

ศักราชในการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียผลไม้โดยระบบย่อยสลายทางชีวภาพ
แบบไร้อากาศ



นางสาวปัทมา พันธุระ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIOGAS PRODUCTION POTENTIAL OF FRUIT WASTES BY
ANAEROBIC BIODEGRADATION.



Miss Papitchaya Puntura

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
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 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียผลไม้โดยระบบ

ย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้อากาศ

โดย

นางสาวปัทมา พันธุระ

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

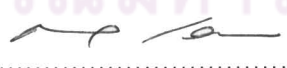

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัณวงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรรัฐ ไสธภาพันธุ์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ศรินดา ลากเจริญ)

ปัทมฉัตร พันธุระ : ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียผลไม้โดยระบบย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้อากาศ. (BIOGAS PRODUCTION POTENTIAL OF FRUIT WASTES BY ANAEROBIC BIODEGRADATION.)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์, 155 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณศักยภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศของเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ได้แก่ มะม่วง สับปะรด แตงไทย แตงโม ส้ม ส้มโอ ฝรั่ง และกล้วย จากตลาดขายส่งผลไม้ โดยทำการศึกษาค่าความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซกับค่าตัวแปรต้นที่มีความจำเพาะเจาะจงกับการผลิตก๊าซ คือ กรดไขมันระเหยง่าย เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด เปอร์เซ็นต์ของแข็งระเหยง่าย ปริมาณลิกนิน และปริมาณเซลลูโลส โดยในงานวิจัยนี้ทำการประยุกต์จากวิธีการหาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (BMP) โดยใช้ขวดเซรัมสีชาขนาด 100 มล. ใช้เครื่องเขย่า(ความเร็ว 100 รอบต่อนาที) ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 30 องศาเซลเซียสภายในระยะเวลา 30 วัน จากผลการศึกษาลักษณะเบื้องต้นพบว่า ค่าซีไอดีมีค่าอยู่ในช่วง 78,336-348,960 มิลลิกรัมต่อลิตร มีสภาพความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 3.6-5.3 โดยที่ส้มโอจะมีปริมาณของแข็งทั้งหมดมากที่สุดคือ 30.98 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเปียก สับปะรดมีปริมาณของแข็งระเหยมากที่สุด 98.38 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง และมะม่วงมีปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจนมากที่สุดคือ 74.76 จากผลการทดลองหาปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า แตงไทย ฝรั่ง กล้วย แตงโม เป็นกลุ่มที่มีการเกิดก๊าซชีวภาพได้ดีที่สุด โดยที่แตงไทยและฝรั่งมีปริมาณก๊าซมีเทนได้ดีที่สุดในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของแข็งระเหยที่เติม และเมื่อนำปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการคำนวณจากสมการเคมี พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลองมีปริมาณน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของระบบคือค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบลดต่ำลงอย่างรวดเร็วส่งผลให้กรดไขมันระเหยง่ายไม่สมดุลกับสภาพความเป็นด่างภายในระบบจากการหาค่าความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆเพื่อสร้างแบบจำลอง พบว่า ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี 30 วัน ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของแข็งระเหยที่เติม จะเกิดได้สูงเมื่อของแข็งทั้งหมดคูณกับของแข็งระเหยได้ที่มีค่าน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปแบบของเหลวสูงกว่า และมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพต่างที่ใช้ในการสะท้อนกรดสูง เช่น แตงไทยและฝรั่งที่มีปริมาณน้ำมากกว่าเนื้อของของแข็ง และมีการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีสูง (r² =0.70) ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดปริมาณก๊าซมีเทนเช่นเดียวกัน ส่วนปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนของเศษขยะผลไม้ในวันที่ 7 ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของแข็งระเหยที่เติม กับค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อค่าสภาพต่างที่มีค่าต่ำ จึงจะทำให้เกิดปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนสูง เช่น แตงไทยและฝรั่ง (r² =0.82)

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ.....ปัทมฉัตร พันธุระ.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....ผศ.ดร.รัชฎาวงศ์.....
ปีการศึกษา2553.....

5070711421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ANAEROBIC PROCESS / BIOGAS / BIOCHEMICAL METHANE POTENTIAL

PAPITCHAYA PUNTURA : BIOGAS PRODUCTION POTENTIAL OF FRUIT WASTES BY ANAEROBIC BIODEGRADATION.

ADVISOR : ASST.PROF.PICHAYA RACHADAWONG,ph.,D 155 pp.

The objectives of this research were to study the potential biogas production from 8 types of fruit wastes such as pineapple, mango, melon, watermelon, orange peel, pomelo, guava and banana from the wholesale fruit market. The aim of this research was to determine relationship between volume of gas and specific variables such as volatile fatty acids, percent of total solids, percent of volatile solids, content of lignin and cellulose. This experiment utilized Biochemical Methane potential (BMP) method. Each sample was added to 100 ml serum bottles and placed on a shaker (100 rpm) in a room temperature for 30 days. Preliminary study of crucial factors showed that COD were 78,336-348,960 milligrams per liter and pH was from 3.6 to 5.3. Pomelo had the highest total solids (30.98 percent by wet weight). Pineapple had the highest volatile solids (98.31 percent by dry basis). And the highest carbon and nitrogen ratio was the mango (74.76). Group of fruits with of highest gas accumulation volatile solids were melon, guava, banana and watermelon. Comparison of gas produced from the experiment with calculated values from the chemical equation were made. The experimental biogas production was lower than theoretical biogas production and may be due to the system pH was imbalance. The pH decreased rapidly and was a result of imbalance between volatile fatty acids and alkalinity. Biogas production yield (30 days) in the unit mL/g VS added was found to negatively correlate with TS*VS and positively correlate with alkalinity. This might be due to the amount of organic substances in liquid phase which is higher than solid phase. High biogas yield production fruit are melon and guava ($r^2 = 0.70$). Methane production yield (7 days) in the unit mL/g VS added was found to positively correlate with volatile fatty acids/alkalinity. High cumulative methane production fruit are melon and guava ($r^2 = 0.82$).

Department : Environmental Engineering Student's Signature Papitchaya Puntura
 Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature พ.ญ. ปิชาดา
 Academic Year : 2010

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถ และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ณ โอกาสนี้ผู้วิจัยขอสำนึกในพระคุณของท่านทั้งหลายเหล่านี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิชญ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งสละเวลาคอยให้ความรู้ คำแนะนำ ปรับปรุง แก้ไขวิทยานิพนธ์ และข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งช่วยเหลือ และสนับสนุนในการทำวิจัยทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ฐเรศ ศรีสถิตย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เขมรัฐ โอสถาปนิก และ ดร.ศรินดา ลากเจริญ ที่ได้สละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ และเครื่องมือที่ห้องปฏิบัติการวิจัย

ขอขอบคุณบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์หัวข้อจุลชีพที่ใช้ในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณธนวรรณ ติลกการย์ คุณพิพัฒน์ เพชรจิโรจน์ และเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโท รุ่นพินิสิตปริญญาโทและเอก รุ่นน้องนิสิตปริญญาตรีและปริญญาโททุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้องทุกท่านเป็นอย่างสูงที่ให้การสนับสนุน ให้คำปรึกษาในทุกๆด้าน ให้การดูแลอบรม สั่งสอน ให้กำลังใจและให้ความรัก ซึ่งล้วนเป็นกำลัง และสิ่งสำคัญยิ่งแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ท
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 องค์ประกอบของขยะ.....	4
2.2 โครงสร้างของผนังเซลล์ในพืช.....	6
2.2.1 เซลลูโลส.....	8
2.2.2 เฮมิเซลลูโลส.....	9
2.2.3 ลิกนิน.....	10
2.3 ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการไร้ออกซิเจน.....	10
2.3.1 จุลชีววิทยาและชีวเคมีของกระบวนการไร้อากาศ.....	13
2.3.1.1 จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดไขมันระเหย.....	14
2.3.1.2 จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดอะซิติก.....	14
2.3.1.3 จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน.....	15
2.3.2 ลักษณะเฉพาะตัวของกระบวนการไร้อากาศข้อดี- ข้อเสีย.....	16
2.4 ปัจจัยสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	17
2.4.1 สารอาหาร.....	17
2.4.2 ปริมาณน้ำภายในถังหมักไร้อากาศ.....	18
2.4.3 การผสม.....	18

	หน้า
2.4.4 ความเป็นกรด-ด่าง และสภาพต่าง.....	18
2.4.5 อัตราการระเหยอินทรีย์และกรดไขมันระเหย.....	19
2.4.6 สารพิษ.....	19
2.4.7 อุณหภูมิ.....	20
2.4.8 ปริมาณออกซิเจน.....	21
2.5 Biochemical Methane Potential (BMP).....	21
2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	27
3.2 ลักษณะตัวอย่างผลไม้.....	28
3.3 หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการวิจัย.....	29
3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	30
3.4.1 ขวดเซรัมส์ชาในการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ.....	30
3.4.2 สารอาหารเสริม.....	32
3.4.3 เครื่องมือวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของก๊าซชีวภาพที่ได้จาก กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ.....	33
3.4.4 อุปกรณ์อื่นๆ.....	34
3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	34
3.5.1 การทดลองเพื่อหาปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนโดยประยุกต์จาก Biochemical Methane Potential (BMP).....	34
3.5.2 ขั้นตอนในการหาปริมาณการผลิตก๊าซมีเทน.....	36
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลอง.....	39
3.6.1 การพิจารณาความเหมาะสมของตัวแบบหรือสมการถดถอย.....	40
3.6.2 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β).....	40
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	42
4.2 เศษขยะผลไม้ที่ใช้ในการทดลอง.....	43
4.2.1 องค์ประกอบของเศษขยะผลไม้จากตลาดผลไม้.....	43
4.3 กรดไขมันระเหยง่าย.....	50
4.4 สภาพต่าง และความเป็นกรด-ต่าง.....	52

	หน้า
4.4.1 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่าง.....	55
4.5 การผลิตก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซ.....	57
4.5.1 ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม.....	57
4.5.2 ผลการวิเคราะห์ก๊าซมีเทน.....	60
4.5.3 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากการคำนวณ.....	66
4.5.4 ผลการเปรียบเทียบปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากการทดลอง กับค่าการคำนวณทางทฤษฎี.....	69
4.6 ผลการสร้างแบบจำลอง.....	72
4.6.1 ความสัมพันธ์เชิงขั้นตอนของการเกิดก๊าซชีวภาพจากเศษขยะ ผลไม้.....	72
4.6.2 Correlation Analysis.....	74
4.6.3 ผลการสร้างแบบจำลอง.....	81
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	83
สรุปผลการทดลอง.....	83
ข้อเสนอแนะ.....	85
รายการอ้างอิง.....	86
ภาคผนวก.....	91
ภาคผนวก ก ปริมาณการผลิตก๊าซ และ อัตราการผลิตก๊าซ.....	92
ภาคผนวก ข ปริมาณก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ และปริมาณก๊าซ ทั้งหมดได้จากการคำนวณ.....	125
ภาคผนวก ค ค่ากรดไขมันระเหยง่าย.....	130
ภาคผนวก ง ค่าสภาพต่าง.....	135
ภาคผนวก จ ความเป็นกรด-ด่าง.....	140
ภาคผนวก ฉ อุณหภูมิ.....	145
ภาคผนวก ช การวิเคราะห์ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อ การผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน.....	147
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	155

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงองค์ประกอบของขยะมูลฝอยของกรุงเทพมหานคร ปี 2548 สำนักรักษา ความสะอาด กรุงเทพมหานคร.....	4
2.2	แสดงองค์ประกอบของขยะมูลฝอยจากตลาดสดสี่มุมเมือง.....	5
2.3	ชนิดและปริมาณของขยะประเภทผักผลไม้และดอกไม้จากตลาดสดสามย่าน ...	5
3.1	ชนิดและส่วนประกอบของผลไม้ที่ใช้ในการทดลอง 8 ชนิด.....	28
3.2	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเศษขยะผลไม้.....	29
3.3	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์หัวเชื้อจุลินทรีย์.....	29
3.4	จำนวนขวดที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาปริมาณก๊าซชีวภาพของเศษขยะผลไม้ ชนิดต่างๆ.....	31
3.5	จำนวนขวดที่ใช้ในการทดลองเพื่อหากรดไขมันระเหยง่ายของเศษขยะผลไม้ ชนิดต่างๆ.....	31
3.6	ปริมาณสารอาหารเสริมหลัก สารอาหารเสริมรอง และสารเสริมความเป็นต่าง..	32
3.7	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	35
3.8	จุดเก็บตัวอย่าง และความถี่ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของการทดลอง..	35
3.9	ตัวอย่างเศษขยะผลไม้ปั่นละเอียดจำนวน 8 ชนิด.....	37
3.10	ตัวแปรต่างๆของการทดลอง.....	39
4.1	ผลการวิเคราะห์หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง.....	43
4.2	ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเศษขยะผลไม้จำนวน 8 ชนิด.....	45
4.3	ลักษณะสมบัติทางชีวภาพของเศษขยะผลไม้จำนวน 8 ชนิด.....	46
4.4	ลักษณะสมบัติทางเคมีของเศษขยะผลไม้จำนวน 8 ชนิด.....	48
4.5	ลักษณะสมบัติทางเคมีของเศษขยะผลไม้จำนวน 8 ชนิด (ต่อ).....	49
4.6	อัตราส่วนโดยโมลและสูตรทางเคมีอย่างง่ายของเศษขยะผลไม้จำนวน 8 ชนิด..	67
4.7	ปริมาณก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ และปริมาณก๊าซทั้งหมดได้จาก การคำนวณ.....	67
4.8	ร้อยละการเกิดก๊าซชีวภาพจากการทดลองต่อการเกิดก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี....	70

ตารางที่	หน้า
4.9	ความสัมพัทธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนมีหน่วยเป็นมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เต็ม..... 75
4.10	ความสัมพัทธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปริมาณก๊าซมีเทนยิลด์มีหน่วยเป็นมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยในช่วงเวลา 7 วัน ของเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด..... 78
ก-1	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการทดลอง 30 วัน ในเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ในหน่วย มิลลิลิตรต่อวัน..... 93
ก-2	ตารางที่ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการทดลอง 30 วัน ในเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ในหน่วย มิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็งระเหยที่เต็ม..... 95
ก-3	ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากการทดลองในวันที่ 7, 14, 21 และวันที่ 30 ในเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน..... 97
ก-4	ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากการทดลองในวันที่ 7, 14, 21 และวันที่ 30 ในเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ในหน่วย มิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็งระเหยที่เต็ม..... 98
ก-5	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้จากการทดลองในวันที่ 7, 14, 21 และวันที่ 30 ในเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน..... 99
ก-6	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้จากการทดลองในวันที่ 7, 14, 21 และวันที่ 30 ในเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ในหน่วย มิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็งระเหยที่เต็ม..... 100
ข-1	ผลการหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของผลไม้ชนิดต่างๆ..... 127
ข-2	ปริมาณองค์ประกอบโดยโมลของเศษขยะผลไม้ชนิดต่างๆ..... 128
ข-3	ปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี..... 129
ค-1	ค่ากรดไขมันระเหยของส้ม..... 131
ค-2	ค่ากรดไขมันระเหยของแตงไทย..... 131
ค-3	ค่ากรดไขมันระเหยของสับปะรด..... 132
ค-4	ค่ากรดไขมันระเหยของแตงโม..... 132
ค-5	ค่ากรดไขมันระเหยของกล้วย..... 133
ค-6	ค่ากรดไขมันระเหยของส้มโอ..... 133
ค-7	ค่ากรดไขมันระเหยของมะม่วง..... 134
ค-8	ค่ากรดไขมันระเหยของฝรั่ง..... 134
ง-1	ค่าสภาพต่างของส้ม..... 136

ตารางที่		หน้า
ง-2	ค่าสภาพต่างของแตงไทย.....	136
ง-3	ค่าสภาพต่างของสับปะรด.....	137
ง-4	ค่าสภาพต่างของแตงโม.....	137
ง-5	ค่าสภาพต่างของกล้วย.....	138
ง-6	ค่าสภาพต่างของส้มโอ.....	138
ง-7	ค่าค่าสภาพต่างของมะม่วง.....	139
ง-8	ค่าสภาพต่างของฝรั่ง.....	139
จ-1	ความเป็นกรด-ต่างของส้ม.....	141
จ-2	ความเป็นกรด-ต่างของแตงไทย.....	141
จ-3	ความเป็นกรด-ต่างของสับปะรด.....	142
จ-4	ความเป็นกรด-ต่างของแตงโม.....	142
จ-5	ความเป็นกรด-ต่างของกล้วย.....	143
จ-6	ความเป็นกรด-ต่างของส้มโอ.....	143
จ-7	ความเป็นกรด-ต่างของมะม่วง.....	144
จ-8	ความเป็นกรด-ต่างของฝรั่ง.....	144
ฉ-1	อุณหภูมิที่ทำการการทดลองของเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด.....	146
ช-1	การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) ระหว่างเศษ ขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด กับปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมในหน่วยมิลลิกรัม ต่อลิตรและปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพยิลด์สะสม เป็นระยะเวลา 30 วัน.....	148
ช-2	การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) ระหว่างเศษ ขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด กับปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนยิลด์ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของแ่งระเหยที่ เต็มของวันที่ 7.....	149
ช-3	การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) ระหว่างเศษ ขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด กับปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนยิลด์ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของแ่งระเหยที่ เต็มของวันที่ 14.....	150

ตารางที่		หน้า
ช-4	การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) ระหว่างเศษ ขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด กับปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนยิลด์ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของแฉ่งระเหยที่ เดิมของวันที่ 21.....	151
ช-5	การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) ระหว่างเศษ ขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด กับปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนยิลด์ ในหน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของแฉ่งระเหยที่ เดิมของวันที่ 30.....	152
ช-5	การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) ระหว่างเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิดกับปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมยิลด์ใน หน่วยมิลลิกรัมต่อลิตรของแฉ่งระเหยที่เดิม เป็นระยะเวลา 30 วัน.....	153
ช-6	การวิเคราะห์ความถดถอยเชิงพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) ระหว่างเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิดกับปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนยิลด์ในหน่วย มิลลิกรัมต่อลิตรของแฉ่งระเหยที่เดิมของวันที่ 7.....	154

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างผนังเซลล์ของพืช.....	7
2.2	สูตรโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลส.....	8
2.3	โครงสร้างเซลลูโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน.....	9
2.4	โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสประเภทไซโลกาแคน.....	9
2.5	โครงสร้างแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการสร้างลิกนิน.....	10
2.6	ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการไร้อากาศ.....	11
2.7	ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตของเซลล์.....	20
2.8	การแบ่งสัดส่วนของขบวนการที่ใช้ในการทดลองการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (BMP)	22
2.9	การเชื่อมต่อกันของ BMP เข้ากับอุปกรณ์วัดก๊าซโดยการแทนที่น้ำ.....	22
2.10	ตัวอย่างกราฟที่ใช้ในการหาค่า BMP.....	22
3.1	อุปกรณ์การทดลอง BMP.....	33
3.2	ขั้นตอนในการหาปริมาณการผลิตก๊าซมีเทน.....	38
4.1	หัวเชื้อจุลินทรีย์แบบเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง.....	42
4.2	ลักษณะของขยะที่เกิดขึ้นภายในตลาดขายส่งส้มเมือง	44
4.3	ค่ากรดไขมันระเหยง่ายของเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด.....	51
4.4	ค่าสภาพต่างของเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด.....	50
4.5	ค่าความเป็นกรด-ต่างของเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด.....	53
4.6	ค่าความเป็นกรด-ต่างเริ่มต้นเปรียบเทียบกับค่าความเป็นกรด-ต่างเฉลี่ยตลอด การทดลองของเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด.....	54
4.7	อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างของเศษขยะผลไม้ ได้แก่ แดงไทย สับปะรด แดงโม กัลฉวย ส้มโอ มะม่วง และฝรั่ง.....	55
4.8	อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างของเศษขยะผลไม้ ได้แก่ ส้ม.....	55
4.9	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของขยะผลไม้ 8 ชนิด.....	57
4.10	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของขยะผลไม้ 8 ชนิด.....	59
4.11	ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของขยะผลไม้ 8 ชนิด.....	60
4.12	ปริมาณก๊าซมีเทนของขยะผลไม้ 7 ชนิดในหน่วยมิลลิลิตรก๊าซมีเทนในช่วงเวลา 30 วัน.....	63

รูปที่	หน้า
4.13	ปริมาณก๊าซมีเทนของเศษขยะผลไม้ของแดงไทย ในหน่วยมิลลิลิตรก๊าซมีเทน ในช่วงเวลา 30 วัน..... 63
4.14	ปริมาณก๊าซมีเทนยิลด์ของเศษขยะผลไม้ 7 ชนิดในหน่วยมิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหย..... 64
4.15	ปริมาณก๊าซมีเทนยิลด์ของเศษขยะผลไม้ของแดงไทย ในหน่วยมิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหย..... 65
4.16	กราฟแท่งแสดงการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทางทฤษฎีกับ ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมจากการทดลองของเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด..... 71
4.17	แผนผังการเกิดความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างของการเกิดก๊าซชีวภาพจากเศษขยะ ผลไม้..... 72
4.18	ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพยิลด์กับปริมาณของแข็งคุณ ปริมาณของแข็งระเหย..... 76
4.19	ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพยิลด์กับค่าสภาพต่าง..... 77
4.20	ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพยิลด์กับค่าอัตราส่วนกรดไขมัน ระเหยง่ายต่อสภาพต่าง..... 79
4.21	ความสัมพันธ์ของปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนยิลด์กับค่าอัตราส่วนกรดไขมัน ระเหยง่ายต่อสภาพต่างเมื่อปรับแก้ค่าแล้ว..... 80
ก-1	ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากส้มในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน..... 101
ก-2	ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากแดงไทยในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน..... 101
ก-3	ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากสับปะรดในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน..... 102
ก-4	ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากส้มโอในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน..... 102
ก-5	ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากแดงโมในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน..... 103
ก-6	ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากกล้วยในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน..... 103
ก-7	ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากมะม่วงในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน..... 104
ก-8	ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากฝรั่งในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน..... 104
ก-9	ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากส้มในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย..... 105
ก-10	ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากแดงไทยในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย..... 105

รูปที่	หน้า
ก-11 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากสับปะรดในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย.....	106
ก-12 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากส้มโอในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย.....	106
ก-13 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากแตงโมในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย.....	107
ก-14 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากกล้วยในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย.....	107
ก-15 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากมะม่วงในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย.....	108
ก-16 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากมะม่วงในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย.....	108
ก-17 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากส้มในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน.....	109
ก-18 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากแตงไทยในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน.....	109
ก-19 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากสับปะรดในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน.....	110
ก-20 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากส้มโอในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน.....	110
ก-21 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากแตงโมในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน.....	111
ก-22 รูปที่ ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากกล้วยในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน.....	111
ก-23 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากมะม่วงในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน.....	112
ก-24 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากฝรั่งในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน.....	112
ก-25 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากส้มในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย.....	113
ก-26 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากแตงไทยในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย.....	113
ก-27 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากสับปะรดในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย.....	114
ก-28 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากส้มโอในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย.....	114

รูปที่	หน้า
ก-29 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากเตาไหมในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย.....	115
ก-30 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากกล้วยในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย.....	115
ก-31 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากมะม่วงในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย.....	116
ก-32 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากมะม่วงในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็ง ระเหย.....	116
ก-33 ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากส้มในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน.....	117
ก-34 ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเตาไหมในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน..	117
ก-35 ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสับปะรดในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน.	118
ก-36 ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากส้มโอในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน.....	118
ก-37 ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเตาไหมในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน....	119
ก-38 ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกล้วยในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน.....	119
ก-39 ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากมะม่วงในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน....	120
ก-40 ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากฝรั่งในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน.....	120
ก-41 ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากส้มในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัม ของแข็งระเหย.....	121
ก-42 ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเตาไหมในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน- กรัมของแข็งระเหย.....	121
ก-43 ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากสับปะรดในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน- กรัมของแข็งระเหย.....	122
ก-44 ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากส้มโอในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน- กรัมของแข็งระเหย.....	122
ก-45 ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเตาไหมในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน- กรัมของแข็งระเหย.....	123
ก-46 ปริมาณการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากกล้วยในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน- กรัมของแข็งระเหย.....	123

รูปที่		หน้า
ก-47	ปริมาณการผลิตก๊าซก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากมะม่วงในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็งระเหย.....	124
ก-48	ปริมาณการผลิตก๊าซก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากมะม่วงในหน่วยมิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็งระเหย.....	124



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

40% และอื่นๆ 1-2% มีค่าพลังงานความร้อนเฉลี่ย 9,000 กิโลแคลอรี/ลูกบาศก์เมตร หรือ 21,000 กิโลจูล/ลูกบาศก์เมตร ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง หรือใช้ในเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า หากเปรียบเทียบก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร (สัดส่วนมีเทน 60 %) จะมีค่าความร้อนเทียบเท่า น้ำมันเบนซิน 0.67 ลิตร น้ำมันดีเซล 0.6 ลิตร น้ำมันเตา 0.55 ลิตร ฟืนไม้ 1.5 กก. ไฟฟ้า 1.2 กิโลวัตต์/ชม. ก๊าซหุงต้ม 0.46 กก. (กรมพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2553) เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีส่วนประกอบหลักคือมีเทน ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีศักยภาพในการทำให้โลกร้อน รุนแรงกว่า คาร์บอนไดออกไซด์จำนวน 23 เท่า (IPCC, 2001) ดังนั้นการนำเอาก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์ จึงมีส่วนช่วยลดภาวะโลกร้อนได้ และเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพสูงอีกด้วย

ตลาดสดขนาดใหญ่บางแห่งได้จัดทำโครงการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษขยะพืชผัก และผลไม้โดยไม่ได้แยกประเภทและชนิดที่เกิดขึ้นภายในตลาดแต่ไม่ประสบความสำเร็จเท่าที่ควร เนื่องจากขาดความรู้ในการจัดทำระบบ ขาดการบำรุงรักษาที่ดี และก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการหรือไม่คุ้มทุนที่จะเดินระบบในการจะนำไปปั่นไฟใช้ภายในตลาด

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการคาดการณ์การเกิดก๊าซชีวภาพและลักษณะของการย่อยสลายที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยศึกษาความสัมพันธ์ของการย่อยสลายที่มีผลต่อการเกิดกรดไขมันระเหยง่ายจากเศษขยะผลไม้ที่มีปริมาณมากที่เกิดขึ้นที่ตลาดกลางขายส่งสี่มุมเมือง 8 ชนิด ได้แก่ มะม่วง สับปะรด แตงโม ส้ม ส้มโอ ฝรั่ง กัลฉวย และแตงไทย ซึ่งที่ตลาดแห่งนี้มีปริมาณขยะประเภทผลไม้มากและไม่กองรวมกันกับขยะประเภทอื่น ไม่เหมือนตามตลาดอื่นทั่วไป โดยจะทำการทดลองหมักเศษขยะผลไม้ดังกล่าวข้างต้นบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นใส่ลงในขวดเซรั่มสี่ขาขนาด 100 มิลลิลิตร เพื่อจำลองการย่อยสลายแบบไร้อากาศและการเกิดก๊าซชีวภาพเป็นข้อมูลเบื้องต้น เพื่อใช้เป็นแนวทางในการใช้งานจริงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศที่เกิดขึ้นของเศษขยะผลไม้ชนิดต่างๆในประเทศไทย
2. เพื่อศึกษาลักษณะของการย่อยสลายของเศษขยะผลไม้ชนิดต่างๆที่มีความสัมพันธ์กับค่าตัวแปรต้นที่มีความจำเพาะเจาะจง เช่น กรดไขมันระเหยง่าย เปอร์เซ็นต์

ของแข็งทั้งหมด เปอร์เซ็นต์ของแข็งระเหยง่าย ปริมาณลิกนิน ปริมาณเซลลูโลส ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. กระบวนการศึกษาการย่อยสลายจะควบคุมให้ระบบอยู่ในสภาพไร้อากาศโดยจะหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีประยุกต์การวิเคราะห์ Biochemical Methane Potential (BMP) ในขบวนการหมักชีวมวลปริมาณ 100 มิลลิลิตร เท่านั้น
3. ตัวอย่างที่ทำการศึกษาใช้เศษขยะผลไม้จากตลาดสดกลางสี่มุมเมืองจำนวน 8 ชนิด คือ มะม่วง สับปะรด แตงโม ส้ม ส้มโอ ฝรั่ง กั้ววย และแตงไทย
4. กระบวนการศึกษาจะใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ (seed) จากโรงงานเสริมสุข จำกัด (มหาชน)
5. การวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการวิจัยนี้ จะทำตามมาตรฐาน APHA, 1998
6. นำค่าที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณและสหสัมพันธ์ (Multiple Regression and Correlation) โดยใช้โปรแกรม SPSS : One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น $p < 0.05$

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงปริมาณก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบที่ได้จากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศของเศษขยะผลไม้ชนิดต่างๆในประเทศไทย
2. สามารถประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่เกิดขึ้นของของเสียเศษขยะผลไม้ชนิดต่างๆในประเทศไทย
3. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการวิจัยนำมาประยุกต์ใช้ในการเปรียบเทียบเชิงสถิติได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 องค์ประกอบของขยะ

จากการศึกษาของสำนักรักษาความสะอาด กรุงเทพมหานคร (2548) พบว่า องค์ประกอบของขยะในกรุงเทพมหานคร พบขยะประเภทเศษอาหาร ผักและผลไม้มากที่สุด ประมาณร้อยละ 44.32 ซึ่งแสดงในตารางที่ 2.1 องค์ประกอบขยะมูลฝอยจากตลาดกลางรังสิต (ชลิตา คู่ตะเภา, 2548) แสดงในตารางที่ 2.2 และจากตารางที่ 2.3 เป็นตัวอย่างองค์ประกอบขยะมูลฝอยจากตลาดสดสามย่านเป็นประเภทผัก ผลไม้ และดอกไม้ จากตัวอย่างพบว่าขยะที่เกิดขึ้นตามตลาดและชุมชนนั้นเป็นขยะประเภทเศษอาหาร ผักผลไม้ เกิดขึ้นมากที่สุด

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของขยะมูลฝอยของกรุงเทพมหานคร ปี 2548 สำนักรักษาความสะอาด กรุงเทพมหานคร (2548)

องค์ประกอบ	ร้อยละขององค์ประกอบ (น้ำหนักเปียก)
เศษอาหาร ผักและผลไม้	44.32
พลาสติกและโฟม	28.21
กระดาษ	9.65
ไม้และใบไม้	5.11
ผ้าและเศษสิ่งทอ	4.58
หนังและยาง	0.83
อื่นๆ	1.10
แก้ว	3.16
โลหะ	2.06
หินและเซรามิค	0.53
กระดุกและเปลือกหอย	0.45
รวม	100

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบของขยะมูลฝอยจากตลาดสดสี่มุมเมือง (ชลิดา คู่ตะเภา, 2548)

องค์ประกอบ	ร้อยละขององค์ประกอบ (น้ำหนักเปียก)
เศษอาหาร ผักและผลไม้	77.48
พลาสติกและโฟม	7.68
กระดาษ	8.97
ยาง	0.19
ไม้	0.77
แก้ว	0.23
โลหะ	3.46
หินและกระเบื้อง	-
กระดุกและเปลือกหอย	1.22
สารพิษหรือสารอันตราย	-
รวม	100

ตารางที่ 2.3 ชนิดและปริมาณของขยะประเภทผักผลไม้และดอกไม้จากตลาดสดสามย่าน (สมชาย เจียมธีรสกุล, 2530)

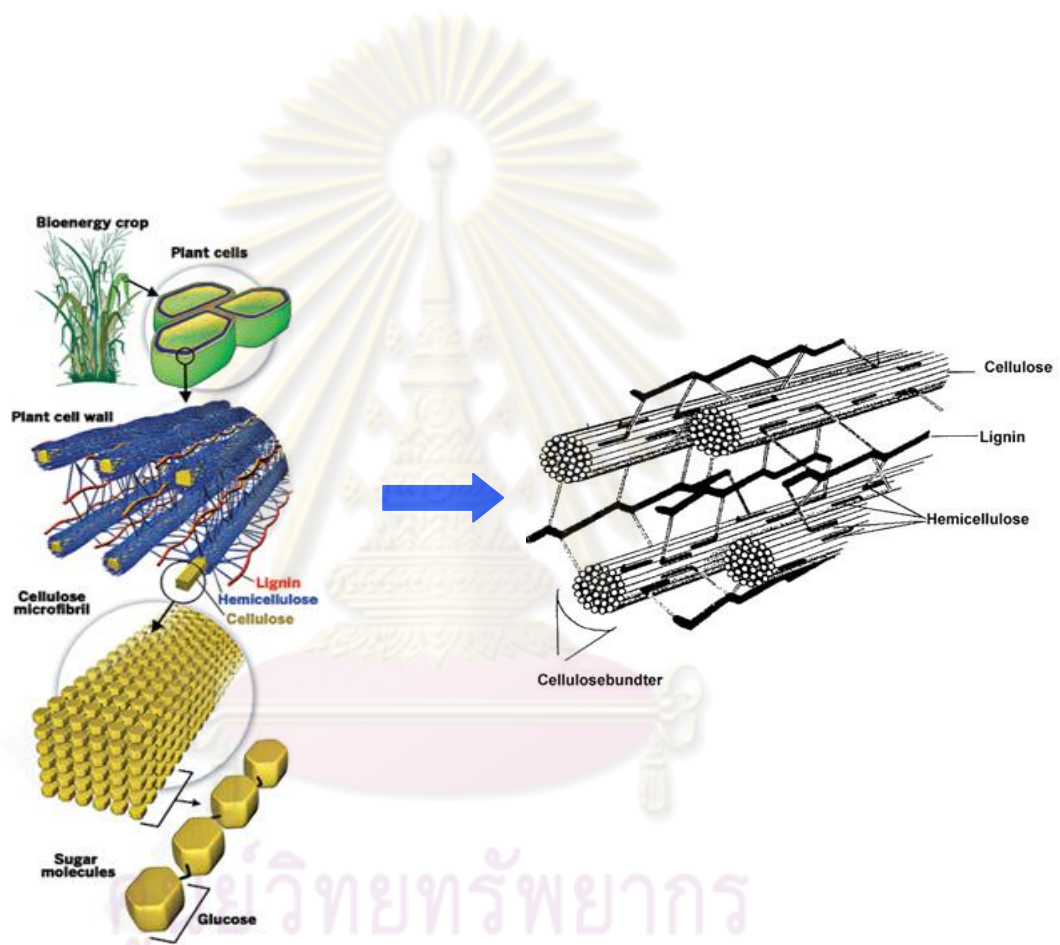
ชนิด	ปริมาณรวม (กก.)	ร้อยละขององค์ประกอบ (น้ำหนักเปียก)
ผักคะน้า	48.5	13.3
ผักกาดขาว	31.2	8.7
ผักกาดหอม	32.4	9.0
ผักบุ้ง	47.7	13.2
ผักกระเฉด	52.9	14.7
กระหล่ำปลี	38.9	10.8
ผักกวางตุ้ง	13.5	3.8
มะระ	9.4	2.6
บวบ	6.9	1.9
มะเขือ (มะเขือยาว มะเขือเทศ)	11.0	3.1

ตารางที่ 2.3 ชนิดและปริมาณของขยะประเภทผักผลไม้และดอกไม้จากตลาดสดสามย่าน (ต่อ)

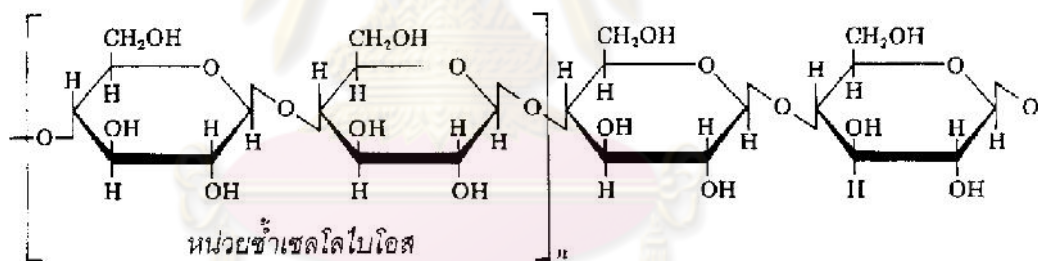
ชนิด	ปริมาณรวม (กก.)	ร้อยละขององค์ประกอบ (น้ำหนักเปียก)
ถั้ว (ถั้วฝักยาว ถั้วลันเตา ถั้วพู)	4.5	1.3
อื่นๆ (แตงกวา ขึ้นฉ่าย สารระแห่น เศษผัก)	10.8	3.0
รวม	307.9	85.7
ผลไม้ (ส้มเขียวหวาน ชมพู ฝรั่ง สับปะรด)	37.1	10.3
ดอกไม้ (กุหลาบ ดาวเรือง ดอก รัก)	14.3	4.0
รวมทั้งหมด	359.3	100.0

2.2 โครงสร้างของผนังเซลล์ในพืช

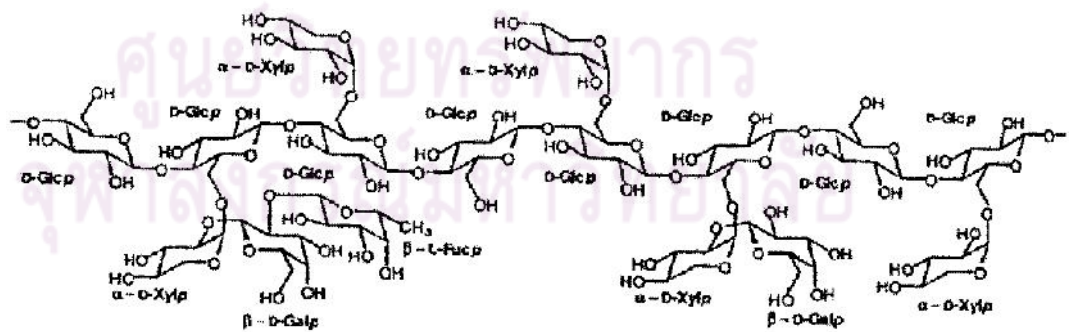
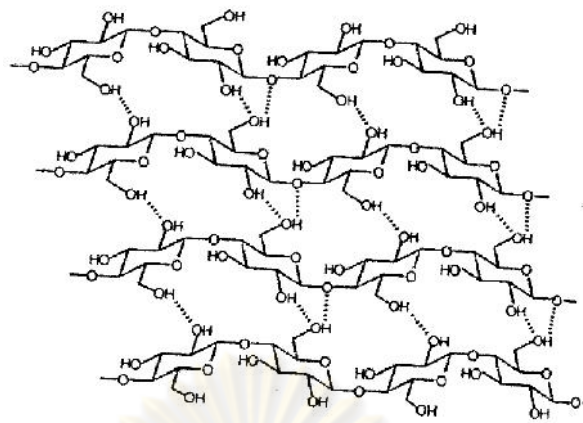
เนื้อเยื่อของพืชประกอบด้วยเซลล์หลายชนิด ส่วนที่กินได้เรียกว่า เซลล์พาราเอนไคมา เซลล์นี้มีอยู่ทั่วไปในผัก ผลไม้ หรือลำต้นที่ยังอ่อนอยู่ มีลักษณะเป็นรูปหลายเหลี่ยมเท่าๆกัน ผนังเซลล์ของพืชหนากว่าของสัตว์ อาจประกอบไปด้วยผนังเซลล์หลายชั้น เซลล์ที่มีอายุน้อยมีผนังเซลล์เพียงชั้นเดียว เมื่อเซลล์โตขึ้นก็อาจมีผนังเซลล์ชั้นที่สองเกิดขึ้นภายใน ผนังเซลล์ชั้นนอกและชั้นในประกอบด้วยเซลลูโลส ภายในเซลล์มีของเหลวเรียกว่า ไซโตพลาสซึม น้ำ นิวเคลียส และสารอื่นๆลอยตัวอยู่ ภายในช่องว่างนี้มีของเหลวชื่อว่า เซลล์แซป ซึ่งมีสารที่ละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาล กลีโค ฯลฯ มีเซลล์ที่ประกอบกันเป็นท่อลำเลียงน้ำและแร่ธาตุจากรากสู่ใบ และมีเซลล์ที่ประกอบกันเป็นท่อลำเลียงอาหารไปยังเซลล์ต่างๆของพืช ผนังของท่อส่งน้ำนี้ประกอบด้วยเซลลูโลส และมีลิกนินเสริมให้ผนังหนาและแข็งแรงขึ้น ส่วนผนังของท่อมีลิกนินเล็กน้อย บนผิวของผักผลไม้ เช่น เปลือกส้ม มีเซลล์อิพิเดอร์มิส มีหน้าที่ป้องกันสิ่งต่างๆ พืชมีองค์ประกอบหลักที่เป็นสารอินทรีย์ที่สร้างขึ้นโดยกระบวนการสังเคราะห์แสงในผนังเซลล์ส่วนต่างๆ ของพืช มีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ คือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) โดยโครงสร้างทั้ง 3 ประเภทนี้เรียกรวมว่า ลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) มีปริมาณมากถึงร้อยละ 90 ของน้ำหนักแห้งในผนังเซลล์ ซึ่งจะมีปริมาณที่แตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดและสภาวะการเจริญเติบโต

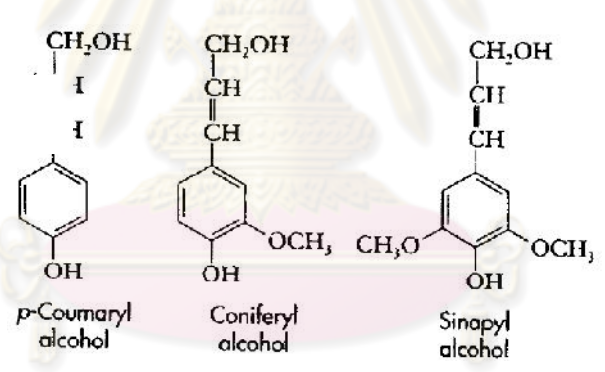


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

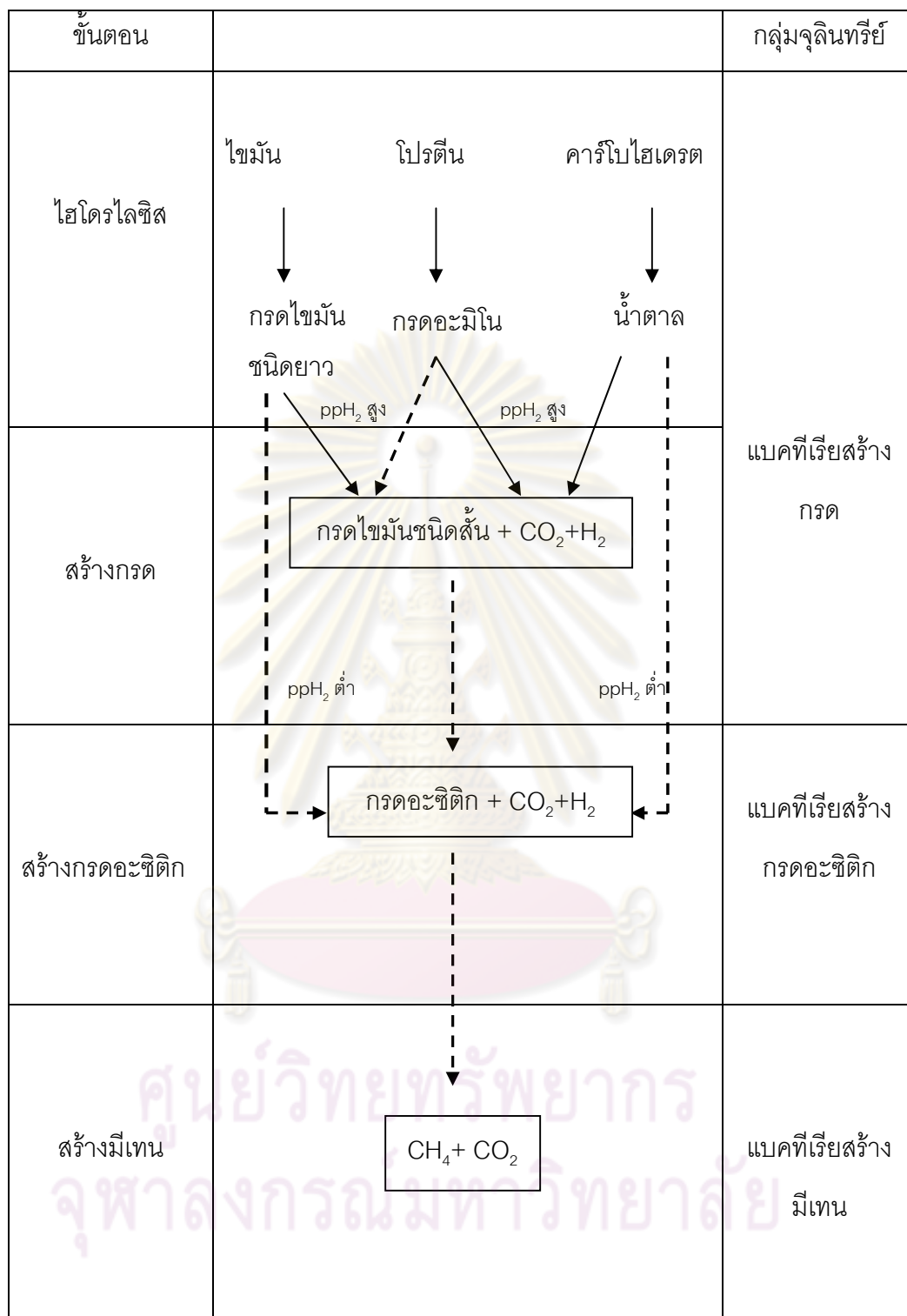


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการไร้อากาศ (Sam-soon,1987 อ้างถึงใน มั่นสิน ตันฑุลเวศน์, 2546)

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

การย่อยสลายไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน ให้เป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันชนิดยาว ตามลำดับ โดยการใช้อุณหภูมิหลาย ๆ ชนิด ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นอุณหภูมิ กลุ่มสร้างกรดด้วยการผลิตเอนไซม์ขึ้นภายในเซลล์และปล่อยเอนไซม์ออกมาออกเซลล์ ซึ่งจะลดพลังงานในกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา เป็นผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น แต่เอนไซม์เป็นโปรตีนที่มีความเฉพาะเจาะจงต่อปฏิกิริยา และตัวทำปฏิกิริยา ดังนั้นจุลินทรีย์ต้องสร้างเอนไซม์ที่ใช้ได้เฉพาะกับสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในของเสีย เช่น ใช้อะไมเลส (amylase) ย่อยสลายแป้งและไกลโคเจนให้เป็นน้ำตาล หรือใช้เอนไซม์ไลเปส (lipase) ย่อยสลายไขมัน และไลเปดให้เป็นกลีเซอรอล และกรดไขมัน หรือใช้เอนไซม์โปรตีเนส (proteinase) และเปปติเดส (peptidase) ย่อยสลายโปรตีนให้กลายเป็นกรดอะมิโน เป็นต้น

ขั้นตอนการย่อยสลายแบบไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนที่ค่อนข้างช้า และเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของปฏิกิริยา ซึ่งความเร็วของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาเคมี ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง พื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น ทำให้เวลาที่ใช้ในการย่อยสลายสารแต่ละชนิดแตกต่างกัน

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenesis)

ผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนไฮโดรไลซิส (น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันชนิดยาว) จะถูกจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน โดยผ่านกระบวนการหมัก (fermentation) และถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (volatile fatty acid ; VFA) เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก เป็นต้น ซึ่งการที่จะเกิดกรดไขมันระเหยชนิดใดนั้นจะขึ้นอยู่กับความดันของไฮโดรเจนในระบบ (hydrogen partial pressure) ถ้าหากระบบมีความดันของไฮโดรเจนในระบบสูงจะเกิดกรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริกมาก แต่ในระบบไร้อากาศต้องการให้มีความดันของไฮโดรเจนต่ำเพื่อทำให้เกิดกรดอะซิติกให้มากที่สุด เพราะกรดอะซิติกเป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาหลักของการสร้างก๊าซมีเทน

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่น ๆ (Acetogenesis)

แบคทีเรียอะเซโตจีนิค (แบคทีเรียสร้างอะเซเตท) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน การผลิตมีเทนโดยแบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นต้องการสับสเตรทเฉพาะเจาะจงมากได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมทิลามีน (Methylamine) กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมไม่อาจใช้เป็นสับสเตรทในการผลิตมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียอะเซโตจีนิค (ที่ผลิตไฮโดรเจนได้ด้วย) มีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และต่ำกว่า 9×10^{-3} สำหรับการย่อยสลายกรดบิวทิริก และกรดโพรพิโอนิก ตามลำดับ ขั้นตอนนี้จะเกิดได้เฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกรดอะซิติกภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง

ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

กรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากขั้นตอนการสร้างกรด จะถูกจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนใช้เป็นแหล่งคาร์บอน และแหล่งพลังงาน ผลิตได้เป็นก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนได้โดยตรง ดังนั้นจุลินทรีย์จะต้องเปลี่ยนกรดไขมันระเหยต่างๆ ให้เป็นกรดอะซิติกหรือไฮโดรเจนเสียก่อนจึงจะใช้ผลิตมีเทนได้ อีกทั้งจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนบางชนิดอาจจะใช้สาร (substrate) บางชนิดในการผลิตก๊าซมีเทน เช่น เมทานอล และกรดฟอร์มิก เป็นต้น

2.3.1 จุลชีววิทยาและชีวเคมีของกระบวนการไร้อากาศ (มันซิน ตันซูลเวคส์, 2542)

กระบวนการย่อยแบบไร้อากาศ (anaerobic digestion) เป็นการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทน ดังที่กล่าวไว้แล้วในข้างต้นว่าสารอินทรีย์จะถูกจุลินทรีย์หลายๆ กลุ่มในระบบไร้อากาศทำการย่อยสลายให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอาศัยปฏิกิริยสัมพันธ์ของกลุ่มจุลินทรีย์ต่างๆ ที่มีการพึ่งพาอาศัยกัน

2.3.1.1 จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดไขมันระเหย (Acidogenic microorganism)

ในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid : VFA) ของกระบวนการไร้อากาศ จะเกิดกรดที่ผลิตขึ้นโดยจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้อากาศเด็ดขาด (obligate anaerobic) มากกว่าชนิดที่ใช้อากาศได้บางส่วน (facultative) ทั้งนี้เพราะ จุลินทรีย์ชนิด obligate anaerobic มีจำนวนมากกว่า facultative โดยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศชนิด obligate anaerobic ที่มีบทบาทในการสร้างกรดไขมันระเหย ก็คือ กลุ่ม Clostridium ซึ่งมีเมตาบอลิซึม (metabolism) หลายแบบที่สามารถใช้สารอาหารที่เป็นแป้งหรือโปรตีนได้ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาการย่อยสลายที่ได้หลายชนิด เช่น กรดบิวทิริก กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน เอทานอล บิวทานอล และอะซีโตน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์ในกลุ่ม Propionibacterium ที่ผลิตกรดพรอปิโอนิก (propionic acid) และกรดอะซิติกจากกรดแลกติก

2.3.1.2 จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic microorganism)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดไขมันระเหยดังกล่าวในข้างต้น ซึ่งผลิตภัณฑ์บางชนิดยังเป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (methanogenic microorganism) ไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารอาหารได้ จึงต้องมีการแลกเปลี่ยนสารเหล่านั้นให้กลายเป็นสารอาหารที่ง่ายสำหรับจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนเพื่อให้สามารถดูดซึมเข้าไปใช้ในเซลล์ได้ ดังนั้นจุลินทรีย์ที่ย่อยกรดไขมันระเหยโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้นั้น สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

1) จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดอะซิเตท (Homoacetogenic microorganism)

หลักการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดนี้ คือ ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนและแหล่งคาร์บอน และใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอนเพื่อเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นกรดอะซิติก ดังสมการ (1)



2) จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดอะซิติกที่ผลิตไฮโดรเจนได้ (H_2 - producing acetogenic microorganism)

แบคทีเรียชนิดนี้จะใช้กรดไขมันระเหย (ที่ไม่ใช่กรดอะซิติก) หรือแอลกอฮอล์เป็นสารอาหาร และสร้างกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นสารอาหารของจุลินทรีย์สร้างมีเทนขึ้นมา ดังนั้นจุลินทรีย์ชนิดนี้จึงมีบทบาทสำคัญเพราะเป็นตัวเชื่อมระหว่างจุลินทรีย์สร้างกรดกับจุลินทรีย์สร้างมีเทน อย่างไรก็ตาม จุลินทรีย์ชนิดนี้จะไม่เจริญเติบโตเมื่ออยู่ตามลำพังเพราะเมื่อมีการสะสมของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นมาจะทำให้มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูงขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาสร้างกรดอะซิติกหยุดการเจริญเติบโต ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดไฮโดรเจนก่อน ซึ่งจุลินทรีย์สร้างกรดอะซิติกจึงจะเจริญเติบโตได้ โดยจุลินทรีย์สร้างมีเทนจึงเข้ามามีบทบาทในตรงนี้เพราะจุลินทรีย์สร้างมีเทนสามารถใช้ไฮโดรเจนเป็นสารอาหารได้ สำหรับแบคทีเรียในกลุ่มนี้จะสร้างก๊าซไฮโดรเจนและพลังงานจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ ดังสมการ (2)

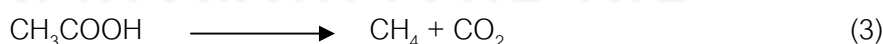


2.3.1.3 จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic microorganism)

จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนเป็นจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้ออกซิเจนได้ (obligate anaerobic) ซึ่งไม่อาจทนต่อสภาวะที่มีออกซิเจนได้แม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อย สามารถจำแนกประเภทตามสารอาหารที่ใช้ในกระบวนการสร้างมีเทนได้ 3 ประเภท ดังนี้

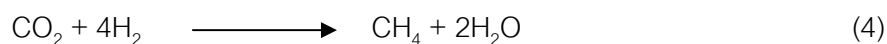
1) จุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (acetoclastic methanogenes)

จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะใช้กรดอะซิติก (CH_3COOH) เป็นสารตั้งต้นในการสร้างก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักในการสร้างก๊าซมีเทน และการกำจัดสารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นจากจุลินทรีย์ของกลุ่มนี้ ดังสมการ (3)



2) จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน (hydrogenotrophic methanogenes)

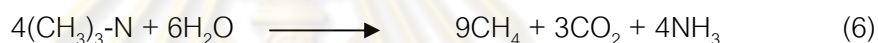
เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ดังสมการ



สำหรับปฏิกิริยาการรวมตัวของ CO_2 และ H_2 เพื่อผลิตก๊าซมีเทนจะได้พลังงานสูงกว่าปฏิกิริยาที่กรดอินทรีย์ (กรดอะซิติก) ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้น จุลินทรีย์จึงชอบที่จะใช้ก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า

3) จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนจากสารประเภทเมทิล (methylotrophic methanogens)

จุลินทรีย์กลุ่มนี้ใช้สารที่มี methyl group ($-\text{CH}_3$) เป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิต CH_4 ได้แก่ เมทานอล (methanol ; $\text{CH}_3 \text{OH}$) และเมทิลลามาาย (methylamine ; $(\text{CH}_3)_3\text{-N}$) ดังสมการ (5) และ (6)



2.3.2 ลักษณะเฉพาะตัวของกระบวนการไร้อากาศข้อดี-ข้อเสีย

ข้อดี

1. สารอินทรีย์กลายเป็นก๊าซ CH_4 , CO_2 80-90 % สร้างเป็น cell ใหม่ 10-20 %
2. ปริมาณอาหารเสริม เช่น N, P, K, Ca และอื่น ๆ น้อย
3. ควบคุมได้ง่าย และแบคทีเรียเจริญเติบโตต่ำ

ข้อเสีย

1. Growth Rate ของแบคทีเรียต่ำทำให้ใช้เวลานาน และ น้ำเสียอยู่ในระบบนาน ทำให้เปลืองความสามารถในการรับภาระ
2. Start up ช้า (ไม่เหมาะกับ Batch Process) และปรับตัวรับ Shock load ไม่ดี
3. H_2S ทำให้น้ำเหม็น น้ำดำ (สารประกอบซัลไฟด์)

2.4 ปัจจัยสภาวะแวดล้อมที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

จุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ โดยเฉพาะจุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างมีเทนนั้นมีความอ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อมภายในถังหมัก กล่าวคือ มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีต่ำ และสามารถเจริญเติบโตได้เฉพาะในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมเท่านั้น ดังนั้นในการเดินระบบไร้อากาศจะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.4.1 สารอาหาร (Macro nutrient)

เนื่องจากปริมาณเซลล์ของจุลินทรีย์ที่สร้างขึ้นมากในกระบวนการไม่ใช้ออกซิเจนจะมีน้อยกว่าแบบใช้ออกซิเจน ซึ่งจากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสต่อซัลเฟอร์ (C:N:P:S) ในเซลล์มีค่าประมาณ 100:10:1:1 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาอัตราส่วนนี้ไว้ไม่ให้น้อยไปกว่านี้ ทำให้จุลินทรีย์ต้องการอาหารเสริมนอกเหนือจากคาร์บอน เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างบีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสอย่างน้อยควรมีค่าเท่ากับ 100:1:0.2 (Metcalf และ Eddy, 2003) นอกจากนี้ยังมีธาตุอาหารบางอย่างที่จุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนต้องการในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้ คือ เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล และซัลเฟอร์

สำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีของแข็งในปริมาณที่สูง (ประมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตร หรือสูงกว่า) มีสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ที่เหมาะสมในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีค่าอยู่ในช่วง 20-30 โดยในกรณีที่มีสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าสูงเกินไปในระหว่างกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ไนโตรเจนจะถูกนำไปใช้อย่างรวดเร็วในการสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์ และเมื่อไนโตรเจนภายในระบบไม่เพียงพอต่อการนำไปสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์จะส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายลดต่ำลง และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นก็ลดลงตามไปด้วย ในทางกลับกันถ้าสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าต่ำเกินไป จะทำให้เกิดการสะสมของไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบสูงขึ้นซึ่งถ้ามีค่าสูงถึง 8.5 ขึ้นไป โดยจะไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนในระบบได้

ส่วนกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีปริมาณของแข็งต่ำ (ประมาณร้อยละ 10-15 โดยปริมาตร) ค่าสัดส่วนของสารอาหารที่จุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศจำเป็นต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และการสร้างเซลล์ส่วนใหญ่จะใช้ในรูปของสัดส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD:N:P) มีค่าเท่ากับ 100:2:0.4 (Speece, 1996)

2.4.2 ปริมาณน้ำภายในถังหมักไร้อากาศ

ปริมาณน้ำภายในถังหมักไร้อากาศเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในถังหมักไร้อากาศ ทั้งนี้เพราะน้ำเป็นสถานะหลักของสารที่เกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีของจุลินทรีย์ ดังนั้น ถ้ามวลภายในถังหมักไร้อากาศมีปริมาณน้ำเพียงพอที่จะทำให้อัตราการย่อยสลายเกิดเร็วขึ้น เป็นผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงขึ้นตามไปด้วย (Patrick และ Philip, 2002)

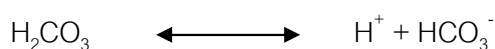
2.4.3 การผสม (mixing)

การผสมเป็นการทำให้จุลินทรีย์ในระบบมีโอกาสสัมผัสกับอาหารมากขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดเร็วขึ้น การผสมสามารถลดเวลาเก็บกักของถังปฏิกิริยาได้ ซึ่งวิธีการกวนผสมโดยใช้ใบพัดกวนจะมีประสิทธิภาพสูงกว่าการผสมแบบหมุนเวียนภายในระบบ จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนมีความไวต่อการกวนผสมเร็วมาก (rapid mix, velocity gradient, $G > 500 \text{ s}^{-1}$) ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการผสมที่อาจทำให้จุลินทรีย์สร้างมีเทนหลุดออกจากระบบ ซึ่งอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ (Gerardi, 2003)

2.4.4 ความเป็นกรด-ด่าง และสภาพด่าง (pH and alkalinity)

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศจะอยู่ในช่วง 6-7 ซึ่งการตรวจวัดความเป็นกรด-ด่างภายในระบบสามารถบอกถึงเสถียรภาพของระบบไร้อากาศได้ เช่น มีค่า pH ต่ำ แสดงว่าอาจเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในระบบทำให้ค่า pH ลดต่ำลง ซึ่งส่งผลให้ไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนได้

สภาพด่าง (alkalinity) คือ ความสามารถในการสะเทินกรด ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมากในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ทั้งนี้เพื่อใช้ในการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม และป้องกันค่า pH ในระบบไร้อากาศไม่ให้ลดลงอย่างรวดเร็ว โดยสมดุลหลักในการควบคุมความเป็นกรด-ด่าง ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ คือ สมดุลของไบคาร์บอเนต (bicarbonate system) ประกอบด้วย คาร์บอเนต (CO_3^{2-}) และไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ดังปฏิกิริยา



ในการเพิ่มเสถียรภาพของระบบควรมีสภาพต่างที่เพียงพอสำหรับป้องกันการลดลงของความ เป็นกรด-ด่างอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการสะสมของกรดไขมันระเหยในขั้นตอนการสร้างกรด (acidogenesis) โดยทั่วไปการเพิ่มสภาพต่างให้แกระบบจะทำโดยการเติมโซเดียมคาร์บอเนต (NaCO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) โดยที่ต้องเติมใน ปริมาณที่เหมาะสม เพราะถ้าหากเติมมากเกินไปอาจทำให้เกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศได้ (วิชญ์นนท์ ธรานนท์, 2551)

2.4.5 อัตราการระสารอินทรีย์และกรดไขมันระเหย (organic loading rate and volatile fatty acid)

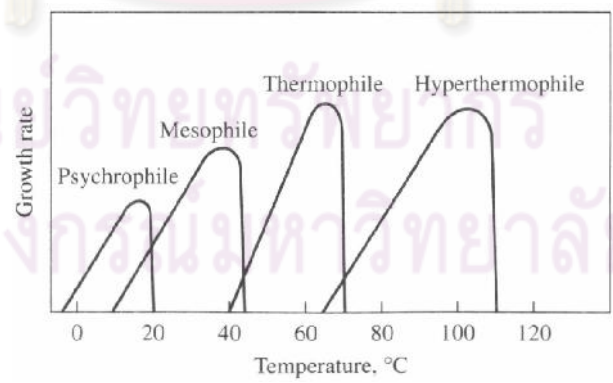
อัตราการระสารอินทรีย์เป็นปัจจัยสำคัญสำหรับถังหมักไร้อากาศแบบกะ (batch anaerobic digester) และมักเป็นสาเหตุของการติดขัดหรือล้มเหลวของระบบไร้อากาศ เช่น การใช้อัตราการระ สารอินทรีย์สูงเกินไป (overloading) ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนใช้กรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นจาก ขั้นตอนการสร้างกรดไม่ทัน ส่งผลให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยและมีส่วนในการเพิ่มความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน (hydrogen partial pressure) ภายในระบบไร้อากาศ ทำให้เกิดกรด ไขมันระเหยที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดโพรพิออนิก และกรดบิวทิริก ซึ่ง เป็นกรดไขมันระเหยที่จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้ และเมื่อกรดไขมันระเหยที่ เกิดขึ้นดังกล่าวไม่ถูกใช้จะทำให้เกิดการสะสมจนมีปริมาณมากขึ้นจะทำให้ความเป็นกรด-ด่าง ภายในระบบลดลงจนไม่เหมาะสมในการดำรงอยู่ของจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ (Valdez-Vazquez และ Poggi-Varaldo, 2008) ดังนั้นในการเพิ่มอัตราการระสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบควรค่อยๆ เพิ่มทีละน้อย และการเปลี่ยนอัตราการระสารอินทรีย์แต่ละครั้งควรรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady-state) ก่อนแล้วจึงเพิ่มอัตราการระสารอินทรีย์ให้ได้ตามอัตราส่วนที่ต้องการ (วิชญ์นนท์ ธรานนท์, 2551)

2.4.6 สารพิษ

สารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ โดยเฉพาะจุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างมีเทนจะมีอยู่ หลายชนิด และระดับความรุนแรงขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารเหล่านั้น ซึ่งสารพิษบางตัว เป็นสารอาหารที่จำเป็นแต่ต้องมีปริมาณที่พอเหมาะ ถ้ามีมากเกินไปจะกลายเป็นพิษได้ โดยการมี



ศูนย์วิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



2.4.8 ปริมาณออกซิเจน

ออกซิเจนจะเป็นพิษอย่างมากต่อระบบไร้อากาศแม้จะมีปริมาณเพียงเล็กน้อย เพราะจะทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลเอนไซม์ในตัวจุลินทรีย์ของระบบไร้อากาศ และทำให้เกิดการยับยั้งกระบวนการผลิตมีเทนได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

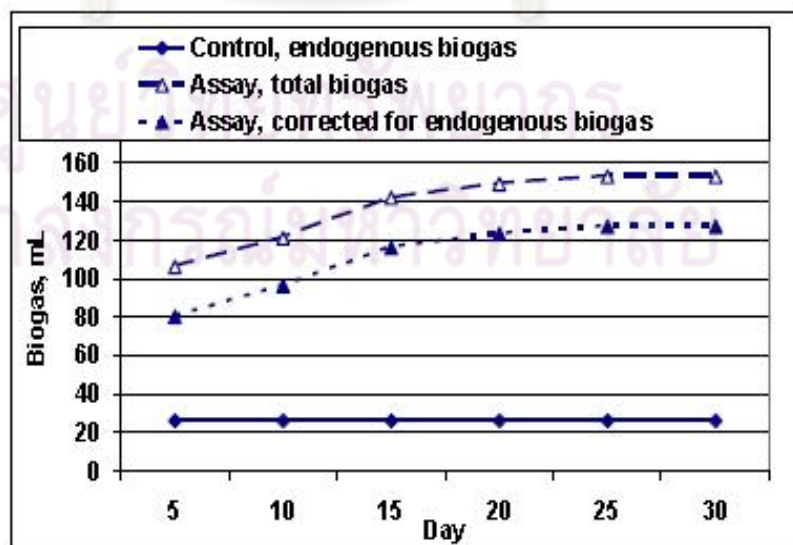
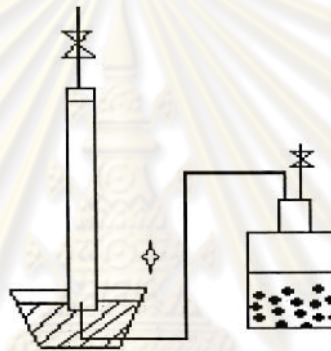
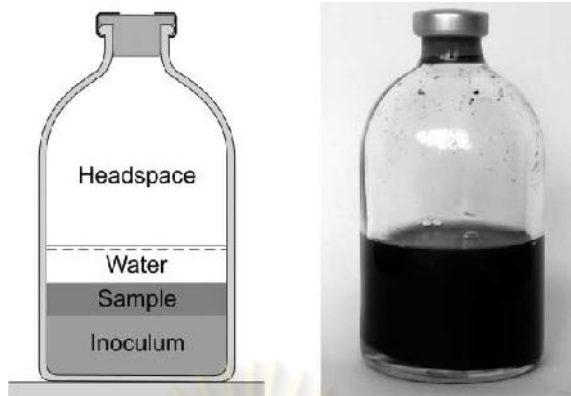
2.5 Biochemical Methane Potential (BMP) (วีระนุช หลาง, 2551)

ระบบบำบัดแบบไร้อากาศเหมาะสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีความสกปรกมากๆ หรือมีค่าบีโอดี หรือซีโอดีสูง ๆ และเนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบส่วนใหญ่เป็น mesophilic microorganisms จึงเหมาะกับการนำมาใช้บำบัดน้ำเสียในเขตร้อน อีกทั้งไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการเดินระบบเหมือนระบบไร้อากาศที่ต้องใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อเติมอากาศ นอกจากนี้ยังได้มีเทนเป็นเชื้อเพลิงทดแทนอีกด้วย จึงเป็นที่นิยมกันมากในประเทศไทย โดยเฉพาะการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าบีโอดีสูงและบางชนิดมีโปรตีนอยู่น้อย เช่น น้ำเสียจากโรงงานแป้ง โรงงานกระดาษ อุตสาหกรรมเกษตร เป็นต้น

การจะนำระบบบำบัดแบบไร้อากาศไปใช้กับน้ำเสียจากกิจกรรมใด ๆ ควรจะต้องทำการทดสอบค่า BMP (Biochemical Methane Potential) เพื่อประเมินความเป็นไปได้หรือศักยภาพของระบบรวมทั้งประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียก่อน BMP เป็นการทดลองหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของของเสียที่นำมาบำบัดด้วยระบบแบบไร้อากาศโดยแสดงในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมซีโอดีของของเสียที่ถูกย่อยสลายไป

การทดลอง BMP ทำได้โดยนำของเสียมาผสมกับตะกอนไร้อากาศแบคทีเรียในขวดแล้วใส่ก๊าซออกซิเจนออกให้หมดก่อนจึงปิดขวดให้สนิท จากนั้นทำการวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจนกว่าระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว (steady state) คือ ไม่มีก๊าซเกิดเพิ่มขึ้น หากมีการวิเคราะห์สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพก็จะทำให้คำนวณปริมาตรของก๊าซมีเทนในช่วงเวลาต่าง ๆ ที่วัดได้นำค่าปริมาณก๊าซมีเทนสะสมไปพลอตกราฟดังรูปที่ 2.10 ค่าพิกัดจุดตัด BMP จาก

$$\text{BMP} = \frac{\text{ปริมาตรของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมด (มิลลิลิตร)}}{\text{กรัมของซีโอดี(หรือกรัม VS) ที่ย่อยสลายไป}}$$



2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lane (1984) ทำการทดลองโดยใช้ซังข้าวโพด สับปะรดและแอปเปิ้ล หมักเป็นเวลา 226 วัน มีอัตราการป้อนสารอาหาร 3.3-4.25 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ได้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 0.429-0.568 ลิตรต่อกิโลกรัมของสารอาหารที่ป้อนเข้าระบบ และได้ก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบประมาณ 50-60%

Ranade และคณะ (1987) ทำการทดลองโดยใช้ขยะจากตลาดสด ได้แก่ผักเศษผักและเปลือกผลไม้ไม่มีค่าของแข็งทั้งหมด (TS) 5% หมักในถังหมักขนาด 200 ลิตรที่ HRT 20 วัน ผลิตก๊าซได้ 30.2 ลิตรต่อกิโลกรัมของขยะต่อวัน และได้ก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ 65 %

Nand และคณะ (1992) ทำการทดลองโดยใช้ผักและผลไม้ เช่น มะม่วง สับปะรด ขนุน มะเขือเทศ เปลือกส้ม และกล้วย เป็นวัตถุดิบโดยไม่มีการเติมน้ำเพื่อลดปริมาณค่าของแข็งทั้งหมด ทำการหมักเป็นระยะเวลา 100 วัน โดยใช้ถังหมักขนาด 60 ลิตร ที่ HRT 20 วัน ผลิตก๊าซได้ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหย และได้ก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบประมาณ 51-53%

Mata-Alvarez และคณะ (1993) ทำการทดลองโดยใช้ผักและผลไม้ เช่น มะเขือเทศ แตงกวา ผักกาด แดงไทย และเปลือกส้ม เป็นวัตถุดิบ มีค่าของแข็งทั้งหมด 45.11% ระยะเวลาการหมัก 35 วัน ในถังหมักสองขั้นตอนขนาด 0.13 และ 0.05 ลูกบาศก์เมตร ที่ HRT 25 วัน สามารถผลิตก๊าซได้สูงสุดในวันที่ 10 ของการทดลองเท่ากับ 3.4 ลิตร ได้ก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบสูงสุด 60%

Bardiya และคณะ (1996) ทำการทดลองหมักเปลือกกล้วยโดยใช้ seed มูลวัว ในถังหมักขนาด 2 ลิตร HRT 40 วัน พบว่าเปลือกกล้วยมีค่า methane yield 190 ลิตรต่อกิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง)

Amathussalam (1999) ศึกษาผลจากการบำบัดเบื้องต้นทางเคมีของขยะผักและผลไม้จากตลาด โดยทำการหมัก 30 วัน อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส โดยขยะที่ยังไม่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 820 ลูกบาศก์เมตรต่อ 250 กรัมของขยะ โดยมีเทนเกิดขึ้น 52% หลังจากใส่ NaHCO_3 ก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น 1,240 ลูกบาศก์เมตรต่อ 250 กรัมของขยะ โดยมีเทนเกิดขึ้น 57%

Bouallagui และคณะ (2003) ศึกษาประสิทธิภาพของขยะผักและผลไม้โดยกระบวนการไร้อากาศในการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยมีค่าของแข็งทั้งหมด 8-18% ของแข็งระเหยได้ 86-92% ส่วนที่ย่อยง่ายได้แก่ น้ำตาลและเฮมิเซลลูโลส 60% เซลลูโลส 9% และลิกนิน 5% โดยมีค่า methane production yield ประมาณ 420 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย

Clarke และคณะ (2008) ทำการทดลองโดยพบว่าอัตราการผลิตมีเทนของเปลือกกล้วยมีค่าสูง โดยมีค่า methane yield 266 ลิตรต่อกิโลกรัม (น้ำหนักแห้ง)

Coalla และคณะ (2009) ทดลองหาก๊าซชีวภาพจากแอปเปิ้ล ใช้ถังหมักขนาด 10 ลิตร หมักเป็นเวลา 80 วัน พบว่า มีเทนเกิดขึ้น 77-80%

Gibson และ Smyth (2007) ศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์โดยวิธีการหาค่า BMP โดยใช้ของเสียที่มีการผสมรวมกันประกอบไปด้วย ของเสียจากอาหาร, กระดาษ, พลาสติก, โลหะและแก้ว โดยทำการทดลองหาค่าก๊าซชีวภาพเป็นเวลา 14 วัน โดยจะมีการบำบัดเบื้องต้น 2 แบบคือ แบบที่หนึ่งทำการพาสเจอร์ไรส์ตัวอย่างที่ อุณหภูมิ 40°C และทำการย่อยแบบไร้อากาศที่ 55°C แบบที่สองทำ thermal hydrolysis (ความร้อน) 20 นาที และทำการย่อยแบบไร้อากาศที่ 40°C โดยวัดค่า methane yield = 100 ลิตรต่อกิโลกรัม-ของแข็งระเหย สำหรับการพาสเจอร์ไรส์ และวัดค่าได้ 276 ลิตรต่อกิโลกรัม-ของแข็งระเหยของการทำ thermal hydrolysis

Paepatung และคณะ (2009) ทำการศึกษาศักยภาพการผลิตมีเทนจากของแข็งและของเสียทางการเกษตรโดยศึกษาทะเลาะปาล์ม ที่อุณหภูมิ 37 °C ใช้ขวดซีรัมขนาด 120 มิลลิลิตร แล้วทำการวัดก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง Gas Chromatography พบว่ามี มีค่า Ultimate methane yield ที่ 90 วัน เท่ากับ 0.37 ลิตร กรัม⁻¹ ของแข็งระเหย

Demirel และ Yenigun (2002) ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายใน ถังปฏิกรณ์แบบ Methanogenic upflow filter พบว่ากรดไพรูวอิกนิก ที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของ Methanogenic bacteria ที่ความเข้มข้นมากกว่า 951 มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก ในขณะที่การเติมกรด บิวทิริก จะช่วยลดการยับยั้งได้

Siegert และ Banks (2005) ศึกษาความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นตัวยับยั้งการย่อยของเซลลูโลส ในขณะที่ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก เป็นตัวยับยั้งการย่อยสลายของกลูโคส

Wang และคณะ (2008) ศึกษาความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายที่มีผลต่อ Methane yield และ Methanogenic bacteria โดยทดลองหมักในขวด 250 มล ที่มี หัวเชื้อจุลินทรีย์ 50 มิลลิลิตร และควบคุมความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายที่ค่าต่างๆและสารอาหารอีก 50 มิลลิลิตร สารที่ใส่เข้าไปในขวดหมักมี HRT 3 วัน ทำการทดลองต่อเนื่อง 15 วัน และทำการทดลองแบบคู่ขนานซึ่งได้ผลการทดลอง คือ ค่าความเข้มข้นที่สูงสุดของเอทานอล กรดอะซิติก และกรดบิวทิริก คือ 2,400, 2400 และ 1,800 มิลลิกรัมลิตร ตามลำดับ ซึ่งไม่มีนัยสำคัญต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของ Methanogenic bacteria อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของกรดไพรูวอิกนิกเพิ่มขึ้นถึง 900 มิลลิกรัม/ลิตร จะมีนัยสำคัญต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของ

Methanogenic bacteria ($P < 0.01$) ความเข้มข้นของแบคทีเรียจะลดลงจาก 6×10^7 ถึง $0.6-1 \times 10^7$ และการวิเคราะห์ค่าที่เหมาะสมของ เอทานอล กรดอะซิติก กรด โพรพิออนิก และกรด บิวทิริก คือความเข้มข้นที่ 1,300 1,600 1,300 และ 1,800 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งจะทำให้ค่า methane yield สะสมมากที่สุด คือ 1,620 มิลลิลิตร

Gunaseelan และคณะ (2007) ศึกษาแบบจำลองสมการถดถอยของค่าการเกิดมีเทน สูงสุด (ultimate methane yield) โดยใช้โปรแกรม SPSS ของของเสียผักและผลไม้ ข้าวฟ่าง และ หญ้าเนเปียร์จากการหมักประกอบทางเคมี โดยวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด กรดไขมันระเหยง่าย ปริมาณอินทรีย์คาร์บอน ไนโตรเจน คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ลิกนิน เซลลูโลสและเถ้า พบว่า ไนโตรเจน เถ้า และคาร์โบไฮเดรตมีความสำคัญอย่างมากต่อการทำนายค่าการเกิดมีเทนสูงสุด โดยมี r^2 อยู่ระหว่าง 0.9-0.99 ซึ่งจะช่วยทำนายการเกิดมีเทนสูงสุดได้ดีในระยะยาวในการทดลอง หมักแบบ Batch

Valdez-Vazquez และ Poggi-Varaldo (2008) ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยา การหมักของสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ พบว่าเกิดไฮโดรเจนในกระบวนการหมักมี สาเหตุมาจากการยับยั้งการทำงาน และ/หรือตายของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน อันเป็นผลให้เกิดการ สะสมของไฮโดรเจน

มรกต ตันติเจริญและคณะ (2526) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกและแกนสับปะ รด ในขวดหมักขนาด 4 ลิตร มีการบำบัดเบื้องต้นด้วย NaOH เพื่อช่วยละลายลิกนินออกจาก วัสดุดิบ ได้ก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 70 ลิตรต่อกิโลกรัมเปียกของวัสดุดิบ และได้ก๊าซมีเทนเป็น องค์ประกอบประมาณ 55%

ธเนศ อุทิศธรรมและคณะ (2528) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกสับปะรด ในขวด หมักขนาด 1 แกลลอน ปริมาตรการหมัก 3 ลิตร พบว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ให้ก๊าซ ชีวภาพสูงสุดประมาณ 1.79 ลิตรต่อการหมัก 1 วัน

สุพินดา ฐระเจน (2544) ศึกษาพฤติกรรมการย่อยสลายของขยะผักและผลไม้จากตลาด สดขายส่งสี่มุมเมือง มีค่าของแข็งทั้งหมด 58.94% ค่าของแข็งระเหยได้ 8.28% โดยเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักขยะที่มีและไม่มีคาร์บอนเวียนน้ำชะขยะ ใช้ถังขนาด 100 ลิตร ทำการทดลองการหมักแบบ Batch 200 วัน พบว่าในถังที่ไม่มีคาร์บอนเวียนน้ำชะขยะ ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 149.60 ลิตรก๊าซชีวภาพต่อการทดลอง 200 วัน โดยมีมีเทนเป็นองค์ประกอบ สูงสุด 40.48% ในถังที่คาร์บอนเวียนน้ำชะขยะผลิตก๊าซชีวภาพได้ 338.58 ลิตรลิตรก๊าซชีวภาพต่อการ ทดลอง 200 วัน โดยมีมีเทนเป็นองค์ประกอบสูงสุด 57.55%

ชลิตา คู่ตะเกา (2548) ศึกษาศักยภาพของขยะผักและผลไม้ เช่น ผักคะน้า ผักกวางตุ้ง กัลฉวยและแตงโม ในการผลิตก๊าซมีเทนแบบไร้อากาศ โดยทำการทดลอง 25 วัน คุณหมุมิเฉลี่ย 27 องศาเซลเซียส พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศซึ่งอัตราส่วน C:N ที่เหมาะสมในการทำงานของระบบคือ 7.25-9.16 และปริมาณลิกนินเซลลูโลสรวมกันน้อยกว่าร้อยละ 60



ศูนย์วิทยพัรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศที่เกิดขึ้นและปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ของเศษขยะผลไม้ จำนวน 8 ชนิด ได้แก่ มะม่วง สับปะรด แตงโม ส้ม ส้มโอ ฝรั่ง กัลย และแตงไทย ที่ซึ่งพบได้มากที่ตลาดสี่มุมเมือง โดยทำการวัดลิกนิน เซลลูโลสก่อน และวิธีการวิเคราะห์ที่ประยุกต์มาจาก Biochemical Methane Potential (BMP) และใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ (seed) จากบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) ตัวอย่างจะนำมาทำการหมักในขวดเซรัมส์ชาปริมาณ 100 มิลลิลิตรในสภาพไร้อากาศ หลังจากนั้นจะหาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต้นที่มีความจำเพาะเจาะจง เช่น ลิกนิน เซลลูโลส กรดไขมันระเหยง่าย เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด เปอร์เซ็นต์ของแข็งระเหยง่าย ที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ พร้อมทั้งวิเคราะห์ปริมาณและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยเฉพาะมีเทนที่เกิดจากการย่อยสลายและคำนวณหาค่า biogas yield ของสารอินทรีย์ของตัวอย่าง โดยจะควบคุมตัวแปรที่สำคัญอื่นๆ ในการเริ่มต้นระบบในแต่ละชุด เช่น สารอาหาร, หัวเชื้อจุลินทรีย์ (seed), ค่า pH, อุณหภูมิ เป็นต้น ให้อยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกันที่เหมาะสมกับสภาพการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เวลาทำการทดลองทั้งสิ้นเท่ากับ 30 วันต่อหนึ่งรอบ โดยจะทำการทดลองหมักตัวอย่างแบบไร้อากาศในขวดเซรัมส์ชา 8 ชุด สำหรับผลไม้ 8 ชนิดทำการทดลองชุดละ 3 ซ้ำ จะไม่มีการเพิ่มเติมสารอาหารลงไปอีกหลังจากที่ได้เริ่มต้นหมักแล้ว โดยระบบจะใช้ตัวอย่างผสมคลุกเคล้าให้เข้ากับหัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนทำการหมัก หลังจากนั้นจึงปิดฝาป้องกันอากาศรั่วไหลเข้าสู่ระบบ ทำการทดลองภายในคณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และจะใช้อุณหภูมิห้องตลอดระยะเวลาในการทดลอง ทำแบบจำลองวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปัจจัยตั้งต้นต่างๆที่จะมีผลอย่างเจาะจงกับการเกิดก๊าซชีวภาพ

3.2 ลักษณะตัวอย่างผลไม้

ตัวอย่างที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ใช้เศษขยะผลไม้ที่พบบริเวณตลาดสดกลางสี่มุมเมืองที่มีการกองทิ้งไว้ซึ่งเป็นส่วนของผลไม้ที่ไม่นำมาบริโภค อีกทั้งมีปริมาณมาก (แสดงในบทที่ 2 ตารางที่ 2.1-2.2) โดยจะคัดชนิดที่ใช้ในการทดลอง 8 ชนิดตามตารางที่ 3.1 โดยนำส่วนที่ต้องการทดสอบมาประมาณชนิดละ 300 กรัม ทำการบด ให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่น เพื่อให้มีขนาดสม่ำเสมอและจุลินทรีย์ทำปฏิกิริยาได้ง่ายและทั่วถึง ซึ่งแต่ละส่วนของผลไม้เหล่านั้นมีปริมาณลิกนินและเซลลูโลสไม่เท่ากันซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยจะนำวัตถุดิบไปทำปฏิกิริยากับกรดแก่ คือ กรดซัลฟูริกความเข้มข้นร้อยละ 72 องค์ประกอบส่วนที่เป็นคาร์โบไฮเดรตจะถูกไฮโดรไลซ์ (Hydrolyze) และจะละลายในกรดเหลือองค์ประกอบที่ไม่สามารถไฮโดรไลซ์ได้ไว้เป็นลิกนินสำหรับเซลลูโลสนั้นมีองค์ประกอบที่มีปริมาณสูงกว่าองค์ประกอบอื่นๆในวัตถุดิบ เซลลูโลสถูกทำลายได้ง่ายด้วย chemical reagents ต่างๆการทดลองนี้ใช้กรดอะซิติกเป็นตัวทำลาย โดยจะแบ่งตัวอย่าง 200 กรัม เพื่อหาค่าตามพารามิเตอร์การวิเคราะห์ตัวอย่างเศษขยะผลไม้ตารางที่ 3.2 พร้อมทั้งนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเศษขยะผลไม้ได้แก่ ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจนและซัลเฟอร์ ด้วยเครื่องมือ CHNS/O Analyzer (Perkin Elmer PE2400 Series II) แล้วจึงนำเศษขยะผลไม้ที่เหลือ 100 กรัม ดำเนินการทดลองในขวดเซรัมส์ซีชาต่อไป

ตารางที่ 3.1 ชนิดและส่วนประกอบของผลไม้ที่ใช้ในการทดลอง 8 ชนิด

ลำดับ	ชนิด	ส่วนที่นำมาทดสอบใช้ทั้งลูกคือ เปลือกและเนื้อรวมกัน
1	มะม่วง	X
2	สับปะรด	X
3	แตงโม	X
4	ส้ม	X
5	ส้มโอ	X
6	ฝรั่ง	X
7	กล้วย	X
8	แตงไทย	X

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเศษขยะผลไม้

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ปริมาณความชื้นทั้งหมด (Moisture content)	การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบมูลฝอยทางเคมี (Dried 75-100°C) (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2553)
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids)	การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบมูลฝอยทางเคมี (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2553)
ปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile solids)	การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบมูลฝอยทางเคมี (Ignited at 815±10°C) (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2553)
กรดไขมันระเหยง่าย (VFA)	Titration method
การหาปริมาณลิกนิน	TAPPI T222 om-88
การหาปริมาณเซลลูโลส	Method of Wood Chemistry (Acid Chlorite)

3.3 หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการวิจัย

หัวเชื้อจุลินทรีย์ (Seed) ที่นำมาใช้ในการวิจัยใช้หัวเชื้อจากบริษัทเสริมสุข จำกัด (มหาชน) ทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนนำไปใช้จริง โดยนำไปแช่ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อรอทำการทดลองต่อไปและทำการวัดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3.3 (หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะทำการวัดองค์ประกอบเบื้องต้นก่อนนำไปใช้ในการทดลอง ประกอบด้วยค่าความชื้นทั้งหมด = 95% ของแข็งทั้งหมด = 5 % ของน้ำหนักรับเปียก และค่าของแข็งระเหยได้ = 90% ของน้ำหนักแห้ง)

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์หัวเชื้อจุลินทรีย์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids)	การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบมูลฝอยทางเคมี (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2553)
ปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile solids)	การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบมูลฝอยทางเคมี (Ignited at 815±10°C) (ธเรศ ศรีสถิตย์, 2553)
ซีโอดี (COD)	Standard method#5220 (Close reflux)
สภาพด่าง (alkalinity)	Standard method#2320 (Titration method)
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	Electronic pH meter with glass electrode method
ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน	ORP meter

3.4 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.4.1 ขวดเซรัมส์ชาในการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ

ขวดเซรัมส์ชาในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นการจำลองระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) ในการหาปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นโดยประยุกต์จากวิธี Biochemical Methane Potential (BMP) ซึ่งจะใช้ขวดเซรัมส์ชานขนาด 100 มิลลิลิตร (รูปที่ 3.1 ก) จำนวน 107 ขวด โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด (แสดงรายละเอียดตารางที่ 3.4-3.5)

จำนวนตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ ประกอบด้วย

- 1) ตัวอย่างเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ที่ทำการผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์และสารอาหารเรียบร้อยแล้ว ทำการทดลองตัวอย่างละ 3 ซ้ำ (ใช้ 24 ขวด ตามตารางที่ 3.4) เป็นชุดการทดลองที่ 1
- 2) จำนวนตัวอย่างของชุดควบคุมการทดลอง BMP ประกอบด้วย Blank จำนวน 1 ตัวอย่าง 3 ซ้ำ (ใช้ 3 ขวด)
- 3) ทำชุดตัวอย่างเพื่อวัดค่า VFA โดยวัดค่า VFA ทุกๆ 3 วัน ของแต่ละตัวอย่างเป็นเวลา 30 วัน โดยใช้ขวดของแต่ละตัวอย่าง 10 ขวดต่อ 1 ชนิดผลไม้ ตามตารางที่ 3.5 เป็นชุดการทดลองที่ 2 (ใช้ 80 ขวด) โดยผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์และสารอาหารเช่นเดียวกับชุดการทดลองที่ 1

ชุดการทดลองที่ 1 การหาปริมาณก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 3.4 จำนวนขวดที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาปริมาณก๊าซชีวภาพของเศษขยะผลไม้ชนิดต่างๆ

ลำดับ	ชนิด	ส่วนของผลไม้ที่นำมาทดสอบ	รวมแต่ละตัวอย่าง (ขวด)
		เปลือกและเนื้อผลไม้รวมกัน	
1	มะม่วง	X	3
2	สับปะรด	X	3
3	แตงโม	X	3
4	ส้ม	X	3
5	ส้มโอ	X	3
6	ฝรั่ง	X	3
7	กล้วย	X	3
8	แตงไทย	X	3
รวม 24 ขวด/3 ชั่วโมง			

ชุดการทดลองที่ 2 การหากรดไขมันระเหยง่าย

ตารางที่ 3.5 จำนวนขวดที่ใช้ในการทดลองเพื่อหากรดไขมันระเหยง่ายของเศษขยะผลไม้ชนิดต่างๆ

ลำดับ	ชนิด	ส่วนของผลไม้ที่นำมาทดสอบ	ส่วนของผลไม้ที่นำมาทดสอบ
		เปลือกและเนื้อผลไม้รวมกัน	
1	มะม่วง	X	10
2	สับปะรด	X	10
3	แตงโม	X	10
4	ส้ม	X	10
5	ส้มโอ	X	10
6	ฝรั่ง	X	10
7	กล้วย	X	10
8	แตงไทย	X	10
รวม 80 ขวด/30 วัน			

3.4.2 สารอาหารเสริม

ในงานวิจัยครั้งนี้มีการเติมสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ โดยปริมาณและชนิดสารอาหารเสริมที่เติมในขวดหมักไร้อากาศในการทดลอง BMP แสดงดังตารางที่ 3.6

สำหรับกระบวนย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีปริมาณของแข็งต่ำ (ประมาณร้อยละ 10-15 โดยปริมาตร) ค่าสัดส่วนของสารอาหารที่จุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศจำเป็นต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และการสร้างเซลล์ส่วนใหญ่จะใช้ในรูปของสัดส่วนซีไอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD:N:P) มีค่าเท่ากับ 100:2:0.4 (Speece, 1996)

ตารางที่ 3.6 ปริมาณสารอาหารเสริมหลัก สารอาหารเสริมรอง และสารเสริมความเป็นต่าง

ชนิดของสารเคมี	ความเข้มข้น (มก./ล.)	ชนิดของสารเคมี	ความเข้มข้น (มก./ล.)
สารอาหารเสริมหลัก		NH_4VO_3	0.5
NH_4Cl	400	$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.5
$\text{MgSO}_4 \cdot 7(\text{H}_2\text{O})$	400	ZnCl_2	0.5
KCl	400	$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.5
$\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	300	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.5
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	50	H_3BO_3	0.5
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$	80	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.5
		$\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.5
สารอาหารเสริมรอง		Na_2SeO_4	0.5
$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	40		
$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	10	สารอาหารเสริมความเป็นต่าง	
KI	10	NaHCO_3	5000
$(\text{NaPO}_3)_6$	0.5		
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.5		

ที่มา: Speece, 1996



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.4 อุปกรณ์อื่นๆ

- 1) เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิ
- 2) ตู้ควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103-105 องศาเซลเซียส
- 3) เตาเผาควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 815 ± 10 องศาเซลเซียส
- 4) เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
- 5) ตู้บชีโอดี
- 6) เครื่องเขย่า
- 7) เครื่องกรองบุคเนอร์
- 8) เครื่องอังไอน้ำ เทอร์มิเตอร์และชุดควบคุมอุณหภูมิ

3.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.5.1 การทดลองเพื่อหาปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนโดยประยุกต์จาก Biochemical Methane Potential (BMP)

ในการทดลองทำ BMP จะนำขวดที่ทำการหมักตัวอย่างเรียบร้อยแล้วจำนวนทั้งสิ้น 107 ขวด แบ่งออกเป็น 2 ชุดการทดลองคือ ชุดที่ 1 ขวดเก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น และชุดที่ 2 คือขวดสำหรับการหากรดไขมันระเหยง่าย นำไปวางไว้บนเครื่องเขย่า โดยจะทำการวิเคราะห์สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น จากนั้นจึงคำนวณปริมาตรของก๊าซมีเทนในช่วงเวลาต่างๆ ที่วัดได้โดยมีตัวแปรและค่าที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.7-3.8 สำหรับจุดเก็บตัวอย่าง และความถี่ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ (วิธีการวิเคราะห์อ้างอิงจาก Owen และคณะ, 1979) วิธีการวิเคราะห์มีดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรควบคุม	ค่าควบคุม
1. อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
2. พีเอช	7.0 - 7.2
3. หัวเชื้อจุลินทรีย์	หัวเชื้อจุลินทรีย์จากบริษัท เสริมสุข จำกัด มหาชน โดยนำไปปรับสภาพก่อนนำมาใช้จริง
4. เวลาที่ใช้ในการทดลอง	30 วัน
5. ปริมาณของผลไม้	10 กรัมเปียก ต่อ 1 ชุดการทดลอง
6. ปริมาณก๊าซชีวภาพ	Inverted glass cylinder method
7. ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน	Gas Chromatography (GC)

ในการทดลองจะวัดพารามิเตอร์โดยจะวัดพารามิเตอร์ต่างๆของตัวอย่างก่อนที่จะใส่ลงในขวดเสริมและแบ่งขวดเก็บก๊าซที่วัดเป็นประจำและขวดเก็บกรดสำหรับการหากรดไขมันระเหยง่าย โดยจะวัดทุกๆ 3 วัน แล้วไม่นำขวดที่วัดกรดไขมันระเหยง่ายแล้วกลับมาใช้อีก ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 จุดเก็บตัวอย่าง และความถี่ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของการทดลอง

พารามิเตอร์	จุดเก็บตัวอย่าง	ความถี่ในการวิเคราะห์
1. ของแข็งทั้งหมด (TS)	ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์	1 ครั้งก่อนการทดลอง
2. ของแข็งระเหย (VS)	ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์	1 ครั้งก่อนการทดลอง
3. การหาปริมาณลิกนิน	ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์	1 ครั้งก่อนการทดลอง
4. การหาปริมาณเซลลูโลส	ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์	1 ครั้งก่อนการทดลอง
5. ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน	ขวดเก็บก๊าซ	1 ครั้ง/ สัปดาห์
6. ปริมาณก๊าซชีวภาพ	ขวดเก็บก๊าซ	ทุกวัน
7. กรดไขมันระเหยง่าย (VFA)	ขวดเก็บกรด	ทุกๆ 3 วัน
8. pH	ขวดเก็บกรด	ทุกๆ 3 วัน

3.5.2 ขั้นตอนในการหาปริมาณการผลิตก๊าซมีเทน

1. ใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ (Seed) จากบริษัท เสริมสุข จำกัด (มหาชน) โดยทำการปรับสภาพ (acclimate) หัวเชื้อจุลินทรีย์ให้คุ้นเคยกับอาหารโดยการใส่น้ำผลไม้รวมลงไปปรับปริมาตรร้อยละ 20 ต่อปริมาตรน้ำตัวอย่าง ลงในขวดเซรัมส์ซิชาขนาด 100 มิลลิลิตรที่ใส่ตัวอย่างแล้ว
2. ทำการปั่นตัวอย่างเศษขยะผลไม้จำนวน 8 ชนิดให้ละเอียด (แสดงในตารางที่ 3.9) นำมาตัวอย่างละ 10 กรัม (ใช้ตัวอย่างละ 3 ซ้ำ พร้อมทั้งทำ Blank อีก 3 ซ้ำ) มาใส่ลงในขวดเซรัมส์ซิชาที่เตรียมไว้
3. เติมสารอาหารพร้อมทั้งทำการปรับพีเอชให้อยู่ในช่วง 7.0-7.2 (ชนิดและปริมาณสารอาหารอ้างอิงดังตารางที่ ตารางที่ 3.6)
4. เติมปริมาณหัวเชื้อและสารอาหารใส่ในขวดเซรัมส์ซิชา ให้มีปริมาณรวมของตัวอย่างหัวเชื้อจุลินทรีย์และสารอาหารประมาณ 60 มิลลิลิตร
5. ทำการไล่ก๊าซออกซิเจนออกให้หมดโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่อัตราส่วน 70:30 (Owen และคณะ, 1979) ใช้เวลาประมาณ 30 วินาที
6. ทำการทดลองตามข้อ 1 – 5 โดยไม่ต้องใส่เศษขยะผลไม้ เพื่อให้เป็น Blank
7. ปิดฝาขวดให้สนิทด้วยฝายางและครอบด้วยฝาลูมิเนียมให้สนิทเพื่อป้องกันอากาศเข้าไปโดยต้องมีช่องเจาะสำหรับวัดก๊าซ
8. นำขวดเซรัมส์ซิชาไปวางไว้บนเครื่องเขย่า และนำออกมาวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นทุกๆ วันเป็นเวลา 30 วัน ด้วยวิธีการวัดปริมาณแทนที่น้ำ จนกระทั่งไม่มีก๊าซเกิดขึ้น และวัดกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) 3 วัน/1 ครั้ง
9. บันทึกข้อมูลของปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น (เป็นปริมาณสะสม) กับเวลา (บันทึกเป็นชั่วโมงสะสม) โดยจะนำค่าปริมาณก๊าซนี้เกิดขึ้นในแต่ละครั้งมาเขียนกราฟ แสดงปริมาณก๊าซสะสมตามระยะเวลา
10. ในระหว่างขั้นตอนการวัดปริมาณก๊าซ ให้ทำการเก็บตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้นในขวดเซรัมส์ซิชาไปวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์มีเทน ด้วยวิธี Gas Chromatography (GC) โดยจะทำการสุ่มตรวจวัดตัวอย่างที่มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุด ซึ่งช่วงเวลาในการเก็บตัวอย่างจะทำการเลือกโดยอ้างอิงจากการตรวจวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH) และวัดความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (ORP) ของระบบให้อยู่ในช่วงที่คาดว่าจะเกิดการผลิตก๊าซมีเทน จากนั้นนำค่าการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมจากการทดลองเปรียบเทียบกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากการคำนวณตามสมการ

ส้ม



กล้วย



สับปะรด



มะม่วง



ส้มโอ



ฝรั่ง



แตงโม



แตงไทย



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เศษขยะผลไม้



10 กรัมเปียก ต่อ 1 ชุดการทดลอง

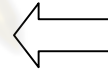


เติมลงขวดเซรัมส์สีขาขนาด 100 มิลลิลิตร

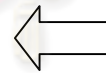
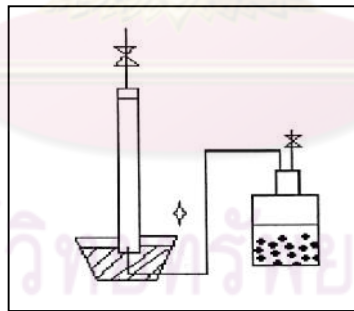


หัวเชื้อจุลินทรีย์จากโรงงานของบริษัทเสริมสุข (จำกัด)
มหาชน
ที่ทำการปรับสภาพแล้ว 12 มิลลิลิตร

ไต่ O₂ ออกจากขวดด้วย
CO₂:O₂ (70:30)



เติมสารอาหาร
38 มิลลิลิตร+ปรับ pH
7.0-7.2



วัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น
ทุกวันเป็นเวลา 30 วัน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลอง

หลังจากที่ทำการทดลองหาปริมาณการผลิตก๊าซมีเทน และทำการวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ แล้ว จะหาความสัมพันธ์ของการเกิดก๊าซชีวภาพและค่าพารามิเตอร์ของการทดลองนี้เพื่อการพยากรณ์โดยจะใช้หลักทางสถิติแบบสมการถดถอยพหุคูณและสหสัมพันธ์ (Multiple Regression and Correlation) เป็นการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระมากกว่า 1 ตัว และตัวแปรตาม 1 ตัว ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถสรุปได้เป็นความสัมพันธ์ อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง และสามารถอธิบายและเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ว่าตัวแปรใดมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลง Y มากที่สุด สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบความสัมพันธ์ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k$$

เมื่อ

Y = ตัวแปรตาม

X_1, X_2, X_k = ตัวแปรอิสระ

α = จุดตัดบนแกน Y

$\beta_1, \beta_2, \beta_k$ = Regression Coefficient

พิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระต่างๆ 5 ตัวแปร คือ ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้น, เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด (%TS), เปอร์เซ็นต์ของแข็งระเหยง่าย (%VS) ปริมาณลิกนิน และปริมาณเซลลูโลส กับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ดังในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ตัวแปรต่างๆของการทดลอง

ตัวแปรอิสระ (X_i)	ตัวแปรตาม (Y)
กรดไขมันระเหยง่าย (X_1)	ก๊าซชีวภาพ
เปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมด (X_2)	
เปอร์เซ็นต์ของแข็งระเหยง่าย (X_3)	
ปริมาณลิกนิน (X_4)	
ปริมาณเซลลูโลส (X_5)	

3.6.1 การพิจารณาความเหมาะสมของตัวแบบหรือสมการถดถอย (ศิริชัย พงษ์วิชัย, 2548)

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ R^2

จะไม่แตกต่างกันกับตัวแบบของสมการเส้นตรงอย่างสำหรับ R^2 ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$R^2 = SSR / SST = r^2$$

เมื่อ SSR เป็นค่าผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อนจากการถดถอย

SST เป็นค่าผลบวกกำลังสองของค่าความแปรปรวนทั้งหมด

แต่จะแตกต่างกันสำหรับ R^2 ที่ปรับแก้แล้วเป็นดังนี้

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \frac{[n-1]}{[n-m-1]}$$

การนำสัมประสิทธิ์การตัดสินใจค่า R^2 ของตัวแบบสมการถดถอยแบบเส้นตรงพหุคูณไปใช้ ถ้า R^2 ที่ได้มีค่าสูงซึ่งแสดงว่าสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามได้ดี แต่จะต้องคำนึงด้วยว่าการจะได้ตัวแปรแต่ละตัวมีค่าใช้จ่ายสูงหรือไม่ เพราะโดยความเป็นจริงแล้วการเพิ่มตัวแปรอิสระเพิ่มมากขึ้น ค่า R^2 ก็จะสูงขึ้นมากเสมอ ดังนั้นในการพิจารณาจึงควรที่จะพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับปรุงแล้ว (Adjust R^2)

เมื่อ n เป็นจำนวนตัวอย่างทั้งหมด

m เป็นจำนวนตัวแปรทั้งหมด

3.6.2 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (β)

เป็นการตรวจสอบว่าตัวแปรอิสระแต่ละตัว (X_j) ที่นำมาใช้ในตัวแบบสามารถนำมาใช้พยากรณ์ตัวแปรตามได้หรือไม่โดยพิจารณาจากสมการความแปรปรวน ดังนี้คือ

$$SST = SSE + SSR$$

เมื่อ SSE เป็นค่าผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อนจากแหล่งที่อธิบายไม่ได้

1) การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย ของตัวแปรอิสระทุกตัวพร้อมๆกันโดยกำหนดสมมติฐานดังนี้

$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ หรือตัวแปรอิสระทุกตัวไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

$H_1: \beta_1 \neq 0$ อย่างน้อย 1 ตัวหรือมีอย่างน้อย 1 ตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม

ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ F-test หรือเรียกว่า Overall F-test เป็นตัวสถิติที่ใช้ในการทดสอบ

๑^๒



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หิวเพื่อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปร	ค่า
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเปียก)	5
ปริมาณของแข็งระเหย (เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง)	90
ปริมาณความชื้น (เปอร์เซ็นต์)	95
ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	110,000
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	7.0
ความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน	-420.50

4.2 เศษขยะผลไม้ที่ใช้ในการทดลอง

4.2.1 องค์ประกอบของเศษขยะผลไม้จากตลาดผลไม้

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาขยะจากตลาดขายส่งสี่มุมเมืองเป็นกรณีศึกษา ภายในตลาดแห่งนี้แบ่งเป็นโซนขายส่ง 3 ส่วนหลักคือ ตลาดขายส่งผัก ตลาดขายส่งผลไม้ และตลาดขายส่งดอกไม้ ซึ่งผักที่เหลือจากการขายจะมีการรับซื้อเพื่อนำไปใช้ประโยชน์เป็นอาหารสำหรับเลี้ยงสัตว์ ในการศึกษาได้เลือกตลาดขายส่งผลไม้ที่มีปริมาณขยะเกิดขึ้นในแต่ละวันเป็นจำนวนมาก พบว่ามีลักษณะของขยะที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.2 เศษขยะผลไม้ที่นำไปทิ้งส่วนใหญ่เป็นผลไม้ที่เน่าเสียจากการขายไม่ทันเหลือทิ้งทั้งลูก หรือเป็นจำพวกเปลือก แกน หรือส่วนที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ของผลไม้ที่เหลือทิ้งจากการตัดแต่ง กองทิ้งไว้แยกประเภทของผลไม้ หลังจากนั้นรถเก็บขยะประจำตลาดขายส่งสี่มุมเมืองจะนำไปเทกองรวมไว้กับขยะประเภทอื่นๆ

การเลือกตัวอย่างเศษขยะผลไม้ที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ จากผลไม้ที่มีผลผลิตทั้งปี และมีปริมาณเป็นจำนวนมาก คือ มะม่วง สับปะรด แตงไทย แตงโม ส้ม ส้มโอ ฝรั่ง และกล้วย นำไปบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่น และทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางชีวภาพ และสมบัติทางเคมี แสดงดังตารางที่ 4.2 - 4.4 พร้อมทั้งวิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ด้วยเครื่อง CHNS/O Analyzer (Perkin Elmer PE2400 Series II) โดยส่งตัวอย่างเศษขยะผลไม้ไปวิเคราะห์ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเศษขยะผลไม้จำนวน 8 ชนิด

ลำดับ	ชนิด	ปริมาณของแข็งทั้งหมด (% ของน้ำหนักเปียก)		ปริมาณความชื้น (%ของน้ำหนักเปียก)		จำนวน ตัวอย่าง
		ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วน เบี่ยงเบน มาตรฐาน	
1	มะม่วง	24.78	± 0.34	75.22	± 0.34	5
2	สับปะรด	15.47	± 0.24	84.53	± 0.24	5
3	แตงไทย	6.02	± 0.18	93.98	± 0.18	5
4	แตงโม	8.64	± 0.12	91.36	± 0.12	5
5	ส้ม	13.65	± 0.24	86.35	± 0.24	5
6	ส้มโอ	30.98	± 0.11	69.02	± 0.11	5
7	ฝรั่ง	11.50	± 0.31	88.50	± 0.31	5
8	กล้วย	21.17	± 0.58	78.83	± 0.58	5

ผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางกายภาพของเศษขยะผลไม้ 8 ชนิดที่นำมาจากตลาดขายส่งผลไม้สี่มุมเมืองที่ใช้ในการทดลองมีความแตกต่างกันตามชนิดของผลไม้ จากตารางที่ 4.2 พบว่า ปริมาณของแข็งรวมทั้งหมด (Total Solids) อยู่ในช่วง 6.02 - 30.98 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเปียก โดยส้มโอจะมีปริมาณของแข็งทั้งหมดมากที่สุดคือ 30.98 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเปียก และแตงไทยจะมีค่าของแข็งทั้งหมดน้อยที่สุดคือ 6.02 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักเปียก และปริมาณความชื้นหรือปริมาณน้ำที่เป็นองค์ประกอบหลักของเศษขยะผลไม้อยู่ในช่วง 69.02 - 93.98 เปอร์เซ็นต์ โดยที่แตงไทยมีค่าปริมาณความชื้นมากที่สุดคือ 93.98 เปอร์เซ็นต์ และส้มโอมีค่าปริมาณความชื้นน้อยที่สุดคือ 69.02 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติทางชีวภาพของเศษขยะผลไม้จำนวน 8 ชนิด

ลำดับ	ชนิด	ปริมาณของแข็งระเหย (% ของของแข็งทั้งหมด)		ปริมาณลิกนิน (% ของน้ำหนักแห้ง)		ปริมาณเซลลูโลส (% ของน้ำหนักแห้ง)		เถ้า (กรัม)		BVS* (% ของน้ำหนักแห้ง)		RVS** (% ของน้ำหนักแห้ง)		จำนวนตัวอย่าง
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
1	มะม่วง	24.41	± 0.24	3.06	± 0.44	9.07	± 0.34	0.24	± 0.02	74.43	± 0.44	25.33	± 0.44	5
2	สับปะรด	15.22	± 0.72	3.21	± 0.12	20.28	± 0.45	0.36	± 0.22	74.01	± 0.12	25.63	± 0.12	5
3	แตงไทย	5.91	± 0.03	4.45	± 0.63	21.13	± 0.69	0.22	± 0.10	70.54	± 0.63	29.24	± 0.63	5
4	แตงโม	8.15	± 0.98	9.09	± 0.84	31.2	± 0.78	0.41	± 0.42	57.55	± 0.84	42.04	± 0.84	5
5	ส้ม	13.42	± 1.79	2.67	± 0.97	18.48	± 0.88	0.39	± 0.33	75.52	± 0.97	24.09	± 0.97	5
6	ส้มโอ	29.74	± 1.38	13.98	± 0.33	20.91	± 0.45	1.25	± 0.29	43.86	± 0.33	54.89	± 0.33	5
7	ฝรั่ง	11.16	± 0.82	2.62	± 0.15	29.98	± 0.20	0.21	± 0.25	75.66	± 0.15	24.13	± 0.15	5
8	กล้วย	20.10	± 0.37	7.45	± 0.86	11.37	± 0.27	0.78	± 0.78	62.14	± 0.86	37.08	± 0.86	5

* ของแข็งระเหยย่อยง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Biodegradable Volatile Solids, biodegradable fraction, BVS) Biodegradable fraction = 0.83 – 0.028(Lignin Content) (Kayhanian, 1994)

**ของแข็งระเหยย่อยยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Refractory Volatile Solids, RVS)

จากตารางที่ 4.3 มีการแสดงค่าลักษณะสมบัติทางชีวภาพของเศษขยะผลไม้จำนวน 8 ชนิด พบว่า ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solids) คือของแข็งที่ระเหยไปเมื่อเผาไปในอากาศที่อุณหภูมิ 815 ± 10 องศาเซลเซียส ผลการวิเคราะห์ของแข็งระเหยในเศษขยะผลไม้ไม่มีค่าอยู่ในช่วง 5.91-29.47 เปอร์เซ็นต์ของของแข็งทั้งหมด หรือเมื่อคิดเป็นปริมาณของแข็งระเหยได้ มีค่าพิสัย 93.65-98.38 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง โดยสับปะรดมีปริมาณของแข็งระเหยได้สูงที่สุด เท่ากับ 98.38 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง และส้มโอมีปริมาณของแข็งระเหยมากที่สุด 29.47 เปอร์เซ็นต์เมื่อคิดต่อปริมาณของแข็งทั้งหมด (คิดเป็นปริมาณของแข็งที่ระเหยได้ 95.99 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง) และแตงไทยมีปริมาณของแข็งระเหยน้อยที่สุดคือ 5.91 เปอร์เซ็นต์ของของแข็งทั้งหมด ทั้งหมด (คิดเป็นปริมาณของแข็งที่ระเหยได้ 93.78 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง)

ปริมาณลิกนินและเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญในผลไม้ เศษขยะผลไม้ในการทดลองที่มีปริมาณลิกนินมากที่สุดคือ ส้มโอ มีค่า 13.98 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง เศษขยะผลไม้ที่มีปริมาณลิกนินเป็นองค์ประกอบน้อยที่สุดคือ ฝรั่งมีค่า 2.62 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ปริมาณเซลลูโลสในเศษขยะผลไม้มากที่สุดคือแตงโม มีค่า 31.20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง และมะม่วงมีค่าน้อยที่สุดคือ 9.07 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ในผลไม้มีลิกนินและเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสูง ซึ่งเป็นผลทำให้อัตราการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในช่วงแรกของการทำปฏิกิริยาช้าลง เนื่องจากโครงสร้างของลิกนินและเซลลูโลสมีการยึดจับกันด้วยพันธะที่แข็งแรงเป็นพอลิเมอร์สายยาว การย่อยสลายจะเกิดในช่วงหลังซึ่งต้องใช้เวลาในการย่อยสลายพันธะของพอลิเมอร์นาน (Chomsurin, 1997)

จากการศึกษาสามารถนำปริมาณลิกนินมาใช้ในการประมาณค่าปริมาณของแข็งระเหยที่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Biodegradable Volatile Solids, BVS) เพื่อสามารถผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งการย่อยสลายแบบไร้อากาศของสารอินทรีย์เพื่อให้เกิดก๊าซชีวภาพจะมีปริมาณมากหากค่า BVS มีค่าสูง และส่วนที่ย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Refractory Volatile Solids, RVS) ต้องใช้เวลามากกว่าในการย่อยสลาย จากการทดลองวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยที่ย่อยสลายได้ง่าย (BVS) มีค่าพิสัย 43.86-75.66 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มปริมาณของแข็งระเหยที่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (BVS) ที่มีค่าสูงกว่า 74 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ ฝรั่ง ส้ม มะม่วง และสับปะรด โดยที่ฝรั่งมีค่าปริมาณของแข็งระเหยที่ย่อยสลายได้ง่ายสูงที่สุด คือ 75.66 ± 0.15 และส้มโอ มีค่าปริมาณของแข็งระเหยที่ย่อยสลายได้ง่ายน้อยที่สุด เท่ากับ 43.86 ± 0.33 โดยที่มะม่วง สับปะรด แตงไทย

แตงโม ส้ม ฝรั่ง กล้วย มีค่าปริมาณของแข็งระเหยที่ย่อยสลายได้ง่ายสูงกว่าปริมาณของแข็งระเหยที่ย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งแสดงแนวโน้มว่าเศษขยะผลไม้ข้างต้นถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศได้ดีกว่าส้มโอที่มีปริมาณของแข็งระเหยที่ย่อยสลายได้ยากสูงกว่าปริมาณของแข็งระเหยที่ย่อยสลายได้ง่าย

ตารางที่ 4.4 ลักษณะสมบัติทางเคมีของเศษขยะผลไม้จำนวน 8 ชนิด

ลำดับ	ชนิด	ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ความเป็นกรด-ด่าง		จำนวนตัวอย่าง
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	
1	มะม่วง	331,200	± 112	3.6	± 0.01	5
2	สับปะรด	96,000	± 57	4.1	± 0.03	5
3	แตงไทย	78,336	± 135	4.2	± 0.03	5
4	แตงโม	105,200	± 30	5.3	± 0.02	5
5	ส้ม	150,800	± 110	4.2	± 0.03	5
6	ส้มโอ	140,928	± 90	4.5	± 0.04	5
7	ฝรั่ง	92,000	± 88	4.2	± 0.02	5
8	กล้วย	348,960	± 121	4.8	± 0.01	5

จากตารางที่ 4.4 ลักษณะสมบัติทางเคมีของเศษขยะผลไม้จำนวน 8 ชนิด พบว่าตัวอย่างทั้งหมดมีค่าความเป็นกรดสูง โดยมะม่วงมีค่าความเป็นกรดสูงสุด คือ 3.6 และแตงโมมีสภาพความเป็นกรดน้อยที่สุดคือ 5.3 ซึ่งความเป็นกรด-ด่างเป็นค่าตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมการทำงาน

ของระบบ และเป็นตัวกำหนดสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ในระบบไร้อากาศ การเกิดเมทาโนเจนค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบควรจะอยู่ในช่วง 6.5 - 8.2 (Speece, 1996) ปริมาณซีโอดีจากการการศึกษามีค่าช่วง 78,336-348,960 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยแต่ไทยมีค่าปริมาณซีโอดีน้อยที่สุดเท่ากับ 78,336 มิลลิกรัมต่อลิตร และจะมีมากที่สุดในกล้วย 348,960 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณซีโอดีเป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการประมาณก๊าซมีเทนจากจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศเนื่องจากปริมาณดังกล่าวบอกถึงปริมาณสารอาหารอินทรีย์ที่จุลชีพนำมาใช้ในการดำรงชีพได้ ตามทฤษฎีปริมาณสารอินทรีย์ที่นำมาหมักด้วยกระบวนการไร้อากาศ 1 กรัมซีโอดีจะสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน 0.395 ลิตรที่อุณหภูมิประมาณ 35 องศาเซลเซียส (Speece, 1996) อาจจะกล่าวได้ว่า ค่าปริมาณของแข็งระเหยที่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (BVS) จะมีค่าเท่าใดก็ตาม ตัวแปรที่สามารถบ่งบอกถึงศักยภาพที่แท้จริงในการผลิตก๊าซชีวภาพ ควรจะเป็นค่าซีโอดี เพราะอยู่ในสภาพของเหลวที่จุลชีพนำไปใช้ได้เร็วที่สุด

ตารางที่ 4.5 ลักษณะสมบัติทางเคมีของเศษขยะผลไม้จำนวน 8 ชนิด (ต่อ)

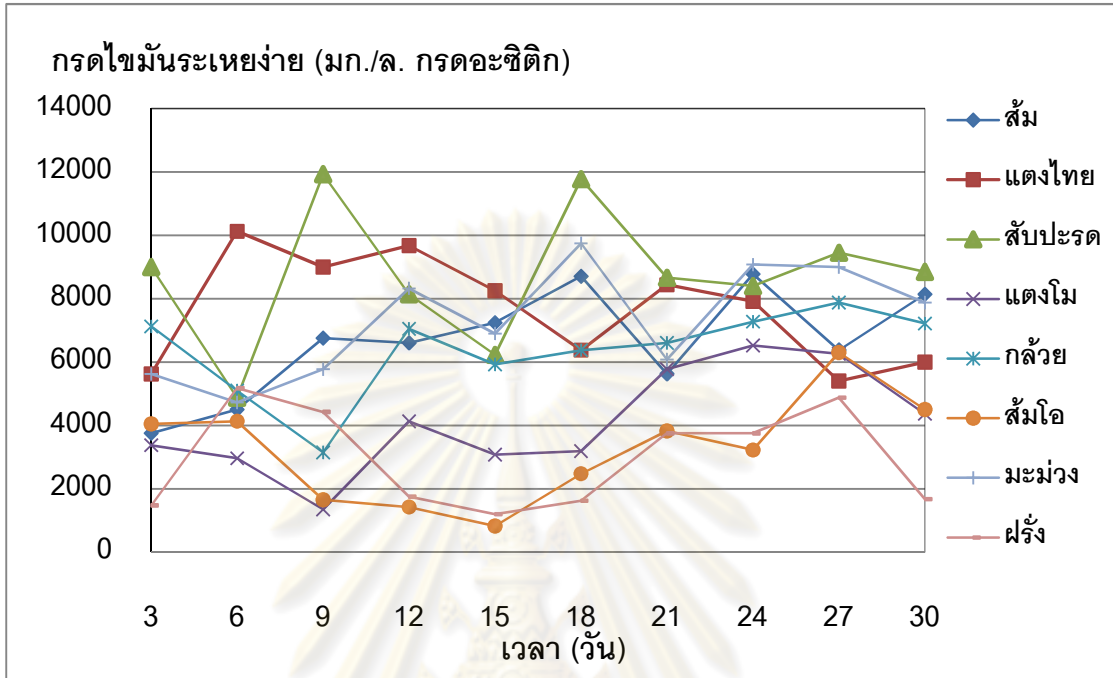
ลำดับ	ชนิด	คาร์บอน (%)	ไฮโดรเจน (%)	ออกซิเจน (%)	ไนโตรเจน (%)	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
1	มะม่วง	40.37	5.56	53.53	0.54	74.76
2	สับปะรด	40.43	6.52	59.12	0.93	43.47
3	แตงไทย	42.19	7.04	50.20	0.57	74.02
4	แตงโม	40.63	5.77	52.00	1.20	33.86
5	ส้ม	41.31	7.05	49.80	1.84	22.45
6	ส้มโอ	38.68	7.07	55.25	1.00	36.68
7	ฝรั่ง	42.02	7.17	49.75	1.06	39.64
8	กล้วย	41.31	5.51	51.28	1.90	21.74

ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีในเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ในตารางที่ 4.5 พบว่าส่วนใหญ่จะมีปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมากกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งในทุกชนิดของเศษขยะผลไม้โดยมีค่าอยู่ในช่วง 38.68 – 42.19 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งแต่ประเทศไทยมีปริมาณคาร์บอนมากที่สุดคือ 42.19 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง และลิมโอมิต้าน้อยที่สุดคือ 38.68 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ปริมาณไนโตรเจนในเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด มีค่าอยู่ในช่วง 0.54 - 1.90 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ในเปลือกกล้วยมีปริมาณไนโตรเจนมากที่สุดคือ 1.90 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง และมีน้อยที่สุดในมะม่วงคือ 0.54 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้ง ค่าปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 21.74 – 74.76 โดยที่มะม่วงมีปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจนมากที่สุดคือ 74.76 และกล้วยมีค่าน้อยที่สุดคือ 21.74 นอกจากคาร์บอนซึ่งเป็นอาหารหลักแล้วแบคทีเรียจำพวกไม่ต้องการออกซิเจน (anaerobic bacteria) มีความต้องการอาหารเสริม (nutrient) จำพวกไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และสารอาหารอื่นๆ ที่ช่วยในการเจริญเติบโต ปริมาณของคาร์บอน ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ต้องการในระบบน้ำเสียไร้อากาศคิดเป็นสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสมีค่าเท่ากับ 100:1:0.2 (Metcalf และ Eddy, 2003) ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่มีของแข็งในปริมาณสูง (ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร หรือสูงกว่า) สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีค่าอยู่ในช่วง 20-30

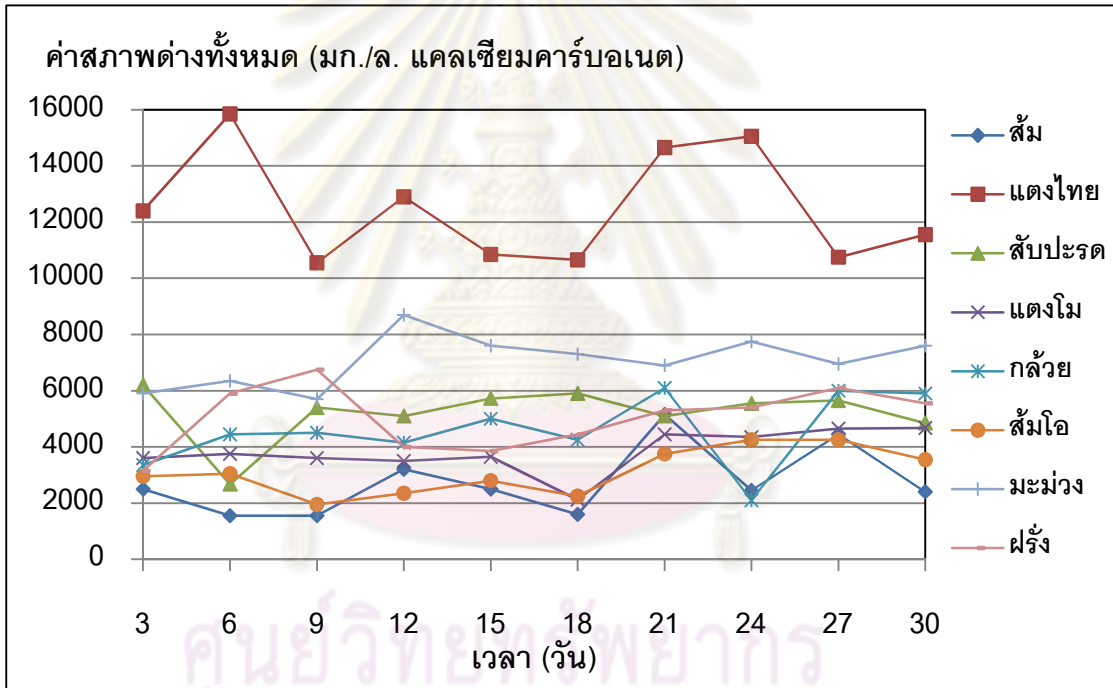
4.3 กรดไขมันระเหยง่าย

กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ กรดไขมันระเหยเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเป็นอย่างมาก ซึ่งกรดไขมันระเหยเป็นผลิตภัณฑ์จากการหมัก เช่น กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก และกรดบิวทีริก ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด จากการศึกษาของ Harjarnis และคณะ (1994) พบว่าผลกระทบของความเป็นพิษของกรดไพรูวอิกที่มีผลต่อแบคทีเรียผลิตมีเทน เมื่อกรดไพรูวอิกมีค่า 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ยับยั้งการเกิดการผลิตก๊าซมีเทน 22-38 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเป็นกรด-ด่างอยู่ในสภาพความเป็นกลาง และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง การยับยั้งแบคทีเรียผลิตมีเทนจะรุนแรงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

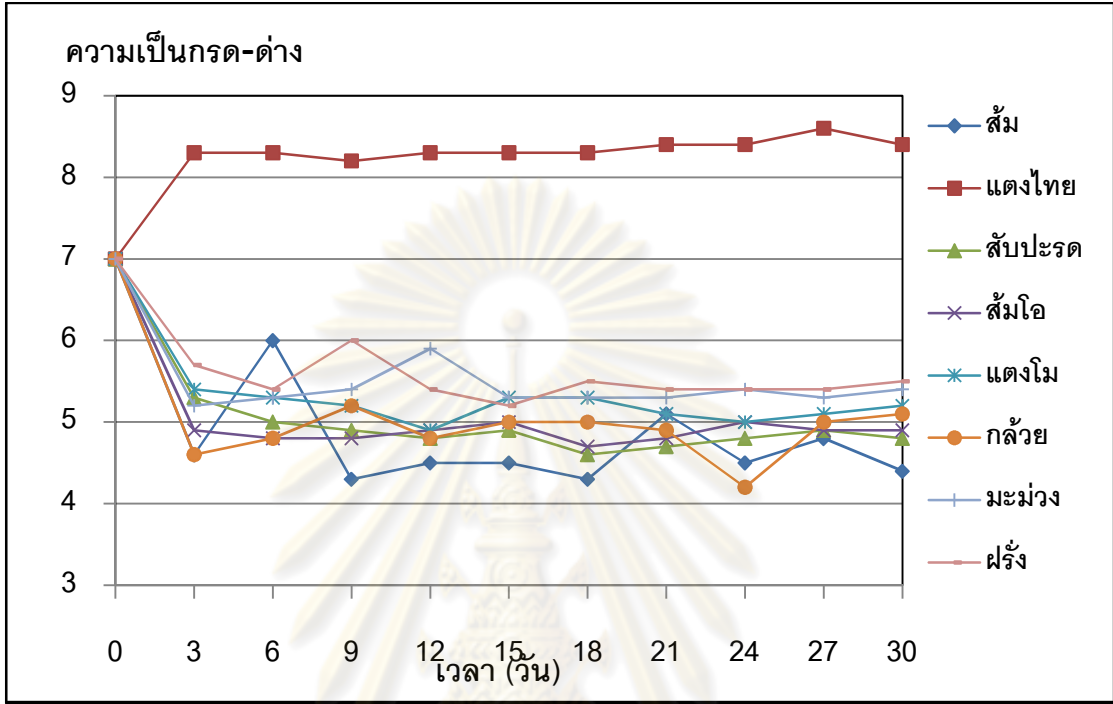
กรดไขมันระเหยง่ายที่สำคัญที่สุดคือ กรดอะซิติก เพราะในกระบวนการสร้างก๊าซมีเทนจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของกรดอะซิติก (Acetoclastic) เป็นปฏิกิริยาหลัก ในระบบที่ทำงานได้ดี อัตราการผลิต และอัตราการใช้กรดไขมันระเหยง่ายต้องสมดุลกัน มิฉะนั้นจะเกิดการยับยั้งการ



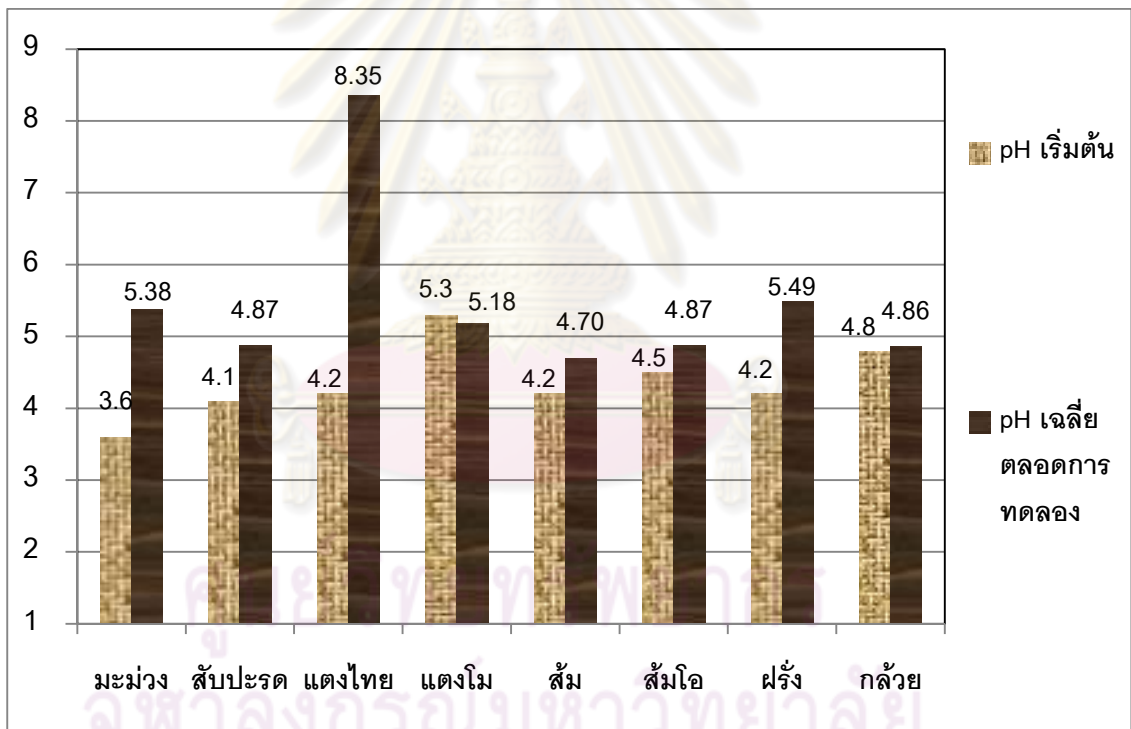
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

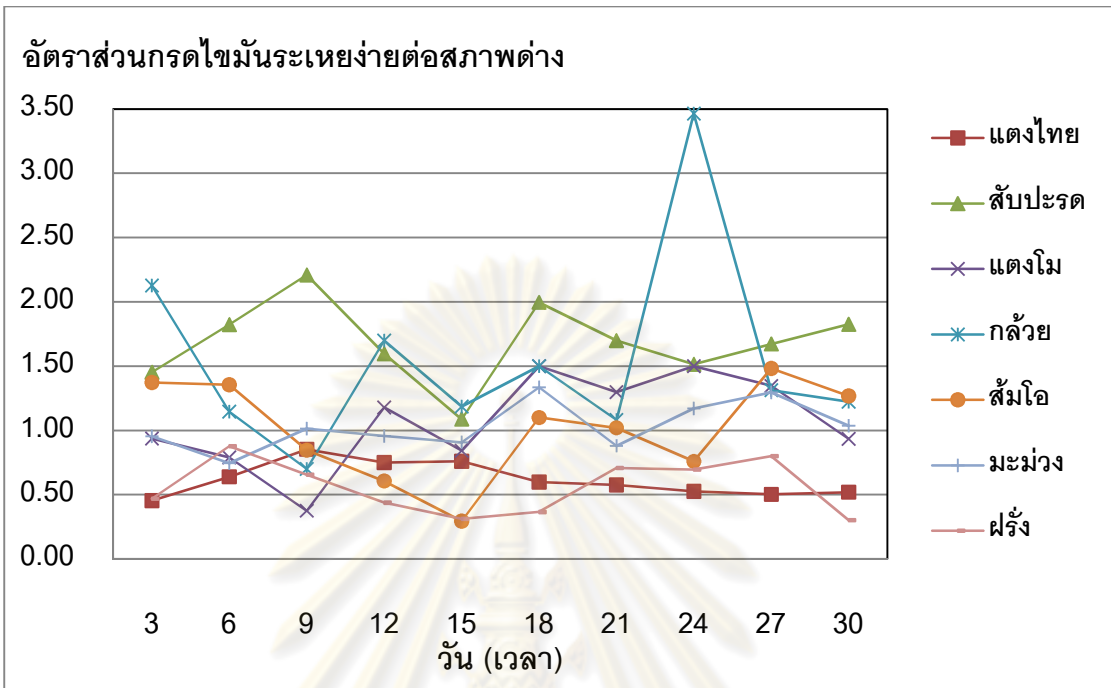


ศูนย์วิทยาศาสตร์สุขภาพ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

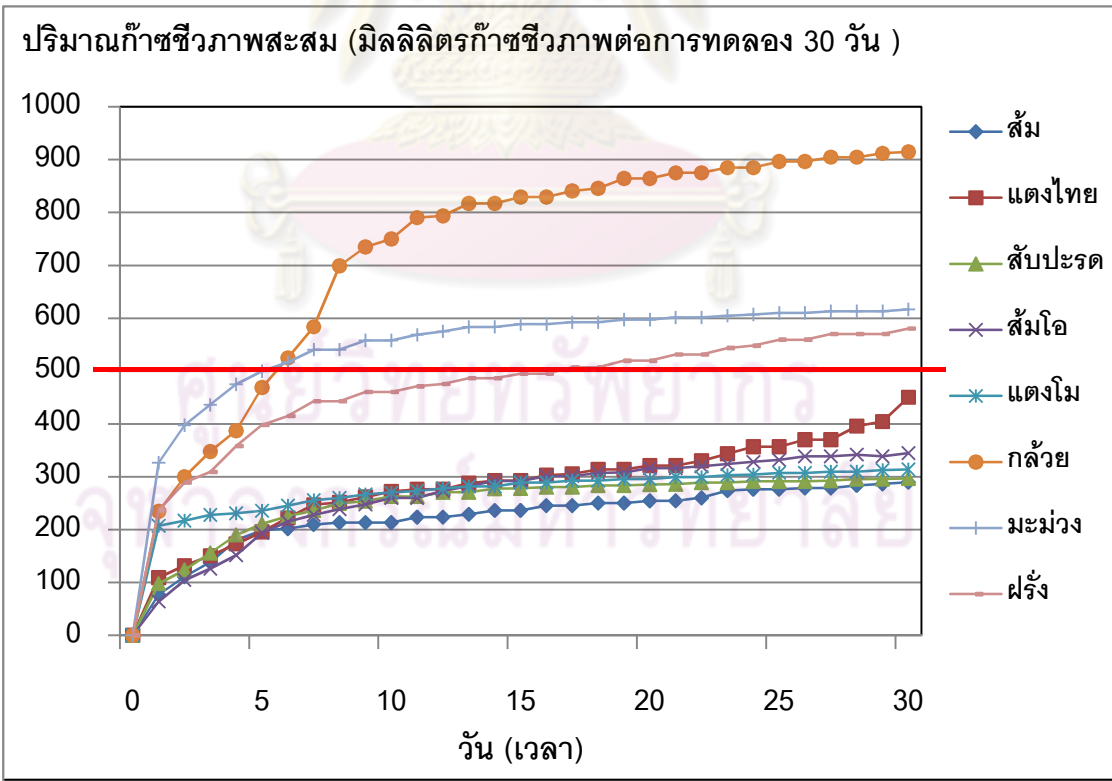




ในระบบไร่อากาศจะต้องมีการตรวจวัด กรดไขมันระเหยง่าย สภาพต่างและค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยระบบที่ดีควรจะมีค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมด น้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้าสัดส่วนนี้มีค่ามากขึ้นแสดงว่าระบบกำลังเสียสมดุล และถ้าสัดส่วนมีค่ามากกว่า 0.8 จะพบว่าสภาพความเป็นกรด-ด่างกำลังจะลดลงอย่างรวดเร็วหรืออาจลดลงไปแล้ว (มันสิน ตัณฑุลเวศน์, 2542) จากการทดลองพบว่า ค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดในระบบมีค่าพิสัย 0.45 – 5.44 ทำให้ภายในระบบไร่อากาศมีความไม่สมดุลเกิดขึ้น และอาจเกิดการยับยั้ง (inhibit) ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน โดยทั้งนี้อาจเนื่องจากคุณสมบัติของเศษขยะผลไม้มีค่าความเป็นกรดค่อนข้างสูง และตัวอย่างเศษขยะผลไม้ที่ใช้มีสภาพละเอียด แฉกที่เรียในระบบสามารถย่อยสลายเศษขยะผลไม้ได้ง่าย ทำให้เศษขยะผลไม้มีการแปรสภาพเป็นกรดในเวลาอันรวดเร็ว ส่งผลให้ในระบบเกิดกรดไขมันระเหยง่ายปริมาณมาก สภาพต่างจึงลดลงอย่างรวดเร็วเป็นผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน ซึ่งอาจจะเกิดจากปรับบัฟเฟอร์ให้แก่ระบบไม่เพียงพอ

จากรูป 4.7 และ 4.8 พบว่าเศษขยะผลไม้ คือ แดงไทย สับปะรด แดงโม กัลย ส้มโอ มะม่วง และฝรั่ง มีค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างในช่วงที่ทำการการทดลองไม่เกิน 2.30 ยกเว้นกัลยมีค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างสูงในวันที่ 21 มีค่าสูงถึง 3.46 โดยที่ส้มมีค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างในการทดลองสูงมาก โดยในวันที่ 18 มีค่าสูงที่สุดถึง 5.44 ซึ่งสอดคล้องกับค่าสภาพต่างทั้งหมดของส้มที่มีค่าไม่เพียงพอที่จะสะเทินกรดที่เกิดภายในระบบของส้มได้ ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถทำงานได้ ทำให้ผลวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพไม่พบค่ามีเทนตั้งแต่วันที่ 21 ของการทดลองเป็นต้นไปดังที่จะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 4.5.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

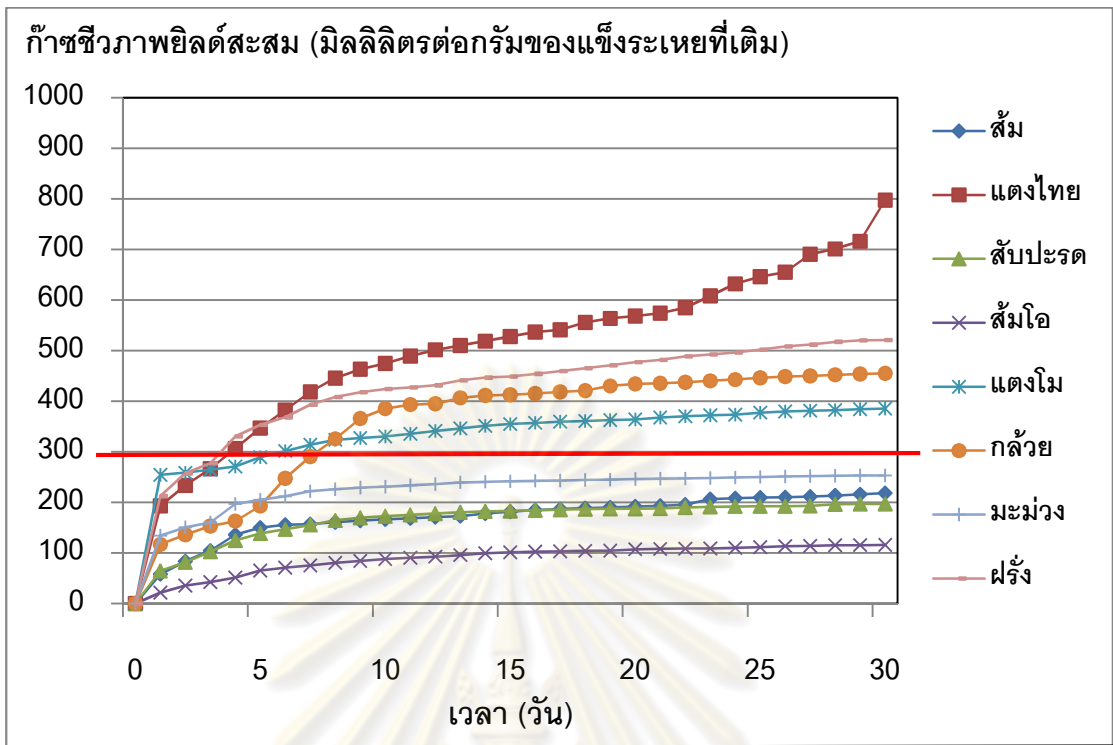


ในช่วง 5 วันแรกของการทดลองจะมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นสูงมาก และจะลดลงจนถึงวันที่ 14 ของการทดลอง จากนั้นจะเกิดก๊าซน้อยลงมากกระทั่งสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 30 ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งเป็นก๊าซที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรด (acidogenesis) และการสะสมของกรดไขมันระเหยภายในขวดเซรัมทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างภายในขวดเซรัมลดต่ำลง ทำให้จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนทำงานได้ไม่ดี เมื่อปริมาณจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนมีไม่เพียงพอต่อการใช้ผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการสร้างกรด (กรดไขมันระเหยชนิดต่างๆ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน) ที่สะสมอยู่ในขวดเซรัม ทำให้กรดไขมันระเหยที่ถูกเปลี่ยนจากสารอินทรีย์ในขั้นตอนการสร้างกรด แปรสภาพกลายเป็นกรดไขมันระเหยชนิดที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม เช่น กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก (Valdez-Vazquez และ Poggi-Valardo, 2009) ซึ่งกรดไขมันระเหยเหล่านี้จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้ นอกจากนี้จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนยังลดจำนวนลงไปในสภาพกรดสูงอีกด้วย

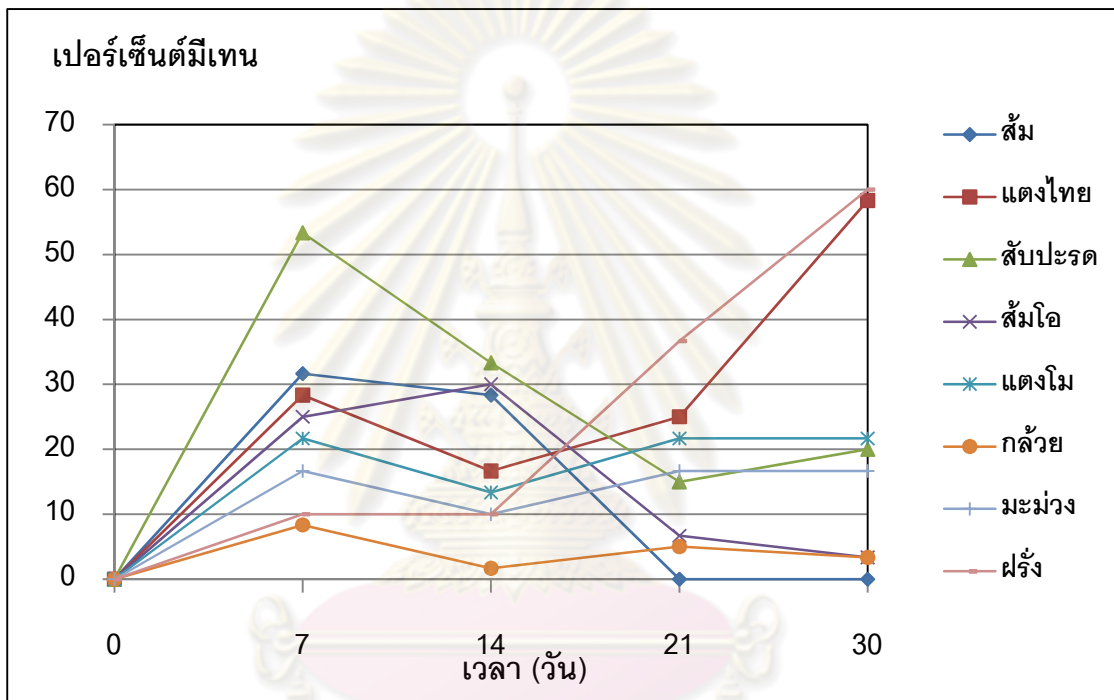
ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในการทดลองมีความสอดคล้องกับค่าซีไอดีบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ของปริมาณสารอาหารในรูปซีไอดีกับการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นก๊าซ โดยกล้วยมีปริมาณซีไอดีสูงที่สุดรองลงมา คือ มะม่วง ซึ่งมีศักยภาพทำให้เกิดปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุด อย่างไรก็ตามอาจจะเกิดผลเสียต่อระบบได้ กล่าวคือจุลชีพย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปกรดไม่ทันทำให้เกิดกรดไขมันระเหยง่ายสะสมในระบบมากจนค่าสภาพต่างทั้งหมดในระบบไม่เพียงพอสำหรับการป้องกันความเป็นกรด-ด่างของระบบที่จะลดลงอย่างรวดเร็ว (pH drop) ส่งผลต่อการยับยั้งการเกิดปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด

เมื่อทำการเปลี่ยนหน่วยเพื่อหาประสิทธิภาพของปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพกับเนื้อเศษขยะผลไม้ที่แท้จริง ในหน่วยมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เติม พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมได้มีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.10

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

21.67 โดยปริมาตร มะม่วง ร้อยละ 16.67 โดยปริมาตร ฝรั่ง ร้อยละ 10.00 โดยปริมาตร และกล้วย ร้อยละ 8.34 โดยปริมาตรตามลำดับ ภายในระบบของตัวอย่างยังคงมีสภาพความเป็นกรดคือมีค่าความเป็นกรด-ต่างอยู่ในช่วง 4.6-5.7 ยกเว้นแตงไทยที่มีค่าความเป็นกรด-ต่าง เท่ากับ 8.2

ในวันที่ 14 ทำการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ผลอีกครั้งพบว่า สับปะรดยังคงมีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นมากที่สุดร้อยละ 33.34 โดยปริมาตร อาจสันนิษฐานได้ว่าเกี่ยวข้องกับปริมาณเนื้อและน้ำของเศษขยะผลไม้ของตัวอย่างที่ใช้ เศษขยะผลไม้ที่มีปริมาณก๊าซมีเทนรองลงมาคือ ส้มโอ เกิดก๊าซมีเทนร้อยละ 30.01 โดยปริมาตร เป็นผลเนื่องมาจากกรดไขมันระเหยง่ายเกิดขึ้นน้อยกว่าค่าสภาพต่างในระบบของส้มโอทำให้มีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพต่างมีค่าที่เหมาะสมเท่ากับ 0.29 ทำให้จุลชีพสามารถสร้างก๊าซมีเทนเกิดขึ้นได้ดี โดยที่ส้มเกิดก๊าซมีเทน ร้อยละ 28.34 โดยปริมาตร แตงไทย ร้อยละ 16.67 โดยปริมาตร แตงโม ร้อยละ 13.34 โดยปริมาตร มะม่วงและฝรั่งมีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นเท่ากับ ร้อยละ 10.00 โดยปริมาตร และกล้วยมีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นน้อยที่สุด (ร้อยละ 1.67 โดยปริมาตร)

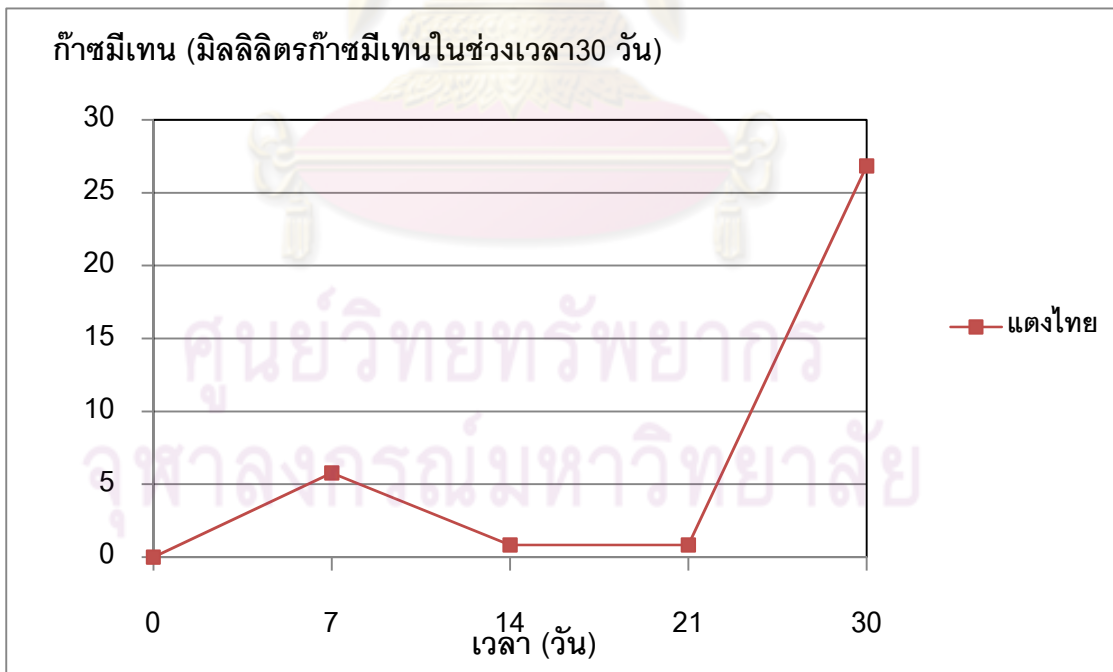
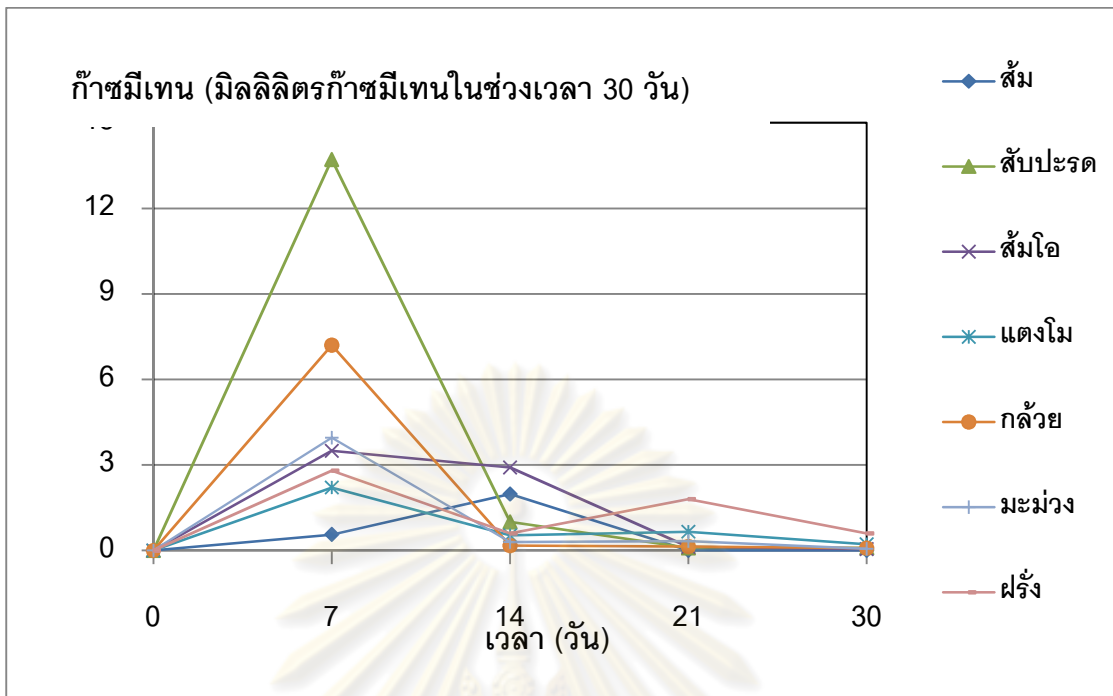
ส่วนผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นก๊าซมีเทนในวันที่ 21 ของการทดลองปรากฏว่าไม่พบก๊าซมีเทนในตัวอย่างก๊าซชีวภาพจากส้มซึ่งสอดคล้องกับค่าความเป็นกรด-ต่างในระบบมีค่าเท่ากับ 5.1 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่างมีค่าเท่ากับ 1.09 จึงมีความเป็นไปได้ที่จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนถูกยับยั้งการทำงาน และ/หรือตายในช่วงเวลาดังกล่าว เนื่องจากสภาพแวดล้อมในขวดเซรั่มไม่เหมาะสม ทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการสร้างกรด และพบว่าฝรั่งมีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นมากที่สุดร้อยละ 36.67 โดยปริมาตร รองลงมาคือ แตงไทย (ร้อยละ 25.01 โดยปริมาตร) ซึ่งสอดคล้องกับอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อค่าสภาพต่างที่ฝรั่งมีค่าเท่ากับ 0.71 และแตงไทยมีค่าเท่ากับ 0.58 โดยที่แตงโมเกิดก๊าซมีเทนร้อยละ 21.67 โดยปริมาตร มะม่วง เกิดก๊าซมีเทน ร้อยละ 16.67 โดยปริมาตร สับปะรดเกิดก๊าซมีเทนร้อยละ 15.00 โดยปริมาตร ส้มโอ เกิดก๊าซมีเทนร้อยละ 6.67 โดยปริมาตร และกล้วยมีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นน้อยที่สุด ร้อยละ 5.00 โดยปริมาตร

จากผลการวิเคราะห์สัดส่วนของมีเทนในก๊าซชีวภาพ ในวันที่ 30 ซึ่งเป็นวันสุดท้ายของการทดลองพบว่าส้มไม่มีปริมาณก๊าซมีเทนในตัวอย่างก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นเลย เนื่องจากส้มย่อยสลายในสภาพไร้อากาศได้ยาก เกิดกรดไขมันระเหยง่ายสะสมในระบบสูง ค่าสภาพต่างทั้งหมดและค่าความเป็นกรด-ต่างมีค่าลดลงตั้งแต่วันที่ 21 ของการทดลอง ส่วนฝรั่งและแตงไทยมีแนวโน้มการ

เกิดปริมาณก๊าซมีเทนสูงขึ้นจากการวัดปริมาณก๊าซมีเทนของในระบบที่ผ่านมา พบว่ามีปริมาณก๊าซมีเทนความเข้มข้นร้อยละ 60.01 และ 58.85 โดยปริมาตรตามลำดับ ซึ่งผลไม้ทั้งสองชนิดนี้ยังอยู่ในช่วงกระบวนการสร้างมีเทน (methanogenesis) ทั้งนี้ แดงไทย ยังมีค่าสภาพต่างที่สูงอยู่ที่ 11,550 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งแดงโม สับปะรด มะม่วง มีปริมาตรรองลงมา คือ ร้อยละ 21.67, 20.00, 16.67 โดยปริมาตร ซึ่งส้มโอและกล้วยมีปริมาณก๊าซมีเทนในตัวอย่างก๊าซชีวภาพน้อยที่สุดโดยมีปริมาณเท่ากันคือร้อยละ 3.33 โดยปริมาตร จะเห็นได้ว่ากล้วยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในการทดลอง 30 วัน มากที่สุดเมื่อวันเป็นในหน่วยปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นมิลลิลิตร แต่มีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นในระบบน้อยที่สุดโดยมีค่าพิสัยร้อยละ 1.67-8.34 โดยปริมาตร ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงในภาคผนวก ก

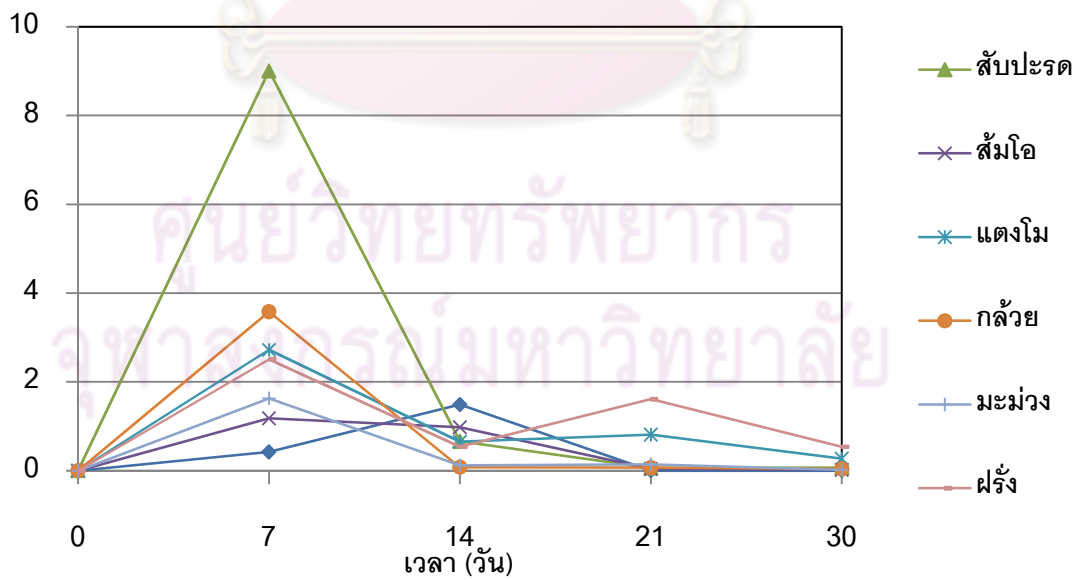
เมื่อทำการเปรียบเทียบสัดส่วนการเกิดก๊าซมีเทนสะสมในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการทดลองของเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิดพบว่าแดงไทย มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนหรือนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ดีโดยมีอัตราการผลิตมีเทนอยู่ในช่วงตั้งแต่ร้อยละ 10-60 โดยปริมาตร เทียบเท่ากับการเกิดก๊าซมีเทนสะสมของแดงไทยเท่ากับ 1.39-44.71 มิลลิกรัมต่อกรัมของแห้งระเหยที่เดิม (แสดงปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนมิลลิลิตรต่อกรัมของแห้งระเหยที่เดิมนรูปที่ 4.15)

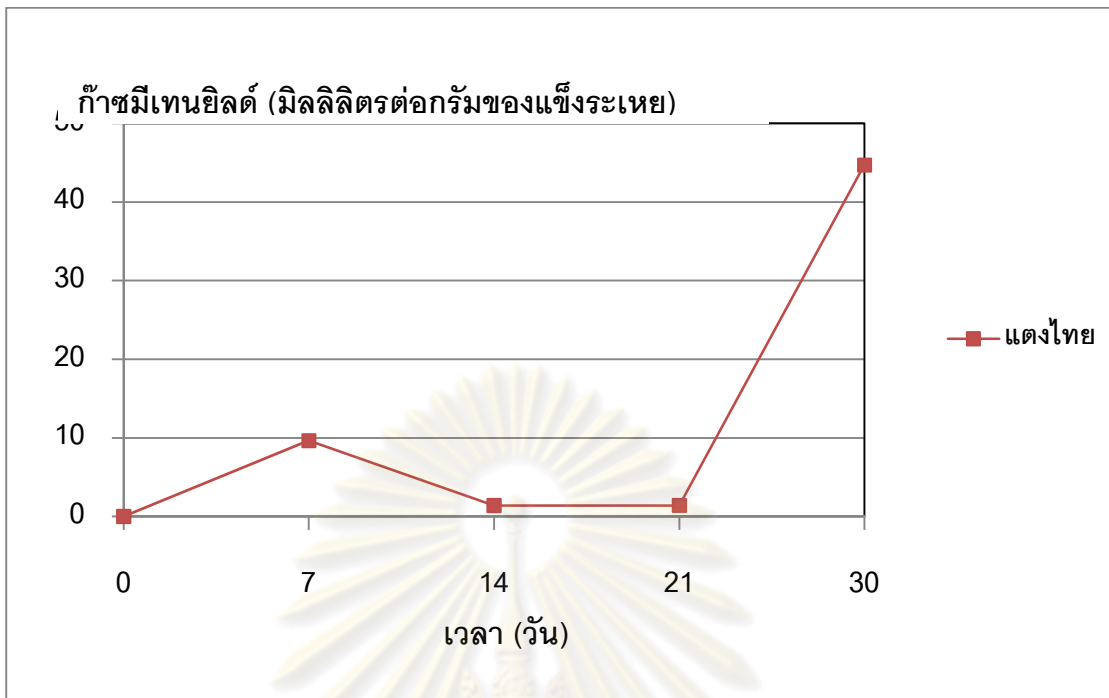
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ก๊าซมีเทนยิลด์ (มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย)

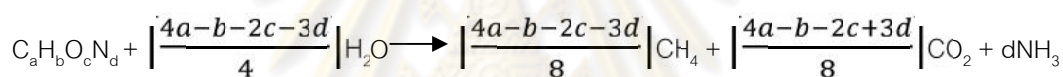
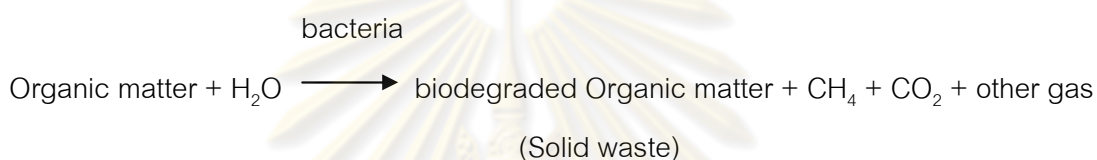




ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5.3 ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนจากการคำนวณ

Tchobanoglous และคณะ (2002) ทำการศึกษาปริมาณและองค์ประกอบของก๊าซที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic Decomposition) ของสารอินทรีย์ ในกรณีที่มีการดำเนินระบบอย่างต่อเนื่องและนานพอที่การย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์มากที่สุดและกระบวนการย่อยสลายนี้นี้มีสารประกอบอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของ $C_aH_bO_cN_d$ เป็นสารตั้งต้นอย่างเพียงพอต่อจุลชีพในการดำรงชีวิตและมีบางส่วนถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซของค์ประกอบอื่นๆดังสมการ (แทนค่าจำนวนโมลขององค์ประกอบทางเคมีที่คำนวณได้จากสมการ)



a = จำนวนโมลของคาร์บอน

b = จำนวนโมลของไฮโดรเจน

c = จำนวนโมลของออกซิเจน

d = จำนวนโมลของไนโตรเจน

จากสมการเคมีข้างต้นและจากผลการทดลองหาปริมาณองค์ประกอบ CHON จากตารางที่ 4.5 สามารถนำมาใช้คำนวณหาสูตรเคมีอย่างง่ายของเศษขยะผลไม้แต่ละชนิดได้ แสดงดังตารางที่ 4.6 และสามารถคำนวณหาปริมาณก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ STP ภายใต้สมมติฐานเมื่อศักยภาพในการทำงานสูงสุดของสารอินทรีย์ที่จะถูกย่อยสลายแบบไร้อากาศเป็นก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 อัตราส่วนโดยโมลและสูตรทางเคมีอย่างง่ายของเศษขยะผลไม้จำนวน 8 ชนิด

ลำดับ	ชนิดผลไม้	จำนวนโมลทั้งหมด				สูตรเคมี อย่างง่าย
		C	H	O	N	
1	มะม่วง	3.36	5.50	3.35	0.04	$C_{87}H_{143}O_{87}N$
2	สับปะรด	3.37	6.46	3.70	0.07	$C_{50}H_{97}O_{55}N$
3	แตงไทย	3.51	6.97	3.14	0.04	$C_{86}H_{171}O_{77}N$
4	แตงโม	3.38	5.71	3.25	0.09	$C_{39}H_{67}O_{38}N$
5	ส้ม	3.44	6.98	3.11	0.13	$C_{26}H_{53}O_{24}N$
6	ส้มโอ	3.22	7.00	3.45	0.07	$C_{45}H_{98}O_{48}N$
7	ฝรั่ง	3.50	7.10	3.11	0.08	$C_{46}H_{94}O_{41}N$
8	กล้วย	3.44	5.46	3.21	0.14	$C_{25}H_{40}O_{24}N$

ตารางที่ 4.7 ปริมาณก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ และปริมาณก๊าซทั้งหมดได้จากการคำนวณ (รายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ข-1)

ลำดับ	ชนิดผลไม้	สัดส่วนจำนวนโมล (ไนโตรเจน = 1)				CH ₄ โมล	CO ₂ โมล	CH ₄ (ลบ.ม./ กรัม ของแข็ง ระเหยที่ เต็ม ที่ STP)	CO ₂ (ลบ.ม./ กรัม ของแข็ง ระเหยที่ เต็ม ที่ STP)	ปริมาณก๊าซ ทั้งหมด มล./กรัม ของแข็ง ระเหยที่เต็ม
		C	H	O	N					
1	มะม่วง	87	143	87	1	39	48	0.0013	0.0016	748
2	สับปะรด	50	97	55	1	23	27	0.0014	0.0016	700
3	แตงไทย	86	171	77	1	45	41	0.0017	0.0015	783
4	แตงโม	39	67	38	1	18	21	0.0016	0.0019	751
5	ส้ม	26	53	24	1	13	13	0.0017	0.0016	759
6	ส้มโอ	45	98	48	1	22	23	0.0012	0.0012	706
7	ฝรั่ง	46	94	41	1	24	22	0.0018	0.0017	779
8	กล้วย	25	40	24	1	11	14	0.0013	0.0017	755

จากตารางที่ 4.7 การคาดการณ์ปริมาณก๊าซชีวภาพในเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด มีค่าเฉลี่ย 700-783 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เต็ม โดยที่แต่ของไทยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงที่สุด คือ 783 มิลลิลิตรต่อกรัม รองลงมาคือ ฝรั่งเศสมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 779 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เต็ม สัม 759 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เต็ม กัวย 755 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เต็ม แดงโม 751 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เต็ม มะม่วง 748 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เต็ม สัมโอ 706 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เต็ม และสับปะรด มีปริมาณก๊าซต่ำที่สุดเท่ากับ 700 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เต็ม ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทางทฤษฎีที่คำนวณได้มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากเมื่อนำตัวอย่างส่งไปวิเคราะห์หาค่า C H O N แล้วนั้นอาจมีความผิดพลาดของการสุ่มตัวอย่างที่วิเคราะห์ เพราะใช้ปริมาณเพียง 1 กรัมในการวิเคราะห์และมีการใช้ความร้อนกับตัวอย่างที่ส่งวิเคราะห์ด้วย แต่เมื่อทำการทดลองจริงใช้ปริมาณตัวอย่างของเศษขยะผลไม้ 10 กรัมของน้ำหนักเปียก เมื่อนำมาคำนวณหาค่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทางทฤษฎีแล้ว จึงไม่สามารถแยกเศษขยะผลไม้ตัวใดตัวหนึ่งที่มีความแตกต่างอย่างเด่นชัด (การคำนวณปริมาณการคำนวณก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปริมาณก๊าซทั้งหมด ดูในภาคผนวก ข)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.5.4 ผลการเปรียบเทียบปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากการทดลองกับค่าการคำนวณทางทฤษฎี

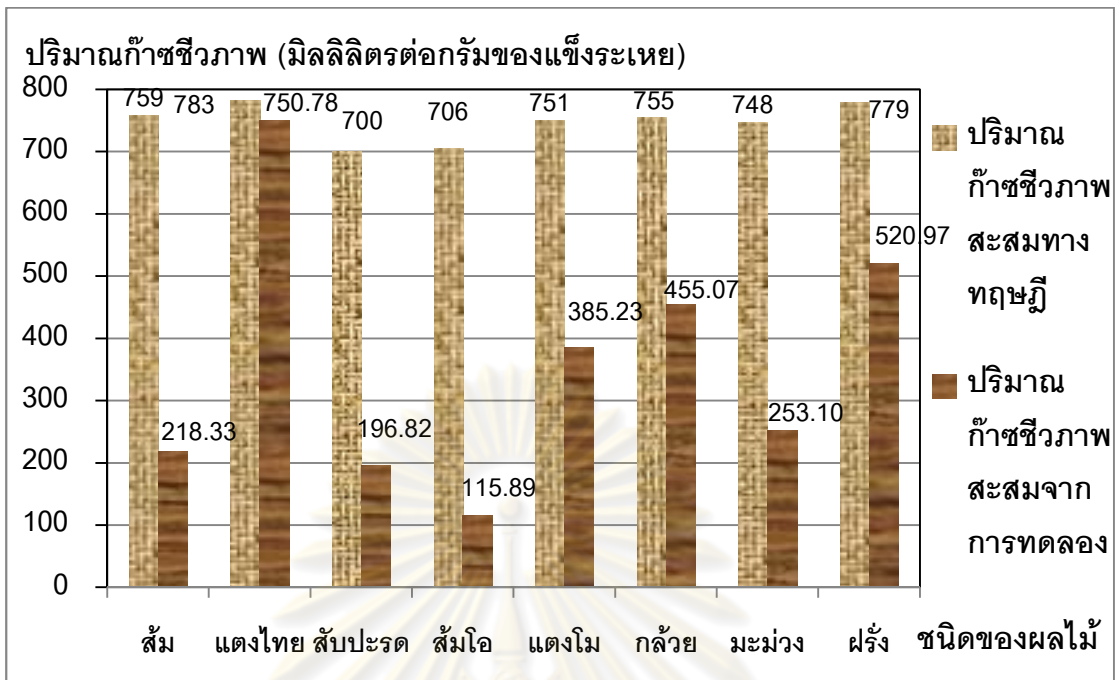
จากการทดลองเมื่อนำปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมจากการหมักผลไม้แบบไร้อากาศของเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ภายใต้อุณหภูมิเฉลี่ย 30 องศาเซลเซียสตลอดการทดลอง เป็นระยะเวลา 30 วัน โดยที่อุณหภูมิเฉลี่ยของการทดลองอยู่ในสภาวะการทำงานของแบคทีเรียแบบมีไซฟิติก ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 25-40 องศาเซลเซียส (มันลิน ตันซุลเวศม์, 2542) เปรียบเทียบกับค่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทางทฤษฎีที่ได้จากการคำนวณ แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพจากการทดลองมีค่าน้อยกว่าปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี เนื่องจากระบบมีการปรับสภาพเพอร์ให้มีค่ากรด-ด่าง เท่ากับ 7 ก่อนปิดฝาขวดเพียงครั้งเดียว ซึ่งค่ากรด-ด่างในช่วงนี้เป็นช่วงที่เหมาะสมที่จุลชีพสามารถใช้อาหารได้ดีและเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ในการทดลองทำการปั่นตัวอย่างเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิดให้ละเอียดและมีการเขย่าตลอดเวลาบนเครื่องเขย่าเพื่อเร่งปฏิกิริยา ทำให้จุลชีพสามารถใช้อาหารได้ดี ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพมากในช่วงแรก เมื่อเวลาผ่านไปไม่มีการปรับเพอร์ให้แกระบบอีกจึงเกิดกรดไขมันระเหยง่ายสะสมในระบบมากขึ้น ค่ากรด-ด่างตกลงอย่างรวดเร็ว และเกิดการยับยั้งการเกิดก๊าซจากสภาวะกรดในระบบ (Acid inhibit) ทำให้กรดไขมันระเหยที่ถูกเปลี่ยนจากสารอินทรีย์ในขั้นตอนการสร้างกรดในสภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน (Hydrogen partial pressure) สูงเป็นกรดไขมันระเหยชนิดที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมจากสภาวะที่เกิดขึ้น กรดไขมันระเหยเหล่านี้จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้นจากการนำค่าการเกิดก๊าซชีวภาพจากการทดลองต่อการเกิดก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี มาเปรียบเทียบกับร้อยละพบว่ามีค่าเฉลี่ยร้อยละ 47.68 ± 26.11 โดยที่แดงไทยมีแนวโน้มการเกิดปริมาณก๊าซชีวภาพจากการทดลองใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีโดยมีค่าสูงถึงร้อยละ 95.89 เป็นผลเนื่องมาจากค่าสภาพกรด-ด่างของแดงไทยมีความเหมาะสมมากกว่าผลไม้ชนิดอื่น กล่าวคือ ไม่ได้อยู่ในสภาวะที่เป็นกรดมากเกินไปคือค่าพีเอชมากกว่า 7 และค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.5 ซึ่งสูงกว่าสภาพอัตราส่วนที่เหมาะสมของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างที่เหมาะสมคือ 0.4 เพียงเล็กน้อย และค่าซีไอดีของแดงไทยมีค่าน้อยที่สุดคือ 78,336 มิลลิกรัมต่อลิตร กล่าวคือแดงไทยมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นน้ำในตัวผลไม่มากและส่วนที่เป็นเปลือกเป็นชนิดเปลือกอ่อนทำให้เกิดการย่อยสลายได้ง่าย และมีความสามารถในการรักษาสภาพต่างได้ดีเกิดปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูง สัมโอมีค่าปริมาณก๊าซชีวภาพจากการทดลองต่อปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎีน้อยที่สุด คือร้อยละ 16.41 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก สัมโอมีค่าของแข็งระเหยที่ย่อยสลายได้ง่าย (BVS) ต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์จึงทำให้ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่ำที่สุด แสดงดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ร้อยละการเกิดก๊าซชีวภาพจากการทดลองต่อการเกิดก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี

ลำดับ	ชนิดผลไม่	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทางทฤษฎี มล./กรัม ของแข็งระเหยที่เต็ม	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้จากการทดลอง มล./กรัม ของแข็งระเหยที่เต็ม	ร้อยละการเกิดก๊าซชีวภาพจากการทดลองต่อการเกิดก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี
1	มะม่วง	748	253.10	33.84
2	สับปะรด	700	196.82	28.12
3	แดงไทย	783	750.78	95.89
4	แดงโม	751	385.23	51.30
5	ส้ม	759	218.33	28.76
6	ส้มโอม	706	115.89	16.41
7	ฝรั่ง	779	520.97	66.88
8	กล้วย	755	455.07	60.27

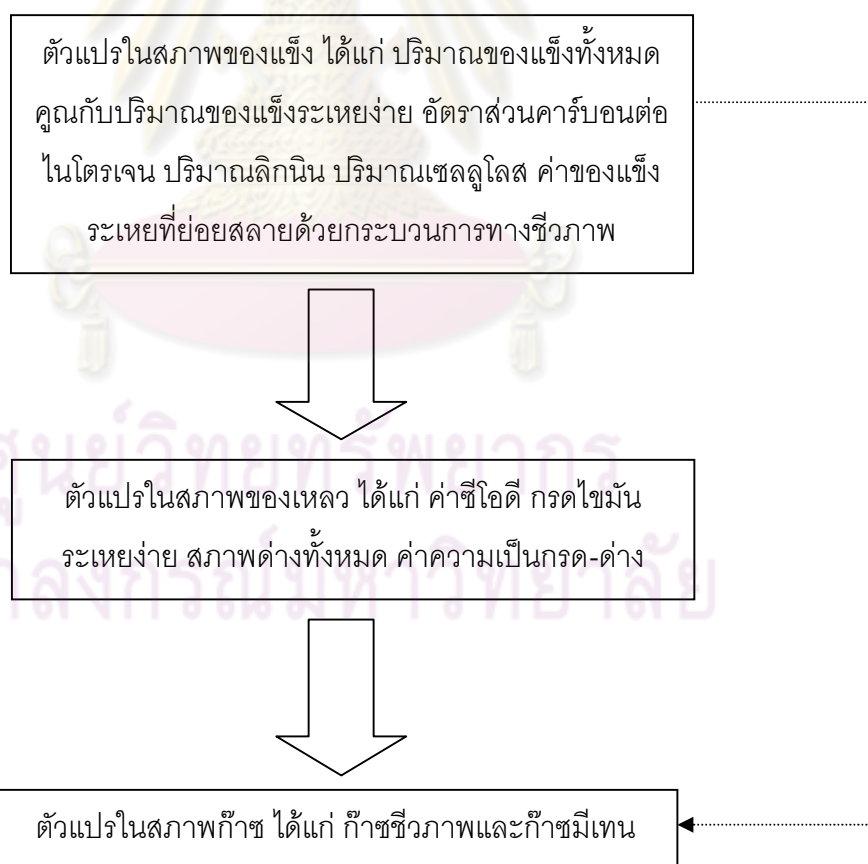


ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 ผลการสร้างแบบจำลอง

เมื่อทำการวัดตัวแปรต่างๆของการทดลองแล้ว นำค่าที่ได้มาหาความสัมพันธ์เชิงสถิติกับปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นโดยใช้โปรแกรม SPSS 11.5 for Windows โดยศึกษาความสัมพันธ์ของแข็งกับของเหลวและก๊าซ ตัวแปรของของแข็ง ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมดคูณกับปริมาณของแข็งระเหยง่าย อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณลิกนิน ปริมาณเซลลูโลส ค่าของแข็งระเหยที่ย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ ตัวแปรของของเหลว ได้แก่ ค่าซีไอดี กรดไขมันระเหยง่าย สภาพต่างทั้งหมด ค่าความเป็นกรด-ด่าง ตัวแปรของก๊าซ ได้แก่ ก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของแข็งกับของเหลว ของแข็งกับก๊าซ และของเหลวกับก๊าซ และนำตัวแปรที่มีแนวโน้มมีความสัมพันธ์มากที่สุดนำไปสร้างแบบจำลองต่อไป

4.6.1 ความสัมพันธ์เชิงขั้นตอนของการเกิดก๊าซชีวภาพจากเศษขยะผลไม้



รูปที่ 4.17 แผนผังการเกิดความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างของการเกิดก๊าซชีวภาพจากเศษขยะผลไม้

จากรูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์เชิงขั้นตอนของการเกิดก๊าซชีวภาพจากเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิดมีความสัมพันธ์กับปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพมี 3 ขั้นตอน โดยจากเศษขยะผลไม้ที่เป็นของแข็ง เป็นของเหลวและเป็นปริมาณก๊าซชีวภาพและมีเทนตามลำดับ โดยทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ (Correlation) ของตัวแปรต้น ในส่วนที่เป็นของแข็ง คือ ค่าของแข็งทั้งหมด ค่าของแข็งระเหยง่าย ค่าของแข็งระเหยที่ย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (BVS) ปริมาณลิกโนเซลลูโลส (ลิกนินรวมกับเซลลูโลส) (จากภาคผนวก ข) เมื่อเทียบกับตัวแปรต้นในส่วนของแข็งกับส่วนที่เป็นของเหลวคือค่าซีไอดี พบว่าค่าของแข็งระเหยที่ย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ มีค่าความสัมพันธ์กับค่าซีไอดีเพียง 0.170 แสดงว่าส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายไม่มีความสัมพันธ์กับค่าซีไอดีเท่าใดนัก แม้ว่าจะมีค่าซีไอดีเท่าใดก็ตาม ค่าลิกโนเซลลูโลสมีความสัมพันธ์กับซีไอดี เท่ากับ -0.665 แสดงว่าค่าลิกโนเซลลูโลสมีความสัมพันธ์กับค่าซีไอดีในเชิงลบกล่าวคือค่าลิกโนเซลลูโลสต้องมีค่าที่น้อย จึงจะมีความสัมพันธ์กับค่าซีไอดีของขยะผลไม้ที่มาก ค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนกับซีไอดี เท่ากับ 0.026 แสดงว่าค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนไม่มีความสัมพันธ์กับค่าซีไอดีของเศษขยะผลไม้ สำหรับอัตราส่วนของแข็งระเหยง่ายกับค่าสภาพต่างทั้งหมดมีความสัมพันธ์กับค่าซีไอดี เท่ากับ 0.147 ซึ่งค่าอัตราส่วนของแข็งระเหยง่ายกับค่าสภาพต่างทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบไม่มีความสัมพันธ์กับค่าซีไอดีของขยะผลไม้ ซึ่งค่าอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยกับค่าสภาพต่างทั้งหมดนั้นเป็นส่วนสำคัญในการควบคุมระบบสำหรับการเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน และตัวแปรสุดท้ายคือค่าของแข็งคูณกับค่าของแข็งระเหยง่ายมีความสัมพันธ์กับซีไอดี เท่ากับ 0.486 ดังนั้นความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าวข้างต้นในส่วนที่เป็นของแข็งกับของเหลวคือค่าซีไอดี กรดไขมันระเหยง่าย สภาพต่างทั้งหมด ค่าความเป็นกรด-ด่างนั้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สำหรับในส่วนหนึ่งของเหลวคือค่าซีไอดี กรดไขมันระเหยง่าย สภาพต่างทั้งหมด ค่าความเป็นกรด-ด่าง นั้นจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับปริมาณก๊าซชีวภาพยิลด์สะสมในหน่วยมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่ายตลอดช่วงระยะเวลา 30 วัน และก๊าซมีเทนยิลด์ที่ทำการวัดทุกวันที่ 7, 14, 21 และ 30 ในหน่วยมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพยิลด์สะสมมีความสัมพันธ์กันกับค่าของแข็งคูณกับค่าของแข็งระเหยง่าย เท่ากับ -0.738 กล่าวคือเมื่อค่าของแข็งคูณกับค่าของแข็งระเหยง่ายมีค่าน้อย ปริมาณก๊าซชีวภาพยิลด์สะสมในหน่วยมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่ายจะมีค่าสูงนั้น ก็อาจเนื่องมาจากสารอินทรีย์อยู่ในรูปแบบของเหลวสูงกว่าของแข็ง และปริมาณก๊าซชีวภาพยิลด์สะสมในหน่วยมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่ายตลอดช่วงระยะเวลา 30 วันยังมีความสัมพันธ์กันกับค่าสภาพต่าง เท่ากับ 0.763 กล่าวคือ เมื่อค่าสภาพต่างสูงสามารถสะท้อนกรดภายในระบบไม่ให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

และจะสามารถทำให้แบคทีเรียกินอาหารและทำปฏิกิริยาภายในระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพ ยิลด์สะสมได้สูง สำหรับการเกิดปริมาณก๊าซมีเทนยิลด์นั้น จากผลการทดลองพบว่า แนวโน้มการผลิตก๊าซมีเทนลดต่ำลงเรื่อยๆตั้งแต่วันที่ 7 ของการทดลองเป็นต้นไปยกเว้นเศษขยะผลไม้บางชนิด เช่น แดงไทย และมีความเกี่ยวข้องกับระบบที่มีความเป็นกรดสูงมาก โดยดูจากค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างมีค่ามากกว่า 0.8 ซึ่งเป็นตัวชี้วัดได้ว่าระบบกำลังเสถียรสมดุล (จากหัวข้อ 4.4.1) เนื่องจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่มีมากเกินไป จุลชีพย่อยสลายได้ไม่ทัน เนื่องจากสภาพแวดล้อมภายในระบบไม่เหมาะสม กำลังบัฟเฟอร์ของระบบไม่เพียงพอ ทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนการสร้างกรด ทำให้เกิดการยับยั้งของสภาวะกรดภายในระบบ (Acid inhibit) เป็นผลให้ค่าสภาพความเป็นกรด-ด่างของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว (pH drop) และมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สร้างมีเทนถูกยับยั้งการทำงาน ดังนั้นแสดงว่าแบคทีเรียผลิตมีเทนสามารถทนอยู่ในสภาพกรดได้ถึงวันที่ 7 ของการทดลองเท่านั้น ซึ่งจากการหาความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างกับปริมาณการเกิดก๊าซมีเทนยิลด์ของวันที่ 7 มีค่าเท่ากับ 0.771 ส่วนในวันอื่นๆ เช่น ในวันที่ 14, 21 และ 30 มีค่าเท่ากับ -0.315, 0.396, 0.168 ตามลำดับ สัดส่วนความสัมพันธ์นี้แทบจะไม่มี

เมื่อทราบตัวแปรต้นที่มีความสัมพันธ์กันกับปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นแล้วจึงนำค่าตัวแปรต้นที่คาดว่าจะมีความสัมพันธ์กับการเกิดก๊าซมาทำการพลอตและวิเคราะห์ด้วย Correlation Analysis ในหัวข้อที่ 4.6.2 แล้วจึงสร้างแบบจำลองต่อไป

4.6.2 Correlation Analysis

ค่าสหสัมพันธ์ (Correlation) เป็นสถิติที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ซึ่งค่าสหสัมพันธ์ที่คำนวณได้ เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ซึ่งสถิติสำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีหลายชนิด ซึ่งการเลือกใช้แบบใดนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขหลายประการในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัว (Bivariate Correlation) บางครั้งเราเรียกว่าตัวแปรอิสระว่า ตัวแปรทำนาย (Predictor variable) และเรียกตัวแปรอีกตัวว่าตัวแปรเกณฑ์ (Criterion variable) ซึ่งโดยปกติจะเป็นตัวแปรตาม (Diekhoff, 1992)

จากการทดลองได้ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นต่างๆ ได้แก่ ของแข็งระเหยที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพ ค่าซีไอดี ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน อัตรากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมด ค่าลิกโนเซลลูโลส ค่าของแข็งทั้งหมดคูณกับค่า

ของแข็งระเหย เป็นต้น ที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณก๊าซชีวภาพยิลด์สะสม 30 วันมีหน่วยเป็น มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เติม แสดงผลดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ตารางความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน มีหน่วยเป็นมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เติม

	GAS	BVS	LC	C:N	TS*VS	ALK	COD
ปริมาณก๊าซชีวภาพยิลด์สะสม 30 วัน (มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เติม)							
Pearson Correlation	1	.274	.356	.379	-.738	.763	-.177
Sig. (2-tailed)	.	.511	.387	.354	.037*	.028*	.675
N	8	8	8	8	8	8	8

หมายเหตุ : GAS คือ ปริมาณก๊าซชีวภาพยิลด์สะสม 30 วัน (มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เติม)

BVS คือ ปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ

LC คือ ลิกลินเซลลูโลส

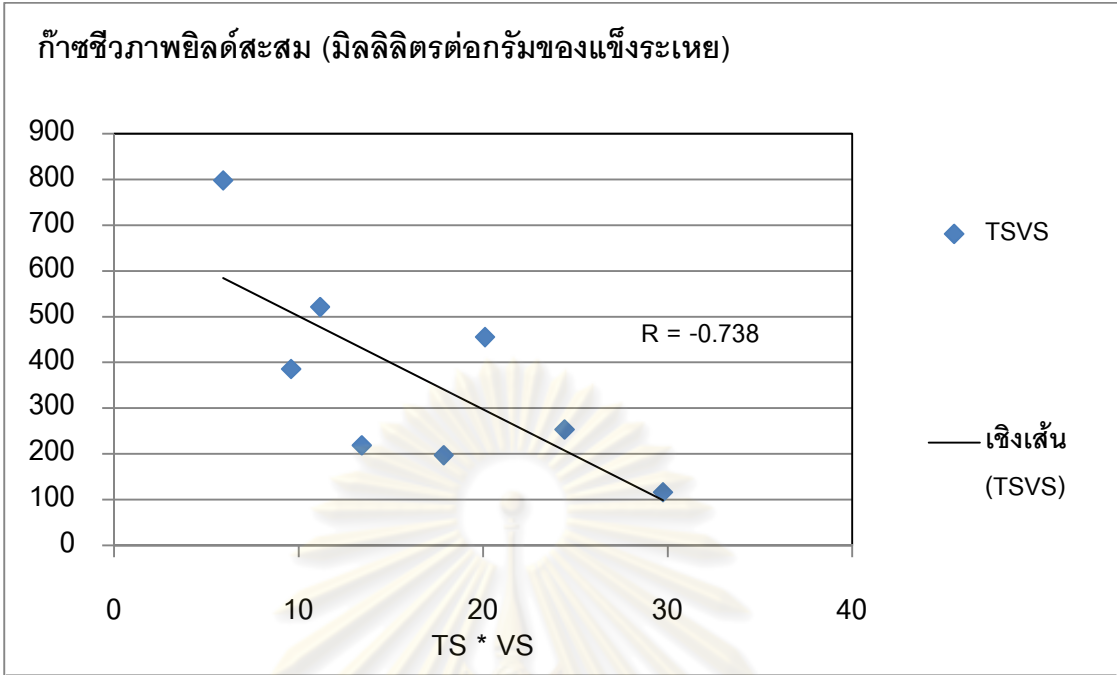
VFA/ALK คือ กรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่างทั้งหมด

C:N คือ ปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจน

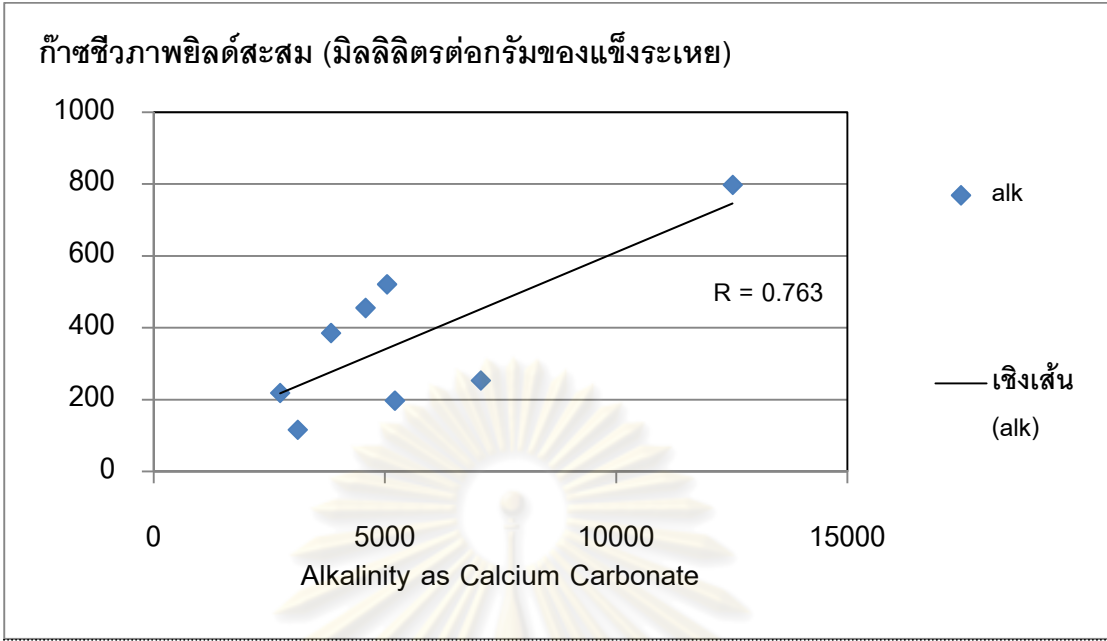
TS*VS คือ ปริมาณของแข็งxปริมาณของแข็งระเหย

COD คือ ค่าซีไอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)

จากตารางที่ 4.9 เมื่อนำค่าตัวแปรอิสระต่างๆ เช่น ของแข็งระเหยที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายทางชีวภาพ ค่าซีไอดี ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน อัตรากรดไขมันระเหยง่ายต่อค่าสภาพด่างทั้งหมด ค่าลิกลินเซลลูโลส ค่าของแข็งทั้งหมดคูณกับค่าของแข็งระเหย เป็นต้น ที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามคือปริมาณก๊าซชีวภาพ มีหน่วยเป็นมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เติม พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพยิลด์ มีหน่วยเป็นมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เติมกับตัวแปรต้นต่างๆ พบว่ามีความสัมพันธ์กันกับปริมาณของแข็งคูณปริมาณของแข็งระเหยและค่าสภาพต่างแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นำมาพลอตหาความสัมพันธ์กันดังรูปที่ 4.18 และ 4.19 และสร้างแบบจำลองในหัวข้อ 4.6.3 ต่อไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 ตารางความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อปริมาณก๊าซมีเทนยิลด์ มีหน่วยเป็น มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยในช่วงเวลา 7 วัน ของเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด

	% Methane	Methane (mL)	Methane Yield	VFA	ALK	VFA/ALK	pH
ปริมาณก๊าซมีเทนยิลด์ 7 วัน (มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เต็ม)							
Pearson Correlation	.535	.758*	1	.664	.587	.771*	.665
Sig. (2-tailed)	.172	.029	.	.073	.126	.025	.072
N	8	8	8	8	8	8	8

หมายเหตุ : % Methane คือ เปอร์เซนต์ก๊าซมีเทนของวันที่ 7

Methane (mL) คือ ปริมาณก๊าซมีเทนของวันที่ 7 มีหน่วยมิลลิลิตร

Methane Yield คือ ปริมาณก๊าซมีเทนยิลด์ของวันที่ 7 มีหน่วยเป็นมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย

VFA คือ กรดไขมันระเหยง่าย

ALK คือ สภาพความเป็นด่าง

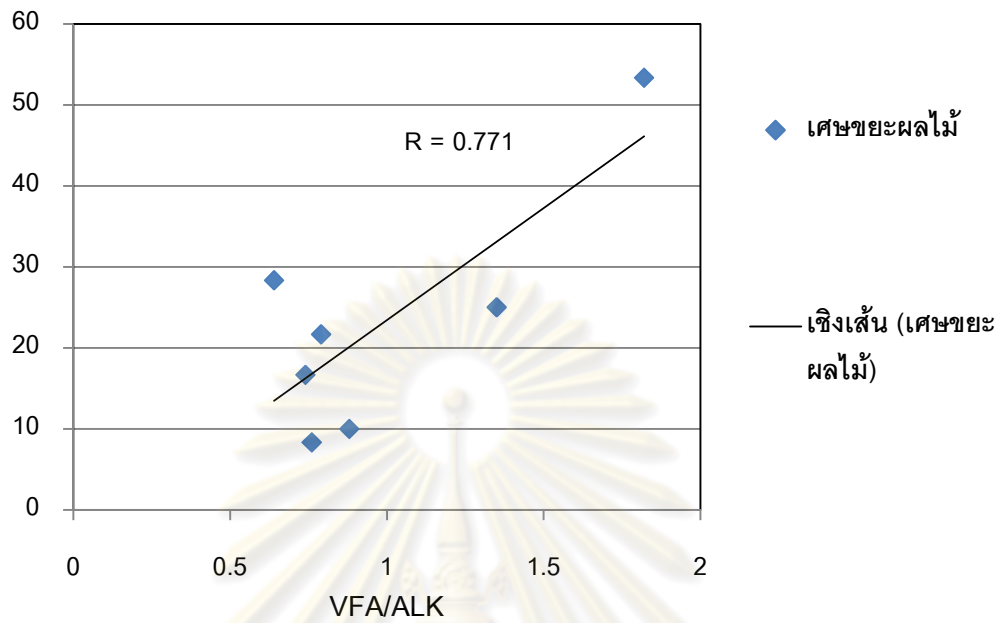
VFA/ALK คือ อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพความเป็นด่างทั้งหมด

pH คือ ค่าสภาพกรด-ด่าง

จากตารางที่ 4.10 พบว่าปริมาณก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อค่าสภาพด่างทั้งหมดมีความสัมพันธ์กันในเชิงบวกมีค่าเท่ากับ 0.771 กล่าวคือ ปริมาณก๊าซมีเทนจะมีปริมาณมากขึ้น ค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อค่าสภาพด่างทั้งหมดจะต้องอยู่ในช่วงที่เหมาะสม คือแบคทีเรียเมทาโนเจนสามารถกินอาหารได้ดี จึงทำให้เกิดปริมาณก๊าซมีเทนมาก

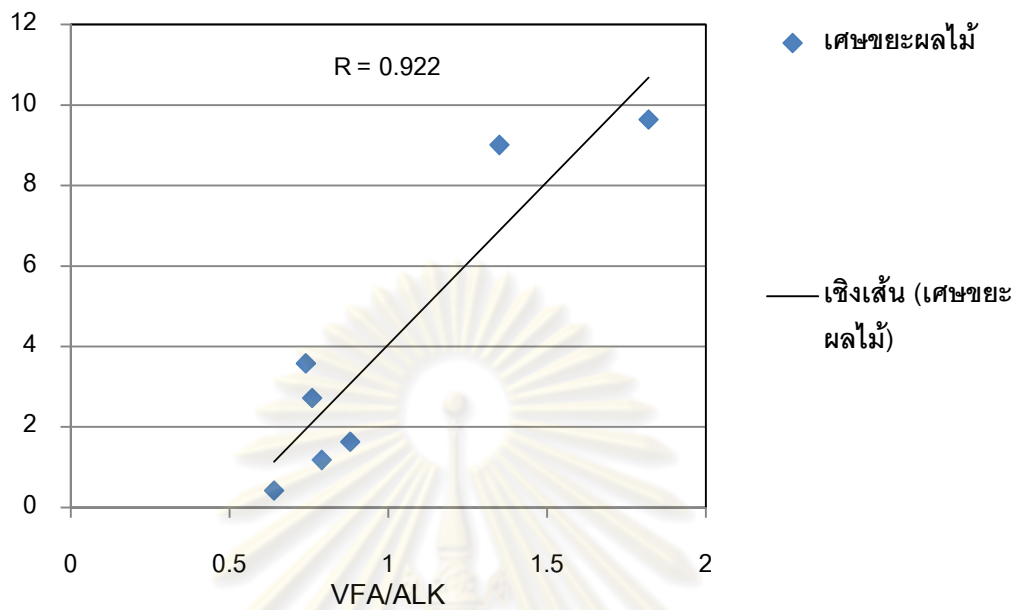
เมื่อทำการทดลองหมักเศษขยะผลไม้ในขวดเซรั่มสีชาพบว่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในช่วง 7 วันแรกมากที่สุดยกเว้นแตงไทย (จากรูปที่ 4.14-4.15) จากนั้นนำมาพลอตจุดเพื่อหาความสัมพันธ์พบว่าปริมาณก๊าซมีเทนยิลด์ที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อค่าสภาพด่างทั้งหมดที่ดี โดยมีแนวโน้มความสัมพันธ์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.20

ก๊าซมีเทนยิลด์ของวันที่ 7 (มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เต็ม)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำขมิเทนยิลด์ของวันที่ 7 (มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เดิม)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6.3 ผลการสร้างแบบจำลอง

ผลการทดลองหาค่าพยากรณ์ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียผลไม้โดยระบบย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้อากาศจากตัวอย่างเศษขยะผลไม้ 8 ชนิดนำไปวิเคราะห์หาข้อมูลทางสถิติ โดยนำค่าที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณและสหสัมพันธ์ (Multiple Regression and Correlation) โดยใช้โปรแกรม SPSS : One-way ANOVA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p < 0.05$) เมื่อพิจารณาปัจจัยหรือตัวแปรที่สำคัญในการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนจากการทดลองเป็นระยะเวลา 30 วัน พบความสัมพันธ์ของการย่อยสลายแบบระบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนสะสมที่ 30 วัน กับเปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมดคูณกับเปอร์เซ็นต์ของแข็งระเหยง่าย และค่าสภาพต่าง ดังสมการต่อไปนี้

$$Y_{\text{ก๊าซชีวภาพยิลด์สะสม}} = 384.647 - 13.964 (TS*VS) + 0.039 (ALK) \quad (4.1)$$

$$R^2 = 0.70$$

เมื่อ $Y_{\text{ก๊าซชีวภาพยิลด์สะสม}}$ เท่ากับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 30 วัน มีหน่วยเป็นมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย

TS*VS เท่ากับเปอร์เซ็นต์ของแข็งทั้งหมดคูณกับเปอร์เซ็นต์ของแข็งระเหยง่าย

ALK เท่ากับค่าสภาพต่าง

พิจารณาสมการที่ 4.1 พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพยิลด์สะสม 30 วัน มีหน่วยเป็นมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย จะมีความสัมพันธ์ในเชิงลบกับกับปริมาณของแข็งทั้งหมดคูณกับปริมาณของแข็งระเหยง่าย คือ ถ้าปริมาณก๊าซชีวภาพยิลด์เกิดขึ้นมากจะต้องมีปริมาณของแข็งคูณปริมาณของแข็งระเหยน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมีปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปแบบของเหลวสูงกว่าโดยไม่คำนึงถึงปริมาณกรด เช่น แดงไทยที่มีปริมาณน้ำมากกว่าเนื้อของของแข็ง และปริมาณก๊าซชีวภาพยิลด์ที่เกิดขึ้นนั้นมีความสัมพันธ์ในเชิงบวกกับค่าสภาพต่างที่ใช้ในการสะเทินกรดสูง กล่าวคือถ้าจุลชีพไม่ถูกยับยั้งด้วยสภาพกรดจากการที่ค่าสภาพกรด-ต่างตกอย่างรวดเร็ว และมีสภาพต่างเพียงพอที่จะรักษาสมดุลภายในระบบได้ จะมีแนวโน้มในการผลิตก๊าซได้ดี ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพยิลด์ที่เกิดขึ้นมากจะต้องมีปริมาณค่าสภาพต่างในระบบสูงด้วย

$$Y_{\text{ก๊าซมีเทนยิลด์วันที่ 7}} = -4.037 + 8.086 (\text{VFA/ALK}) \quad (4.2)$$

$$R^2 = 0.82$$

เมื่อ $Y_{\text{ก๊าซมีเทนยิลด์วันที่ 7}}$ เท่ากับปริมาณก๊าซมีเทนยิลด์วันที่ 7 มีหน่วยเป็นมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็ง
ระเหย
VFA/ALK เท่ากับค่าอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพต่าง

จากการทดลองพบว่าก๊าซมีเทนยิลด์มีความสัมพันธ์กับการใช้กรดไขมันระเหยง่ายเป็นหลัก ซึ่งมีแนวโน้มชัดเจน ทั้งนี้เนื่องจากระบบเป็นกรดได้ง่าย ค่าเริ่มต้นของกรดไขมันระเหยง่ายในวันแรกมีค่าสูง เมื่อพิจารณาสมการที่ 4.2 พบว่าปริมาณก๊าซมีเทนยิลด์วันที่ 7 มีหน่วยเป็นมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยนั้น จะมีค่าแปรผันตรงกับค่าอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อค่าสภาพต่าง คือในช่วง 7 วันแรกจุลชีพที่สร้างมีเทนยังอยู่ในระบบได้ และผลิตก๊าซมีเทนในช่วง 7 วันแรกได้ดี แสดงว่า จุลชีพสามารถใช้อาหารในสภาวะนี้ได้ คือยังมีการแปรรูปกรดไปเป็นก๊าซมีเทนได้ ซึ่งยังไม่ถูกยับยั้งจากสภาวะแวดล้อมอื่นๆภายในขวดหมัก เซรั่มสีชา จึงทำให้มีปริมาณก๊าซมีเทนยิลด์เกิดขึ้นสูง

สำหรับปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพยิลด์สะสม 30 วัน และก๊าซมีเทนยิลด์ของวันที่ 7 เช่น ค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณลิกนิน ปริมาณเซลลูโลส ปริมาณของแข็งที่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งจากการหาสมการพบว่า ตัวแปรอื่นๆที่นอกจากตัวแปรจากที่อยู่ในสมการแล้วนั้น ตัวแปรอื่นๆไม่มีผลต่อการคาดการณ์ก๊าซชีวภาพยิลด์สะสม 30 วัน และก๊าซมีเทนยิลด์ของวันที่ 7 อย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ($p > 0.05$)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

1. เศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด ได้แก่ มะม่วง สับปะรด แดงไทย แดงโม ส้ม ส้มโอ ฝรั่ง และกล้วย สามารถแบ่งกลุ่มที่มีค่าปริมาณของแข็งระเหยที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (BVS) มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์โดยเรียงจากมากไปหาน้อย ได้แก่ ฝรั่ง (75.66) ส้ม (75.52) มะม่วง (74.43) สับปะรด (74.01) แดงไทย (70.54) และกลุ่มที่มีค่าปริมาณของแข็งระเหยที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพน้อยกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ กล้วย (62.14) แดงโม (57.55) และส้มโอ (43.86)

ค่าของแข็งระเหย (Volatile Solid) ของเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด มีพิสัย 93.65-98.38 เปอร์เซ็นต์ของของแข็งทั้งหมด โดยแดงโมมีปริมาณของแข็งระเหยน้อยที่สุด คือ 93.65 เปอร์เซ็นต์ของของแข็งทั้งหมด และ สับปะรดมีปริมาณของแข็งระเหยมากที่สุด คือ 98.38 เปอร์เซ็นต์ของของแข็งทั้งหมด

สำหรับค่าซีไอดีของการทดลองแบ่งเป็นเศษขยะผลไม้มีค่าซีไอดีมากกว่า 100,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้แก่ กล้วย (348,960) มะม่วง (331,200) ส้ม (150,800) ส้มโอ (140,928) ขยะผลไม้มีค่าซีไอดีน้อยกว่า 100,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้แก่ สับปะรด (96,000) ฝรั่ง (92,000) และ แดงไทย (78,336) ซึ่งค่าซีไอดีที่สูงกว่า 100,000 มิลลิกรัมต่อลิตรมีแนวโน้มจะทำให้เกิดปริมาณก๊าซชีวภาพสูง แต่ค่าซีไอดีที่ต่ำกว่า 100,000 มิลลิกรัมต่อลิตรจะมีแนวโน้มทำให้เกิดปริมาณก๊าซมีเทนสูง โดยเฉพาะ ฝรั่งและแดงไทย เกิดปริมาณก๊าซมีเทนสูงที่สุดเป็นสองอันดับแรกจากเศษขยะผลไม้ทั้งหมด

ส่วนส้มโอมีปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมและปริมาณก๊าซมีเทนสะสมในการทดลองน้อยที่สุด เท่ากับ 115.89 และ 17.40 มิลลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เติม ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากปริมาณของแข็งทั้งหมดของส้มโอมีค่าสูงถึง 30.98 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าของแข็งระเหยที่ย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (BVS) น้อยกว่าเศษขยะผลไม้ชนิดอื่นๆ

2. เศษขยะผลไม้จากฝรั่ง และ แดงโม มีปริมาณลิกนินและเซลลูโลสรวมกันมากที่สุด เท่ากับ 43.96 และ 40.29 ตามลำดับ ถึงแม้ว่าฝรั่งและแดงโม จะมีลิกนินและเซลลูโลสรวมกันมากที่สุดแต่มีปริมาณก๊าซเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนสูงเมื่อคิดในหน่วยมิลลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เติม ทั้งนี้เนื่องจากตัวอย่างที่ทำการสังเคราะห์หาปริมาณลิกนินและเซลลูโลสนั้น ขึ้นกับว่าผู้วิเคราะห์สุ่มตรวจส่วนไหนของเศษขยะผลไม้ เพราะแต่ละส่วนมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นปริมาณ

ของลิกนินและเซลลูโลสอาจไม่สามารถบ่งชี้ถึงปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในการทดลอง

3. ค่าความเป็นกรด-ด่างภายในระบบของการทดลองของเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิดมีค่าพีเอช 4.70-8.35 โดยที่เศษขยะผลไม้ ได้แก่ มะม่วง สับปะรด แตงโม ส้ม ส้มโอ ฝรั่ง และกล้วยมีค่าความเป็นกรด-ด่างเฉลี่ยตลอดการทดลองนั้นต่ำกว่า 7 ยกเว้นแตงไทยที่มีความเป็นกรด-ด่างมากกว่า 7 ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เป็นกลางจะทำให้จุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนทำงานได้ดี แต่หากมีค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบต่ำเกินไป ส่งผลให้กรดไขมันระเหยสะสมมากในระบบ ซึ่งมีผลในการยับยั้งการทำงาน และ/หรือเจริญเติบโตของจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน ทำให้ระบบเกิดการขาดแคลนจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทนในที่สุด โดยเฉพาะส้ม มีค่าสภาพต่างเกิดขึ้นในระบบน้อยที่สุดคือ $2,735 \pm 1,220$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งหลังจากวันที่ 14 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง เมื่อวิเคราะห์คุณภาพก๊าซชีวภาพของส้มไม่พบตัวอย่างก๊าซมีเทนที่ทำการวิเคราะห์เป็นผลจากการเกิดกรด (Acid inhibit) ยับยั้งรุนแรง

4. เมื่อนำตัวแปรต้นต่างๆมาหาความสัมพันธ์และสร้างแบบจำลองนั้นพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพยิลด์สะสมนั้นมีความสัมพันธ์กับค่าสภาพต่างโดยจะต้องมีอย่างเพียงพอที่จะสะเทินกรดภายในระบบ มีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างน้อย จะทำให้เกิดปริมาณก๊าซมีเทนสะสมได้ดี ในฝรั่งและแตงไทยมีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างที่เหมาะสม คือ 0.56 และ 0.62 ตามลำดับ

5. เศษขยะที่มีค่าซีไอดีมากได้แก่กล้วยและมะม่วงมีค่าซีไอดีสูงเท่ากับ 348,960 และ 331,200 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ทำให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพสูงเป็นสองอันดับแรก โดยกล้วยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม เท่ากับ 914.57 มิลลิลิตร และมะม่วงมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม เท่ากับ 616.73 มิลลิลิตร โดยที่ค่าอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างในระบบของกล้วย มีค่าเท่ากับ 1.54 และมะม่วงมีค่าเท่ากับ 1.03 จึงทำให้จุลชีพที่ใช้สร้างมีเทนทำงานได้ไม่ดี จึงเป็นผลให้กล้วยและมะม่วงมีปริมาณก๊าซมีเทนจากก๊าซชีวภาพสะสมเกิดขึ้นเพียงร้อยละ 4 และ 15 ตามลำดับ

6. จากการทดลองพบตัวแปรที่มีความสัมพันธ์ที่ดีกับสมการที่สร้างขึ้นของปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนในช่วง 7 วันแรก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อค่าสภาพต่างทั้งหมด กล่าวคือค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อค่าสภาพต่างจะต้องมีค่าที่เหมาะสม มีค่าไม่เกิน 0.8 จนทำให้เกิดจุลชีพสร้างมีเทนถูกยับยั้งการทำงาน เกิดสภาพแวดล้อมภายในขวดหมักไม่เหมาะสม ซึ่งจะทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหย คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน

7. ปริมาณของก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นในระบบนั้นไม่มีความสัมพันธ์กับค่าของแข็งระเหยง่ายที่ย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (BVS) ถึงแม้ว่าจะมีค่า BVS สูง แต่ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการทดลองไม่ได้ขึ้นกับส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายเท่านั้น ยังขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ เช่น ความสามารถในการสะเทินกรดของค่าสภาพต่างที่ต้องมีกำลังเพียงพอที่จะบัฟเฟอร์ไม่ให้เกิดกรดสะสมภายในระบบมากเกินไป

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัยต่อไปดังนี้

1. ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพในสภาวะไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนเนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างของเศษขยะผลไม้ในระบบตลอดการทดลองมีค่าต่ำกว่า 6 ยกเว้นแดงไทย ซึ่งที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบน่าจะเกิดการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ง่ายกว่าการผลิตก๊าซมีเทนเพื่อเป็นพลังงานทางเลือกอีกทางหนึ่ง โดยสามารถทำระบบแบบทีละเท (Batch)

2. ศึกษาความเป็นไปได้โดยการทำการทดลองลงในถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและมีการเดินระบบจริง โดยเลือกเศษขยะผลไม้ที่มีแนวโน้มในการเกิดก๊าซชีวภาพและมีเทนสูงและทำการวัดค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการทดลอง และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วงการเกิดเมทาโนเจนเพื่อผลิตเป็นมีเทนได้ดีเพื่อป้องกันการลดต่ำลงอย่างรวดเร็วของค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH drop)

3. ศึกษาวิธีบำบัดเบื้องต้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยทางชีวภาพของเศษขยะผลไม้หรือของเสียที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ ก่อนนำไปบำบัดด้วยระบบไร้อากาศ

4. ศึกษาผลของการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการหมักเศษขยะผลไม้เกิดค่าความเป็นกรดสูงมากซึ่งมีผลต่อจุลชีพกลุ่มสร้างมีเทน

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กัลยา วานิชย์บัญชา. 2552. การใช้ SPSS for Windows ในการวิเคราะห์ข้อมูล. พิมพ์ครั้งที่ 15. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2551. รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทยปี 2551. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.pcd.go.th/download/pollution.cfm?task=s2> [2553, พฤษภาคม 15].
- กรมพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน. กระทรวงพลังงาน. การปฏิบัติงานที่ดีของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.eppo.go.th/admin/history/encon.html#4> [2553, พฤษภาคม 12].
- กรุงเทพมหานคร. กองนโยบายและแผนงาน สำนักสิ่งแวดล้อม. 2551. ปริมาณขยะมูลฝอยในกรุงเทพมหานครประจำปี 2551.
- กรุงเทพมหานคร. กองวิชาการและแผนงาน สำนักรักษาความสะอาด. 2548. สถิติกรุงเทพมหานครประจำปี 2548.
- จกมล พูนทวี. 2537. ผลของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, คณะเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ชลิดา อู่ตะเภา. 2548. ศักยภาพของขยะผักผลไม้ในการผลิตมีเทนแบบไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ. ฝ่ายคุณภาพสิ่งแวดล้อมและห้องปฏิบัติการ. 2546. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. เล่มที่ 1 และ 2, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธเนศ อุทิศธรรม และคณะ. 2528. การผลิตก๊าซชีวภาพที่อุณหภูมิต่างๆจากของเสียโรงงานสับปะรดกระป๋อง. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธเรศ ศรีสถิตย์. 2553. วิศวกรรมการจัดการมูลฝอยชุมชน. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มรกต ตันติเจริญ และคนอื่นๆ. 2526. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกและแกนสับปะรด. มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

- มันสิน ตันกุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. 2546. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศรินพร ลีมหารุ่งเรือง. 2543. การจัดการมูลฝอย. 1-31. การฝึกอบรมเรื่องการจัดการมูลฝอยจากชุมชน และการจัดการกากอุตสาหกรรม. 7-9 มิถุนายน 2543. กรุงเทพฯ.
- ศิริชัย พงษ์วิชัย. 2546. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยคอมพิวเตอร์. พิมพ์ครั้งที่ 15. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สมชาย เจียมธีรสกุล. 2530. การผลิตก๊าซมีเทนจากขยะโดยกระบวนการไร้อากาศสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุพินดา ฐานะเจน. 2544. การเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักเศษผักและผลไม้ไร้อากาศแบบแห้งที่มีการหมุนเวียนน้ำชะขยะ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วรรณา ตูลยธัญ, 2549. เคมีอาหารของคาร์โบไฮเดรต. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วิษณุพนธ์ ธรานนท์. 2551. การปรับปรุงความสามารถในการย่อยสลายของกากส้มในระบบไร้อากาศด้วยการบำบัดเบื้องต้นทางเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วีระนุช หลาง. 2551. จุลชีววิทยาสิ่งแวดล้อม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- อรุณวรรณ นุชพ่วง. 2547. การย่อยสลายหญ้าแฝกหอม Vetiveria zizanioides Nash โดยใช้เชื้อราที่ย่อยสลายเซลลูโลสได้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Amathussalam, A., and Abubacker, M.N. 1999 Effect of chemical pretreatment of market wastes in biogas production. Asian Journal Microbio Biotech Env Sci. 1: 93-93.
- Angelidaki, I., et al. 2009. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. Water Science & Technology. 927-934.
- Bardiya, N., Somayaji, D., and Khanna, S. 1996. Biomethane of banana peel and pineapple Waste. Bioresource Technology. 58: 73-76.
- Blackburn, B., MacDonald, T., McCormack, M., Perez, P., and Tiengco, V. 1999. Evaluation of biomass-to-ethanol fuel potential in California. California energy xommission docket 1999-12-22-500-99-022.
- Bouallagui, H., Cheikh, R., Marouani, L., and Hamdi, M. 2003. Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. Bioresource Technology. 86: 85–89.
- Clarke, W., Radnidge P, Lai, T., Jensen, P., and Hardin M. 2008. Digestion of waste bananas to generate energy in Australia. Waste Management. 28: 527–33.
- Chomsurin, C. 1997. Evaluation of Gas Migration and methane oxidation in a domestic solid waste landfill. M.S. thesis, Asian Institute of Technology, Bangkok.
- Coalla, H., Fernandez J.M., Moris, M.A., and Lopez, M.R. 2009. Biogas generation apple pulp. Bioresource Technology. 100: 3843–3847.
- Derniral, B., and Yenigun O. 2002. The effect of change in volatile fatty acid (VFA) composition on methanogenic upflow filter reactor (UFAF) performance. Environ Technol. 23: 1179-1187.
- Diekhoff, G. 1992. Statistics for the Social and Behavioral Sciences: Univariate, Bivariate, Multivariate. Wm. C. Brown Publishers, Dubuque, IA.
- Gerardi, M.H. 2003. The microbiology of anaerobic digesters. New Jersey: John Wiley & Son.
- Gibson, T., and Smyth, M. 2007. Organic Waste Biodegradability Test Bio Methane Potential Method. In Report for Cambi UK Ltd.

- Glazer, N.A., and Nikaido, N. 1995. Microbial biotechnology: Fundamental of applied microbiology. W.H. Freeman & Company.
- Harjarnis, S.R., and Ranade, D.R. 1994. Effect of propionate toxicity on some methanogens at different pH values and in combination with butyrate. In: Proceeding of 7th International Symposium on Anaerobic Digestion. South Africa. 46-49.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. [Online]. Available from: http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/ [2010, May 14].
- Kayhanian, M., and Hardy, S. 1994. The impact of four design parameters on the performance of a high-solids anaerobic digestion of municipal waste for fuel gas production. Environmental Technology. 15: 557-567.
- Lane, A.G. 1984. Laboratory Scale Anaerobic digestion of fruit and vegetable solid waste. Biomass. 5: 245-259.
- Lesteur, M., et al. 2009. Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review. Process Biochemistry. 45: 431-440.
- Mata-Alvarez J., Viturtia, A., Luengo, P., and Cecchi, F. 1993. Kinetic and performance study of a batch two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. Biomass and Bioenergy. 5: 481-488.
- Metcalf and Eddy. 2003. Wastewater engineering. Fourth Edition. New York. The McGraw-Hill Companies.
- Nand, K., Viswanath, P., and Devi, S. 1992. Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Processing Wastes for Biogas Production. Bioresource Technology. 40: 43-48.
- Moody, L., Burns, R., Haan, W., and Spajic, R. 2009. Use of Biochemical Methane Potential (BMP) Assays for Predicting and Enhancing Anaerobic Digester Performance. In: 44th Croatian & 4th International Symposium on Agriculture. February 16 - 20, 2009. Croatia.
- Owen, W.P., Stuckey, D.C., Healy, J.B., Young, L.Y., and McCarty, P.L. 1979. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. Water Res 13: 485-492.

- Paepatung, N., nopharatana, A., and Songkasiri, W. 2009. Bio-Methane Potential of Biological Solid Material and Agricultural Waste.
[Online]. Available from: www.asian-energy-journal.info [2010, February 14].
- Patrick, W. and Philip, O. 2002. Bioreactor landfill design and operation. Waste age: 72-76.
- Ranade, D.R, Yeole, T. Y., and Godbole, S. H. 1987. Production of Biogas from Market Waste. 13: 147-153.
- Rittmann, B.E., and McCarty, P.L. 2001. Environmental biotechnology: Principles and applications. McGraw-Hill International Editions.
- Robyt, J.F. 1998. Essentials of carbohydrate chemistry. New York: Springer.
- Siegert, J., and Banks C. 2005. The effect of volatile fatty acid additions on the anaerobic digestion of cellulose and glucose in batch reactors. Process Biochem. 40: 3412-3418.
- Speece, R.E. 1996. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater. Arche Press. Nashville. Tennessee. p.1-393.
- Tchobanoglous, G., and Krieth F. 2002. Handbook of solid waste management. Second Edition. New York. The McGraw-Hill Companies.
- Valdez-Vazquez, I. and Poggi-Varaldo, H.M. 2009. Hydrogen production by fermentative consortia. Renewable and Sustainable Energy Reviews.1000-1013
- Wang, Y.,Zhang, Y., Wang, J., and Meng, L. 2009. Effects of volatile fatty acid concentrations on methane yield and methanogenic bacteria. Biomass and Bioenergy. 848-853.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ปริมาณการผลิตก๊าซ และ อัตราการผลิตก๊าซ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการทดลอง 30 วัน ในเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ในหน่วย มิลลิลิตรต่อวัน

จำนวนวัน	ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อวัน (ค่าเฉลี่ย มิลลิลิตรต่อวัน)							
	ส้ม	แตงไทย	สับปะรด	ส้มโอ	แตงโม	กล้วย	มะม่วง	ฝรั่ง
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	77.00	109.00	97.89	64.00	207.15	234.63	326.48	236.69
2	34.00	22.90	26.11	40.59	3.50	38.73	40.00	50.00
3	27.69	18.54	31.95	21.62	5.00	34.00	24.00	22.30
4	41.95	22.56	34.05	25.55	5.00	20.00	89.18	59.29
5	18.18	22.82	20.65	42.39	15.00	60.00	20.00	25.00
6	8.00	20.00	13.00	16.00	10.00	110.00	17.10	16.80
7	1.77	20.40	12.70	14.00	10.22	86.41	23.76	27.95
8	4.88	15.50	13.60	14.79	7.81	70.55	10.00	17.00
9	4.20	10.00	8.00	11.50	3.00	80.56	7.45	10.40
10	3.45	6.34	4.76	10.45	2.58	40.00	4.50	7.00
11	2.70	8.20	4.00	7.50	4.00	15.48	6.00	3.69
12	3.00	7.00	3.93	6.88	4.70	3.20	6.60	4.50
13	2.44	4.72	3.90	9.40	4.01	23.54	8.40	11.01
14	7.00	5.00	3.00	10.41	4.00	10.00	3.00	6.00
15	5.00	5.07	0.50	6.00	3.04	2.23	2.00	2.59
16	4.17	5.10	2.35	3.09	2.00	5.00	2.59	5.71
17	2.57	2.50	2.00	3.00	1.75	6.52	1.00	6.00
18	2.40	8.30	1.30	2.53	1.00	5.00	3.00	6.61
19	2.00	4.40	1.00	1.10	1.70	18.43	2.04	6.00
20	2.44	4.72	3.90	9.40	4.01	23.54	8.40	11.01
21	7.00	5.00	3.00	10.41	4.00	10.00	3.00	6.00
22	5.00	5.07	0.50	6.00	3.04	2.23	2.00	2.59
23	4.17	5.10	2.35	3.09	2.00	5.00	2.59	5.71
24	2.57	2.50	2.00	3.00	1.75	6.52	1.00	6.00
25	2.40	8.30	1.30	2.53	1.00	5.00	3.00	6.61

ตารางที่ ก-1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการทดลอง 30 วัน ในเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ในหน่วย มิลลิลิตรต่อวัน

จำนวนวัน	ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อวัน (ค่าเฉลี่ยมิลลิลิตรต่อวัน)							
	ส้ม	แตงไทย	สับปะรด	ส้มโอ	แตงโม	กล้วย	มะม่วง	ฝรั่ง
26	1.00	5.08	0.20	6.88	2.00	5.00	2.00	6.86
27	1.50	20.00	0.80	1.28	1.13	3.30	1.72	4.00
28	3.24	5.84	4.63	3.28	1.00	4.00	2.00	6.25
29	3.30	8.60	0.80	1.00	1.23	3.35	1.00	3.00
30	3.10	45.98	0.50	1.60	1.00	2.50	0.33	1.00
รวม	289.93	450.47	299.57	344.61	313.85	914.57	616.73	580.51

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-2 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการทดลอง 30 วัน ในเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ในหน่วย มิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็งระเหยที่เต็ม

จำนวนวัน	ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อวัน (ค่าเฉลี่ย มิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็งระเหยที่เต็ม)							
	ส้ม	แตงไทย	สับปะรด	ส้มโอ	แตงโม	กล้วย	มะม่วง	ฝรั่ง
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	57.98	181.67	64.32	21.52	254.27	116.75	133.99	212.41
2	25.60	38.17	17.15	13.65	4.30	19.27	16.42	44.87
3	20.85	30.90	20.99	7.27	6.14	16.92	9.85	20.01
4	31.59	37.60	22.37	8.59	6.14	9.95	36.60	53.21
5	13.69	38.03	13.57	14.25	18.41	29.85	8.21	22.44
6	6.02	33.33	8.54	5.38	12.27	54.73	7.02	15.08
7	1.33	34.00	8.34	4.71	12.54	43.00	9.75	25.08
8	3.67	25.83	8.94	4.97	9.59	35.10	4.10	15.26
9	3.16	16.67	5.26	3.87	3.68	40.08	3.06	9.33
10	2.60	10.57	3.13	3.51	3.17	19.90	1.85	6.28
11	2.03	13.67	2.63	2.52	4.91	7.70	2.46	3.31
12	2.26	11.67	2.58	2.31	5.77	1.59	2.71	4.04
13	1.84	7.87	2.56	3.16	4.92	11.71	3.45	9.88
14	5.27	8.33	1.97	3.50	4.91	4.98	1.23	5.38
15	3.77	8.45	0.33	2.02	3.73	1.11	0.82	2.32
16	3.14	8.50	1.54	1.04	2.45	2.49	1.06	5.12
17	1.94	4.17	1.31	1.01	2.15	3.24	0.41	5.38
18	1.81	13.83	0.85	0.85	1.23	2.49	1.23	5.93
19	1.51	7.33	0.66	0.37	2.09	9.17	0.84	5.38
20	1.60	4.35	0.33	2.70	1.23	3.98	1.23	6.28
21	1.51	5.60	0.39	0.67	3.74	1.43	0.46	4.40
22	2.09	10.00	2.09	0.62	2.45	1.81	0.41	7.18
23	10.92	22.17	1.31	0.34	2.06	2.99	1.03	3.79
24	1.98	22.25	0.83	1.08	1.23	2.49	0.82	3.95
25	1.02	13.33	0.26	1.24	4.05	3.30	1.20	5.69

ตารางที่ ก-2 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการทดลอง 30 วัน ในเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ในหน่วย มิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็งระเหยที่เต็ม (ต่อ)

จำนวนวัน	ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อวัน (ค่าเฉลี่ย มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่เต็ม)							
	ส้ม	แตงไทย	สับปะรด	ส้มโอ	แตงโม	กล้วย	มะม่วง	ฝรั่ง
26	0.75	8.47	0.13	2.31	2.45	2.49	0.82	6.16
27	1.13	33.33	0.53	0.43	1.38	1.64	0.71	3.59
28	2.44	9.73	3.04	1.10	1.23	1.99	0.82	5.61
29	2.48	14.33	0.53	0.34	1.51	1.67	0.41	2.69
30	2.33	76.63	0.33	0.54	1.23	1.24	0.14	0.90
รวม	218.33	750.78	196.82	115.89	385.23	455.07	253.10	520.97

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากการทดลองในวันที่ 7, 14, 21 และวันที่ 30 ในเศษขยะ
ผลไม้ 8 ชนิด ในหน่วย มิลลิลิตรต่อวัน

จำนวนวัน	ปริมาณก๊าซมีเทนต่อวัน (ค่าเฉลี่ย มิลลิลิตรต่อวัน)							
	ส้ม	แตงไทย	สับปะรด	ส้มโอ	แตงโม	กล้วย	มะม่วง	ฝรั่ง
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.56	5.78	13.71	3.5	2.21	7.2	3.96	2.8
14	1.98	0.83	1	2.91	0.53	0.17	0.3	0.6
21	0	0.84	0.09	0.13	0.66	0.14	0.33	1.8
30	0	26.83	0.1	0.05	0.22	0.08	0.06	0.6
รวม	2.54	34.28	14.9	6.59	3.62	7.59	4.65	5.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-4 ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากการทดลองในวันที่ 7, 14, 21 และวันที่ 30 ในเศษขยะ
ผลไม้ 8 ชนิด ในหน่วย มิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็งระเหย

จำนวนวัน	ปริมาณก๊าซมีเทนต่อวัน (ค่าเฉลี่ย มิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็งระเหย)							
	ส้ม	แตงไทย	สับปะรด	ส้มโอ	แตงโม	กล้วย	มะม่วง	ฝรั่ง
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.42	9.64	9.01	1.18	2.72	3.58	1.63	2.51
14	1.49	1.39	0.66	0.98	0.65	0.08	0.12	0.54
21	0	1.4	0.06	0.04	0.81	0.07	0.14	1.61
30	0	44.71	0.07	0.02	0.27	0.04	0.02	0.54
รวม	1.91	57.14	9.8	2.22	4.45	3.77	1.91	5.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-5 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้จากการทดลองในวันที่ 7, 14, 21 และวันที่ 30 ในเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ในหน่วย มิลลิลิตรต่อวัน

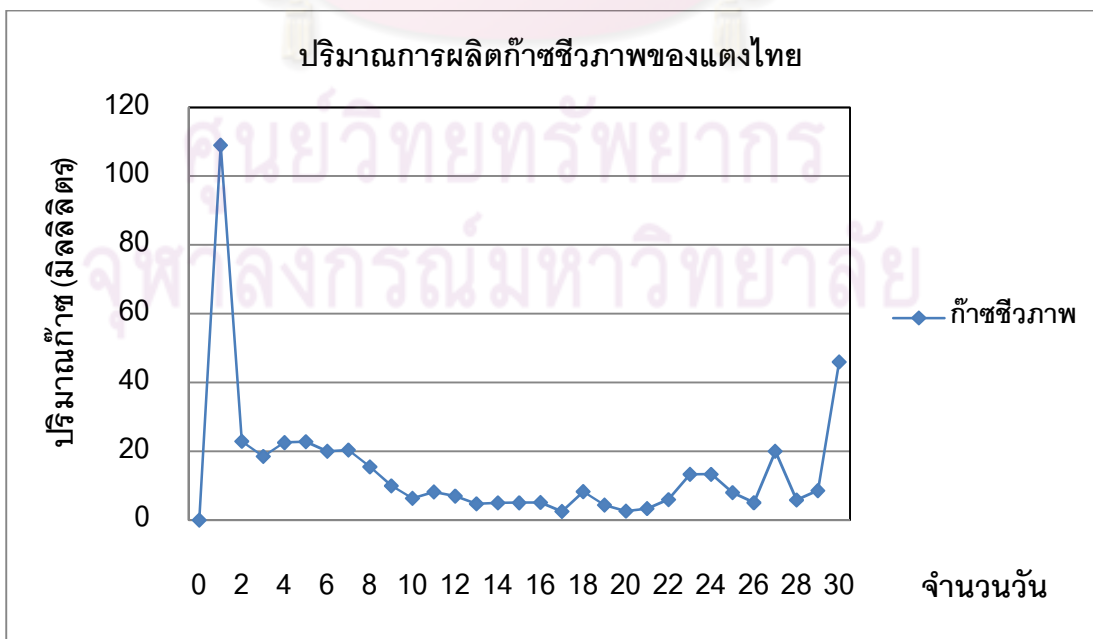
จำนวนวัน	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อวัน (ค่าเฉลี่ย มิลลิลิตรต่อวัน)							
	ส้ม	แตงไทย	สับปะรด	ส้มโอ	แตงโม	กล้วย	มะม่วง	ฝรั่ง
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	1.50	11.90	10.71	8.87	6.13	69.14	19.80	20.97
14	4.67	3.08	2.25	5.67	2.67	7.67	1.85	3.90
21	1.40	1.79	0.30	1.73	1.93	2.16	1.33	2.04
30	1.55	15.33	0.29	1.28	0.55	1.79	0.15	0.32
รวม	9.12	32.11	13.55	17.55	11.28	80.76	23.14	27.23

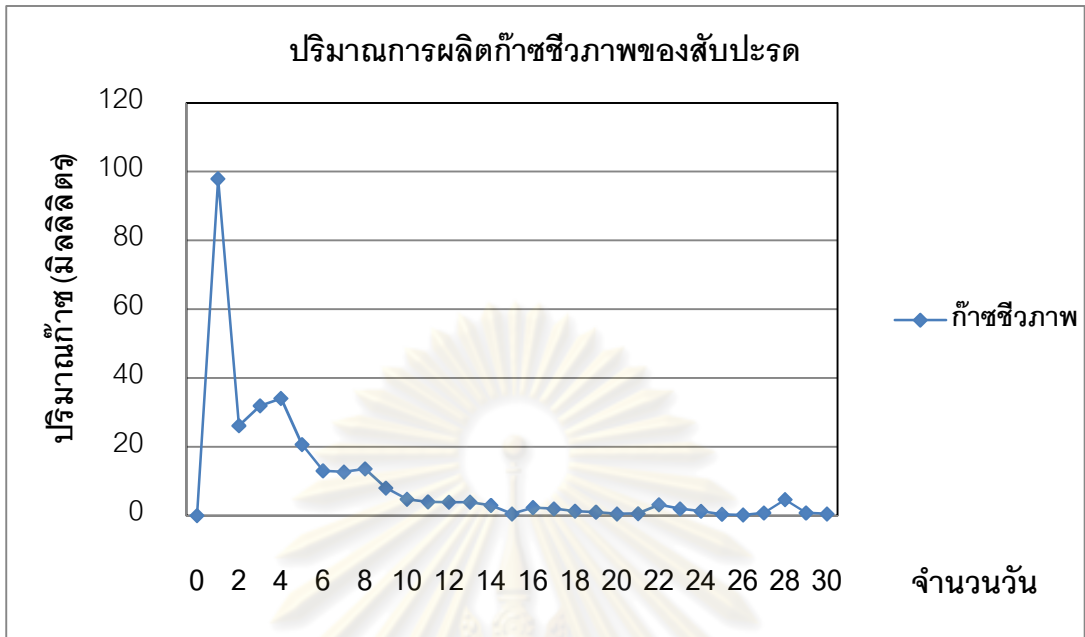
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-6 ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้จากการทดลองในวันที่ 7, 14, 21 และวันที่ 30 ในเศษขยะผลไม้ 8 ชนิด ในหน่วย มิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็งระเหย

จำนวนวัน	ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อวัน (ค่าเฉลี่ย มิลลิลิตรต่อวัน-กรัมของแข็งระเหย)							
	ส้ม	แตงไทย	สับปะรด	ส้มโอ	แตงโม	กล้วย	มะม่วง	ฝรั่ง
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	1.13	19.84	7.04	2.98	7.53	34.41	8.13	18.81
14	3.51	5.14	1.48	1.91	3.27	3.82	0.76	3.50
21	1.06	2.99	0.20	0.58	2.37	1.07	0.55	1.83
30	1.17	25.55	0.19	0.43	0.68	0.89	0.06	0.29
รวม	6.87	53.51	8.90	5.90	13.85	40.19	9.50	24.43

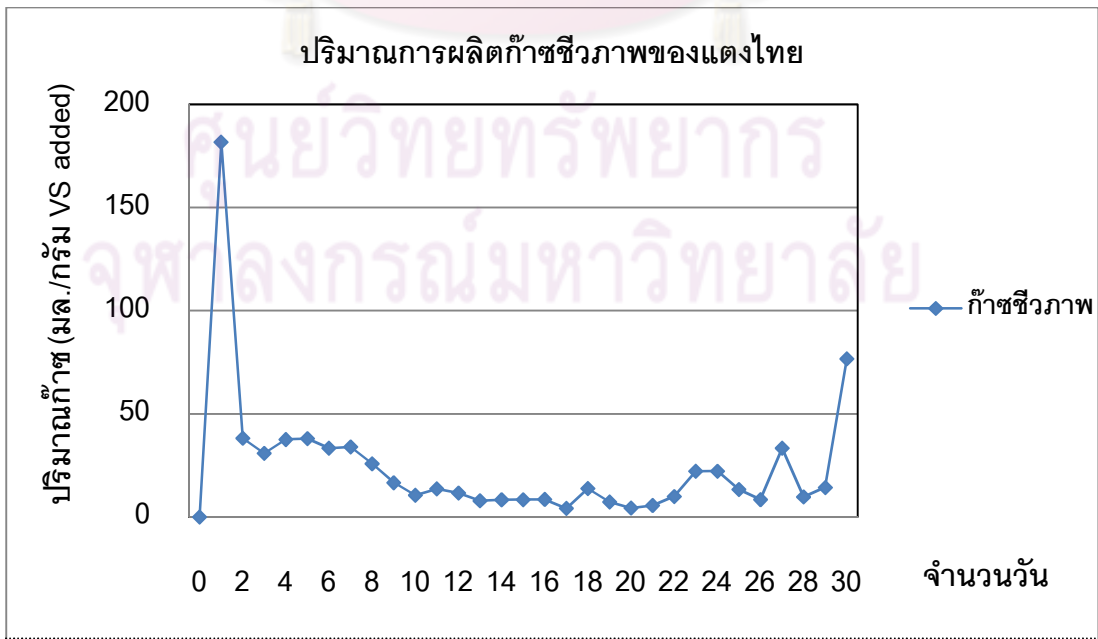
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

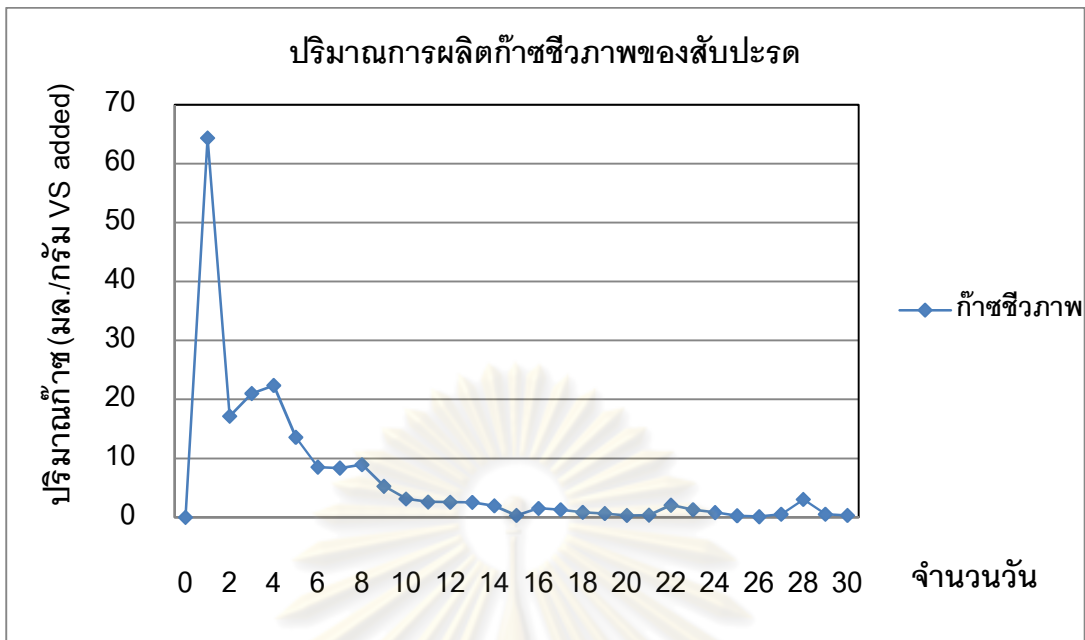








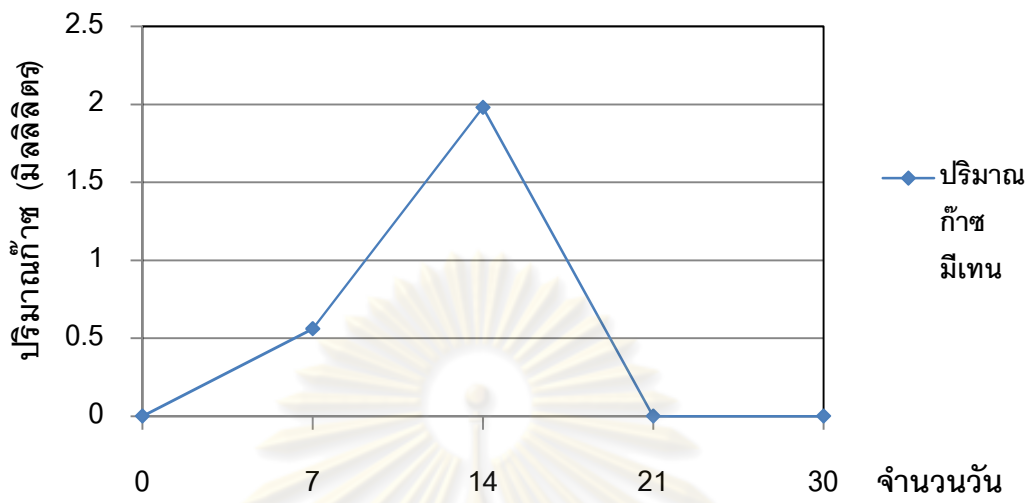




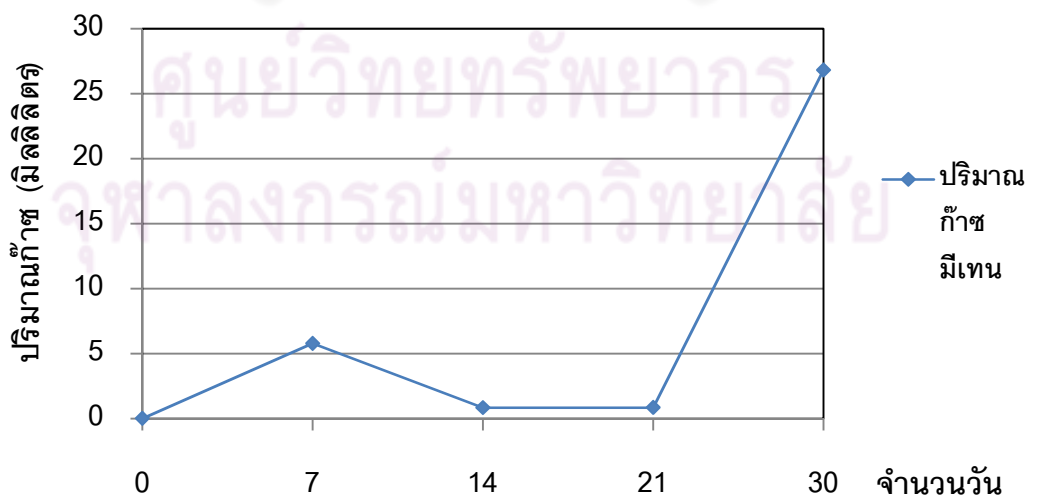


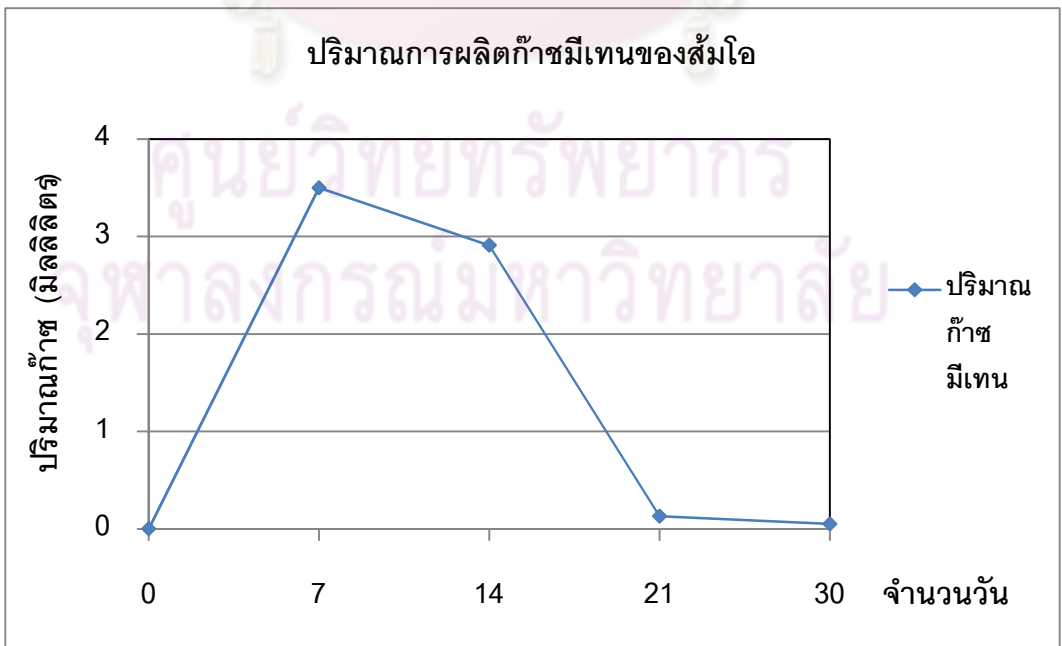


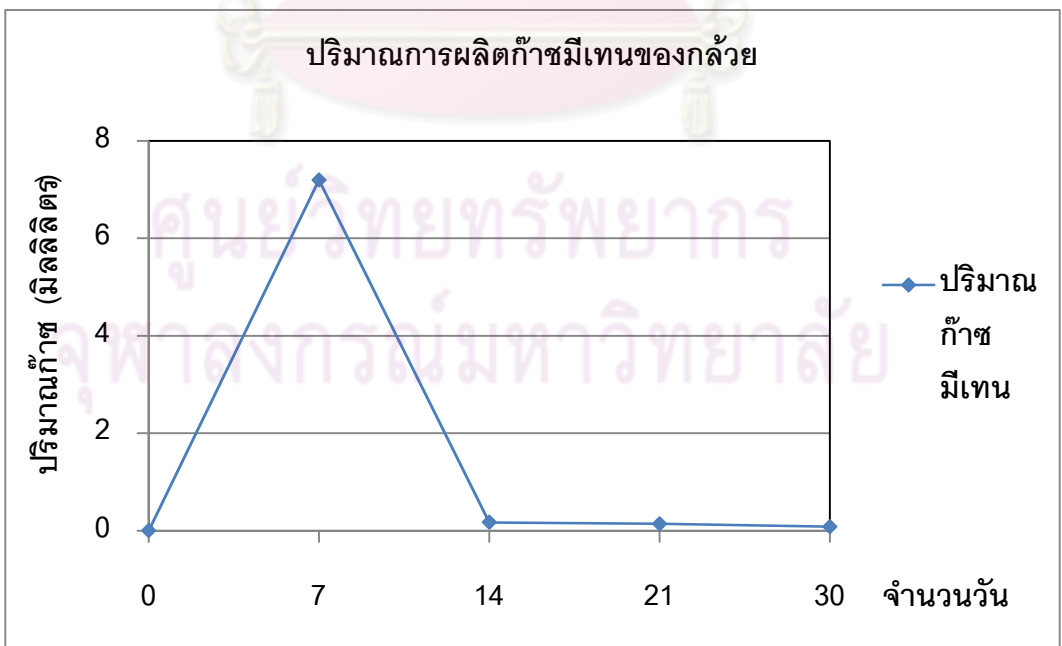
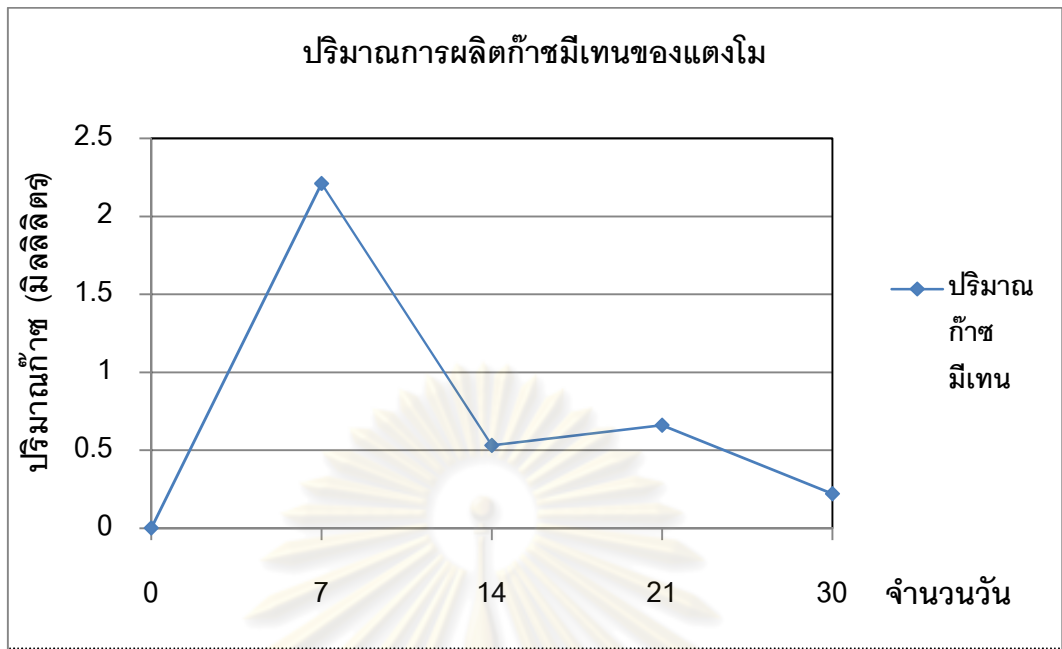
ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนของส้ม

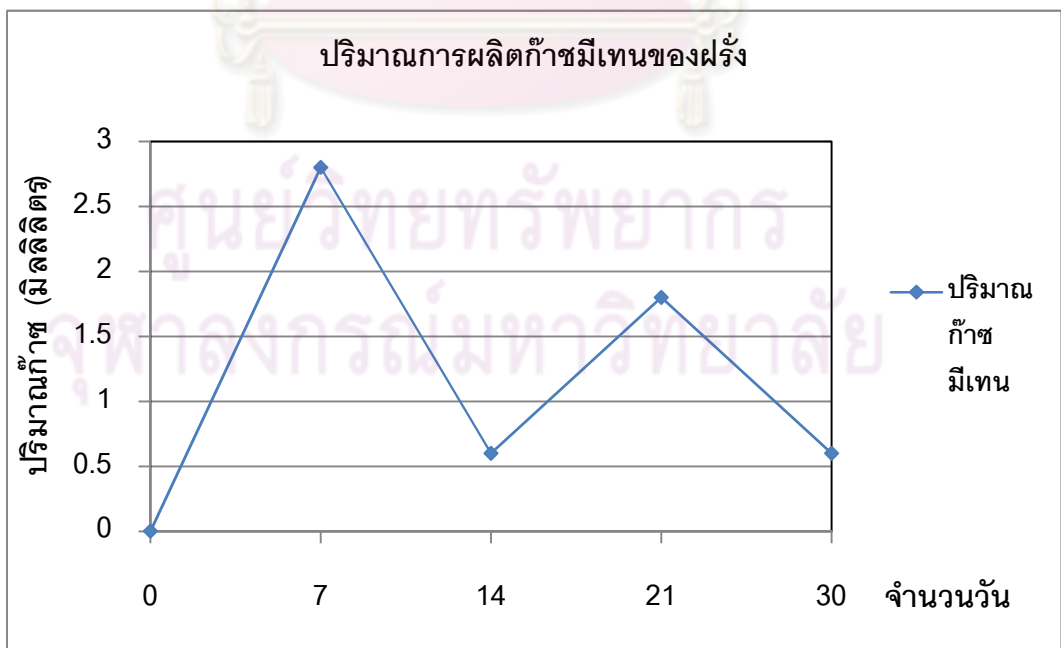
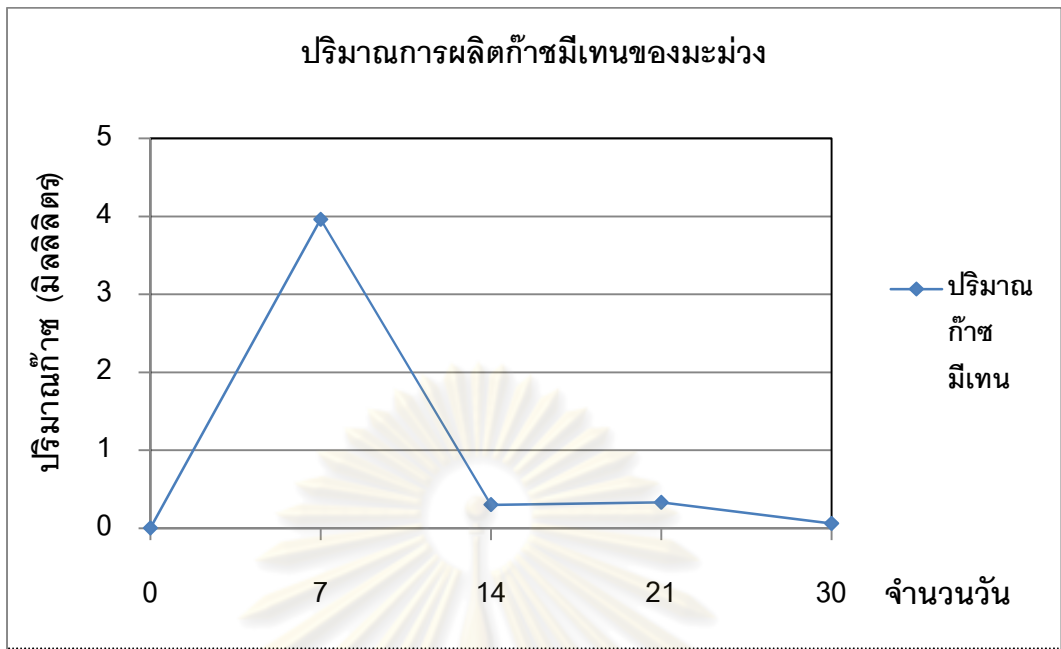


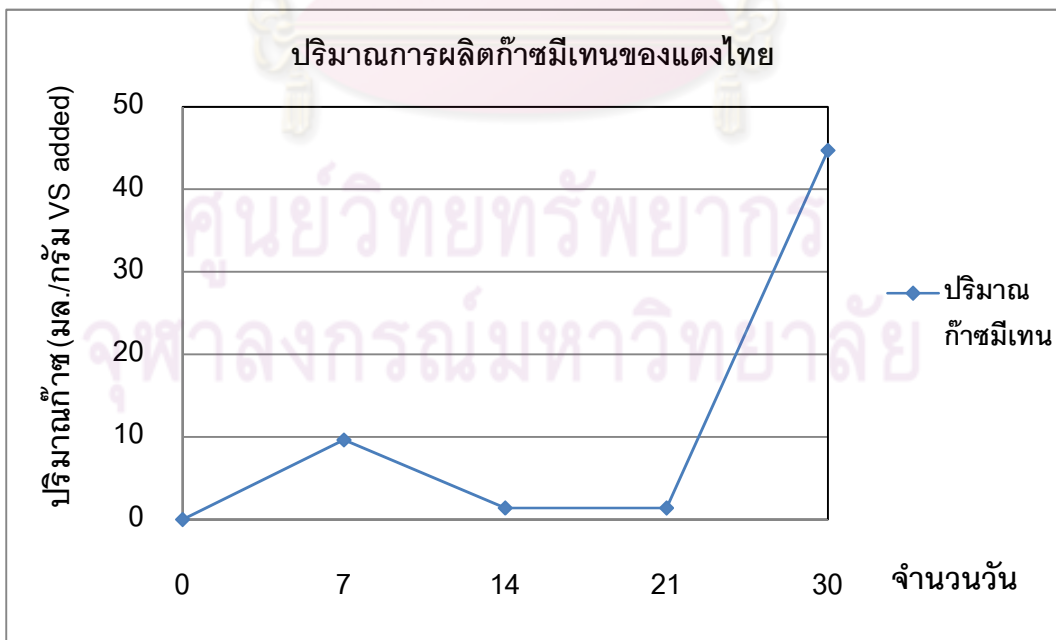
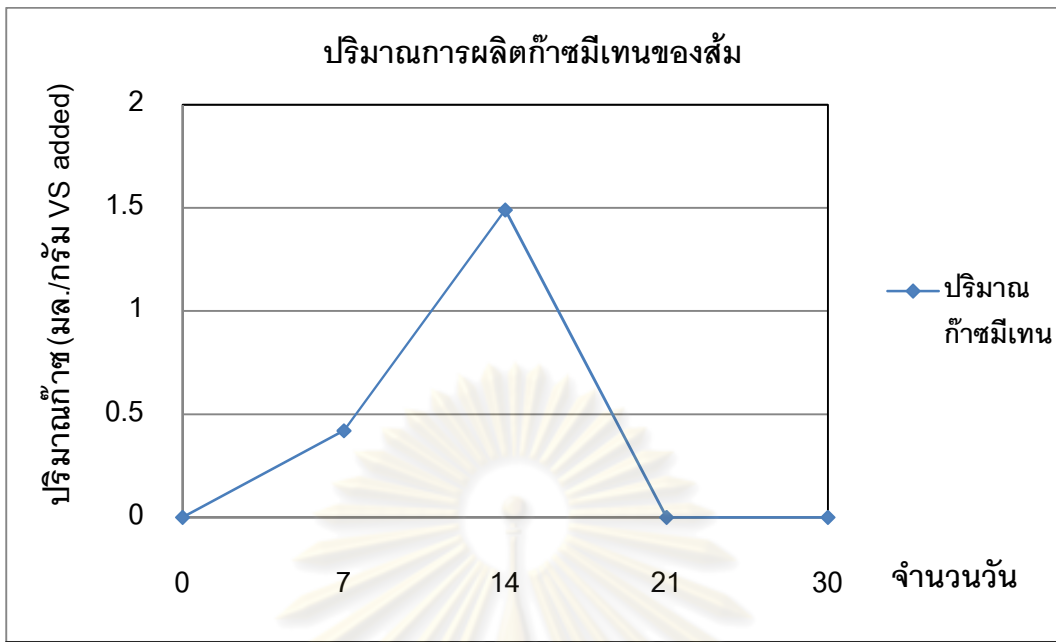
ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนของแตงไทย

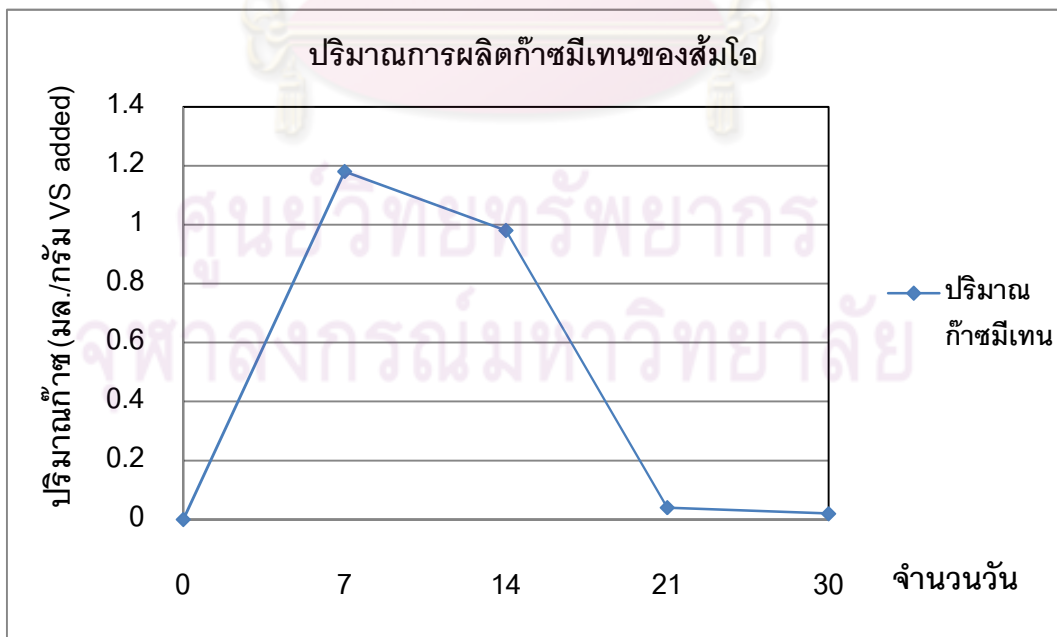




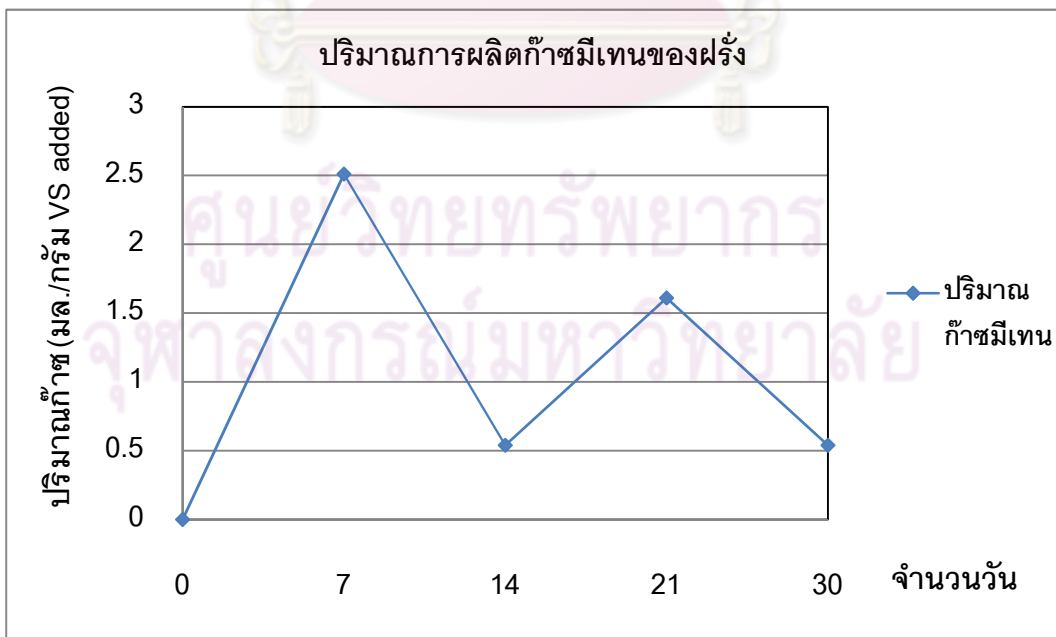


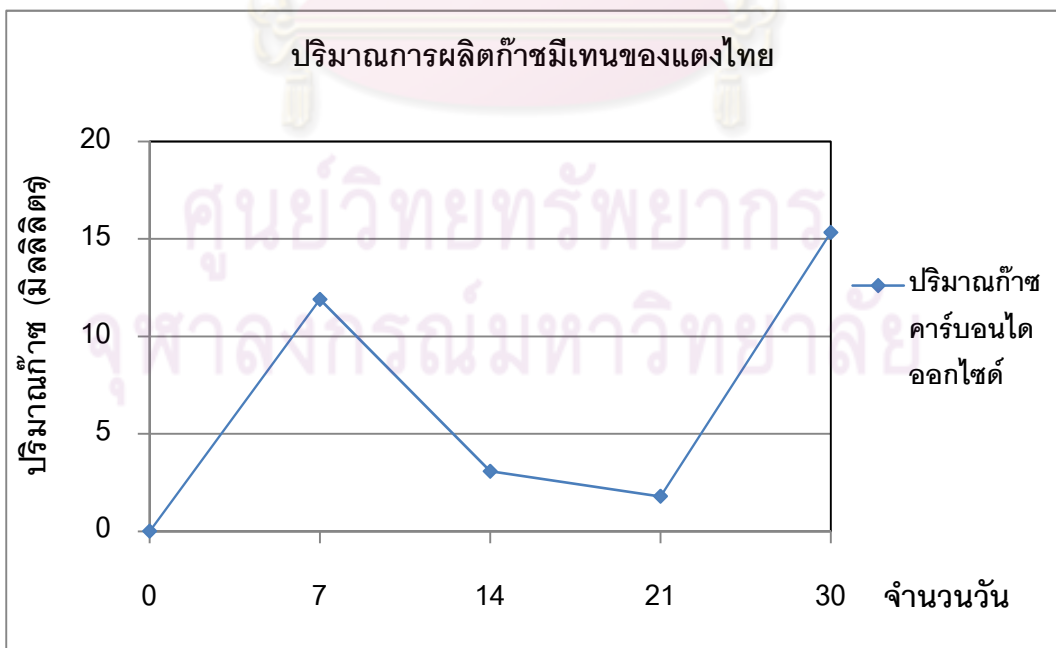
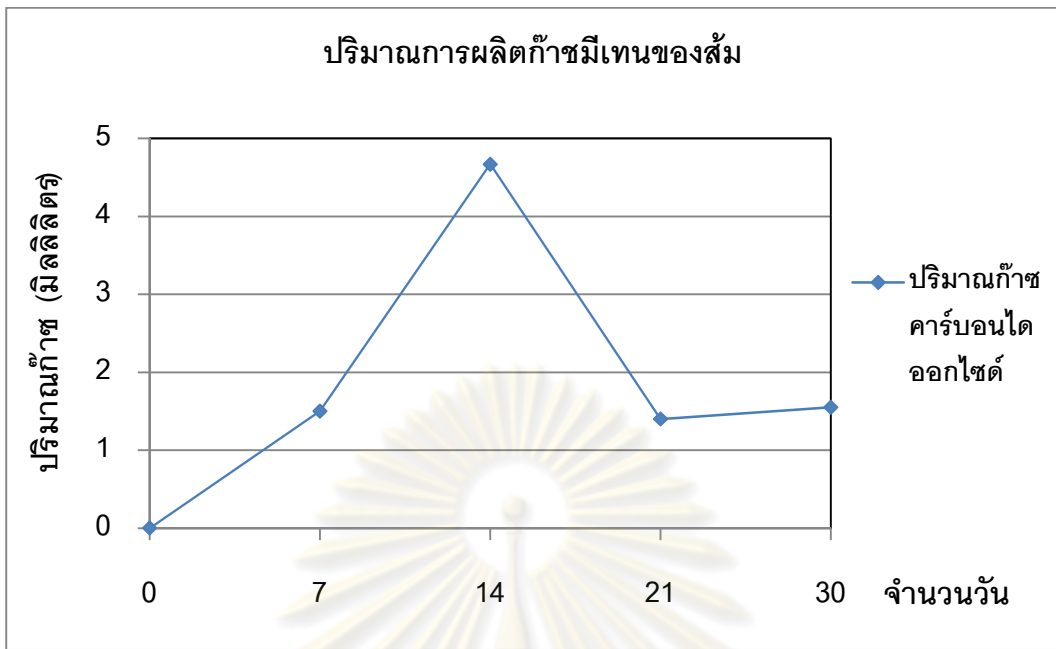


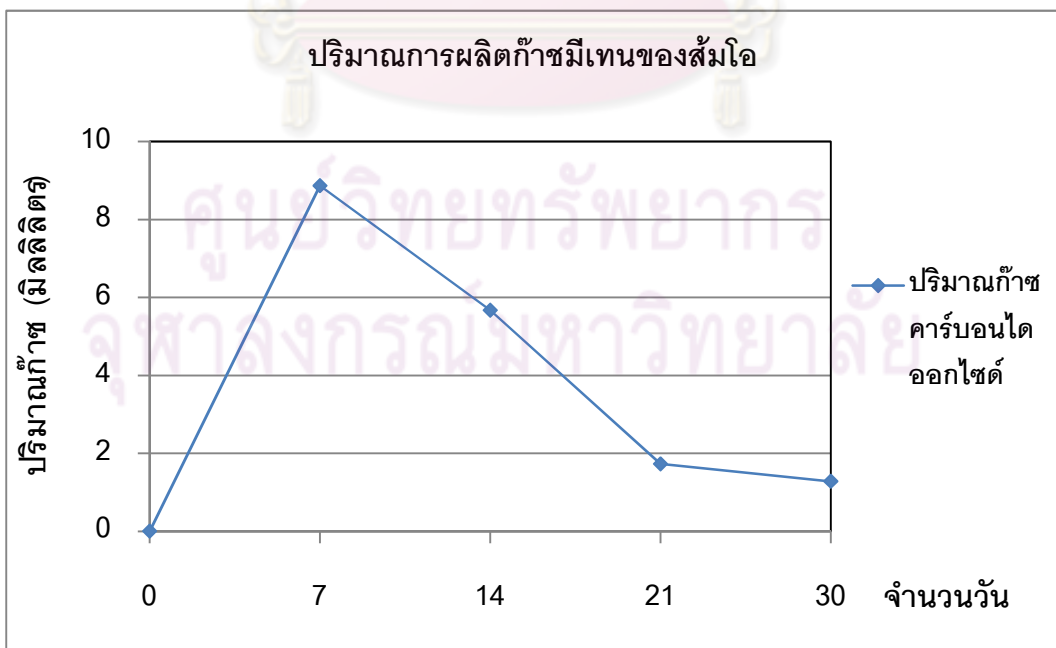


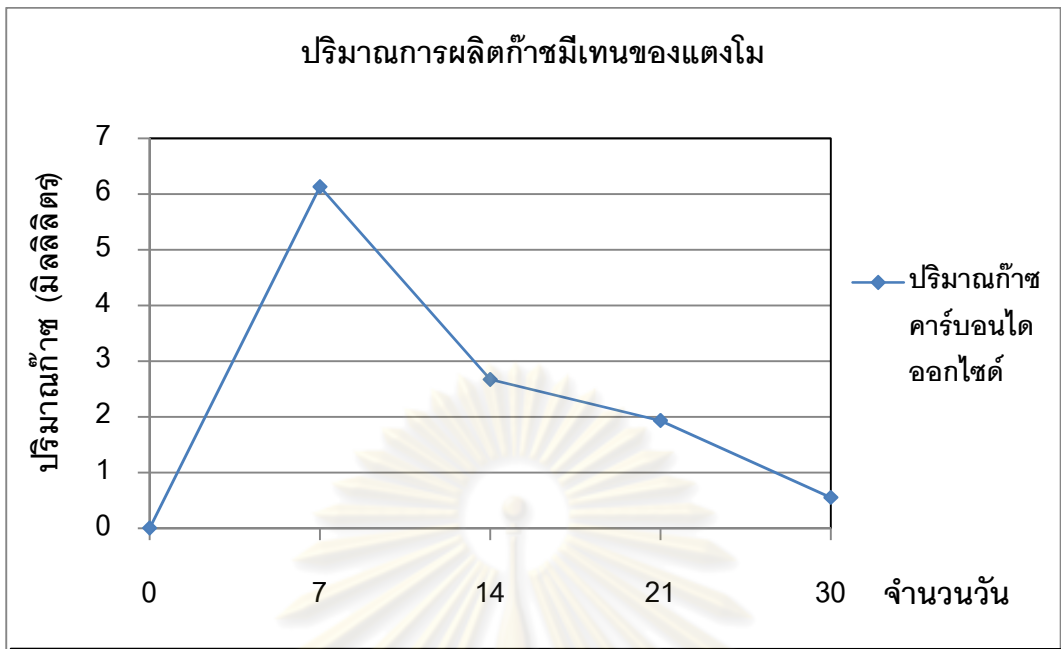


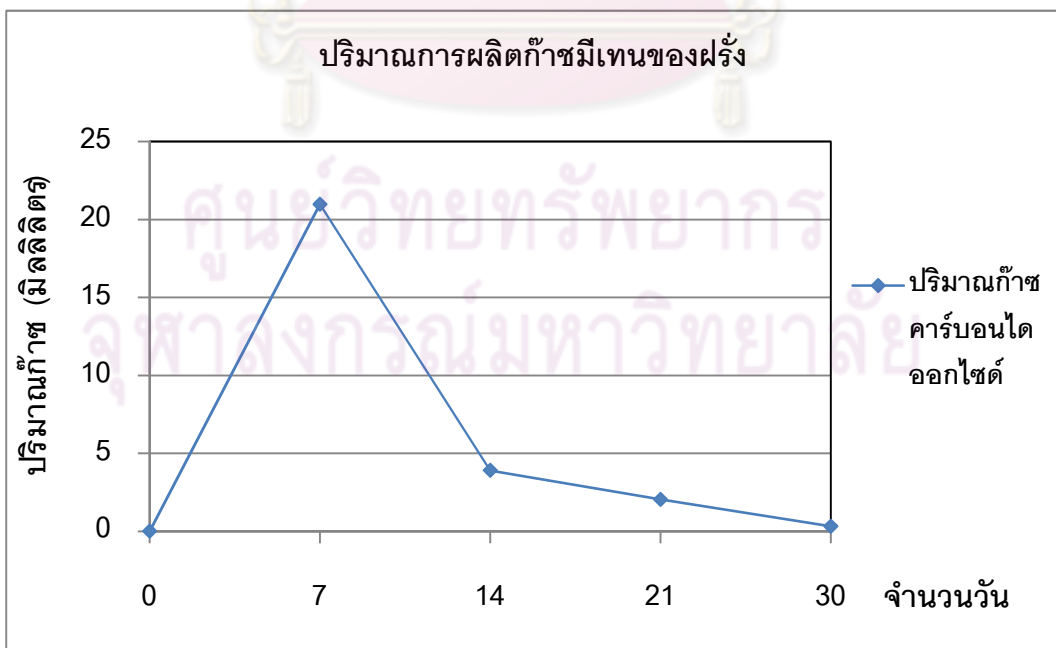
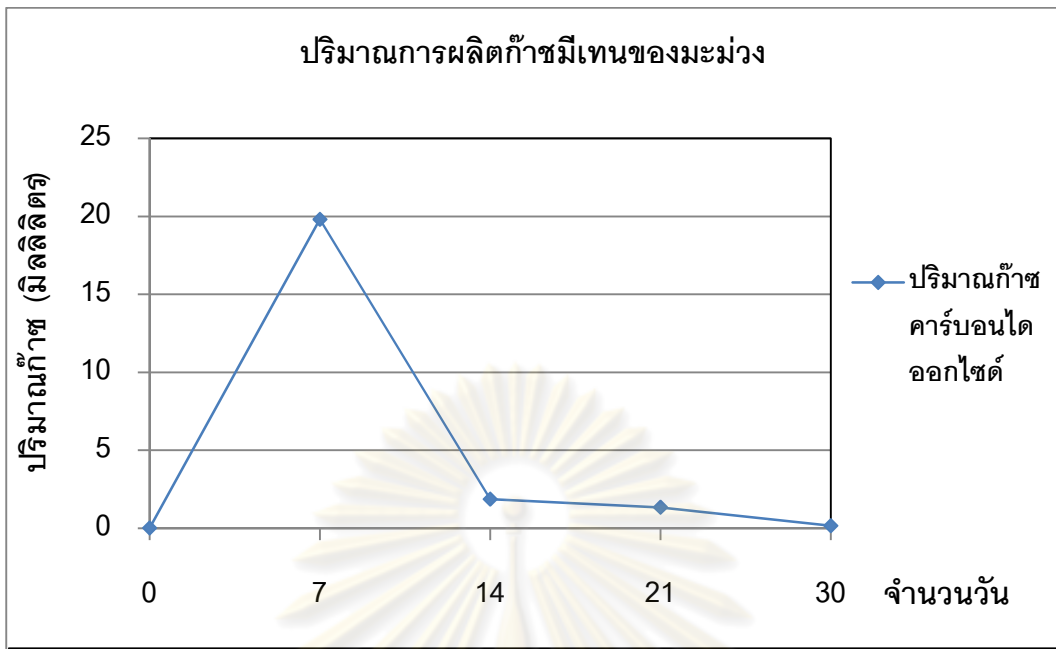


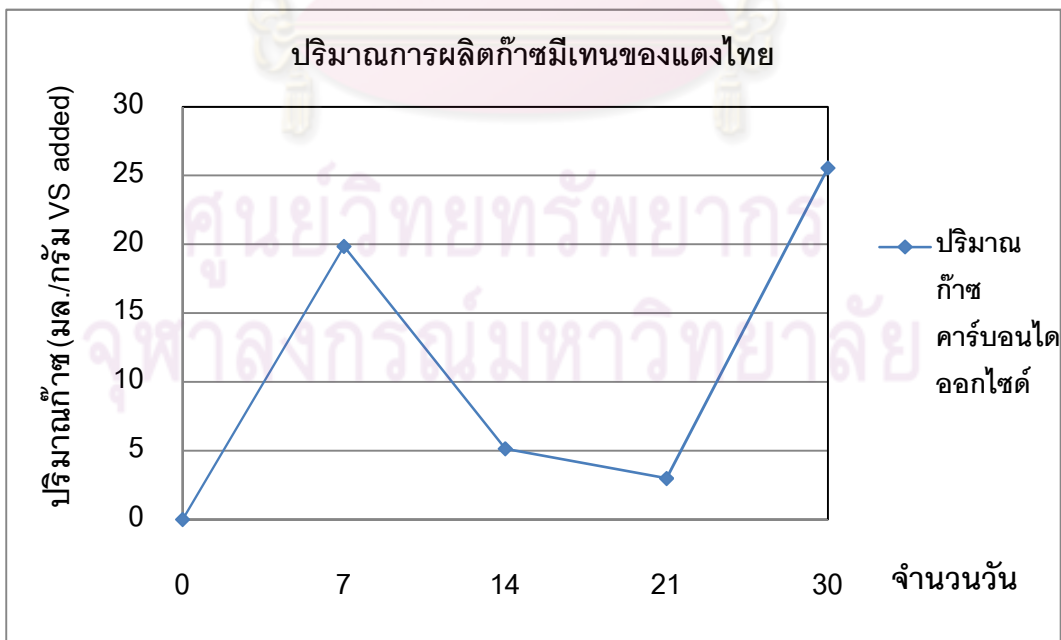
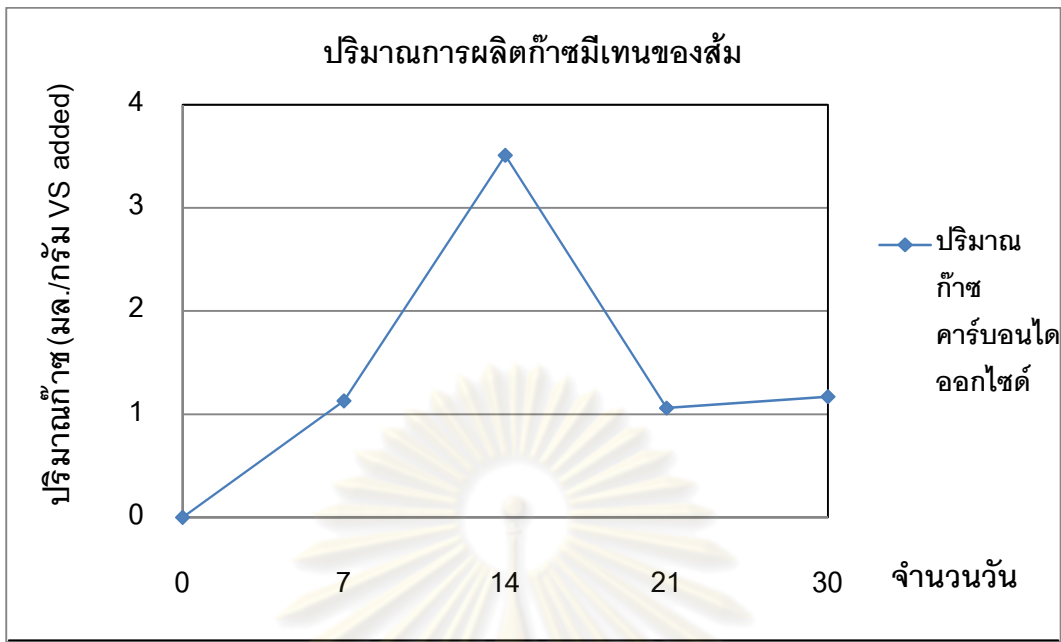


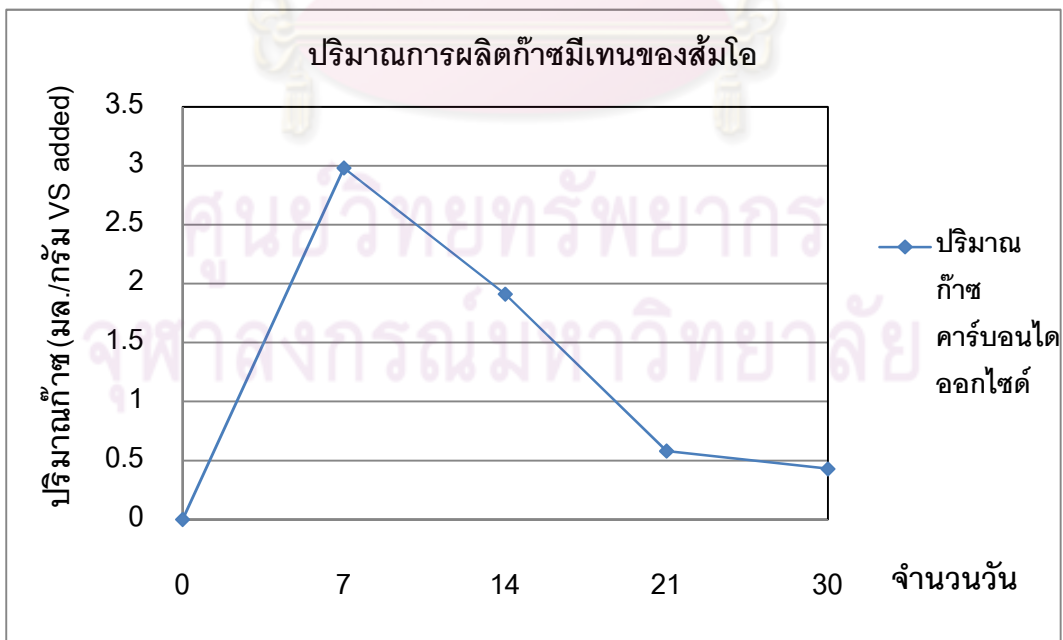


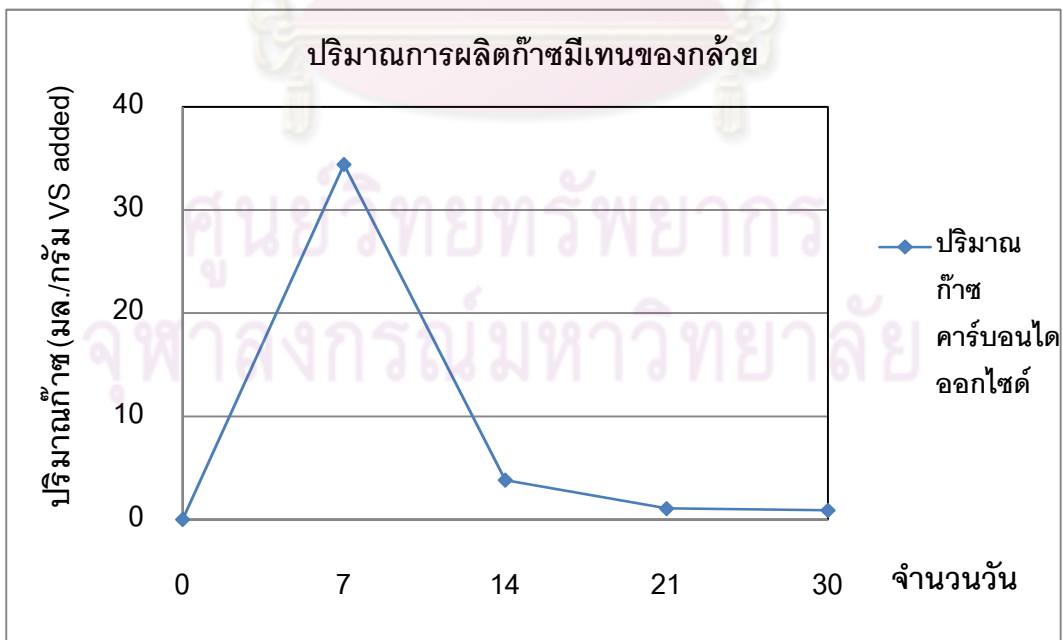
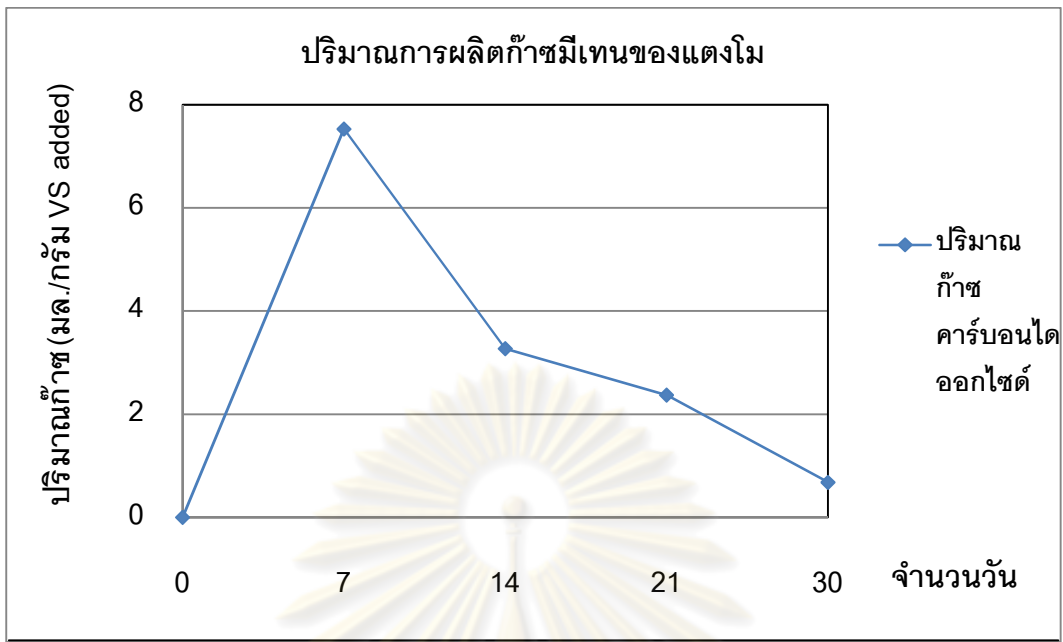


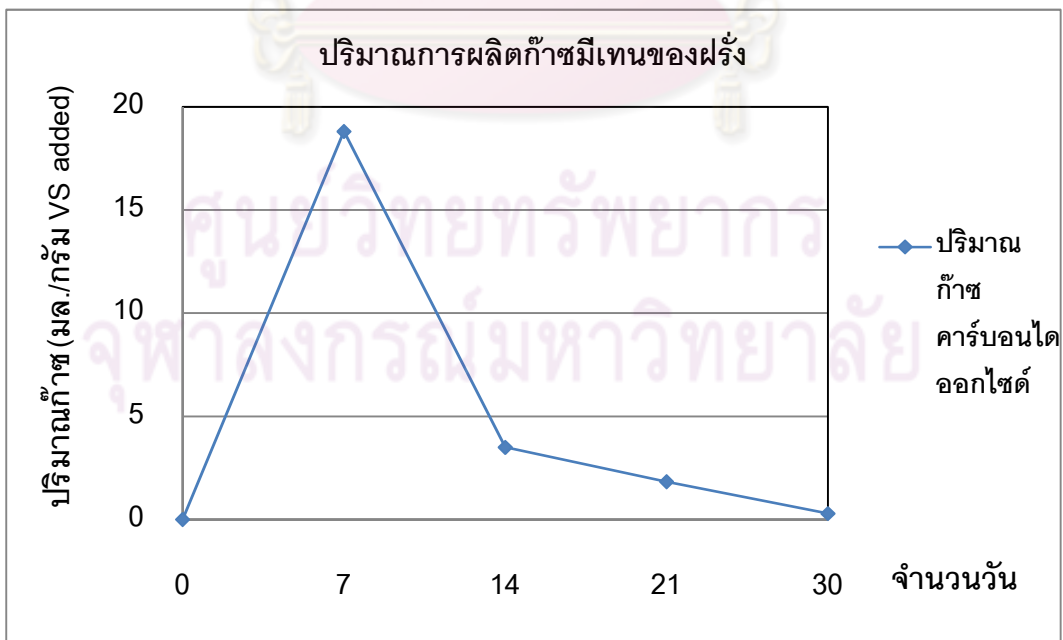














ภาคผนวก ข

ปริมาณก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่
และปริมาณก๊าซทั้งหมดได้จากการคำนวณ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข-1 ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น

1) เมื่อมะม่วงมีสูตรเคมี คือ $C_{87}H_{143}O_{87}N$ จากการคำนวณหาจำนวนโมล a,b,c,d ในสมการของ Tchobanoglous ข้างต้น แทนค่าจำนวนโมล a,b,c,d ในสูตรเคมี $C_aH_bO_cN_d$ หาน้ำหนักโมเลกุล



2) คำนวณหาปริมาณก๊าซมีเทน (CH_4) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เกิดจากการย่อยสลายโดยใช้น้ำหนักจำเพาะของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เท่ากับ 0.7176 และ 1.9783 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ดังนั้น สามารถคำนวณหาปริมาณก๊าซได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{ก๊าซมีเทน} &= \frac{(628)(0.0038 \text{ กก.})}{(2593)(0.7176 \text{ กก./ลบ.ม.})} \\
 &= 0.0013 \text{ ลบ.ม.ที่ STP}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์} &= \frac{(2101)(0.0038 \text{ กก.})}{(2593)(1.9783 \text{ กก./ลบ.ม.})} \\
 &= 0.0016 \text{ ลบ.ม.ที่ STP}
 \end{aligned}$$

$$\therefore \text{ปริมาณก๊าซชีวภาพ} = 0.0013 + 0.0016 = 0.0029 \text{ ลบ.ม.ที่ STP}$$

$$= 0.748 \text{ ลบ.ม./กก.}$$

$$= 748 \text{ มล./กรัม}$$

ตารางที่ ข-1 ผลการหาปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของผลไม้ชนิดต่างๆ

ลำดับ	ชนิดผลไม้	คาร์บอน (เปอร์เซ็นต์)	ไฮโดรเจน (เปอร์เซ็นต์)	ออกซิเจน (เปอร์เซ็นต์)	ไนโตรเจน (เปอร์เซ็นต์)	อัตราส่วน คาร์บอน ต่อ ไนโตรเจน	อัตราส่วนโดยโมล				จำนวนโมลต่อไนโตรเจน			
1	มะม่วง	40.37	5.56	53.53	0.54	74.76	3.36	5.50	3.35	0.04	87.21	142.82	86.80	1.00
2	สับปะรด	40.43	6.52	59.12	0.93	35.95	3.37	6.46	3.70	0.07	50.71	97.25	55.66	1.00
3	แตงไทย	42.19	7.04	50.20	0.57	74.02	3.51	6.97	3.14	0.04	86.34	171.32	77.12	1.00
4	แตงโม	40.63	5.77	52.00	1.2	33.86	3.38	5.71	3.25	0.09	39.50	66.70	37.94	1.00
5	ส้ม	41.31	7.05	49.80	1.84	22.45	3.44	6.98	3.11	0.13	26.19	53.15	23.70	1.00
6	ส้มโอ	38.68	7.07	55.25	1.00	36.68	3.22	7.00	3.45	0.07	45.12	98.07	48.38	1.00
7	ฝรั่ง	42.02	7.17	49.75	1.06	39.64	3.50	7.10	3.11	0.08	46.24	93.83	41.10	1.00
8	กล้วย	41.31	5.51	51.28	1.9	21.74	3.44	5.46	3.21	0.14	25.36	40.23	23.63	1.00

ตารางที่ ข-2 ปริมาณองค์ประกอบโดยโมลของเศษขยะผลไม้ชนิดต่าง

ลำดับ	สัดส่วนส่วนจำนวนโมล					สูตรเคมี อย่างง่าย	นน. โมเลกุล ของสูตร เคมี	โมล CH ₄	นน. CH ₄	โมล CO ₂	นน. CO ₂	จำนวนโมลต่อไนโตรเจน			
	ชนิด ผลไม้	คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน	ไนโตรเจน							คาร์บอน	ไฮโดรเจน	ออกซิเจน	ไนโตรเจน
1	มะม่วง	87	143	87	1	C ₈₇ H ₁₄₃ O ₈₇ N	2595.31	39	630	48	2101	87.21	142.82	86.80	1.00
2	สับปะรด	50	97	55	1	C ₅₀ H ₉₇ O ₅₆ N	1592.48	23	369	27	1188	50.71	97.25	55.66	1.00
3	แตงไทย	86	171	77	1	C ₈₆ H ₁₇₁ O ₇₇ N	2451.58	45	718	41	1815	86.34	171.32	77.12	1.00
4	แตงโม	39	67	38	1	C ₃₉ H ₆₇ O ₃₈ N	1158.07	18	289	21	924	39.50	66.70	37.94	1.00
5	ส้ม	26	53	24	1	C ₂₆ H ₅₃ O ₂₄ N	763.8	13	213	13	561	26.19	53.15	23.70	1.00
6	ส้มโอ	45	98	48	1	C ₄₅ H ₉₈ O ₄₈ N	1421.44	22	359	23	996	45.12	98.07	48.38	1.00
7	ฝรั่ง	46	94	41	1	C ₄₆ H ₉₄ O ₄₁ N	1317.41	24	387	22	963	46.24	93.83	41.10	1.00
8	กล้วย	25	40	24	1	C ₂₅ H ₄₀ O ₂₄ N	738.66	11	179	14	611	25.36	40.23	23.63	1.00

ตารางที่ ข-3 ปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี

ลำดับ	ชนิด ผลไม้	โมล CH ₄	นน. CH ₄	โมล CO ₂	นน. CO ₂	CH ₄ (ลบ.ม.ที่STP)	CO ₂ (ลบ.ม.ที่STP)	Gas รวม	Gas รวม (ลบ.ม/กก.)	Gas รวม (มล./กรัม ของแข็งระเหย)
1	มะม่วง	39	630	48	2101	0.0013	0.0016	0.0029	0.748	748
2	สับปะรด	23	369	27	1188	0.0014	0.0016	0.0030	0.700	700
3	แตงไทย	45	718	41	1815	0.0017	0.0015	0.0032	0.783	783
4	แตงโม	18	289	21	924	0.0016	0.0019	0.0035	0.751	751
5	ส้ม	13	213	13	561	0.0017	0.0016	0.0033	0.759	759
6	ส้มโอ	22	359	23	996	0.0012	0.0012	0.0025	0.706	706
7	ฝรั่ง	24	387	22	963	0.0018	0.0017	0.0035	0.779	779
8	กล้วย	11	179	14	611	0.0013	0.0017	0.0030	0.755	755

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

คำกรดไข่มั่นระเหยง่าย

ศูนย์วิทยพัรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-1 ค่ากรดไขมันระเหยของส้ม

วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH ₃ COOH)
3	3,750
6	4,500
9	6,750
12	6,600
15	7,237.5
18	8,700
21	5,625
24	8,775
27	6,375
30	8,137.5

ตารางที่ ค-2 ค่ากรดไขมันระเหยของแตงไทย

วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH ₃ COOH)
3	5,625
6	1,0125
9	9,000
12	9,675
15	8,250
18	6,375
21	8,437.5
24	7,912.5
27	5,400
30	6,000

ตารางที่ ค-3 ค่ากรดไขมันระเหยของสับปะรด

วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH ₃ COOH)
3	9,000
6	4,875
9	11,932.5
12	8,137.5
15	6,225
18	11,775
21	8,662.5
24	8,400
27	9,450
30	8,850

ตารางที่ ค-4 ค่ากรดไขมันระเหยของแตงโม

วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH ₃ COOH)
3	3,375
6	2,962.5
9	1,350
12	4,125
15	3,075
18	3,187.5
21	5,775
24	6,525
27	6,262.5
30	4,365

ตารางที่ ค-5 ค่ากรดไขมันระเหยของกล้วย

วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH ₃ COOH)
3	7,125
6	5,100
9	3,150
12	7,050
15	5,925
18	6,375
21	6,600
24	7,275
27	7,875
30	7,215

ตารางที่ ค-6 ค่ากรดไขมันระเหยของส้มโอ

วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH ₃ COOH)
3	3,375
6	2,962.5
9	1,350
12	4,125
15	3,075
18	3,187.5
21	5,775
24	6,525
27	6,262.5
30	43,65

ตารางที่ ค-7 ค่ากรดไขมันระเหยของมะม่วง

วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH ₃ COOH)
3	5,625
6	4,725
9	5,775
12	8,325
15	6,900
18	9,750
21	6,075
24	9,075
27	9,000
30	7,875

ตารางที่ ค-8 ค่ากรดไขมันระเหยของฝรั่ง

วันที่	กรดไขมันระเหย (มก./ล. CH ₃ COOH)
3	1,475
6	5,175
9	4,425
12	1,750
15	1,200
18	1,625
21	3,750
24	3,750
27	4,875
30	1,675



ภาคผนวก ง

ค่าสภาพต่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง-1 ค่าสภาพต่างของส้ม

วันที่	สภาพต่าง (มก./ล. CaCO ₃)
3	2,500
6	1,550
9	1,550
12	3,200
15	2,500
18	1,600
21	5,150
24	2,450
27	4,450
30	2,400

ตารางที่ ง-2 ค่าสภาพต่างของแตงไทย

วันที่	สภาพต่าง (มก./ล. CaCO ₃)
3	12,400
6	15,850
9	10,550
12	12,900
15	10,850
18	10,650
21	14,650
24	15,050
27	10,750
30	11,550

ตารางที่ ง-3 ค่าสภาพต่างของสับปะรด

วันที่	สภาพต่าง (มก./ล. CaCO ₃)
3	6,200
6	2,675
9	5,400
12	5,100
15	5,725
18	5,900
21	5,100
24	5,550
27	5,650
30	4,850

ตารางที่ ง-4 ค่าสภาพต่างของแตงโม

วันที่	สภาพต่าง (มก./ล. CaCO ₃)
3	3,600
6	3,750
9	3,600
12	3,500
15	3,650
18	2,125
21	4,450
24	4,350
27	4,650
30	4,675

ตารางที่ ง-5 ค่าสภาพต่างของกล้วย

วันที่	สภาพต่าง (มก./ล. CaCO ₃)
3	3,350
6	4,450
9	4,500
12	4,150
15	5,000
18	4,250
21	6,100
24	2,100
27	6,000
30	5,900

ตารางที่ ง-6 ค่าสภาพต่างของส้มโอ

วันที่	สภาพต่าง (มก./ล. CaCO ₃)
3	2,950
6	3,050
9	1,950
12	2,350
15	2,800
18	2,250
21	3,750
24	4,250
27	4,250
30	3,550

ตารางที่ ง-7 ค่าสภาพต่างของมะม่วง

วันที่	สภาพต่าง (มก./ล. CaCO ₃)
3	5,900
6	6,350
9	5,700
12	8,700
15	7,600
18	7,300
21	6,900
24	7,750
27	6,950
30	7,600

ตารางที่ ง-8 ค่าสภาพต่างของฝรั่ง

วันที่	สภาพต่าง (มก./ล. CaCO ₃)
3	3,150
6	5,900
9	6,750
12	4,000
15	3,850
18	4,450
21	5,300
24	5,400
27	6,100
30	5,550



ภาคผนวก จ

ความเป็นกรด-ด่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ-1 ความเป็นกรด-ด่างของส้ม

วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
3	4.6
6	6
9	4.3
12	4.5
15	4.5
18	4.3
21	5.1
24	4.5
27	4.8
30	4.4

ตารางที่ จ-2 ความเป็นกรด-ด่างของแตงไทย

วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
3	8.3
6	8.3
9	8.2
12	8.3
15	8.3
18	8.3
21	8.4
24	8.4
27	8.6
30	8.4

ตารางที่ ๑-3 ความเป็นกรด-ด่างของสับปะรด

วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
3	5.3
6	5.0
9	4.9
12	4.8
15	4.9
18	4.6
21	4.7
24	4.8
27	4.9
30	4.8

ตารางที่ ๑-4 ความเป็นกรด-ด่างของแตงโม

วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
3	5.4
6	5.3
9	5.2
12	4.9
15	5.3
18	5.3
21	5.1
24	5.0
27	5.1
30	5.2

ตารางที่ ๑-5 ความเป็นกรด-ด่างของกล้วย

วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
3	4.6
6	4.8
9	5.2
12	4.8
15	5.0
18	5.0
21	4.9
24	4.2
27	5.0
30	5.1

ตารางที่ ๑-6 ความเป็นกรด-ด่างของส้มโอ

วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
3	4.9
6	4.8
9	4.8
12	4.9
15	5.0
18	4.7
21	4.8
24	5.0
27	4.9
30	4.9

ตารางที่ ๑-7 ความเป็นกรด-ด่างของมะม่วง

วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
3	5.2
6	5.3
9	5.4
12	5.9
15	5.3
18	5.3
21	5.3
24	5.4
27	5.3
30	5.4

ตารางที่ ๑-8 ความเป็นกรด-ด่างของฝรั่ง

วันที่	ความเป็นกรด-ด่าง
3	5.7
6	5.4
9	6.0
12	5.4
15	5.2
18	5.5
21	5.4
24	5.4
27	5.4
30	5.5



ภาคผนวก ฉ

อุณหภูมิต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ๑-1 อุณหภูมิที่ทำการการทดลองของเศษขยะผลไม้ทั้ง 8 ชนิด

วันที่	อุณหภูมิ (°C)	วันที่	อุณหภูมิ (°C)
1	33.0	16	31.0
2	30.2	17	28.9
3	30.5	18	31.2
4	32.0	19	30.6
5	31.1	20	32.5
6	30.4	21	31.4
7	34.0	22	30.5
8	30.3	23	30.2
9	32.7	24	32.8
10	31.3	25	31.5
11	29.7	26	30.1
12	30.4	27	29.9
13	29.8	28	32.0
14	30.1	29	33.3
15	33.0	30	30.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ช

การวิเคราะห์ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่มีผลต่อ
การผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ปิพิชญา พันธุระ เกิดเมื่อวันที่ 15 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดเพชรบุรี เป็นบุตรของ พ.อ. (พิเศษ) เฉลิมพงษ์ พันธุระ กับ พ.อ.หญิง พรสวรรค์ พันธุระ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พื้นพิภพ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย