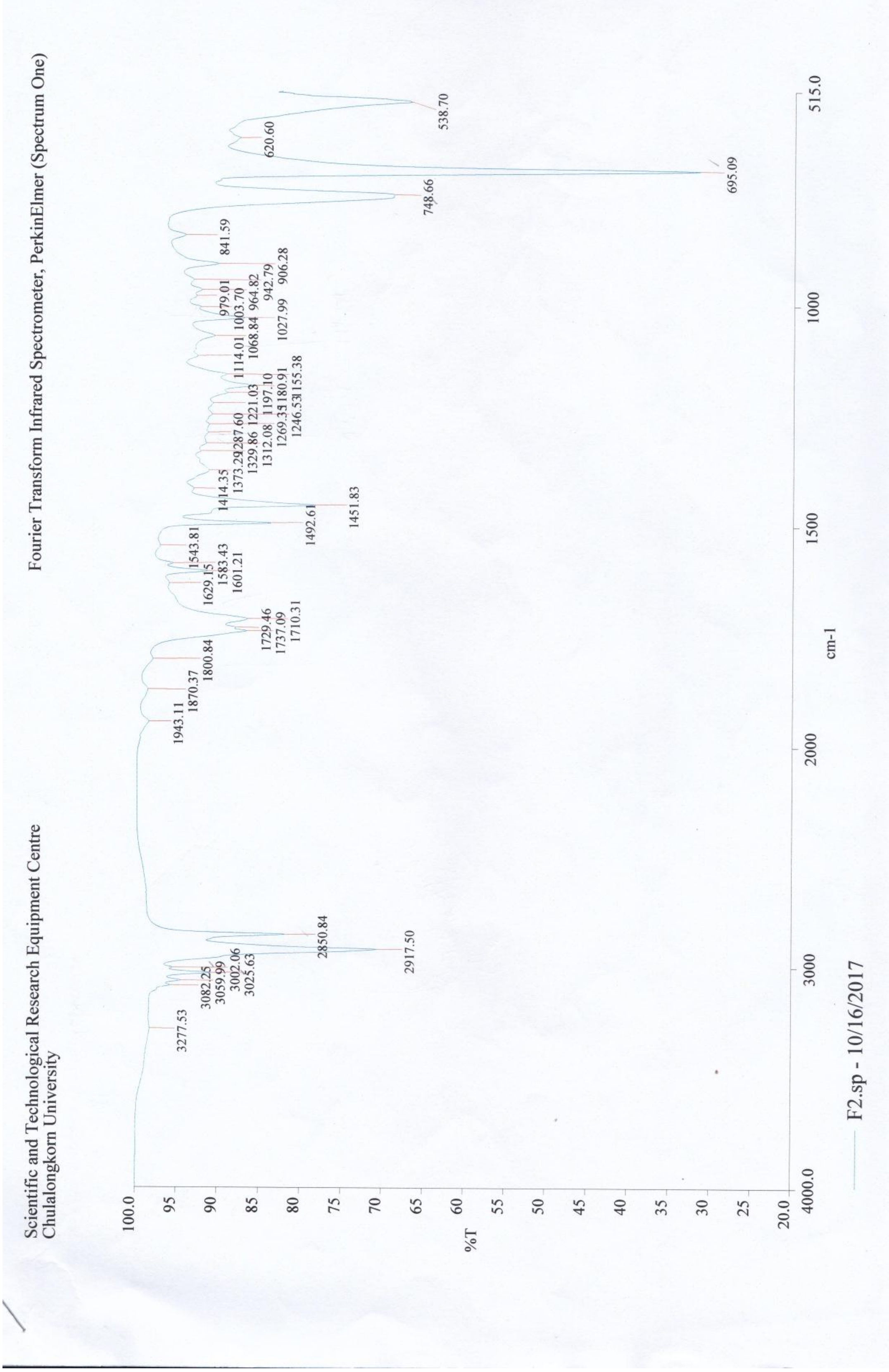
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University


Scientific and Technological Research Equipment Centre
Chulalongkorn University
Fourier Transform Infrared Spectrometer, PerkinElmer (Spectrum One)
%T
100.0
95
90
85
80
75
70
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20.0
4000.0
3000
2000
1500
1000
515.0
cm-1
3506.25
3299.06
2997.39
2946.22
2851.85
1749.41
1577.31
1541.25
1453.59
1358.23
1384.04
1303.39
1267.02
1208.82
1181.03
1128.28
1084.49
1043.44
956.22
922.31
870.60
756.04
687.55
L2.sp - 10/16/2017



Scientific and Technological Research Equipment Centre
Chulalongkorn University
Fourier Transform Infrared Spectrometer, PerkinElmer (Spectrum One)
%T
100.0
95
90
85
80
75
70
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20.0
4000.0
3000
2000
1500
1000
515.0
cm-1
3661.09
3506.22
2881.49
2945.87
2995.70
1747.81
1452.29
1381.98
1359.95
1305.02
1266.31
1180.46
1127.34
1080.38
1043.71
955.92
894.68
867.73
754.76
702.93
L1.sp - 10/16/2017

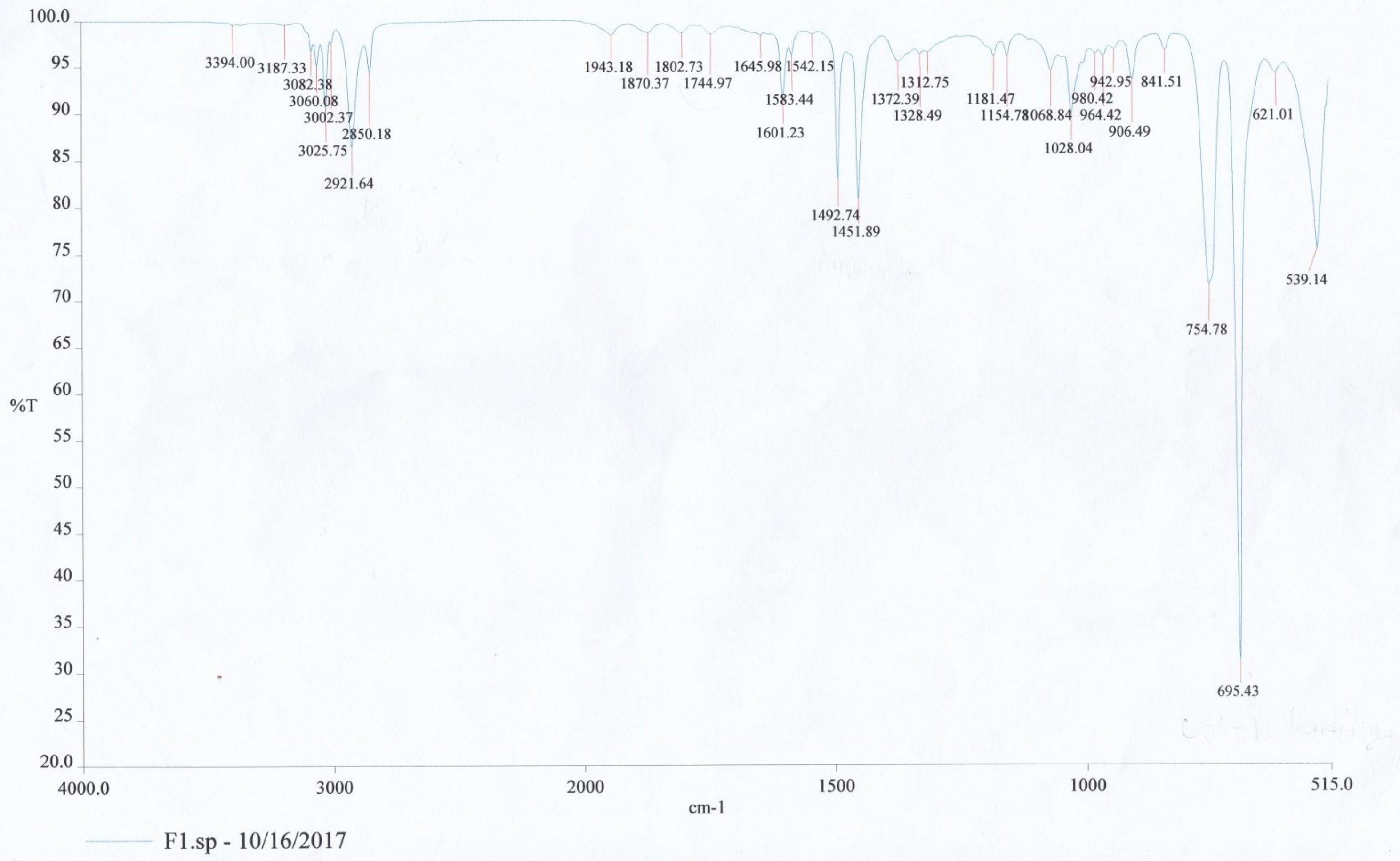

Scientific and Technological Research Equipment Centre
Chulalongkorn University
Fourier Transform Infrared Spectrometer, PerkinElmer (Spectrum One)
%T
cm-1
F3.sp - 10/16/2017
3281.05
3082.58
3060.32
3025.21
3003.97
2954.72
2917.71
2871.93
2850.29
1943.46
1868.48
1796.05
1710.85
1660.78
1600.93
1575.80
1527.52
1492.59
1465.78
1451.39
1413.76
1378.60
1276.99
1224.96
1208.15
1188.51
1153.45
1117.10
1070.71
1028.41
964.42
905.97
840.68
747.13
718.85
695.38
538.89
4000.0
3000
2000
1500
1000
515.0
100.0
95
90
85
80
75
70
65
60
55
50
45
40
35
30
25
20.0

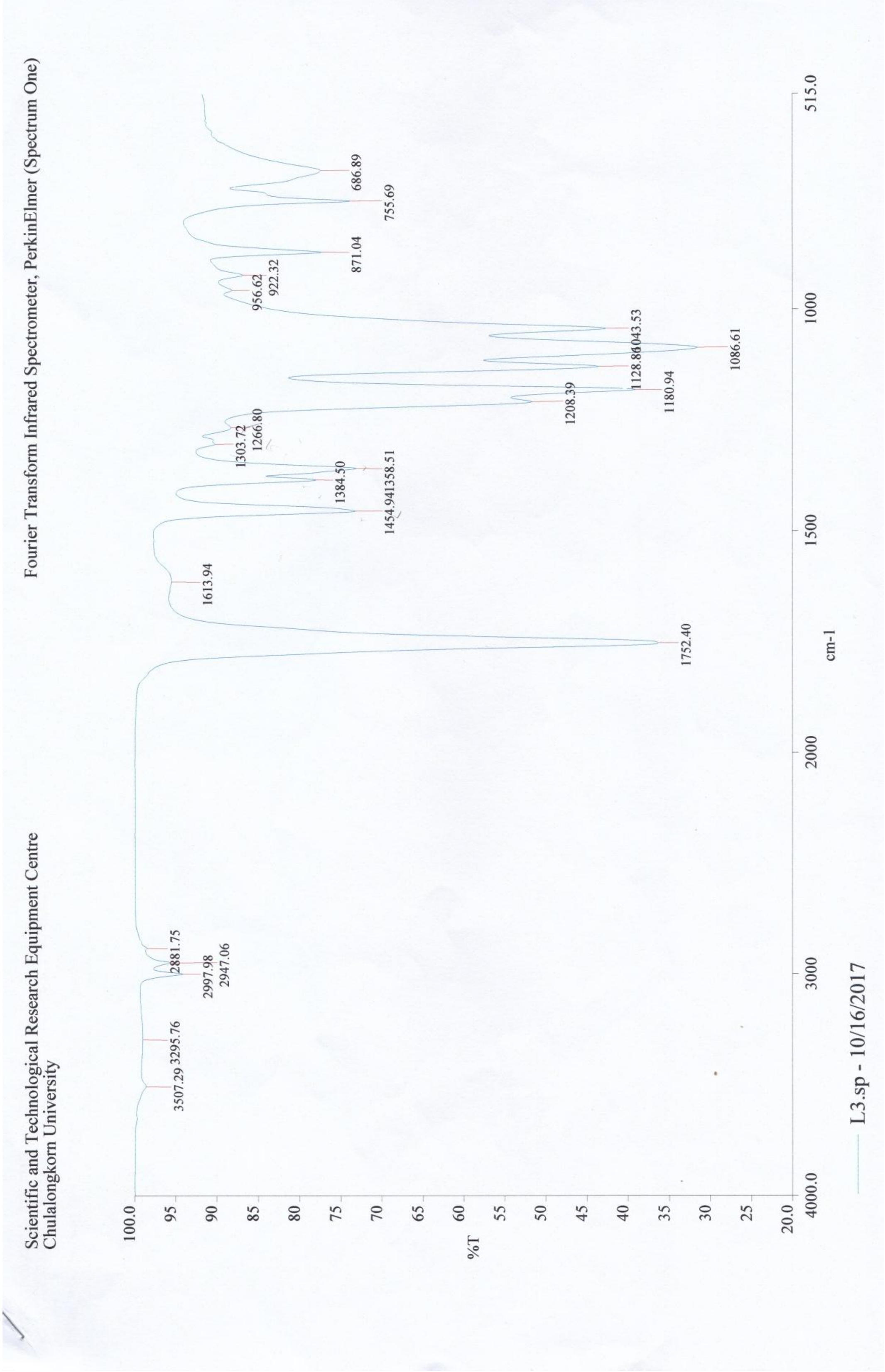


Scientific and Technological Research Equipment Centre
Chulalongkorn University
Fourier Transform Infrared Spectrometer, PerkinElmer (Spectrum One)
%T
cm-1
F2.sp - 10/16/2017
3277.53
3082.25
3059.99
3002.06
3025.63
2850.84
2917.50
1943.11
1870.37
1800.84
1729.46
1737.09
1710.31
1629.15
1583.43
1601.21
1543.81
1492.61
1451.83
1414.35
1373.29
1287.60
1329.86
1221.03
1312.08
1197.10
1269.33
1180.91
1246.53
1155.38
1114.01
1068.84
1003.70
1027.99
979.01
964.82
942.79
906.28
841.59
748.66
695.09
620.60
538.70

Scientific and Technological Research Equipment Centre
Chulalongkorn University

Fourier Transform Infrared Spectrometer, PerkinElmer (Spectrum One)





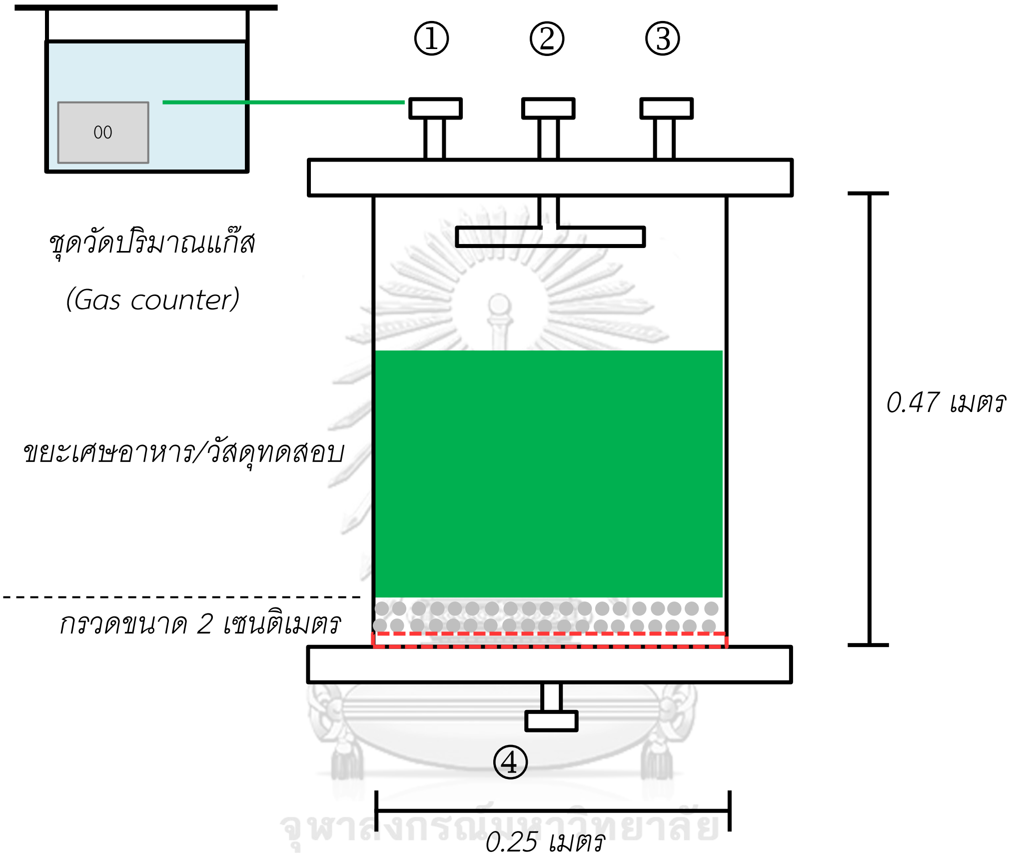
Scientific and Technological Research Equipment Centre
Chulalongkorn University
Fourier Transform Infrared Spectrometer, PerkinElmer (Spectrum One)
%T
cm-1
L3.sp - 10/16/2017
100.0
20.0
4000.0
3000
2000
1500
1000
515.0
3507.29
3295.76
2997.98
2947.06
2881.75
1752.40
1613.94
1454.94
1384.50
1358.51
1303.72
1266.80
1208.39
1180.94
1128.86
1086.61
1043.53
956.62
922.32
871.04
755.69
686.89

ภาคผนวก ซ

ถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

แผนผังถังปฏิกรณ์หลุมฝังกลบ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

① วัดปริมาณแก๊ส
② เวียนน้ำชะขยะ
③ จุดเก็บตัวอย่างแก๊ส
④ ระบายและเก็บตัวอย่างน้ำชะขยะ

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปาณิศา ศิริบุรมย์ เกิดเมื่อวันที่ 4 มิถุนายน พ.ศ.2534 มีภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา ในปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2557

ผลงานวิจัยส่วนหนึ่งจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เผยแพร่ในงานการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 16 (16th National Environmental Conference และ 16th International Conference on Environmental Engineering, Science, and Management) ในหัวข้อ "การย่อยสลายของวัสดุภาชนะบรรจุอาหารในสภาวะไร้อากาศ" ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รองเมือง กรุงเทพฯ ระหว่างวันที่ 17 - 18 พฤษภาคม พ.ศ. 2560

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY