

การผลิตก๊าซชีวภาพจากใบกระถินด้วยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน



นางสาวกรรณก ดุลยพัชร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Biogas production from Acacia leaves by Two-stage anaerobic digestion system

Miss Kornkanok Dulyapach



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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตก๊าซชีวภาพจากใบกระถินด้วยระบบหมักไร้ ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน
โดย	นางสาวกรรณก ดุลยพัชร์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ขวาลภาฤทธิ์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

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

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

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิ้มปิยากร)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(อาจารย์ ดร.วาสนศักดิ์ ลิ้มควรรสุวรรณ)

กรกนก ดุลยพัทธ์ : การผลิตก๊าซชีวภาพจากใบกระถินด้วยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสอง  
 ขั้นตอน (Biogas production from Acacia leaves by Two-stage anaerobic  
 digestion system) อ.ที่ปริกษานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.อรรถัย ชวาลภาฤทธิ์, 179 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบกระถินเทพนรงค์  
 ด้วยระบบหมักไร้ออกซิเจนสองขั้นตอนประกอบด้วยถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตเป็นถังผลิตกรด และตาม  
 ด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์เป็นถังผลิตก๊าซชีวภาพ การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรก  
 ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการระเบิดด้วยไ  
 น้ำที่อุณหภูมิ 121 °ซ ในการปรับสภาพเบื้องต้นใบกระถินเทพนรงค์เพื่อนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ  
 โดยใช้หลักการฟื้นฟูดอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพเบื้องต้น ผล  
 การศึกษาพบว่า ชุดการทดลองที่ปรับสภาพที่สภาวะความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์  
 ร้อยละ 3 ระยะเวลา 30 นาที ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราที่สูงที่สุด คือ 316.19 ลิตรต่อกิโลกรัม  
 ของแห้งระเหย โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงกว่าชุดควบคุมร้อยละ 89.71 การทดลองที่สองเป็น  
 การศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากใบกระถินสดและใบกระถินปรับสภาพในระบบถังหมัก  
 ไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักที่  
 ได้จากการหมักใบกระถินที่มีการเติมมูลโคเป็นหัวเชื้อในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต ผลการทดลอง  
 พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักคือ ช่วงที่น้ำหมักกรดมีอัตราการผลิตกรดไขมัน  
 ระเหยลดลง และเมื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตกรดในถังปฏิกรณ์ทั้งสองพบว่า ถังปฏิกรณ์ชุดใบ  
 กระถินสดมีประสิทธิภาพสูงกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพจะเป็นทำลายเชื้อจุลินทรีย์ประจำถิ่นใน  
 ใบไม้ และเป็นการละลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายในใบไม้ ทำให้สารอาหารและเชื้อจุลินทรีย์  
 เริ่มต้นในถังปฏิกรณ์ลิชเบตชุดใบกระถินปรับสภาพต่ำกว่าชุดใบกระถินสด และเมื่อนำน้ำหมักกรดของ  
 ทั้งสองชุดการทดลองมาศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า ชุดใบกระถินปรับสภาพและใบ  
 กระถินสดมีปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 100.39 และ 152.47 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแห้งระเหย  
 ตามลำดับ

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

# # 5570109121 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: BIOGAS PRODUCTION / PRETREATMENT / TWO-PHASE ANAEROBIC DIGESTION / LEACH BED REACTOR / ACACIA SPP. (AURICULIFORMIS X MANGIUM)

KORNKANOK DULYAPACH: Biogas production from Acacia leaves by Two-stage anaerobic digestion system. ADVISOR: ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., 179 pp.

The objective of the research was to evaluate the performance of methane production from *Acacia leaves* in two-stage anaerobic digestion in a Leach Bed reactor (acidification tank) followed by a continuously stirred tank reactor (methane tank). The experiment was divided into 2 parts. The first part was to investigate the effect of Sodium Hydroxide (NaOH) concentration and reaction time of steam explosion (121 °C) for enhancing biogas production from Acacia leaves. Response surface methodology (RSM) was used for optimizing pretreatment condition. The result of studying on RSM showed that The best pretreatment condition for acacia leaves was at 121 °C for 30 minute with 3%NaOH (w/v) which can enhance the biogas production up to 89.71% (316.19 L/kg VS ) that compared to the untreated sample. The second part was a comparative study of biogas production from fresh acacia leaves and acacia leaves pretreatment in two-stage anaerobic digestion. The first step would be the optimum time to dilute the leachate from each Leach Bed reactor. The results showed that acid production, enhanced when the digester was recirculation of the leachate. After the rate of volatile fatty acids decrease, the leachate was diluted. This might be due to product (VFAs) inhibition. The reactor of fresh acacia leaves is more efficiency than the reactor of acacia leaves pretreatment. The results of the experimental scale study show that the two-stage anaerobic digestion system: LBR followed by CSTR can produce biogas production of 100.39 and 152.47 L/kg VS of acacia leaves pretreatment and acacia leaves, respectively.

Department: Environmental Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยต้องขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ให้ความอนุเคราะห์ทุกท่าน ดังนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์ ซึ่งได้สละเวลาให้คำปรึกษา ให้ความรู้ คำแนะนำ และช่วยเหลือในงานวิจัยมาโดยตลอด จนทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงโดยสมบูรณ์ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ได้แก่ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล (ประธานกรรมการ) ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เบญจพร สุวรรณศิลป์ (กรรมการ) รองศาสตราจารย์ ดร.ตะวัน ลิมปิยากกร (กรรมการ) และ ดร.วาสนศักดิ์ ลิ้มควรรสุวรรณ (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย) ที่ได้กรุณาชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างยิ่ง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอน ถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ และมอบความปรารถนาดีให้แก่ผู้วิจัย รวมถึงบุคลากรของภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกมาตลอด

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่เอื้ออำนวยความสะดวกช่วยเหลือด้านเอกสารและการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนเป็นอย่างมาก ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ แก่ผู้วิจัย อีกทั้งยังคอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ และญาติพี่น้อง ที่ได้ให้การสนับสนุนและคอยผลักดัน รวมทั้งเป็นกำลังใจที่สำคัญที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เหตุสำคัญการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศไทย.....	4
2.2 สารชีวมวล.....	6
2.3 พรรณไม้สกุลอะคาเซีย (Acacia).....	11
2.4 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) .....	15
2.5 ก๊าซชีวภาพ .....	29
2.6 การปรับสภาพเบื้องต้นสารชีวมวล (Pretreatment) .....	33
2.7 วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response Surface Methodology; RSM).....	38
2.8 การย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (Two-stage anaerobic-digestion) .....	46
2.9 เทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวล .....	47

2.10 ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต (Leach bed reactor: LBR).....	49
2.11 ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Continuously Stirred Tank Reactor, CSTR).....	50
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	50
2.13 สรุปผลการทบทวนเอกสารและแนวทางการวิจัย .....	61
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	63
3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย .....	63
3.2 เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	66
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	74
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง .....	89
4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของไบโกระถินเทพนรงค์ .....	90
4.2 ผลการปรับสภาพเบื้องต้นไบโกระถินเทพนรงค์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการ กระเปิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส .....	91
4.3 ผลการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพนรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่สภาวะ ต่างๆ โดยวิธีบีเอ็มพี.....	100
4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีกรองของการหมักแบบบีเอ็มพี.....	104
4.5 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพไบโกระถินเทพนรงค์โดยใช้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการกระเปิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส โดยอาศัย หลักการพื้นผิวตอบสนอง .....	105
4.6 ผลการศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพนรงค์สดและไบโกระถิน เทพนรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นในระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน .....	111
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อธิบายผล และข้อเสนอแนะ.....	143
รายการอ้างอิง .....	148
ภาคผนวก.....	154
ภาคผนวก ก .....	155



ภาคผนวก ข .....	156
ภาคผนวก ค .....	159
ภาคผนวก ง.....	160
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	179



## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2 - 1 ความเข้มข้นของอ็อกซิเจนที่ละลายในน้ำของโลหะเบาที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย .....	24
ตารางที่ 2 - 2 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย .....	25
ตารางที่ 2 - 3 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน .....	29
ตารางที่ 2 - 4 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ .....	30
ตารางที่ 2 - 5 ลักษณะและสมบัติก๊าซชีวภาพ .....	30
ตารางที่ 2 - 6 ประเภทการปรับสภาพทางเคมีและสารเคมีที่ใช้ .....	34
ตารางที่ 2 - 7 สรุปประสิทธิภาพของการปรับสภาพเบื้องต้นสารชีวมวลด้วยกระบวนการต่างๆ .....	37
ตารางที่ 2 - 8 ข้อดีและข้อเสียของการปรับสภาพเบื้องต้นสารชีวมวลด้วยกระบวนการต่างๆ .....	37
ตารางที่ 2 - 9 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการทดลองกับสัญลักษณ์ตามชุดการทดลองแบบ ประสมส่วนกลาง .....	45
ตารางที่ 2 - 10 ข้อเด่นและข้อจำกัดของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวล .....	47
ตารางที่ 2 - 11 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชี วมวลที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น .....	58
ตารางที่ 2 - 12 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวลที่ผ่านการปรับ สภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ .....	59
ตารางที่ 2 - 13 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวลที่ผ่านการปรับ สภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อน .....	59
ตารางที่ 2 - 14 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด .....	60
ตารางที่ 2 - 15 เหตุผลของการพิจารณาเลือกชนิดชีวมวล วิธีการปรับสภาพเบื้องต้น และระบบ ผลิตก๊าซชีวภาพ .....	61
ตารางที่ 3 - 1 ขนาดของถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด (Leach Bed Reactor) .....	68
ตารางที่ 3 - 2 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์หาค่าขององค์ประกอบของไบโกระถิน .....	74
ตารางที่ 3 - 3 ความสัมพันธ์ของตัวแปรและรหัสตัวแปร .....	75

ตารางที่ 3 - 4 ความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปร.....	76
ตารางที่ 3 - 5 วิธีการวิเคราะห์ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลอง.....	77
ตารางที่ 3 - 6 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาในการเดินระบบถึงปฏิกรณ์แบบลิซเบด.....	84
ตารางที่ 3 - 7 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ.....	85
ตารางที่ 3 - 8 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาในช่วงการทดลอง.....	86
ตารางที่ 4 - 1 องค์ประกอบทางเคมีของไบกระถินเทพณรงค์.....	90
ตารางที่ 4 - 2 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของตัวแปรต่อปริมาณซีโอดีกรองหลังการปรับสภาพ.....	97
ตารางที่ 4 - 3 ข้อมูลผลผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดการทดลองทั้ง 13 ชุดการทดลอง.....	105
ตารางที่ 4 - 4 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของตัวแปรต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ.....	106
ตารางที่ 4 - 5 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลองกับจากสมการความสัมพันธ์... ..	108
ตารางที่ 4 - 6 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้สมการความสัมพันธ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ.....	110
ตารางที่ 4 - 7 องค์ประกอบทางเคมีของไบกระถินเทพณรงค์สด ไบกระถินเทพณรงค์ปรับสภาพ..	113
ตารางที่ 4 - 8 แสดงปริมาณไบกระถินเทพณรงค์ มูลโค และ น้ำประปาที่เติมลงไปจนถึงปฏิกรณ์ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ.....	115
ตารางที่ 4 - 9 ปริมาณกรดไขมันระเหย ปริมาณซีโอดี และปริมาณซีโอดีกรองของน้ำหมักกรดที่เก็บในวันที่มีการเจือจางน้ำหมักกรด .....	126
ตารางที่ 4 - 10 ลักษณะสมบัติของน้ำหมักกรดที่ได้จากการหมักไบกระถินเทพณรงค์ผสมมูลโคระยะเวลาในการหมัก 12 วัน .....	130
ตารางที่ 4 - 11 ลักษณะสมบัติของน้ำหมักที่ป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ .....	130
ตารางที่ 4 - 12 แสดงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในถังผลิตก๊าซชีวภาพชุดไบกระถินปรับสภาพและชุดไบกระถินสด .....	139
ตารางที่ 4 - 13 ตารางแสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย) ที่เกิดขึ้นจากน้ำหมักไบกระถินปรับสภาพและไบกระถินสด.....	140

ตารางที่ 4 - 14 เปรียบเทียบศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวลชนิดต่างๆ ด้วยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด..... 142

ตารางที่ 5 - 1 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้สมการความสัมพันธ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ ..... 144

ตารางที่ 5 - 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการปรับสภาพเบื้องต้นสารชีวมวลโดยวิธีต่างๆ ..... 145



## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2 - 1 การใช้พลังงานของประเทศไทย ปี 2552-2557.....	4
รูปที่ 2 - 2 การใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2552 - 2557 .....	5
รูปที่ 2 - 3 โครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชชั้นสูง.....	8
รูปที่ 2 - 4 พันธะพอลิเมอร์ของเซลลูโลส .....	9
รูปที่ 2 - 5 ชนิดพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส .....	9
รูปที่ 2 - 6 หน่วยโครงสร้างพื้นฐานของลิกนิน.....	10
รูปที่ 2 - 7 ลักษณะ (ก) ลำต้น (ข) ใบ (ค) ดอก และ (ง) ฝักของกระถินเทพณรงค์.....	14
รูปที่ 2 - 8 ลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน.....	17
รูปที่ 2 - 9 ภาพ 3 มิติของผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว .....	40
รูปที่ 2 - 10 contour plot ของผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว .....	40
รูปที่ 2 - 11 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ $k=2$ และ $k=3$ .....	43
รูปที่ 2 - 12 แสดงการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ $k = 3$ .....	43
รูปที่ 2 - 13 ตำแหน่งชุดการทดลองแบบประสมส่วนกลาง .....	44
รูปที่ 2 - 14 ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด (Leach bed reactor: LBR).....	49
รูปที่ 2 - 15 ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ (Continuously Stirred Tank Reactor, CSTR) .....	50
รูปที่ 3 - 1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	65
รูปที่ 3 - 2 ชุดทดลองบีเอ็มพี (ก) ขวดซีรัมซีชา (ข) จุกยางและฝาอลูมิเนียมแคม.....	67
รูปที่ 3 - 3 ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด (Leach Bed Reactor).....	69
รูปที่ 3 - 4 ระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด (Leach Bed Reactor) .....	70
รูปที่ 3 - 5 ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ (Completely Stirred Tank Reactor: CSTR) .....	72
รูปที่ 3 - 6 แผนผังการเดินระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน .....	73
รูปที่ 3 - 7 ชุดการทดลองสำหรับหาปริมาณก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี .....	78

รูปที่ 3 - 8	แผนผังการทดลอง โดยวิธีปีเอ็มพี .....	79
รูปที่ 3 - 9	ระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด .....	84
รูปที่ 3 - 10	แผนผังขั้นตอนการศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่าย.....	87
รูปที่ 3 - 11	แผนผังขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักไบโกระถิน.....	88
รูปที่ 4 - 1	ลักษณะไบโกระถินเทพณรงค์และสภาพไบหลังการบด .....	90
รูปที่ 4 - 2	ลักษณะของไบโกระถินเทพณรงค์หลังจากปรับสภาพที่สภาวะต่างๆ .....	93
รูปที่ 4 - 3	ลักษณะพื้นผิวของไบโกระถินเทพณรงค์หลังจากปรับสภาพที่สภาวะต่างๆ.....	95
รูปที่ 4 - 4	ปริมาณซีไอดีกรองที่ได้หลังจากปรับสภาพในแต่ละชุดการทดลอง.....	96
รูปที่ 4 - 5	ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการ ระเบิดด้วยไอน้ำ ต่อปริมาณซีไอดีกรองที่เกิดขึ้นหลังการปรับสภาพไบไม้ .....	98
รูปที่ 4 - 6	องค์ประกอบของไบโกระถินเทพณรงค์หลังการปรับสภาพในสภาวะต่างๆ .....	99
รูปที่ 4 - 7	ปริมาณก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพที่สภาวะต่างๆ .....	100
รูปที่ 4 - 8	ผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะต่างๆ .....	103
รูปที่ 4 - 9	ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีกรองของแต่ละชุดการทดลอง .....	104
รูปที่ 4 - 10	พื้นที่ผิวผลตอบ : แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอก ไซด์และระยะเวลาการระเบิดด้วยไอน้ำต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ.....	109
รูปที่ 4 - 11	กราฟแบบโครงร่าง : แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดร อกไซด์และระยะเวลาการระเบิดด้วยไอน้ำต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ .....	109
รูปที่ 4 - 12	ไบโกระถินเทพณรงค์ก่อนเข้าสู่ระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด.....	112
รูปที่ 4 - 13	ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด .....	114
รูปที่ 4 - 14	ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำหมักกรดจากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด .....	117
รูปที่ 4 - 15	แสดงสภาวะในถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด .....	118
รูปที่ 4 - 16	ปริมาณซีไอดีและซีไอดีกรองในน้ำหมักกรดจากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด .....	119
รูปที่ 4 - 17	ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในน้ำหมักกรดจากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด .....	122
รูปที่ 4 - 18	ชนิดของกรดไขมันระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด .....	123

รูปที่ 4 - 19 แสดงสภาวะในถังปฏิกรณ์แบบลิซเบด .....	124
รูปที่ 4 - 20 ปริมาณซีโอดีทั้งหมดและซีโอดีละลายในถังปฏิกรณ์แบบลิซเบด.....	125
รูปที่ 4 - 21 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงบ่งชี้เสถียรภาพของถังหมักกรดที่เดินระบบแบบแบตช์.....	129
รูปที่ 4 - 22 ค่าพีเอชในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ.....	131
รูปที่ 4 - 23 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ.....	132
รูปที่ 4 - 24 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถังผลิตก๊าซชีวภาพชุดไบกระถินปรับสภาพ.....	133
รูปที่ 4 - 25 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของถังผลิตก๊าซชีวภาพชุดไบกระถินสด.....	134
รูปที่ 4 - 26 แสดงอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวันและปริมาณกรดไขมันระเหยขาเข้า .....	136
รูปที่ 4 - 27 แสดงอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวันและปริมาณกรดไขมันระเหยขาเข้า .....	136
รูปที่ 4 - 28 ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร ต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด) ของถังผลิตก๊าซชีวภาพ.....	137
รูปที่ 4 - 29 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร).....	139

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจและการดำเนินชีวิตของคนทั่วโลก ซึ่งประเทศไทยต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศจำนวนมาก ทำให้ในแต่ละปีต้องสูญเสียเงินเป็นจำนวนมากในการจัดหาพลังงานเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการใช้พลังงานของคนในประเทศ และปัจจุบันแนวโน้มในการใช้พลังงานสูงขึ้นตามการขยายตัวทางเศรษฐกิจของประเทศ จึงมีความจำเป็นที่ต้องพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทน เพื่อตอบสนองความต้องการพลังงานที่สูงขึ้นและเพื่อเป็นการพัฒนาให้มีพลังงานใช้อย่างยั่งยืน

ประเทศไทยจัดเป็นประเทศที่มีศักยภาพทางด้านพลังงานทดแทนอยู่ในระดับสูง เนื่องจากเป็นประเทศเกษตรกรรมและมีที่ตั้งอยู่ในเขตภูมิศาสตร์ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชพันธุ์ต่างๆ โดยผลผลิตทางการเกษตรสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงาน ทั้งพลังงานชีวมวล ก๊าซชีวภาพ รวมถึงไบโอดีเซลและเอทานอล นอกจากนี้วัสดุเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมต่างๆยังสามารถก่อให้เกิดเป็นพลังงานได้อีกด้วย และในปัจจุบันได้มีการส่งเสริมการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อเสริมสร้างศักยภาพให้ภาคอุตสาหกรรมและชุมชนในการผลิตพลังงานจากชีวมวล โดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานก๊าซชีวภาพ ซึ่งเกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารแบบไร้ออกซิเจน โดยมีองค์ประกอบหลักคือ ก๊าซมีเทน ซึ่งมีค่าความร้อนสูงและสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนอื่นๆ ได้ เช่น พลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า เป็นต้น

กระถินเทพณรงค์ *Acacia hybrid (mangium x auriculaeformis)* เป็นหนึ่งในไม้โตเร็วที่รัฐบาลได้ส่งเสริมให้มีการปลูก เนื่องจากเนื้อไม้มีคุณสมบัติที่ดีสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง เช่น ไม้แปรรูป ทำเครื่องเรือน เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เป็นวัตถุดิบสำหรับทำเยื่อกระดาษ เป็นต้น (สาพิศ ร้อยอำแพง, 2543) ดังนั้นเมื่อนำเนื้อไม้มาใช้ประโยชน์ จะทำให้เหลือส่วนของใบเป็นจำนวนมาก ใบเหล่านี้เป็นชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลส ซึ่งเป็นส่วนที่มีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบสูง ดังนั้นใบกระถินเทพณรงค์จึงมีศักยภาพในการผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ แต่สารชีวมวลเหล่านี้มีองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีโครงสร้างซับซ้อน ทำให้ยากต่อการย่อยสลาย ดังนั้นจึงต้องมีการปรับสภาพเบื้องต้นใบไม้ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นการเพิ่มศักยภาพในกระบวนการผลิต งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาวิธีการปรับสภาพใบกระถินเทพณรงค์ที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ



จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนสามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นการแยกกลุ่มจุลินทรีย์สองกลุ่มที่สำคัญในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพออกจากกัน เพื่อสามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกลุ่มแบคทีเรียทั้งสองชนิด เพื่อให้แบคทีเรียในแต่ละกลุ่มสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้ทำการเดินระบบโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตเป็นถังหมักกรดและตามด้วยถังปฏิกรณ์กวนผสมเป็นถังผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อนำข้อมูลที่ได้เป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการย่อยสลายวัตถุดิบชีวมวลที่มีโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ และนำไปใช้ในการพิจารณาเพื่อเป็นพลังงานทางเลือกต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นใบบ่กระถินเทพนรงค์
2. เพื่อศึกษาผลของอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายในการหมักใบบ่กระถินเทพนรงค์ด้วยถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต
3. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักใบบ่กระถินเทพนรงค์ด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนผสม

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการโดยดำเนินการทดลอง ณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตงานวิจัยดังนี้

1. ใบบ่กระถินเทพนรงค์ก่อนนำมาใช้ในการทดลองจะนำมาบดให้มีขนาด 0.5 เซนติเมตร จากนั้นนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบหลักทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ ปริมาณความชื้น ปริมาณเถ้า สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน
2. การปรับสภาพเบื้องต้นใบบ่กระถินเทพนรงค์ โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส โดยใช้วิธีแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) มาออกแบบชุดการทดลอง แล้วเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพ
3. ศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซมีเทนจากใบบ่กระถินเทพนรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่สภาวะต่างๆ โดยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP)

4. ใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) มาเลือกชุดการทดลองที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสภาวะที่เหมาะสม
5. ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้เป็นระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (Two stage anaerobic digestion) โดยขั้นตอนแรกใช้ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด (Leach Bed reactor) ระดับห้องปฏิบัติการ ที่มีการเดินระบบการหมักแบบที่ละเท ปริมาณการใช้งานจริง 5 ลิตร เพื่อศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายในการหมักใบกระถิน และขั้นตอนที่สองใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor: CSTR) ระดับห้องปฏิบัติการ ที่มีการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ขนาดถังปฏิกรณ์ 6 ลิตร เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักใบกระถิน
6. พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด ปริมาณของแข็งแขวนลอย ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย ปริมาณคาร์บอน ปริมาณไนโตรเจน ค่าซีไอดีทั้งหมด สภาพความเป็นต่าง ปริมาณลิทโมสเฟส ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต่อวัน และองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

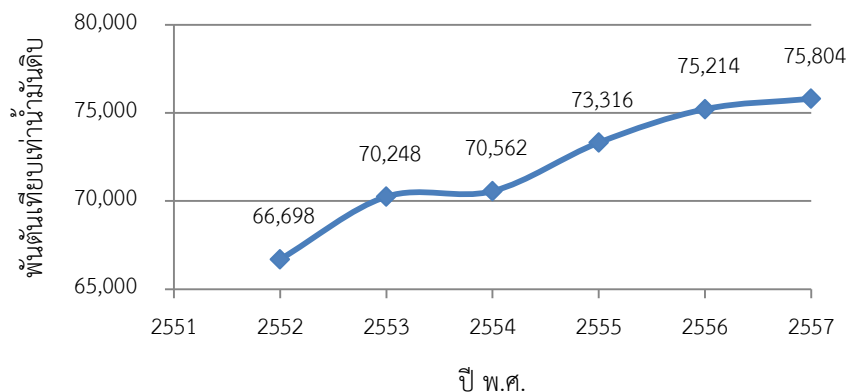
#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบกระถินเทพณรงค์และการเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้สารละลายต่างร่วมกับการเปิดด้วยไอน้ำ
2. ทราบประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบกระถินเทพณรงค์ด้วยระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

## บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 เหตุสำคัญการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศไทย

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งในการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศไทย ในแต่ละปีประเทศไทยมีอัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูลสถานการณ์พลังงานของประเทศไทยปี 2552 - 2557 พบว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นจากปีก่อน และการใช้พลังงานนี้ยังคงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2-1 ในแต่ละปีประเทศไทยมีการใช้พลังงานคิดเป็นมูลค่ากว่าหลายพันล้านบาท และต้องพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้พลังงานของคนในประเทศ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องจัดหาแหล่งพลังงานทดแทนภายในประเทศ เพื่อเป็นการลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศและเพื่อเป็นการพัฒนาให้มีพลังงานใช้อย่างยั่งยืน (กระทรวงพลังงาน, 2557a)



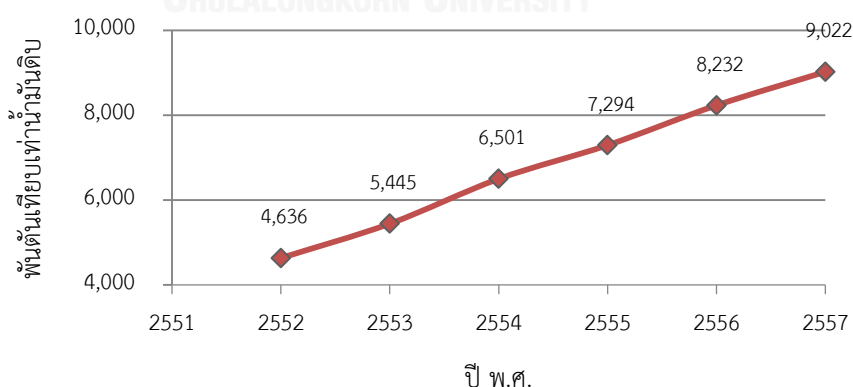
รูปที่ 2 - 1 การใช้พลังงานของประเทศไทย ปี 2552-2557

กระทรวงพลังงานได้กำหนดแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ. 2551-2565) โดยมอบหมายให้กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานดำเนินการจัดทำแผนปฏิบัติการตามกรอบแผนพัฒนาพลังงานทดแทน เพื่อให้สามารถดำเนินการพัฒนาพลังงานทดแทนด้านต่างๆ ให้สามารถผลิตไฟฟ้ารวมสะสมถึงปี 2565 จำนวน 5,604 เมกะวัตต์ ประกอบด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ 500 เมกะวัตต์ พลังงานลม 800 เมกะวัตต์ พลังน้ำ 324 เมกะวัตต์ พลังงานชีวมวล 3,700 เมกะวัตต์ ก๊าซชีวภาพ 120 เมกะวัตต์ ชยะ 160 เมกะวัตต์ นอกจากนี้ยังให้มีการพัฒนาเชื้อเพลิงชีวภาพ ได้แก่ เอทานอลและไบโอดีเซล และพลังงานความร้อนและก๊าซ NGV ซึ่งก่อให้เกิดสัดส่วนการใช้พลังงาน

ทดแทนได้ 20% ของปริมาณการใช้พลังงานของประเทศในปี 2565 การกำหนดแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปีดังกล่าว จึงมีความจำเป็นต้องสร้างแนวทางแผนพัฒนาในแต่ละเทคโนโลยีเพื่อให้เป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ (กระทรวงพลังงาน, 2551)

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีศักยภาพทางด้านพลังงานทดแทนอยู่ในระดับสูง เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมาก เช่น ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง เป็นต้น รวมถึงมีอุตสาหกรรมการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรซึ่งทำให้เกิดผลผลิตเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีศักยภาพสูงสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนได้หลายชนิด เช่น พลังงานชีวมวล ก๊าซชีวภาพ ไบโอดีเซล และเอทานอล เป็นต้น

ประเทศไทยมีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากข้อมูลการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2552-2557 พบว่ามีปริมาณสูงขึ้นจากปีก่อนๆ จากปี พ.ศ. 2552 ถึงปี พ.ศ. 2557 มีอัตราการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 94.6 ดังรูปที่ 2-2 ซึ่งเป็นผลมาจากนโยบายการพัฒนาพลังงานทดแทนที่มีเป้าหมายให้มีการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มขึ้นในทุกภาคส่วนของสังคม นอกจากนี้จะเป็นการลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลแล้ว ยังเป็นการลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศอีกด้วย เนื่องจากการพัฒนาพลังงานทดแทนของประเทศไทยในปัจจุบันจะใช้พลังงานที่ผลิตภายในประเทศเป็นหลัก ซึ่งประกอบด้วย แสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชีวมวล ก๊าซชีวภาพขยะ และเชื้อเพลิงชีวภาพ (เอทานอลและไบโอดีเซล) โดยที่การใช้พลังงานทดแทนดังกล่าว จะใช้ ในรูปของไฟฟ้า ความร้อน และเชื้อเพลิงชีวภาพ อย่างไรก็ตามยังต้องมีการพัฒนาพลังงานทดแทนขึ้นเรื่อยๆ ให้เป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ เพื่อจะได้ลดการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลและลดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ (กระทรวงพลังงาน, 2557b)



รูปที่ 2 - 2 การใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2552 - 2557

## 2.2 สารชีวมวล

สารชีวมวล(Biomass) คือ วัสดุหรือสสารที่ได้จากธรรมชาติหรือสิ่งมีชีวิต ได้แก่ พืช เกษตรกรรม เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร กากของเสียจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมรวมถึง ขยะอินทรีย์และมูลสัตว์ ซึ่งสารดังกล่าวเป็นสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ สามารถนำมาเปลี่ยนเป็นแหล่งพลังงานได้ ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีผลผลิตทางการเกษตรหลากหลายชนิด เช่น ข้าว อ้อย มันสำปะหลัง ยางพารา ปาล์มน้ำมัน ข้าวโพด เป็นต้น ทำให้เกิดเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น แกลบ ชานอ้อย กากมันสำปะหลัง เศษไม้และใบไม้ กากปาล์ม ชังข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งสารชีวมวลเหล่านี้สามารถนำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานที่มีค่า เนื่องจากในขั้นตอนของการเจริญเติบโต พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้เป็นแป้งและน้ำตาล กักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิง ทำให้ได้พลังงานออกมา เมื่อนำชีวมวลมาเผาไหม้ เกิดพลังงานความร้อน สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ต่อไป (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

### 2.2.1 พลังงานจากชีวมวล

พลังงานจากชีวมวล คือ พลังงานสะอาดที่ได้จากพืชหรือสัตว์ การใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวลช่วยรักษาสิ่งแวดล้อมเนื่องจากพลังงานจากชีวมวลมีการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศ และสารพิษต่างๆ ออกมาน้อย อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดปริมาณขยะลงได้อีกมาก พลังงานจากชีวมวลมีการหมุนเวียนเกิดขึ้นใหม่ตลอดเวลา เนื่องจากมีการปลูกทดแทนทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียน ไม่มีการปลดปล่อยสู่ชั้นบรรยากาศ การนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้ประโยชน์โดยนำมาแปรรูปเป็นพลังงานนั้นทำได้หลายวิธีขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ และวัตถุประสงค์ที่จะนำไปใช้งาน ในบรรดาแหล่งพลังงานชีวมวลทั้งหลายที่มีศักยภาพมากที่สุดนั้น แหล่งวัตถุดิบที่มีลิกโนเซลลูโลสสูง ซึ่งได้แก่ พืช เศษวัสดุจากการเกษตรเช่น ชังข้าวโพด (corn stover) เส้นใยข้าวโพด (corn fibre) ชานอ้อย(sugar cane bagasse) วัสดุเหลือทิ้งจากไม้ เช่น ชี้เลื่อยจากทั้งไม้เนื้ออ่อน และไม้เนื้อแข็ง พืชขยะจากกระบวนการแปรรูปอาหาร และเศษกระดาษ ฯลฯ (สถาบันวิจัยด้านพลังงานประเทศญี่ปุ่น, 2552)

ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีมากมายในการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของสารชีวมวลเพื่อรองรับกับจุดประสงค์การใช้งาน ทั้งทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ เช่น การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ได้แก่ การบดสีกและการใช้ไอน้ำเพื่อสลายโครงสร้างของสารชีวมวล ทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น เพื่อเร่งกระบวนการทางเคมี และทางชีวภาพ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพมักใช้ก่อนทำปฏิกิริยาเพื่อเร่งกระบวนการหลัก เรียกว่าการปรับสภาพเบื้องต้น (Pretreatment) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงทาง

ชีวภาพ ส่วนใหญ่หมายถึงกระบวนการหมัก เช่น เอทานอล มีเทน อะซิโตนบิวทานอล ไฮโดรเจน เป็นต้น

นอกจากนี้กระบวนการแปรรูปมีด้วยกันมากมายหลายวิธี ในบรรดากระบวนการแปรรูปเพื่อผลิตเป็นพลังงานนั้น กระบวนการหมัก จัดว่ามีประสิทธิภาพดีที่สุดในปัจจุบัน ทั้งยังมีผลพลอยได้ เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าสูง เช่น เอนไซม์ กรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ ไบโอบลาสติก ผลิตภัณฑ์ตั้งต้นสำหรับอุตสาหกรรมด้านเวชภัณฑ์และเคมีภัณฑ์ชนิดต่างๆ และอื่นๆ อีกมากมาย แต่ก่อนการหมักพวกลิกโนเซลลูโลสไม่เป็นที่นิยมหรือไม่ทำกันเพราะเป็นขั้นตอนที่ช้า ย่อยสลายยากและได้ผลผลิตน้อย ปัจจุบันมีเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่ช่วยให้การหมักดำเนินไปได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นการทำปรับสภาพเบื้องต้นสารชีวมวลลิกโนเซลลูโลสก่อนที่จะนำไปหมักจึงเป็นแนวทางสำคัญในการเพิ่มศักยภาพของพืชพลังงาน

## 2.2.2 องค์ประกอบของสารชีวมวล

สารชีวมวลแต่ละชนิดมีองค์ประกอบหลัก คือ ลิกโนเซลลูโลส(lignocelluloses) แป้ง(starch) และโปรตีน(protein) ซึ่งจะมีในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ในพืช จะประกอบไปด้วยลิกโนเซลลูโลส ซึ่งจะพบมากในผนังเซลล์ของพืชได้แก่ ไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน เศษวัสดุจากการเกษตร เช่น ชังข้าวโพด เส้นใยข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ ฟางข้าว ขยะจากกระบวนการแปรรูปอาหารและจากบ้านเรือน มูลสัตว์ต่างๆ เป็นต้น (สุขใจ ชูจันทร์, 2554)

### 1. ลิกโนเซลลูโลส(lignocelluloses)

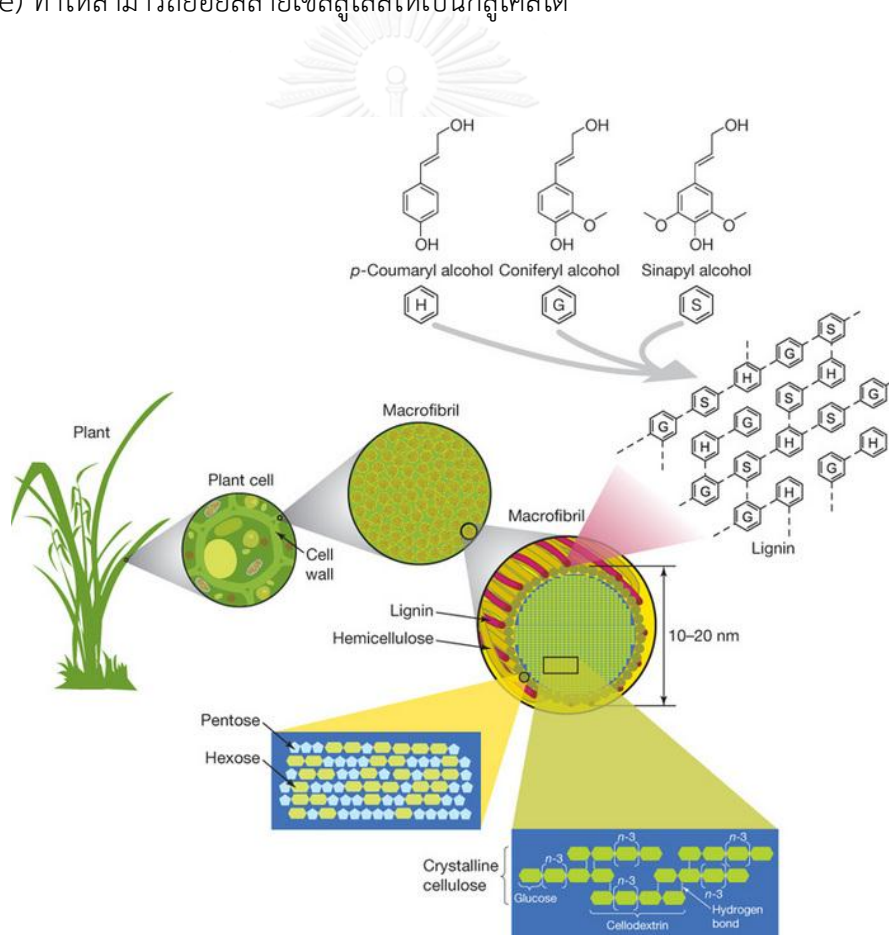
ลิกโนเซลลูโลส ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน พอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิดจะยึดกันด้วยแรงของพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งเป็นส่วนของผนังเซลล์พืช ทำให้ผนังเซลล์พืชมีความแข็งแรง โดยปริมาณของพอลิเมอร์แต่ละชนิดจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับชนิดอายุ และส่วนต่างๆของพืช

#### 1.1 เซลลูโลส (cellulose)

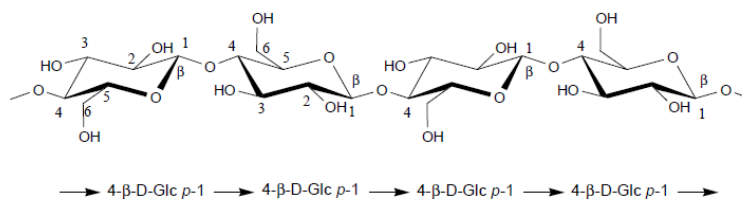
เซลลูโลส  $[C_6(H_2O)_5]_n$  เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่พบมากที่สุด ซึ่งมีประมาณ 45% ของสารอินทรีย์ทั้งหมดในธรรมชาติ ส่วนใหญ่สะสมอยู่ที่ผนังเซลล์ของพืชชั้นสูงทุกชนิด ประกอบด้วยสายพอลิเมอร์ (polymer chain) เรียงขนานกัน ยึดกันด้วยแรงแผ่กระจาย(dispersion force)และพันธะไฮโดรเจน(hydrogen bond) ทำให้ภายในโมเลกุลเซลลูโลสจึงยึดติดกันแน่นและทำให้เซลลูโลสทำปฏิกิริยากับสารต่างๆได้ช้า

เซลลูโลสใน primary cell wall ประกอบด้วย สายโพลีเมอร์ที่เกิดจาก D-กลูโคสต่อกันเป็นสายยาวประมาณ 2,000 โมเลกุล ส่วนใน secondary cell wall มี D-กลูโคสต่อกันเป็นสายยาวมากกว่า 14,000 โมเลกุล โดยเซลลูโลสจะเกาะกันเป็นคู่ตามยาวและเรียงขนานกันเป็นกลุ่ม 40 คู่ เรียกว่า ไมโครไฟบริล (microfibril) เพื่อให้ความแข็งแรงกับผนังเซลล์ของพืช ดังรูปที่ 2-3

ในด้านโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส สายโพลีเมอร์ D-กลูโคสจะเชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดบีตา ( $\beta$ -1,4-glycosidic bonds) ดังรูปที่ 2-4 ทำให้เซลลูโลสไม่สามารถละลายน้ำได้ จึงไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์อะไมเลส (amylase) ที่อยู่ในกระเพาะอาหารหรือลำไส้ของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม แต่สัตว์ที่กินพืช เช่น โค กระบือ เป็นต้น สามารถใช้เซลลูโลสเป็นแหล่งอาหารและแหล่งพลังงานได้ เนื่องจากในกระเพาะของสัตว์ดังกล่าว มีจุลินทรีย์ที่ผลิตเอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) ทำให้สามารถย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นกลูโคสได้



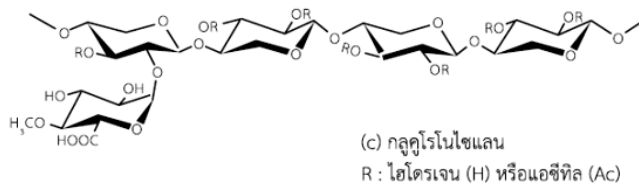
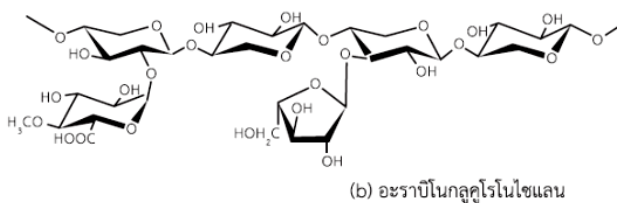
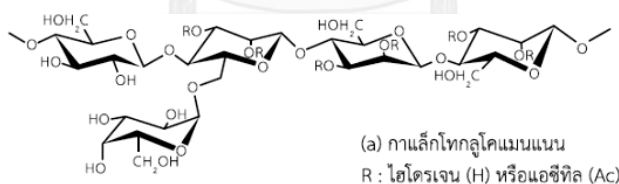
รูปที่ 2 - 3 โครงสร้างของลิกนินเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชชั้นสูง  
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)



รูปที่ 2 - 4 พันธะพอลิเมอร์ของเซลลูโลส

## 1.2 เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลส  $[C_5(H_{20})_4]_n$  หรือ  $[C_6(H_{20})_5]_n$  เป็นพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำและมีปริมาณการเกิดเป็นพอลิเมอร์ (degree of polymerization, DP) ประมาณ 50-300 เฮมิเซลลูโลสมีทั้งโครงสร้างที่เป็นสายโซ่ตรงและโซ่กิ่งของน้ำตาลที่มีคาร์บอน 5 อะตอม ได้แก่ ไซโลส (D-xylose) และอะราบินอส (L-arabinose) และน้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม ได้แก่ กลูโคส (D-glucose) แมนโนส (D-mannose) และกาแล็กโทส (D-galactose, L-galactose) และมีกรดยูโรนิก (Uronic acid) ได้แก่ กรดกลูคูโรนิก (D-glucuronic acid) องค์ประกอบส่วนใหญ่ในเฮมิเซลลูโลสเป็นไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะบีตา ( $\beta$ -1,4-glycosidic bonds) ดังรูปที่ 2-5 เฮมิเซลลูโลสจะถูกละลายได้ง่ายด้วยกรดหรือเบสเจือจาง หรือเอนไซม์ เพราะเฮมิเซลลูโลสมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ไม่เป็นเส้นตรง และมีลำดับของหน่วยย่อยน้ำตาลที่เรียงตัวแบบสลับ จึงทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างไซโลสถูกทำลายด้วยกรดหรือเอนไซม์ได้ง่าย



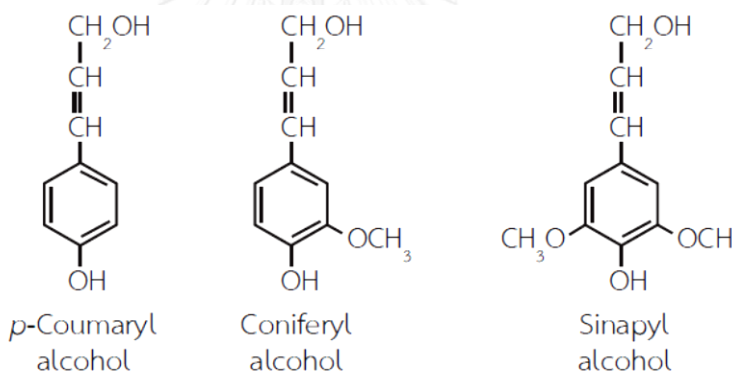
รูปที่ 2 - 5 ชนิดพอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลส



### 1.3 ลิกนิน (lignin)

ลิกนิน ( $C_{10}H_{10}O_4$ )<sub>n</sub> เป็นพอลิเมอร์ที่พบในผนังเซลล์พืชที่มีความสัมพันธ์เชิงโครงสร้างร่วมกับ เซลลูโลสและพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดอื่นๆ ลิกนินประกอบด้วยโมเลกุลที่เป็นวงแหวนที่ต่อกันแบบสุ่มเป็น โครงสร้าง 3 มิติ หน่วยย่อยของลิกนิน คือ ฟีนิลโพรพานอยด์ (phenyl propanoid) ที่มีหมู่เมธิลอยู่ บนโมเลกุล ลิกนินจากไม้เนื้ออ่อน หญ้า และไม้เนื้อแข็งมีองค์ประกอบของหมู่แทนที่พวกเมธอกซี (methoxy) และการเกิดพันธะระหว่างหมู่ฟีนิลที่แตกต่างกัน โดยภายในโครงสร้างจะเชื่อมกันด้วย พันธะอีเธอร์หรือคาร์บอนระหว่าง 2 โมเลกุล ดังรูปที่ 2-6 ทำให้ลิกนินทนทานต่อการ ย่อยสลายด้วย สารเคมีและเอนไซม์มากกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ

การที่ลิกนินอยู่รวมกับเซลลูโลสในเนื้อไม้ ทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรงได้ตาม ธรรมชาติ รวมทั้งยังทำให้จุลินทรีย์และเอนไซม์ไม่สามารถทำลายโครงสร้างพืชได้ง่าย โดยโครงสร้างที่ ลิกนินอยู่รวมกับเซลลูโลสจะมีพันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ดังนั้นเพื่อให้การ ใช้ประโยชน์จากวัสดุกลุ่มลิกโนเซลลูโลสมีมากขึ้น จึงต้องใช้ในการปรับสภาพวัสดุเหล่านี้ก่อน



รูปที่ 2 - 6 หน่วยโครงสร้างพื้นฐานของลิกนิน

## 2. แป้ง

แป้งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยหน่วยของ D-glucose และเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -glycosidic ความแตกต่างของโครงสร้างพันธะระหว่างแป้งกับเซลลูโลส คือเซลลูโลสจะไม่ละลายน้ำ แต่บางส่วนของแป้งจะละลายในน้ำร้อน คือ อะไมเลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 10,000-50,000 ซึ่งมี อยู่ร้อยละ 10-20 ของแป้ง ส่วนที่ไม่ละลายคือ อะไมโลเพกติน ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 50,000-100,000 มีอยู่ประมาณร้อยละ 80-90 ของแป้ง บริเวณที่พบแป้งมักพบในราก ลำต้น และเมล็ด

### 3. โปรตีน

โปรตีนเป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่เกิดจากกรดอะมิโนหลายชนิดมาต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ โดยโปรตีนแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของกรดอะมิโน โปรตีนไม่ใช่สารประกอบพื้นฐานของสารประกอบชีวมวล และมีสัดส่วนในสารชีวมวลที่น้อยกว่าลิกโนเซลลูโลส

### 4. สารอื่นๆ (สารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์)

สารอินทรีย์ที่พบมาก เช่น กลีเซอรอล รงควัตถุ ซีพีน เทอร์ปีน เป็นต้น ส่วนสารอนินทรีย์และธาตุต่างๆ เช่น แกล์ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม ซิลิกอน อะลูมิเนียม โซเดียม และเหล็ก เป็นต้น

## 2.3 พรรณไม้สกุลอะคาเซีย (Acacia)

พรรณไม้สกุลอะคาเซียที่นิยมปลูกในประเทศไทยมี 3 ชนิด คือ กระจินเทพา (*Acacia mangium*) กระจินณรงค์ (*Acacia auriculiformis*) และกระจินเทพณรงค์ (*Acacia spp. (auriculiformis x mangium)*) โดยที่กระจินเทพาและกระจินณรงค์เป็นพรรณไม้ต่างถิ่นซึ่งมีถิ่นกำเนิดตามธรรมชาติอยู่ในประเทศออสเตรเลีย ปาปัวนิวกินี และอินโดนีเซีย พบบริเวณที่มีความสูงจากระดับน้ำทะเลไม่เกิน 800 เมตร อะคาเซียเป็นพรรณไม้ไม่ผลัดใบอยู่ในวงศ์ Fabaceae (หรือ Leguminosae) วงศ์ย่อย Mimosoideae จัดเป็นพรรณไม้เบิกนำที่มีการเติบโตเร็ว มีความสูงเมื่อโตเต็มที่มากกว่า 15 เมตร ลำต้นของกระจินเทพาตรงมากกว่ากระจินณรงค์ซึ่งตามธรรมชาติมักแตกเป็นพุ่มแต่ปัจจุบันมีการปรับปรุงพันธุ์ให้ลำต้นเปลาตรงมากขึ้น พรรณไม้ทั้งสองชนิดนี้ เมื่อกอกออกจากเมล็ดใหม่ๆ มีใบเป็นใบประกอบขนาดเล็ก หลังจากนั้นไม่กี่สัปดาห์ ใบแท้เหล่านี้จะหายไปแต่ก้านใบจะแผ่ออกและทำหน้าที่แทนใบ เรียกว่า ใบเทียม (phyllode) ลักษณะดังกล่าวแตกต่างจากไม้อะคาเซียอื่นๆ ซึ่งใบของกระจินเทพามีขนาดใหญ่กว่าใบของกระจินณรงค์ เนื้อไม้อะคาเซียมีสีเหลืองอ่อน แก่นมีสีน้ำตาล สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น ไม้แปรรูป เยื่อและกระดาษ ไม้ฟืน และไม้เพื่อพลังงาน เป็นต้น กระจินเทพาเหมาะสำหรับปลูกในพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำฝนมาก ในขณะที่ กระจินณรงค์เหมาะสำหรับปลูกในพื้นที่แห้งแล้ง (สถาบันวิจัยด้านพลังงานประเทศญี่ปุ่น, 2552)

สำหรับกระจินเทพณรงค์เป็นพันธุ์ผสมระหว่างกระจินเทพากับกระจินณรงค์ ซึ่งได้มีการปรับปรุงพันธุ์เพื่อที่จะนำเนื้อไม้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล เนื่องจากเนื้อไม้ของกระจินเทพณรงค์มีความร้อนสูงประมาณ 4,800 – 4,900 กิโลแคลต่อกิโลกรัม และมีการเจริญเติบโตดีกว่ากระจินเทพา และกระจินณรงค์ มีรูปทรงลำต้นเปลาตรงคล้ายต้นกระจินเทพา และเนื้อไม้มีคุณสมบัติหลายประการ

คล้ายกระถินเทพณรงค์ ทำให้กระถินเทพณรงค์เป็นหนึ่งในไม้โตเร็วที่รัฐบาลได้ส่งเสริมให้มีการปลูกเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล (สาพิศ ร้อยอำแพง, 2543)

### 2.3.1 ลักษณะทั่วไปของกระถินเทพณรงค์

ลำต้น : กระถินเทพณรงค์เป็นไม้ที่มีลักษณะลำต้นตรงเหมือนกระถินเทพาและไม่ค่อยแตกกิ่งแขนง เนื่องจากกระถินเทพณรงค์มีลักษณะพิเศษ คือ รีดกิ่งได้เองตามธรรมชาติ โดยกิ่งส่วนล่างจะทยอยแห้งตายไปตั้งแต่อายุน้อย ทรงพุ่มของต้นกระถินเทพณรงค์จะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อม โดยจะมีพุ่มกว้าง ถ้าปลูกห่างหรือขึ้นอยู่ในบริเวณที่โล่ง และจะสูงโปร่งถ้าปลูกชิดกันในสภาพของสวนป่า ลำต้นเมื่ออายุมาก จะมีเปลือกแข็งหนา ขรุขระและแตกเป็นร่องตามยาว ดังรูปที่ 2-7 (ก)

ใบ : ในระยะที่เป็นต้นอ่อน กระถินเทพณรงค์จะมีใบจริงประเภทใบร่วม ซึ่งประกอบด้วยใบย่อยหลายๆ ใบคล้ายกับใบของกระถิน แต่เมื่อมีอายุได้ 2-3 สัปดาห์ ต้นกระถินเทพณรงค์จะสร้างใบเทียมที่มีลักษณะเป็นใบเดี่ยวมีเส้นใบแบบขนานขึ้นมาแทนใบจริง โดยใบเทียมดังกล่าวนี้เป็นส่วนของก้านใบและแกนกลางของใบรวมที่ขยายตัวแผ่กว้างออกไปจนมี ลักษณะคล้ายแผ่นใบของพืชทั่วไป และจะมีลักษณะใบที่ใหญ่กว่าใบกระถินเทพาดังรูปที่ 2-7 (ข)

ดอก : มีลักษณะเป็นช่อคล้ายหางกระรอก ซึ่งประกอบด้วยดอกย่อยขนาดเล็กสีขาว ดังรูปที่ 2-7 (ค)

ฝักและเมล็ด : ฝักอ่อนมีสีเขียว ฝักแก่มีสีน้ำตาลเข้ม ลักษณะฝักบิดไปมาและม้วนขดเป็นกระจุกดังรูปที่ 2-7 (ง)

เนื้อไม้ : มีส่วนกระพี้บาง แก่นสีน้ำตาล มีคุณสมบัติแข็งและทนทาน เนื้อไม้มีค่าพลังงานความร้อนสูงประมาณ 4,800 – 4,900 กิโลแคลต่อกิโลกรัม

### 2.3.2 การใช้ประโยชน์ของกระถินเทพณรงค์

#### 1) การใช้ไม้ทำเครื่องเรือนและก่อสร้าง

กระถินเทพณรงค์เป็นไม้ที่มีแก่น ความแข็งแรงปานกลาง เหมาะที่จะนำมาทำเฟอร์นิเจอร์และพื้นปาร์เก้ เครื่องเรือน วงกบประตู หน้าต่าง ปอกเป็นไม้วีเนียร์ และ เป็นไม้แบบสำหรับก่อสร้าง และใช้ในงานก่อสร้างทุกชนิดที่ไม่ต้องรับน้ำหนักมาก และไม่เป็นชิ้นส่วนที่ฝังลงในดิน

2) การใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ

กระดาษเยื่อกระดาษสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมประเภทนี้ได้ ทั้งชนิดฟอกและไม่ฟอก ถ้าใช้กรรมวิธีซัลเฟตแล้วไม้ที่นำมาป่นทั้งเปลือกใช้สารละลายต่าง ปริมาณพอสสมควรก็สามารถให้ผลเกิน 50% ของเยื่อซึ่งมีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับทำกระดาษ และใช้กรรมวิธี Neutral semichemicalprocess แล้วก็จะได้เยื่อมากขึ้นอีกประมาณ 61 – 75 % เยื่อที่ผ่านการฟอกแล้วนำไปผลิตเป็นกระดาษชนิดดี เช่น กระดาษเขียนหนังสือ เพราะมีคุณภาพใกล้เคียงกับเยื่อที่ได้จาก ไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งเหมาะสำหรับใช้ในโรงงานที่ผลิตกระดาษชนิดต่างๆ

3) ใบกระดาษเยื่อกระดาษ ดอกและเกสรใช้เป็นอาหารสัตว์

สามารถใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ในยามขาดแคลน และใช้เป็นแหล่งให้น้ำหวานสำหรับการเลี้ยงผึ้งได้เป็นอย่างดี

4) การปลูกกระดาษเยื่อกระดาษเพื่อปรับปรุงสภาพดินแล้ว

การปรับปรุงดิน เนื่องจากกระดาษเยื่อกระดาษเป็นพืชตระกูลถั่ว มีเชื้อแบคทีเรียสกุลไรโซเบียมอาศัยอยู่ที่ปมราก ช่วยในการตรึงธาตุไนโตรเจนจากอากาศในดินมาใช้ประโยชน์ ดังนั้นจึงมีความสามารถในการปรับปรุงบำรุงดินให้ดีขึ้นได้

5) ประโยชน์อื่นๆ

ปลูกเพื่อใช้เป็นร่มเงา เป็นไม้ประดับ เป็นพืชคลุมดิน และแนวกันลม

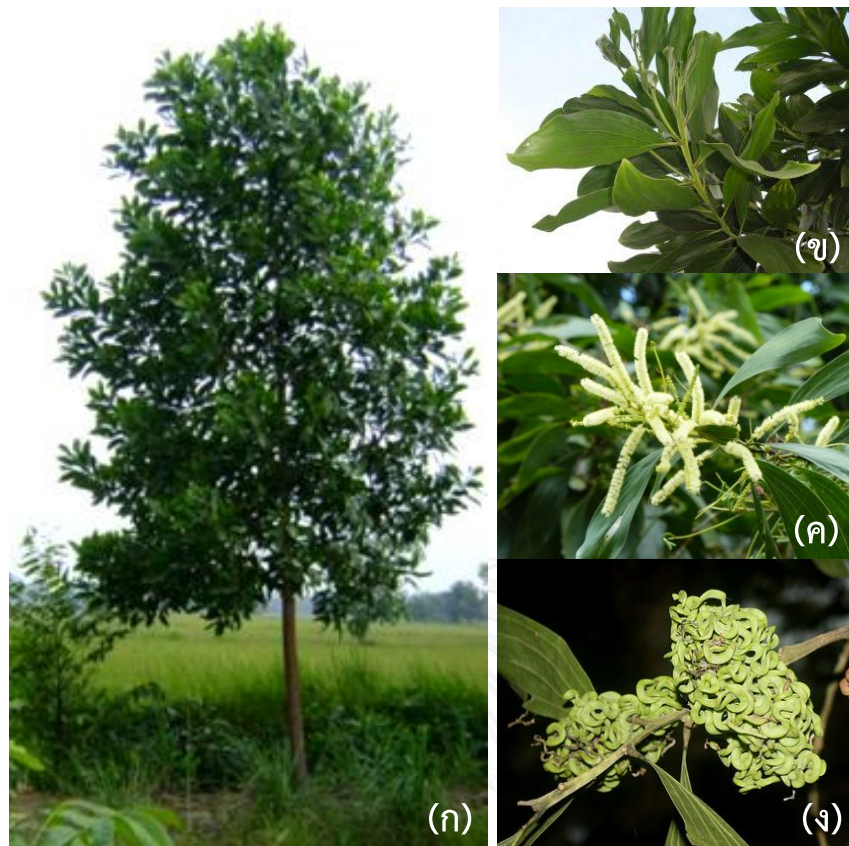
### 2.3.3 สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมของการปลูกกระดาษเยื่อกระดาษ

อุณหภูมิ : กระดาษเยื่อกระดาษจะขึ้นในพื้นที่ที่มีอากาศร้อนชื้น ซึ่งมีอุณหภูมิ อยู่ระหว่าง 31-34 องศาเซลเซียส ส่วนอากาศเย็นจะมีอุณหภูมิระหว่าง 15-22 องศาเซลเซียส

ปริมาณน้ำฝน : กระดาษเยื่อกระดาษสามารถขึ้นได้ในพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำฝนตั้งแต่ 1,500 มิลลิเมตร จนถึง 1,800 มิลลิเมตรต่อปี

ดิน : สามารถเจริญเติบโตได้ดีแม้ในดินที่ไม่ค่อยอุดมสมบูรณ์หรือมีสภาพเป็นกรดสูง เช่น ดินลูกรัง ดินที่ผ่านการทำไร่เลื่อนลอย เป็นต้น

การทนร่ม : กระดาษเยื่อกระดาษเป็นพืชที่มีความต้องการแสงแดดจัด



รูปที่ 2 - 7 ลักษณะ (ก) ลำต้น (ข) ใบ (ค) ดอก และ (ง) ฝักของกระถินเทพนรงค์  
(ฐานข้อมูลพรรณไม้ที่ใช้ในงานภูมิสถาปัตยกรรม, 2550)

## 2.4 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนประกอบด้วยกระบวนการย่อยสลายหลายขั้นตอน โดยในแต่ละขั้นตอนจะมีการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายกลุ่มที่ทำหน้าที่ต่างกันไป เพื่อให้เกิดผลผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

### 2.4.1 ขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน

ขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน (รูปที่ 2-8) ดังนี้

#### ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

กระบวนการไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยเริ่มจากขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน ให้เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่เล็กลง จนสามารถละลายน้ำได้ เช่น โมโนแซคคาไรด์ กรดอะมิโน กรดไขมัน ซึ่งขั้นตอนนี้เกิดขึ้นโดยอาศัยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ที่ปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme) เพื่อทำการย่อยสลายสารโมเลกุลใหญ่ให้มีโมเลกุลเล็กลงจนสามารถดูดซึมไปใช้เป็นแหล่งอาหารและแหล่งพลังงานภายในเซลล์ได้ จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้คือ จุลินทรีย์กลุ่มไฮโดรไลติก (Hydrolytic microorganisms) และ กลุ่มเฟอร์เมนเตทีฟ (Fermentative microorganisms) โดยที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้ขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ระยะเวลาที่เก็บสารอินทรีย์องค์ประกอบของสารอินทรีย์ เป็นต้น

#### ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

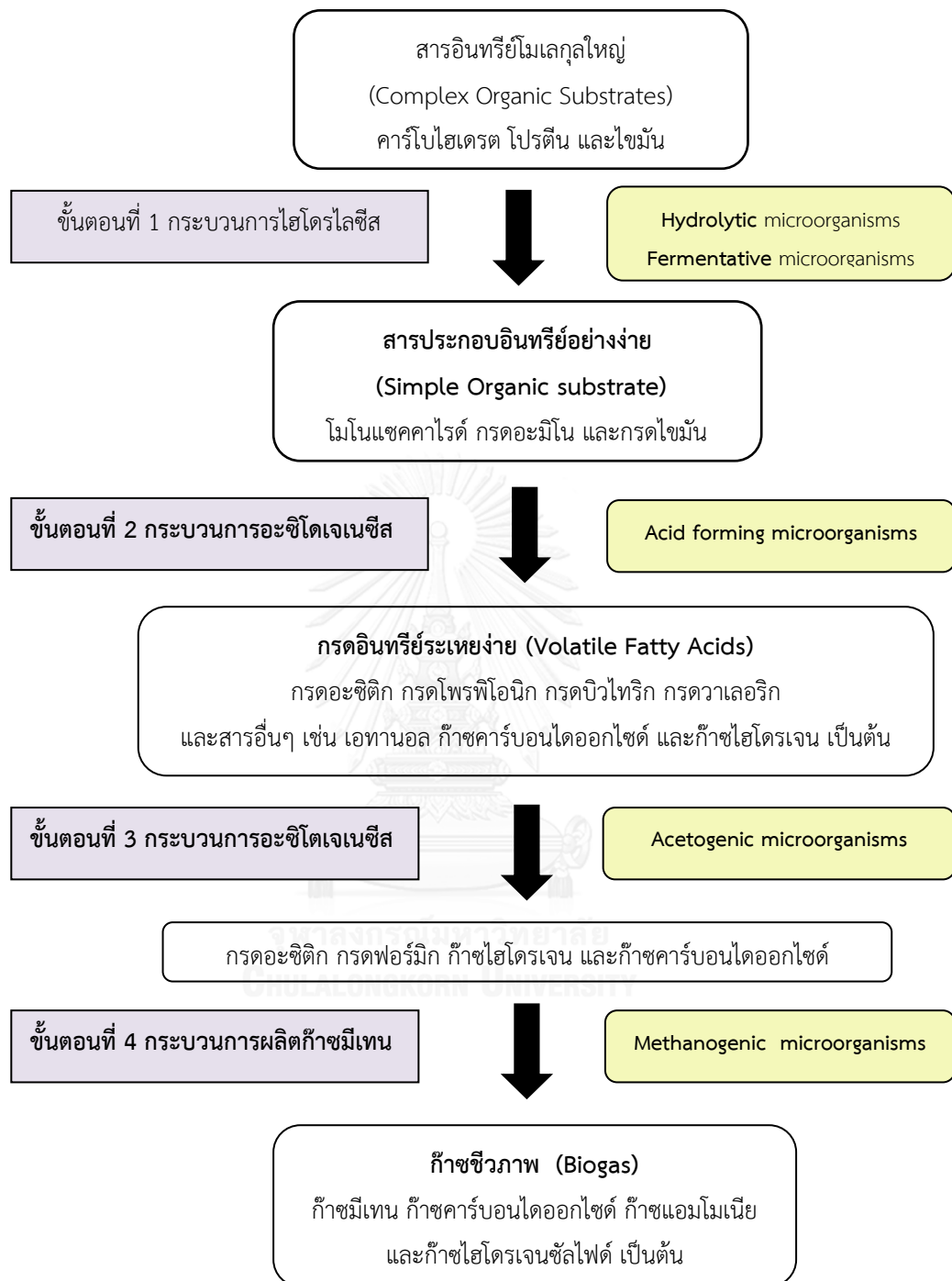
เป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรด (Acid forming microorganisms) ทำการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำได้ ซึ่งถูกสร้างขึ้นจากกระบวนการไฮโดรไลซิส โดยที่ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ซึ่งเป็นสารที่มีโครงสร้างโมเลกุลอะตอมของคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) กรดโพรพิอิก ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$ ) กรดบิวทีริก ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$ ) และกรดวาเลอริก ( $\text{C}_4\text{H}_9\text{COOH}$ ) และเกิดสารอื่นๆ เช่น เอทานอล ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เป็นต้น จุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถดำรงชีพอยู่ได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีอากาศ (Facultative microorganisms)

### ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis)

เป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจเนติก (Acetogenic microorganisms) เปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดกรดไพรูวอิก กรดบิวทิริกและกรดวาเลอริกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการอะซิโตเจเนซิสเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน ปฏิกริยานี้ถือเป็นปฏิกริยาสำคัญต้องระวังไม่ให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงมากเกินไป เพราะจะมีผลไปยังกระบวนการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน

### ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน กระบวนการนี้เกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenic producing microorganisms) ได้แก่ กลุ่ม Acetophilic methanogen และ Hydrogenophilic methanogen ซึ่งจะทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการผลิตกรด ให้เป็นผลผลิตสุดท้ายคือ ก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) น้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) และก๊าซอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ก๊าซแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) โดยสารตั้งต้นที่มีความสำคัญมากที่สุดที่จะทำให้เกิดก๊าซมีเทนในปริมาณสูง คือ กรดอะซิติก และในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนนี้ จุลินทรีย์กลุ่มนี้ มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมมาก และมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ ดังนั้นการเจริญเติบโต และปริมาณของจุลินทรีย์กลุ่มนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 2 - 8 ลำดับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน



## 2.4.2 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน

(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนเป็นกระบวนการทางธรรมชาติ ที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์หลายชนิดร่วมกัน จุลินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการนี้สามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรด (Acid forming microorganisms) และจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane producing microorganisms) ดังนี้

### 1) จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรด (Acid forming microorganisms)

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ส่วนใหญ่จะเป็นจุลินทรีย์จำพวก Facultative anaerobic microorganisms ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะแวดล้อมที่มีและไม่มีออกซิเจน โดยในสภาวะที่มีออกซิเจนจะสร้างพลังงานจากกระบวนการหายใจ ส่วนในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจะสร้างพลังงานจากกระบวนการหมัก (fermentation) เมื่อจุลินทรีย์กลุ่มนี้ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่จะได้ผลผลิตเป็นกรดไขมัน กรดอินทรีย์ระเหยง่าย แอลกอฮอล์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เพื่อนำสารดังกล่าวไปใช้เป็นแหล่งอาหารและแหล่งพลังงานภายในเซลล์ จุลินทรีย์กลุ่มนี้มีอัตราการเจริญเติบโตสูงสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมได้ดี เจริญในช่วงค่าความเป็นกรดต่าง 5.5-6.5 จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

#### 1.1) จุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจนิก (Acidogenic microorganisms)

จุลินทรีย์กลุ่มนี้เป็นจุลินทรีย์กลุ่มใหญ่ที่สุดในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากสามารถใช้อาหารได้หลากหลายและมีอัตราการเจริญเติบโตสูง จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำได้ ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) เช่น กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) กรดไพรูวอิก ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$ ) กรดบิวทีริก ( $\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$ ) และกรดวาเลอริก ( $\text{C}_4\text{H}_9\text{COOH}$ ) นอกจากนี้ยังเกิดสารอื่นๆ เช่น เอทานอล ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) เป็นต้น จุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถดำรงชีพอยู่ได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultative bacteria)

#### 1.2) จุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจนิก (Acetogenic microorganisms)

จุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจนิก (Acetogenic microorganisms) จะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดกรดไพรูวอิก กรดบิวทีริกและกรดวาเลอริกที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ

อะซิโตนเจนเนซิสเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

(1) Hydrogen producing acetogenic microorganisms

จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายในกระบวนการอะซิโตนเจนเนซิส ได้แก่ กรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลายตัว และแอลกอฮอล์ ให้กลายเป็นกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจน บางปฏิกิริยาอาจเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมด้วย ดังสมการที่ (2-1) (2-2) และ (2-3) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่ถูกย่อยสลาย



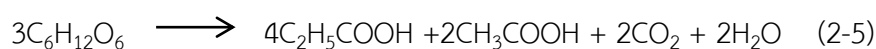
(2) Homoacetogenic microorganisms

จุลินทรีย์กลุ่มนี้แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

■ Autotroph จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารรับอิเล็กตรอนและแหล่งคาร์บอน และใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอนเพื่อเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกรดอะซิติกดังสมการที่ (2-4)



■ Heterotroph จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะใช้สารประกอบอินทรีย์ที่มีคาร์บอนหลายอะตอมในการเจริญเติบโต เกิดผลผลิตที่เป็นกรดอะซิติกและกรดไพรูวอิก ดังสมการที่ (2-5)

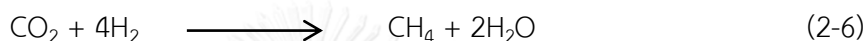


## 2) จุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane producing microorganisms)

จุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทนจะเป็นจุลินทรีย์จำพวก Obligate anaerobic microorganisms ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเท่านั้น และสามารถใช้อาหารได้เพียงไม่กี่ชนิด จุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถแบ่งตามชนิดการใช้อาหารตั้งต้นได้ 2 กลุ่ม

### 2.1) Hydrogenotrophic methanogens

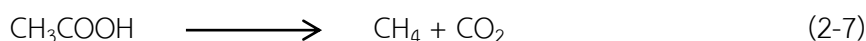
จะใช้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารอาหารตั้งต้น เกิดผลผลิตเป็นก๊าซมีเทน ดังสมการที่ (2-6)



ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนในระหว่างกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งก๊าซดังกล่าวหากสะสมในปริมาณมาก จะทำให้เกิดความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนสูง โดยจะมีผลไปยังปฏิกิริยาการสร้างกรดอะซิติก ดังนั้นจุลินทรีย์กลุ่มนี้จึงมีบทบาทสำคัญต่อปฏิกิริยาการสร้างกรดอะซิติก เนื่องจากมีการใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทน จึงทำให้คงสภาวะให้มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่ำ

### 2.2) Acetotrophic methanogens

ซึ่งจะเปลี่ยนอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (2-7)



ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ประมาณ 2 ใน 3 เกิดจากการเปลี่ยนอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์กลุ่ม Acetotrophic methanogens และส่วนที่เหลือเป็นผลของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนโดยจุลินทรีย์กลุ่ม Hydrogenotrophic methanogens

### 2.4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน

(อรรรรณ วัฒนยมมนาพร, 2553)

เนื่องจากในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ 2 กลุ่มหลัก คือ จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรด และจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องควบคุมระบบให้มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่ม โดยจะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและปัจจัยทางด้านการเดินระบบ

#### 1. ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน

สิ่งแวดล้อมมีอิทธิพลต่อจุลินทรีย์ในระบบ ดังนั้นต้องเข้าใจถึงสภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ เพื่อที่จะได้ควบคุมระบบให้มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีหลายปัจจัย ดังต่อไปนี้

##### 1) อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เนื่องจากอุณหภูมิต่างกันมีความสำคัญต่อการผลิตเอนไซม์ที่ใช้ในการเร่งให้เกิดปฏิกิริยาชีวเคมีต่างๆภายในเซลล์ ซึ่งเอนไซม์ของจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะถูกผลิตและทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของจุลินทรีย์ โดยสามารถแบ่งช่วงของอุณหภูมิได้เป็น 3 ช่วง คือ

- ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 50–65 °C โดยเรียกจุลินทรีย์ที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Thermophilic microorganisms
- ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 20–45 °C โดยเรียกจุลินทรีย์ที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Mesophilic microorganisms
- ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) จะมีอุณหภูมิประมาณ 5–15 °C โดยเรียกจุลินทรีย์ที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Psychrophilic microorganisms

##### 2) ค่าพีเอช

ค่าพีเอชมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ต่างๆภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ต่างชนิดกันเจริญเติบโตในช่วงค่าพีเอชที่แตกต่างกัน โดยกลุ่มจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนจะเจริญเติบโตในช่วงค่าพีเอช 6.8–7.2 โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 7.0 ในขณะที่กลุ่มจุลินทรีย์ชนิดที่สร้างกรดสามารถเจริญเติบโตในช่วงค่าพีเอช 5.0–8.0 ดังนั้นจึงควรมีการปรับค่าพีเอช

ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่ม ในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนนี้มักมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความพีเอชได้ หากมีการป้อน ปริมาณสารอินทรีย์เข้าไปในระบบมากเกินไป เพราะจะทำให้จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) ออกมามากและทำให้เกิดการสะสมของกรดดังกล่าว จนทำให้ภายในระบบมีค่าพีเอชลดลง ซึ่งหากค่าพีเอชในระบบต่ำกว่า 6.5 จะส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มนี้ไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นระบบจะต้องมีความสามารถในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชที่ดี ซึ่งหากมีค่าสภาพต่างในระบบที่มากพอก็สามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชได้

### 3) ค่าสภาพต่าง

ค่าสภาพต่างเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของระบบว่ามีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอช และเป็นตัวบ่งชี้ถึงเสถียรภาพของระบบ ในกรณีที่มีค่าสภาพต่างสูงแสดงว่าระบบมีปริมาณบัฟเฟอร์สูงพอที่จะรักษาค่าพีเอชของระบบให้คงตัวได้นานพอโดยไม่เกิดการแปรปรวนของค่าพีเอชได้ง่ายเมื่อมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มขึ้นภายในระบบ ความเป็นต่างในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตที่เกิดมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ค่าสภาพต่างที่เหมาะสมภายในระบบควรมีค่าอยู่ในช่วง 1,000-3,000 มิลลิกรัมของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ดังนั้นในการควบคุมระบบให้ทำงานเป็นปกติจึงจำเป็นต้องรักษาค่าสภาพต่างไม่ให้มีค่าต่ำจนเกินไปเพื่อรักษาระดับค่าพีเอชในระบบ

### 4) กรดอินทรีย์ระเหยง่าย

กรดอินทรีย์ระเหยง่ายเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนโดยอาศัยการทำงานของของจุลินทรีย์พวกสร้างกรด ซึ่งปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นในระบบสามารถเป็นตัวบ่งชี้การทำงานของระบบได้ โดยปกติแล้วในระบบควรมีกรดอินทรีย์ระเหยง่ายอยู่ในช่วง 50-500 มิลลิกรัมของกรดอะซิติก ต่อลิตร หรือมีสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อค่าความเป็นต่างไม่เกิน 0.3 ถึง 0.4 แต่หากในระบบมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณที่มากกว่า 2,000 มิลลิกรัมของกรดอะซิติก ต่อลิตร อาจจะทำให้ระบบเกิดการล้นเหลวได้ เนื่องจากปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เพิ่มขึ้นในระบบจะส่งผลให้ค่าพีเอชในระบบลดต่ำลง หากค่าดังกล่าวลดต่ำลงจนมีค่าประมาณ 4.5 - 5.0 จะทำให้จุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่สามารถทำงานได้ และทำให้ระบบล้นเหลวในที่สุด ดังนั้นควรมีการตรวจสอบปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบอยู่เสมอเพื่อที่จะได้แก้ไขระบบอย่างทันที่

## 5) สารอาหาร

สารอาหารเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ เนื่องจากเป็นแหล่งอาหารและแหล่งพลังงานเพื่อให้เกิดการเจริญเติบโตและการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ โดยสารอาหารแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สารอาหารหลัก (macronutrient) ซึ่งเป็นสารอาหารที่จุลินทรีย์ต้องการในปริมาณมาก ได้แก่ คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) โดยที่ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่จุลินทรีย์ต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนอย่างน้อยที่สุดต้องมีอัตราส่วน BOD:N:P เท่ากับ 100: 1: 0.2 โดยจุลินทรีย์จะใช้คาร์บอนในการสังเคราะห์พลังงาน ใช้ไนโตรเจนในการสังเคราะห์โปรตีนและใช้ฟอสฟอรัสในการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก และสารอาหารอีกชนิดหนึ่งคือ สารอาหารรอง (micronutrient) หรือแร่ธาตุต่างๆ ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) โคบอลต์ (Co) เหล็ก (Fe) และนิกเกิล (Ni) สารอาหารดังกล่าว จุลินทรีย์มีความต้องการในปริมาณน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์แต่ละชนิดมีความต้องการสารอาหารที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้มีอัตราส่วนของสารอาหารที่เหมาะสมและเพียงพอแก่ความต้องการของจุลินทรีย์

## 6) สารพิษ

สารที่มีพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนมีอยู่หลายชนิด ซึ่งระดับความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและความปริมาณของสารนั้นๆ หากมีการสะสมของสารบางชนิดภายในถังปฏิกรณ์ในปริมาณที่มากเกินไปอาจจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ได้ ซึ่งอาจจะมีผลต่อการยับยั้ง (Inhibition) การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ หรืออาจทำให้จุลินทรีย์ในระบบตายได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ ทำให้ระบบล้มเหลวได้ สารพิษที่มีผลต่อระบบมีหลายชนิด สามารถแบ่งได้ 3 ประเภท ดังต่อไปนี้

### (1) อีออนประจุบวกของโลหะเบา

อีออนประจุบวกของโลหะเบา ได้แก่ โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) โพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) ซึ่งเกิดขึ้นมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือการเติมสารเคมีเพื่อปรับค่าความเป็นกรดต่างในระบบ โดยอีออนดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในระบบเมื่อมีความเข้มข้นที่มากเกินไป ความเป็นพิษของอีออนประจุบวกของโลหะเบาแต่ละชนิดรุนแรงไม่เท่ากัน อีออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 1 จะมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียน้อยกว่าอีออน ประจุบวกของโลหะเบาที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 2 นั่นคือพิษของแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) และแมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) จะมากกว่าพิษของโซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) และ

โพแทสเซียม ( $K^+$ ) ดังตารางที่ 2-1 ดังนั้นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นความเป็นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาสามารถลดลงได้ถ้ามีไอออนประจุบวกของโลหะเบาอีกชนิดหนึ่งอยู่ด้วย โดยจะทำให้ความเป็นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาชนิดแรกลดลง ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า แอนตาโกนิซึม (antagonism) แต่ในทางตรงกันข้ามไอออนประจุบวกของโลหะเบาบางชนิดจะไปเพิ่มพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาอีกชนิดหนึ่งเมื่อมีอยู่ร่วมกัน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ซินเนอจิสซึม (synergism)

ตารางที่ 2 - 1 ความเข้มข้นของไอออนประจุบวกของโลหะเบาที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

ไอออนประจุบวกของโลหะเบา	ความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร
โซเดียม ( $Na^+$ )	3,500
โพแทสเซียม ( $K^+$ )	2,500
แคลเซียม ( $Ca^{2+}$ )	2,500
แมกนีเซียม ( $Mg^{2+}$ )	1,000

## (2) โลหะหนัก

โลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แคดเมียม โคบอลต์ โครเมียม นิกเกิล เป็นต้น โลหะหนักดังกล่าวจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของโลหะหนักในระบบ และขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีอยู่ในระบบด้วย เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์จะทำปฏิกิริยากับโลหะหนักเกิดเป็นตะกอนของเกลือซัลไฟด์ซึ่งไม่มีความเป็นพิษ ดังนั้นกล่าวได้ว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ช่วยในการลดความเป็นพิษของโลหะหนักในระบบ แสดงความเข้มข้นของโลหะหนักที่ไม่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2 - 2 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย  
(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

โลหะหนัก (heavy metal)	ความเข้มข้นสูงสุดที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร
Cu	1
Zn	5
Cr <sup>6+</sup>	5
Cr <sup>3+</sup>	2,000
Total chromium (Cr)	5
Ni	2
Cd	0.02

### (3) ก๊าซบางชนิด

#### ■ แอมโมเนีย

แอมโมเนียเป็นก๊าซที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบภายใต้สภาวะไร้อากาศ ทำให้เกิดเป็นก๊าซแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>) หรืออาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) โดยทั้งสองตัวนี้จะเปลี่ยนไปมาได้ขึ้นอยู่กับค่าพีเอชในระบบ ถ้ามีค่าต่ำกว่า 7.2 จะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน แต่ถ้ามีค่าสูงกว่า 7.2 จะอยู่ในรูปของก๊าซแอมโมเนีย ซึ่งก๊าซแอมโมเนียจะมีความเป็นพิษมากกว่าแอมโมเนียมไอออน โดยที่แอมโมเนียเมื่ออยู่ในรูปของก๊าซแอมโมเนีย จะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบเมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ถ้าอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออนจะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 7,000–9,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### ■ ซัลไฟด์

ซัลไฟด์เป็นก๊าซที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบภายใต้สภาวะไร้อากาศ ซึ่งซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจะละลายอยู่ในน้ำ และหากมีความเข้มข้นสูงกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ แต่หากมีโลหะหนักอยู่ในระบบ โลหะหนักทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์สร้างผลึกที่ไม่ละลายน้ำขึ้น ทำให้เป็นการลดความเป็นพิษของซัลไฟด์ที่อยู่ในระบบได้ ดังนั้นการเติมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก สามารถลดความเป็นพิษของซัลไฟด์ละลายได้



## 2. ปัจจัยทางด้านการเดินระบบที่มีผลต่ออัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน

### 1) คุณภาพและปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น

ในการเริ่มต้นเดินระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน จะต้องให้ความสำคัญกับคุณภาพและปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ที่จะนำมาใช้ในระบบ โดยเชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ควรมาจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนหรือระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีลักษณะและองค์ประกอบใกล้เคียงกันกับสารอินทรีย์ที่จะนำมาใช้ในการเดินระบบ เพราะจะทำให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถปรับตัวให้เข้ากับสารอินทรีย์ชนิดใหม่ที่ป้อนเข้าสู่ระบบได้อย่างรวดเร็ว และสามารถทนต่อสารที่เป็นพิษหรือสารที่ยับยั้งการเจริญเติบโตที่มีอยู่ในระบบได้ หากไม่สามารถหาเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าวได้ สามารถใช้มูลสัตว์ต่างๆ เช่น มูลสุกร มูลโค เป็นต้น ซึ่งมีลักษณะและองค์ประกอบใกล้เคียงกับเชื้อจุลินทรีย์ แต่อาจจะต้องใช้เวลาในการเริ่มต้นเดินระบบนานกว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์ ส่วนปริมาณของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใส่ลงไปในระบบ อาจต้องเติมเชื้อจุลินทรีย์เข้าไปในระบบอย่างต่อเนื่องหรือควรเติมเชื้อจุลินทรีย์เมื่อเริ่มต้นเดินระบบในปริมาณมากๆ เพื่อให้เพียงพอต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ และเป็นการลดระยะเวลาในการเริ่มต้นเดินระบบ

### 2) อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (OLR)

ในการออกแบบระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน ต้องคำนึงถึงอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายต้องมีความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในปริมาณพอเหมาะกับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ จึงจะทำให้ระบบย่อยสลายมีประสิทธิภาพ หากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไปจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์บางส่วนถูกทำลายไปเพราะอยู่ในสภาพที่ไม่สมดุล ในทางตรงกันข้ามหากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบน้อยเกินไป จะทำให้การใช้ถังหมักไม่เต็มประสิทธิภาพไม่คุ้มค่าในการลงทุน และยังส่งผลให้จุลินทรีย์ในระบบปรับตัวเข้ากับสภาพสารอินทรีย์ที่มีปริมาณต่ำ ซึ่งทั้งสองกรณีอาจส่งผลในระบบล้มเหลวได้ อย่างไรก็ตามค่าของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งค่านี้สามารถหาได้จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ หรือจากระบบจริงที่มีผู้เดินระบบสำเร็จมาแล้ว อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ มีหน่วยเป็นน้ำหนักของซีโอดีที่อยู่ในสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดต่อปริมาตรของระบบบำบัดต่อวัน ( $\text{kg COD/m}^3 \cdot \text{วัน}$ ) อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัด (Feeding rate) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการรักษาเสถียรภาพของระบบให้คงที่ การเปลี่ยนอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

- ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัด ซึ่งวิธีนี้จะมีผลต่อระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ (Hydraulic retention time : HRT) ภายในระบบบำบัด
- ทำการเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่จะป้อนเข้าสู่ระบบบำบัด

### 3) ระยะเวลาพักพักทางชลศาสตร์ (HRT)

ระยะเวลาพักพักทางชลศาสตร์ คือ ระยะเวลาที่สารอินทรีย์อยู่ในระบบบำบัดสามารถคำนวณได้จากการนำค่าปริมาตรของระบบบำบัดหารด้วยอัตราการไหลของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัด (Feeding Rate)

$$\text{HRT (วัน)} = \frac{\text{ปริมาตรของระบบบำบัด}}{\text{อัตราการไหลของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัด}}$$

การเพิ่มระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนอย่างหนึ่ง ซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์มีระยะเวลาที่สามารถสัมผัสกับสารอินทรีย์ในระบบได้นานขึ้น ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น ในการเพิ่มระยะเวลากักเก็บ ทำได้โดยการออกแบบให้ระบบมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ก็เกิดปัญหาทำให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบสูงขึ้นด้วย หรืออาจทำได้โดยการปรับลดอัตราการไหลของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ แต่วิธีนี้จะมีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบ สำหรับการลดระยะเวลาในการกักเก็บ อาจทำให้จุลินทรีย์หลุดออกจากระบบได้ ซึ่งจะส่งผลให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพล้มเหลว

ในช่วงเริ่มต้นการเดินระบบควรใช้อัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบต่ำ และควรมีระยะเวลากักเก็บสูง เพื่อให้จุลินทรีย์มีเวลาสัมผัสกับสารอินทรีย์ในระบบได้นาน ทำให้มีระยะเวลาในการย่อยสลายที่มากขึ้น จากนั้นค่อยๆเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบให้มากขึ้น และค่อยๆลดระยะเวลากักเก็บลง

### 4) การกวนผสม

การกวนผสมมีความสำคัญต่อระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนมาก เนื่องจากทำให้จุลินทรีย์และสารอาหารต่างๆในระบบสัมผัสกันอย่างทั่วถึง ซึ่งทำให้ทุกจุดในระบบมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เท่าเทียมกัน นอกจากนี้การกวนผสมยังช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการแยกชั้นระหว่างจุลินทรีย์กับสารอาหาร ซึ่งถ้าเกิดการแยกชั้นจะสร้างปัญหาให้กับระบบ โดยจะทำให้เกิดตะกอนลอยด้านบนของระบบ ทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบลดลง

### 5) ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเป็นการบ่งบอกความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในระบบ โดยทั่วไปแล้วเมื่อมีกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์จะทำให้ค่าซีโอดีในระบบลดลง ระบบบำบัดที่ดีควรมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีมากกว่าร้อยละ 85 หากพบว่าในระบบบำบัดมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีต่ำลงเรื่อยๆและน้อยกว่าร้อยละ 70 แสดงว่าระบบเริ่มมีปัญหา ซึ่งอาจเกิดจากสภาวะแวดล้อมภายในระบบบำบัดไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ต่ำลง

### 6) อัตราการผลิตก๊าซมีเทนและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

อัตราการผลิตก๊าซมีเทนและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพเป็นตัวแปรสำคัญที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติของสารอินทรีย์ที่ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในระบบว่าสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ในปริมาณที่เหมาะสมที่จะนำมาผลิตเป็นแหล่งพลังงานทดแทน โดยที่องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพควรมีก๊าซมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 60-65 และจากทฤษฎีพบว่าในการผลิตก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียสจะได้ก๊าซมีเทน 0.35 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด นอกจากนี้ยังบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ในระบบ เนื่องจากหากมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการผลิตก๊าซมีเทน อาจสันนิษฐานได้ว่าในระบบมีสภาวะไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทน เพราะจุลินทรีย์กลุ่มนี้มีความอ่อนไหวต่อสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงมาก ดังนั้นจึงควรควบคุมกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราที่สูงที่สุด

ตารางที่ 2-3 แสดงช่วงค่าที่เหมาะสมและช่วงค่าที่ยอมรับได้ของปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและปัจจัยทางด้านการเดินระบบที่มีผลต่อระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน

ตารางที่ 2 - 3 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน  
(กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

ปัจจัย	ช่วงค่าที่เหมาะสม	ช่วงค่าที่ยอมรับได้
อุณหภูมิ (°C)	30-35	25-40
ค่าพีเอช	6.8-7.2	6.6-7.4
ค่าสภาพต่าง (มิลลิกรัมของCaCO <sub>3</sub> ต่อลิตร)	2,000-3,000	1,000-4,000
ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (มิลลิกรัมของกรดอะซิติกต่อลิตร)	50-500	2,000
ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี	มากกว่าร้อยละ 85	ร้อยละ 75-85
อัตราส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อค่าสภาพต่าง	น้อยกว่า 0.3	0.03-0.3
ร้อยละมีเทน	60-65	55-60
H <sub>2</sub> S ที่ละลายน้ำ (ppm)	น้อยกว่า 30	น้อยกว่า 200
อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจน	40-50	น้อยกว่า 100

## 2.5 ก๊าซชีวภาพ

### 2.5.1 ความหมายของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) หมายถึง ก๊าซที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนภายใต้การทำงานของจุลินทรีย์ 2 กลุ่มหลัก คือ จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรด โดยส่วนใหญ่แล้วกรดที่ผลิตขึ้นเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย โดยที่จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรด จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กลง กลุ่มที่สองคือจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน จุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กเป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) โดยมีก๊าซอื่นๆเกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) หรือก๊าซไข่เน่า และก๊าซแอมโมเนีย (NH<sub>3</sub>)-เป็นต้น กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพต้องระวังไม่ให้อากาศเข้าไปสัมผัสกับจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนลดลง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

### 2.5.2 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด โดยมีองค์ประกอบหลัก คือ ก๊าซมีเทน ประมาณ 50 – 70 เปอร์เซ็นต์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณ 20 – 50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) แอมโมเนีย ( $NH_3$ ) และไอน้ำ ( $H_2O$ ) ซึ่งมีปริมาณ ดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2 - 4 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ชนิดองค์ประกอบ	ปริมาณ
$CH_4$ (%)	50 – 70
$CO_2$ (%)	20 – 50
$H_2O$ (%)	0 – 10
$N_2$ (%)	0 – 5
$O_2$ (%)	0 – 2
$NH_3$ (%)	0 – 1
$H_2S$ (ppm)	50 - 10,000

### 2.5.3 สมบัติก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพแต่ละชนิดจะมีลักษณะทางกายภาพ และเคมีที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2 - 5 ลักษณะและสมบัติก๊าซชีวภาพ

สมบัติของก๊าซ	$CH_4$	$CO_2$	$H_2S$
มวลโมเลกุล [กิโลกรัม/โมล]	16.04	44.01	34.08
ความหนาแน่น (ที่ 1.013 บาร์สัมบูรณ์, 15°ซ) [กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร]	0.68	1.87	1.45
Critical Temperature [°ซ]	-82.7	31	100
Critical Pressure [บาร์สัมบูรณ์]	45.96	73.825	89.37
Sp. Gr. (เทียบกับอากาศ = 1)(ที่ 1.013 บาร์สัมบูรณ์ , 15°ซ )	0.55	1.521	1.189
Specific volume (ที่ 1.013 บาร์สัมบูรณ์ , 21°ซ ) [ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม]	1.48	0.547	0.699
Heat capacity at constant pressure (Cp) (ที่ 1.013 บาร์สัมบูรณ์ , 25°ซ ) [กิโลจูล/โมล.เคลวิน]	0.035	0.037	0.034
Heat capacity at constant volume (Cv) (ที่ 1.013 บาร์สัมบูรณ์ , 25°ซ ) [กิโลจูล/โมล.เคลวิน]	0.027	0.028	-

สมบัติของก๊าซ	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
Ratio , Cp/Cv (ที่ 1.013 บาร์สัมบูรณ์ , 25°ซ )	1.3054	1.2938	-
Thermal conductivity (@ 1.013 บาร์สัมบูรณ์ , 0°ซ ) [มิลลิวัตต์/เมตร เคลวิน]	32.81	14.65	12.98
High Heating Value (@ 1.013 บาร์สัมบูรณ์ , 15.6°ซ ) [เมกกะจูล/ลูกบาศก์เมตร]	37.63	-	12
Lower Heating Value (@ 1.013 บาร์สัมบูรณ์ , 15°ซ ) [เมกกะจูล/ลูกบาศก์เมตร]	33.91		
Solubility in water (@ 1.013 บาร์สัมบูรณ์ , 2°ซ ) [ปริมาตร/ปริมาตร]	0.054	1.7163	4.67
Auto-ignition temperature [°ซ]	595	-	270

#### 2.5.4 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ

##### 1) ประโยชน์ทางด้านพลังงาน

ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้แทนพลังงานในรูปแบบต่างๆ ได้หลายชนิด โดยสามารถเปรียบเทียบค่าพลังงานกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ได้ดังนี้

ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร ที่ประกอบด้วยมีเทน 60% จะมีค่าความร้อนประมาณ 5,000 – 5,500 กิโลแคลอรี (กระทรวงพลังงาน, 2548)

เทียบเท่าน้ำมันดีเซล	0.60	ลิตร
เทียบเท่าน้ำมันเบนซิน	0.67	ลิตร
เทียบเท่าน้ำมันเตา	0.81	ลิตร
เทียบเท่ากับก๊าซหุงต้ม (LPG)	0.46	กิโลกรัม
เทียบเท่ากับพลังงานไฟฟ้า	1.20	กิโลวัตต์-ชั่วโมง
เทียบเท่ากับไม้ฟืน	1.50	กิโลกรัม

ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาแบ่งใช้ประโยชน์ได้หลายประการ ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการนำก๊าซชีวภาพมาผลิตเป็นพลังงานได้ ดังต่อไปนี้

1) การนำก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน

เป็นรูปแบบการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์โดยการเผาไหม้ให้ความร้อนโดยตรง ซึ่งจะได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มไอน้ำในโรงงานผลิตอาหารสัตว์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง ใช้กับหัวกลูกสูกร ใช้ในครัวเรือน ฯลฯ

2) การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตพลังงานกลและพลังงานไฟฟ้า

เป็นรูปแบบการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์โดยการนำไปผลิตเป็นพลังงานกลและพลังงานไฟฟ้าสามารถใช้งานได้ง่าย โดยเฉพาะเมื่อผลิตเป็นไฟฟ้าแล้ว สามารถนำไปใช้งานได้สะดวก

3) การผลิตพลังงานร่วม

เป็นการผลิตพลังงานกล พลังงานไฟฟ้า และความร้อนร่วมกันซึ่งเป็นระบบที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการใช้เชื้อเพลิงให้มีค่าสูงขึ้นมากกว่าการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือความร้อนเพียงอย่างเดียว

2) ประโยชน์ทางการเกษตร

กากตะกอนที่เหลือจากการผลิตก๊าซชีวภาพมีองค์ประกอบสำคัญคือ ฮิวมัส (Humus) ซึ่งเป็นอินทรีย์วัตถุที่คงสภาพและยากต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ มีคุณสมบัติในการดูดซับน้ำ และธาตุอาหารพืช ทำให้ดินร่วนซุย ช่วยส่งเสริมการทำงานของรากพืชในการดูดซึมน้ำและอาหาร อีกทั้งช่วยป้องกันการพังทลายของหน้าดิน ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์สำหรับการเพาะปลูกพืช

3) ประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อม

หากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นขยะเหลือใช้ จะทำให้ช่วยลดปริมาณของขยะลง ช่วยลดปัญหาของกลิ่นและก๊าซพิษ ทำให้ไม่ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็นรบกวน ช่วยลดปัญหาการเกิดโรคจากทางเดินอาหาร ช่วยลดการปล่อยก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศ และยังช่วยลดปัญหาเรื่องของคุณภาพในแหล่งน้ำธรรมชาติ เป็นต้น

## 2.6 การปรับสภาพเบื้องต้นสารชีวมวล (Pretreatment)

ปัจจุบันมีการนำเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งเศษวัสดุเหล่านี้เป็นสารชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ ลิกโนเซลลูโลสเป็นเส้นใยที่ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน พอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิดจะยึดกันด้วยแรงของพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์จับกันเป็นเส้นใยอย่างหนาแน่น จึงทำให้ลิกโนเซลลูโลสย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจนได้ยากและใช้ระยะเวลานาน จากปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดเทคโนโลยีการปรับสภาพเบื้องต้นของสารชีวมวลขึ้นมากมาย โดยวัตถุประสงค์ของการปรับสภาพเบื้องต้น คือ เพื่อลดขนาดของโครงสร้างเซลลูโลส (crystallinity of cellulose) เพื่อให้เฮมิเซลลูโลสและลิกนินละลายออกมา เพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของลิกนิน และเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของวัตถุดิบ ซึ่งการปรับสภาพเบื้องต้นนี้จะช่วยลดระยะเวลาในขั้นตอนไฮโดรไลซิสของกระบวนการย่อยสลาย และช่วยให้เกิดสารผลิตภัณฑ์ในปริมาณที่มากขึ้น (Mosier และคณะ, 2005) ในปัจจุบันสามารถจำแนกวิธีการปรับสภาพเบื้องต้น ได้เป็น 5 วิธี (Hendriks และ Zeeman, 2009) ดังนี้

### 2.6.1 กระบวนการทางแรงกล (Mechanical pretreatment)

การปรับสภาพโดยกระบวนการทางแรงกลเป็นวิธีพื้นฐานของการปรับสภาพของวัตถุดิบ เป็นการทำให้วัตถุดิบมีขนาดเล็กลง เช่น การหั่น การสับ การทุบ หรือการบดด้วยลูกบอล เป็นต้น วิธีดังกล่าวเป็นวิธีที่มีต้นทุนต่ำและถือเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับวัตถุดิบ นอกจากนี้การปรับสภาพด้วยวิธีทางแรงกลยังช่วยลดปริมาณการใช้สารเคมี เชื้อจุลินทรีย์ หรือเอนไซม์ในการย่อยลิกโนเซลลูโลส และยังช่วยลดระยะเวลาในการย่อยสลายในขั้นตอนไฮโดรไลซิส

### 2.6.2 กระบวนการทางกายภาพ (Physical pretreatment)

ในปัจจุบันการปรับสภาพโดยกระบวนการทางกายภาพมีหลายวิธี โดยวิธีที่เป็นที่นิยมมากที่สุดคือ การใช้ความร้อน (Thermal pretreatment) จากงานวิจัยของ Bobleter (1994) พบว่าหากทำการปรับสภาพที่อุณหภูมิสูงกว่า 150-180 °C จะทำให้ส่วนของลิกโนเซลลูโลส นั่นคือ เฮมิเซลลูโลสและลิกนินเริ่มที่จะละลายออกมา โดยที่โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสซึ่งประกอบไปด้วยไซเลน (xylan) และ กลูโคแมนแนน (glucomanan) จะถูกย่อยสลายและแยกออกจากกัน และถ้าทำการปรับสภาพที่อุณหภูมิสูงกว่า 180 °C จะทำให้เฮลิเซลลูโลสและลิกนินละลายออกมาอยู่ในสารละลาย ซึ่งในระหว่างกระบวนการปรับสภาพด้วยความร้อน เฮมิเซลลูโลสจะเกิดการย่อยสลายและจะเกิดการดัดต่างๆ ซึ่งกรดเหล่านี้จะเป็นตัวกระตุ้นการย่อยสลายของเฮมิเซลลูโลส ส่วนลิกนินที่ถูกย่อยสลายจะทำให้เกิดสารประกอบฟีนอล (phenolic compounds) ซึ่งสารนี้อาจเป็นสารยับยั้งหรือเป็นสารพิษต่อ



จุลินทรีย์ และสารประกอบฟีนอลที่เกิดขึ้นจะมีการสะสมอยู่ในชั้นของสารชีวมวลในระบบ นอกจากนี้ การปรับสภาพในสภาวะที่รุนแรงเกินไป เช่น ในสภาวะกรดร่วมกับความร้อน หรือในสภาวะที่ อุณหภูมิสูงกว่า 220 °C จะทำให้ลิกนินละลายออกมาจากลิกโนเซลลูโลสมาก และทำให้เกิดการ สะสมของสารพิษ เช่น วานิลลิน(vanillin),วานิลลิน แอลกอฮอล์ (vanillin alcohol) เฟอร์ฟูรัล (furfural), 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล (HMF) เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อกระบวนการ ย่อยสลายในขั้นตอนต่อไป

### 2.6.3 กระบวนการทางเคมี (Chemical pretreatment)

สารเคมีตั้งแต่ พวก Oxidizing agents พวกกรดต่างๆ ไปจนกระทั่งถึงด่าง หรือเกลือ สามารถย่อยสลาย เซลลูโลสเฮมิเซลลูโลส และลิกนินได้ และสามารถทำภายใต้ความดันและอุณหภูมิ ปกติได้ ตัวอย่างสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพวัตถุดิบ (Taherzadeh และ Karimi, 2008) ดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2 - 6 ประเภทการปรับสภาพทางเคมีและสารเคมีที่ใช้

การปรับสภาพ	ตัวอย่างสารเคมี
Alkaline treatment	sodium hydroxide, ammonia, ammonium sulfite
Acid treatment	sulphuric acid, hydrochloric acid, phosphoric acid
Gas treatment	chlorine dioxide, nitrogen dioxide, sulphur dioxide
Addition of oxidizing agents	hydrogen peroxide, ozone (Ozonolysis)
Solvent extraction of lignin (Organosolv)	ethanol-water extraction, benzene-water extraction, Ethylene glycol extraction, butanol-water extraction, swelling agents

สารละลายกรดที่นิยมใช้ในการปรับสภาพวัตถุดิบส่วนใหญ่จะเป็นสารละลายกรดแก่ เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟูริก เป็นต้น ซึ่งจะช่วยในการละลายเฮมิเซลลูโลสออกจากลิกโนเซลลูโลส จึงทำให้เซลลูโลสที่อยู่ในระบบถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น แต่จะทำให้เกิดสารพิษ เช่น วานิลลิน (vanillin), วานิลลิน แอลกอฮอล์ (vanillin alcohol) เฟอร์ฟูรัล (furfural), 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล (HMF) เป็นต้น ถ้าสารเหล่านี้สะสมอยู่ในระบบปริมาณมากจะทำการยับยั้งการทำงานของ จุลินทรีย์ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลายในขั้นตอนไฮโดรไลซิส ส่วนสารละลายด่างที่ นิยมใช้ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจาง และแอมโมเนีย เป็นต้น สารเหล่านี้จะทำลายโครงสร้าง ของลิกนิน ทำให้เซลลูโลสที่อยู่ในระบบถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น และที่สำคัญการปรับสภาพด้วย สารละลายด่างจะเกิดสารพิษในปริมาณที่น้อยกว่าการปรับสภาพด้วยสารละลายกรด

การปรับการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้สารละลายต่างจะนิยมใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Taherzadeh และ Karimi, 2008) เพราะสามารถย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทำให้ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสละลายออกมากจากโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส จึงทำให้เซลลูโลสถูกย่อยได้ง่ายขึ้นในขั้นตอนไฮโดรไลซิสของกระบวนการย่อยแบบไร้ออกซิเจน ซึ่งจะส่งผลให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น (Mosier และคณะ, 2005) นอกจากนี้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ยังช่วยรักษาค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในขั้นตอนการผลิตกรดและขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน (Hashimoto, 1986) การปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้อง และที่สำคัญการปรับสภาพด้วยสารละลายต่างจะเกิดสารพิษในปริมาณที่น้อยกว่าการปรับสภาพด้วยสารละลายกรด

จากงานวิจัยของ Pang และคณะ (2008) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากขี้ข้าวโพด โดยการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 6 ที่อุณหภูมิห้องระยะเวลา 3 วัน พบว่าจากการปรับสภาพเบื้องต้นทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 48.5 และจากการศึกษาของ Zheng และคณะ (2009) ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 ในการปรับสภาพขี้ข้าวโพด ที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 3 วัน พบว่าให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 72.9 อย่างไรก็ตามการปรับสภาพเบื้องต้นสารชีวมวลแต่ละชนิด จะใช้ระดับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการปรับสภาพที่ต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบภายในสารชีวมวลแต่ละชนิด

#### 2.6.4 กระบวนการทางชีวภาพ (Biological pretreatment)

การปรับสภาพโดยกระบวนการทางชีวภาพคือการอาศัยจุลินทรีย์มาช่วยในการย่อยสลายวัตถุดิบ โดยการเติมจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสลงไปในวัตถุดิบและทำการปรับสภาพให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เติมลงไป หรือการเติมเอนไซม์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสลงไปในวัตถุดิบโดยลง ตัวอย่างเช่น cellulases, glucuronidase, acetylsterase, feruloylsterase, xylanase,  $\beta$ -xylosidase, lignin peroxidase, manganese peroxidase และ laccase เป็นต้น เนื่องจากลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วย ประกอบด้วยพอลิเมอร์ 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสได้จะเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลส ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะมีมากที่สุดในกระเพาะ rumen ของสัตว์ที่ได้รับอาหารหยาบเป็นหลัก ตัวอย่างจุลินทรีย์ชนิดที่สำคัญ ได้แก่ *Ruminococcus flavefaciens*, *R. albus*, *Bacteroides succinogenes* *Cillobacterium cellulosolvens* และ *Clostridium spp.* เป็นต้น สำหรับกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสมีหลายชนิด เช่น *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Lachnospيريا multiparens* และ *Bacteroides ruminicola* เป็นต้น ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถย่อยสลายเซลลูโลสได้ด้วย ส่วน

จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายลิกนินจะเป็นราในกลุ่ม white rot fungi ซึ่งราในกลุ่มนี้จะทำการย่อยสลายลิกนินในสภาวะที่มีออกซิเจน (Keller และคณะ, 2003)

### 2.6.5 กระบวนการทางกายภาพร่วมกับทางเคมี (Physicochemical pretreatment)

การปรับสภาพวัตถุดิบวิธีนี้เป็นการปรับโดยใช้วิธีทางกายภาพร่วมกับการใช้สารเคมี โดยวิธีทางกายภาพที่นิยมใช้คือ การใช้ความร้อน ซึ่งอาจเรียกรวมกันว่า Thermochemical treatment วิธีนี้จะทำให้เฮมิเซลลูโลสและลิกนินถูกย่อยสลายออกมาในสารละลายมากขึ้น และทำให้โครงสร้างของเซลลูโลสเกิดการแตกตัวและถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาในการย่อยสลายเซลลูโลสในขั้นตอนไฮโดรไลซิส การปรับสภาพโดยวิธีนี้แบ่งออกเป็นหลายวิธี ดังนี้

#### ■ Steam explosion

วิธีนี้จะทำการปรับสภาพวัตถุดิบที่อุณหภูมิระหว่าง 160 - 260 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันที่มีไอน้ำอิ่มตัว 0.69 - 4.83 เมกะพาสคาล และใช้เวลาประมาณ 2-3 นาที หลังจากนั้นจะลดอุณหภูมิและความดันให้เข้าสู่สภาวะปกติอย่างรวดเร็ว วัตถุประสงค์ของการปรับสภาพวิธีนี้คือเพื่อละลายเฮมิเซลลูโลสออกมาจากลิกนินเซลลูโลส ทำให้เซลลูโลสถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้วิธีดังกล่าวยังทำให้เกิดสารยับยั้งในปริมาณน้อยกว่าการปรับสภาพโดยวิธีอื่น (Varga และคณะ, 2004) การเติมสารเคมี เช่น กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) ลงไปในวัตถุดิบจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส ช่วยลดปริมาณการเกิดสารยับยั้ง

#### ■ Wet oxidation pretreatment

วิธีนี้เป็นการปรับสภาพโดยการใช้ น้ำ อากาศ หรือออกซิเจนที่อุณหภูมิระหว่าง 200 - 210 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาประมาณ 30 นาที (Palonen และคณะ, 2004) Martin และคณะ (2007) ศึกษาการปรับสภาพขานอ้อยด้วยวิธี Wet oxidation ที่อุณหภูมิ 195 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที สารละลายที่ได้พบว่ามีร้อยละ 93 ถึง 94 ได้มาจากการสลายของเฮมิเซลลูโลส ในปัจจุบันนิยมปรับสภาพด้วยวิธี Wet oxidation ร่วมกับสารละลายต่าง เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายมากขึ้น เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต ร่วมด้วยจะนำไปสู่การละลายที่ดีขึ้นของสารพวกลิกนินเซลลูโลส

#### ■ Liquid hot water (LHW) pretreatment

วิธีนี้เป็นการปรับสภาพโดยการใช้ น้ำ ร้อนอุณหภูมิ 150 - 230 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดัน 5 เมกะพาสคาล และใช้เวลานานหลายนาทีจนถึงหลักชั่วโมง (Girio และคณะ, 2010) วิธีนี้จะ

ช่วยในการละลายเฮมิเซลลูโลสออกมาจากกัวตุดิบ หากมีการควบคุมสภาพความเป็นกรด-ด่างระหว่างการปรับสภาพให้อยู่ในช่วง 4-7 จะสามารถลดสารยับยั้งที่จะเกิดขึ้นได้ เช่น ฟูเฟอร์อล

ตารางที่ 2-7 สรุปประสิทธิภาพของการปรับสภาพเบื้องต้นสารชีวมวลด้วยกระบวนการต่างๆ โดยศึกษาจากลักษณะของสารชีวมวลหลังจากการปรับสภาพ ส่วนตารางที่ 2-8 แสดงข้อดีและข้อเสียของการปรับสภาพเบื้องต้นสารชีวมวลด้วยกระบวนการต่างๆ

ตารางที่ 2 - 7 สรุปประสิทธิภาพของการปรับสภาพเบื้องต้นสารชีวมวลด้วยกระบวนการต่างๆ

กระบวนการ	เพิ่มพื้นที่ผิว	การสลายโครงสร้างเซลลูโลส	การละลายของเฮมิเซลลูโลส	ลิกนินที่ถูกกำจัด	การเปลี่ยนโครงสร้างของลิกนิน	การเกิดสารพิษ
การบด	H	H	0	0	0	0
การใช้กรด	H	0	H	M	H	H
การใช้ด่าง	H	H	H/M	H	H	L
การระเบิดด้วยไอน้ำ	H	ND	H	M	H	H
การใช้น้ำ อากาศ หรือ ออกซิเจน	H	ND	H	M	H	L
การใช้น้ำร้อน	H	ND	H	L	H	H
การใช้จุลินทรีย์	M	0	0	H	ND	0/L

หมายเหตุ H = สูง M = ปานกลาง L = ต่ำ 0 = ไม่มีผล ND = ไม่ได้ทำการศึกษา

ตารางที่ 2 - 8 ข้อดีและข้อเสียของการปรับสภาพเบื้องต้นสารชีวมวลด้วยกระบวนการต่างๆ (Tomás-Pejó และคณะ, 2011)

กระบวนการปรับสภาพเบื้องต้น	ข้อดี	ข้อเสีย
การบด	ช่วยลดโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส	ใช้พลังงานสูง
การใช้กรดเข้มข้น	- ทำให้เกิดกลูโคสในปริมาณสูง - สามารถปรับสภาพที่อุณหภูมิห้องได้	- กรดมีราคาแพง - ทำให้ถึงปฏิกิริยาเกิดการกัดกร่อน - ก่อให้เกิดสารยับยั้งในระบบ
การใช้กรดเจือจาง	- ถึงปฏิกิริยาเกิดการกัดกร่อนน้อยกว่าการปรับสภาพด้วยกรดเข้มข้น - เกิดสารยับยั้งในระบบน้อยกว่าการปรับสภาพด้วยกรดเข้มข้น	เกิดปริมาณน้ำตาลน้อย
การใช้ด่าง	- เพิ่มความสามารถในการละลายเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน	- ต้องมีการกำจัดต่างออกไปภายหลังจากการปรับสภาพ

กระบวนการปรับสภาพเบื้องต้น	ข้อดี	ข้อเสีย
การใช้กรดเจือจาง	- ถังปฏิกรณ์เกิดการกัดกร่อนน้อยกว่าการปรับสภาพด้วยกรดเข้มข้น - เกิดสารยับยั้งในระบบน้อยกว่าการปรับสภาพด้วยกรดเข้มข้น	เกิดปริมาณน้ำตาลน้อย
การใช้ด่าง	- เพิ่มความสามารถในการละลายเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน	- ต้องมีการกำจัดด่างออกในภายหลังจากการปรับสภาพ
การระเบิดด้วยไอน้ำ	- ทำให้ลิกนินเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง - เพิ่มความสามารถในการละลายของเฮมิเซลลูโลส	ก่อให้เกิดสารยับยั้งในระบบ
การใช้น้ำ อากาศหรือ ออกซิเจน	- เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน - เกิดสารยับยั้งในระบบน้อย - ใช้พลังงานในการปรับสภาพน้อย	ออกซิเจนและสารละลายต่างที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยามีราคาแพง
การใช้น้ำร้อน	- ไม่จำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา - ถังปฏิกรรมีราคาต่ำ	- ใช้พลังงานสูง - ใช้น้ำในการปรับสภาพมาก
การใช้จุลินทรีย์	- ย่อยสลายโครงสร้างของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสได้ - ใช้พลังงานน้อย - ไม่ก่อให้เกิดสารยับยั้งในระบบ	- ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานาน - จำเป็นต้องควบคุมสภาวะให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

## 2.7 วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว (Response Surface Methodology; RSM)

วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวหรือ RSM เป็นวิธีการคณิตศาสตร์และสถิติที่เป็นประโยชน์เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา ในการตรวจสอบความสัมพันธ์ของตัวแปรที่สนใจ สามารถหาจุดที่เหมาะสม Optimization จากความสัมพันธ์ของตัวแปรเหล่านั้นได้ (Montgomery และคณะ, 1984)

วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิวมีตัวแปรที่สำคัญ 2 ตัวแปร ดังนี้

- 1) Input Variable คือ ตัวแปรต้นหรือปัจจัยเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้น ปริมาณสาร เป็นต้น
- 2) Response Variable คือ ค่าผลตอบสนองเป็นค่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เช่น ผลผลิต (yield) ความหนืด ความแข็ง ระดับความเข้ม (ทางประสาทสัมผัส) เป็นต้น

วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรต้น กับค่าการตอบสนอง ซึ่งจะแสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนอง เมื่อระดับของปัจจัยเชิงปริมาณเปลี่ยนแปลง และสามารถหาระดับของปัจจัยเชิงปริมาณที่เหมาะสม (optimum value) ที่จะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด (อิศรพงษ์ พงษ์ศิริกุล, 2544)

หลักการที่สำคัญของวิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงสร้างพื้นผิว เพื่อนำเสนอผลการวิจัยมีหลักการดังนี้

- 1) การที่จะนำเสนอแบบพื้นผิวที่ผิวผลตอบ ต้องมีแผนการทดลองที่เหมาะสม อย่างน้อยต้องมีตัวแปรอิสระ 2 ตัวขึ้นไป และต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ต้องมีตัวแปรตามอย่างน้อย 1 ตัวขึ้นไปและต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณด้วย ดังนั้นแผนการทดลองที่จะสามารถสร้างพื้นผิวผลตอบได้ คือ Factorial Design, Mixture Design, Central Composite Design (CCD), Plackett & Burman Design
- 2) ระดับของตัวแปรอิสระที่ต้องผันแปรไปนั้น จำเป็นต้องครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษา
- 3) จากนั้นนำข้อมูลของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ( $X_i$ ) มีสัมพันธ์กับข้อมูลของตัวแปรตาม ( $Y_i$ ) เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) ซึ่งอาจจะมีทั้งความสัมพันธ์กันในเชิงเส้นตรง (Linear Model) ความสัมพันธ์ในเชิง Interaction (Interactin model) ความสัมพันธ์กันในเชิง Quadratic (Quadratic Model) ดังสมการที่ 2-8 และ 2-9
- 4) นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ไปสร้างเป็นภาพสามมิติ หรือที่เรียกว่าสร้างพื้นผิวผลตอบแนวความคิดทั่วไป (ไพโรจน์ วิริยจारी, 2555)

พิจารณาสมการ

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (2-8)$$

เมื่อ  $Y$  = ค่าตอบสนองที่สังเกตได้ ซึ่งมักรู้จักกันในชื่อ Dependent variable

$f$  = ฟังก์ชันของการตอบสนองของ  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ซึ่งเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ มักรู้จักกันในชื่อ Independent variable

$\varepsilon$  = เทอมของความคลาดเคลื่อนสุ่ม

ถ้ากำหนดว่า

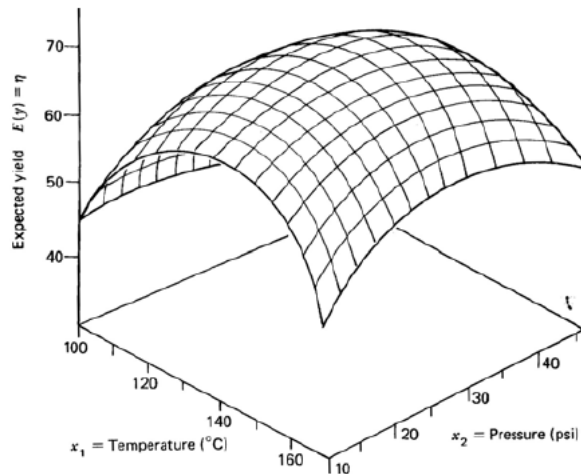
$$E(Y) = f(x_1, x_2) = \eta \quad (2-9)$$

เมื่อ  $\eta$  คือพื้นผิว (Surface) ดังนั้นสามารถแสดงความสัมพันธ์ของ  $\eta$  และตัวแปรทั้ง 2 ได้

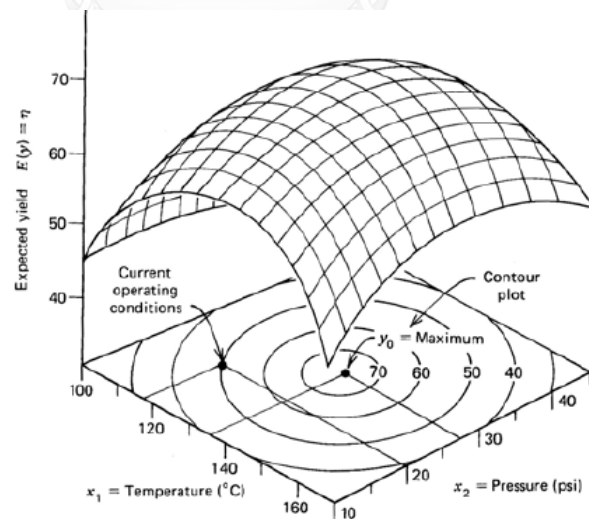
ดังนี้

$$\eta = f(x_1, x_2) \quad (2-10)$$

ซึ่งเรียกว่าผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว (Response surface) (Montgomery และคณะ, 1984) การนำค่า  $\eta$  มาพล็อตกับระดับของตัวแปร  $x_1$  และ  $x_2$  แสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปแบบของกราฟิก โดยที่  $\eta$  จะถูกพล็อตกับระดับของ  $x_1$  และ  $x_2$  เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น หรืออาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบ



รูปที่ 2 - 9 ภาพ 3 มิติของผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว



รูปที่ 2 - 10 contour plot ของผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิว

อย่างไรก็ตามในการศึกษาโดยใช้วิธีการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวนั้น จำเป็นต้องค้นหาฟังก์ชันที่แท้จริงระหว่างตัวแปรตามหรือค่าตอบสนอง ต่อตัวแปรอิสระต่าง ๆ เป็นลำดับแรก การค้นหาฟังก์ชันต่าง ๆ เหล่านี้มักใช้ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล (Polynomial) ลำดับต้น ๆ เช่น ลำดับหนึ่งหรือกำลังหนึ่ง (First order) ลำดับสองหรือกำลังสอง (Second order) เป็นต้น โดยทั่วไปฟังก์ชันซึ่งประมาณความสัมพันธ์แบบกำลังหนึ่ง มีแบบจำลองดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (2-11)$$

สำหรับระบบมีลักษณะความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง ต้องใช้โพลีโนเมียลที่มีลำดับสูงขึ้น เช่น ลำดับสองหรือกำลังสองซึ่งมีแบบจำลองดังนี้

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^k \beta_{ji} X_i X_j + \varepsilon \quad (2-12)$$

$\beta_0$  = intercept ประมาณด้วย  $\beta_0$

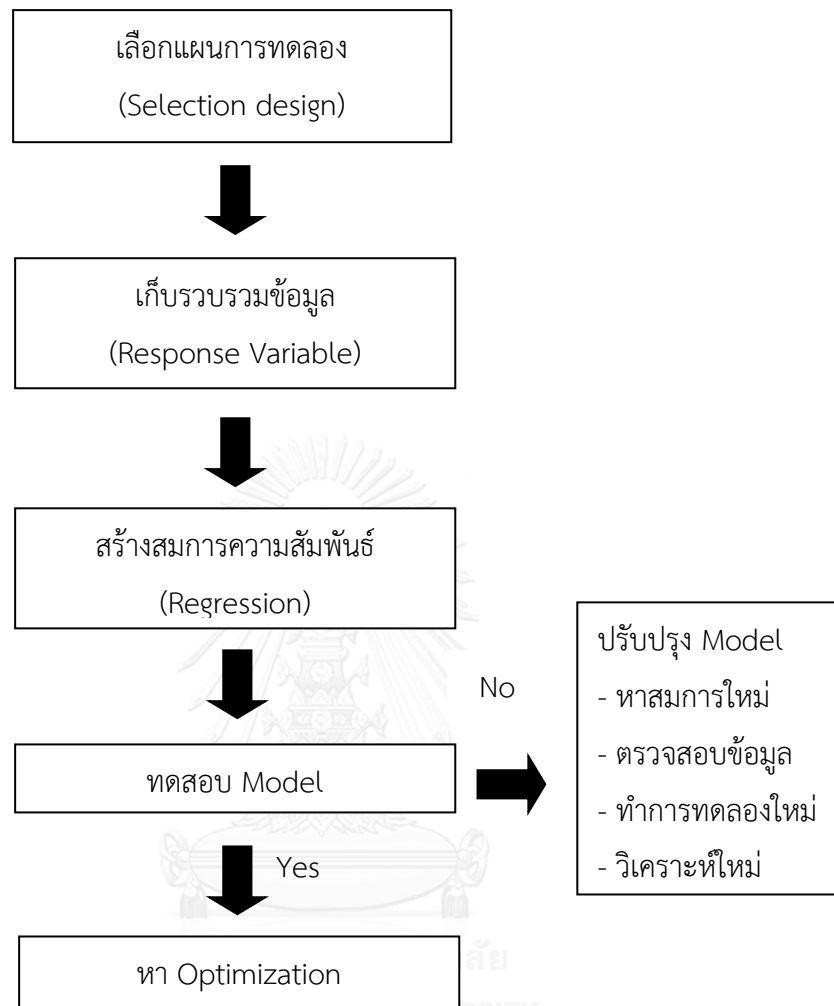
$\beta_i$  = the linear effect of  $X_i$ ; ประมาณด้วย  $\beta_i$

$\beta_{ii}$  = the quadratic effect of  $X_i$ ; ประมาณด้วย  $\beta_{ii}$

$\beta_{ij}$  = the interaction effect of  $X_i, X_j$  ประมาณด้วย  $\beta_{ij}$  โดยที่  $\varepsilon \sim N(0,1)$



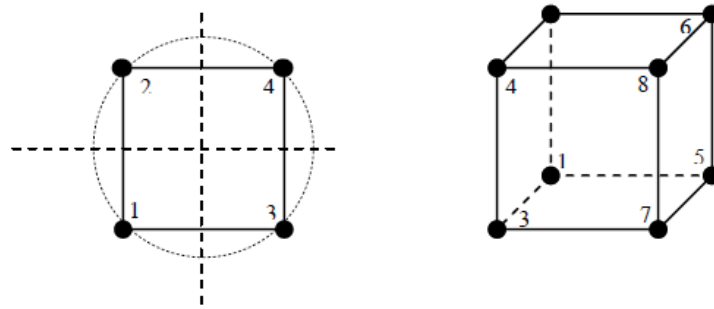
## ขั้นตอนการทำ RSM



- 1) กำหนดแผนการทดลองที่จะใช้และการเตรียมตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบตัวอย่างที่เหมาะสมที่สามารถให้ข้อมูลเพียงพอในการสร้าง Contour plot โดยกำหนด Factor หรือปัจจัยที่สำคัญ 2 หรือ 3 ปัจจัย กำหนดระดับปัจจัยที่จะศึกษา (RSM จะใช้ 3 ระดับขึ้นไป)
- 2) เก็บรวบรวมข้อมูลและนำข้อมูลที่ได้มาสร้างสมการ regression ที่ดีที่สุด (SAS , SPSS)
- 3) สร้าง Contour plot จากสมการที่หามาได้ (ใช้ Program sufer , statistica หรือ Sigma plot)
- 4) ตรวจสอบ Model
- 5) Verification โดยการทำ independent run ภายใต้ขอบเขตของตัวแปรแต่ละตัว และตรวจหา Optimization

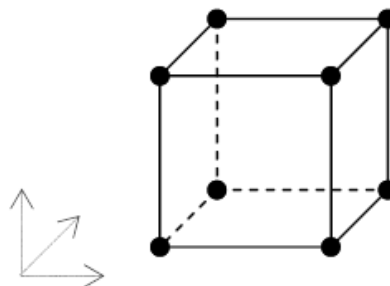
ปัญหาเกี่ยวกับการแสดงผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวส่วนมากจะใช้แบบจำลองกำลังหนึ่งหรือแบบจำลองกำลังสองในการหาผลตอบ แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ถ้าพื้นผิวที่เราสนใจอยู่มีขนาดใหญ่ การออกแบบผลตอบสนองแบบโครงร่างพื้นผิวมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ การออกแบบสำหรับเพื่อสร้างแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และแบบจำลองอันดับที่สอง ซึ่งการออกแบบสำหรับสร้างแบบจำลองอันดับที่สองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้าง Quadratic model ของผลตอบ มีวิธีการที่น่าสนใจอยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ

- 1) การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD) เป็นหนึ่งในวิธีการหาพื้นผิวผลตอบที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย  $2^k$  แฟกทอเรียลที่มี  $nf$  รัน ซึ่ง  $2^k$  รันในแนวแกนหรือแนวรูปดาว และ  $nc$  รันที่จุดศูนย์กลาง ดังรูปที่ 2-11 แสดง CCD สำหรับ  $k=2$  และ  $k=3$  บ้าง



รูปที่ 2 - 11 การออกแบบส่วนประสมกลาง (CCD) สำหรับ  $k=2$  และ  $k=3$

- 2) การออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) เป็นการออกแบบสามระดับสำหรับฟิตพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล  $2^k$  กับ การออกแบบบล็อกไม่สมบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังสามารถใช้ในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย

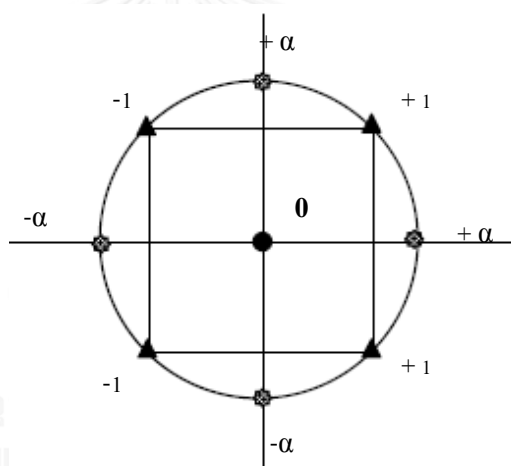


รูปที่ 2 - 12 แสดงการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน สำหรับ  $k = 3$

เนื่องจากการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี 2 และไม่ได้รวมเอาจุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจำกัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ ดังรูปที่ 2-13 ซึ่งการกระทำเช่นนี้มีประโยชน์มากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์เป็นการรวมเอาปัจจัยระดับ (Factor-Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปได้ที่จะทำการทดลองอันเนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านกายภาพของกระบวนการ

งานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองโดยมี 2 ปัจจัย จึงขอกล่าวถึงการออกแบบการทดลองแบบการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design; CCD)

การออกแบบส่วนประสมมีหลักการออกแบบการทดลองที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัยห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลางดังรูปที่ 2-13 จะประกอบด้วยจำนวนชุดการทดลองทั้งหมดแสดงตามตารางที่ 2-9



รูปที่ 2 - 13 ตำแหน่งชุดการทดลองแบบประสมส่วนกลาง

ตารางที่ 2 - 9 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการทดลองกับสัญลักษณ์ตามชุดการทดลองแบบประสม  
ส่วนกลาง

สัญลักษณ์	ลำดับ	ปัจจัยที่ 1	ปัจจัยที่ 2	
▲	1	-1	-1	
	2	-1	1	
	3	1	-1	
	4	1	1	
⊗	5	-1.414	0	
	6	1.414	0	
	7	0	-1.414	
	8	0	1.414	
●	9	0	0	
	ทำการทดลอง	10	0	0
	ซ้ำที่จุด	11	0	0
	ศูนย์กลางการ	12	0	0
	ทดลอง	13	0	0

แผนการทดลองแบบประสมส่วนกลางจะประกอบด้วย

- 1) ตำแหน่งการทดลอง ของ  $2^n$  Factorial Design ( ถ้า  $n$  ในที่นี้คือตัวแปรอิสระ 2 ตัว ดังนั้น  $2^2$  จะมีตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ได้แก่  $(-1,-1)$   $(+1,-1)$   $(+1, +1)$  และ  $(-1, +1)$
- 2) ตำแหน่งการทดลองที่เพิ่มขึ้นมาอีก 4 ตำแหน่ง คือตำแหน่งที่เป็น (Axial Point) แนว  $+ \alpha$  หรือ  $- \alpha$  ในแนวแกน ได้แก่  $(+ \alpha, 0)$   $(- \alpha, 0)$   $(0, + \alpha)$  และ  $(0, - \alpha)$
- 3) ตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่การทดลองอีก 1 ตำแหน่ง คือศูนย์กลาง (Central Point) ตำแหน่ง  $(0,0)$

เพราะฉะนั้นการทดลองแบบประสมส่วนกลาง กรณีที่มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว จะมีตำแหน่งเพิ่มขึ้นจาก  $2^2$  ของ Factorial Design อีก 5 ตำแหน่งคือ  $(+ \alpha, 0)$   $(- \alpha, 0)$   $(0, + \alpha)$   $(0, - \alpha)$  และ  $(0, 0)$  ทำให้การทดลองแบบนี้จึงสามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการโดยปกติแล้วจะมีการทดลองซ้ำที่จุดศูนย์กลางเท่ากับ  $2n$

## 2.8 การย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (Two-stage anaerobic digestion)

ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดและจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทนมีความแตกต่างกัน เช่น จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดเจริญได้ดีที่พีเอชช่วง 5.5-6.5 ส่วนจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทนจะเจริญได้ดีในช่วงพีเอช 6.8-7.2 ทำให้กรดที่เกิดจากขั้นตอนการหมักกรดส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทน ทำให้มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่ำลง จึงได้มีการพัฒนาระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนขึ้น โดยวิธีการแยกกลุ่มจุลินทรีย์ทั้งสองออกจากกัน เพื่อสามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกลุ่มจุลินทรีย์ทั้งสองชนิด เพื่อให้จุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่มสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ถือเป็น การเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพให้กับระบบ (อรรวรรณ วัฒนยมนาพร, 2553)

ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนประกอบด้วยถังปฏิกริยาสองถังแยกออกจากกันโดยเรียงต่อกันแบบอนุกรม ถังแรกเป็นถังสำหรับการสร้างกรด และถังที่สองจะเป็นถังสำหรับการสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งจะมีการควบคุมสภาวะให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังทั้งสอง เพื่อให้จุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่มทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ข้อดีและข้อเสียของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

### ข้อดีของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

- สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมที่สุดต่อจุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่มได้
- สามารถลดขนาดถังปฏิกรณ์ได้ ทำให้ง่ายต่อการดูแลระบบ
- จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดสามารถเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่โดยไม่มีผลไปรบกวนการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทน
- เกิดผลผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราที่สูง และมีเปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนสูง

- สารพิษที่มีผลต่อจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทน เช่น แอมโมเนีย กรดไขมัน และซัลไฟด์ จะถูกกำจัดในถังปฏิกริยาขั้นตอนแรก
- มีประสิทธิภาพในการลดลงของของแข็งแขวนลอยสูง

#### ข้อเสียของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

- ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างและควบคุมระบบสูง
- ต้องมีการควบคุมโดยผู้ชำนาญการ
- ต้องมีอุปกรณ์เพิ่มขึ้นเพื่อใช้สำหรับติดตาม ตรวจสอบ และควบคุมระบบ

## 2.9 เทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวล

ปัจจุบันรูปแบบของเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีหลายรูปแบบ ได้แก่ ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Complete Stirred Tank Reactors : CSTR) ยูเอเอสบี (Upflow anaerobic sludge blanket; UASB) ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic covered lagoon) ตรึงฟิล์ม (Anaerobic fixed film; AF) ระบบแผ่นกั้นแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic baffled reactor : ABR) เป็นต้น โดยแต่ละรูปแบบจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น สภาพของจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในถัง รูปแบบการเดินระบบ การควบคุมสภาวะต่างๆในระบบ ชนิดของสารอินทรีย์ที่จะนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งแต่ละระบบจะมีข้อเด่นและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ดังแสดงในตารางที่ 2-10

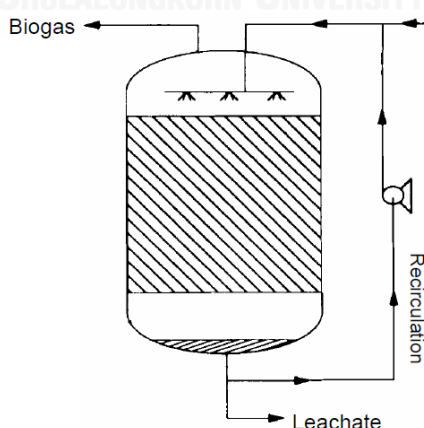
ตารางที่ 2 - 10 ข้อเด่นและข้อจำกัดของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวล

รูปแบบ	ข้อเด่น	ข้อจำกัด
ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Complete Stirred Tank Reactors : CSTR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การกวนผสมของสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์ภายในถังเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ</li> <li>- สามารถรับสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงได้ดี</li> <li>- สามารถรับของเสียที่มีสารพิษเจือปนได้ เนื่องจากมีการกวนผสมทำให้สารพิษเจือจาง</li> <li>- มีการตรวจวัดและควบคุมระบบไม่ยุ่งยาก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ถังปฏิกรณ์ต้องมีขนาดใหญ่ เพื่อแก้ปัญหาเชื้อจุลินทรีย์ในระบบลดลง เนื่องจากเกิดการหลุดออกนอกระบบ</li> <li>- มีการใช้พลังงานในการกวนผสม ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น</li> <li>- น้ำเสียที่ออกจากระบบมีค่าความสกปรกสูง เนื่องจากมีตะกอนเท่ากับตะกอนภายในถัง</li> </ul>

รูปแบบ	ข้อเด่น	ข้อจำกัด
ถังปฏิกรณ์แบบตะกอนลอย (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถรับอัตราการรับสารอินทรีย์ได้สูง</li> <li>- มีระยะเวลาในการบำบัดสั้น</li> <li>- ไม่มีปัญหาเรื่องการอุดตันของถังปฏิกรณ์</li> <li>- ไม่ต้องใช้สารตัวกลางสำหรับให้เชื้อจุลินทรีย์เกาะ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องใช้เวลาในการเริ่มต้นเดินระบบ (Start - Up) ค่อนข้างนาน</li> <li>- การดูแลและการเดินระบบมีความยุ่งยาก ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญ</li> <li>- ไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง</li> </ul>
ระบบบ่อปิดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic covered lagoon)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ก่อสร้างง่าย</li> <li>- การดูแลและเดินระบบง่าย</li> <li>- ใช้ต้นทุนต่ำ</li> <li>- บ่อมีผลกระทบต่ำ สารอินทรีย์ที่เข้ามามีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติอย่างรวดเร็ว</li> <li>- เหมาะกับของเสียที่มีความเข้มข้นของแข็งสูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีอัตราการรับสารอินทรีย์ต่ำ</li> <li>- ใช้พื้นที่ในการก่อสร้างระบบมาก</li> <li>- ประสิทธิภาพในการกวนผสมเกิดขึ้นต่ำ</li> <li>- การจัดการตะกอนในบ่อเป็นไปได้ยาก</li> </ul>
ระบบแผ่นกั้นแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic baffled reactor : ABR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่มีปัญหาการหลุดของเชื้อจุลินทรีย์ แม้เชื้อจุลินทรีย์จะเจริญเติบโตแบบตะกอนแขวนลอยหรือเป็นเม็ด</li> <li>- สามารถลดเวลากักพักเซลล์ได้ดีน้อยเท่าที่ต่อการโดยที่เวลากักเก็บของแข็งยังสูงอยู่</li> <li>- ไม่จำเป็นต้องใช้หน่วยแยกก๊าซหรือตะกอนเพิ่ม</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นและสารแขวนลอยสูงเนื่องจากอาจเกิดการสะสมตัวของตะกอนในแต่ละห้องส่งผลทำให้เกิดความเสียหายของน้ำเสียและก๊าซชีวภาพ</li> <li>- กรณีน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีการเปลี่ยนแปลงสมบัติอย่างรวดเร็วอาจส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในบริเวณห้องแรกของระบบทำให้ระบบล้มเหลวได้</li> </ul>
การหมักแบบท่อไหล (Plug-flow Digestion)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การออกแบบและการทำงานไม่ซับซ้อน</li> <li>- บำบัดของเสียได้หลายประเภท</li> <li>- ประหยัดพลังงานเนื่องจากไม่ต้องการการกวนผสม</li> <li>- อัตราส่วนที่เกิดการหมักต่อปริมาตรใช้งานสูง</li> <li>- โอกาสที่จะเกิดการล้มเหลวของระบบน้อย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เหมาะกับวัตถุดิบที่ปริมาณของแข็งต่ำ ทำให้อัดน้ำเยอะ</li> <li>- ประสิทธิภาพต่ำลงเมื่อปริมาณของแข็งสูงขึ้น</li> <li>- ต้องการปรับสภาพเบื้องต้นวัตถุดิบก่อนหมัก</li> <li>- ต้องการปรับสภาพของเหลวหลังจากที่ผ่านการหมัก</li> </ul>
ถังปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic fixed film : AFF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีอัตราการรับสารอินทรีย์ที่สูง</li> <li>- มีปริมาณจุลินทรีย์สูง</li> <li>- ระยะเวลาที่น้ำต่ำ (HRT)</li> <li>- ผลิตก๊าซชีวภาพได้สูง</li> <li>- จุลินทรีย์ออกจากระบบได้ยาก</li> <li>- ระบบมีเสถียรภาพและประสิทธิภาพสูง</li> <li>- ต้นทุนในการเดินระบบต่ำไม่ต้องมีการกวนผสม</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้เวลาในการเริ่มต้นเดินระบบนาน เนื่องจากมีวัสดุตัวกลางในถังปฏิกรณ์ เพื่อให้จุลินทรีย์เกาะในลักษณะของฟิล์มชีวภาพ</li> <li>- อาจเกิดการอุดตันได้ง่ายไม่เหมาะกับน้ำเสียที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูง</li> <li>- จำเป็นต้องมีการเวียนน้ำเสีย</li> <li>- มีต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากค่าวัสดุตัวกลาง</li> </ul>

## 2.10 ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต (Leach bed reactor: LBR)

ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตถูกออกแบบมาครั้งแรกเพื่อบำบัดขยะที่เป็นของแข็ง เช่น เศษอาหาร และสารชีวมวลต่างๆ เช่น พืชพลังงาน เศษวัสดุเหลือใช้จากการเกษตร เป็นต้น ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตมีการเดินระบบการหมักแบบทีละเท (Batch) โดยจะเริ่มต้นระบบด้วยการใส่สารอินทรีย์ที่เป็นของแข็งลงในถังปฏิกรณ์ มีการปล่อยให้น้ำไหลลักษณะโปรยเป็นฝอยในส่วนบนของถังปฏิกรณ์ เพื่อเพิ่มความชื้นให้กับสารอินทรีย์ที่อยู่ในถัง ทำให้จุลินทรีย์สามารถทำงานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยน้ำจะไหลผ่านชั้นของสารอินทรีย์ในถังและจะเกิดน้ำชะ (liquid leachate) ไหลลงข้างล่างถังปฏิกรณ์ โดยจะมีถังสำหรับใส่น้ำชะที่เกิดขึ้นเพื่อเวียนน้ำชะกลับขึ้นไป โดยจะมีการหมุนเวียนน้ำในลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ ดังรูปที่ 2-14 ซึ่งการหมุนเวียนน้ำในลักษณะนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าระบบในขั้นตอนไฮโดรไลซิสของกระบวนการการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน เมื่อเกิดการย่อยสลายในขั้นตอนดังกล่าวจะเกิดกรดอินทรีย์ระเหย (VFA) ไหลลงมาอยู่ในน้ำที่ชะออกมาจากข้างล่างถัง ซึ่งกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มข้นสูง แต่จากการหมุนเวียนน้ำกลับขึ้นไปและการกระจายน้ำเป็นฝอยถือเป็นการเจือจางกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นและเป็นการเพิ่มอัตราการเปลี่ยนกรดอินทรีย์เป็นกรดอะซิติก ทำให้ค่าพีเอชที่เกิดขึ้นในระบบไม่ต่ำเกินไป จึงส่งผลกระทบต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนน้อยลง ดังนั้นการดำเนินระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตถือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารอินทรีย์ที่มีลักษณะเป็นของแข็ง นอกจากนี้ถือเป็นการลดปริมาณที่เสถียรภาพสูง เนื่องจากระบบสามารถควบคุมอัตราการเวียนน้ำกลับได้เมื่อระบบมีพีเอชที่มากเกินไป (Xie และคณะ, 2012)

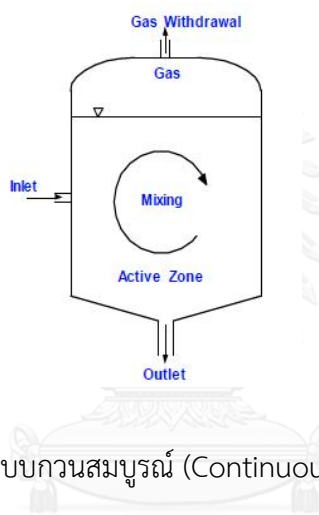


รูปที่ 2 - 14 ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต (Leach bed reactor: LBR)



## 2.11 ถังปฏิกรณ์แบบกวนผสม (Continuously Stirred Tank Reactor, CSTR)

ถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมเป็นถังปฏิกรณ์ที่ของเหลวและของแข็งภายในถังเกิดการกวนผสม วิธีการกวนผสมทำโดยการติดตั้งใบกวน ซึ่งใบกวนที่ใช้จะมีรูปทรงต่างๆ เช่น แบบใบพาย หรือแบบสกรู ติดตั้งไว้ภายในถัง ดังรูปที่ 2-15 การกวนผสมที่เกิดขึ้นจะทำให้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์เท่ากันทั่วทั้งถังและทำให้มีการสัมผัสระหว่างจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ได้ดี ส่งผลให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายภายในระบบเกิดได้ดี ยังป้องกันการเกิดเศษตะกอนลอยที่ระดับน้ำและป้องกันการตกตะกอนด้านล่างของถังปฏิกรณ์ นอกจากนี้ยังสามารถช่วยลดความเข้มข้นของสารอาหารภายในระบบให้มีค่าลดลงจนไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)



รูปที่ 2 - 15 ถังปฏิกรณ์แบบกวนผสม (Continuously Stirred Tank Reactor, CSTR)

## 2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.12.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวลที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น

กลิ่นประทุม ปัญญาปิง (2555) ศึกษาศักยภาพการย่อยสลายให้ก๊าซมีเทนของเศษก้านและใบไม้หลายชนิด โดยใช้ชุดถังหมักปริมาตร 400 มิลลิลิตร ต่อเข้ากับชุดทดสอบหาปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น ซึ่งใช้อัตราส่วนของของเสียผสม : เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น 70:30 งานวิจัยนี้ได้แบ่งชุดการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ซึ่งแตกต่างกันที่วัตถุดิบที่ใช้ ผลการทดลองพบว่า ร้อยละของ BMP ในหน่วยของสัดส่วนการผลิตก๊าซมีเทนในระบบต่อการผลิตก๊าซมีเทนทางทฤษฎีของของเสียข้างต้นในชุดที่ 1 (เศษก้านและใบไม้รวมของชุมชน มทร.ล้านนา) ชุดที่ 3 (เศษก้านและใบมะม่วง) และ ชุดที่ 4 (เศษก้านและใบสัก) มีค่าใกล้เคียงกันคือร้อยละ 25.58 25.06 และ 25.38 ตามลำดับ ส่วน ร้อยละของ BMP ในชุดที่ 2 (เศษก้านและใบไม้รวมชุมชนบ้านทุ่งปี่) มีค่าต่ำสุดคือร้อยละ 20.59 และ

ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของของเสียในชุดการทดลองที่ 1-4 เท่ากับร้อยละ 59.72 55.00 56.61 และ 53.66 ตามลำดับ

กลินประทุม ปัญญาปิง (2556) ศึกษาการย่อยสลายของเศษก้านและใบลำไย ทั้งใบเขียว(สด) และน้ำตาล (แห้ง) ในสภาวะไร้ออกซิเจน เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและผลพลอยได้ โดยใช้ถังหมักแบบไม่มีการกวนขนาด 200 ลิตร และใช้ตะกอนจุลินทรีย์จากมูลสุกรเป็นเชื้อตั้งต้น หมักร่วมกับน้ำกากส่า โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลองตามอัตราส่วนของใบลำไยสดและแห้งที่แตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่า ชุดที่ 2 (อัตราส่วนสด: แห้ง 3:1) ให้ก๊าซชีวภาพมากที่สุด ในระยะเวลา 14 วัน คือ 544 ลิตร เฉลี่ยประมาณ 40 ลิตร/วัน โดยมีก๊าซมีเทนมากที่สุดร้อยละ 34 ชุดที่ 1 (อัตราส่วนสด:แห้ง 4:0) ให้ก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกับชุดที่ 2 คือ 498.5 ลิตร และชุดที่ 3 (อัตราส่วนสด: แห้ง 2:2) ให้ก๊าซชีวภาพน้อยที่สุด คือ 247.5 ลิตร และผลพลอยได้ของงานวิจัยนี้ คือ ได้ปุ๋ยน้ำชีวภาพที่ดี ซึ่งมีธาตุอาหารสำคัญ คือ ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และโพแทสเซียม (K) สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของทุกชุดการทดลอง มีค่าใกล้เคียงกัน คือมีค่ามากกว่าร้อยละ 92

Gunaseelan (1988) ศึกษาการย่อยสลายใบแคฝรั่ง (*Gliricidia maculata*) ในสภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและผลิตปุ๋ยหมักชีวภาพ งานวิจัยนี้ได้นำใบแคฝรั่งสดมาลดขนาดให้มีขนาดประมาณ 1 มิลลิเมตร โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุด ซึ่งแตกต่างกันที่ปริมาณของใบแคฝรั่งและปริมาณน้ำที่เติม นั่นคือ 50 กรัม 200 กรัม และ 250 กรัม ต่อ ตะกอนจุลินทรีย์ 1000 มิลลิลิตร จากนั้นนำมาเข้าสู่กระบวนการหมักในถังหมักขนาด 3 ลิตร หมักที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 4 สัปดาห์ ผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่เติมใบแคฝรั่งและน้ำ อย่างละ 50 กรัม ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยสูงสุด คือ 180 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย สำหรับการตรวจคุณภาพของปุ๋ยหมักที่เกิดขึ้นพบว่า มีค่าไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และ โพแทสเซียม เพิ่มสูงขึ้นร้อยละ 34 11 และ 27 ตามลำดับ

Brown และคณะ (2012) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ โดยสารชีวมวลที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 8 ชนิด คือ หญ้า switchgrass ซึ่งข้าวโพด พางข้าวสาลี ของเสียจากการเกษตร ใบไม้ ขยะประเภทกระดาษ ไม้เมเบิล และไม้สน ซึ่งงานวิจัยนี้จะศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการหมักแบบใช้ถังหมักของแข็งแบบไร้ออกซิเจน และถังหมักแบบของเหลวแบบไร้ออกซิเจน ระยะเวลาในการหมัก 30 วัน ผลการทดลองพบว่าการหมักทั้ง 2 วิธีใช้ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นในชุดการทดลองที่ใช้ขยะประเภทกระดาษ และ ไม้สน ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังหมักของแข็งแบบไร้ออกซิเจนของ หญ้า switchgrass ซึ่งข้าวโพด พางข้าวสาลี ของเสียจากการเกษตร ใบไม้ ขยะประเภทกระดาษ ไม้เมเบิล

และไม้สน คือ 131.8 116.9 123.9 75.3 49.3 46.9 15.3 และ 17.0 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแห้ง ะเหยของวัตถุดิบชีวมวลที่เติมลงไป ตามลำดับ สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังหมักแบบ ของเหลวแบบไร้ออกซิเจน คือ 124.0 111.0 139.1 81.0 59.7 57.2 312.4 และ 54.3 ลิตรต่อ กิโลกรัมของของแห้งระเหยของวัตถุดิบ ตามลำดับ

### 2.12.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

Zhu และคณะ (2010) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากซังข้าวโพดที่ทำการปรับสภาพเบื้องต้น ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกันคือร้อยละ 1 2.5 5.0 และ 7.5 ( น้ำหนักต่อปริมาตร) ที่อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ผลจากการปรับสภาพเบื้องต้นพบว่า เมื่อ ปรับสภาพซังข้าวโพดที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้นไปจะยิ่งกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกจากซังข้าวโพดได้มากขึ้น โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 7.5 ปริมาณลิกนินและเฮมิเซลลูโลสลดลงร้อยละ 46.2 และ 13.8 ตามลำดับ สำหรับผลการ ทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า ชุดการทดลองที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอก ไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดคือ 372.4 ลิตรต่อกิโลกรัมของแห้งระเหย ซึ่งเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 37 เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ปรับสภาพ สำหรับชุดการทดลองที่ ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 ให้ผลผลิตมีเทนน้อยนั้นเป็น เพราะมีการใช้ความเข้มข้นที่สูงเกินไป ทำให้เกิดสารยับยั้งที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน

Juntarasiri และคณะ (2011) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบประดู่ (*Padauk Angsana leave*) และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยเปรียบเทียบอัตราของแห้งที่แตกต่างกันคือร้อยละ 2 5 และ 10 ของของแห้งทั้งหมด และเปรียบเทียบกับวิธีการปรับสภาพเบื้องต้นใบประดู่ 3 วิธี คือ การปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 2 ที่อุณหภูมิห้องระยะเวลา 24 ชั่วโมง การปรับสภาพด้วยเอมไซม์เซลลูเลส ระยะเวลา 24 ชั่วโมง และการปรับสภาพด้วยทั้งสองวิธี ข้างต้น จากนั้นนำชุดการทดลองแต่ละชุดการทดลองมาหมักในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนอย่างสมบูรณ์ที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 54 วัน ผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่ทำการปรับ สภาพใบประดู่ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 2 ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่มีอัตรา ภาระของแห้งร้อยละ 10 ของของแห้งทั้งหมด ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุด

Liew และคณะ (2011) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษใบไม้ร่วงที่ทำการปรับสภาพ เบื้องต้นโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกันคือร้อยละ 2 3.5 และ 5 และ มีการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนวัตถุดิบตั้งต้นต่อตะกอนจุลินทรีย์คือ 4.1 6.2 และ 8.2 จากนั้นทำการหมัก

ในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนอย่างสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 วัน ผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3.5 ที่อัตราส่วนวัตถุดิบตั้งต้นต่อตะกอนจุลินทรีย์ 4.1 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดคือ 82 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย จะหลังจากการปรับสภาพทำให้เซลล์และเฮมิเซลล์ลดลงร้อยละ 36.0 และ 34.9 ตามลำดับ

### 2.12.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อน

Nieves และคณะ (2011) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะเลลายปาล์มน้ำมัน โดยเปรียบเทียบการปรับสภาพเบื้องต้นทะเลลายปาล์มน้ำมัน 2 วิธี คือ ปรับสภาพด้วยสารละลายกรดฟอสฟอริกเข้มข้นร้อยละ 85.7 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และ ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 8 ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาต่างกัน คือ 10 20 40 และ 60 นาที จากนั้นทำการหมักในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนอย่างสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 วัน โดยจะทำการเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ปรับสภาพเบื้องต้น ผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่มีการปรับสภาพเบื้องต้นทะเลลายปาล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระยะเวลา 60 นาที ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด คือ 404 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยกรดฟอสฟอริก และชุดการทดลองที่ไม่มีการปรับสภาพเบื้องต้นพบว่าให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเพียง 283 และ 202 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยตามลำดับ

Xie และคณะ (2011) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าแห้งหมักที่ทำการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 1 2.5 5 และ 7.5 ร่วมกับการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 20 60 100 และ 150 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 48 ชั่วโมงด้วยวิธีบีเอ็มพี ผลการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จะทำให้ชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ทั้ง 4 ความเข้มข้น มีปริมาณซีโอดีสูงขึ้นร้อยละ 45 และสามารถละลายลิกนิน เฮมิเซลล์ และเซลล์ได้ร้อยละ 65.6 36.1 และ 21.2 ตามลำดับและจากผลบีเอ็มพี ของทั้ง 4 ชุดการทดลองพบว่าเกิดก๊าซมีเทน 359.5 401.8 449.5 และ 452.5 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ปรับสภาพพบว่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10-38.9 จากผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพหญ้าหมัก คือ ชุดการทดลองที่ทำการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 5 ร่วมกับการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

Chandra และคณะ (2012) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว โดยเปรียบเทียบการปรับสภาพเบื้องต้น 2 วิธีคือ ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 ระยะเวลา 120 ชั่วโมง และปรับสภาพเบื้องต้นโดยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 10 นาทีและมีการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 5 เพื่อปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง จากนั้นทำการหมักในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนอย่างสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 40 วัน ผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่ปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพ 184.8 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย สำหรับชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยความร้อนให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพ 315.9 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีการปรับสภาพพบว่าให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพียง 184.8 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย

Salehian และคณะ (2013) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเนื้อไม้สนที่ทำการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 8.0 น้ำหนักต่อน้ำหนัก ร่วมกับการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 0 และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 30 และ 60 นาที จากนั้นทำการหมักในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนอย่างสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 วัน โดยจะทำการเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ปรับสภาพเบื้องต้น ผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่มีการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 8.0 น้ำหนักต่อน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จะให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด คือ 178.2 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่าย เมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีการปรับสภาพเบื้องต้น พบว่าให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพียง 65 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่าย และการปรับสภาพด้วยวิธีนี้ทำให้วัตถุดิบมีร้อยละของลิกนินลดลงจาก 34.4 เป็น 28.6

Taherdanak และ Zilouei (2014) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเมล็ดและฟางข้าวสาลีที่ทำการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 8.0 น้ำหนักต่อน้ำหนัก ร่วมกับการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 0 25 50 75 และ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นทำการหมักในถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนอย่างสมบูรณ์ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 วัน โดยจะทำการเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ปรับสภาพเบื้องต้น ผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่มีการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 8.0 น้ำหนักต่อน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที จะให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด คือ 404 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่าย เมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีการปรับสภาพเบื้องต้น พบว่าให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพียง 219 มิลลิลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหยง่าย ซึ่งจากการปรับสภาพ

นี้ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 54.4 และการปรับสภาพด้วยวิธีนี้ทำให้วัตถุดิบมีร้อยละของลิกนินลดลงจาก 18 เป็น 10.8

ชนกพร วงษ์วัน (2555) ศึกษาผลของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การแช่ด้วยสารละลายต่าง การใช้ความร้อน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการใช้ของเสียเกลือโซเดียมที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็นสารหมักร่วมกับต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง สามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด 0.2 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย เมื่อเทียบกับต้นข้าวโพดที่ไม่มีการปรับสภาพ สามารถผลิตก๊าซได้เพียง 0.1 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย เมื่อนำเกลือโซเดียมที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาหมักร่วมกับข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง จะช่วยเพิ่มสารอินทรีย์ในระบบ ทำให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น ในงานวิจัยนี้ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของการเติมเกลือโซเดียม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการทดลองพบว่า เมื่อเติมเกลือโซเดียมร้อยละ 1 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีที่สุด โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึง 0.24 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย

#### 2.12.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต

Chanakya และคณะ (1993) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษใบไม้สดและเศษใบไม้แห้งที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยระบบไร้ออกซิเจนสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกใช้ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตผลิตกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ส่วนถังปฏิกรณ์ขั้นที่สองเป็นแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ใช้ผลิตก๊าซมีเทน จะทำการใส่เศษใบไม้ลงในถังปฏิกรณ์ขั้นที่หนึ่ง โดยในช่วงแรกจะใส่ใบไม้ 1 กรัมของของแข็งและในวันที่ 63 ของการเดินระบบจะใส่ใบไม้ 2 กรัมของของแข็ง จะทำการตรวจวัดกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำชะจากถังปฏิกรณ์ขั้นแรกเพื่อนำเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ขั้นที่สอง โดยกำหนดให้มีค่ากรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 6 กรัมต่อลิตร มีการปรับค่าพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 5 ในถังปฏิกรณ์ขั้นที่สองจะมีเชื้อจุลินทรีย์ผสมกับมูลวัวเพื่อช่วยในการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นก๊าซมีเทน ผลการทดลองพบว่า จากการใช้เศษใบไม้สดและเศษใบไม้แห้งในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสองขั้นตอน เกิดก๊าซชีวภาพ 290 และ 190 ลิตรต่อกิโลกรัมของวัตถุดิบ ตามลำดับ

Yu และคณะ (2002) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าโดยใช้ระบบย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกใช้ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตเป็นถังที่ใช้ผลิตกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ส่วนถังปฏิกรณ์ขั้นที่สองเป็นแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ใช้ผลิตก๊าซมีเทน โดยทำการใส่หญ้าสดลงในถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต มีการป้อนน้ำเข้าสู่ระบบทางด้านบนของถังปฏิกรณ์ ควบคุมพีเอชให้มีค่า 5.4 น้ำจะไหลลงทางด้านล่างของถังออกมาเป็นน้ำหมักหญ้า ซึ่งจะรวมกันที่ถังพักน้ำหมัก และจะมีการเวียนน้ำกลับขึ้นไปยังถังปฏิกรณ์ โดยจะมีการตรวจวัดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในน้ำหมักกรดทุกวัน และมี

การป้อนน้ำหมักหญ้าเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชั้นที่สอง โดยมีการกำหนดอัตราภาระชีโอดีสูงสุดเท่ากับ 2.7 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยจะทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังนี้ ผลการทดลองพบว่าในระยะ 1 เดือนแรก ค่าชีโอดีในระบบมีค่าสูงสุดเท่ากับ 35,000 มิลลิกรัมต่อลิตรเมื่อระบบดำเนินมาจนถึงระยะเวลา 190 วัน มีค่า ชีโอดีในระบบคงที่ประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นทั้งหมด 0.15 ลูกบาศก์เมตร ต่อกิโลกรัมหญ้าสด คิดเป็นก๊าซมีเทน 71%

ณัฐกาญจน์ ชราพ (2554) ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าชนิดต่างๆในประเทศไทยด้วยวิธีบีเอ็มพีและศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียว สำหรับหญ้าที่นำมาใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 7 ชนิด ได้แก่ หญ้ารูซี่ หญ้ากินนีสีม่วง หญ้าอะตราดัม หญ้าฟลิแคทูลัม หญ้าไรต์ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าแพงโกล่า ทำการทดลองในขวดซีรัมสี่ขาขนาด 120 มิลลิิตรที่ผสมสารละลายบัฟเฟอร์และหมักร่วมกับมูลวัว ระยะเวลาการทดลองรวม 63 วัน ผลการทดลองวิธีบีเอ็มพีซึ่งเป็นการหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนพบว่า หญ้ากินนีสีม่วงมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 0.170 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ส่วนการทดลองที่สองเป็นการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่มีอัตราการเวียนน้ำกลับที่แตกต่างกันคืออัตราเวียนน้ำกลับร้อยละ 25 และร้อยละ 100 ตามลำดับ โดยนำหญ้าที่หญ้ากินนีสีม่วงมาใช้ในการทดลอง ซึ่งถังปฏิกรณ์ทั้งสองที่มีอัตราการเวียนน้ำกลับที่แตกต่างกันโดยแต่ละถังจะป้อนหญ้ากินนีสีม่วงเท่ากับ 101.77 กรัมของของแข็งระเหยและมูลวัวสด 31.81 กรัมของของแข็งระเหย ผลการทดลองพบว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ 2 ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.317 และ 0.353 11 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ โดยถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีผลผลิตก๊าซชีวภาพที่มากกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 อยู่ที่ร้อยละ 10.81 ดังนั้นการทดลองที่อัตราการเวียนน้ำกลับที่สูงขึ้นจะให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เพิ่มขึ้น

#### 2.12.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) มาออกแบบชุดการทดลอง

Zhang และคณะ (2011) ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของการใช้ความร้อนร่วมกับกรดซัลฟูริกเจือจางในการปรับสภาพเบื้องต้นกากมันสำปะหลังเพื่อเพิ่มผลผลิตมีเทน โดยย่อยกากมันสำปะหลังด้วยซัลฟูริกเจือจาง และความร้อน (Thermal-dilute sulfuric acid : TDSA) ออกแบบชุดการทดลองโดยใช้โปรแกรมทางสถิติ โดยเลือกแผนการทดลองแบบ Central Composite Design : CCD เพื่อจะศึกษาชุดการทดลองที่ใช้ปริมาณสารปรับสภาพ และเวลาที่เหมาะสมมากที่สุดเพื่อให้ผลผลิตมีเทนที่สูงสุดระหว่างชุดการทดลองที่มีการปรับสภาพร่วมกันของกรด และความร้อนหรืออย่างไร

อย่างหนึ่ง หลังจากเลือกชุดการปรับสภาพที่เหมาะสม คือที่ระดับอุณหภูมิ 157.84 องศาเซลเซียส กรดซัลฟูริกร้อยละ 2.99 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก ของแข็งทั้งหมด) ระยะเวลา 20.15 นาที ได้ผลผลิต มีเทนมากที่สุด เท่ากับ 248 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ซึ่งมากกว่าชุดควบคุมถึงร้อยละ 56.96 ค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎี (ร้อยละ 56.53) จากผลการทดลองทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมกับการปรับสภาพกากมันสำปะหลังด้วยวิธี TDSA ในการเพิ่มผลผลิตมีเทน

Mukhopadhyay และคณะ (2013) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะจำพวกผักและพลาสติก โดยใช้หลักการตอบสนองพื้นที่ผิว และเลือกแผนการทดลองแบบประสมส่วนกลาง (central composite design : CCD) มาออกแบบชุดการทดลองที่เหมาะสมเพื่อหาชุดการทดลองที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุด โดยจะกำหนดปริมาณขยะจำพวกผักเท่ากัน คือ 400 กรัม และทำการกำหนดตัวแปรต้นในปริมาณที่ต่างกันคือ ปริมาณของขยะจำพวกพลาสติก ค่าอัตราส่วนความกว้างของขยะพลาสติกต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง และปริมาณความชื้น ค่าระยะเวลาในการย่อยสลาย ผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดคือ ชุดการทดลองที่กำหนดปริมาณของขยะจำพวกพลาสติก 15% ค่าอัตราส่วนความกว้างของขยะพลาสติกต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 ปริมาณความชื้น 162 มิลลิลิตร ระยะเวลาในการย่อยสลาย 18 สัปดาห์ ซึ่งให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 25.25 ลูกบาศก์เมตรต่อตันของขยะจำพวกผัก โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9976



ตารางที่ 2 - 11 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวลที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น

วัตถุดิบมวลชีวภาพ	รายละเอียด	ผลผลิตที่ได้		เอกสารอ้างอิง
		ก๊าซชีวภาพ (m <sup>3</sup> /kg VS)	ก๊าซมีเทน (m <sup>3</sup> /kg VS)	
เศษก้านและใบไม้หลายชนิด	ใช้อัตราส่วนของของเสียผสม : เชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น 70:30			กลินประทุม ปัญญาปิง และคณะ, 2555
	- ชุดที่ 1 (เศษก้านและใบไม้ของชุมชน มทร.)	25.58 %	0.090 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /Kg COD	
	- ชุดที่ 2 (เศษก้านและใบไม้รวมชุมชนทุ่งปี่ )	20.59 %	0.072 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /Kg COD	
	- ชุดที่ 3 (เศษก้านและใบมะม่วง)	25.06 %	0.088 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /Kg COD	
เศษก้านและใบลำไย ทั้งใบเขียว (สด) และน้ำตาล (แห้ง)	แบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดลอง	498.5 L		กลินประทุม ปัญญาปิง และคณะ, 2555
	- ชุดที่ 1 (อัตราส่วนสด: แห้ง 4:0)	544 L		
	- ชุดที่ 3 (อัตราส่วนสด: แห้ง 2:1)	247.5 L		
ใบแคฝรั่ง	การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ชุด			Nallathambi , 1988
	- ชุดที่ 1 (ใบแคฝรั่ง 50 กรัม : น้ำ 50 กรัม )		0.181 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / Kg VS	
	- ชุดที่ 2 (ใบแคฝรั่ง 200 กรัม : น้ำ 200 กรัม )		0.165 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> / Kg VS	
หญ้า ซังข้าวโพด ฟางข้าวสาลี ของเสียเกษตร ใบไม้ กระดาศ ไม้เมเปิล และไม้สน	ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการหมักแบบใช้ถังหมักของแข็งแบบไร้ออกซิเจน และถังหมักแบบของเหลวแบบไร้ออกซิเจน	ในถัง SS-AD	ในถัง L-AD	Brown และคณะ , 2012
	- หญ้า switchgrass	0.132	0.124	
	- ซังข้าวโพด	0.117	0.111	
	- ฟางข้าวสาลี	0.124	0.139	
	- ของเสียการเกษตร	0.075	0.081	
	- ใบไม้	0.049	0.059	
	- กระดาศ	0.047	0.057	
	- ไม้เมเปิล	0.015	0.312	
	- ไม้สน	0.017	0.054	

ตารางที่ 2 - 12 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

วัตถุดิบมวลชีวภาพ	การปรับสภาพ	รายละเอียด	ผลผลิตที่ได้		เอกสารอ้างอิง
			ก๊าซชีวภาพ (m <sup>3</sup> /kg VS)	ก๊าซมีเทน (m <sup>3</sup> /kg VS)	
ซังข้าวโพด	ใช้ NaOH ที่ 1% 2.5% 5.0% และ 7.5% ระยะเวลา 24 ชั่วโมง	- ชุดที่ปรับสภาพด้วย NaOH 5% ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด	0.372		Zhu และคณะ, 2010
		- ชุดการทดลองที่ไม่ปรับสภาพ	0.270		
ใบประดู่ และ น้ำเสียจาก โรงงาน	ปรับสภาพ 3 วิธี -ใช้ NaOH 2% เวลา 24 ชั่วโมง - ใช้เอมไซม์เซลลูเลส เวลา 24 ชั่วโมง - ใช้ทั้งสองวิธี	ชุดที่ปรับสภาพด้วย NaOH 2% เวลา 24 ชั่วโมง ที่มีอัตราภาระของแข็ง 10% TS ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด	275 m <sup>3</sup> /ton		Juntarasiri และคณะ, 2011
เศษใบไม้ร่วง	ใช้ NaOH ที่ 2% 3.5% และ 5%	-ชุดที่ปรับสภาพด้วย NaOH 3.5%		0.082	Liew และคณะ, 2011

ตารางที่ 2 - 13 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับความร้อน

วัตถุดิบมวลชีวภาพ	การปรับสภาพ	รายละเอียด	ผลผลิตที่ได้		เอกสารอ้างอิง
			ก๊าซชีวภาพ (m <sup>3</sup> /kg VS)	ก๊าซมีเทน (m <sup>3</sup> /kg VS)	
ทะลายปาล์ม น้ำมัน	ใช้ NaOH 8% ที่อุณหภูมิ 100 °C ที่ระยะ เวลา คือ 10 20 40 และ 60 นาที	- ชุดที่ปรับสภาพด้วย NaOH 8% ที่อุณหภูมิ 100 °C ระยะเวลา 60 นาที ให้ก๊าซชีวภาพสูงสุด	0.404		Nieves และคณะ, 2011
หญ้าแห้งหมัก	ใช้ NaOH ที่ 1% 2.5% 5% และ 7.5% และ ความร้อนที่ อุณหภูมิที่ 20 60 100 และ 150 °C เวลา 48 ชั่วโมง ด้วยวิธี BMP	- ชุดที่ปรับสภาพด้วย NaOH 5% ร่วมกับความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C ให้ก๊าซชีวภาพสูงสุด	0.450		Xie และคณะ, 2011
ฟางข้าว	ใช้ NaOH 3% ระยะ เวลา 120 ชั่วโมง		0.185	0.074	Chandra และคณะ, 2012
	ใช้ความร้อน ที่อุณหภูมิ 200 °C ระยะเวลา 10 นาที		0.316	0.313	

วัตถุดิบมวลชีวภาพ	การปรับสภาพ	รายละเอียด	ผลผลิตที่ได้		เอกสารอ้างอิง
			ก๊าซชีวภาพ (m <sup>3</sup> /kg VS)	ก๊าซมีเทน (m <sup>3</sup> /kg VS)	
เนื้อไม้สน	ใช้ NaOH 8.0% w/w ร่วมกับการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เวลา 10 30 และ 60 นาที	- ชุดที่ปรับสภาพด้วย NaOH 8.0% ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10 นาที	0.178		Salehian และคณะ , 2013
		- ชุดควบคุมที่ไม่มีการปรับสภาพ	0.065		
เมล็ดและฟางข้าวสาลี	ใช้ NaOH 8.0% w/w ร่วมกับการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 60 นาที	- ชุดที่ปรับสภาพด้วย NaOH 8.0% ที่อุณหภูมิ 75 °C เป็นเวลา 60 นาที	0.404		Taherdan a และ Zilouei, 2013
		- ชุดควบคุมที่ไม่มีการปรับสภาพ	0.219		
ต้นข้าวโพด	สารละลายต่าง (NaOH) และ การใช้ความร้อน		0.2		ชนกพร วงษ์วัน และ คณะ, 2555

ตารางที่ 2 - 14 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต

วัตถุดิบมวลชีวภาพ	รายละเอียด	ถังปฏิกรณ์ที่ใช้		ผลผลิตที่ได้		เอกสารอ้างอิง
		ชั้นที่ 1	ชั้นที่ 2	ก๊าซชีวภาพ	ก๊าซมีเทน	
เศษใบไม้สด และเศษใบไม้แห้ง	- กำหนดค่ากรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 6 กรัมต่อลิตร เข้าสู่ถังหมักกรด	LBR	AFF		290 และ 190 L/Kg วัตถุดิบ	Chanakya และคณะ, 1993
หญ้า	- กำหนดอัตราภาระซีไอทีสูงสุดเท่ากับ 2.7 กิโลกรัมซีไอทีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันที่เข้าสู่ถังหมักกรด	LBR	AFF		0.15 m <sup>3</sup> /kg VS (มีเทน ร้อยละ 71)	Yu และคณะ, 2002

### 2.13 สรุปผลการทบทวนเอกสารและแนวทางการวิจัย

จากการศึกษาทบทวนงานวิจัยที่ผ่านพบว่าไบocerดินสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยต้องนำมาปรับสภาพเบื้องต้นก่อนที่จะนำมาเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน จากการศึกษาทบทวนงานวิจัยพบว่า การปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร่วมกับความร้อนสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวลได้

ตารางที่ 2 - 15 เหตุผลของการพิจารณาเลือกชนิดชีวมวล วิธีการปรับสภาพเบื้องต้น และระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

สารชีวมวล	เหตุผล
ไบocerดินเทพนรงค์	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นวัตถุดิบเหลือใช้จากการนำเนื้อไม้ของไบocerดินไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ ซึ่งในอุตสาหกรรมนี้จะมีการปลูกพืชดังกล่าวไว้ใช้ในอุตสาหกรรมจำนวนมาก ทำให้ง่ายต่อการรวบรวมไบocerดินมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ</li> </ul>
การปรับสภาพเบื้องต้น	<p style="text-align: center;"><b>เหตุผล</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ช่วยย่อยสลายโครงสร้างของ ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส ทำให้ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสละลายออกมาจากโครงสร้างลิกโนเซลลูโลส จึงทำให้เซลลูโลสถูกย่อยได้ง่ายขึ้นในขั้นตอนไฮโดรไลซิสของกระบวนการย่อยแบบไร้ออกซิเจน</li> <li>- สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ยังช่วยรักษาพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียในขั้นตอนการผลิตกรดและขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน</li> <li>- การปรับสภาพด้วยสารละลายต่างจะเกิดสารพิษในปริมาณที่น้อยกว่าการปรับสภาพด้วยสารละลายกรด</li> <li>- การใช้ความร้อนทำให้ลิกนินเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ทำให้เซลลูโลสถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น</li> <li>- การปรับสภาพด้วยสารละลายต่างและความร้อนสามารถทำร่วมกันได้ และจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในทำลายโครงสร้างของลิกนิน</li> </ul>
วิธีวิเคราะห์ผล	<p style="text-align: center;"><b>เหตุผล</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นวิธีการคณิตศาสตร์และสถิติที่รวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนอง</li> <li>- สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นกับค่าการตอบสนอง</li> </ul>
การแสดงผลตอบสนองแบบ โครงร่างพื้นผิว (Response Surface ethodology; RSM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นวิธีการคณิตศาสตร์และสถิติที่รวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบสนอง</li> <li>- สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นกับค่าการตอบสนอง</li> </ul>

วิธีวิเคราะห์ผล (ต่อ)	เหตุผล
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถแสดงให้เห็นแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองเมื่อระดับของปัจจัยเชิงปริมาณเปลี่ยนแปลง</li> <li>- สามารถหาระดับของปัจจัยเชิงปริมาณที่เหมาะสม (optimum value) ที่จะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ดีที่สุด หรือ สามารถเลือกจุดที่เหมาะสมได้จาก ผลตอบสนองหลาย ๆ ค่าได้</li> </ul>
เชื้อหมักร่วม	เหตุผล
มูลโค	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เพื่อปรับค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัตถุดิบก่อนเข้าสู่ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบลิชเบตให้มีค่าอยู่ในช่วง 20-30</li> <li>- มูลโคเป็นแหล่งของจุลินทรีย์จำนวนมากที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส</li> </ul>
ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ	เหตุผล
ถังหมักแบบไร้ออกซิเจนสองขั้นตอนแบบต่อเนื่อง (Two-stage anaerobic digestion )	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมที่สุดต่อแบคทีเรียในแต่ละกลุ่มได้</li> <li>- สามารถลดขนาดถังปฏิกรณ์ได้ ทำให้ง่ายต่อการดูแลระบบ</li> <li>- แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดสามารถเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่โดยไม่มีผลไปรบกวนการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน</li> <li>- เกิดผลผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราที่สูง และมีร้อยละของก๊าซมีเทนสูง</li> <li>- สารพิษที่มีผลต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน เช่น แอมโมเนีย กรดไขมัน และซัลไฟด์ จะถูกกำจัดในถังปฏิกรณ์ขั้นตอนแรก</li> <li>- มีประสิทธิภาพในการลดของของแข็งแขวนลอยสูง</li> </ul>
ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต (Leach bed reactor: LBR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เหมาะสำหรับสารอินทรีย์ที่เป็นของแข็ง</li> <li>- รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงและคงที่ตลอดสภาวะการทำงาน</li> <li>- ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าระบบในขั้นตอนไฮโดรไลซิส</li> <li>- มีการหมุนเวียนน้ำกลับขึ้นไป เพื่อเป็นการเพิ่มความชื้นให้กับสารอินทรีย์ที่อยู่ในถัง ทำให้จุลินทรีย์สามารถทำงานได้ดีมีประสิทธิภาพมากขึ้น</li> </ul>
ถังปฏิกรณ์กวนผสม (Continuously Stirred Tank Reactor, CSTR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การกวนผสมของสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์ภายในถังเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ</li> <li>- สามารถรับสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงได้ดี</li> <li>- สามารถรับของเสียที่มีสารพิษเจือปนได้ เนื่องจากมีการกวนผสมทำให้สารพิษเจือจาง</li> </ul>

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

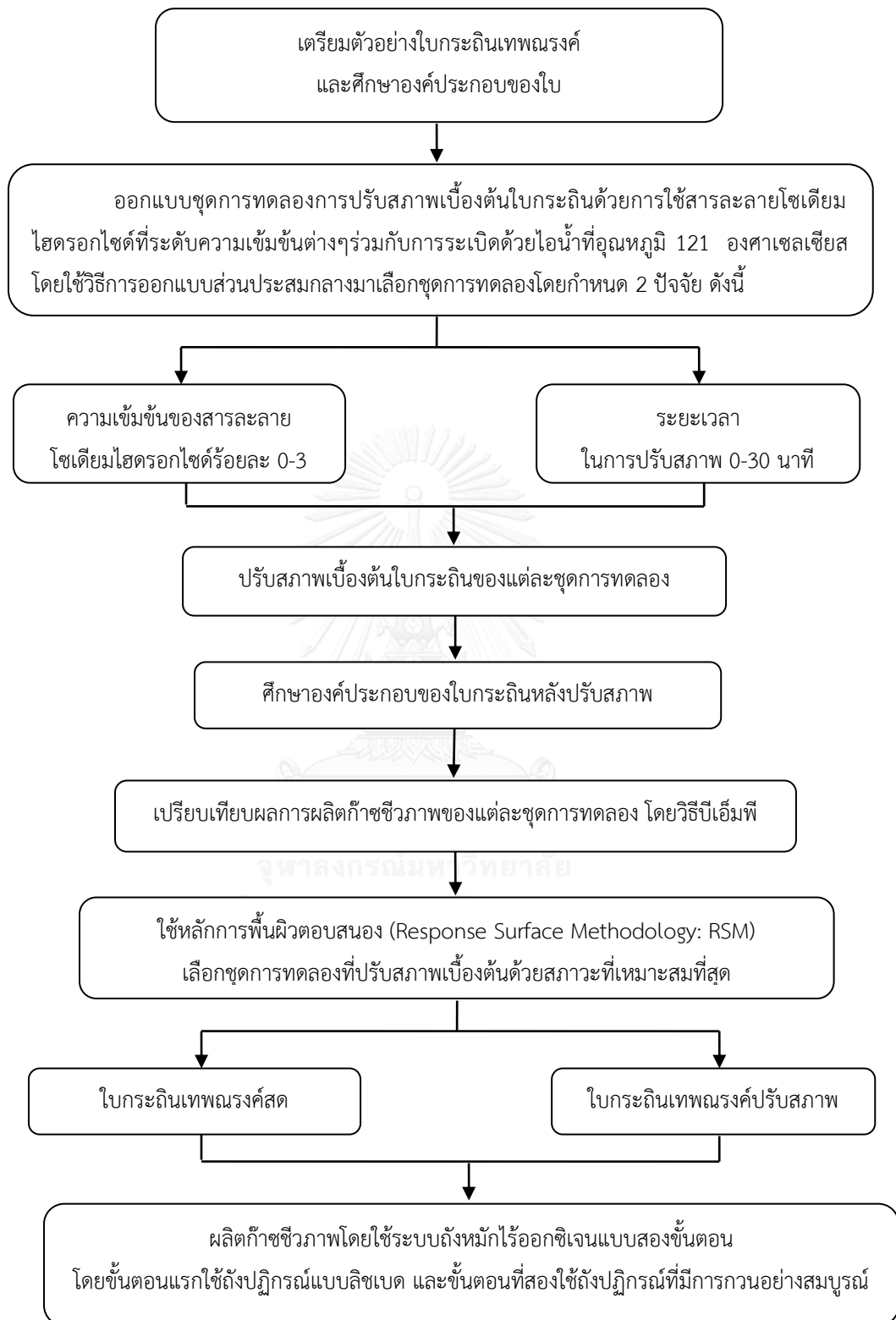
#### 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระดับห้องปฏิบัติการ ณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโอมัสจากไบโอมัสที่ผ่านการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไบโอมัสที่ผ่านการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นแล้วมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยมีขั้นตอนในการทดลอง (รูปที่ 3-1) ดังนี้

- 1) ศึกษาองค์ประกอบของไบโอมัสที่ผ่านการปรับปรุงสภาพเบื้องต้น โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน
- 2) ทำการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นของไบโอมัสที่ผ่านการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (กำหนดความเข้มข้นร้อยละ 0-3) ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส (กำหนดระยะเวลา 0-30 นาที) โดยใช้วิธีแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) มาออกแบบชุดการทดลอง จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณซีไอตีดกรองในสารละลายและวิเคราะห์องค์ประกอบของไบโอมัสที่ผ่านการปรับปรุงสภาพเบื้องต้น โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน
- 3) ศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโอมัสที่ผ่านการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นที่สภาวะต่างๆ โดยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลด้วยหลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เพื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงสภาพไบโอมัส
- 4) ศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโอมัสที่ผ่านการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นและไบโอมัสที่ผ่านการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นในระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (Two-stage anaerobic digestion) โดยขั้นตอนแรกเป็นถังปฏิกรณ์แบบลีชเบด (Leach Bed reactor) ระดับห้องปฏิบัติการ ปริมาตรการใช้งาน 5 ลิตร โดยศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายในการหมักไบโอมัสที่มีการเติมมูลโคเป็นหัวเชื้อ และขั้นตอนที่สองเป็นถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor: CSTR) ที่มี

การเดินระบบแบบต่อเนื่อง ปริมาณการใช้งาน 6 ลิตร โดยศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซ  
ชีวภาพจากน้ำหมักไบโกระถินเทพณรงค์ที่ได้จากถังปฏิกรณ์ขั้นตอนแรก





รูปที่ 3 - 1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย



### 3.2 เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

#### 3.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับกระบวนการปรับสภาพ

1. เครื่องบด (Grinder) (โง้วฮวดหุย, ประเทศไทย)
2. หม้อนึ่งแรงดันไอน้ำที่ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (Autoclave)

#### 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

1. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิ (Hot air oven) (Mettler, Germany)
2. เตาเผาควบคุมอุณหภูมิ (Hot air oven) (Mettler, Germany)
3. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) (Mettler, Germany)
4. เครื่องเขย่าสาร (Shaker) (ORTO ALRESA, Spain)
5. เครื่องปั่นกวน (Magnetic stirrer)
6. เครื่องปั่นเหวี่ยงสาร (Centrifuge)
7. เตาแผ่น ( Hot plate)
8. ตู้ดูดควัน
9. เครื่องแก้วต่างๆ
10. กระดาษกรอง (GF/C) (Whatman, England)

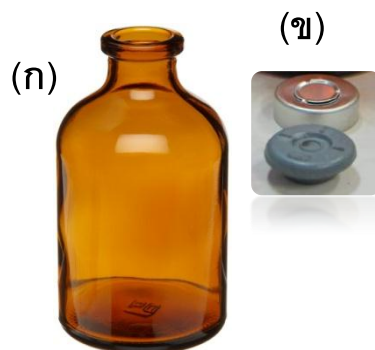
#### 3.2.3 เครื่องมือที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์

1. เครื่องวัดพีเอช (pH-meter) (Sartorius, Germany)
2. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer) (Sartorius, Germany)
3. เครื่องชั่งละเอียด (Analytical balance) (Sartorius, Germany)
4. เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (gas chromatography) (HP 6890)
5. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (JEOL JSM-6480LV)

#### 3.2.4 ชุดทดลองบีเอ็มพี

ชุดทดลองบีเอ็มพีประกอบด้วยขวดซีรัมสีขาปริมาตร 125 มิลลิลิตร มีจุกยางและฝาอลูมิเนียมแคมดั่งรูปที่ 3 - 2 สำหรับปิดขวดเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศจากภายนอกเข้าไปในขวดระหว่างที่ทำการทดลอง โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ปริมาตรการทำงาน 80 มิลลิลิตร เพื่อให้มีช่องว่าง (head space) สำหรับก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการทดลอง และในการตรวจวัดก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในขวดทดลองจะใช้กระบอกฉีดยาปริมาตร 50 มิลลิลิตร โดยจะใช้เข็มฉีดยาแทงลงไปตรงจุกยางที่ปิดขวดทดลอง แล้วก๊าซที่เกิดขึ้นในขวดจะดันลูกยางในกระบอกฉีดยาขึ้นมา

เมื่อลูกยางในกระบอกฉีดยาหยุดเคลื่อนที่ ทำให้สามารถทราบปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นได้ (ASTM E2170-01, 2008)



รูปที่ 3 - 2 ชุดทดลองบีเอ็มพี (ก) ขวดซีรัมซีซา (ข) จุกยางและฝาอลูมิเนียมแคม

### 3.2.5 ชุดระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (Two-stage anaerobic digestion)

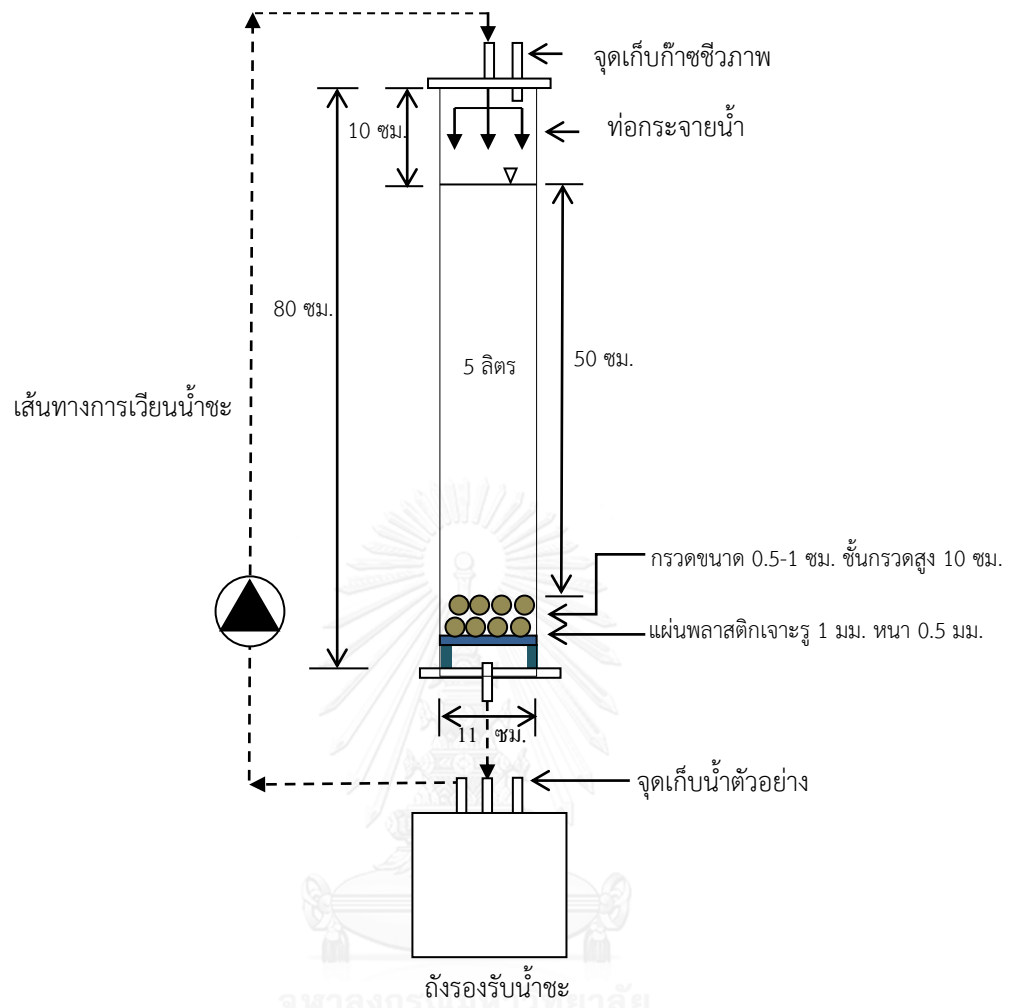
ขั้นตอนที่หนึ่ง : ชุดระบบถังปฏิกรณ์ผลิตกรดไขมันระเหยง่าย

#### 1. ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด (Leach Bed Reactor)

ถังทรงกระบอก ตัวถังทำด้วยอะคริลิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 เซนติเมตร สูง 80 เซนติเมตร ขนาดของถังปฏิกรณ์แสดงดังตารางที่ 3-1 โดยออกแบบถังปฏิกรณ์ให้มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 5.76:1 เพื่อให้เกิดการย่อยสลายแบบปลั๊กโฟลว์ (Marcal Dekker, 1999) ตามทฤษฎีการย่อยสลายแบบปลั๊กโฟลว์ควรมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของถังปฏิกรณ์มากกว่า 5:1 (Singh และ Prerna, 2009) โดยกำหนดปริมาตรใช้งานจริง 5 ลิตร ฝาปิดด้านบนและด้านล่างมีประเก็นยางเพื่อป้องกันการรั่วซึมของก๊าซและยึดติดฝากับตัวถังด้วยน็อต อีกทั้งด้านบนของถังติดตั้งชั้นกระจายน้ำเพื่อเวียนน้ำกลับเข้าระบบและติดตั้งระบบเก็บก๊าซชีวภาพ ด้านล่างของถังปฏิกรณ์ได้ติดตั้งวาล์วเพื่อใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำชะ ภายในถังปฏิกรณ์จะมีชั้นกรองอยู่ด้านล่างประกอบด้วยชั้นกรวด สูง 10 เซนติเมตร และชั้นแผ่นพลาสติกเจาะรูขนาด 1 มิลลิเมตรหนา 0.5 เซนติเมตร มีขาตั้งสูง 5 เซนติเมตร (ดัดแปลงจาก Jagadabhi (2011) ) เพื่อป้องกันไม่ให้เศษใบไม้หลุดจากถังปฏิกรณ์ และลดการอุดตันที่จุดระบายน้ำต่างๆ จากนั้นน้ำชะจะถูกปล่อยสู่ถังรองรับน้ำชะเพื่อทำการเวียนน้ำชะและส่งน้ำชะไปยังถังปฏิกรณ์ที่ 2 รูปแบบของถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด แสดงดังรูปที่

ตารางที่ 3 - 1 ขนาดของถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต (Leach Bed Reactor)

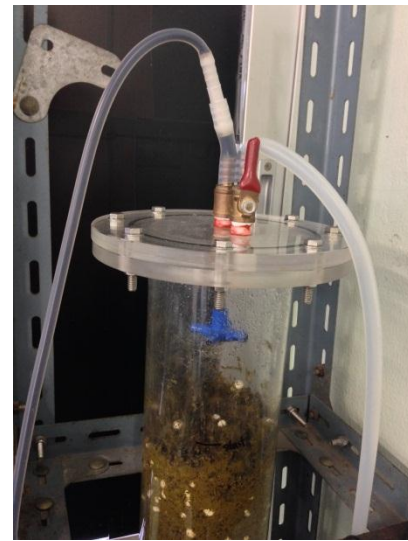
ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต (Leach Bed Reactor)	ขนาด (เซนติเมตร)
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของถัง	11.0
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถัง	10.4
ความหนาของถัง	0.3
ความสูงของถังทั้งหมด	80.0
ความสูงของถังที่ใช้งานจริง (ประมาณ)	60.0 (5.0 ลิตร)
ความสูงของถังที่ว่างด้านบน (ประมาณ)	10.0
ความสูงของส่วนรองรับน้ำด้านล่าง	5.0
ความสูงของชั้นกรวด	10.0
อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง	5.77:1
เส้นผ่านศูนย์กลางฝาปิดถังบน/ล่าง	17.0
ความหนาของฝาปิดถังบน/ล่าง	1.0
ชั้นกระจายน้ำห่างจากฝาปิด	5.0
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อกระจายน้ำ	1.0
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อเก็บก๊าซ	1.0
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อระบายน้ำ	1.0
เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อเวียนน้ำ	1.0
ความหนาแผ่นพลาสติกเจาะรูขนาด 0.2 เซนติเมตร	0.5



รูปที่ 3 - 3 ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต (Leach Bed Reactor)



(ก) ระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต



(ข) ลักษณะหัวกระจายน้ำ



(ค) ลักษณะชั้นกรอง

รูปที่ 3 - 4 ระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต (Leach Bed Reactor)

## 2. ถังรองรับน้ำชะ

ถังทรงกระบอก ตัวถังเป็นพลาสติก ปริมาตรถัง 5 ลิตร ด้านบนมีฝาปิด ซึ่งจะเจาะรู 3 รู สำหรับใส่สายยาง 3 เส้น คือ สายยางสำหรับเชื่อมระหว่างตัวถังลิชเบตกับถังรองรับน้ำชะ สายยางสำหรับเชื่อมต่อกับปั๊มน้ำเพื่อสูบน้ำชะจากถังรองรับน้ำชะขึ้นไปยังด้านบนถังลิชเบต และสายยางสำหรับเก็บน้ำตัวอย่างไปวิเคราะห์

## 3. ไดอะแฟรม มิเตอร์ริงปั๊ม (Diaphragm Metering Pump) (CNPA รุ่น1002)

เป็นเครื่องสูบของเหลว ซึ่งสามารถสูบจ่ายของเหลวในปริมาณที่แม่นยำ ในช่วงระยะเวลาที่กำหนด และได้มีการออกแบบเพื่อให้สามารถสูบจ่ายของเหลวด้วยแรงดันสูง ที่อัตราการไหลที่มีความคงที่ ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้ในการสูบน้ำชะจากถังรองรับน้ำชะ เพื่อเวียนน้ำขึ้นไปยังด้านบนของถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตได้

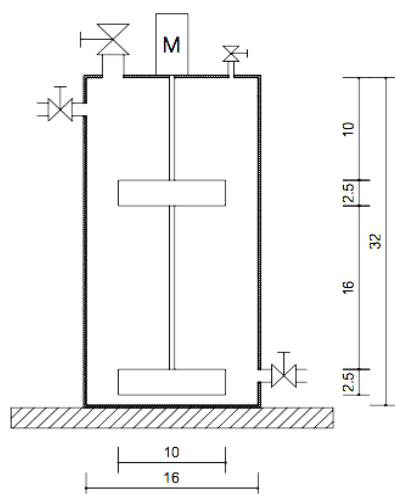
## 4. ไทม์เมอร์ (Timer)

ไทม์เมอร์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ใช้ในการควบคุมเวลาการทำงานของปั๊ม ซึ่งสามารถตั้งเวลาปิด-เปิดปั๊มได้ ทำให้สามารถควบคุมการเวียนน้ำในระบบลิชเบตได้

### ขั้นตอนที่สอง : ชุดระบบถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ

## 1. ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor)

ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ เป็นถังอะคริลิกใส ทรงกระบอกปริมาตรรวม 6 ลิตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร ความสูง 38 เซนติเมตร ติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการกวนผสม ประกอบด้วยมอเตอร์และใบพัดด้วยอัตราเร็วการกวน 50 รอบต่อนาทีเพื่อกวนผสมชีวมวลและเชื้อจุลินทรีย์ให้สัมผัสกันอย่างทั่วถึง มีท่อนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักเพื่อไปวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นด้วยอุปกรณ์เก็บก๊าซ (Counter gas) และมีท่อนำก๊าซเพื่อเก็บก๊าซไปศึกษาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ มีท่อสำหรับใส่ก๊าซออกซิเจน ท่อเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพกรด ต่างในถังปฏิกรณ์ และมีฝาปิดที่ครอบไว้ไม่มีอากาศจากภายนอกเข้าไปในถังปฏิกรณ์ได้ ด้านข้างของถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์จะมีท่อซึ่งใช้วาล์วปิดเปิดใช้ในเก็บตัวอย่างน้ำมาทำการวิเคราะห์ และมีตำแหน่งติดตั้งตัววัดอุณหภูมิภายในถัง ดังรูปที่ 3-5



รูปที่ 3 - 5 ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor: CSTR)

#### 2. อุปกรณ์เก็บก๊าซชีวภาพ (Gas counter)

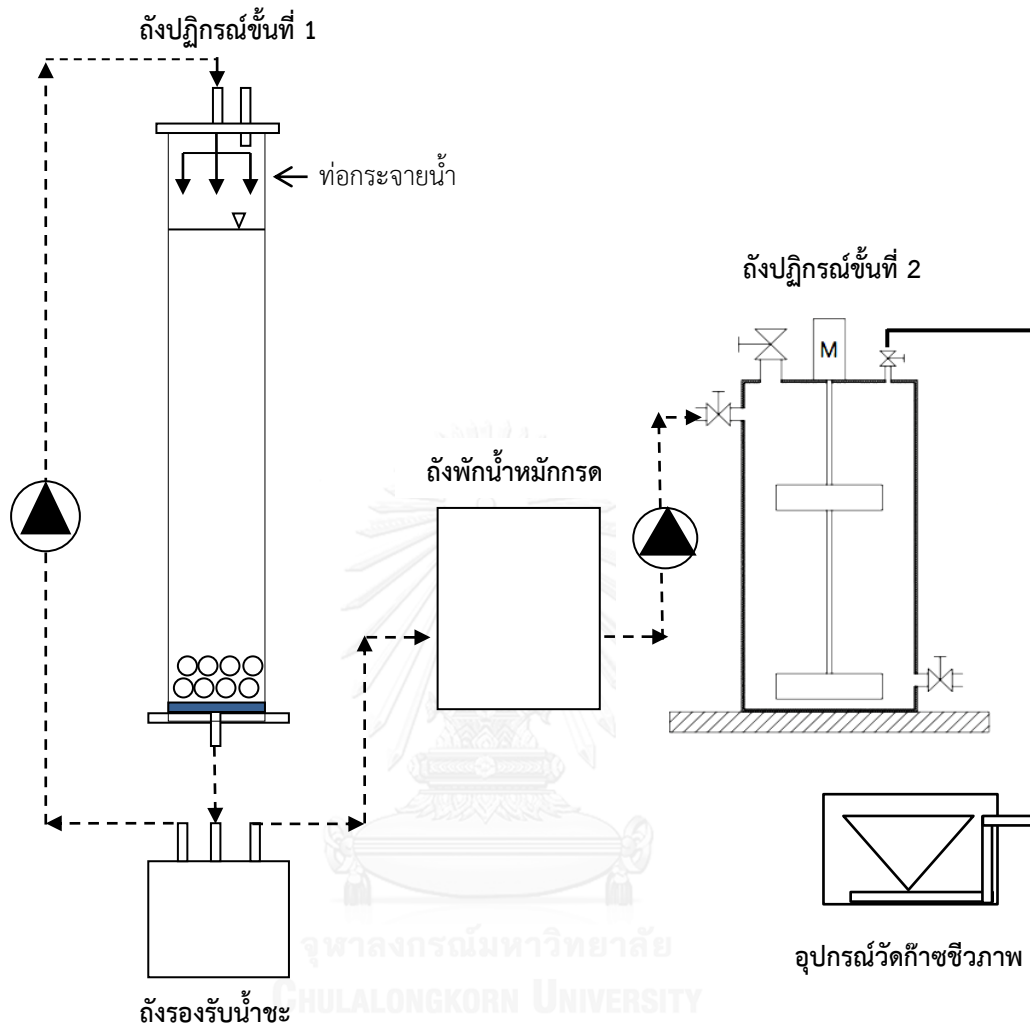
ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์จะถูกรวบรวมและวัดปริมาณโดยอาศัยหลักการแทนที่ด้วยของเหลว (Inverted glass cylinder method) โดยระบบเก็บก๊าซ 1 ชุด ประกอบด้วย กระจกบอตวงขนาด 1 ลิตรและกระจกบอตวงขนาด 0.5 ลิตร แล้วทำการปรับค่าพีเอชของน้ำให้ต่ำกว่า 2 โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น ( $H_2SO_4$ ) เข้มข้น 5 โมลาร์ ในน้ำ 100 มิลลิลิตร เพื่อป้องกันการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

#### 3. ปั๊มสายรัด (Peristaltic pump) (SEKO รุ่น PR1)

เป็นเครื่องสูบจ่ายของเหลวแบบรัดสายยาง โดยอาศัยหลักการแทนที่ตัวลูกรีด (roller) จะรัดสายยางเป็นช่วงๆ เพื่อผลักดันให้ของเหลวในสายยางเกิดการเคลื่อนที่ไปยังทิศทางที่ต้องการ ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้ในการป้อนน้ำหมักเข้าและถ่ายน้ำเสียออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

#### 4. ไทม์เมอร์ (Timer)

ไทม์เมอร์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้า ซึ่งจะใช้ในการควบคุมเวลาการทำงานของชุดควบคุมมอเตอร์ในการหมุนของใบพัด



รูปที่ 3 - 6 แผนผังการเดินระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน



### 3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมและศึกษาองค์ประกอบของใบกระถินเทพนรงค์

- 1) นำใบกระถินเทพนรงค์ซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้จากการนำเนื้อไม้ไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ มาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบด ให้มีขนาดประมาณ 0.5 เซนติเมตร (Pakarinen และคณะ, 2011)
- 2) ทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบต่างๆ ในใบกระถินเทพนรงค์ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่าย ความชื้น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน แสดงวิธีวิเคราะห์ดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3 - 2 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของใบกระถิน

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์
ของแข็งทั้งหมด	Standard Method#2540B (Dried 103 - 105° C)
ของแข็งระเหยง่าย	Standard Method#2540B (Dried 500 - 600° C)
ความชื้น	AOAC, 1990
เซลลูโลส (Cellulose content)	P.J. Van soest, 1960
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose content)	P.J. Van soest, 1960
ลิกนิน (Lignin content)	P.J. Van soest, 1960

#### 3.3.2 ศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นใบกระถินเทพนรงค์

- 1) ออกแบบชุดการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) ซึ่งจะกำหนดตัวแปร 2 ตัว คือ การปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อยู่ระหว่างร้อยละ 0-3 (น้ำหนักต่อปริมาตร) และปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำอยู่ระหว่าง 0-30 นาที ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ด้วยหม้อนิ่งแรงดันไอน้ำ (Autoclave) โดยมีขั้นตอนการออกแบบ ดังนี้
  1. กำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการทดลอง
    - ปัจจัยที่ทำการศึกษา - ระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะกำหนด ให้มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 0-3
    - ระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ ซึ่งจะกำหนดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0-30 นาที

- ปัจจัยควบคุม - อุณหภูมิที่ใช้ในการปรับสภาพ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อปริมาตร
- ค่าผลตอบสนอง - ปริมาณซีโอดีทั้งหมดและซีโอดีละลาย
- ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

2. การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) ออกแบบการทดลองในงานวิจัยนี้กำหนดปัจจัยที่ทำการศึกษา 2 ตัวแปร ซึ่งมีค่า  $\alpha$  เท่ากับ 1.414 โดยสามารถกำหนดรหัสตำแหน่งของแต่ละชุดการทดลอง และค่าตัวแปรจริงได้ดังตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3 - 3 ความสัมพันธ์ของตัวแปรและรหัสตัวแปร

ตัวแปรจริง	ระดับของตัวแปร	รหัสตัวแปร				
		$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ร้อยละ, w/v)	$X_1$	-0.62*	0	1.50	3	3.62
ระยะเวลาในการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส (นาท)	$X_2$	-6.21*	0	15.0	30	36.21

\* หมายเหตุ เนื่องจากค่าที่คำนวณได้เป็นค่าติดลบซึ่งไม่สามารถเตรียมสารได้ จึงกำหนดให้เป็นศูนย์ ,

$$\alpha = 1.414$$

จากผลการออกแบบชุดการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบส่วนประสมกลาง จะสามารถกำหนดชุดการทดลองออกเป็น 13 ชุดการทดลอง ดังตารางที่ 3-4 โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $X_1$ ) และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ( $X_2$ ) เช่น ชุดการทดลองที่ 4 จะทำการปรับสภาพที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับร้อยละ 3 ระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ 30 นาที ชุดการทดลองที่ 9 จะทำการปรับสภาพที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับร้อยละ 1.5 ระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ 15 นาที เป็นต้น จากชุดการทดลองทั้ง 13 ชุด โดยที่ชุดการทดลองที่ 1 - 4 เป็นชุดการทดลองที่มีการออกแบบการทดลองของ  $2^2$  Factorial Design สำหรับชุดการทดลองที่ 5 - 8 เป็นชุดการทดลองในตำแหน่ง Axial Point นั่นคือตำแหน่งในแนวแกน  $+\alpha$  และ  $-\alpha$  และชุดการทดลองที่ 9 - 13 เป็นชุดการทดลองที่อยู่ในตำแหน่งจุดศูนย์กลางการทดลอง ซึ่งจะมีการทำซ้ำทั้งหมด 5 ชุดการทดลอง เพื่อเป็นการดูถึงความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง จากชุดการทดลองจะมีค่าบางค่าที่มีค่าติดลบ ซึ่งในการทดลองไม่สามารถทำได้จึงได้กำหนดให้ค่าดังกล่าวมีค่าเป็นศูนย์

ตารางที่ 3 - 4 ความสัมพันธ์ของชุดการทดลองและรหัสตัวแปร

ชุดการทดลอง	รหัสตำแหน่ง		ตัวแปร	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1	-1	-1	0.00	0.00
2	-1	1	0.00	30.00
3	1	-1	3.00	0.00
4	1	1	3.00	30.00
5	-1.414	0	-0.62	15.00
6	1.414	0	3.62	15.00
7	0	-1.414	1.50	-6.21
8	0	1.414	1.50	36.21
9	0	0	1.50	15.00
10	0	0	1.50	15.00
11	0	0	1.50	15.00
12	0	0	1.50	15.00
13	0	0	1.50	15.00

- 2) ทำการปรับสภาพใบกระถินที่เตรียมจากขั้นตอนที่ 3.3.1 มาใช้ในสารละลายไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆตามชุดการทดลอง ในอัตราส่วนของตัวอย่างต่อปริมาตรของสารละลายไซโตเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 20 (น้ำหนักต่อปริมาตร) จากนั้นนำไปปรับสภาพโดยการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส โดยใช้หม้อนึ่งแรงดันไอน้ำ (Autoclave) ที่ระยะเวลาต่างๆ ตามชุดการทดลอง
- 3) ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในชุดการทดลองทั้ง 13 ชุดหลังจากที่ทำปรับสภาพเบื้องต้น โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีทั้งหมด ซีโอดีละลาย ของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยง่าย หลังจากนั้นแยกส่วนของใบกระถินไปล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกลั่นจนให้มีสภาพเป็นกลาง แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ( ดัดแปลงจาก (Nieves และคณะ, 2011) ) จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณที่หายไประหว่างการปรับสภาพ และวิเคราะห์หาองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่ ปริมาณ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยง่าย แสดงวิธีวิเคราะห์ดังตารางที่

ตารางที่ 3 - 5 วิธีการวิเคราะห์ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลอง

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์	ความถี่
ซีโอดีละลาย	Standard Method#5220C (Closed Reflux)	ก่อนและหลังการทดลอง
ซีโอดีทั้งหมด	Standard Method#5220C (Closed Reflux)	ก่อนและหลังการทดลอง
ของแข็งทั้งหมด	Standard Method#2540B (Dried 103 ถึง 105° C)	ก่อนและหลังการทดลอง
ของแข็งระเหยง่าย	Standard Method#2540B (Dried 500 ถึง 600° C)	ก่อนและหลังการทดลอง
ลิกโนเซลลูโลส	P.J. Van soest, 1960	ก่อนและหลังการทดลอง

3.3.3 ศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่สภาวะต่างๆ โดยวิธีบีเอ็มพี

นำไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นทุกชุดการทดลองมาหาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีบีเอ็มพีทั้ง 13 ชุดการทดลอง โดยจะเอาทั้งส่วนสารละลายและส่วนของไบโกระถิน และมีชุดควบคุมคือ ชุดการทดลองที่ไม่มีไบโกระถิน มีขั้นตอนการทดลอง (รูปที่ 3-8) ดังนี้

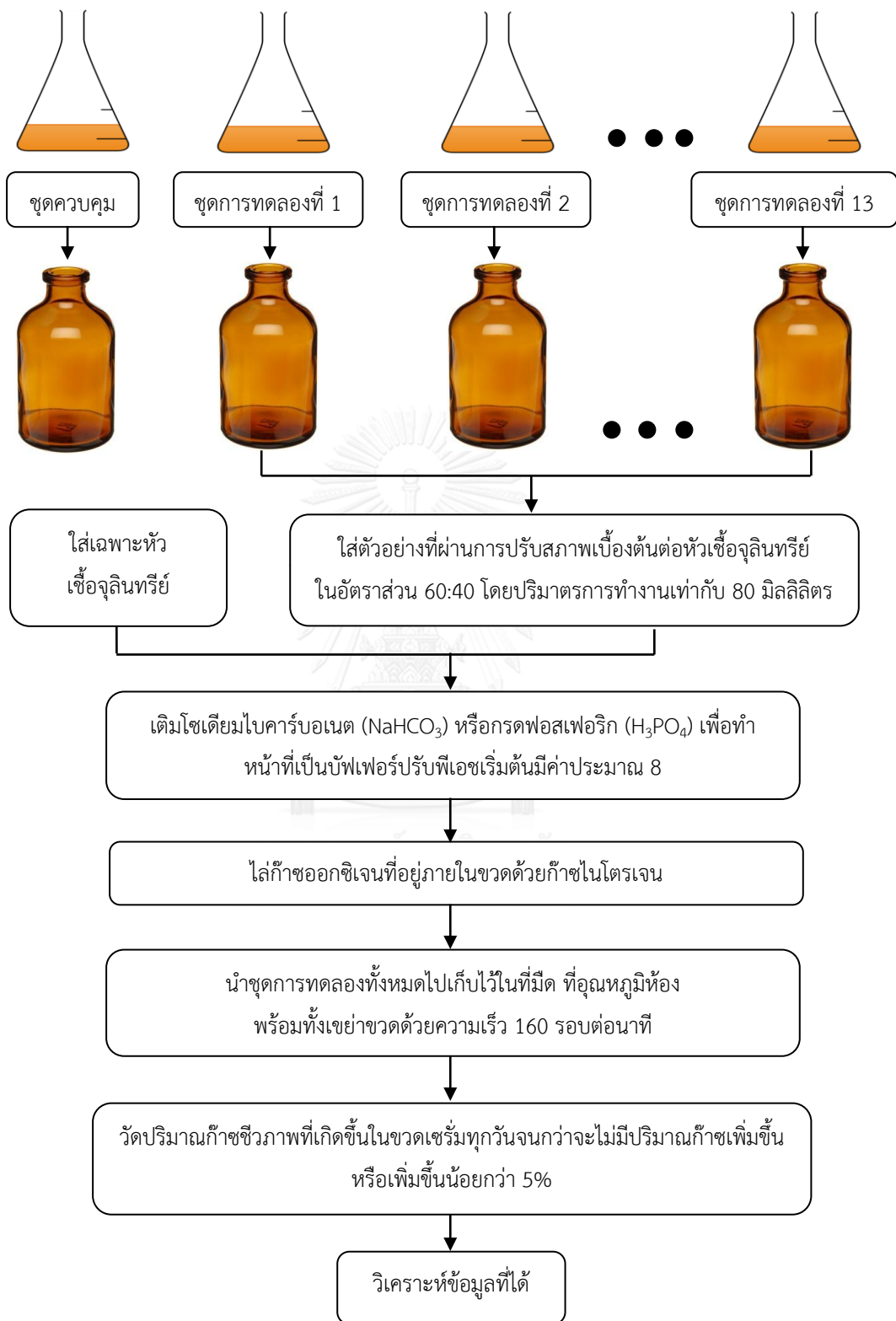
1. ใส่ไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์ในอัตราส่วน 60:40 (Hobson และ Wheatley, 1993) ลงในขวดซีรัมสี่ขาปริมาตร 125 มิลลิลิตร โดยมีปริมาตรการทำงานเท่ากับ 80 มิลลิลิตร กำหนดปริมาณความเข้มข้นของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดเริ่มต้นร้อยละ 2 และกำหนดหัวเชื้อจุลินทรีย์ในระบบมีค่าของแข็งแขวนลอยระเหยได้ร้อยละ 2.5 (อภิวัฒน์ เจนจัดการ, 2557)
2. ปรับค่าพีเอชในระบบของแต่ละชุดการทดลองให้มีค่าเริ่มต้นประมาณ 8 ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) ในกรณีที่ระบบมีค่าพีเอชต่ำกว่า 8 หรือใช้กรดฟอสเฟอริก ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) ในกรณีที่ระบบมีค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 8
3. ใส่ก๊าซออกซิเจนที่อยู่ภายในขวดด้วยก๊าซไนโตรเจน แล้วปิดด้วยจุกยางตามด้วยฝาอลูมิเนียมแคมให้แน่น
4. นำชุดการทดลองทั้งหมดไปเก็บไว้ในที่มืด ที่อุณหภูมิห้อง พร้อมทั้งเขย่าขวดด้วยความเร็ว 160 รอบต่อนาที
5. ทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในขวดเซรัมทุกวัน
6. วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้

จะทำการวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจนกว่าจะไม่มีปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นหรือเพิ่มขึ้นน้อยกว่า 5% โดยชุดการทดลองทั้ง 13 ชุดการทดลอง จะมีชุดควบคุมคือชุดการทดลองที่ไม่ใส่ใบกระถิน ซึ่งจะมีเฉพาะหัวเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อดูปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนมากับหัวเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งจะใช้ในการคำนวณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของชุดการทดลองทั้ง 13 ชุด โดยจะนำมาลบกับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากชุดควบคุม และคำนวณก๊าซชีวภาพทั้งหมดในหน่วยลิตรของก๊าซชีวภาพทั้งหมดต่อกรัมของของแข็งระเหยง่ายที่ถูกย่อยสลายไป ดังสมการ

$$\text{ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น} = \frac{\text{ปริมาตรของก๊าซชุดทดลอง} - \text{ปริมาตรของก๊าซชุดควบคุม}}{\text{ปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่สลายไป (กรัม)}}$$



รูปที่ 3 - 7 ชุดการทดลองสำหรับหาปริมาณก๊าซชีวภาพด้วยวิธีบีเอ็มพี



รูปที่ 3 - 8 แผนผังการทดลอง โดยวิธีปีเอ็่มพี

### 3.3.4 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติเพื่อหาวิธีการปรับสภาพเบื้องต้นในกระบวนการผลิตที่เหมาะสม

ใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) เลือกชุดการทดลองที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการเปิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียสในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด จากการทดลอง 3.3.3 โดยที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดจะเป็นฟังก์ชันของร้อยละความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับระยะเวลาในการปรับสภาพ และสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ด้วยสมการคณิตศาสตร์ (Montgomery และคณะ, 1984) จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพในระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยจะนำไบโกระถินเทพนรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะที่เหมาะสมมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในถังปฏิกรณ์ขั้นตอนแรก (ถังผลิตกรด) ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด เพื่อที่จะศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่าย โดยจะทำการเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ใช้ไบโกระถินเทพนรงค์สด

### 3.3.5 ศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพนรงค์สดและไบโกระถินเทพนรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นในระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

นำไบโกระถินเทพนรงค์สดและไบโกระถินเทพนรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการวิเคราะห์โดยใช้หลักการพื้นผิวตอบสนอง มาเข้าสู่ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน เพื่อทำการเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพนรงค์ทั้งสองชุดการทดลอง โดยขั้นตอนแรกจะใช้ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด (Leach Bed reactor: LBR) ระดับห้องปฏิบัติการ ที่มีการเดินระบบการหมักแบบทีละเท (Batch) ปริมาณการใช้งานจริง 5 ลิตร ทำหน้าที่ผลิตกรดอินทรีย์ โดยศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายในการหมักไบโกระถินเทพนรงค์ที่มีการเติมมูลโคเป็นหัวเชื้อ โดยในถังปฏิกรณ์ทั้งสองจะมีการปล่อยให้น้ำไหลลักษณะโปรยเป็นฝอยในส่วนด้านบนของถังปฏิกรณ์เพื่อเพิ่มความชื้นให้กับสารอินทรีย์ที่อยู่ในถัง ทำให้จุลินทรีย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จากนั้นน้ำจะไหลซึมผ่านชั้นของสารอินทรีย์และเกิดน้ำชะ (liquid leachate) ไหลลงด้านล่างของถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะมีถังสำหรับใส่น้ำชะที่เกิดขึ้นเพื่อเวียนน้ำชะกลับขึ้นไป โดยจะมีการหมุนเวียนน้ำในลักษณะนี้ไปเรื่อยๆ เพื่อเป็นการหมุนเวียนสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ในระบบ ทำให้เกิดการย่อยสลายในขั้นตอนไฮโดรไลซิสดังกล่าวได้มากขึ้น (Jagadabhi และคณะ, 2010) จากนั้นจะนำหมัก (น้ำชะ) ที่ได้จากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบดมาเข้าสู่ขั้นตอนที่สอง ซึ่งเป็นถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor: CSTR) ที่มีการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ปริมาณการใช้งาน 6 ลิตร โดยศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักไบโกระถินเทพนรงค์ที่ได้จากถังปฏิกรณ์ขั้นตอนแรก ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง เก็บก๊าซชีวภาพที่

เกิดขึ้นด้วยวิธีการแทนที่ของน้ำ และทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ตามวิธีของ Zhang และคณะ (2011) มีขั้นตอนการทดลอง (รูปที่ 3-10 และ 3-11) ดังนี้

3.3.5.1 ศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายจากการหมักไบโกระถินเทพณรงค์ที่มีการผสมมูลโคเป็นหัวเชื้อด้วยถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบเพื่อผลิตน้ำหมักกรด มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

1. การเตรียมวัตถุดิบก่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต

- ไบโกระถินเทพณรงค์สด

ไบโกระถินเทพณรงค์สดที่ใช้ในงานวิจัย เก็บมาจากสถานีวนวัฒนวิจัยสระเกล้าฯ ตำบลอุดมทรัพย์ อำเภอมัญจาคีรี จังหวัดนครราชสีมา ก่อนใช้ในการทดลองจะนำมาบดด้วยเครื่องบดให้มีขนาดเล็กกว่า 0.5 เซนติเมตร (Pakarinen และคณะ, 2011) จากนั้นนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบหลักทางเคมี

- ไบโกระถินเทพณรงค์ปรับสภาพเบื้องต้น

นำไบโกระถินเทพณรงค์สดที่ได้ทำการบดให้มีขนาดประมาณ 0.5 เซนติเมตร ไปเข้าสู่กระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 และระยะเวลาในระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส 30 นาที จากนั้นล้างออกด้วยน้ำประปาจนสีของน้ำที่ไหลผ่านใบไม้เจือจาง มีค่าพีเอชประมาณ 8 และนำไปไม้ไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้ค่าความชื้นของใบไม้หลังปรับสภาพมีค่าใกล้เคียงกับใบไม้สด จากนั้นนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบหลักทางเคมี ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้เฉพาะไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพมาทดลอง โดยไม่ได้นำส่วนของสารละลายที่ได้จากการปรับสภาพมาใช้ เนื่องจากในสารละลายมีองค์ประกอบของลิกนิน และมีค่าพีเอชสูง

- มูลโคสด

มูลโคสดที่ใช้ในงานวิจัย เก็บมาจาก ฟาร์มโคนม สวนจิตรลดา แขวงสวนจิตรลดา เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร จากนั้นจะนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบหลักทางเคมี

2. ทำการหมักไบโกระถินทั้งสองชุดการทดลองโดยมีการผสมมูลโคเป็นหัวเชื้อ เนื่องจากมูลโคเป็นแหล่งของจุลินทรีย์จำนวนมากที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และเป็นการปรับค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัตถุดิบก่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตให้ มีค่าอยู่ในช่วง 20-30



โดยกำหนดค่าเริ่มต้นในการเดินระบบถังลิชเบต ดังนี้

- กำหนดให้ถังปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินเทพณรงค์สดมีไบโม่เริ่มต้น 1 กิโลกรัมของไบโม่สด
- กำหนดอัตราส่วนของไบโกระถินเทพณรงค์ต่อมูลโคในอัตราส่วน 70:30 ของแข็งระเหย (Chen และคณะ, 2010)
- กำหนดร้อยละของแข็งในระบบเท่ากับ 15 (Kusch, 2013)
- ใส่เม็ดโม่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร ลงไปผสมกับไบโกระถินเทพณรงค์และมูลโค เพื่อทำให้หน้าที่เป็นส่วนที่ทำให้เกิดช่องว่างของวัสดุหมักในถังปฏิกรณ์ (bulking agents) และป้องกันการอุดตันในระบบ (ดัดแปลงจาก (Xu และคณะ, 2011) )
- วัสดุที่ใช้เป็นชั้นกรองประกอบด้วย ชั้นกรวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-1.0 เซนติเมตร ชั้นกรวดสูง 10 เซนติเมตร และแผ่นพลาสติกเจาะรูขนาด 0.2-0.3 เซนติเมตร (ดัดแปลงจาก Jagadabhi และคณะ, 2010)
- น้ำหมักจะไหลผ่านชั้นกรองซึ่งอยู่ด้านล่างของถังลิชเบต และจะไหลลงตามสายยางไปยังถังรองรับน้ำชะ ในถังนี้จะมีสายยางที่เชื่อมต่อกับไดอะแฟรมบีมเพื่อที่จะหมุนเวียนน้ำหมักขึ้นไปยังด้านบนของถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต ซึ่งมีการติดตั้งระบบกระจายน้ำเพื่อให้ น้ำหมักกระจายได้ทั่วทุกพื้นที่ของไบโม่
- โดยจะกำหนดให้ถังปฏิกรณ์มีการเวียนน้ำหมักกรด 4 ลิตรต่อวัน (ดัดแปลงจาก Babel และคณะ (2004)
- เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) 3 กรัมต่อลิตร ลงไปในน้ำที่นำมาเวียนในระบบ เพื่อทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ และควบคุมให้ค่าพีเอชในถังปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 5.5-6.5 (Jagadabhi และคณะ, 2010)
- เก็บตัวอย่างน้ำหมักทุก 1-3 วัน เพื่อทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3-6 หมายเหตุ กรดไขมันระเหยจะทำการวิเคราะห์ในวันเก็บน้ำหมักกรด เพื่อศึกษาอัตราการผลิตน้ำหมักกรดของระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตในวันนั้นๆ ซึ่งทำให้สามารถกำหนดระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักกรดได้

### 3. ขั้นตอนการเดินระบบ

จากงานวิจัยของ Babel และคณะ (2004) ได้ทดลองหมักเปลือกสับปะรดในถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต ซึ่งจะทำการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยในน้ำชะ ผลการทดลองพบว่าเมื่อเดินระบบไปจนถึงวันที่ 10 ของการเดินระบบ ปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบจะมีค่าลดลง เนื่องจากในระบบมีค่าพีเอชของระบบสูง จึงส่งผลให้ไปยับยั้งการผลิตกรดไขมัน

ระเหย Babel และคณะ จึงทำการเจือจางน้ำหมักกรดร้อยละ 50 เพื่อเป็นลดความเข้มข้นของกรดลง ผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการเจือจางน้ำหมักกรด ในช่วงแรกปริมาณน้ำหมักกรดจะลดลง แต่จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการหมุนเวียนน้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเจือจางน้ำหมักกรด จะช่วยให้ระบบถังลิชเบตมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการควบคุมระบบถังลิชเบตตามวิจัยของ Babel และคณะ

โดยงานวิจัยนี้จะทำการเดินระบบ 2 ครั้ง ซึ่งวิธีการเดินระบบดัดแปลงจากงานวิจัยของ Babel และคณะ,2004 ดังนี้

- การทดลองครั้งที่ 1 จะทำการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมัก และศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหยในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต หลังจากการเจือจางน้ำหมัก โดยจะทำการทดลอง ดังนี้

■ ระยะเวลา 20 วันแรกของการเดินระบบ จะทำการเวียนน้ำหมักไปเรื่อยๆ โดยที่ไม่มีการเจือจางน้ำหมัก และไม่มีการปรับพีเอชในน้ำหมัก เพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมัก

■ วันที่ 20 ของการเดินระบบ จะทำการเจือจางน้ำหมักร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำหมักทั้งหมดด้วยน้ำประปา (เก็บน้ำหมักกรดจากถังรองรับน้ำชะร้อยละ 50 ของปริมาตรน้ำหมักกรดในถัง และทำการเติมน้ำประปาเข้าไปแทนที่ ) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหยในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต หลังจากการเจือจางน้ำหมัก โดยจะมีการปรับพีเอชของน้ำหมักให้อยู่ในช่วง 5.5 – 6.5 เพื่อให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตกรดไขมันระเหยง่าย

- การทดลองครั้งที่ 2 ศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายจากการหมักใบกระถินที่มีการผสมมูลโคเป็นหัวเชื้อด้วยถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต โดยนำผลของสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตที่ได้จากการทดลองครั้งที่ 1 มาใช้ในการเดินระบบ จากนั้นนำน้ำหมักที่ผลิตได้เข้าสู่ถังผลิตก๊าซชีวภาพ

#### 4. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ตารางที่ 3 - 6 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาในการเดินระบบถังปฏิกรณ์แบบลิซเบด

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่
อุณหภูมิ	Thermometer	ทุกวัน
ค่าพีเอช	pH meter	ทุก 2 - 3 วัน
ซีโอดี (มก./ล.)	Standard Method#5220C (Closed Reflux)	ทุก 2 - 3 วัน
สภาพด่างทั้งหมด (มก./ล. หินปูน)	Standard Method#2320B (Titration Method)	ทุก 2 - 3 วัน
กรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. อะซิติก)	Standard Method#5560	ทุก 2 - 3 วัน
ของแข็งระเหย (มก./ล.)	Standard Method#2540B	ทุก 2 - 3 วัน
ชนิดกรดไขมันระเหย (มก./ล.)	Gas Chromatography	วันที่ผลิตกรดสูงสุด
ของแข็งทั้งหมด	Standard Method#2540B (Dried 103 - 105° C)	ก่อนและหลังการ
ของแข็งแขวนลอยระเหยได้	Standard Method#2540B (Dried 500 - 600° C)	ทดลอง



รูปที่ 3 - 9 ระบบถังปฏิกรณ์แบบลิซเบด

(ซ้าย) ชุดการทดลองที่ใส่ไบโกระถินเทพณรงค์สด (ขวา) ชุดการทดลองที่ใส่ไบโกระถินเทพณรงค์ปรับสภาพ

3.3.5.2 ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักใบกระถินด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ มีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

1. เริ่มต้นระบบด้วยการป้อนน้ำหมักใบกระถินเทพรงค์ที่ได้จากถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นซีโอดีของน้ำหมักที่เข้าถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์เริ่มต้นเท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร กำหนดความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 25,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณร้อยละ 40 ของปริมาตรถังหมัก(Hobson และ Wheatly, 1993) และทำการปรับสภาพน้ำหมักใบกระถินในระบบโดยการเติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) 1 นอร์มัล ให้มีค่าพีเอช อยู่ในช่วง 7.0-7.2 จากนั้นเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่
2. เมื่อระบบคงที่จึงทำการป้อนน้ำหมักใบกระถินที่ได้จากถังปฏิกรณ์แรกเข้าระบบอย่างต่อเนื่อง โดยกำหนดค่าอัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ (OLR) เท่ากับ 0.417 kg COD/m<sup>3</sup>.วัน (เฉลิมชนม์ เจริญวุฒิชัย, 2555)
3. วิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 3-10 โดยจะวิเคราะห์ทั้งน้ำหมักก่อนเข้าระบบ และน้ำที่ออกจากระบบ
4. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

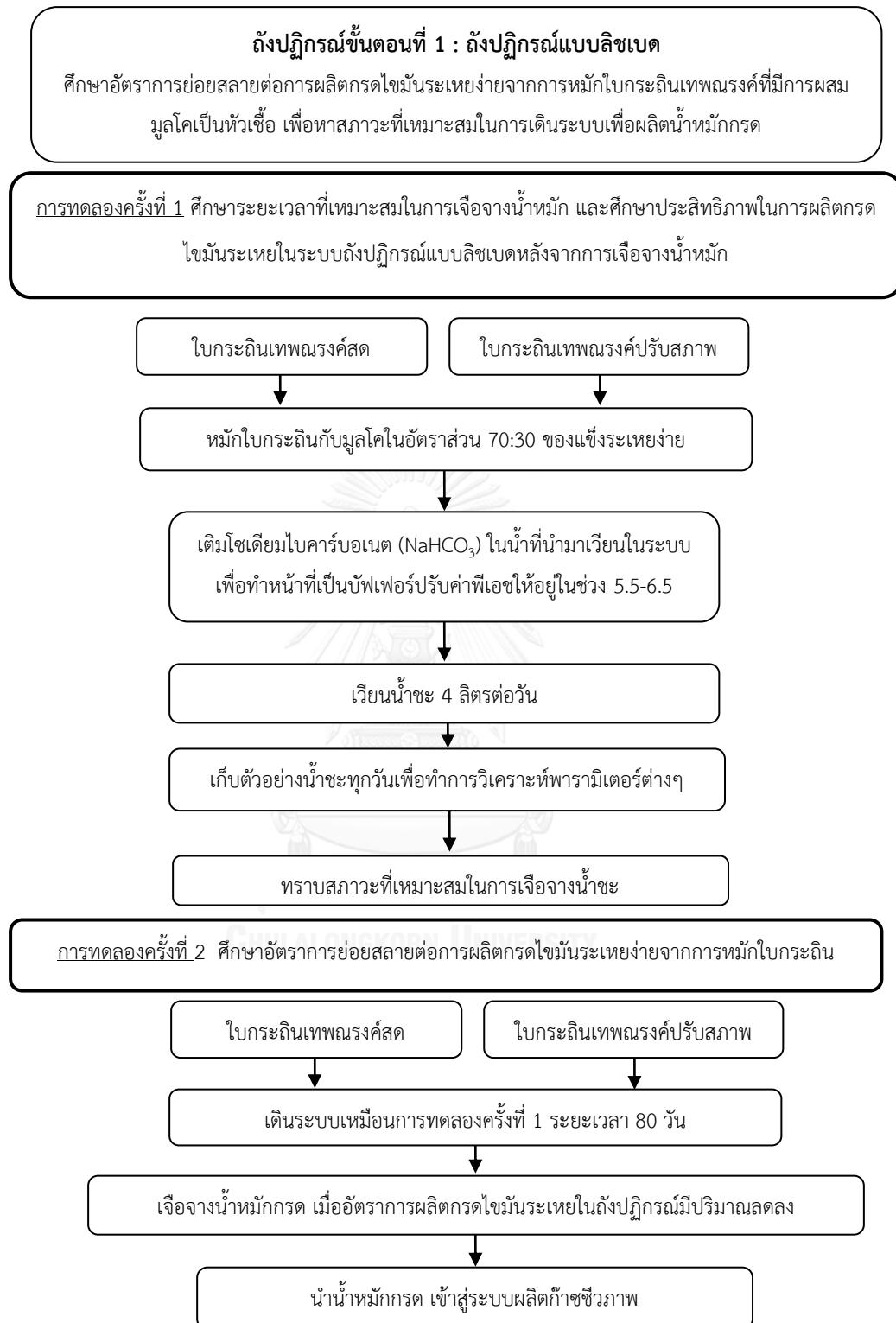
ตารางที่ 3 - 7 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่
อุณหภูมิ	Thermometer	ทุกวัน
ค่าพีเอช	pH meter	ทุก 3 วัน
ซีโอดี (มก./ล.)	Standard Method#5220C (Closed Reflux)	ทุก 3 วัน
สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล. หินปูน)	Standard Method#2320B (Titration Method)	ทุก 3 วัน
กรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. อะซิติก)	Standard Method#5560	ทุก 3 วัน
ของแข็งระเหย (มก./ล.)	Standard Method#2540B	ทุก 3 วัน
ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด	Gas counter	ทุกวัน

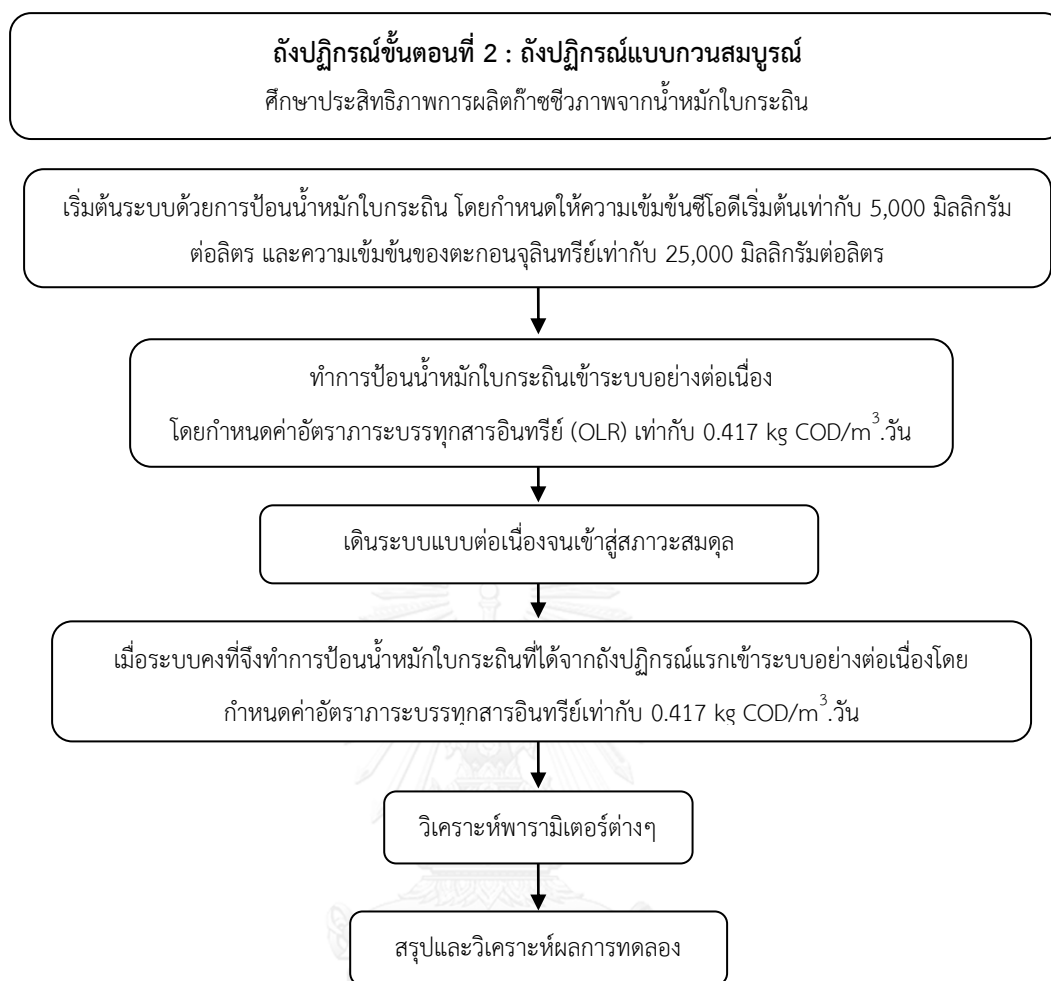
ตารางที่ 3 - 8 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาในช่วงการทดลอง

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่
อุณหภูมิ	Thermometer	ทุกวัน
ค่าพีเอช	pH meter	ทุก 3 วัน
ซีไอดี (มก./ล.)	Standard Method#5220C (Closed Reflux)	ทุก 3 วัน
สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล. หินปูน)	Standard Method#2320B (Titration Method)	ทุก 3 วัน
กรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. อะซิติก)	Standard Method#5560	ทุก 3 วัน
ของแข็งระเหย (มก./ล.)	Standard Method#2540B	ทุก 3 วัน
ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด	Gas counter	ทุกวัน
องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	Gas chromatography	ที่สภาวะสมดุล





รูปที่ 3 - 10 แผนผังขั้นตอนการศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่าย  
จากการหมักไบโอะรีนที่มีการผสมมูลโคเป็นหัวเชื้อ



รูปที่ 3 - 11 แผนผังขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักไโคกระถิน

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ด้วยระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน งานวิจัยมีขั้นตอนในการทดลอง ดังนี้

- 1) ศึกษาองค์ประกอบของไบโกระถินเทพณรงค์ก่อนการปรับสภาพเบื้องต้น โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน
- 2) ทำการปรับสภาพเบื้องต้นไบโกระถินเทพณรงค์ด้วยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (กำหนดความเข้มข้นร้อยละ 0-3) ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส (กำหนดระยะเวลา 0-30 นาที) โดยใช้วิธีแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) มาออกแบบชุดการทดลอง จากนั้นทำการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีกรองในสารละลายและวิเคราะห์องค์ประกอบของไบโกระถินเทพณรงค์หลังการปรับสภาพเบื้องต้น โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน
- 3) ศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่สภาวะต่างๆ โดยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential: BMP) จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลด้วยหลักการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เพื่อเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์
- 4) ศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์สดและไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นในระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (Two-stage anaerobic digestion) โดยขั้นตอนแรกเป็นถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด (Leach Bed reactor) ระดับห้องปฏิบัติการ ปริมาตรการใช้งาน 5 ลิตร โดยศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายในการหมักไบโกระถินเทพณรงค์ที่มีการเติมมูลโคเป็นหัวเชื้อ และขั้นตอนที่สองเป็นถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor: CSTR) ที่มีการเดินระบบแบบต่อเนื่อง ปริมาตรการใช้งาน 6 ลิตร โดยศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักไบโกระถินเทพณรงค์ที่ได้จากถังปฏิกรณ์ขั้นตอนแรก



#### 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของใบกระถินเทพนรงค์

ใบกระถินเทพนรงค์ ก่อนนำมาใช้ในการทดลองจะนำใบมาบดให้มีขนาดเล็กกว่า 0.5 เซนติเมตร ลักษณะใบและสภาพใบหลังการบดแสดงดังรูปที่ 4-1 จากนั้นนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเบื้องต้น ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย เถ้า ความชื้นและ สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนด้วยวิธี Standard Method#2540B ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ด้วยวิธีของ P.J. Van soest (1960) ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4-1



(ก) ใบกระถินเทพนรงค์



(ข) สภาพใบหลังการบด

รูปที่ 4 - 1 ลักษณะใบกระถินเทพนรงค์และสภาพใบหลังการบด

ตารางที่ 4 - 1 องค์ประกอบทางเคมีของใบกระถินเทพนรงค์

องค์ประกอบ	ร้อยละ
ความชื้น (Moister) (%Wet weight)	59.2
ของแข็งทั้งหมด (Total Solid:TS) (%Wet weight)	40.8
ของแข็งระเหยง่าย (Total Volatile Solid :TVS) (%TS)	94.36
เถ้า (Ash) (%TS)	5.64
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon to nitrogen ratio)	20.5
เซลลูโลส (Cellulose) (%TS)	19.21
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) (%TS)	14.74
ลิกนิน (Lignin) (%TS)	18.20
อื่นๆ (Other) (%TS)	47.85

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของใบกระถินเทพนรงค์พบว่ามียอดองค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลสร้อยละ 52.15 โดยมีเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 33.95 ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวสามารถเป็นสารตั้งต้นในการผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ แต่เนื่องจากใบกระถินเทพนรงค์มีลิกนินเป็นองค์ประกอบร้อยละ 18.20 ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทำให้เซลล์พืชมีความแข็งแรง จึงทำให้ยากต่อการย่อยสลายในสภาวะไร้ออกซิเจน ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับสภาพเบื้องต้นใบกระถินเทพนรงค์ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเป็นการลดระยะเวลาในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

#### 4.2 ผลการปรับสภาพเบื้องต้นใบกระถินเทพนรงค์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส

จากการออกแบบการทดลองด้วยหลักการประสมส่วนกลาง (Central Composite Design:CCD) โดยกำหนดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0-3 และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ 0-30 นาที ได้ชุดการทดลองทั้งหมด 13 ชุดการทดลอง ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชุดการทดลองหลัก คือ ชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำ ชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำ หลังจากปรับสภาพเบื้องต้นใบกระถินเทพนรงค์ในสภาวะต่างๆทั้ง 13 ชุดการทดลอง ได้ทำการศึกษาปริมาณซีโอดีกรองในสารละลาย และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของใบกระถินเทพนรงค์ (ของแข็งทั้งหมด, ของแข็งระเหยง่าย, เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส, ลิกนิน และเถ้า)

##### 4.2.1 ลักษณะใบกระถินเทพนรงค์หลังจากปรับสภาพเบื้องต้น

หลังจากการปรับสภาพเบื้องต้นใบกระถินเทพนรงค์ที่สภาวะต่างๆ เมื่อแยกส่วนกากไปล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกลั่นจนให้มีสภาพเป็นกลาง แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ลักษณะใบไม้หลังการปรับสภาพเบื้องต้นแสดงดังรูปที่ 4-2 จากผลการปรับสภาพจะเห็นว่าใบไม้ที่ปรับสภาพด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำเพียงอย่างเดียว จะมีลักษณะแตกต่างจากชุดการทดลองที่ไม่ทำการปรับสภาพเล็กน้อย คือ พื้นผิวใบไม้จะบางลง และสีของผิวใบซีดลง ส่วนชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยสารละลายต่างเพียงอย่างเดียว ผิวของใบไม้จะมีสีเข้มขึ้น เนื่องจากสารละลายต่างทำปฏิกิริยาเคมีกับเซลล์ใบไม้ ทำให้เซลล์ใบไม้หลุดออกบางส่วน และชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำ จากรูปที่ 4-2 จะเห็นส่วนของเส้นใยใบไม้เป็นส่วนใหญ่ และยังเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ จะยิ่งเห็นส่วนของเส้นใยใบไม้ชัดเจนขึ้น



(ก) NaOH ร้อยละ 0 , ระยะเวลา 0 นาที



(ข) NaOH ร้อยละ 0 , ระยะเวลา 15 นาที



(ค) NaOH ร้อยละ 0 , ระยะเวลา 30 นาที



(ง) NaOH ร้อยละ 1.5 , ระยะเวลา 0 นาที



(จ) NaOH ร้อยละ 1.5 , ระยะเวลา 15 นาที



(ฉ) NaOH ร้อยละ 1.5 , ระยะเวลา 36.2 นาที



(ข) NaOH ร้อยละ 3 , ระยะเวลา 0 นาที



(ค) NaOH ร้อยละ 3 , ระยะเวลา 30 นาที

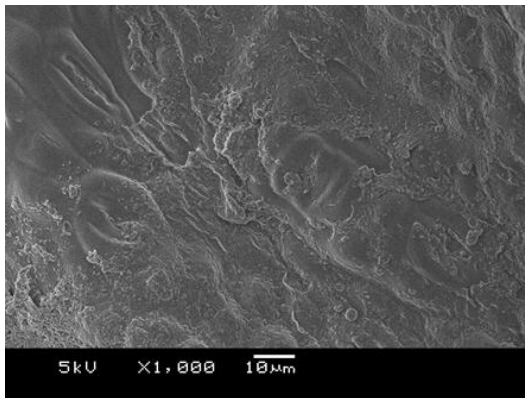


(ง) NaOH ร้อยละ 3.62 , ระยะเวลา 15 นาที

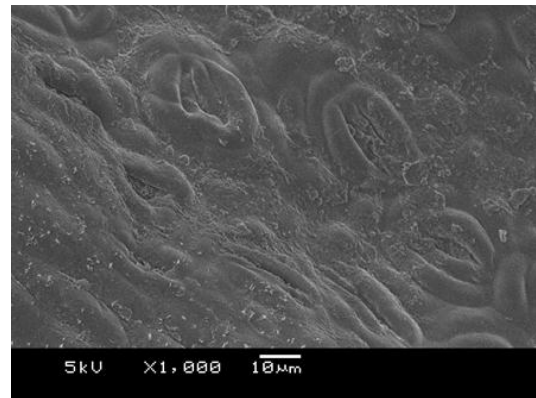
รูปที่ 4 - 2 ลักษณะของใบกระถินเทพนรงค์หลังจากปรับสภาพที่สภาวะต่างๆ

#### 4.2.2 ลักษณะพื้นผิวของใบกระถินเทพนรงค์หลังจากปรับสภาพเบื้องต้น

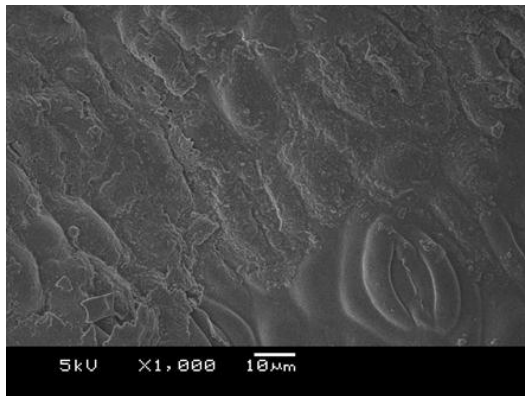
จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของใบกระถินเทพนรงค์หลังจากปรับสภาพที่สภาวะต่างๆด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ที่กำลังขยาย 1,000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4-3 จากรูปจะเห็นว่ายิ่งเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเพิ่มระยะเวลาในการเปิดด้วยไอน้ำ พื้นผิวของของใบกระถินเทพนรงค์จะมีลักษณะโครงสร้างที่มีความหนาแน่นน้อยลง โครงสร้างของใบจะจับตัวกันอย่างหลวมๆ ผนังเซลล์ที่อยู่รอบนอกจะถูกทำลาย จากรูปที่ 4-3 (ข) พบว่าพื้นผิวของใบกระถินเทพนรงค์ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 3 ระยะเวลาในการเปิดด้วยไอน้ำ 30 นาที จะเห็นผนังเซลล์ที่ชัดเจนอย่างชัดเจน และโครงสร้างของใบจะจับตัวกันอย่างหลวมๆ



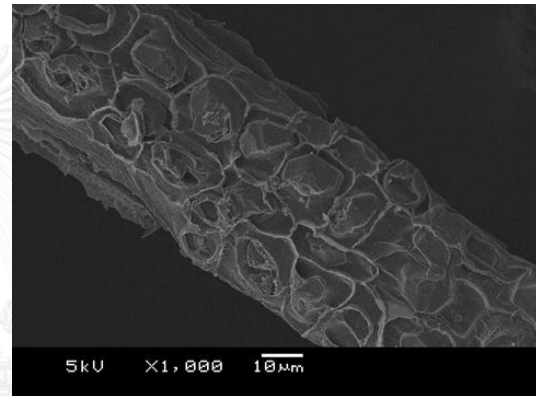
(ก) NaOH ร้อยละ 0 , ระยะเวลา 0 นาที



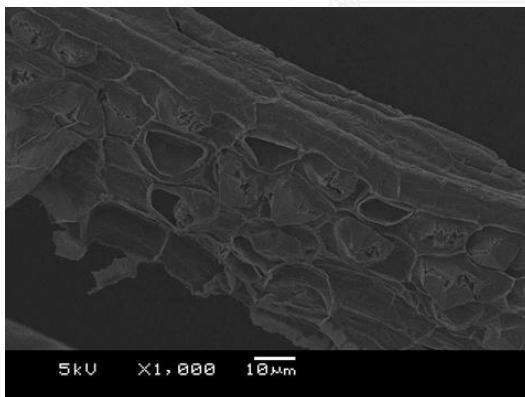
(ข) NaOH ร้อยละ 0 , ระยะเวลา 15 นาที



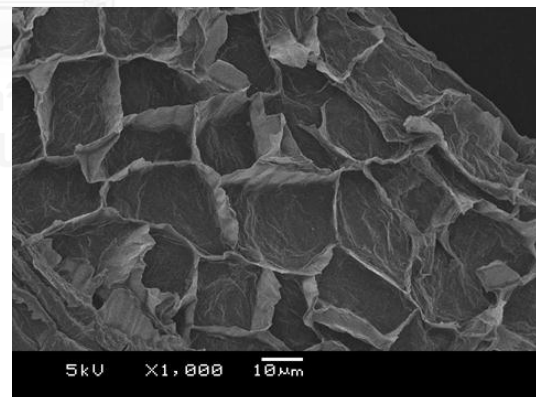
(ค) NaOH ร้อยละ 0 , ระยะเวลา 30 นาที



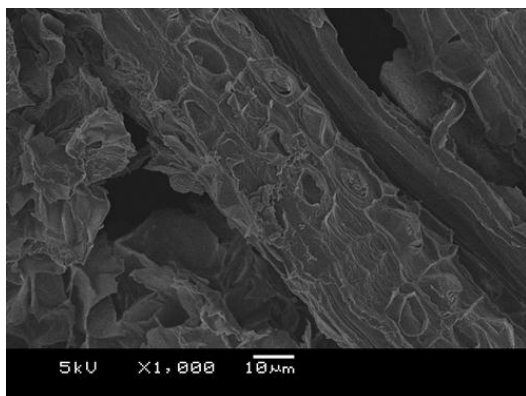
(ง) NaOH ร้อยละ 1.5 , ระยะเวลา 0 นาที



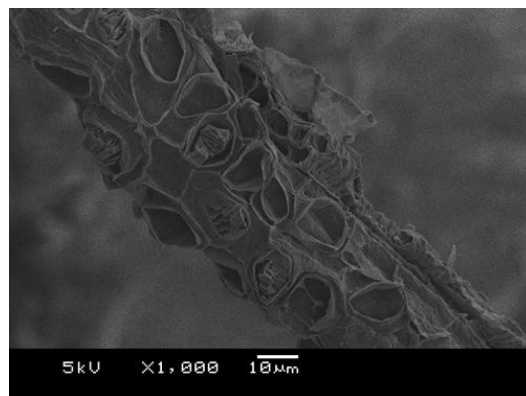
(จ) NaOH ร้อยละ 1.5 , ระยะเวลา 15 นาที



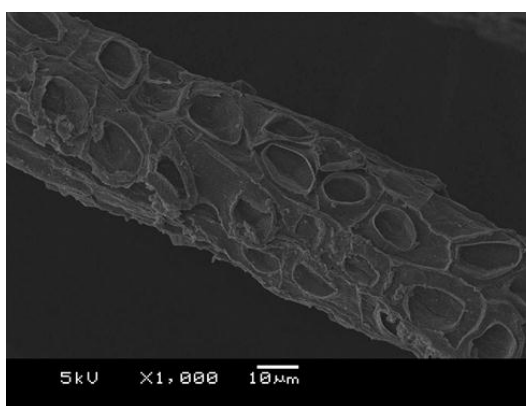
(ฉ) NaOH ร้อยละ 1.5 , ระยะเวลา 36.2 นาที



(ข) NaOH ร้อยละ 3 , ระยะเวลา 0 นาที



(ช) NaOH ร้อยละ 3 , ระยะเวลา 30 นาที



(ณ) NaOH ร้อยละ 3.62 , ระยะเวลา 15 นาที

รูปที่ 4 - 3 ลักษณะพื้นผิวของใบกระถินเทพณรงค์หลังจากปรับสภาพที่สภาวะต่างๆ

#### 4.2.3 ปริมาณซีโอดีกรองที่ได้หลังจากปรับสภาพเบื้องต้น

หลังจากการปรับสภาพใบกระถินเทพณรงค์ที่สภาวะต่างๆ เมื่อนำสารละลายมาวิเคราะห์หาปริมาณซีโอดีกรองของแต่ละชุดการทดลองพบว่า เมื่อระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำนานขึ้น และระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น จะทำให้ปริมาณซีโอดีกรองเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ดังรูปที่ 4-4 ซึ่งจากสภาวะในการปรับสภาพ สามารถอธิบายผลการทดลอง ออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1) ผลของระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 °ซ ต่อปริมาณซีโอดีกรอง

เมื่อทำการปรับสภาพใบกระถินเทพณรงค์โดยการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาต่างกัน (15 และ 30 นาที) หลังจากการปรับสภาพ เมื่อนำสารละลายมาวิเคราะห์หาปริมาณซีโอดีกรอง พบว่าปริมาณซีโอดีกรองจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการปรับสภาพ โดยที่ 15 และ 30 นาที มีค่าซีโอดีกรอง เท่ากับ  $12.38 \pm 1.59$  และ  $13.50 \pm 1.06$  กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพ 1.83 และ 2.00 เท่า ตามลำดับ

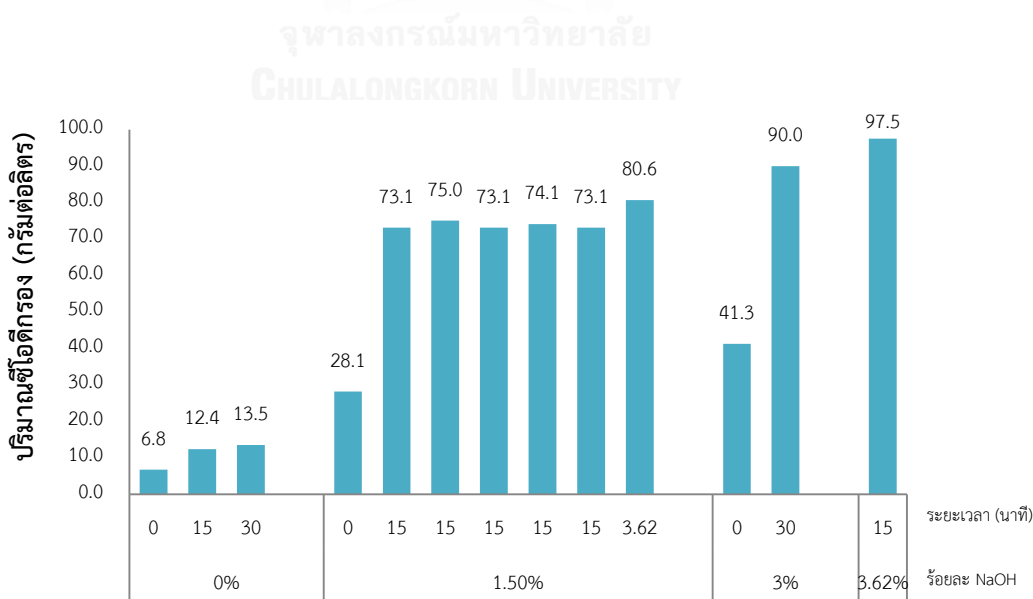
2) ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อปริมาณซีโอดีกรอง

จากชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.5 และ 3.0 พบว่าปริมาณซีโอดีกรองที่เกิดขึ้นเท่ากับ  $28.13 \pm 2.56$  และ  $41.25 \pm 1.33$  กรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพ 4.17 และ 6.11 เท่า ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ปรับสภาพโดยการระเบิดด้วยไอน้ำเพียงอย่างเดียว จะเห็นว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อปริมาณซีโอดีกรองมากกว่าความร้อน เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่าง สามารถทำลายโครงสร้างของลิกนินที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ได้ ส่วนความร้อนถือเป็นการปรับสภาพทางกายภาพ จะช่วยให้ผิวของใบไม้เปื่อยยุ่ย ซึ่งสามารถทำลายโครงสร้างของผนังเซลล์ได้น้อยกว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

3) ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และความร้อน ต่อปริมาณซีโอดีกรอง

จากชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส พบว่าปริมาณซีโอดีกรองจะเพิ่มขึ้นสูงถึง 10.83 - 14.44 เท่าของชุดการทดลองที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพ โดยชุดการทดลองที่ทำการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3.62 ระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ 15 นาที จะมีปริมาณซีโอดีกรองสูงสุด ซึ่งมีปริมาณซีโอดีกรองเท่ากับ  $97.5 \pm 10.61$  กรัมต่อลิตร

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการปรับสภาพโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับสภาพ ซึ่งแสดงผลจากปริมาณซีโอดีกรองในสารละลายที่สูงขึ้นโดยมีค่าสูงกว่าการปรับสภาพโดยใช้ด่างหรือความร้อนเพียงอย่างเดียว



รูปที่ 4 - 4 ปริมาณซีโอดีกรองที่ได้หลังจากปรับสภาพในแต่ละชุดการทดลอง

เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ของระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการระเบิดด้วยไอน้ำต่อปริมาณซีโอติกรองที่เกิดขึ้นหลังการปรับสภาพไบโอดีด้วยหลักการทางสถิติ (ANOVA) เพื่อหาความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณซีโอติกรองมากที่สุด ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4 - 2 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของตัวแปรต่อปริมาณซีโอติกรองหลังการปรับสภาพ

Source	Sum of Squares (SS)	df	Mean Square	F-Value	p-value Prob > F
Model	11441.26	5	2288.25	22.04	0.0004
A-NaOH Conc.	7393.22	1	7393.22	71.22	6.47E-05
B-Reaction time	2538.62	1	2538.62	24.45	0.0017
AB	439.95	1	439.95	4.24	0.0785
A <sup>2</sup>	1280.60	1	1280.60	12.34	0.0098
B <sup>2</sup>	1056.01	1	1056.01	10.17	0.0153
Residual	726.70	7	103.81		
Lack of Fit	723.77	3	241.26	329.58	3.04E-05
Pure Error	2.93	4	0.73		
Cor Total	12167.96	12			

จากตาราง ANOVA ค่า p-value ของระดับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำมีค่าน้อยกว่า 0.05 (p-value= 0.0004) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สรุปได้ว่าทั้งความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการระเบิดด้วยไอน้ำต่างมีผลต่อการเพิ่มปริมาณซีโอติกรอง และเมื่อพิจารณาค่า Sum of Squares (SS) พบว่าค่า SS ของระดับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่ามากกว่าระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ ซึ่งหมายถึงความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่งผลต่อปริมาณซีโอติกรองมากกว่าระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของระดับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำต่อปริมาณซีโอติกรองที่เกิดขึ้นหลังการปรับสภาพไบโอดีด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM)



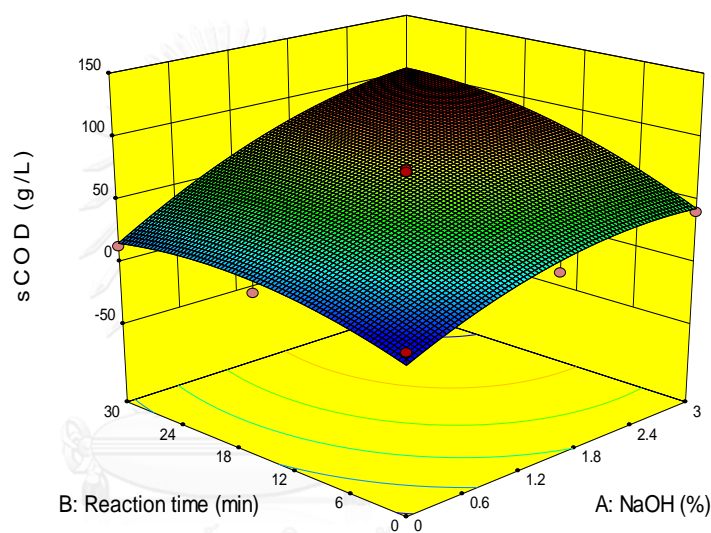
ซึ่งมีความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง ดังรูปที่ 4-5 จากผลการวิเคราะห์จะเห็นว่าให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน คือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการเปิดด้วยไอน้ำ จะมีปริมาณซีโอติกรองในสารละลายสูงขึ้นด้วย โดยมีความสัมพันธ์เชิงสมการดังนี้

$$\text{sCOD (g/L)} = -2.34 + 37.24 A + 2.59 B + 0.47 AB - 7.24 A^2 - 0.07 B^2$$

โดยที่ A = ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

B = ระยะเวลาในการเปิดด้วยไอน้ำ ณ อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส

Design-Expert® Software  
Factor Coding: Actual  
sCOD (g/L)  
● Design points above predicted value  
● Design points below predicted value  
97.5  
6.75  
X1 = A: NaOH  
X2 = B: Reaction time



รูปที่ 4 - 5 ความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการเปิดด้วยไอน้ำ ต่อปริมาณซีโอติกรองที่เกิดขึ้นหลังการปรับสภาพใบไม้

#### 4.2.4 องค์ประกอบของไบโกระถินเทพนรงค์หลังจากปรับสภาพเบื้องต้น

นำไบโกระถินเทพนรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพที่สภาวะต่างๆ มาแยกส่วนกากออก แล้วนำไปล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกลั่นจนให้มีสภาพเป็นกลาง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่เปลี่ยนแปลงไปหลังจากการปรับสภาพไบโกระถินเทพนรงค์ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4-6

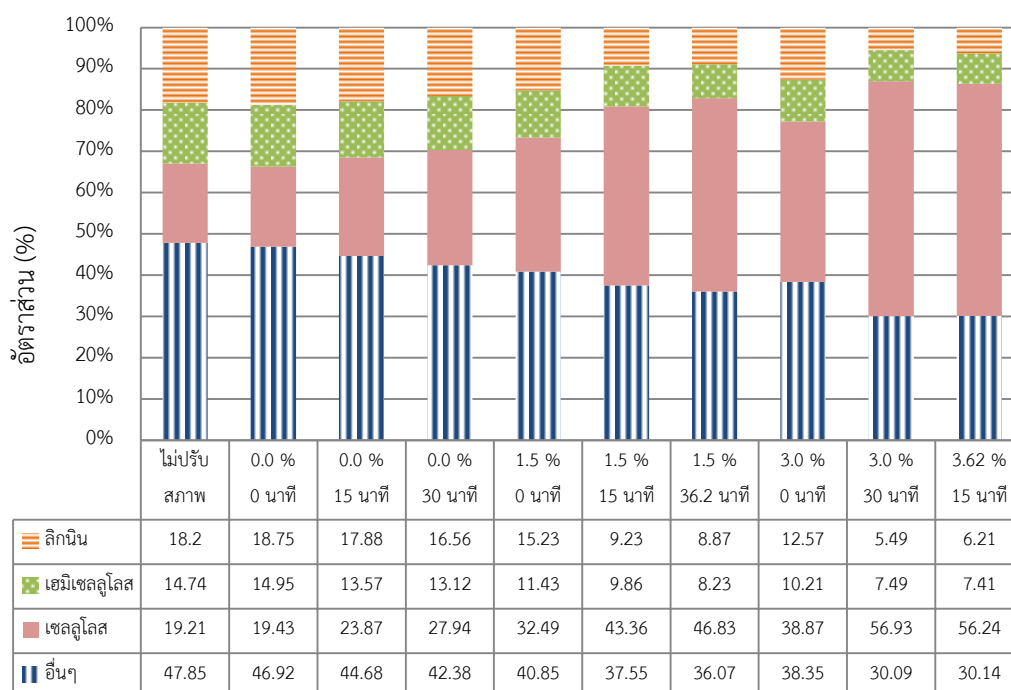
จากผลการทดลองพบว่าองค์ประกอบของไบโกระถินเทพนรงค์หลังการปรับสภาพในสภาวะต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อสภาวะการปรับสภาพในสภาวะที่รุนแรงขึ้น ปริมาณลิกนินและเฮมิเซลลูโลสจะมีปริมาณลดลง เนื่องจากลิกนินมีโครงสร้างเป็นวงแหวนอะโรมาติก โมเลกุลค่อนข้าง

ซับซ้อน แต่จะย่อยสลายในสารละลายต่างและสามารถถูกออกซิไดซ์ได้ภายใต้สภาวะที่มีความร้อนและความดันสูง ส่วนเฮมิเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายได้ง่ายด้วยกรดหรือเบสเจือจาง หรือเอนไซม์ เพราะเฮมิเซลลูโลสมีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ไม่เป็นเส้นตรง และมีลำดับของหน่วยย่อยน้ำตาลที่เรียงตัวแบบสุ่ม จึงทำให้พันธะที่เชื่อมระหว่างไซโลสถูกทำลายด้วยกรดหรือเอนไซม์ได้ง่าย

(Hendriks และ Zeeman, 2009)

เนื่องจากสารละลายไฮเดรียมไฮดรอกไซด์และความร้อนจะไปช่วยทำลายโครงสร้างของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ของพืชจึงทำให้สารอินทรีย์ชนิดอื่นที่อยู่ภายในเซลล์พืชออกมาอยู่ในสารละลาย จึงส่งผลให้อัตราส่วนอื่นๆในไบโอดีเซลลงเมื่อมีการปรับสภาพในสภาวะที่รุนแรงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของปริมาณซีโอดีที่กรอง และเนื่องจากปริมาณลิกนินและเฮมิเซลลูโลสลดลงจึงส่งผลให้อัตราส่วนของเซลลูโลสเพิ่มสูงขึ้น

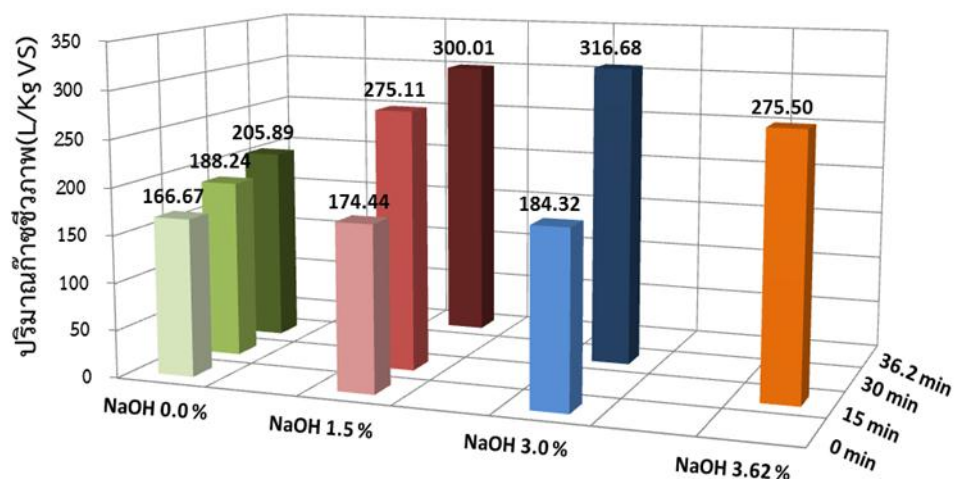
จากผลการศึกษาพบว่าไบโกระถินเทพณรงค์ที่ปรับสภาพด้วยสารละลายไฮเดรียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3.0 ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำระยะเวลา 30 นาที ทำให้อัตราส่วนของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสลดลงสูงสุด ซึ่งเท่ากับร้อยละ 69.84 และ 48.24 ทำให้สรุปได้ว่าทั้งความเข้มข้นของสารละลายไฮเดรียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส มีผลต่อการสลายโครงสร้างของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส



รูปที่ 4 - 6 องค์ประกอบของไบโกระถินเทพณรงค์หลังการปรับสภาพในสภาวะต่างๆ

#### 4.3 ผลการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นที่สภาวะต่างๆ โดยวิธีบีเอ็มพี

หลังจากการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์ในสภาวะต่างๆ เมื่อนำส่วนกากและของเหลวมาศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีบีเอ็มพี ทำการทดลองทั้งหมด 60 วัน ผลปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของแต่ละชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4-7 จากผลการทดลองจะเห็นว่าชุดการทดลองที่ทำการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุด



รูปที่ 4 - 7 ปริมาณก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพที่สภาวะต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพในชุดที่ไม่ได้รับการปรับสภาพเบื้องต้นมีค่า  $166.67 \pm 1.39$  ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ซึ่งมีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ปรับสภาพในสภาวะอื่น เนื่องจากไบโกระถินเทพณรงค์มีลิกนินเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 18.21

จากสภาวะในการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์ ก่อนที่เข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถอธิบายผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

##### 1. ผลของระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ ต่อผลการผลิตก๊าซชีวภาพ

เมื่อทำการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์โดยการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 15 และ 30 นาที พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการการ

ระเบิดด้วยไอน้ำ ชุดการทดลองที่ได้รับการปรับสภาพโดยการระเบิดด้วยไอน้ำเป็นเวลา 15 และ 30 นาที มีปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ  $188.24 \pm 5.55$  และ  $205.89 \pm 1.39$  ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ซึ่งมีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงกว่าชุดควบคุมร้อยละ 21.57 และ 39.22 ตามลำดับ ดังรูปที่ 4-8 (ก)

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า เมื่อเพิ่มระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ โครงสร้างของไบโอดีกรีจะถูกทำลายได้มากขึ้น เนื่องจากโครงสร้างของลิกนินถูกทำลาย และยังส่งผลให้ปริมาณซีโอติกรองในสารละลายเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในสารละลาย รวมถึงย่อยสลายโครงสร้างของไบโอดีกรีได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองดังกล่าว มีปริมาณสูงกว่าชุดการทดลองที่ไม่ทำการปรับสภาพ

## 2. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อผลการผลิตก๊าซชีวภาพ

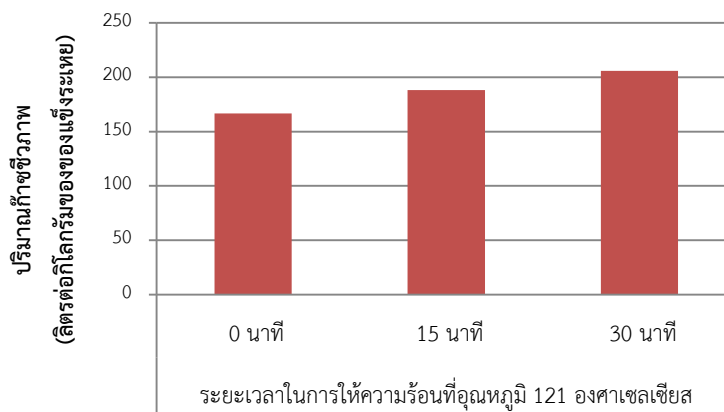
จากชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.5 และ 3.0 พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ชุดการทดลองที่ได้รับการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1.5 และ 3.0 มีปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ  $174.44 \pm 6.28$  และ  $184.32 \pm 1.42$  ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ซึ่งมีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงกว่าชุดควบคุมร้อยละ 4.66 และ 10.59 ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 4-8 (ข)

เมื่อนำผลการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ปรับสภาพโดยให้ความร้อนเพียงอย่างเดียว จะเห็นว่าความร้อนมีผลต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทั้งที่ปริมาณซีโอติกรองเริ่มต้นในชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีปริมาณมากกว่าชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยความร้อน เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวเป็น ไฮดรอกไซด์ ไอออน (Hydroxyl ions) ซึ่งไอออนชนิดนี้สามารถทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ อาจส่งผลให้จุลินทรีย์บางส่วนในระบบถูกทำลาย (Siqueira และ Lopes, 1999) จึงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบลดลง

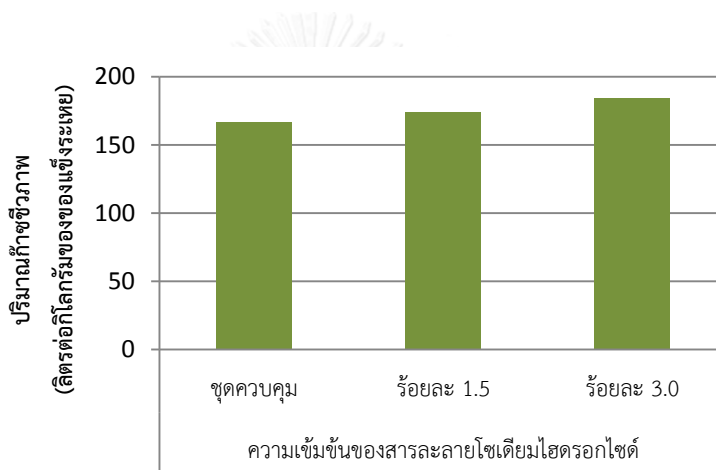
## 3. ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และความร้อน ต่อผลการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากชุดการทดลองที่ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4-8 (ค) พบว่าเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำมีผลต่อการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพเนื่องจากความร้อนจะทำให้โครงสร้างของไบโอดีกรีถูกทำลาย ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของไบโอดีกรีให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถทำปฏิกิริยาในการย่อยสลายโครงสร้างของไบโอดีกรีได้อย่าง

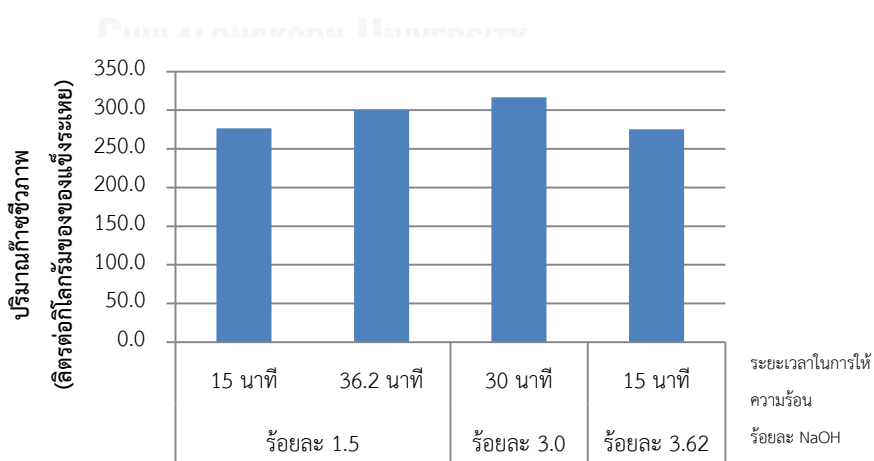
ทั่วถึงและจะส่งผลให้ปริมาณซีโอติกรองในสารละลายมีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย โดยเพิ่มขึ้นสูงถึง 10.83 - 14.44 เท่าของชุดควบคุม และนอกจากนี้สัดส่วนของลิกนินในโครงสร้างของไบโม่ลดลง ซึ่งลดลงถึงร้อยละ 69.84 ของชุดการทดลองที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพ ดังนั้นเมื่อเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ทำให้จุลินทรีย์จำพวก Hydrolytic bacteria และ Fermentative bacteria สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในสารละลาย รวมถึงย่อยสลายโครงสร้างของไบโม่ได้ง่ายขึ้น โดยโครงสร้างของไบโม่ที่ผ่านการปรับสภาพจะมีองค์หลักคือโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส เมื่อจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายโครงสร้างดังกล่าว จะทำให้เกิดเป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็กออกมา จากนั้นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กจะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายต่อจนเกิดเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งการปรับสภาพในสภาวะดังกล่าวจะช่วยลดระยะเวลาในการย่อยสลายในขั้นไฮโดรไลซิสของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยชุดการทดลองที่ทำการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 ระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ 30 นาที จะมีปริมาณชีวภาพสูงสุด คือ  $316.19 \pm 0.69$  ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ซึ่งมีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงกว่าชุดควบคุมร้อยละ 89.71



(ก) ผลของระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ ต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ



(ข) ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ

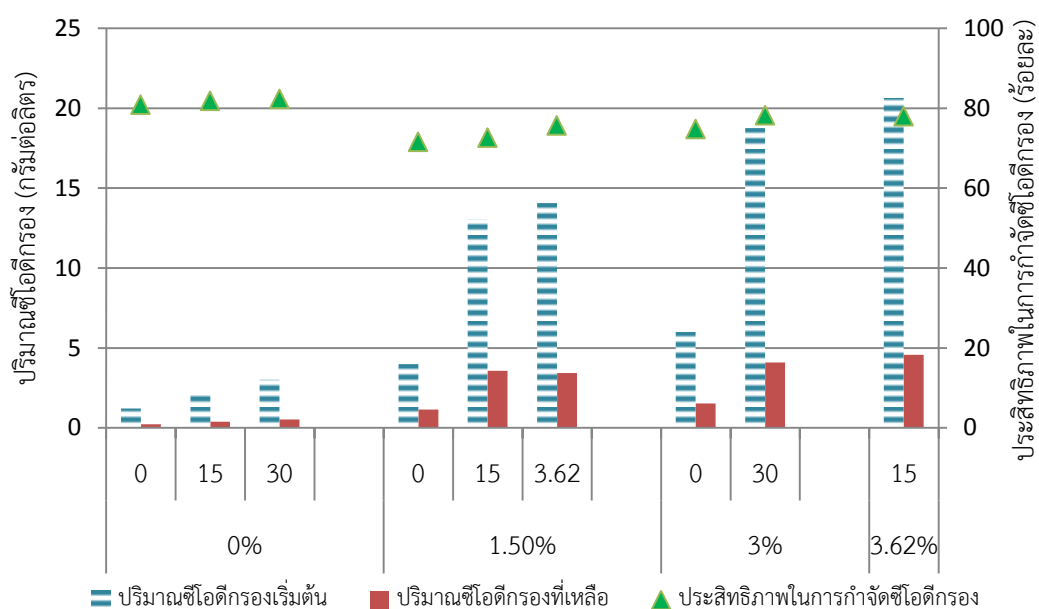


(ค) ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำ

รูปที่ 4 - 8 ผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะต่างๆ

#### 4.4 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีกรองของการหมักแบบบีเอ็มพี

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการหมักแบบบีเอ็มพีในการกำจัดซีโอดีกรอง จากการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกรองของแต่ละชุดการทดลองมีค่าสูงกว่าร้อยละ 70 ดังรูปที่ 4 - 9 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณซีโอดีเริ่มต้นของแต่ละชุดการทดลองไม่เท่ากัน ชุดการทดลองที่ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่ความเข้มข้นสูงและระยะเวลาสั้น จะมีปริมาณซีโอดีกรองเริ่มต้นสูงขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4-9 เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักแบบ บีเอ็มพีพบว่าปริมาณซีโอดีกรองในแต่ละชุดการทดลองลดลงในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักแบบบีเอ็มพี



รูปที่ 4 - 9 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีกรองของแต่ละชุดการทดลอง

#### 4.5 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพใบกระถินเทพณรงค์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส โดยอาศัยหลักการพื้นผิวตอบสนอง

ในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรม Design Expert Version 8.0 (Trial Version) ในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเบื้องต้นใบกระถินเทพณรงค์เพื่อที่จะนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพในอัตราที่สูงที่สุด โดยเลือกใช้วิธีแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) มาออกแบบชุดการทดลอง ซึ่งจะกำหนดปัจจัย 2 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส และค่าผลตอบสนอง คือ ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละชุดการทดลอง จากนั้นจะหาความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 2 ต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยการแสดงแบบจำลองเป็นสมการกำลังสอง หรือ สมการแบบ Quadratic โดยอาศัยหลักการพื้นผิวตอบสนอง (Respond Surface Methodology: RSM)

จากการออกแบบชุดการทดลอง โดยใช้วิธีแบบส่วนประสมกลาง จะได้ชุดการทดลองทั้งหมด 13 ชุด เมื่อทำการศึกษาผลของสภาวะต่างๆที่ใช้ในการปรับสภาพเบื้องต้นใบกระถินเทพณรงค์ จะได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4 - 3 ข้อมูลผลผลิตก๊าซชีวภาพจากชุดการทดลองทั้ง 13 ชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	การปรับสภาพเบื้องต้น		ผลผลิตก๊าซชีวภาพ
	% NaOH	เวลา (นาที)	
1	0.00	0.00	166.67±1.39
2	0.00	15.00	188.24±5.55
3	0.00	30.00	205.89±0.00
4	1.50	0.00	174.44±4.16
5	1.50	15.00	271.58±1.39
6	1.50	15.00	275.99±0.69
7	1.50	15.00	272.56±1.39
8	1.50	15.00	277.22±1.04
9	1.50	15.00	276.97±6.04
10	1.50	36.21	299.52±6.04
11	3.00	0.00	184.32±1.39
12	3.00	30.00	316.19±0.69
13	3.62	15.00	275.01±2.08



หลังจากทำการศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ปรับสภาพเบื้องต้นในสภาวะต่างๆ ตามชุดการทดลองที่ได้ออกแบบโดยวิธีแบบส่วนประสมกลาง โดยกำหนดปัจจัย คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ดังตารางที่ 4-3 ไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของปัจจัยทั้ง 2 ต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ดังนี้

#### 4.5.1 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของตัวแปรต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลการศึกษาความสัมพันธ์ของระดับความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการระเบิดด้วยไอน้ำต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพด้วยหลักการทางสถิติ (ANOVA) เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล โดยพิจารณา จาก ค่า P-value ของปัจจัยต่าง ๆ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ได้ผลวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4 - 4

ตารางที่ 4 - 4 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของตัวแปรต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-value Prob > F
Model	31680.06	5	6336.01	34.24	< 0.0001
A-NaOH Conc.	9483.89	1	9483.89	51.25	0.0002
B-Reaction time	16646.80	1	16646.80	89.96	< 0.0001
AB	2146.01	1	2146.01	11.60	0.0114
A <sup>2</sup>	3850.22	1	3850.22	20.81	0.0026
B <sup>2</sup>	3199.13	1	3199.13	17.29	0.0043
Residual	1295.27	7	185.04		
Lack of Fit	1267.92	3	422.64	61.82	0.0508
Pure Error	27.35	4	6.84		
Cor Total	32975.33	12			

จากวิเคราะห์ค่าตารางความแปรปรวน ANOVA ค่า p-value ของระดับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส มีค่าน้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 สรุปได้ว่าสมมติฐานที่กำหนดไว้มีนัยสำคัญทางสถิติกับข้อมูล นั่นคือ ทั้งความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาการระเบิด

ด้วยไอน้ำต่างมีผลต่อการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพ และเมื่อพิจารณาค่า Sum of Squares (SS) พบว่าค่า SS ของระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำมีค่ามากกว่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งหมายถึงระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำส่งผลต่อการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

#### 4.5.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square: R-Sq)

เมื่อวิเคราะห์ผลทางสถิติหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ศึกษา กับค่าการตอบสนอง พบว่าสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและค่าตอบสนองมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R Squared) ที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เท่ากับ 0.9607 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจสามารถอธิบายได้ว่าผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลองเป็นผลมาจากปัจจัยที่ทำการศึกษาร้อยละ 96.07 ส่วนที่เหลืออีกร้อยละ 3.93 เป็นผลมาจากปัจจัยอื่นที่ไม่สามารถทราบได้ โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจควรมีค่าน้อยร้อยละ 75 (Montgomery, 1991) แสดงว่าแบบจำลองสามารถนำไปสร้างสมการทำนาย เพื่อหาค่าผลตอบได้อย่างถูกต้องและเหมาะสม

#### 4.5.3 การสร้างสมการทำนายผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นในสภาวะต่างๆ

การสร้างสมการทำนายผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นในสภาวะต่างๆ โดยนำค่าของปัจจัยที่ได้จากการวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของสมการถดถอยของผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมาเขียนให้อยู่ในรูปของสมการแบบ Quadratic ดังนี้

$$\text{Biogas Production (L/Kg Vs)} = 151.41 + 47.71 A + 5.27 B + 1.03 AB - 12.54 A^2 - 0.11 B^2$$

โดยที่ A = ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

B = ระยะเวลาการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส

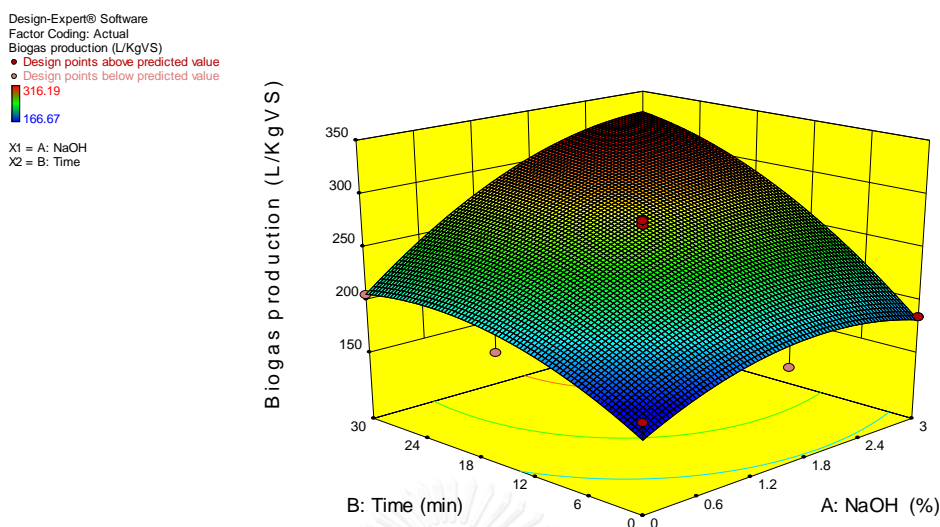
จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและค่าตอบสนองสามารถทำนายผลผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะต่างๆ ที่ทำการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4 - 5 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลองกับจากสมการความสัมพันธ์

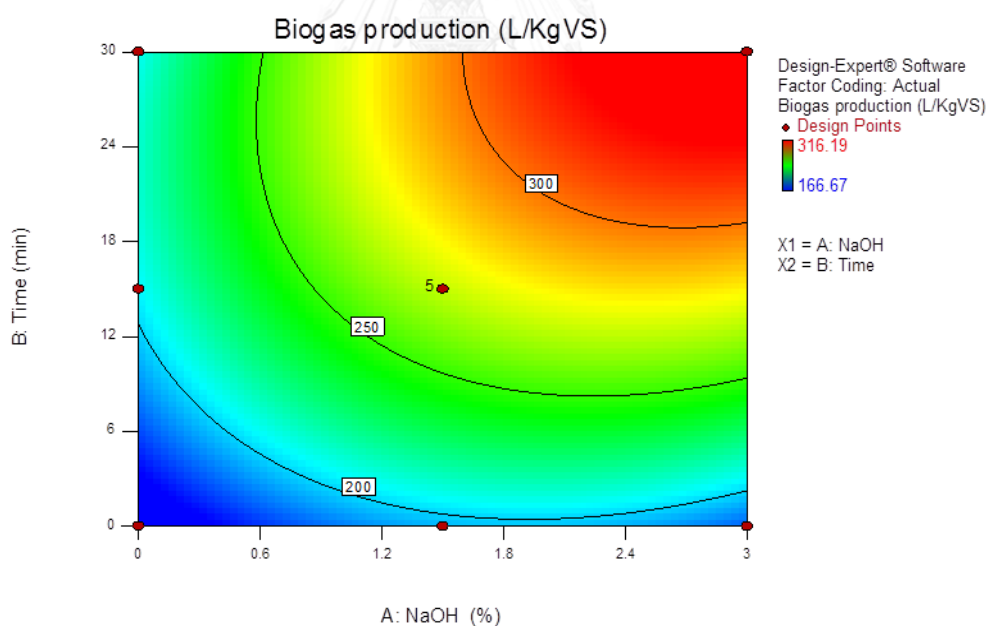
ชุดการทดลอง	การปรับสภาพเบื้องต้น		ก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย)	
			Actual	Predicted
	% NaOH	เวลา (นาที)		
1	0.00	0.00	166.67±1.39	151.41
2	0.00	15.00	188.24±5.55	204.69
3	0.00	30.00	205.89±0.00	206.50
4	1.50	0.00	174.44±4.16	194.75
5	1.50	15.00	271.58±1.39	271.19
6	1.50	15.00	275.99±0.69	271.19
7	1.50	15.00	272.56±1.39	271.19
8	1.50	15.00	277.22±1.04	271.19
9	1.50	15.00	276.97±6.04	271.19
10	1.50	36.21	299.52±6.04	291.44
11	3.00	0.00	184.32±1.39	181.63
12	3.00	30.00	316.19±0.69	329.37
13	3.62	15.00	275.01±2.08	268.86

#### 4.5.4 การสร้างพื้นผิวตอบสนองของผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นในสภาวะต่างๆ

เมื่อได้สมการสำหรับทำนายผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นในสภาวะต่างๆ จึงนำมาสร้างกราฟพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งเป็นการเขียนเป็นพื้นผิวตอบสนองในรูปของความสัมพันธ์แบบเส้นโค้ง เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวตอบสนองได้ดีขึ้น ดังรูปที่ 4 - 10 และสามารถแสดงเป็นกราฟแบบโครงร่าง ดังรูปที่ 4-11



รูปที่ 4 - 10 พื้นที่ผิวผลตอบ : แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาการระเบิดด้วยไอน้ำต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ



รูปที่ 4 - 11 กราฟแบบโครงร่าง : แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาการระเบิดด้วยไอน้ำต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ

จากรูปที่ 4-10 และ 4-11 จะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำจะมีผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นด้วย

#### 4.5.5 หาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยต่อค่าตอบสนอง (Optimization)

การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงที่สุดโดยใช้ฟังก์ชัน response optimizer ในโปรแกรม Design Expert ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัย และใช้วัดความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (composite desirability: D) ซึ่งค่าความพึงพอใจของผลตอบมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ถ้า D มีค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์

จากฟังก์ชัน response optimizer ในโปรแกรม Design Expert สามารถกำหนดค่าของปัจจัย ที่ทำการศึกษาได้ นั่นคือ ต้องการค่ามากที่สุด (maximize) หรือ ค่าน้อยที่สุด (minimize) เพื่อให้โปรแกรมทำนายผลผลิตก๊าซชีวภาพที่จะเกิดขึ้น แสดงดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4 - 6 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้สมการความสัมพันธ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ

No	Factors values		Response values	Desirability	เปรียบเทียบกับ ชุดควบคุม
	NaOH (%)	Time (min)	Biogas production		
1	maximize	maximize	329.374	1.0000	97.62
	3.000	30.000			
2	minimize	minimize	239.127	0.597	43.47
	0.942	10.773			
3	maximize	minimize	267.618	0.734	60.57
	3.000	12.393			
4	minimize	maximize	274.884	0.799	64.93
	1.044	30.000			

จากตารางที่ 4-6 พบว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราที่สูงที่สุด คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ 30 นาที ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 329.374 ลิตรต่อ กิโลกรัมของแข็งระเหย โดยมีค่าความพึงพอใจรวมเท่ากับ 1.0000 ซึ่งเมื่อนำผลผลิตก๊าซชีวภาพมาเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ทำการปรับสภาพพบว่า มีค่าสูงกว่าร้อยละ 97.62 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกสภาวะดังกล่าวในการปรับสภาพเบื้องต้นไบโกระถินเทพณรงค์ก่อนนำไปเข้าสู่ระบบถังหมักไว้

ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นถังปฏิกรณ์แบบลิซเบต และขั้นตอนที่สองเป็นถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์

#### 4.6 ผลการศึกษาเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพนรงค์สดและไบโกระถินเทพนรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นในระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพนรงค์ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที เปรียบเทียบกับการใช้ไบโกระถินเทพนรงค์สด โดยจะนำหมักร่วมกับมูลโค และนำเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบลิซเบตที่มีปริมาตรการทำงาน 5 ลิตร เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดไขมันระเหย จากนั้นจะนำน้ำหมักกรดที่ได้จากถังปฏิกรณ์แบบลิซเบตทั้ง 2 ถัง มาเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ที่มีปริมาตรการทำงาน 6 ลิตร เพื่อศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำหมักที่ผลิตได้

##### 4.6.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้นก่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบลิซเบต

###### 1. ไบโกระถินเทพนรงค์สด

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไบโกระถินเทพนรงค์สดพบว่า มีค่าของแข็งทั้งหมดร้อยละ  $38.40 \pm 2.30$  โดยน้ำหนัก และมีค่าของแข็งระเหยง่าย  $34.50 \pm 2.09$  โดยน้ำหนัก คิดเป็นสัดส่วนของแข็งระเหยต่อของแข็งทั้งหมดร้อยละ 89.84 และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลส พบว่า มีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน 19.98 15.24 และ 18.8 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4-7 ลักษณะของไบโกระถินเทพนรงค์สดก่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบลิซเบต ดังรูปที่ 4-12

###### 2. ไบโกระถินเทพนรงค์หลังการปรับสภาพเบื้องต้น

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไบโกระถินเทพนรงค์หลังการปรับสภาพเบื้องต้นพบว่า มีค่าของแข็งทั้งหมดร้อยละ  $32.4 \pm 1.77$  โดยน้ำหนัก และมีค่าของแข็งระเหยง่าย  $31.20 \pm 2.64$  โดยน้ำหนัก คิดเป็นสัดส่วนของแข็งระเหยต่อของแข็งทั้งหมดร้อยละ 96.30 และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของลิกโนเซลลูโลส พบว่า มีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน 57.73 7.89 และ 5.79 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าไบโกระถินเทพนรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นมีปริมาณลิกนินและเฮมิเซลลูโลสลดลง ร้อยละ 48.42 และ 69.20 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4-7 ลักษณะของไบโกระถินเทพนรงค์หลังการปรับสภาพเบื้องต้น แสดงดังรูปที่ 4-12 ซึ่งการปรับสภาพเบื้องต้นไบโกระถินมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อกำจัดลิกนินจากใบไม้ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัดได้สูงมากแต่วิธี

ปรับสภาพนี้ก็มีผลในการกำจัดปริมาณเฮมิเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย ด้วย ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วย

### 3. มูลโคสด

มูลโคสดใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ โดยมีค่าของแข็งทั้งหมดร้อยละ  $19.40 \pm 1.11$  โดยน้ำหนัก และมีค่าของแข็งระเหยง่าย  $16.56 \pm 2.23$  โดยน้ำหนัก ดังตารางที่ 4-7 โดยในมูลโคสดจะมีเชื้อจุลินทรีย์หลายกลุ่ม เช่น จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรด จุลินทรีย์กลุ่มย่อยสลายลิกโนเซลลูโลส เป็นต้น ซึ่งการเติมมูลโคเข้าไปในระบบจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสสารอินทรีย์ในระบบ (Wang และคณะ, 2009)



(ก) ใบกระถินเทพนครสด

(ข) ใบกระถินเทพนครหลังการปรับสภาพเบื้องต้น

รูปที่ 4 - 12 ใบกระถินเทพนครก่อนเข้าสู่ระบบถังปฏิกรณ์แบบลิซเบด

ตารางที่ 4 - 7 องค์ประกอบทางเคมีของไบกระถินเทพณรงค์สด ไบกระถินเทพณรงค์ปรับสภาพ และมูลโคสด

วัตถุดิบ	ไบกระถินเทพณรงค์สด	ไบกระถินเทพณรงค์ปรับสภาพ	มูลโคสด
ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	38.40±2.30	32.4±1.77	19.40±1.11
ของแข็งระเหยง่าย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	34.50±2.09	31.20±2.64	16.56±2.23
ความชื้น (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	61.6±2.30	67.6±1.77	80.6±1.11
เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	3.9±2.09	1.2±2.64	2.84±2.23
เซลลูโลส	19.98	57.73	-
เฮมิเซลลูโลส	15.24	7.89	-
ลิกนิน	18.8	5.79	-

#### 4.6.2 การเดินระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต ที่มีไบกระถินเทพณรงค์เป็นวัตถุดิบตั้งต้น

การทดลองนี้จะทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต ที่มีไบกระถินเทพณรงค์สดและไบกระถินที่ปรับสภาพเป็นวัตถุดิบตั้งต้น โดยมีการหมักร่วมกับมูลโคซึ่งทำหน้าที่เป็นหัวเชื้อ

ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตในการทดลองนี้มีปริมาตร 6 ลิตร โดยมีปริมาตรการทำงาน 5 ลิตร โดยกำหนดอัตราส่วนโดยน้ำหนักของไบกระถินเทพณรงค์ต่อมูลโคในอัตราส่วน 70:30 ของแข็งระเหยกำหนดร้อยละของแข็งในระบบเท่ากับ 15 และด้านล่างถังปฏิกรณ์จะมีถังรองรับน้ำชะ ซึ่งจะมีการหมุนเวียนน้ำจากถังนี้กลับไปยังด้านบนของถังปฏิกรณ์ แสดงดังรูปที่ 4-13





รูปที่ 4 - 13 ถังปฏิกรณ์แบบลิซเบด

(ซ้าย) ถังลิซเบดที่ใส่ไบโกระถินเทพนรงค์สด, (ขวา) ถังลิซเบดที่ใส่ไบโกระถินเทพนรงค์ปรับสภาพ

การเริ่มต้นเดินระบบจะกำหนดอัตราส่วนของไบโกระถินเทพนรงค์ต่อมูลโคในอัตราส่วน 70:30 ของแข็งระเหย โดยในถังปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินเทพนรงค์สดที่เตรียมจากข้อ 3.3.5.1 340 กรัมของแข็งระเหย (1,000 กรัมของน้ำหนักไบโกระถินเทพนรงค์สด) และใช้มูลโค 145.8 กรัมของแข็งระเหย (911.25 กรัม น้ำหนักสด) และมีการกำหนดร้อยละของแข็งในระบบเท่ากับ 15 จึงมีการเติมน้ำในระบบเท่ากับ 2352 มิลลิลิตร ส่วนในระบบถังปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินเทพนรงค์ปรับสภาพ 340 กรัมของของแข็งระเหย (1,030 กรัมของน้ำหนักไบโกระถินเทพนรงค์ปรับสภาพ โดยคิดเป็น 1500 กรัมของไบโกระถินเทพนรงค์สด ) และมีการเติมน้ำในระบบเท่ากับ 2251 มิลลิลิตร จากการเริ่มต้นของถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 จะเห็นว่า ถังปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินปรับสภาพจะใช้ไบโกระถินเทพนรงค์สดมากกว่าถังปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินสดถึง 0.5 เท่า แสดงดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4 - 8 แสดงปริมาณไบโกระถินเทพณรงค์ มูลโค และ น้ำประปาที่เติมลงไปในถังปฏิกรณ์ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

วัตถุดิบเริ่มต้น	ถังปฏิกรณ์		ถังปฏิกรณ์	
	ชุดไบโกระถินเทพณรงค์สด		ชุดไบโกระถินเทพณรงค์ปรับสภาพ	
	กรัมของ ของแข็งระเหย	กรัมของน้ำหนักสด	กรัมของ ของแข็งระเหย	กรัมของน้ำหนักสด
ไบโกระถินเทพณรงค์	340 กรัม	1000 กรัม	340 กรัม	1030 กรัม (1500 กรัมของใบไม้สด)
มูลโค	145.8 กรัม	911.25 กรัม	145.8 กรัม	911.25 กรัม
น้ำประปา	2352 มิลลิลิตร		2251 มิลลิลิตร	

จากงานวิจัยของ Babel และคณะ (ค.ศ. 2004) ได้ทดลองหมักเปลือกสับประรดในถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต ซึ่งจะทำการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยในน้ำชะ ผลการทดลองพบว่าเมื่อเดินระบบไปจนถึงวันที่ 10 ของการเดินระบบ ปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบจะมีค่าลดลง เนื่องจากในระบบมีค่าพีเอชของระบบสูง จึงส่งผลให้ไปยับยั้งการผลิตกรดไขมันระเหย Babel และคณะ จึงทำการเจือจางน้ำหมักกรด เพื่อเป็นลดความเข้มข้นของกรดลง ผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการเจือจางน้ำหมักกรด ในช่วงแรกปริมาณน้ำหมักกรดจะลดลง แต่จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการหมวนเวียนน้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเจือจางน้ำหมักกรด จะช่วยให้ระบบถังลิชเบตมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการควบคุมระบบถังลิชเบตตามวิจัยของ Babel และคณะ

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมัก เพื่อให้ระบบยังคงมีประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหย จึงทำการเดินระบบ 2 ครั้ง ดังนี้

- **การเดินระบบครั้งที่ 1** เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักที่ได้จากการหมักไบโกระถินเทพณรงค์ในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต และประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหยในระบบลิชเบตหลังจากการเจือจางน้ำหมัก
- **การเดินระบบครั้งที่ 2** เพื่อศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายจากการหมักไบโกระถินที่มีการผสมมูลโคเป็นหัวเชื้อในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต เพื่อนำน้ำหมักที่ผลิตได้มาเข้าสู่ถังผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้ผลของระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักจากการทดลองครั้งที่ 1

#### 4.6.3 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักที่ได้จากการหมักร่วมในกระถินที่มีการผสมมูลโคเป็นหัวเชื้อในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต และศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหยในระบบลิชเบตหลังจากการเจือจางน้ำหมัก

การเดินระบบผลิตกรดไขมันระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตครั้งที่ 1 เพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักที่ได้จากการหมักในกระถินที่มีการผสมมูลโคเป็นหัวเชื้อในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต และการศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหยในระบบลิชเบตหลังจากการเจือจางน้ำหมัก มีระยะเวลาเดินระบบ 40 วัน รายละเอียดผลการทดลองดังต่อไปนี้

##### 1) ผลผลิตกรดไขมันระเหยง่าย

ในการทดลองเพื่อศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักกรด ซึ่งจะทำการเดินระบบเป็นระยะ 20 วัน โดยไม่มีการควบคุมพีเอชในน้ำหมัก ผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำหมักกรดจากถังปฏิกรณ์ทั้งสอง พบว่าตั้งแต่เริ่มต้นเดินระบบ ปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตจะเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดในวันที่ 10 ของการเดินระบบ ดังรูปที่ 4-14 โดยพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ในกระถินเทพณรงค์สด จะมีปริมาณสูงกว่าถังปฏิกรณ์ชุดในกระถินปรับสภาพเล็กน้อยทดลอง โดยมีค่าเท่ากับ 2,400 มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก และ 2,280 มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก ตามลำดับ สาเหตุที่ปริมาณกรดไขมันระเหยในชุดในกระถินสด มีค่ามากกว่าในชุดในกระถินปรับสภาพ มีหลายสาเหตุ ดังนี้

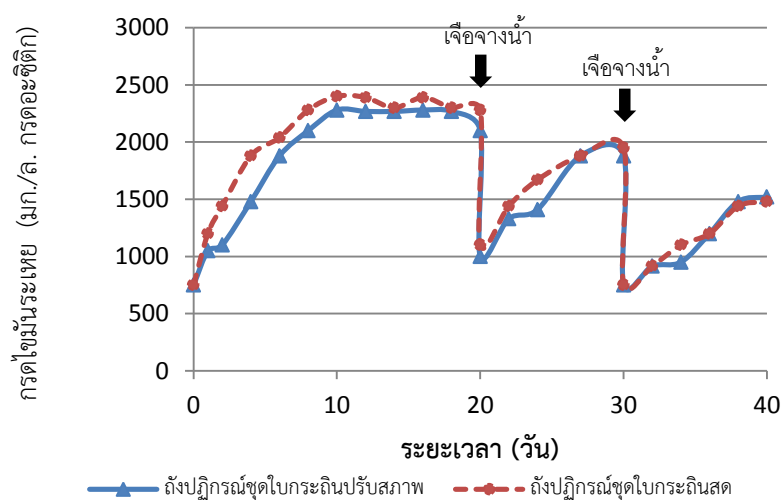
1. ปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นของถังปฏิกรณ์ชุดในกระถินปรับสภาพมีปริมาณน้อยกว่าถังปฏิกรณ์ชุดในกระถินสด เนื่องจากในการปรับสภาพไปไม้ด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำจะเป็นการทำลายจุลินทรีย์ที่อยู่ในไปไม้ ทำให้ไปไม้หลังการปรับสภาพเป็นไปไม้ที่ปราศจากเชื้อจุลินทรีย์ เมื่อนำไปไม้ทั้งสองมาผสมมูลโค ซึ่งถึงแม้จะมีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายลิกโนเซลลูโลส และจุลินทรีย์ในกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) แต่อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชุดในกระถินสดจะสามารถปรับตัวและเจริญเติบโตได้เร็วกว่าจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชุดในกระถินปรับสภาพ เนื่องจากไปไม้จะมีจุลินทรีย์ประจำถิ่น (Normal Flora) ซึ่งจะสามารถช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในไปไม้กระถินสดได้เร็วขึ้น จึงส่งผลให้อัตราการผลิตกรดไขมันระเหยในถังปฏิกรณ์ชุดในกระถินสดมีปริมาณสูงกว่าถังปฏิกรณ์ชุดในกระถินปรับสภาพ

2. จากกระบวนการปรับสภาพไปไม้กระถิน ผงเซลลูโลสฟิชจะถูกทำลาย ทำให้สารละลายต่างๆจากเซลลูโลสฟิช ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน ถูกชะละลายออกมายังสารละลาย และจากการวิเคราะห์ปริมาณลิกโนเซลลูโลส พบว่าสัดส่วนของเอมิเซลลูโลสลดลงร้อยละ 48.24 ซึ่งโครงสร้างของเอมิเซลลูโลสจะมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ เมื่อทำการปรับสภาพไปไม้

เฮมิเซลลูโลสจะแตกสลาย ทำให้น้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสละลาย ออกมาอยู่สารละลาย (เนตรชนก ศรีแสง, 2557) ซึ่งในการทดลองนี้ได้ใช้เฉพาะไบกระถินที่ผ่านการ ปรับสภาพมาทดลองโดยไม่ได้นำสารละลายต่างที่ใช้ปรับสภาพมาหมักเนื่องจากมีองค์ประกอบของ ลิกนินและมีค่าพีเอชสูง ส่วนของไบกระถินเมื่อแยกจากสารละลายแล้วจะนำมาล้างน้ำและปรับให้มี ค่าพีเอชเป็นกลางก่อนที่จะนำเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต จึงทำให้เป็นการสูญเสียคุณค่าของ สารอินทรีย์ในระบบ เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีในสารละลายหลังการปรับสภาพพบว่ามีค่าสูง ถึง 98.2 กรัมต่อลิตร

3. ระบบลิชเบตมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ทำให้จุลินทรีย์ในระบบถึงจุดไบกระถินสด เจริญเติบโตได้ดี ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายในระบบสูง จึงทำให้ปริมาณกรดไขมันระเหยในถังไบ กระถินสดมีมากกว่าในชุดทดลอง (Xie และคณะ, 2012)

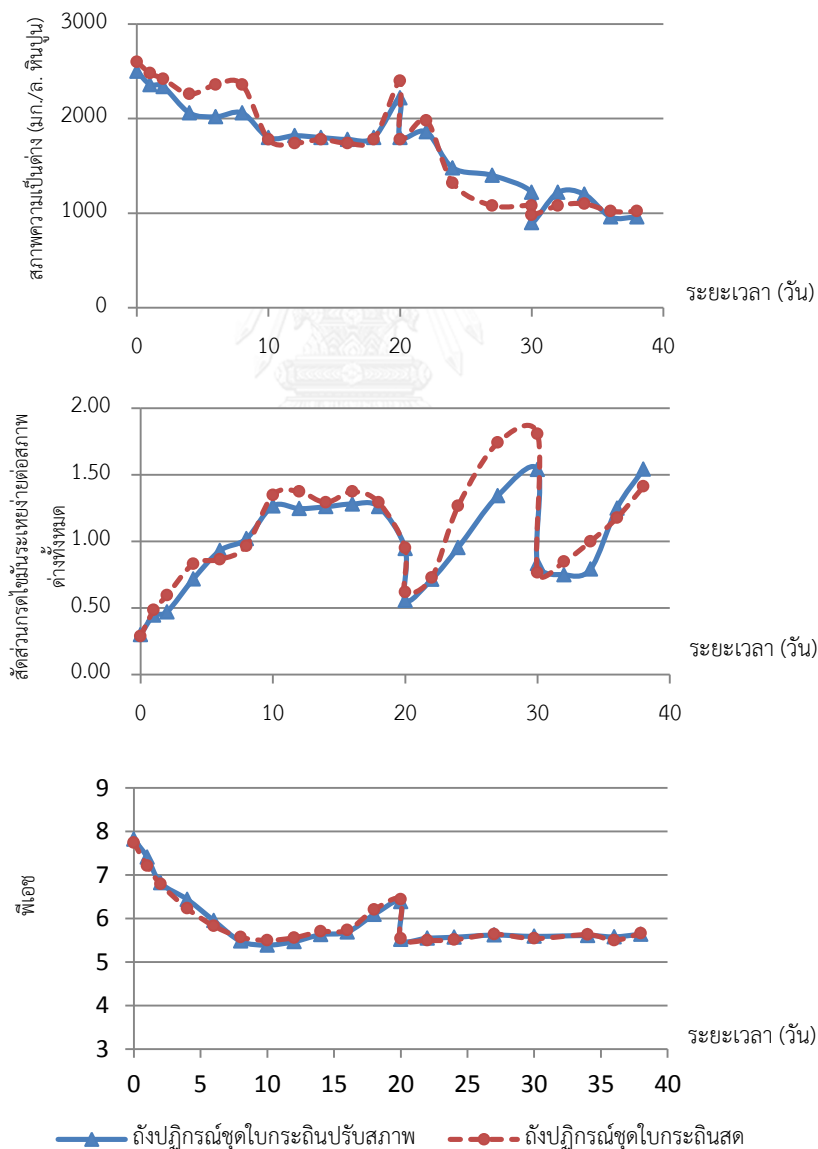
เมื่อพิจารณากรดไขมันระเหย หลังจากวันที่ 10 ของการเดินระบบ พบว่าปริมาณกรดไขมัน ระเหยในถังปฏิกรณ์ทั้งสองจะมีอัตราการผลิตกรดไขมันระเหยลดลง ดังรูปที่ 4-14 ซึ่งเป็นเพราะใน ระบบมีปริมาณกรดไขมันระเหยที่สูงเกินไป อาจไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตกรด ทำให้ ประสิทธิภาพในการผลิตกรดของจุลินทรีย์ในระบบต่ำลง (babel และคณะ, 2004) เมื่อเดินระบบมา จนถึงวันที่ 20 ได้ทำการเจือจางน้ำหมักกรด เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหยใน ระบบลิชเบตหลังจากการเจือจางน้ำหมัก ผลการทดลองพบว่า จากการเจือจางน้ำหมักจะทำให้ ปริมาณกรดไขมันระเหยมีค่าลดลง แต่เมื่อมีการเวียนน้ำในระบบ ปริมาณกรดไขมันระเหยก็จะถูกชะ ออกมาจากระบบ โดยอัตราการผลิตกรดจะสูงขึ้นเรื่อยๆ และเริ่มคงที่ในวันที่ 30 ของการเดินระบบจึง ทำการเจือจางน้ำหมักอีกรอบ ซึ่งผลที่ได้เป็นไปในทางเดียวกันกับการเจือจางน้ำหมักกรดครั้งแรก



รูปที่ 4 - 14 ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำหมักกรดจากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต

## 2) สภาวะในถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด

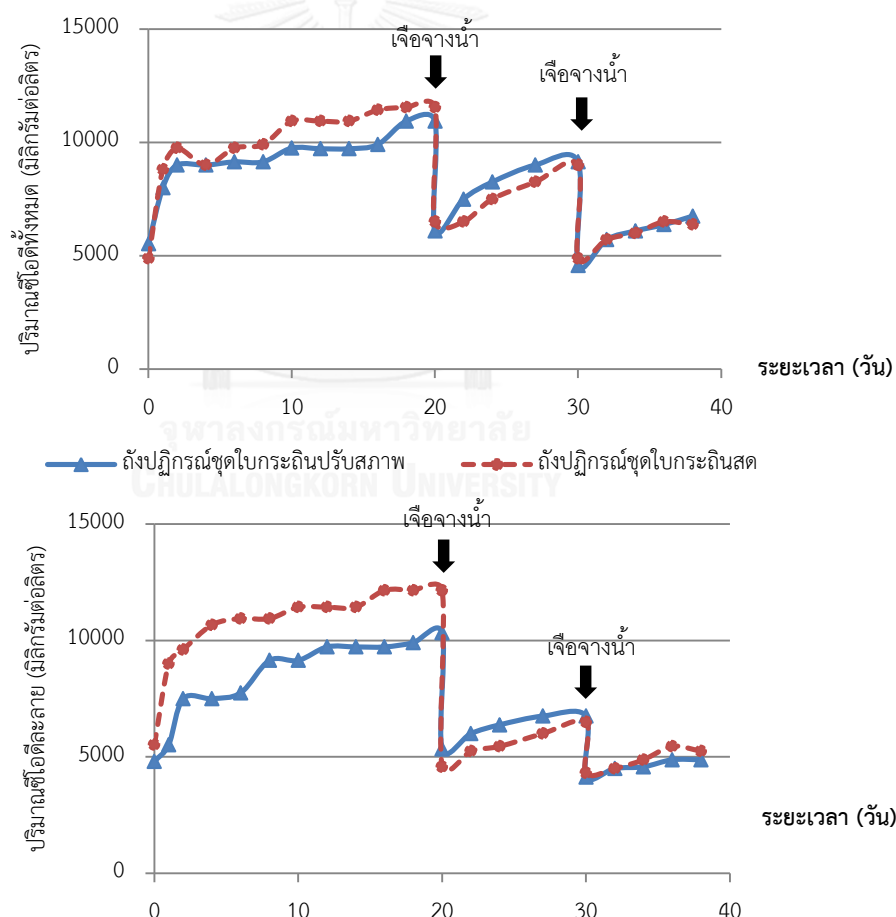
เมื่อพิจารณาค่าพีเอชในของน้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ทั้งสอง พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ จะมีค่าลดลงจนถึงวันที่ 10 ซึ่งมีค่าพีเอชต่ำสุดและหลังจากวันที่ 10 พีเอชในระบบจะค่อยๆ สูงขึ้น รูปที่ 4-15 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในระบบมีแนวโน้มที่จะเกิดก๊าซชีวภาพ และเมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดพบว่า จะมีค่าสูงขึ้นเรื่อยๆจนถึงวันที่ 10 ของการทดลอง และจะมีค่าคงที่หลังจากวันที่ 10 ของการทดลอง ซึ่งผลสอดคล้องกับการผลิตกรดไขมันระเหย โดยตลอดระยะเวลาการเดินระบบ 40 วัน ค่าสัดส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดดังกล่าวจะมีค่าสูงกว่า 0.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในระบบมีอัตราการผลิตกรดไขมันระเหยสูง



รูปที่ 4 - 15 แสดงสภาวะในถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด

### 3) ปริมาณซีโอดีและซีโอดีกรองของน้ำหมักจากระบบถังปฏิกรณ์แบบลิซเบด

ปริมาณซีโอดีและซีโอดีกรองของน้ำหมักกรดในถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อมีการเวียนน้ำหมักกรด โดยจะพบว่าหลังจากวันที่ 10 ในระบบจะมีปริมาณซีโอดีและซีโอดีละลายเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งผลเป็นไปในทางเดียวกันกับปริมาณกรดไขมันระเหย โดยพบว่าปริมาณซีโอดีที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ชุดไบกระถินสด จะมีปริมาณสูงกว่าถังปฏิกรณ์ไบกระถินปรับสภาพ โดยมีค่าเท่ากับ 11,544 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 10,937 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่อมีการเจือจางน้ำในวันที่ 20 ของการเดินระบบ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหย ผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการเดินระบบหลังจากวันที่ 21 ปริมาณซีโอดีในสารละลายจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงวันที่ 30 ซึ่ง โดยมีค่าซีโอดีในถังปฏิกรณ์ชุดไบกระถินสดและถังปฏิกรณ์ไบกระถินปรับสภาพ เท่ากับ 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 9,143 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ



รูปที่ 4 - 16 ปริมาณซีโอดีและซีโอดีกรองในน้ำหมักกรดจากถังปฏิกรณ์แบบลิซเบด

จากการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักกรด พบว่า วันที่ 10 ของการเดินระบบ มีความเหมาะสมที่ทำการเจือจางน้ำหมักกรด เนื่องจากเมื่อพิจารณาการผลิตกรดไขมันระเหยของทั้งสองถึงปฏิกรณ์พบว่า ในวันที่ 10 ของการเดินระบบเริ่มมีอัตราการผลิตกรดไขมันระเหยลดลง และปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำหมักกรดเริ่มมีค่าคงที่ไปจนถึงวันที่ 20 ของการเดินระบบ

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหยในระบบลิชเบตหลังจากการเจือจางน้ำหมัก พบว่าเมื่อทำการเจือจางน้ำหมักจะทำให้อัตราการผลิตกรด และปริมาณซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น การเจือจางน้ำหมักเมื่อในระบบมีอัตราการผลิตลดลงมีความสำคัญต่อระบบมาก เนื่องจากเมื่อมีความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในระบบสูง กรดไขมันระเหยจะยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตกรด ทำให้จุลินทรีย์หยุดการสร้างกรด หากไม่มีการเจือจางน้ำหมักจะส่งผลให้ระบบล้มเหลวได้ (Cadavid-Rodríguez และ Horan, 2014)

#### 4.6.4 ผลการศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายจากการหมักร่วมไบโกระถินเทพณรงค์ที่มีการผสมและมูลโคเป็นหัวเชื้อ

การเดินระบบผลิตกรดไขมันระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตครั้งที่ 2 เพื่อศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายจากการหมักไบโกระถินเทพณรงค์ที่มีการผสมมูลโคเป็นหัวเชื้อ โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างชุดการทดลองที่ใช้ไบโกระถินเทพณรงค์ปรับสภาพและไบโกระถินเทพณรงค์สด ซึ่งจะมีการเริ่มต้นเดินระบบเช่นเดียวกันกับการเดินระบบครั้งที่ 1 โดยนำผลของสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบถึงปฏิกรณ์แบบลิชเบตที่ได้จากการเดินระบบครั้ง 1 มาใช้ในการเดินระบบครั้งนี้

จากการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักกรด พบว่าวันที่ 10 ของการเดินระบบมีความเหมาะสมที่ทำการเจือจางน้ำหมักกรด และการเจือจางน้ำหมักกรดครั้งต่อไปคือ ช่วงที่น้ำหมักกรดมีอัตราการผลิตกรดไขมันระเหยลดลง ในการเจือจางน้ำหมักกรดมี้วิธีการดำเนินการ คือ ระบายน้ำหมักออกมาจากถังรองรับน้ำหมักร้อยละ 50 ของปริมาณน้ำหมักหมักทั้งหมด (ปริมาณ 1 ลิตร) พร้อมด้วยแล้วเติมน้ำประปาเข้าไปแทนที่ให้มีปริมาณเท่ากับส่วนที่ระบายออก จากนั้นนำน้ำหมักที่เจือจางไปเข้าสู่ระบบผลิตกรดต่อไป ส่วนน้ำหมักกรดที่เอาระบายออกมาก็จะนำไปป้อนเข้าสู่ระบบถึงผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักกรดในขั้นตอนต่อไป นอกจากนี้จะมีการรักษาสภาวะในระบบให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดโดยการปรับพีเอชด้วยสารละลายกรดฟอสเฟอริกให้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 5.5 - 6.5 การทดลองนี้จะมีระยะเวลาการเดินระบบ 80 วัน รายละเอียดผลการทดลองแสดงดังต่อไปนี้

### 1) ผลผลิตกรดไขมันระเหย

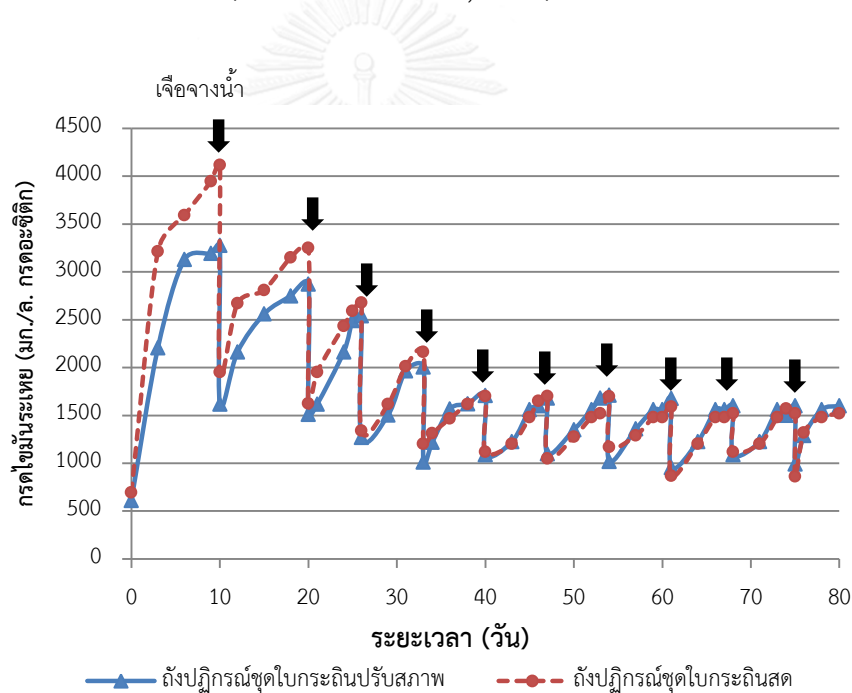
จากการเดินระบบถังปฏิกรณ์แบบลิซเบตของทั้งสองชุดการทดลองพบว่า เมื่อมีการเวียนน้ำในระบบ ปริมาณกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์จะถูกชะออกมาพร้อมกับการหมุนเวียนของระบบน้ำ โดยเมื่อระยะเวลาในการเดินระบบนานขึ้นปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำหมักจะมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยในวันที่ 3 และ 6 ของการเดินระบบจะมีอัตราการผลิตกรดไขมันสูง และจากการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักกรดพบว่า วันที่ 10 ของการเดินระบบมีความเหมาะสมในการเจือจางน้ำหมัก เนื่องจากหลังวันที่ 10 ของการเดินระบบพบว่า มีอัตราการผลิตกรดไขมันระเหยมีแนวโน้มลดลง และเมื่อนำผลการทดลองของการเดินระบบครั้งที่ 1 มาเปรียบเทียบกับผลการทดลองครั้งนี้พบว่า เป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือ จากการเดินระบบวันที่ 10 ของการทดลองมีอัตราการผลิตกรดไขมันระเหยลดลง จึงทำการเจือจางน้ำหมักในวันที่ 10 ของการเดินระบบโดยการระบายน้ำหมักออกมาจากถังรองรับน้ำหมักร้อยละ 50 ของปริมาณน้ำหมักกรดทั้งหมด (ปริมาณ 1 ลิตร) แล้วเติมน้ำประปาเข้าไปแทนที่ให้มีปริมาณเท่ากับส่วนที่ระบายออก จากการวิเคราะห์ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยของน้ำหมักกรดจากแต่ละถังปฏิกรณ์ พบว่าปริมาณกรดที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ชุดไบกระถินสดจะมีปริมาณสูงกว่าถังปฏิกรณ์ชุดไบกระถินปรับสภาพร้อยละ 23.9 โดยมีค่าเท่ากับ 3,948 มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก และ 3,192 มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก ตามลำดับ ซึ่งผลเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการเดินระบบครั้งที่ 1

เมื่อมีการเดินระบบหลังจากการเจือจางน้ำหมักกรดครั้งที่ 1 พบว่าปริมาณกรดไขมันในถังรองรับน้ำหมักกรดของแต่ละถังปฏิกรณ์จะมีค่าลดลงปริมาณร้อยละ 50 ของปริมาณกรดไขมันระเหยก่อนการเจือจาง เมื่อเริ่มหมุนเวียนน้ำหมักกรดในถังปฏิกรณ์ทั้งสองจะพบว่า ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำหมักจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเดินระบบไปจนถึงวันที่ 20 พบว่าอัตราการผลิตกรดไขมันระเหยมีแนวโน้มที่ลดลง จึงทำการเจือจางน้ำหมักกรดเป็นครั้งที่ 2 ซึ่งค่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยในถังปฏิกรณ์ชุดไบกระถินสดยังคงมีความเข้มข้นมากกว่าในถังปฏิกรณ์ชุดไบกระถินปรับสภาพซึ่งมีค่าเท่ากับ 3,250 มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก และ 2,872 มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก ตามลำดับ เมื่อนำคุณภาพน้ำหมักกรดของวันที่ 10 และ วันที่ 20 ของการเดินระบบมาเปรียบเทียบกัน พบว่า ปริมาณกรดไขมันในวันที่ 20 ของทั้งสองถังปฏิกรณ์มีค่าน้อยกว่า วันที่ 10 ซึ่งผลเป็นไปในทางเดียวกับงานวิจัย Babel และคณะ, 2004 , และงานวิจัยของ Cadavid-Rodriguez และคณะ, 2014 ที่รายงานว่าปริมาณกรดไขมันจะลดลงตามเวลาในการเดินระบบ

ดังนั้นในการเดินระบบต่อมานำค่าอัตราการผลิตกรดไขมันเป็นดัชนีบ่งชี้การเจือจางน้ำหมักกรดที่ได้จากถังปฏิกรณ์ จากนั้นจะทำการเดินระบบโดยหมุนเวียนน้ำหมักกรดในลักษณะเหมือนเดิมไปเรื่อยๆ และมีการเจือจางน้ำหมักร้อยละ 50 เมื่ออัตราการผลิตกรดไขมันระเหยในน้ำ

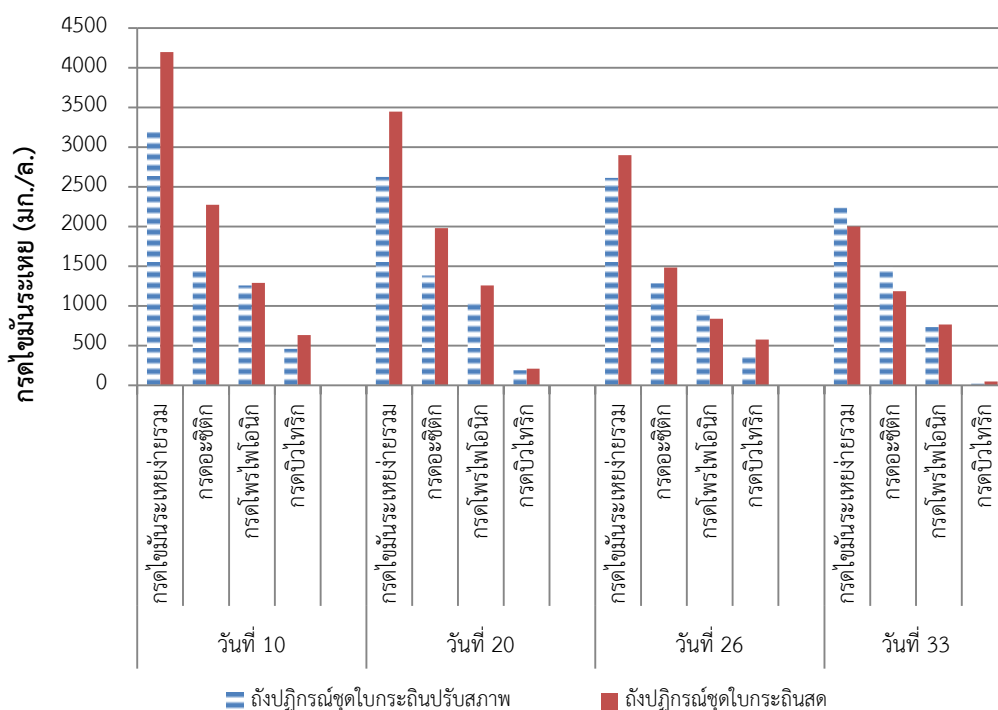


หมักมีแนวโน้มลดลง ซึ่งจากผลการทดลองได้ทำการเจือจางน้ำหมักกรด ในวันที่ 10 20 26 33 40 47 54 61 68 และ 75 ของการเดินระบบ โดยทำการเดินระบบจนถึงวันที่ 80 ของการทดลอง แสดงดังรูปที่ 4-17 และมีการควบคุมพีเอชในระบบให้อยู่ในช่วง 5.5 - 6.6 ผลการทดลองพบว่า การเจือจางน้ำหมักกรดร้อยละ 50 เมื่ออัตราการผลิตกรดไขมันระเหยลดลง และการควบคุมพีเอชในระบบถึงหมักกรดให้อยู่ในช่วง 5.5 - 6.6 จะทำให้ระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตสามารถดำเนินต่อไปได้ แต่เมื่อเวลาผ่านไปพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำหมักกรดมีแนวโน้มลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำหมักกรดในช่วงแรกของการเดินระบบ ทั้งนี้เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายในระบบเริ่มจะหมดลง และปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในระบบมีปริมาณน้อยลง เนื่องจากกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นในระบบไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงส่งผลให้อัตราการผลิตกรดไขมันระเหยในช่วงหลังมีค่าลดลง (Sandoval และคณะ, 2009)



รูปที่ 4 - 17 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในน้ำหมักกรดจากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต

จากผลการวิเคราะห์ชนิดกรดไขมันระเหยง่ายในน้ำหมักกรดของวันที่ทำการเจือจางน้ำหมัก โดยได้ทำการวิเคราะห์ในวันที่ 10 20 26 และ 33 ของการเดินระบบ ผลการวิเคราะห์พบว่าถึงปฏิกรณ์ทั้งสองมีสัดส่วนของกรดอะซิติกในปริมาณสูงสุด รองลงมาคือกรดโพรไพโอนิก และกรดบิวไทรริก ตามลำดับ โดยพบว่ากรดอะซิติกมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 46.17-66.33 กรดโพรไพโอนิกอยู่ในช่วงร้อยละ 28.93-39.93 และกรดบิวไทรริกอยู่ในช่วงร้อยละ 19.86-0.86 แสดงดังรูปที่ 4-18 โดยที่ปริมาณกรดไขมันในถังปฏิกรณ์ชุดใบกระถินสดจะมีค่ามากกว่าถังปฏิกรณ์ชุดใบกระถินปรับสภาพ และมีสัดส่วนกรดอะซิติกที่สูงกว่าด้วย ซึ่งปริมาณกรดอะซิติกที่สูงนั้นจะส่งผลต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทนสามารถย่อยสลายได้ทันที

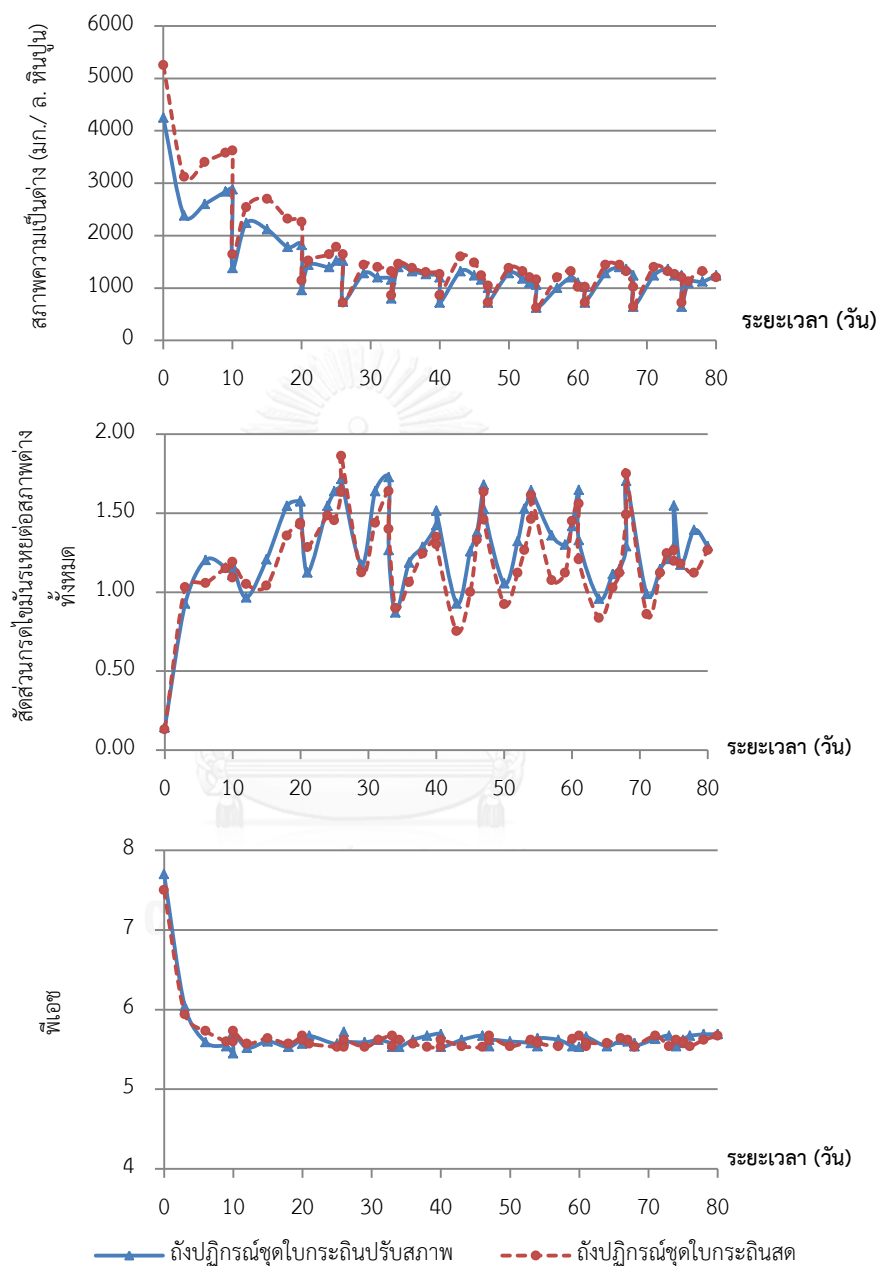


รูปที่ 4 - 18 ชนิดของกรดไขมันระเหยง่ายในถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด

## 2) สภาวะในถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด

เมื่อพิจารณาค่าพีเอชในน้ำหมักกรดของถังปฏิกรณ์ทั้งสอง พบว่ามีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ จะมีค่าลดลงจนถึงวันที่ 10 ซึ่งมีค่าพีเอชต่ำสุด และหลังจากวันที่ 10 จะมีปรับพีเอชในน้ำหมักกรดให้อยู่ในช่วง 5.5 - 6.0 เพื่อควบคุมพีเอชในระบบให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดไขมันระเหย และเมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดพบว่า มี

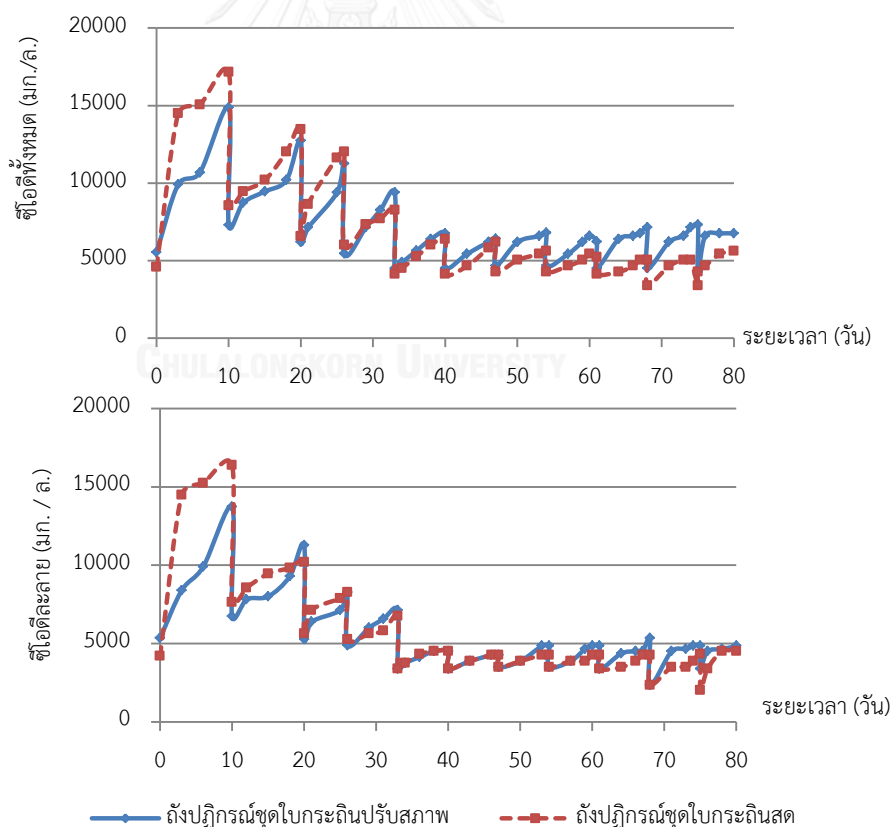
ค่าอยู่ระหว่าง 0.8 – 1.8 ซึ่งค่าดังกล่าวมีแนวโน้มเป็นไปในทางเดียวกันกับผลผลิตกรดไขมันระเหย นั่นคือ เมื่อปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำหมักกรดมีค่าสูง ค่าสัดส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่าง ทั้งหมดก็จะมีค่าสูงตามไปด้วย ดังรูปที่ 4-19



รูปที่ 4 - 19 แสดงสถานะในถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด

### 3) ปริมาณซีโอดีและซีโอดีกรองในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิซเบด

ปริมาณซีโอดีและซีโอดีกรองของน้ำหมักกรดในถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกับการเกิดกรดไขมันระเหย แสดงดังรูปที่ 4-20 ซึ่งจากการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีทั้งหมดในน้ำหมักกรดของถังปฏิกรณ์ทั้งสองในวันที่ 10 ของการเดินระบบพบว่า ปริมาณซีโอดีในถังปฏิกรณ์ชุดใบกระถินสดจะมีปริมาณสูงกว่าในถังปฏิกรณ์ชุดใบกระถินปรับสภาพ โดยมีค่าเท่ากับ 17,143 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 14,875 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่ามีความมากกว่าถึงร้อยละ 15.24 และเมื่อมีการเจือจางน้ำหมักกรดในวันที่ 10 ของการเดินระบบ พบว่าหลังจากการเจือจางปริมาณซีโอดีในน้ำหมักกรดจะมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 50 และจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการหมุนเวียนน้ำหมักในระบบ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ปริมาณซีโอดีในน้ำหมักกรดของถังปฏิกรณ์ทั้งสองในวันที่ 20 ของการเดินระบบพบว่า ปริมาณซีโอดีในน้ำหมักกรดทั้งสองเริ่มมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เนื่องจากจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ชุดใบกระถินปรับสภาพสามารถปรับตัวในระบบได้ดีขึ้น และเมื่อมีการเดินระบบในลักษณะเต็มไปเรื่อยๆ จนถึงวันที่ 80 ของการทดลอง จะเห็นว่าปริมาณซีโอดีในน้ำหมักกรดของถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งผลเป็นไปในทางเดียวกับการผลิตกรดไขมันระเหย



รูปที่ 4 - 20 ปริมาณซีโอดีทั้งหมดและซีโอดีละลายในถังปฏิกรณ์แบบลิซเบด

เมื่อนำค่าซีไอดีทั้งหมดและค่าซีไอดีกรองของแต่ละชุดการทดลองมาเปรียบเทียบกันพบว่า มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงให้เห็นว่าในน้ำหมักมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ละลายสูง และมีสารแขวนลอยต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากถังปฏิกรณ์มีชั้นกรอง ทำให้น้ำหมักกรดที่ไหลลงสู่ถังรองรับน้ำชะไม่มีเศษของไบโกระถินเทพนครบปนเปื้อน

จากการเดินระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตระยะเวลา 80 วัน โดยในแต่ละชุดการทดลองได้ทำการเจือจางน้ำหมักกรดทั้งหมด 10 ครั้ง โดยที่แต่ละครั้งจะมีน้ำหมักกรดปริมาณ 1 ลิตร และน้ำหมักกรดที่เก็บในแต่ละครั้งจะมีปริมาณกรดไขมันระเหย และปริมาณซีไอดีที่แตกต่างกัน แต่คุณภาพของน้ำหมักที่ได้จากถังปฏิกรณ์ทั้งสองจะมีการเปลี่ยนแปลงไปในแนวทางเดียวกัน คือ น้ำหมักที่เก็บในวันที่ 10 20 และ 26 ของการเดินระบบจะมีคุณภาพสูง โดยมีค่ากรดไขมันระเหยและปริมาณซีไอดีสูง เนื่องจากเป็นช่วงเริ่มต้นเดินระบบจึงมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายสูง ทำให้ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงตามไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของทั้งสองถังปฏิกรณ์พบว่า ถังปฏิกรณ์ไบโกระถินสดมีประสิทธิภาพสูงกว่า สังเกตได้จากคุณภาพของน้ำหมักกรดที่เก็บในแต่ละวัน แสดงดังตารางที่ 4-9 และเมื่อเดินระบบมาเรื่อยๆ จะพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยและซีไอดีของน้ำหมักมีแนวโน้มที่ลดลงตามปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายในระบบ

ตารางที่ 4 - 9 ปริมาณกรดไขมันระเหย ปริมาณซีไอดี และปริมาณซีไอดีกรองของน้ำหมักกรดที่เก็บในวันที่มีการเจือจางน้ำหมักกรด

วันที่เก็บน้ำหมัก	ปริมาณน้ำหมัก (ลิตร)	ถังปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินปรับสภาพ			ถังปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินสด		
		กรดไขมันระเหย	ซีไอดีทั้งหมด	ซีไอดีละลาย	กรดไขมันระเหย	ซีไอดีทั้งหมด	ซีไอดีละลาย
วันที่ 10	1 ลิตร	3,192	14,857	13,714	3,948	17,143	16,381
วันที่ 20	1 ลิตร	2,872	12,727	11,273	3,250	13,455	10,182
วันที่ 26	1 ลิตร	2,541	11,250	8,250	2,678	12,000	8,250
วันที่ 33	1 ลิตร	2,005	9,375	7,125	2,163	8,250	6,750
วันที่ 40	1 ลิตร	1,709	6,750	4,500	1,700	6,375	4,500
วันที่ 47	1 ลิตร	1,680	6,387	4,258	1,700	6,194	4,258
วันที่ 54	1 ลิตร	1,712	6,774	4,839	1,697	5,613	4,500
วันที่ 61	1 ลิตร	1,679	6,194	4,839	1,590	5,216	4,258
วันที่ 68	1 ลิตร	1,600	7,125	5,333	1,520	5,032	4,258
วันที่ 75	1 ลิตร	1,600	7,300	4,839	1,520	5,375	4,313

#### 4.6.5 ผลการศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำหมักที่ผลิตได้จากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต

ในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จะเริ่มต้นการเดินระบบด้วยการป้อนน้ำหมักกรดไบกระถิน เทพณรงค์ที่ได้จากถังลิชเบตเข้าถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ โดยกำหนดให้ความเข้มข้นซีโอดีของน้ำหมัก เริ่มต้นเท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาพักทางชีวศาสตร์เท่ากับ 12 วัน จากนั้นเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่

น้ำหมักกรดที่จะนำมาป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงเริ่มต้นระบบ(Start up) จะต้องเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ควรเป็นกรดไขมันระเหยซึ่งจะทำให้จุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทนสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการก๊าซชีวภาพได้ทันที ทำให้ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีอัตราในการผลิตก๊าซมีเทนสูง จึงมีการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการหมักไบกระถินเทพณรงค์เพื่อให้เกิดกรดไขมันระเหยสูงสุด โดยจะทำการหมักไบกระถินเทพณรงค์ผสมมูลโค ซึ่งเป็นหัวเชื้อในอัตราส่วน 70:30 ลงในถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ที่มีปริมาตรการทำงาน 5 ลิตรมีระยะเวลาเดินระบบทั้งหมด 30 วัน เพื่อหาระยะเวลาในการหมักที่ทำให้เกิดกรดไขมันระเหยสูงสุด และเพื่อให้ น้ำหมักกรดที่เข้าสู่ระบบในช่วงเริ่มต้นเดินระบบมีคุณภาพที่ใกล้เคียงกันเพื่อให้จุลินทรีย์สามารถปรับตัวในระบบและสามารถทำให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพเข้าสู่สภาวะคงที่ได้เร็วขึ้น

ผลการศึกษาระยะเวลาในการหมักที่เหมาะสมต่อการผลิตกรดไขมันระเหยของไบกระถินเทพณรงค์ โดยจะทำการหมักร่วมไบกระถินเทพณรงค์ผสมมูลโคเป็นหัวเชื้อในอัตราส่วน 70:30 ลงในถังปฏิกรณ์มีปริมาตรการทำงาน 5 ลิตร การทดลองนี้จะศึกษาโดยทดลองแบบแบตช์ มีระยะเวลาเดินระบบทั้งหมด 30 วัน รายละเอียดผลการทดลองมีดังต่อไปนี้

##### 1) ผลผลิตกรดไขมันระเหย

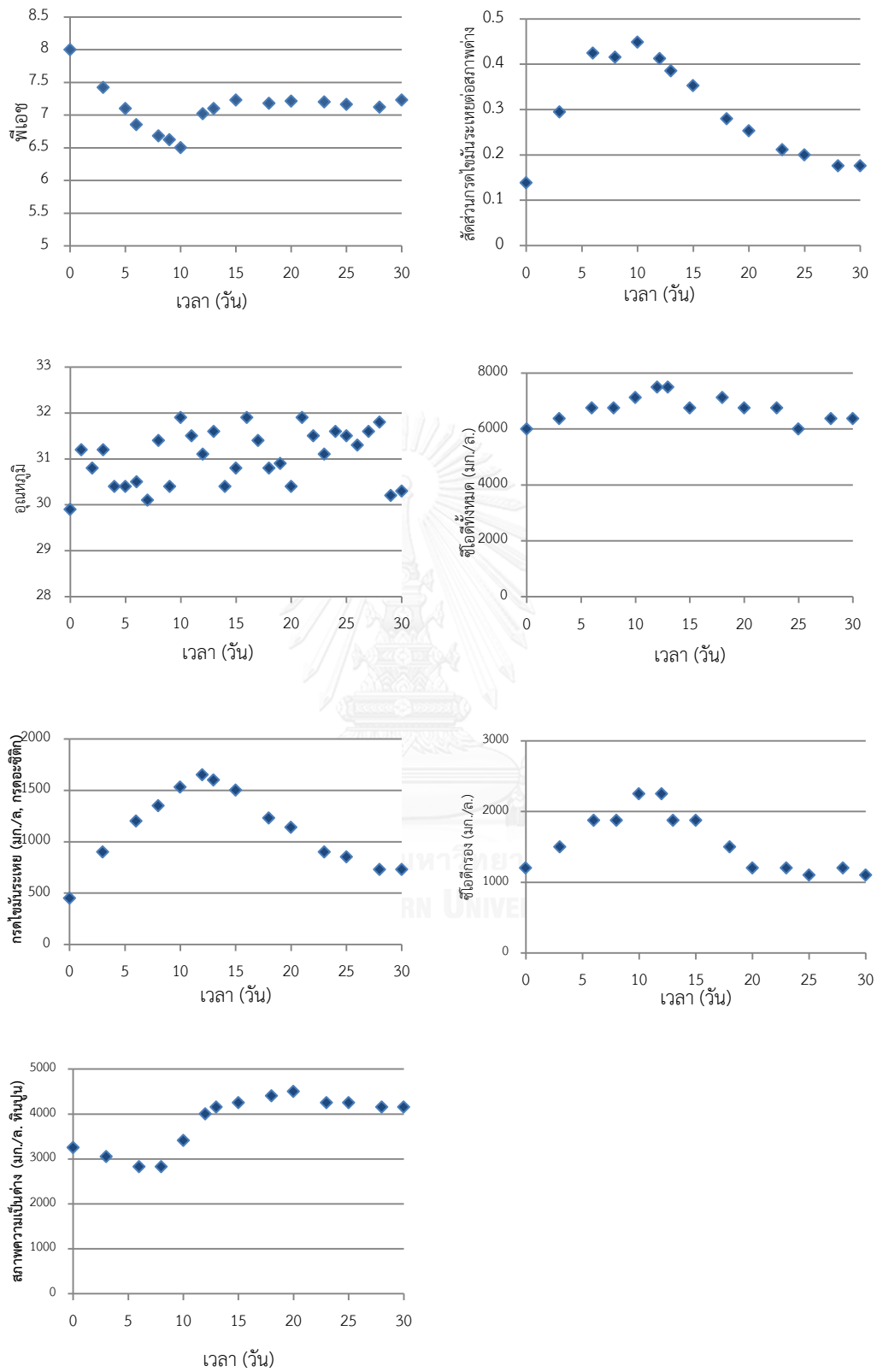
จากผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยพบว่าในวันที่ 12 ของการทดลอง สามารถผลิตกรดไขมันระเหยง่ายได้สูงสุดเท่ากับ 1,650 มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก ดังรูปที่ 4-21 เมื่อพิจารณาปริมาณกรดไขมันระเหยหลังจากวันที่ 12 พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยเริ่มลดลงซึ่งสอดคล้องกับปริมาณซีโอดีกรองที่ค่าลดลงเช่นกัน และเมื่อพิจารณาค่าสัดส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดพบว่าหลังจากวันที่ 12 มีค่าสัดส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดน้อยกว่า 0.4 จากงานวิจัยของ Borja และคณะ, 2004 พบว่าเมื่อค่าสัดส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดมีค่าน้อยกว่า 0.4 จะทำให้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทนทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาในการหมักที่เหมาะสมต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายของไบกระถินเทพณรงค์ที่มีมูลโคเป็นหัวเชื้อ คือ ระยะเวลา 12 วัน

## 2) สถานะในถังหมักกรดที่มีการเดินระบบแบบแบตช์

ในการเดินระบบแบบแบตช์จะมีการเติมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ก่อนเริ่มเดินระบบ เพื่อทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์รักษาสมดุลพีเอชไม่ให้มีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเกิดกรดไขมันระเหยง่ายในระบบ โดยค่าพีเอชช่วงเริ่มเดินระบบอยู่ระหว่าง 7.5 – 8.0 และหลังจากนั้นค่าพีเอชในระบบจะมีค่าต่ำลง โดยจะมีค่าลดลงต่ำสุด ประมาณวันที่ 10 ของการเดินระบบ ซึ่งในช่วงนี้จะทำการปรับพีเอชด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต เพื่อทำการควบคุมค่าพีเอชในระบบให้อยู่ในช่วง 6.5 – 7.5 เนื่องจากการทำงานของ Babel และคณะ, 2004 พบว่าค่าพีเอชในถังผลิตกรดควรมีค่าอยู่ในช่วง 6.5-7.5 ซึ่งเป็นสภาวะเหมาะสมในการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria)

เมื่อพิจารณาสภาพต่างทั้งหมดภายในระบบพบว่าหลังจากวันที่ 10 ของการทดลองสภาพความเป็นด่างในระบบมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเติมการเติมบัฟเฟอร์เข้าไปในระบบเพื่อรักษาสมดุลพีเอชให้มีค่าไม่ต่ำกว่า 6.5





รูปที่ 4 - 21 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่แสดงบ่งชี้เสถียรภาพของถังหมักกรดที่เดินระบบแบบแบตช์



#### 4.6.5.1 การเดินระบบถังผลิตก๊าซชีวภาพ

ในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จะเริ่มต้นการเดินระบบด้วยการป้อนน้ำหมักไบโกระถินเทพณรงค์ที่ได้จากถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ โดยในงานวิจัยนี้จะมีระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 2 ถัง สำหรับศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักกรดในถังปฏิกรณ์ลิชเบตชุดไบโกระถินปรับสภาพ และถังปฏิกรณ์ลิชเบตชุดไบโกระถินสด โดยกำหนดให้ความเข้มข้นซีโอดีของน้ำหมักเริ่มต้นเท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 12 วัน โดยน้ำหมักที่จะนำมาเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงเริ่มต้นระบบ ได้มาจากการหมักไบโกระถินเทพณรงค์ผสมมูลโคเป็นหัวเชื้อในอัตราส่วน 70:30 ลงในถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ มีปริมาตรการทำงาน 5 ลิตร ระยะเวลาในการหมัก 12 วัน ซึ่งจะได้น้ำหมักที่มีค่าซีโอดี  $7095 \pm 288.53$  มิลลิกรัมต่อลิตร และมีปริมาณกรดไขมันระเหย  $1570 \pm 67.82$  มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก ดังตารางที่ 4-10 โดยจะนำน้ำหมักที่ผลิตได้มาเจือจางให้มีความเข้มข้นซีโอดีของน้ำหมักเริ่มต้นเท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ดังตารางที่ 4-11 จากนั้นจะทำการเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงที่ เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลก็จะทำการศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักที่ได้จากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต

ตารางที่ 4 - 10 ลักษณะสมบัติของน้ำหมักกรดที่ได้จากการหมักไบโกระถินเทพณรงค์ผสมมูลโค ระยะเวลาในการหมัก 12 วัน

พารามิเตอร์	สมบัติของน้ำหมัก
พีเอช	$7.02 \pm 0.06$
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$7095 \pm 288.53$
ซีโอดีกรอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$1875 \pm 306.18$
กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$1570 \pm 67.82$
สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$3727 \pm 600.22$

ตารางที่ 4 - 11 ลักษณะสมบัติของน้ำหมักที่ป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ

พารามิเตอร์	สมบัติของน้ำหมัก
พีเอช	$7.21 \pm 0.11$
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$5265 \pm 148.54$
ซีโอดีกรอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$1572 \pm 86.67$
กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$993.75 \pm 73.39$
สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$1487.63 \pm 255.49$

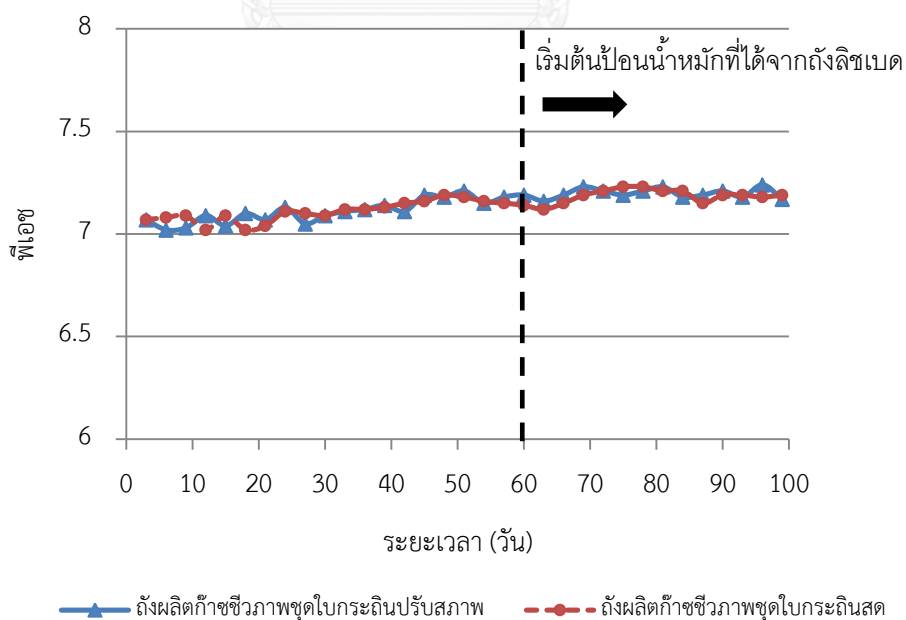
#### 4.6.5.2 สภาวะการเดินระบบในถังผลิตก๊าซชีวภาพ

การเดินระบบถังผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องจะต้องมีการควบคุมค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการดำรงชีพของจุลินทรีย์ เพื่อให้การเดินระบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

จากการเริ่มต้นการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพของทั้งสองถังพบว่า ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะเข้าสู่สภาวะสมดุลในช่วงวันที่ 45 ของการทดลอง และจะเดินระบบมาเรื่อยๆ จนถึงวันที่ 60 ของการเดินระบบ จึงทำการป้อนน้ำหมักที่ได้ถึงปฏิกรณ์แบบลิชเบต เพื่อศึกษาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพของน้ำหมักที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งจะมีการเจือจางให้ความเข้มข้นซีโอดีของน้ำหมักเริ่มต้นเท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลของสภาวะในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ มีดังนี้

##### 1) พีเอช

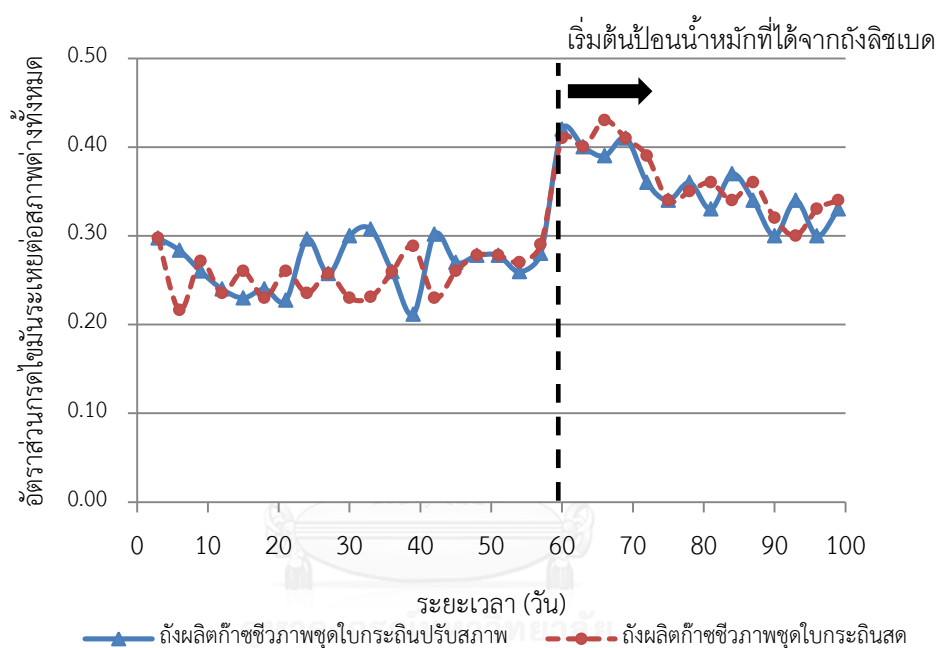
ในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องจะทำการควบคุมพีเอชในสารอินทรีย์ขาเข้าให้มามีค่าประมาณ 7.0 - 7.2 ซึ่งเป็นช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทน จึงส่งผลให้พีเอชในระบบมีค่าในช่วง 7.0-7.2 ตลอดระยะเวลาการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงดังรูปที่ 4-22



รูปที่ 4 - 22 ค่าพีเอชในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

## 2) อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมด

ในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนควรมีอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดไม่เกิน 0.4 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีบัฟเฟอร์เพียงพอ และสามารถเดินระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่หากอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดในระบบมีค่าสูงเกินกว่า 0.8 จะแสดงถึงความไม่เสถียรภาพของระบบและอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542) โดยระหว่างการทดลองจะมีการเติมสารโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อรักษาพีเอช และควบคุมอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดให้มีค่าที่เหมาะสม

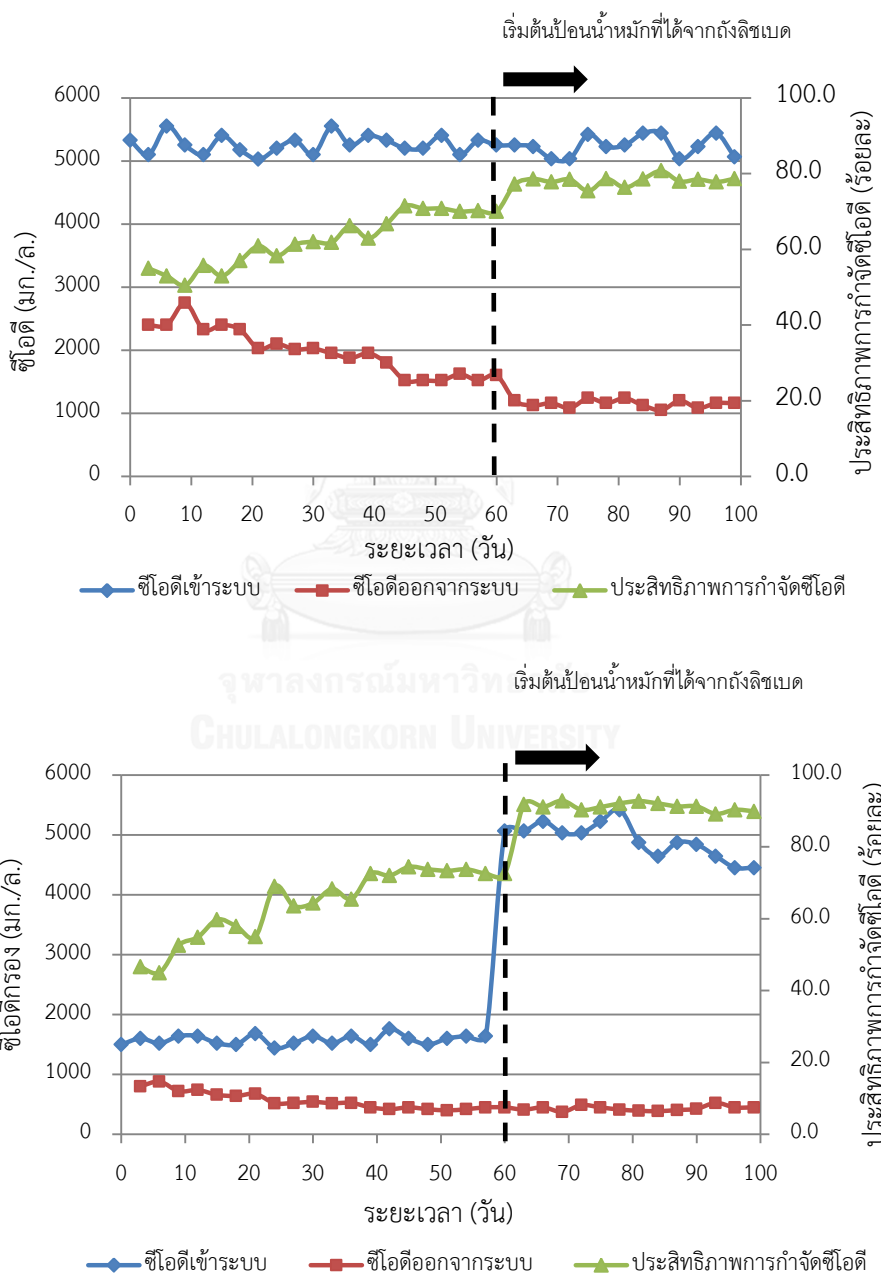


รูปที่ 4 - 23 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

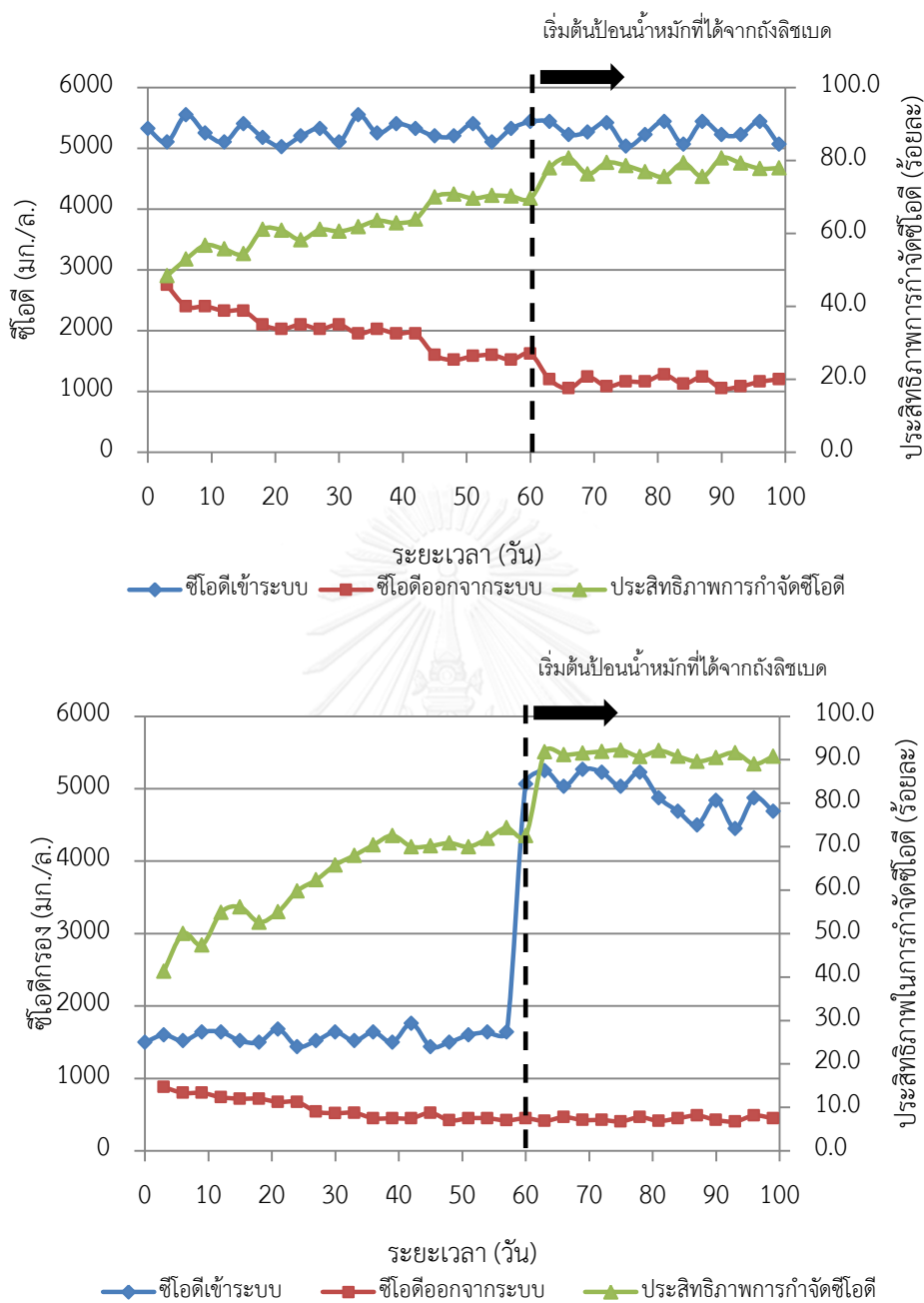
จากการเดินระบบพบว่าในช่วงเริ่มต้นเดินระบบจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ อัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดของถังผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสองอยู่ในช่วง 0.2-0.3 และเมื่อทำการป้อนน้ำหมักที่ได้จากถังลิชเบตเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่าค่าอัตราส่วนกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างทั้งหมดมีค่าสูงขึ้น อยู่ในช่วง 0.3 - 0.4 ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหมักกรดที่ได้จากถังลิชเบตมีค่ากรดไขมันระเหยสูง แสดงดังรูปที่ 4-23

3) ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติ

ในช่วงเริ่มต้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพพบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติของถังทั้งสองมีค่าต่ำเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ในระบบยังไม่คุ้นชินกับสารอาหารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ แต่เมื่อเดินระบบไประยะหนึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติสูงขึ้นเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติทั้งหมดของทั้งสองถังผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าประมาณร้อยละ 70 ส่วนประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอติกรองของทั้งสองถังผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าประมาณร้อยละ 73 แสดงดังรูปที่ 4-24, 4-25



รูปที่ 4 - 24 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอติของถังผลิตก๊าซชีวภาพชุดไบโอะรีนปรับสภาพ



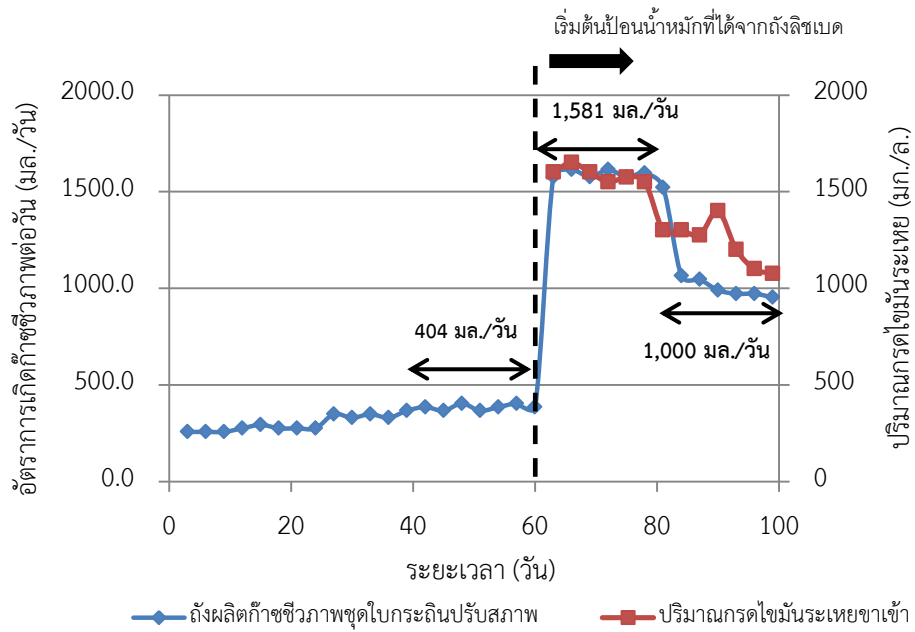
รูปที่ 4 - 25 ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของถังผลิตก๊าซชีวภาพชุดไบโกระถินสด

ในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักที่ได้จากถังลิซเบดในชุดไบโกระถินปรับสภาพ พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีทั้งหมดและซีไอดีกรองเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 78.0 และ 91.2 ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีทั้งหมดและซีไอดีกรองของระบบผลิตก๊าซชีวภาพในชุดไบโกระถินสดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 78.1 และ 91.1 ตามลำดับ

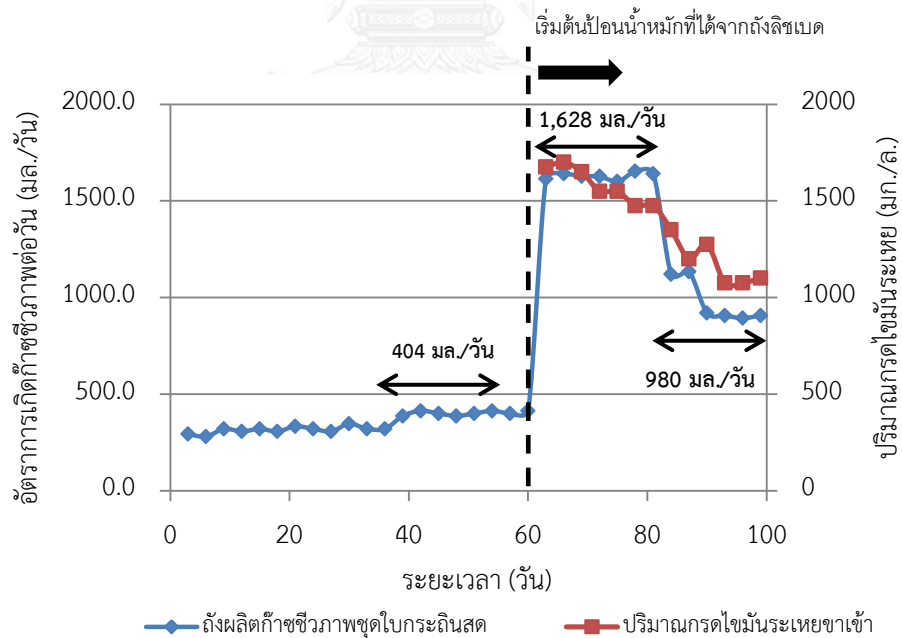
#### 4) ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักไບกระถินเทพนรงค์

ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยป้อนน้ำหมักไบกระถินเทพนรงค์ที่ได้จากถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ที่มีความเข้มข้นซีโอดีเริ่ม 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าในช่วงแรกของการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพของทั้งสองถังปฏิกรณ์ จะมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำ เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ในระบบยังไม่คุ้นชินกับสารอาหารที่ป้อนเข้าสู่ในระบบ ทำให้มีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่ำ แต่เมื่อมีการเดินระบบต่อเนื่อง พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะค่อยๆสูงขึ้น จะมีค่าคงที่อยู่ในช่วงหนึ่ง ซึ่งผลอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเป็นไปทางเดียวกับประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี โดยเมื่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสองเข้าสู่สภาวะสมดุล จะมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันเฉลี่ยเท่ากับ  $403.8 \pm 9.33$  มิลลิลิตรต่อวัน

เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล จึงนำน้ำหมักไบกระถินเทพนรงค์ที่ได้จากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตมาเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะมีน้ำหมัก 2 ชนิด คือ น้ำหมักจากชุดไบกระถินปรับสภาพและน้ำหมักจากชุดไบกระถินเทพนรงค์สด เนื่องจากน้ำหมักที่มาจากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตในแต่ละวันมีคุณภาพที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 4-9 โดยในช่วงแรกน้ำหมักกรดจะมีปริมาณกรดไขมันระเหยและปริมาณซีโอดีสูงกว่าน้ำหมักกรดในช่วงหลัง และนอกจากนี้จากการวิเคราะห์ชนิดของกรดไขมันระเหยพบว่า น้ำหมักกรดในช่วงแรกจะมีชนิดของกรดอะซิติกในปริมาณที่สูงกว่าน้ำหมักกรดในช่วงหลัง ดังนั้นเมื่อนำน้ำหมักกรดที่ได้จากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตมาป้อนเข้าสู่ถังผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งก่อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะทำการเจือจางน้ำหมักกรดที่เก็บในแต่ละวันให้มีความเข้มข้น 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงส่งผลต่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวันของถังผลิตก๊าซชีวภาพจากไบกระถินปรับสภาพและไบกระถินสด แสดงดังรูปที่ 4-26, 4-27 ตามลำดับ



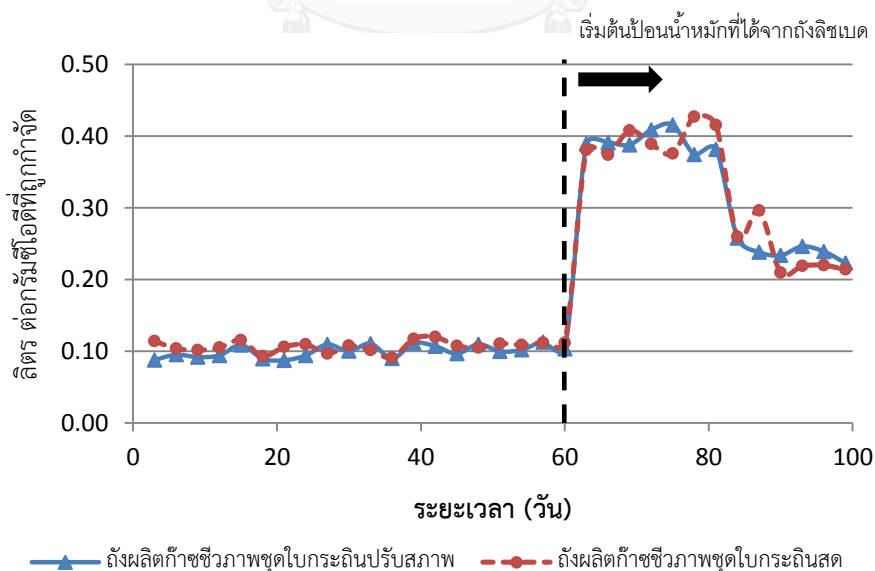
รูปที่ 4 - 26 แสดงอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวันและปริมาณกรดไขมันระเหยขาเข้าของถึงผลิตก๊าซชีวภาพไบกระถินปรับสภาพ



รูปที่ 4 - 27 แสดงอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวันและปริมาณกรดไขมันระเหยขาเข้าของถึงผลิตก๊าซชีวภาพไบกระถินสด

จากผลอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวันของถังผลิตก๊าซชีวภาพชุดไบโกระถินปรับสภาพและชุดไบโกระถินสด พบว่ามีค่าเป็นไปในทางเดียวกัน คือ เมื่อนำน้ำหมักกรดที่ได้จากถังลิขเบตมาเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ในวันแรกของการเดินระบบพบว่าในถังผลิตก๊าซชีวภาพทั้งสองจะมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวันสูง และค่อยๆมีค่าลดลง ซึ่งค่าดังกล่าวจะสอดคล้องกับปริมาณกรดไขมันระเหยที่เข้าสู่ระบบแสดงดังรูปที่ 4-26 และ 4-27 โดยอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน ในช่วง 20 วันแรกของถังผลิตก๊าซชีวภาพชุดไบโกระถินปรับสภาพและชุดไบโกระถินสด ( วันที่ 60 – 80 ของการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ) มีค่าเท่ากับ  $1,581 \pm 31$  และ  $1,628 \pm 17$  มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการป้อนน้ำหมักกรดที่เก็บในวันที่ 10 20 26 33 40 และ 47 ส่วนอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน หลังจากวันที่ 20 จนถึงสิ้นสุดการทดลอง ( วันที่ 81 – 100 ของการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ) มีค่าเท่ากับ  $1,000 \pm 44$  และ  $980 \pm 114$  มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากการป้อนน้ำหมักกรดที่เก็บในวันที่ 54 61 68 75 และ 80

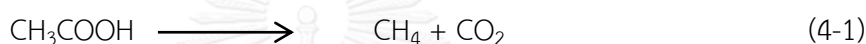
จากผลปริมาณก๊าซชีวภาพ ในหน่วย ลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ของแต่ละวันพบว่า มีค่าเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับผลอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน โดยผลปริมาณก๊าซชีวภาพ ในหน่วย ลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัดต่อวัน ในช่วง 20 วันแรกของถังผลิตก๊าซชีวภาพชุดไบโกระถินปรับสภาพและไบโกระถินสด มีค่าเท่ากับ  $0.393 \pm 0.015$  และ  $0.396 \pm 0.021$  ลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ส่วนอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน หลังจากวันที่ 20 จนถึงสิ้นสุดการทดลอง มีค่าเท่ากับ  $0.240 \pm 0.012$  และ  $0.237 \pm 0.034$  ลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ดังรูปที่ 4-28



รูปที่ 4 - 28 ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร ต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด) ของถังผลิตก๊าซชีวภาพชุดไบโกระถินปรับสภาพและชุดไบโกระถินสด



จากผลการผลิตก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกรณ์ทั้งสองจะเห็นว่าน้ำหมักกรดที่ได้จากการเวียนน้ำ ในวันที่ 10 20 26 33 40 และ 47 มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าน้ำหมักกรดที่ได้จากการเวียนน้ำในวันที่ 54 61 68 75 และ 80 ถึงแม้ว่าน้ำหมักกรดก่อนที่จะนำมาเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะถูกเจือจางให้มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรเท่ากัน แต่จากการวิเคราะห์ชนิดของกรดไขมันระเหยง่ายในน้ำหมักกรดทั้งสองชุดการทดลองพบว่า น้ำหมักกรดที่เก็บในวันที่ 10 จะมีชนิดของกรดอะซิติกสูงสุด และปริมาณกรดอะซิติกในน้ำหมักกรดจะลดลงเรื่อยๆ เมื่อมีการเดินระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบดที่ระยะเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้จากน้ำหมักกรดในช่วงหลังมีปริมาณลดลง ทั้งนี้เนื่องจากกรดอะซิติกเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยจุลินทรีย์ในกลุ่ม Acetotrophic methanogens จะสามารถย่อยสลายกรดอะซิติกไปเป็นก๊าซมีเทนได้ทันที ดังสมการที่ (4-1)



ส่วนกรดอินทรีย์ชนิดอื่น เช่น กรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทรริก เป็นต้น จะต้องมีจุลินทรีย์ในกลุ่ม Acetogenic microorganism มาย่อยสลายเพื่อให้เปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ก่อนที่กรดอะซิติกจะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งกระบวนการเปลี่ยนกรดกรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทรริก เป็นกรดอะซิติกนั้นจะเกิด ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ (4-2) และ (4-3)

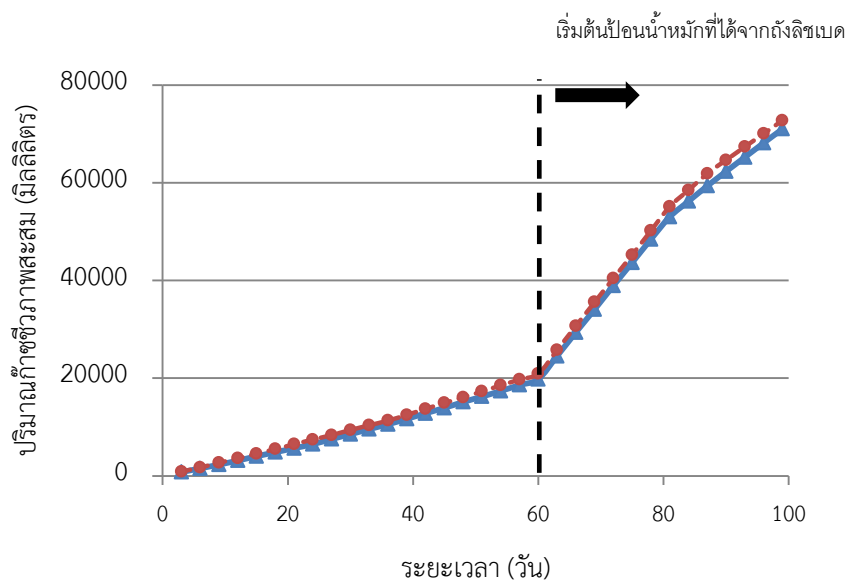


นอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์ในกลุ่ม Hydrogenotrophic methanogens ซึ่งสามารถใช้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารอาหารตั้งต้น เกิดเป็นก๊าซมีเทน ดังสมการที่ (4-4)



ดังนั้นปริมาณกรดอะซิติกจึงมีความสำคัญในการผลิตก๊าซชีวภาพ หากน้ำหมักกรดมีส่วนของกรดอะซิติกสูงก็จะทำให้เกิดผลผลิตก๊าซมีเทนในอัตราที่สูงด้วยเช่นกัน

จากผลปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ตั้งแต่วันที่เริ่มเอาน้ำหมักกรดจากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตชุด ไบโกระถินปรับสภาพ และชุดไบโกระถินสดมีค่าเท่ากับ 51,200 และ 51,840 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 4-29 ดังนั้นตั้งแต่เริ่มต้นเดินระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตคิดเป็นปริมาตรก๊าซชีวภาพทั้งหมดเท่ากับ 100.39 และ 152.47 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย



รูปที่ 4 - 29 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร)

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในช่วง 20 วันแรกของถังผลิตก๊าซชีวภาพชุด ไบโกระถินปรับสภาพและชุดไบโกระถินสด มีองค์ประกอบแสดงดังตารางที่ 4-12 ตารางที่ 4 - 12 แสดงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในถังผลิตก๊าซชีวภาพชุดไบโกระถินปรับสภาพและชุดไบโกระถินสด

ถังผลิตก๊าซชีวภาพ	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ		
	ก๊าซมีเทน	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ก๊าซอื่นๆ
ชุดไบโกระถินปรับสภาพ	76.7±5.09	22.0±4.38	1.3±0.71
ชุดไบโกระถินสด	73.6±0.99	24.6±0.85	1.8±0.14

เมื่อนำผลผลิตก๊าซชีวภาพมาคิดเฉพาะส่วนของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบ พบว่าชุดการทดลองที่ใช้ไบโกระถินสดและไบโกระถินปรับสภาพมีปริมาณก๊าซมีเทนเท่ากับ 112.22 และ 77.00 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ดังตารางที่ 4-13 และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ จะเห็นว่า ชุดการทดลองทั้งสองจะมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในสัดส่วนที่สูงกว่าร้อยละ 70 ซึ่งถือว่าสัดส่วนที่สูงมากเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา ทั้งนี้เนื่องจากในถังผลิตก๊าซชีวภาพอาจมีจุลินทรีย์ในกลุ่ม Hydrogenotrophic methanogens ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถใช้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารอาหารตั้งต้นเกิดเป็นก๊าซมีเทน ทำให้เป็นการเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2553)

ตารางที่ 4 - 13 ตารางแสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย) ที่เกิดขึ้นจากน้ำหมักไบโกระถินปรับสภาพและไบโกระถินสด

ถังปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินเทพนครสด		ถังปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินเทพนครที่ปรับสภาพ	
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย)	ปริมาณก๊าซมีเทน (ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย)	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย)	ปริมาณก๊าซมีเทน (ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย)
152.47	112.22	100.39	77.00

#### 5) สรุปผลการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพนครสดในระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน

จากการทดลองเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพนครสดปรับสภาพกับไบโกระถินเทพนครสดในระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยไบโกระถินเทพนครที่ผ่านปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำระยะเวลา 30 นาที หลังจากการปรับสภาพจะนำเฉพาะส่วนของไบโกระถินมาใช้ในการทดลอง โดยจะทิ้งส่วนของสารละลายออกเนื่องจากสารละลายมีค่าพีเอชสูง และนอกจากนี้ยังมีความหนืดสูง ซึ่งหากนำไปใช้เป็นน้ำเวียนในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต อาจทำให้ระบบอุดตันได้ และเมื่อนำไบโกระถินทั้งสองมาเข้าสู่ระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตโดยมีการผสมมูลโคเป็นหัวเชื้อ ซึ่งจะมีการเวียนน้ำในระบบทุกวันเพื่อเป็นการเพิ่มความชื้นและหมุนเวียนสารอินทรีย์ในระบบ เพื่อให้จุลินทรีย์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และจะมีการเจือจางน้ำหมักกรดเมื่ออัตราการผลิตกรดไขมันระเหยมีปริมาณน้อยลง ผลการทดลองพบว่า เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหยในน้ำหมักพบว่า ถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน คือ มีอัตราการผลิตกรดไขมันระเหยสูงในช่วงแรกๆของการเดิน

ระบบ และเมื่อดำเนินระบบไปเรื่อยๆ พบว่าอัตราการผลิตกรดไขมันระเหยลดลงทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเดินระบบนานขึ้น ปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายในระบบมีปริมาณลดลง และจากงานวิจัยของ Babel และคณะ (2004) พบว่าระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตจะผลิตกรดไขมันระเหยในปริมาณสูง ซึ่งกรดไขมันระเหยที่ความเข้มข้นสูงอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบได้ ดังนั้นจึงส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตกรดไขมันระเหยลดลงเมื่อมีการเดินในระยะเวลาที่นานขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหยของทั้งสองถังปฏิกรณ์พบว่า ถังปฏิกรณ์ชุดใบกระถินสดจะมีประสิทธิภาพดีกว่า นั่นคือ ให้กรดไขมันระเหยในปริมาณที่สูงกว่า และเมื่อมีการเจือจางน้ำหมัก ก็ยังคงประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหย ซึ่งสาเหตุที่ปริมาณกรดไขมันระเหยในชุดใบกระถินสดมีค่ามากกว่าในชุดใบกระถินปรับสภาพ มีหลายสาเหตุ ดังนี้

1. เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพของวัตถุดิบตั้งต้นพบว่า ชุดใบกระถินปรับสภาพ ซึ่งการปรับสภาพด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 °ซ จะเป็นการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ประจำถิ่นในใบไม้ จึงส่งผลให้ปริมาณจุลินทรีย์ตั้งต้นเมื่อเริ่มเดินระบบของถังชุดใบกระถินปรับสภาพมีปริมาณน้อยกว่าในถังชุดใบกระถินสด และในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตเป็นระบบที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์เริ่มต้นสูง ดังนั้นเมื่อมีปริมาณจุลินทรีย์ในระบบสูงก็จะสามารถเกิดอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สูงเช่นกัน

2. จากกระบวนการปรับสภาพใบกระถิน ผงเซลล์พืชจะถูกทำลายทำให้สารละลายต่างๆ จากเซลล์พืช ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน ถูกชะละลายออกมายังสารละลาย และจากการวิเคราะห์ปริมาณลิโกลูโลส พบว่าสัดส่วนของเอมิเซลลูโลสลดลงร้อยละ 48.24 ซึ่งโครงสร้างของเอมิเซลลูโลสจะมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ เมื่อทำการปรับสภาพใบไม้ เอมิเซลลูโลสจะแตกสลาย ทำให้น้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างของเอมิเซลลูโลสละลายออกมาอยู่สารละลาย (เนตรชนก ศรีแสง, 2557) และจากการวิเคราะห์ปริมาณซีโอตีในสารละลายหลังการปรับสภาพพบว่ามีความสูงถึง 98.2 กรัม ดังนั้นการทิ้งสารละลายออกถือเป็นทิ้งสารอินทรีย์ที่มีคุณค่าในการผลิตก๊าซชีวภาพ

และเมื่อนำน้ำหมักกรดที่ผลิตได้จากถังปฏิกรณ์ทั้งสองมาเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่าผลผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำหมักชุดใบกระถินเทพณรงค์สด และชุดใบกระถินปรับสภาพ มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ เท่ากับ 152.47 และ 100.39 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยตามลำดับ

- 6) เปรียบเทียบศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวลชนิดต่างๆ ด้วยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต

จากตารางที่ 4-14 เมื่อเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพของสารชีวมวลชนิดต่างๆ ที่ทำการหมักด้วยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตพบว่า ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของไบโกระถินเทพณรงค์มีประสิทธิภาพต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับสารชีวมวลชนิดอื่นๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของสารชีวมวล และองค์ประกอบทางเคมีของสารชีวมวลแต่ละชนิด สารชีวมวลบางชนิดย่อยสลายง่าย บางชนิดมีองค์ประกอบของน้ำตาลสูง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับ การเดินระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยเฉพาะในถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตมีความสำคัญมาก เนื่องจากต้องมีการควบคุมในหลายปัจจัย เช่น การควบคุมความชื้น การควบคุมการเวียนน้ำ การควบคุมพีเอช เป็นต้น ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายและส่งผลต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป

ตารางที่ 4 - 14 เปรียบเทียบศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารชีวมวลชนิดต่างๆ ด้วยระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต

สารชีวมวล	ถังปฏิกรณ์	ปริมาตร (ลิตร)	ผลผลิตก๊าซชีวภาพ	อ้างอิง
		ถังชั้นที่ 1 / ถังชั้นที่ 2		
ไบโกระถินเทพณรงค์	LBR - CSTR	5.0 / 6.0	152	งานวิจัยนี้
หญ้าหมัก (Grass silage)	LBR - AF	7.6 / 2.6	390	Lehtomaki และ
Sugar beet	LBR - AF	7.6 / 2.6	380	Bjornsson, 2006
Willow leaves	LBR - AF	7.6 / 2.6	160	
หญ้าหมัก (Grass silage)	LBR - AF	0.75 / 0.9	270	Cirne และคณะ , 2008
ฟางข้าว (Rice straw)	LBR - ASBR	4.0 / 4.0	190	Zhang และ Zhang, 1999
Sugar beet leaves	LBR - AF	7.6 / 2.6	216	Parawira และ คณะ

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย อธิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ผลการดำเนินงานวิจัย สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ผลของพารามิเตอร์ที่ศึกษาจากกระบวนการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์

ผลการวิเคราะห์พบว่าไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที ให้ปริมาณซีโอติกรองเท่ากับ 90 กรัมต่อลิตร เมื่อศึกษาสัดส่วนของลิกโนเซลลูโลสหลังการปรับสภาพเบื้องต้นพบว่า มีปริมาณลิกนิน และ เฮมิเซลลูโลสลดลงร้อยละ 69.84 และ 49.18 ตามลำดับ

2) ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพจากวิธีเอ็มพี

ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพจากวิธีเอ็มพีระยะเวลา 60 วัน พบว่าชุดการทดลองที่ทำการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราที่สูงที่สุด คือ 316.19 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงกว่าชุดควบคุมร้อยละ 89.71

3) ผลการใช้หลักการพื้นผิวตอบสนองเพื่อเลือกสภาวะในการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์ในการผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมที่สุด

ผลการวิเคราะห์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์โดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส โดยอาศัยหลักการพื้นผิวตอบสนองพบว่าสมการความสัมพันธ์ของปัจจัย (ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และระยะเวลาการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส) กับค่าตอบสนอง (ปริมาณก๊าซชีวภาพ) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5-1 ซึ่งสมการความสัมพันธ์ที่ได้สามารถนำมาใช้

ทำนายค่าผลตอบสนองที่ปัจจัยระดับต่างๆ และยังสามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าของปัจจัยต่อค่าตอบสนองที่เหมาะสมได้ เมื่อใช้สมการพิจารณาระดับของปัจจัยที่ให้ค่าตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด

$$\text{Biogas Production (L/Kg Vs)} = 151.41 + 47.71 A + 5.27 B + 1.03 AB - 12.54 A^2 - 0.11 B^2$$

ตารางที่ 5 - 1 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้สมการความสัมพันธ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำ

No	Factors values		Response values	Desirability	เปรียบเทียบกับชุดควบคุม
	NaOH (%)	Time (min)	Biogas production		
1	maximize	maximize	329.374	1.0000	97.62
	3.000	30.000			
2	minimize	minimize	239.127	0.597	43.47
	0.942	10.773			
3	maximize	minimize	267.618	0.734	60.57
	3.000	12.393			
4	minimize	maximize	274.884	0.799	64.93
	1.044	30.000			

จากตารางที่ 5-1 พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการปรับสภาพไบโกระถินเทพนรงค์ คือ ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที โดยมีค่า Desirability เท่ากับ 1.0000 และมีปริมาณมากกว่าชุดควบคุมร้อยละ 97.62

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นสารชีวมวลชนิดต่างๆโดยวิธีการปรับสภาพที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 5-2 จากตารางเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการปรับสภาพเบื้องต้นของแต่ละงานวิจัย สามารถสรุปได้ว่าการปรับสภาพเบื้องต้นสารชีวมวลก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนจะช่วยเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพ และการปรับสภาพโดยใช้สารละลาย NaOH ร่วมกับการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °C มีปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นร้อยละ 89.71 ซึ่งถือว่าการปรับสภาพเบื้องต้นโดยวิธีดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูง เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา

ตารางที่ 5 - 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการปรับสภาพเบื้องต้นสารชีวมวลโดยวิธีต่างๆ

สารชีวมวล	วิธีการปรับสภาพเบื้องต้น	ผลผลิตก๊าซชีวภาพ	%ก๊าซชีวภาพที่เพิ่มขึ้น	อ้างอิง
ไบโกระถินเทพณรงค์	สารละลาย NaOH 3% ร่วมกับความร้อนที่อุณหภูมิ 121 °ซ ระยะเวลา 30 นาที	ก๊าซชีวภาพ 316.19 L/Kg VS	89.71%	งานวิจัยนี้
ใบไม้ร่วง	สารละลาย NaOH 3.5%	ก๊าซมีเทน 81.8 L/Kg VS	21.5%	Liew และคณะ, 2011
ใบประดู่	สารละลาย NaOH 2% ระยะเวลา 24 ชั่วโมง	ก๊าซชีวภาพ 275 m <sup>3</sup> /ton	52.7%	Juntarasiri และคณะ, 2011
หญ้าแห้งหมัก	สารละลาย NaOH 5% ร่วมกับความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °ซ	ก๊าซชีวภาพ 450 L/Kg VS	38.9 %	Xie และคณะ, 2011
ใบอ้อย	ไอน้ำ ระยะเวลา 60 นาที	ก๊าซชีวภาพ 373.46 L/Kg VS	77.9%	สุรพงศ์ นนท์ประเสริฐ, 2553

จากการศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพณรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นในสภาวะต่างๆ โดยวิธีบีเอ็มพี ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพไบโกระถินเทพณรงค์ คือการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 ร่วมกับการระมัดระวังด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 30 นาที การทดลองครั้งต่อมาจึงสภาวะดังกล่าวมาปรับไบโกระถินก่อนเข้าสู่ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยศึกษาเปรียบเทียบกับไบโกระถินเทพณรงค์สด ผลการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ในขั้นตอนการศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายในการหมักไบโกระถินเทพณรงค์ที่มีการเติมมูลโคเป็นหัวเชื้อโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต ระยะเวลา 80 วัน พบว่าระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักกรดคือ ช่วงที่น้ำหมักกรดมีอัตราการผลิตกรดไขมันระเหยลดลง ซึ่งการเจือจางน้ำมีความสำคัญ เพราะหากในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตมีปริมาณกรดอินทรีย์สูงอาจส่งผลให้กรดอินทรีย์ไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบได้ ส่งผลให้ระบบล้มเหลว และจากการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยในถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตพบว่า ชุดการทดลองที่ใช้ไบโกระถินเทพณรงค์สดมีประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหยสูงกว่าชุดไบโกระถินปรับสภาพ ทั้งนี้เนื่องจากในงานวิจัยใช้เฉพาะส่วนของไบโกระถินหลังการปรับสภาพ ไม่ได้นำส่วนของสารละลายมาใช้ในการทดลอง ซึ่งการปรับสภาพจะเป็นการละลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายในใบไม้ ทำให้ถือเป็น



การทิ้งสารอินทรีย์ที่มีคุณค่า นอกจากนี้การปรับสภาพไบโม่ถือเป็นการทำลายเชื้อจุลินทรีย์ในไบโม่จึงทำให้ในถังปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินปรับสภาพมีอัตราการย่อยสลายที่ต่ำกว่าถังปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินสด

2) เมื่อนำน้ำหมักกรดของทั้งสองชุดการทดลองมาศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่าถังผลิตก๊าซชีวภาพชุดไบโกระถินสดและไบโกระถินปรับสภาพมีปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 152.47 และ 100.39 ลิตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหย

จากผลการดำเนินงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่าการปรับสภาพเบื้องต้นไบโกระถินเทพรงค์ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำจะช่วยในการทำลายโครงสร้างของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งโครงสร้างทั้งสองเป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืช จึงส่งผลให้ผนังเซลล์ถูกทำลาย ทำให้สารละลายต่างๆภายในเซลล์ละลายออกมายังสารละลาย จึงส่งผลให้สารละลายที่เกิดขึ้นหลังการปรับสภาพเบื้องต้นมีปริมาณซีโอดีสูง ซึ่งปริมาณซีโอดีจะมีปริมาณสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำนานขึ้น และจากการศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินที่ผ่านการปรับสภาพในสภาวะต่างๆ โดยวิธีบีเอ็มพี ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีในแต่ละชุดการทดลองสูงกว่าร้อยละ 70 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ในระบบสามารถนำสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นหลังการปรับสภาพไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าสารละลายที่เกิดขึ้นหลังการปรับสภาพมีความเหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพจากไบโกระถินเทพรงค์ที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 3 ร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำระยะเวลา 30 นาที โดยวิธีบีเอ็มพี ซึ่งจะใช้ทั้งส่วนของไบโกระถินและสารละลายมาศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพ จากการทดลองพบว่าให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราที่สูงที่สุด จากนั้นจึงนำกระถินที่ปรับสภาพโดยวิธีดังกล่าวมาศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน โดยศึกษาเปรียบเทียบกับไบโกระถินสด ซึ่งในส่วนของการทดลองที่ใช้ไบโกระถินปรับสภาพจะใช้เฉพาะส่วนของไบโกระถินมาเข้าสู่ระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต โดยไม่นำส่วนของสารละลายที่ได้จากการปรับสภาพมาใช้ เนื่องจากในสารละลายมีค่าพีเอชสูงและมีความหนืดสูง ซึ่งหากนำมาเข้าสู่ระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบตจะส่งผลให้ระบบอุดตันได้ ผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่ใช้ไบโกระถินสดมีประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหยมากกว่าชุดการทดลองที่ใช้ไบโกระถินปรับสภาพ ทั้งนี้เนื่องจากการปรับสภาพเบื้องต้นจะทำให้สารอินทรีย์ต่างๆละลายออกมายังสารละลาย แต่เนื่องจากการทดลองครั้งนี้ไม่ได้นำสารละลาย

มาใช้จึงถือเป็นการทิ้งสารอินทรีย์ที่คุณค่าในการผลิตก๊าซชีวภาพไป ดังนั้นจากการทดลองครั้งนี้ ผู้วิจัยคิดว่าควรมีการปรับปรุง คือ ควรมีการนำสารละลายที่ได้จากการปรับสภาพมาเข้าสู่ระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต โดยอาจนำมาเจือจางกับน้ำเพื่อลดความหนืดของสารละลาย และมีการปรับพีเอชสารละลายเพื่อให้มีค่าที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดไขมันระเหย

นอกจากนี้ควรมีการทดลองปรับเปลี่ยนสภาวะในการเดินระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต เนื่องจากระบบนี้ต้องใช้หลายปัจจัยในการควบคุม เช่น อัตราการเวียนน้ำ ระยะเวลาในการเจือจางน้ำหมักกรด เป็นต้น ดังนั้นเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการผลิตกรดไขมันระเหยมากยิ่งขึ้น จึงต้องมีการศึกษาปัจจัยดังกล่าวเพิ่มเติม เพื่อหาความเหมาะสมในการนำไปปรับใช้



## รายการอ้างอิง

- Babel, S., Fukushi, K., and Sitanrassamee, B. 2004. Effect of acid speciation on solid waste liquefaction in an anaerobic acid digester. Water Research. 38(9): 2417-2423.
- Bobleter, O. 1994. Hydrothermal degradation of polymers derived from plants. Progress in polymer science. 19(5): 797-841.
- Brown, D., Shi, J., and Li, Y. 2012. Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production. Bioresource technology. 124: 379-386.
- Cadavid-Rodríguez, L. S., and Horan, N. J. 2014. Production of volatile fatty acids from wastewater screenings using a leach-bed reactor. water research. 60: 242-249.
- Chanakya, H., Borgaonkar, S., Rajan, M., and Wahi, M. 1993. Two phase fermentation of whole leaf biomass to biogas. Biomass and Bioenergy. 5(5): 359-367.
- Chandra, R., Takeuchi, H., and Hasegawa, T. 2012. Hydrothermal pretreatment of rice straw biomass: a potential and promising method for enhanced methane production. Applied Energy. 94: 129-140.
- Chen, G., Zheng, Z., Yang, S., Fang, C., Zou, X., and Zhang, J. 2010. Improving conversion of *Spartina alterniflora* into biogas by co-digestion with cow feces. Fuel Processing Technology. 91(11): 1416-1421.
- Girio, F., Fonseca, C., Carvalheiro, F., Duarte, L., Marques, S., and Bogel-Lukasik, R. 2010. Hemicelluloses for fuel ethanol: a review. Bioresource technology. 101(13): 4775-4800.
- Gunaseelan, V. N. 1988. Anaerobic digestion of *Gliricidia* leaves for biogas and organic manure. Biomass. 17(1): 1-11.
- Hashimoto, A. G. 1986. Pretreatment of wheat straw for fermentation to methane. Biotechnology and bioengineering. 28(12): 1857-1866.
- Hendriks, A., and Zeeman, G. 2009. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. Bioresource technology. 100(1): 10-18.

- Hobson, P. N., and Wheatley, A. D. Anaerobic digestion: modern theory and practice. Elsevier applied science London. 1993.
- Jagadabhi, P. S. 2011. Methods to enhance hydrolysis during one and two-stage anaerobic digestion of energy crops and crop residues.
- Jagadabhi, P. S., Kaparaju, P., and Rintala, J. 2010. Effect of micro-aeration and leachate replacement on COD solubilization and VFA production during mono-digestion of grass-silage in one-stage leach-bed reactors. Bioresource technology. 101(8): 2818-2824.
- Juntarasiri, P., Nijsunkij, S., Buatick, T., Jamkrajang, E., Wacharawichanant, S., Seadan, M., Wasantakorn, A., and Suttiruengwong, S. 2011. Enhancing biogas production from padauk angšana leave and wastewater feedstock through alkaline and enzyme pretreatment. Energy Procedia. 9: 207-215.
- Keller, F. A., Hamilton, J. E., and Nguyen, Q. A. 2003. Microbial pretreatment of biomass. Applied biochemistry and biotechnology. 105(1-3): 27-41.
- Kusch, S. 2013. Understanding and Managing the Start-up Phase in Dry Anaerobic Digestion. Proceedings in Research Conference in Technical Disciplines.
- Liew, L. N., Shi, J., and Li, Y. 2011. Enhancing the solid-state anaerobic digestion of fallen leaves through simultaneous alkaline treatment. Bioresource technology. 102(19): 8828-8834.
- Martin, C., Klinke, H. B., and Thomsen, A. B. 2007. Wet oxidation as a pretreatment method for enhancing the enzymatic convertibility of sugarcane bagasse. Enzyme and Microbial Technology. 40(3): 426-432.
- Montgomery, D. C., Montgomery, D. C., and Montgomery, D. C. Design and analysis of experiments. 7. Wiley New York. 1984.
- Mosier, N., Wyman, C., Dale, B., Elander, R., Lee, Y., Holtzapple, M., and Ladisch, M. 2005. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. Bioresource technology. 96(6): 673-686.
- Mukhopadhyay, D., Prakash Sarkar, J., and Dutta, S. 2013. Optimization of process parameters for the economical generation of biogas from raw vegetable wastes under the positive influence of plastic materials using response surface methodology. Journal of Biochemical Technology. 4(1): 549-553.

- Nieves, D. C., Karimi, K., and Horváth, I. S. 2011. Improvement of biogas production from oil palm empty fruit bunches (OPEFB). Industrial Crops and Products. 34(1): 1097-1101.
- Pakarinen, O., Kaparaju, P., and Rintala, J. 2011. The effect of organic loading rate and retention time on hydrogen production from a methanogenic CSTR. Bioresource technology. 102(19): 8952-8957.
- Palonen, H., Thomsen, A. B., Tenkanen, M., Schmidt, A. S., and Viikari, L. 2004. Evaluation of wet oxidation pretreatment for enzymatic hydrolysis of softwood. Applied biochemistry and biotechnology. 117(1): 1-17.
- Pang, Y., Liu, Y., Li, X., Wang, K., and Yuan, H. 2008. Improving biodegradability and biogas production of corn stover through sodium hydroxide solid state pretreatment. Energy & Fuels. 22(4): 2761-2766.
- Salehian, P., Karimi, K., Zilouei, H., and Jeihanipour, A. 2013. Improvement of biogas production from pine wood by alkali pretreatment. Fuel. 106: 484-489.
- Singh, S., and Prerna, P. 2009. Review of recent advances in anaerobic packed-bed biogas reactors. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13(6): 1569-1575.
- Siqueira, J., and Lopes, H. 1999. Mechanisms of antimicrobial activity of calcium hydroxide: a critical review. International endodontic journal. 32(5): 361-369.
- Taherdanak, M., and Zilouei, H. 2014. Improving biogas production from wheat plant using alkaline pretreatment. Fuel. 115: 714-719.
- Taherzadeh, M. J., and Karimi, K. 2008. Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production: a review. International journal of molecular sciences. 9(9): 1621-1651.
- Tomás-Pejó, E., Alvira, P., Ballesteros, M., and Negro, M. 2011. Pretreatment technologies for lignocellulose-to-bioethanol conversion. Biofuels: alternative feedstocks and conversion processes. 7: 149-176.
- Varga, E., Klinke, H. B., Réczey, K., and Thomsen, A. B. 2004. High solid simultaneous saccharification and fermentation of wet oxidized corn stover to ethanol. Biotechnology and bioengineering. 88(5): 567-574.

- Wang, H., Lehtomäki, A., Tolvanen, K., Puhakka, J., and Rintala, J. 2009. Impact of crop species on bacterial community structure during anaerobic co-digestion of crops and cow manure. Bioresource technology. 100(7): 2311-2315.
- Xie, S., Frost, J., Lawlor, P., Wu, G., and Zhan, X. 2011. Effects of thermo-chemical pre-treatment of grass silage on methane production by anaerobic digestion. Bioresource technology. 102(19): 8748-8755.
- Xie, S., Lawlor, P., Frost, J., Wu, G., and Zhan, X. 2012. Hydrolysis and acidification of grass silage in leaching bed reactors. Bioresource technology. 114: 406-413.
- Xu, S. Y., Lam, H. P., Karthikeyan, O. P., and Wong, J. W. 2011. Optimization of food waste hydrolysis in leach bed coupled with methanogenic reactor: effect of pH and bulking agent. Bioresource technology. 102(4): 3702-3708.
- Yu, H., Samani, Z., Hanson, A., and Smith, G. 2002. Energy recovery from grass using two-phase anaerobic digestion. Waste management. 22(1): 1-5.
- Zhang, Q., Tang, L., Zhang, J., Mao, Z., and Jiang, L. 2011. Optimization of thermal-dilute sulfuric acid pretreatment for enhancement of methane production from cassava residues. Bioresource technology. 102(4): 3958-3965.
- Zheng, M., Li, X., Li, L., Yang, X., and He, Y. 2009. Enhancing anaerobic biogasification of corn stover through wet state NaOH pretreatment. Bioresource Technology. 100(21): 5140-5145. มหาวิทยาลัย
- Zhu, J., Wan, C., and Li, Y. 2010. Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment. Bioresource technology. 101(19): 7523-7528.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 4 พลังงานชีวมวล. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร:บริษัทเอเบิล คอลซัลแดนท์ จำกัด. 2554.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบการผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.diw.go.th/km/safety/pdf/biogas\\_2.pdf](http://www.diw.go.th/km/safety/pdf/biogas_2.pdf). [20 ตุลาคม 2556]
- กระทรวงพลังงาน. 2548. พลังงานก๊าซชีวภาพ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.eppo.go.th/power/powerN/PICP/File/\(15\).pdf](http://www.eppo.go.th/power/powerN/PICP/File/(15).pdf). [20 ตุลาคม 2556]
- กระทรวงพลังงาน. 2551. แผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี (พ.ศ.2551-2565). [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www.enconfund.go.th/pdf/index/REDP\\_15\\_yrs.pdf](http://www.enconfund.go.th/pdf/index/REDP_15_yrs.pdf). [1 ธันวาคม 2556]

- กระทรวงพลังงาน. 2557a. รายงานการอนุรักษ์พลังงานของไทย ปี 2556. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://www4.dede.go.th/dede/images/stories/stat\\_dede/report13/thailand%20energy%20efficiency%20situation%202013.pdf](http://www4.dede.go.th/dede/images/stories/stat_dede/report13/thailand%20energy%20efficiency%20situation%202013.pdf). [28 มีนาคม 2557]
- กระทรวงพลังงาน. 2557b. รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย ปี 2556. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/alternative%20energy2013%20.pdf>. [28 มีนาคม 2557]
- กลิ่นประทุม ปัญญาปิง, น. ส., ปิยะนันท์ ธนชัย และอุกฤษฏ์ เมืองขวัญใจ,. 2556. การพัฒนาการย่อยสลายของเศษก้านและใบลำไยในสภาวะไร้ออกซิเจน เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและผลพลอยได้. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยขอนแก่น (กรกฎาคม-สิงหาคม 2555) : 543-555.
- กลิ่นประทุม ปัญญาปิง, ว. ก., สราญรักษ์ แสนพรหม และ เอกราช คำปัญญา,. ศักยภาพการย่อยสลายให้ก๊าซมีเทนของเศษก้านและใบไม้หลายชนิด. Journal of Community Development Research 5 : 1-10. 2555.
- เฉลิมชนม์ เจริญวุฒิชัย. 2555. การผลิตก๊าซชีวภาพจากทะเลสาบปลาบ่อกว่าที่มีการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นร่วมกับกลีเซอรอล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชนกพร วงษ์วัน. 2555. การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ปรับปรุงสภาพเบื้องต้นร่วมกับของเสียกลีเซอรอล. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ฐานข้อมูลพรรณไม้ที่ใช่ในงานภูมิสถาปัตยกรรม. 2550. กระถินณรงค์. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://agkc.lib.ku.ac.th/plantwebsite/webpage/Trees/กระถินณรงค์.html>. [10 ธันวาคม 2556]
- ณัฐกาญจน์ ชราพก. 2554. การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าในระบบหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เนตรชนก ศรีแสง. 2557. การเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพจากขาน้อยด้วยการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นโดยการใช้กรดอะซิติกร่วมกับการระเบิดด้วยไอน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไพโรจน์ วิริยจारी. การออกแบบการทดลองขั้นสูง. เชียงใหม่: ภาควิชา เทคโนโลยีการพัฒนามลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2555.
- สถาบันวิจัยด้านพลังงานประเทศญี่ปุ่น. 2552. มือสารชีวมวลเอเชีย: แนวทางสำหรับการผลิตและการใช้สารชีวมวล. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

[http://www.jie.or.jp/biomass/AsiaBiomassHandbook/Thai/All\\_T.pdf](http://www.jie.or.jp/biomass/AsiaBiomassHandbook/Thai/All_T.pdf). [5 ตุลาคม 2556]

สาพิศ ร้อยอำแพง. 2543. การเจริญเติบโตและลักษณะทางสรีรวิทยาของลูกผสมไม้กระถินณรงค์และไม้กระถินเทพา. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://forprod.forest.go.th/forprod/Tips/Silviculture/Silvic\\_Seminar/t29SS.pdf](http://forprod.forest.go.th/forprod/Tips/Silviculture/Silvic_Seminar/t29SS.pdf). [12 มีนาคม 2557]

สุขใจ ชูจันทร์. การผลิตกรดอินทรีย์จากวัสดุเหลือใช้มวลชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2554.

อภิวัฒน์ เจนจัดการ. 2557. การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ด้วยระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรรธรณ วัฒนยมนาพร. 2553. การหมักร่วมของขยะเศษอาหารกับกากตะกอนน้ำเสียชุมชนโดยใช้ถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อิศรพงษ์ พงษ์ศิริกุล. การวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับอุตสาหกรรม. เชียงใหม่: ภาควิชาเทคโนโลยีการพัฒนาลิถภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2544.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก

### การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายสำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบมวลชีวภาพ (P.J. Van Soest, 1960)
  - 1.1 สารละลาย neutral detergent fiber (NDF)
    - 1.1.1 ชั่งโซเดียมลัลริวซัลเฟต 60 กรัม และดวงสารละลายไตรเอทิลีนไกลคอล 20 มิลลิลิตร ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 2 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน
    - 1.1.2 ละลายไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตแอนไฮดรัส 9.12 กรัม และอีดีทีเอ 37.22 กรัม ด้วยน้ำกลั่น แล้วเทใส่ขวดปรับปริมาตรที่มีปริมาตร 2 ลิตร เขย่าให้เข้ากัน เติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรครบ 2 ลิตร
  - 1.2 สารละลาย acid detergent fiber (ADF)
    - 1.2.1 เตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 นอร์มัล โดยการตวงกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (98 เปอร์เซ็นต์โดยมวล) ปริมาตร 27.2 มิลลิลิตร แล้วค่อยๆ เทลงในน้ำกลั่น ปริมาตรประมาณ 900 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรสุทธิให้เป็น 1 ลิตร
    - 1.2.2 ชั่งเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ปริมาณ 20 กรัม แล้วละลายในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 นอร์มัล
  - 1.3 สารละลาย Acid Detergent Lignin (ADL)
    - 1.3.1 ตวงซัลฟิวริกเข้มข้น 670 มิลลิลิตร ค่อยๆ เทลงในปีเกอร์ ขนาด 1 ลิตร ที่มีน้ำกลั่นอยู่ประมาณ 100 มิลลิลิตร พร้อมกับใช้แท่งแก้วคนให้สารละลายเข้ากัน รอจนสารละลายเย็น
    - 1.3.2 เมื่อสารละลายเย็นลง ปรับปริมาตรสุทธิให้เป็น 1 ลิตร

## ภาคผนวก ข

### วิธีการวิเคราะห์

#### 1. หาปริมาณองค์ประกอบมวลชีวภาพ (P.J. Van Soest, 1960)

##### 1.1 วิธีวิเคราะห์หา Neutral Detergent Fiber (NDF)

- 1.1.1 อบครุชชีเบล ขนาด 50 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปไว้ในโถดูดความชื้น รอจนครุชชีเบลเย็น แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก
- 1.1.2 ชั่งตัวอย่างใบกระถินเทพณรงค์ที่แห้งมา 1 กรัม มาใส่ขวดย่อยขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลาย NDF ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปย่อยเป็นเวลา 60 นาที
- 1.1.3 หลังจากย่อยเสร็จให้ล้างตัวอย่างในครุชชีเบล และต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำร้อนจนกระทั่งตัวอย่างทั้งหมดอยู่ในครุชชีเบล
- 1.1.4 จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยอะซิโตนประมาณ 3-5 ครั้ง หรือจนกระทั่งน้ำล้างตัวอย่างไม่มีสี
- 1.1.5 นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่าง ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
- 1.1.6 นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบแห้งเอาใส่ในโถดูดความชื้นปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่า ร้อยละ NDF
- 1.1.7 นำครุชชีเบลเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักหาค่า

#### วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละ NDF} = \frac{[(W1 - W2 \times 100) - \text{ร้อยละ Acid insoluble ash}]}{W3}$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่าง

W2 คือ น้ำหนักครุชชีเบล

W3 คือ น้ำหนักตัวอย่าง

ร้อยละ Acid insoluble ash คือร้อยละเถ้าที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หาลิกนิน

## 1.2 การวิเคราะห์หา acid detergent fiber (ADF)

- 1.2.1 อบครุชชีเบล ขนาด 50 มิลลิลิตร เป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปไว้ในโถดูดความชื้น รอจนครุชชีเบลเย็น แล้วนำมาชั่งน้ำหนัก
- 1.2.2 ชั่งตัวอย่างใบกระถินเทพนรงค์ที่แห้งมา 1 กรัม มาใส่ขวดย่อยขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วเติมสารละลาย ADF ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปย่อยเป็นเวลา 60 นาที
- 1.2.3 หลังจากย่อยเสร็จให้ล้างตัวอย่างในครุชชีเบลที่ชั่งน้ำหนักแล้ว
- 1.2.4 จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยอะซิโตนประมาณ 3-5 ครั้ง หรือจนกระทั่งน้ำล้างตัวอย่างไม่มีสี
- 1.2.5 นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่าง ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
- 1.2.6 นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่างออกจากตู้อบแห้งเอาใส่ในโถดูดความชื้นปล่อยให้เย็น แล้วชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่า ร้อยละ ADF
- 1.2.7 นำครุชชีเบลเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนักหาถ้ำ

### วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละ ADF} = \frac{[(W1 - W2 \times 100)] - \text{ร้อยละ Acid insoluble ash}}{W3}$$

เมื่อ W1 คือ น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่าง

W2 คือ น้ำหนักครุชชีเบล

W3 คือ น้ำหนักตัวอย่าง

ร้อยละ Acid insoluble ash คือร้อยละถ้ำที่ได้จากขั้นตอนการเผาในการวิเคราะห์หาลิกนิน

### วิธีคำนวณปริมาณเฮมิเซลลูโลส

$$\text{ร้อยละเฮมิเซลลูโลส} = \text{ร้อยละ NDF} - \text{ร้อยละ ADF}$$

### 1.3 วิเคราะห์หา Acid Detergent Lignin (ADL)

- 1.3.1 นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่างจากการวิเคราะห์หา ADF แล้วมาเติมสารละลาย ADL ประมาณ 30 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวางลงในภาตสแตนเลส ใช้แท่งแก้วคนให้ทั่ว เพื่อให้ตัวอย่างแยกจากกันไม่จับกันเป็นก้อน ควบคุมอุณหภูมิของครุชชีเบลในภาตสแตนเลสที่ 20 องศาเซลเซียส
- 1.3.2 เติมสารละลาย ADL เมื่อสารละลายในครุชชีเบลแห้ง คนเป็นระยะๆ ใช้เวลาย่อยนาน 3 ชั่วโมง
- 1.3.3 ล้างสารละลายกรดออกจากตัวอย่างที่อยู่ในครุชชีเบลที่ต่อกับเครื่องดูดสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำร้อนจนหมดกรด หรือประมาณ 1,400 มิลลิลิตร
- 1.3.4 นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่าง ไปอบในตู้อบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง หรือตลอดคืน เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนัก

#### วิธีการคำนวณ

$$\text{ร้อยละเซลลูโลส} = \frac{[(W1 - W4) \times 100]}{W3}$$

- เมื่อ W1 คือ น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่างจากการวิเคราะห์ ADF  
 W3 คือ น้ำหนักตัวอย่าง  
 W4 คือ น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่างจากที่อบ

### 1.4 วิเคราะห์หาลิกนิน

- 1.4.1 นำครุชชีเบลที่มีตัวอย่างซึ่งวิเคราะห์หาเซลลูโลสไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง
- 1.4.2 เอาออกใส่ในโถดูดความชื้น ปล่อยให้เย็น ชั่งน้ำหนัก

#### วิธีคำนวณ

$$\text{ร้อยละลิกนิน} = \frac{W4 - W5}{W3} \times 100$$

- เมื่อ W4 = น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่างหลังที่อบ  
 W5 = น้ำหนักครุชชีเบล + น้ำหนักตัวอย่างหลังการเผา  
 W3 = น้ำหนักตัวอย่าง

## ภาคผนวก ค

## ผลการวิเคราะห์ ANOVA

ตารางที่ ค - 1 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของตัวแปรต่อปริมาณซีโอดีกรองหลังการปรับสภาพ

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-value Prob > F
Model	11441.26	5	2288.25	22.04	0.0004
A-NaOH Conc.	7393.22	1	7393.22	71.22	6.47E-05
B-Reaction time	2538.62	1	2538.62	24.45	0.0017
AB	439.95	1	439.95	4.24	0.0785
A <sup>2</sup>	1280.60	1	1280.60	12.34	0.0098
B <sup>2</sup>	1056.01	1	1056.01	10.17	0.0153
Residual	726.70	7	103.81		
Lack of Fit	723.77	3	241.26	329.58	3.04E-05
Pure Error	2.93	4	0.73		
Cor Total	12167.96	12			

ตารางที่ ค - 2 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) ของตัวแปรต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-value Prob > F
Model	31680.06	5	6336.01	34.24	< 0.0001
A-NaOH Conc.	9483.89	1	9483.89	51.25	0.0002
B-Reaction time	16646.80	1	16646.80	89.96	< 0.0001
AB	2146.01	1	2146.01	11.60	0.0114
A <sup>2</sup>	3850.22	1	3850.22	20.81	0.0026
B <sup>2</sup>	3199.13	1	3199.13	17.29	0.0043
Residual	1295.27	7	185.04		
Lack of Fit	1267.92	3	422.64	61.82	0.0508
Pure Error	27.35	4	6.84		
Cor Total	32975.33	12			

## ภาคผนวก ง

## ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ ง-1 ปริมาณซีโอดีกรองหลังการปรับสภาพเบื้องต้นของแต่ละชุดการทดลองเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

Run	Pretreatment Condition		sCOD (g/L)	Higher than the control (%)
	NaOH (%)	Reaction time (min)		
1	0.00	0.00	6.75±0.00	Control
2	0.00	15.00	12.38±1.59	83.4
3	0.00	30.00	13.50±1.06	100.0
4	1.50	0.00	28.13±2.56	316.7
5	1.50	15.00	73.12±2.56	983.3
6	1.50	15.00	75.00±5.30	1,011.1
7	1.50	15.00	73.12±2.56	983.3
8	1.50	15.00	74.06±1.33	997.2
9	1.50	15.00	73.12±2.56	983.3
10	1.50	36.21	80.62±2.56	1,094.4
11	3.00	0.00	41.25±15.91	511.1
12	3.00	30.00	90.00±0.00	1,233.3
13	3.62	15.00	97.50±10.61	1,344.4

ตารางที่ ง-2 ผลก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร) จากชุดการทดลองปีเอ็มพี

วันที่ เก็บ	NaOH 0% 0 นาที	NaOH 0% 15 นาที	NaOH 0% 30 นาที	NaOH1.5 % 0 นาที	NaOH1.5 % 15 นาที (A)	NaOH1.5 % 15 นาที (B)	NaOH1.5 % 15 นาที (C)	NaOH1.5 % 15 นาที (D)
5	45±2.83	57±1.41	63±2.12	39.5±2.12	45±3.54	43±0.00	43.5±2.12	45±0.71
7	65±2.83	78±1.41	84±0.71	59.5±0.71	81±0.70	80±1.41	75±4.24	82±0.00
8	71±2.83	86±1.41	92±0.00	64.5±2.12	101±0.70	101±1.41	93±4.95	101±0.71
9	73.5±2.12	89±1.41	95±0.00	66.5±2.12	118±2.83	118±3.54	111±4.95	118±0.71
10	77±2.12	93±1.41	98±0.35	69±2.47	133±2.83	132±1.41	126±2.47	132±1.06
11	80.5±2.12	97±1.41	101±0.71	71±2.82	148±2.83	145±0.71	141±0.00	146±1.41
12	85±2.83	101±1.41	105±0.71	75±2.82	152±2.83	159±1.41	157±0.71	163±0.71
13	89±2.83	105±1.41	109±0.71	78±3.53	167±1.41	172±0.00	174±2.12	175±3.53
14	92±2.83	108±1.41	112±0.71	82±4.24	175±1.41	176.5±0.7	181±1.41	180±4.24
15	96±2.83	113±2.83	119±1.41	87±4.94	182±1.41	184±0.71	188±2.12	188±6.36
16	99±2.83	116±2.83	121±2.12	92±4.94	186±2.12	191±0.71	192±3.54	194±6.36
17	102±2.83	118±2.83	124±2.47	98±4.94	191±2.83	195±0.35	197±2.82	199±5.66
18	105±2.83	120±2.83	127±2.83	102±4.94	195±3.54	200±1.41	201±2.12	203±4.95
19	107±4.24	123±2.83	130±2.83	110±4.94	200±4.95	203±2.12	205±1.41	208±2.83
21	112±1.41	127±2.83	135±4.24	112±5.66	208±4.95	212±3.53	214±0.00	215±4.24
24	117±1.41	132±3.54	140±4.95	120±5.66	217±6.36	222±2.82	222±1.41	222±7.07
26	121±1.41	136±3.54	144±5.66	125±4.94	223±4.95	226±4.95	226±0.71	226±4.94
28	124±0.71	140±2.83	146±4.95	130±3.53	227±4.95	231±8.49	230±0.71	231±3.53
30	130±1.41	145±2.83	152±7.78	141±4.24	233±4.95	238±7.07	234±0.71	237±3.18
34	137±2.12	153±2.83	158±10.6	145±4.94	242±7.07	245±7.78	240±0.71	246±0.35
36	142±2.12	160±2.83	164±11.3	150±4.94	247±7.77	248±10.6	245±0.00	254±1.77
39	145±2.12	163±2.83	167±12.0	156±4.24	252±9.90	255±7.07	248±0.00	260±3.89
42	148±2.12	169±4.24	173±13.4	159±4.24	257±11.3	261±5.66	251±0.00	268±2.47
46	155±2.12	176±4.95	181±13.4	162±4.24	264±12.73	269±4.24	257±0.71	277±1.06
49	159±1.41	180±4.95	186±14.8	165±4.24	268±14.8	273±2.12	260±0.71	283±0.35
52	163±0.71	185±4.95	191±14.8	169±4.24	272±14.8	277±2.12	264±0.71	287±1.06
55	167±0.71	190±5.66	196±14.8	171±4.24	276±15.5	281±2.12	268±1.41	291±1.77
60	175±1.41	197±5.66	205±14.1	178±4.24	282±15.5	286±0.71	273±2.12	297±4.60



ตารางที่ ง-2 ผลก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร) จากชุดการทดลองปีเอเอ็มพี (ต่อ)

วันที่ เก็บ	NaOH1.5 % 15 นาที (D)	NaOH1.5 % 36.2 นาที	NaOH3 % 0 นาที	NaOH3 % 30 นาที	NaOH 3.62 % 15 นาที
5	46±5.66	43±3.53	12±0.71	24±0.71	19±2.82
7	77±1.41	75±0.71	22±0.71	38±0.00	27±1.41
8	97±1.41	95±1.41	27±0.71	43±0.71	31±3.54
9	111±1.41	112±1.41	31±0.71	46±0.71	35±4.24
10	121±1.41	126±2.47	40±0.71	53±1.41	42±4.95
11	131±3.53	141±3.53	49±1.06	60±2.12	50±5.66
12	148±2.83	161±8.48	65±1.41	78±0.71	67±6.36
13	161±2.83	178±5.66	76±0.00	101±2.12	91±7.07
14	167±2.83	186±0.71	81±0.71	122±1.41	107±5.66
15	176±2.83	196±2.12	88±0.71	139±1.41	118±4.24
16	183±1.77	202±4.95	91±0.71	148±2.12	125±1.41
17	187±1.77	207±3.89	96±0.71	159±3.53	131±2.48
18	191±1.77	212±2.82	100±1.41	169±4.95	138±3.54
19	197±4.60	215±2.82	102±2.12	182±4.95	150±4.24
21	206±1.77	224±4.95	112±2.12	199±2.83	166±9.19
24	216±3.53	237±9.19	120±2.12	216±1.41	181±8.48
26	223±3.53	244±12.0	125±2.12	232±0.00	188±9.19
28	228±2.83	249±12.0	132±2.12	242±0.71	194±8.48
30	234±2.83	254±12.0	137±2.12	253±2.82	200±7.78
34	243±1.77	262±13.43	145±2.12	270±1.41	216±2.12
36	250±1.77	269±10.67	150±2.12	283±4.24	228±1.41
39	253±3.53	275±10.67	153±1.41	287±4.94	237±2.12
42	259±1.77	281±10.67	158±1.41	294±3.53	250±0.71
46	266±4.60	290±10.67	164±1.41	305±1.41	264±2.12
49	272±4.60	295±10.67	167±1.41	309±1.41	273±1.41
52	276±4.60	299±10.67	172±1.41	314±0.71	276±0.71
55	284±4.60	303±10.67	177±1.41	324±0.71	280±2.12
60	287±4.60	310±10.67	188±1.41	327±0.71	285±2.12

ตารางที่ ง-3 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

Run	Pretreatment Condition		Biogas (L/kg VS)	Higher than the control (%)
	NaOH (%)	Reaction time (min)		
1	0.00	0.00	166.67±1.39	Control
2	0.00	15.00	188.24±5.55	12.04
3	0.00	30.00	205.89±0.00	22.51
4	1.50	0.00	178.44±4.16	7.22
5	1.50	15.00	271.58±1.39	52.35
6	1.50	15.00	275.99±0.69	54.45
7	1.50	15.00	272.56±1.39	51.57
8	1.50	15.00	277.22±1.04	54.06
9	1.50	15.00	276.97±6.04	54.45
10	1.50	36.21	299.52±10.04	66.23
11	3.00	0.00	184.32±1.39	10.84
12	3.00	30.00	316.19±0.69	77.22
13	3.62	15.00	275.01±2.08	59.16

ตารางที่ ง-4 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีในชุดทดลองบีเอ็มพี

Run	Pretreatment Condition		sCOD (g/L)	sCOD (g/L)	sCOD (g/L)	% Efficiency sCOD removal
	NaOH (%)	Reaction time (min)	หลังปรับสภาพเบื้องต้น	ก่อน BMP	หลัง BMP	
1	0.00	0.00	6.75±0.00	1.20±0.15	0.23±0.11	80.83
2	0.00	15.00	12.38±1.59	2.09±0.15	0.38±0.11	81.82
3	0.00	30.00	13.50±1.06	3.00±0.00	0.53±0.00	82.33
4	1.50	0.00	28.13±2.56	4.00±0.87	1.14±0.54	71.50
5	1.50	15.00	73.12±2.56	12.75±0.87	3.43±0.54	73.10
6	1.50	15.00	75.00±5.30	13.50±0.00	3.43±0.54	74.59
7	1.50	15.00	73.12±2.56	12.75±0.87	3.43±0.54	73.10
8	1.50	15.00	74.06±1.33	12.75±0.00	3.81±0.54	70.12
9	1.50	15.00	73.12±2.56	13.50±0.87	3.81±0.00	71.78
10	1.50	36.21	80.62±2.56	14.07±0.75	3.43±0.54	75.62
11	3.00	0.00	41.25±15.91	6.00±0.00	1.52±1.08	74.67
12	3.00	30.00	90.00±0.00	18.75±5.73	4.09±0.54	78.19
13	3.62	15.00	97.50±10.61	20.63±3.75	4.57±1.08	77.85

ตารางที่ ง-5 ผลวิเคราะห์ซีโอดีละลายและผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลองและได้จากการทำนายจากโปรแกรม

Run	Pre-treatment		Dependent variables			
	Conditions		sCOD (g/L)		Biogas (L/Kg VS)	
	NaOH (%)	Reaction time (min)	Experimental	Predicted	Experimental	Predicted
1	0.00	0.00	6.75±0.00	-2.34	166.67±1.39	142.02
2	0.00	15.00	12.38±1.59	21.76	188.24±5.55	214.81
3	0.00	30.00	13.50±1.06	16.29	205.89±0.00	207.32
4	1.50	0.00	28.13±2.56	37.24	178.44±4.16	170.55
5	1.50	15.00	73.12±2.56	71.83	271.58±1.39	269.00
6	1.50	15.00	75.00±5.30	71.83	275.99±0.69	269.00
7	1.50	15.00	73.12±2.56	71.83	272.56±1.39	269.00
8	1.50	15.00	74.06±1.33	71.83	277.22±1.04	269.00
9	1.50	15.00	73.12±2.56	71.83	276.97±6.04	269.00
10	1.50	36.21	80.62±2.56	70.29	299.52±10.04	285.34
11	3.00	0.00	41.25±15.91	44.27	184.32±1.39	181.02
12	3.00	30.00	90.00±0.00	104.85	316.19±0.69	338.97
13	3.62	15.00	97.50±10.61	87.07	275.01±2.08	263.60

ตารางที่ ง-6 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้สมการความสัมพันธ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และระยะเวลาในการให้ความร้อน

No	Factors values		Response values	Desirability	เปรียบเทียบกับชุดควบคุม
	NaOH (%)	Time (min)	Biogas production		
1	maximize	maximize	329.374	1.0000	97.62
	3.000	30.000			
2	minimize	minimize	239.127	0.597	43.47
	0.942	10.773			
3	maximize	minimize	267.618	0.734	60.57
	3.000	12.393			
4	minimize	maximize	274.884	0.799	64.93
	1.044	30.000			

ตารางที่ ง-7 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักที่ได้จากการหมักใบกระถินที่มี การผสมมูลโคเป็นหัวเชื้อในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิชเบด แสดงพารามิเตอร์ กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก) สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร หินปูน) สัดส่วนกรดไขมันระเหย ง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมด และพีเอช

วัน	VFA (มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก)		AIK (มิลลิกรัมต่อลิตร หินปูน)		สัดส่วน VFA/AIK		PH	
	ถังปฏิกรณ์ ชุดใบกระถิน ปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ ชุดใบกระถิน สด	ถังปฏิกรณ์ ชุดใบกระถิน ปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ ชุดใบกระถิน สด	ถังปฏิกรณ์ ชุดใบกระถิน ปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ ชุดใบกระถิน สด	ถังปฏิกรณ์ ชุดใบกระถิน ปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ ชุดใบกระถิน สด
0	750	750	2500	2600	0.30	0.29	7.82	7.74
1	1050	1200	2360	2480	0.44	0.48	7.41	7.21
2	1100	1440	2340	2420	0.47	0.60	6.82	6.79
4	1480	1880	2060	2260	0.72	0.83	6.44	6.23
6	1880	2040	2020	2360	0.93	0.86	5.95	5.83
8	2100	2280	2060	2360	1.02	0.97	5.48	5.57
10	2280	2400	1800	1780	1.27	1.35	5.39	5.5
12	2268	2390	1820	1740	1.25	1.37	5.47	5.56
14	2268	2300	1800	1780	1.26	1.29	5.63	5.7
16	2280	2390	1780	1740	1.28	1.37	5.69	5.73
18	2268	2300	1800	1780	1.26	1.29	6.09	6.2
20	2100	2280	2220	2400	0.95	0.95	6.39	6.44
20	1000	1100	1860	1980	0.72	0.73	5.55	5.5
22	1330	1440	1480	1320	0.95	1.27	5.57	5.51
24	1410	1670	1400	1080	1.34	1.74	5.62	5.64
27	1880	1880	1220	1080	1.54	1.81	5.59	5.54
30	1880	1950	900	980	0.83	0.77	5.61	5.63
30	750	750	1220	1080	0.75	0.85	5.58	5.5
32	915	915	1200	1100	0.79	1.00	5.64	5.66
34	950	1100	960	1020	1.25	1.18	5.58	5.5
36	1200	1200	960	1020	1.54	1.41	5.58	5.5
38	1200	1200	960	1020	1.54	1.41	5.58	5.5
40	1200	1200	960	1020	1.54	1.41	5.69	5.64

ตารางที่ ง -8 ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเจือจางน้ำหมักที่ได้จากการหมักใบกระถินที่มีการผสมมูลโคเป็นหัวเชื้อในระบบถังปฏิกรณ์แบบลิซเบต แสดงพารามิเตอร์ ปริมาณซีโอดีทั้งหมด ปริมาณซีโอดีกรอง และอุณหภูมิ

วัน	ปริมาณซีโอดีทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ปริมาณซีโอดีกรอง (มิลลิกรัมต่อลิตร)		อุณหภูมิ	
	ถังปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินปรับ สภาพ	ถังปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินสด	ถังปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินปรับ สภาพ	ถังปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินสด	ถังปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินปรับ สภาพ	ถังปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินสด
0	5524	4875	6400	10000	30.1	31.3
1	8000	8800	8000	8800	31.5	30.2
2	9000	9750	9000	9750	30.7	30.1
4	9000	9000	9000	9000	31.6	31.9
6	9143	9750	9750	9750	31.1	31.8
8	9143	9905	14582	16405	30.9	31.3
10	9750	10937	14582	16405	31.2	31.6
12	9721	10937	17013	16797	31.3	30.9
14	9721	10937	17013	17013	31.6	32.1
16	9905	11429	9905	11429	30.9	31.8
18	10937	11544	8381	10667	31.3	31.3
20	10937	11544	9143	9905	31.8	30.9
20	6095	6500	5333	5333	31.3	31.2
22	7500	6500	5714	5714	30.9	30.9
24	8250	7500	5250	6095	31.2	31.2
27	9000	8250	5250	4875	31.5	31.3
30	9143	9000	6095	4500	31.4	31.6
30	4571	4875	4571	4875	31.7	30.9
32	5714	5714	5714	5714	30.1	32.1
34	6095	6000	6095	6000	31.2	31.8
36	6375	6500	6375	6500	31.3	31.3
38	6750	6375	6750	6375	31.2	30.9
40	6750	6375	6750	6375	31.5	31.8

ตาราง ง-9 ผลการศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายจากการหมักร่วมใบ  
กระถินเทพณรงค์ที่มีการผสมและมูลโคเป็นหัวเชื้อ แสดงพารามิเตอร์ กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อ  
ลิตร กรดอะซิติก) สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร หินปูน) สัดส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพ  
ต่างทั้งหมด และพีเอช

วัน	VFA (มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิ ติก)		ALK (มิลลิกรัมต่อลิตร หินปูน)		VFA/ALK		PH	
	ถึงปฏิกิริยา สุดใบ กระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกิริยา สุดใบ กระถินสด	ถึงปฏิกิริยา สุดใบ กระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกิริยา สุดใบ กระถินสด	ถึงปฏิกิริยา สุดใบ กระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกิริยา สุดใบ กระถินสด	ถึงปฏิกิริยา สุดใบ กระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกิริยา สุดใบ กระถินสด
0	609	693	4250	5250	0.14	0.13	7.7	7.5
3	2205	3213	2380	3120	0.93	1.03	6.04	5.94
6	3129	3591	2600	3400	1.20	1.06	5.59	5.73
9	3192	3948	2840	3580	1.15	1.15	5.54	5.6
10	3276	4116	2880	3620	1.11	1.09	5.45	5.6
10	1617	1953	1380	1640	1.17	1.19	5.71	5.73
12	2163	2670	2240	2540	0.97	1.05	5.52	5.57
15	2560	2809	2120	2700	1.21	1.04	5.6	5.64
18	2750	3150	1780	2320	1.54	1.36	5.53	5.57
20	2872	3250	1820	2260	1.58	1.44	5.64	5.67
20	1510	1625	960	1140	1.57	1.43	5.57	5.62
21	1617	1953	1440	1520	1.12	1.28	5.67	5.57
24	2163	2435	1400	1640	1.55	1.48	5.57	5.53
25	2490	2590	1520	1780	1.64	1.46	5.72	5.53
26	2541	2678	1520	1640	1.67	1.63	5.61	5.62
26	1270	1340	740	720	1.72	1.86	5.59	5.53
29	1502	1617	1280	1440	1.17	1.12	5.62	5.62
31	1967	2012	1200	1400	1.64	1.44	5.57	5.67
33	2005	2163	1160	1320	1.73	1.64	5.53	5.54
33	1012	1204	800	860	1.27	1.40	5.53	5.62
34	1218	1312	1400	1460	0.87	0.90	5.62	5.57
36	1567	1467	1320	1380	1.19	1.06	5.67	5.53
38	1620	1617	1260	1300	1.29	1.24	5.69	5.53
40	1709	1700	1200	1260	1.42	1.35	5.53	5.62
40	1090	1120	720	860	1.51	1.30	5.62	5.54
43	1225	1204	1320	1600	0.93	0.75	5.67	5.53
45	1560	1480	1240	1480	1.26	1.00	5.54	5.61
46	1600	1650	1160	1240	1.38	1.33	5.62	5.67

วัน	VFA (มีผลกรั้มต่อลิตร กรดอะซิติค)		AIK (มีผลกรั้มต่อลิตร หินปูน)		VFA/AIK		PH	
	ถึงปฏิกรณ์จุด ไบกระถิน ปรับสภาพ	ถึงปฏิกรณ์จุด ไบกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์จุด ไบกระถิน ปรับสภาพ	ถึงปฏิกรณ์จุด ไบกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์จุด ไบกระถิน ปรับสภาพ	ถึงปฏิกรณ์จุด ไบกระถิน ปรับสภาพ	ถึงปฏิกรณ์จุด ไบกระถิน ปรับสภาพ	ถึงปฏิกรณ์จุด ไบกระถิน ปรับสภาพ
47	1680	1700	1000	1040	1.68	1.63	5.60	5.54
47	1100	1050	720	720	1.53	1.46	5.58	5.62
50	1350	1275	1280	1380	1.05	0.92	5.54	5.6
52	1560	1480	1180	1320	1.32	1.12	5.64	5.58
53	1680	1520	1100	1200	1.53	1.27	5.62	5.54
54	1712	1697	1060	1160	1.62	1.46	5.54	5.63
54	1020	1170	620	620	1.65	1.61	5.53	5.67
57	1358	1290	1000	1200	1.36	1.08	5.61	5.54
59	1560	1480	1200	1320	1.30	1.12	5.66	5.58
60	1560	1480	1100	1020	1.42	1.45	5.54	5.58
61	1679	1590	1020	1020	1.65	1.56	5.62	5.64
61	956	869	720	720	1.33	1.21	5.6	5.62
64	1225	1204	1280	1440	0.96	0.84	5.58	5.54
66	1560	1480	1400	1440	1.11	1.03	5.54	5.53
67	1560	1480	1360	1320	1.15	1.12	5.63	5.67
68	1600	1520	1240	1020	1.29	1.49	5.67	5.54
68	1090	1120	640	640	1.70	1.75	5.54	5.62
71	1225	1204	1240	1400	0.99	0.86	5.58	5.6
73	1560	1480	1360	1320	1.15	1.12	5.62	5.58
74	1500	1570	1240	1260	1.21	1.25	5.67	5.54
75	1600	1520	1240	1200	1.29	1.27	5.69	5.62
75	990	861	640	720	1.55	1.20	5.69	5.67
76	1290	1320	1100	1120	1.17	1.18	5.67	5.54
78	1560	1480	1120	1320	1.39	1.12	5.69	5.62
80	1600	1520	1240	1200	1.29	1.27	5.69	5.67

ตาราง ง-10 ผลการศึกษาอัตราการย่อยสลายต่อการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายจากการหมักร่วมใบกระถินเทพณรงค์ที่มีการผสมและมูลโคเป็นหัวเชื้อ แสดงพารามิเตอร์ ปริมาณซีไอดีทั้งหมด ปริมาณซีไอดีกรอง และอุณหภูมิ

วัน	ปริมาณซีไอดีทั้งหมด		ปริมาณซีไอดีกรอง		อุณหภูมิ	
	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด
0	5524	4571	5333	4190	30.1	30.3
3	9905	14476	8381	14476	30.2	30.2
6	10667	15048	9905	15238	31.3	30.9
10	14857	17143	13714	16381	31.2	31.2
10	7273	8545	6727	7636	31.5	31.9
12	8727	9455	7818	8545	31.6	31.2
15	9455	10182	8000	9455	30.9	31.3
18	10182	12000	9273	9818	31.3	31.5
20	12727	13455	11273	10182	31.8	31.9
20	6188	6563	5250	5625	31.3	31.2
21	7125	8625	6375	7125	30.9	31.4
25	9375	11625	7125	7875	31.2	30.8
26	11250	12000	8250	8250	31.4	31.2
26	5438	6000	4875	5250	31.5	31.5
29	7125	7313	6000	5625	31.3	31.1
31	8250	7688	6563	5813	31.2	31.4
33	9375	8250	7125	6750	31.3	31.5
33	4500	4125	3375	3375	31.4	31.2
34	4875	4500	3750	3750	31.3	31.3
36	5625	5250	4125	4313	30.8	31.8
38	6375	6000	4500	4500	31.3	31.2
40	6750	6375	4500	4500	31.2	31.2
40	4500	4125	3375	3375	31.6	31.2
43	5419	4645	3871	3871	32.4	31.5
46	6194	5806	4258	4258	31.3	31.3
47	6387	6194	4258	4258	31.8	31.2
47	4645	4258	3484	3484	31.3	30.1



วัน	ปริมาณซีไอทั้งหมด		ปริมาณซีไอดีกรอง		อุณหภูมิ	
	ตั้งปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินปรับ สภาพ	ตั้งปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินสด	ตั้งปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินปรับ สภาพ	ตั้งปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินสด	ตั้งปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินปรับ สภาพ	ตั้งปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินสด
50	6194	5032	3871	3871	31.2	31.9
53	6581	5419	4839	4258	32.4	31.8
54	6774	5613	4839	4258	31.3	31.3
54	4645	4258	3484	3484	31.8	31.6
57	5419	4645	3871	3871	31.3	30.9
59	6194	5032	4645	3871	31.3	32.1
60	6581	5419	4839	4258	31.2	31.8
61	6194	5216	4839	4258	31.6	31.2
61	4500	4125	3375	3375	30.7	31.3
64	6375	4258	4358	3484	31.2	31.6
66	6581	4645	4500	3871	31.2	30.9
67	6750	5032	4500	4258	31.6	31.3
68	7125	5032	5333	4258	30.9	31.8
68	4500	3375	2323	2323	31.3	31.3
71	6194	4645	4500	3484	31.8	30.9
73	6581	5032	4645	3484	31.3	31.2
74	7125	5032	4839	3871	31.2	31.5
75	7300	3375	4839	4313	31.3	31.4
75	4258	4258	3375	2000	31.4	31.7
76	6581	4645	4500	3375	31.3	30.1
78	6750	5419	4645	4500	30.8	31.2
80	6750	5613	4839	4500	31.3	31.3

ตารางที่ ง-11 ปริมาณกรดไขมันระเหย ปริมาณซีโอดี และ ปริมาณซีโอดีกรอง ของน้ำหมักที่เก็บในวันที่มีการเจือจางน้ำหมักกรด

วันที่เก็บ น้ำหมัก	ปริมาณ น้ำหมัก (ลิตร)	ถึงปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินปรับสภาพ			ถึงปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินสด		
		กรดไขมัน ระเหย	ซีโอดี ทั้งหมด	ซีโอดี ละลาย	กรดไขมัน ระเหย	ซีโอดี ทั้งหมด	ซีโอดี ละลาย
วันที่ 10	1 ลิตร	3,192	14,857	13,714	3,948	17,143	16,381
วันที่ 20	1 ลิตร	2,872	12,727	11,273	3,250	13,455	10,182
วันที่ 26	1 ลิตร	2,541	11,250	8,250	2,678	12,000	8,250
วันที่ 33	1 ลิตร	2,005	9,375	7,125	2,163	8,250	6,750
วันที่ 40	1 ลิตร	1,709	6,750	4,500	1,700	6,375	4,500
วันที่ 47	1 ลิตร	1,680	6,387	4,258	1,700	6,194	4,258
วันที่ 54	1 ลิตร	1,712	6,774	4,839	1,697	5,613	4,500
วันที่ 61	1 ลิตร	1,679	6,194	4,839	1,590	5,216	4,258
วันที่ 68	1 ลิตร	1,600	7,125	5,333	1,520	5,032	4,258
วันที่ 75	1 ลิตร	1,600	7,300	4,839	1,520	5,375	4,313

ตารางที่ ง-12 ชนิดกรดไขมันระเหยง่ายในน้ำหมักที่เก็บในวันที่ 10 20 26 และ 33

วันที่	ชนิดกรดไขมันระเหยง่าย	ถึงปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินปรับสภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินสด
10	กรดไขมันระเหยง่ายรวม	3,194	4,200
	กรดอะซีติก	1,475	2,277
	กรดโพรไพโอนิก	1,258	1,290
	กรดบิวไทริก	460	633
20	กรดไขมันระเหยง่ายรวม	2,627	3,450
	กรดอะซีติก	1,386	1,980
	กรดโพรไพโอนิก	1,049	1,258
	กรดบิวไทริก	192	211
26	กรดไขมันระเหยง่ายรวม	2,615	2,900
	กรดอะซีติก	1,287	1,485
	กรดโพรไพโอนิก	944	839
	กรดบิวไทริก	384	576
33	กรดไขมันระเหยง่ายรวม	2,238	2,001
	กรดอะซีติก	1,485	1,188
	กรดโพรไพโอนิก	734	765
	กรดบิวไทริก	19	48

ตารางที่ ง-13 ผลการศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำหมักที่ผลิตได้จากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต แสดงสถานะในถังผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงพารามิเตอร์ กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก) สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร หินปูน) สัดส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมด และพีเอช ของน้ำขาเข้า

วัน	VFA (มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก)		AIK (มิลลิกรัมต่อลิตร หินปูน)		VFA/AIK		PH	
	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ
0	1050	1050	2175	2175	0.48	0.48	8.00	8.00
3	1000	1000	2200	2200	0.45	0.45	7.23	7.23
6	975	975	2200	2200	0.44	0.44	7.31	7.31
9	900	900	2550	2550	0.35	0.35	7.28	7.28
12	1000	1000	2450	2450	0.41	0.41	7.29	7.29
15	1050	1050	2525	2525	0.42	0.42	7.21	7.21
18	875	875	2700	2700	0.32	0.32	7.24	7.24
21	1025	1025	2650	2650	0.39	0.39	7.25	7.25
24	975	975	2250	2250	0.43	0.43	7.31	7.31
27	925	925	2525	2525	0.37	0.37	7.28	7.28
30	875	875	2650	2650	0.33	0.33	7.15	7.15
33	1025	1025	2525	2525	0.41	0.41	7.26	7.26
36	1075	1075	2575	2575	0.42	0.42	7.36	7.36
39	975	975	2550	2550	0.38	0.38	7.25	7.25
42	1125	1125	2450	2450	0.46	0.46	7.34	7.34
45	1125	1125	2525	2525	0.45	0.45	7.25	7.25
48	900	900	2175	2175	0.41	0.41	7.22	7.22
51	1000	1000	2200	2200	0.45	0.45	7.34	7.34
54	1025	1025	2450	2450	0.42	0.42	7.31	7.31
57	975	975	2250	2250	0.43	0.43	7.21	7.21
60	1600	1675	2600	2700	0.62	0.62	7.31	7.25
63	1600	1675	2575	3000	0.62	0.56	7.28	7.23
66	1650	1700	3000	3000	0.55	0.57	7.21	7.31
69	1600	1650	2775	2700	0.58	0.61	7.21	7.22
72	1550	1550	2500	3000	0.62	0.52	7.24	7.21
75	1575	1550	3000	2775	0.53	0.56	7.22	7.25
78	1550	1475	3000	2400	0.52	0.61	7.31	7.24
81	1300	1475	2550	3175	0.51	0.46	7.28	7.21

วัน	VFA (มีลลิกกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก)		AIK (มีลลิกกรัมต่อลิตร หินปูน)		VFA/AIK		PH	
	ถึงปฏิกรณ์ชุด ไบโกระถิน ปรับสภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ไบโกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุด ไบโกระถิน ปรับสภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ไบโกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุด ไบโกระถิน ปรับสภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ไบโกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุด ไบโกระถิน ปรับสภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ไบโกระถินสด
84	1300	1350	2775	3175	0.47	0.43	7.21	7.22
87	1275	1200	3000	3000	0.43	0.40	7.22	7.25
90	1400	1275	3500	3175	0.40	0.40	7.24	7.31
93	1200	1075	3000	2500	0.40	0.43	7.26	7.29
96	1100	1075	2600	2500	0.42	0.43	7.31	7.22
99	1075	1100	2500	2575	0.43	0.43	7.26	7.25

หมายเหตุ วันที่ 0-59 ของการเดินระบบเป็นช่วงเริ่มต้นเดินระบบ (start up)

วันที่ 60 ของการเดินระบบ เริ่มป้อนน้ำหมักกรดที่ได้จากถึงปฏิกรณ์ลิชเบตชุดไบโกระถินปรับสภาพและถึงปฏิกรณ์ลิชเบตชุดไบโกระถินสด



ตารางที่ ง-14 ผลการศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำหมักที่ผลิตได้จากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต แสดงสถานะในถังผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงพารามิเตอร์ กรดไขมันระเหย (มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก) สภาพต่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร หินปูน) สัดส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมด และพีเอช ของน้ำขาออก

วัน	VFA (มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก)		AIK (มิลลิกรัมต่อลิตร หินปูน)		VFA/AIK		PH	
	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ
0	-	-	-	-	-	-	-	-
3	550	550	1850	1850	0.30	0.30	7.07	7.07
6	475	400	1675	1850	0.28	0.22	7.02	7.08
9	350	475	1700	1750	0.21	0.27	7.03	7.09
12	375	400	1750	1700	0.21	0.24	7.09	7.02
15	275	350	1350	1675	0.20	0.21	7.04	7.09
18	350	350	1675	1980	0.21	0.18	7.1	7.02
21	450	350	1980	1600	0.23	0.22	7.07	7.04
24	400	400	1350	1700	0.30	0.24	7.13	7.11
27	450	450	1750	1750	0.26	0.26	7.05	7.1
30	300	325	1675	1675	0.18	0.19	7.09	7.09
33	375	375	1220	1625	0.31	0.23	7.11	7.12
36	350	350	1350	1350	0.26	0.26	7.12	7.12
39	275	375	1300	1300	0.21	0.29	7.14	7.13
42	350	350	1160	1600	0.30	0.22	7.11	7.15
45	250	400	1180	1180	0.21	0.34	7.19	7.16
48	400	400	1440	1440	0.28	0.28	7.18	7.19
51	375	375	1350	1350	0.28	0.28	7.21	7.18
54	350	325	1350	1675	0.26	0.19	7.15	7.16
57	325	325	1160	1700	0.28	0.19	7.18	7.15
60	375	300	875	775	0.42	0.41	7.19	7.14
63	300	300	750	775	0.40	0.4	7.16	7.12
66	300	375	750	875	0.39	0.43	7.19	7.15
69	375	350	900	875	0.41	0.41	7.23	7.19
72	350	275	975	700	0.36	0.39	7.21	7.21
75	275	350	875	100	0.34	0.34	7.19	7.23
78	350	375	975	1075	0.36	0.35	7.21	7.23
81	250	350	775	975	0.33	0.36	7.23	7.21

วัน	VFA (มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอะซิติก)		AIK (มิลลิกรัมต่อลิตร หินปูน)		VFA/AIK		PH	
	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถิน ปรับสภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด
84	400	400	1000	1100	0.37	0.34	7.18	7.21
87	375	375	1000	1075	0.34	0.36	7.19	7.15
90	450	450	1500	1400	0.3	0.32	7.21	7.19
93	400	400	1200	1300	0.34	0.3	7.18	7.19
96	450	450	1500	1375	0.30	0.33	7.24	7.18
99	450	450	1300	1375	0.33	0.34	7.17	7.19

ตารางที่ ง-14 ผลการศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำหมักที่ผลิตได้จากถังปฏิกรณ์แบบลิซเบต แสดงสถานะในถังผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงพารามิเตอร์ ปริมาณซีโอดีทั้งหมดขาเข้า ปริมาณซีโอดีทั้งหมดขาออก และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี

วัน	ปริมาณซีโอดีทั้งหมดขาเข้า		ปริมาณซีโอดีทั้งหมดขาออก		ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีทั้งหมด	
	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด
0	5325	5325	-	-	-	-
3	5100	5100	2400	2750	54.9	48.4
6	5550	5550	2400	2400	52.9	52.9
9	5250	5250	2750	2400	50.5	56.8
12	5100	5100	2325	2325	55.7	55.7
15	5400	5400	2400	2325	52.9	54.4
18	5175	5175	2325	2100	56.9	61.1
21	5025	5025	2025	2025	60.9	60.9
24	5200	5200	2100	2100	58.2	58.2
27	5325	5325	2013	2025	61.3	61.1
30	5100	5100	2025	2100	62.0	60.6
33	5550	5550	1950	1950	61.8	61.8
36	5250	5250	1875	2025	66.2	63.5
39	5400	5400	1950	1950	62.9	62.9
42	5325	5325	1800	1950	66.7	63.9
45	5200	5200	1520	1600	71.5	70.0
48	5200	5200	1520	1520	70.8	70.8

วัน	ปริมาณซีโอดีทั้งหมดขาเข้า		ปริมาณซีโอดีทั้งหมดขาออก		ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีทั้งหมด	
	ถึงปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุดใบ กระถินสด
51	5400	5400	1520	1580	70.8	69.6
54	5100	5100	1620	1600	70.0	70.4
57	5325	5325	1520	1520	70.2	70.2
60	5250	5438	1600	1620	70.0	69.6
63	5250	5438	1200	1200	77.1	77.9
66	5226	5226	1125	1050	78.6	80.7
69	5032	5266	1161	1239	77.8	76.3
72	5032	5419	1084	1084	78.5	79.4
75	5419	5032	1239	1161	75.4	78.6
78	5226	5226	1161	1161	78.6	76.9
81	5250	5438	1239	1277	76.3	75.6
84	5438	5063	1125	1125	78.6	79.3
87	5438	5438	1050	1238	80.7	75.5
90	5032	5226	1200	1050	77.9	80.7
93	5226	5226	1084	1084	78.5	79.3
96	5438	5438	1161	1161	77.8	77.8
99	5063	5063	1161	1200	78.7	77.9

ตารางที่ ง-15 ผลการศึกษาผลผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำหมักที่ผลิตได้จากถังปฏิกรณ์แบบลิชเบต แสดงสถานะในถังผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงพารามิเตอร์ ปริมาณซีโอดีกรองขาเข้า ปริมาณซีโอดีกรองขาออก และประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีกรอง

วัน	ปริมาณซีโอดีกรองขาเข้า		ปริมาณซีโอดีกรองขาออก		ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีกรอง	
	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด
0	1500	1500	-	-	-	-
3	1600	1600	800	880	46.7	41.3
6	1520	1520	880	800	45.0	50.0
9	1640	1640	720	800	52.6	47.4
12	1640	1640	740	740	54.9	54.9
15	1520	1520	660	720	59.8	56.1
18	1500	1500	640	720	57.9	52.6

วัน	ปริมาณซีไอตีกรองขาเข้า		ปริมาณซีไอตีกรองขาออก		ประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอตีกรอง	
	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินปรับ สภาพ	ถึงปฏิกรณ์ชุด ใบกระถินสด
21	1680	1680	675	675	55.0	55.0
24	1440	1440	520	675	69.0	59.8
27	1520	1520	525	542	63.5	62.4
30	1640	1640	542	520	64.3	65.8
33	1520	1520	520	525	68.3	68.0
36	1640	1640	525	450	65.5	70.4
39	1500	1500	450	450	72.6	72.6
42	1760	1760	420	450	72.0	70.0
45	1600	1440	450	525	74.4	70.2
48	1500	1500	420	420	73.8	70.8
51	1600	1600	400	450	73.3	70.0
54	1640	1640	420	450	73.8	71.9
57	1640	1640	450	420	72.6	74.4
60	5063	5063	450	450	72.6	72.6
63	5063	5250	413	413	91.8	91.8
66	5226	5032	450	465	91.1	91.1
69	5032	5266	375	426	92.8	91.5
72	5032	5226	488	426	90.3	91.9
75	5226	5032	450	406	91.1	92.2
78	5419	5226	413	465	92.1	90.8
81	4875	4875	394	413	92.7	92.1
84	4645	4688	387	450	92.1	90.8
87	4875	4500	406	488	91.3	89.6
90	4839	4839	426	426	91.3	90.5
93	4645	4452	525	406	89.2	91.6
96	4452	4875	450	488	90.3	89.0
99	4452	4688	450	450	89.9	90.8



ตารางที่ ง-11 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวัน มิลลิลิตรต่อวัน

วัน	ถังปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินปรับสภาพ	ถังปฏิกรณ์ชุดไบโกระถินสด
3	256.7	293.3
6	256.7	280.0
9	256.7	320.0
12	275.0	306.7
15	293.3	320.0
18	275.0	306.7
21	275.0	333.3
24	275.0	320.0
27	348.3	306.7
30	330.0	346.7
33	348.3	320.0
36	330.0	320.0
39	366.7	386.7
42	385.0	413.3
45	366.7	400.0
48	403.3	386.7
51	366.7	400.0
54	385.0	413.3
57	403.3	400.0
60	385	413.3
63	1576.7	1613.3
66	1613.3	1640.0
69	1576.7	1626.7
72	1613.3	1626.7
75	1576.7	1600.0
78	1595.0	1653.3
81	1521.7	1640.0
84	1063.3	1120.0
87	1045.0	1133.3
90	990.0	920.0
93	971.7	906.7
96	971.7	893.3
99	953.3	906.7

หมายเหตุ วันที่ 63 เริ่ม feed น้ำหมักกรด

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกรรณก ดุลยพัชร์ เกิดเมื่อวันที่ 28 มีนาคม พ.ศ. 2533 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพัทลุง จังหวัดพัทลุง ในปีการศึกษา 2550 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์แบบบรรยายในที่ประชุมระดับนานาชาติ

Kornkanok Dulyapach and Orathai Chavalparit. "Optimization of alkaline thermo-chemical pretreatment for enhancing biogas production of Acacia leaves by Response Surface Methodology" The proceedings of the 2rd 3R International Conference on Material Cycle and Waste Management, Daejeon Convention Center, Daejeon, Korea. 21-23 May, 2015.

การเผยแพร่วิทยานิพนธ์แบบบรรยายในที่ประชุมระดับชาติ

กรรณก ดุลยพัชร์ และ อรทัย ขวาลภาฤทธิ์. "การปรับปรุงสภาพเบื้องต้นที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบกระถิน" เอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 14, โรงแรมโลตัส ปางสวนแก้ว จังหวัดเชียงใหม่. วันที่ 27-29 พฤษภาคม 2558.