การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับของเสียกลีเซอรอล

นางสาวชนกพร วงษ์วัน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

BIOGAS PRODUCTION FROM CO-DIGESTION OF PRETREATED CORN STALK AND GLYCEROL WASTE

Miss Chanokporn Wongvan

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science

(Interdisciplinary Program)

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับของเสียกลีเซอรอล
โดย	นางสาวชนกพร วงษ์วัน
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.อมร เพชรสม)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.สมชาย ดารารัตน์)

ชนกพร วงษ์วัน : การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับของเสียกลีเซอรอล. (BIOGAS PRODUCTION FROM CO-DIGESTION OF PRETREATED CORN STALK AND GLYCEROL WASTE) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ.ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์, 99 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาผลของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การแช่ด้วยสารละลายด่าง (NaOH) การใช้ความร้อน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการใช้ของเสียกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็นสารหมักร่วมกับต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องด้วยสารละลายด่าง (NaOH) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด 80.7 L/kg VS removed และสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 43.6 L/kg VS removed เมื่อนำกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาหมักร่วมกับข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายด่าง (NaOH) จะช่วยเพิ่มสารอินทรีย์ในระบบ ทำให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น ในงานวิจัยนี้ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมของการเติมกลีเซอรอล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลจากการทดลองพบว่า เมื่อเติมกลีเซอรอลจำนวน 1% (V/V) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีที่สุด โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึง 170.05 L/kg VS removed และและสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 85.4 L/kg VS removed ในทางตรงกันข้าม หากมีการเติมกลีเซอรอลในสารตั้งต้นมากกว่า 1% จะทำให้การย่อยสลายกลีเซอรอลทางชีวภาพเกิดขึ้นเร็วกว่าการย่อยสลายโพรไพโอเนททางชีวภาพ ถังปฏิกิริยาก็จะมีภาระบรรทุกกลีเซอรอลมากเกินไป ความเข้มข้นของไพโอเนทก็จะสูงขึ้น ดังนั้นควรควบคุมปริมาณกลีเซอรอลที่ป้อนเข้าไปในกระบวนการอย่างระมัดระวัง เพราะถ้าระบบมีภาระบรรทุกมากเกินไปจะเกิดผลเสียต่อระบบได้

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต .....

ปีการศึกษา 2555 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

5387121320 : MAJOR ENVIRONMENTAL SCIENCE
KEYWORD : BIOGAS PRODUCTION CO-DIGESTION CORN STALK GLYCEROL PRETREATMENT

CHANOKPORN WONGVAN : BIOGAS PRODUCTION FROM CO-DIGESTION OF PRETREATED CORN STALK AND GLYCEROL WASTE. ADVISOR : ASSOC.PROF.ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., 99 pp.

This paper aims to study the result of the pretreat the basic stage as immersing with alkaline salt, blasting with stream pressure; as the result of experiment the alkaline salt can produce biogas total 80.7 L/kg VS removed and methane yield of 43.6 L/kg VS removed. Glycerol from the biodiesel production regarded as the hardly eliminated waste; it played a major role in increasing the organic substance when put together with corn stalk as the co-digestion and provided a high rate of biogas as a result. This paper aimed to study the appropriated proportion of the Glycerol to produce the effective biogas. The experiment found that Glycerol amounts of 1% (V/V) produced the best rate of biogas at 170.05 L/kg VS removed and methane yield of 52.6 L/kg VS removed. On the other hand, if adding glycerol in initial substance more than 1%, it will make biological digestion of glycerol occur faster than biological digestion of propionate. The reaction tank will have duty of carrying glycerol extremely. Then, the concentration of propionate will rise. Therefore, we should control glycerol added in the process carefully because if the system has too much duty to carry, it will harm the system.

Field of Study : Environmental Science Student's Signature .....

Academic Year : 2012 Advisor's Signature .....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ รวมถึงการให้เกร็ดความรู้ใหม่ๆ ที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการดำเนินงาน ตลอดจนตรวจทานจนทำให้วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมที่ได้มอบเงินทุนอุดหนุนในการทำงานวิจัยและขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ข้อมูลต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์เป็นไปอย่างถูกต้อง ขอขอบคุณกระทรวงพลังงานที่ได้มอบทุนวิจัยสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้ทำให้งานวิจัยสำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ที่ได้เสียสละเวลามาเป็นกรรมการสอบรวมถึงให้ข้อคิดเห็นและคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งจนทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ที่ได้ให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่กรุณาอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือ ทำให้วิทยานิพนธ์ประสบความสำเร็จได้

ขอขอบพระคุณบิดา มารดาที่ให้ความเข้าใจ ความช่วยเหลือทุกอย่าง รวมถึงการให้กำลังใจ ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งในระหว่างทำการวิจัยจนทำให้งานวิจัยประสบความสำเร็จ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญภาพ ..... ฎ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญ 1
1.2 วัตถุประสงค์ 1
1.3 ขอบเขตการศึกษา 3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 พืชชีวมวล 5
2.2 ความรู้ทั่วไปของต้นข้าวโพด 6
2.2.1 เศษวัสดุเหลือใช้จากต้นข้าวโพด 7
2.3 เทคโนโลยีสำหรับการทำ Pre-treatment สำหรับวัสดุที่มีเซลลูโลส 8
2.3.1 Mechanical pretreatment 8
2.3.2 Physical pretreatment 8
2.3.3 Physicochemical pretreatment 9
2.3.4 Chemical pretreatment 9
2.3.5 Biological pretreatment 10
2.4 ก๊าซชีวภาพ 10
2.4.1 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ 11
2.4.1.1 กระบวนการไฮโดรลิซิส (Hydrolysis) 11
2.4.1.2 กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) 12
2.4.1.3 กระบวนการผลิตกรดอะซิติค (Acetogenesis) 12
2.4.1.4 กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) 12

หน้า

2.4.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง 13
2.4.2.1 แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) 13
2.4.2.2 แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane producing bacteria) 15
2.4.3 สภาวะแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้อากาศ 16
2.4.3.1 อุณหภูมิ 17
2.4.3.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 17
2.4.3.3 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity: Alk) 18
2.4.3.4 กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acids: VFA) 18
2.4.3.5 อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR) 19
2.4.3.6 สารพิษ (Toxic substances) 20
2.4.4 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่นิยมใช้ 20
2.4.4.1 ระบบบ่อไร้อากาศแบบคลึมบ่อ (Anaerobic covered lagoons) 21
2.4.4.2 ระบบกวนสมบูรณ์ (CSTR) 21
2.4.4.3 ระบบแอนแอโรบิคคอนแทค (Anaerobic contact) 21
2.4.4.4 ระบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic filter) 21
2.4.4.5 ระบบยูเอเอสบี (UASB) 21
2.4.4.6 ระบบอีจีเอสบี (EGSB) 21
2.4.4.7 ระบบย่อยสลัดจ์แบบราง (Plug flow digester) 22
2.5 กระบวนการหมัก (Fermention) 22
2.5.1 ชนิดการหมัก 22
2.5.1.1 Batch fermentation 22
2.5.1.2 Continuous fermentation 22
2.5.1.3 Fed-batch fermentation 22
2.5.2 การหมักร่วม 23

หน้า

2.6 การผลิตไบโอดีเซล 23
2.7 กลีเซอรอล 26
2.7.1 การใช้ประโยชน์จากกลีเซอรอลดิบจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล 26
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 28
บทที่ 3 วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินงานวิจัย 31
3.1 ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากข้าวโพดที่ทำการปรับสภาพเบื้องต้น 32
3.1.1 ชุดการทดลองที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด (ชุดควบคุม) 32
3.1.2 ชุดการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับ
การใช้สารละลายด่าง 32
3.1.3 ชุดการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับ
การให้ความร้อน 32
3.1.4 ชุดการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมัก
ร่วมกับมูลสุกร อัตราส่วน 95 : 5 32
3.2 ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้น
หมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 32
3.3 การเตรียมตะกอนจุลชีพ 32
3.4 การเตรียมวัตถุดิบ 33
3.4.1 การเตรียมต้นข้าวโพดในชุดทดลองที่ปรับสภาพโดยการลดขนาด
(ชุดควบคุม) 33
3.4.2 การเตรียมต้นข้าวโพดในชุดทดลองปรับสภาพเบื้องต้นทางเคมี 34
3.4.3 การเตรียมต้นข้าวโพดในชุดทดลองการปรับสภาพเบื้องต้น
ด้วยความร้อน 34
3.5 ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสมบูรณ์ (Continuous Stirred Tank
Reactor : CSTR) 35
3.5.1 ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์ 35
3.5.2 อุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซชีวภาพโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ 36
3.6 วิธีการทดลอง 36
3.6.1 การเดินระบบ 36

หน้า

3.6.2 การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดที่มีการปรับสภาพเบื้องต้น 37
3.6.3 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ผล 38
บทที่ 4 ผลการทดลอง 39
4.1 ลักษณะสมบัติทางเคมีของต้นข้าวโพด 39
4.2 สมบัติเบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์ 42
4.3 สมบัติเบื้องต้นของมูลสุกร 42
4.4 สมบัติเบื้องต้นของกลีเซอรอลดิบ 43
4.5 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น 44
4.5.1 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด (ชุดควบคุม) 44
4.5.2 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการใช้สารละลายด่าง 47
4.5.3 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการให้ความร้อน 50
4.5.4 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วน 95 : 5 52
4.6 การเปรียบเทียบปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นต่อวันและปริมาณก๊าซสะสมของต้นข้าวโพดที่ทำการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีที่แตกต่างกัน 54
4.7 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นของข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 55
4.7.1 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 0.5% 56
4.7.2 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 1% 59
4.7.3 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 2% 61

หน้า

4.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองต่างๆ 63
4.9 การเปรียบเทียบผลการวิจับกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 67
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 72
รายการอ้างอิง 74
ภาคผนวก 77
ภาคผนวก ก ผลการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นของต้นข้าวโพดโดยการลดขนาด (ชุดควบคุม) 78
ภาคผนวก ข ผลการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นของต้นข้าวโพดโดยการลดขนาด ร่วมกับการใช้สารละลายด่าง (NaOH 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง) 82
ภาคผนวก ค ผลการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นของต้นข้าวโพดทางกายภาพ แล้วหมักร่วมกับมูลสุกรอัตราส่วน 95 : 5 86
ภาคผนวก ง ผลการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นของต้นข้าวโพดทางกายภาพ แล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 0.5% 90
ภาคผนวก จ ผลการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นของต้นข้าวโพดทางกายภาพ แล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 1% 94
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 98

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	11
3.1	ความถี่ในการเก็บตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์	38
4.1	สมบัติทางเคมีของต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ	40
4.2	สมบัติเบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์	42
4.3	สมบัติเบื้องต้นของมูลสุกร	43
4.4	สมบัติทางเคมีของกลีเซอรอล	44
4.5	ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักข้าวโพดที่ปรับสภาพสภาวะต่างๆ	65
4.6	การเปรียบเทียบประสิทธภาพการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ	69

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	การเก็บเกี่ยวข้าวโพด	7
2.2	โครงสร้างเซลลูโลส	8
2.3	โครงสร้างเซลลูโลส	8
2.4	โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส	9
2.5	สูตรโครงสร้างของลิกนิน	10
2.6	โครงสร้างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและสิกนินในเซลล์พืช	11
2.7	โครงสร้างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและสิกนินที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น	12
2.8	แผนผังแสดงกระบวนการผลิตไบโอดีเซล	26
2.9	ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์	27
2.10	โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล	27
3.1	ขั้นตอนการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ	31
3.2	ตะกอนจุลชีพจากระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB) จากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทผลิตน้ำผลไม้	33
3.3	ต้นข้าวโพดที่ผ่านการบดให้ละเอียด โดยให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 2 มิลลิเมตร	33
3.4	ต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องด้วยการลดขนาดและแช่ในสารละลายด่าง โซเดียมไฮดรอกไซด์	34
3.5	ต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการลดขนาดแล้วนำไปนึ่งด้วยหม้อนึ่ง ความดันสูง (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส	34
3.6	ภาพจำลองถังหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์	35
3.7	ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	36
3.8	อุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซชีวภาพโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ	36
4.1	ต้นข้าวโพดที่ยังไม่มีการปรับสภาพ	40
4.2	ต้นข้าวโพดที่มีการปรับสภาพโดยการลดขนาด	40
4.3	ข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้สารละลายด่าง	41
4.4	ข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยการให้ความร้อน	41

ภาพที่ หน้า

4.5 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากชุดข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด (ชุดควบคุม) 46
4.6 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด ร่วมกับการใช้สารละลายด่าง (NaOH 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง) 49
4.7 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด ร่วมกับการให้ความร้อน (Steam 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที) 51
4.8 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากข้าวโพดที่การปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้ว หมักร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วน 95 : 5 53
4.9 การเปรียบเทียบการเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนจากการปรับสภาพ ด้วยวธีที่แตกต่างกัน 54
4.10 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากชุดต้นข้าวโพดที่การปรับสภาพเบื้องต้น ทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 0.5% 58
4.11 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากชุดต้นข้าวโพดที่การปรับสภาพเบื้องต้น ทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 1% 60
4.12 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากชุดต้นข้าวโพดที่การปรับสภาพเบื้องต้น ทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 2% 62
4.13 การเปรียบเทียบการเกิดก๊าซชีวภาพของชุดควบคุม การปรับสภาพด้วย NaOH 2% หมักร่วมกับมูลสุกร 5% และการปรับสภาพด้วย NaOH 2% หมักร่วมกับของเสีย กลีเซอรอล 1% 66
4.14 การเปรียบเทียบการเกิดก๊าซมีเทนของชุดควบคุม การปรับสภาพด้วย NaOH 2% หมักร่วมกับมูลสุกร 5% และการปรับสภาพด้วย NaOH 2% หมักร่วมกับของเสีย กลีเซอรอล 1% 67

บทที่ 1
บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีผลผลิตทางการเกษตรมีปริมาณมาก จึงมีการนำเอาผลผลิตทางการเกษตรมาแปรรูปเพื่อเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์และจากกระบวนการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้ ถ้ามีการนำสิ่งเหลือใช้มาทำให้มีคุณค่านำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ก็จะลดภาระของเกษตรกรลง การผลิตก๊าซชีวภาพจึงเป็นวิธีการทางเทคโนโลยีชีวภาพที่มีบทบาทสำคัญและเป็นประโยชน์มาก สำหรับพลังงานทดแทนที่จะสามารถนำไปใช้เป็นก๊าซหุงต้มหรือเป็นพลังงานเบื้องต้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2551 : ออนไลน์)

การผลิตก๊าซชีวภาพจากกรดอินทรีย์ระเหยที่ได้จากกระบวนการหมักต้นข้าวโพดเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะเป็นแนวทางการเลือกใช้พลังงานทดแทน เนื่องจากผลผลิตที่ได้คือ ก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานที่มีความสำคัญอย่างหนึ่ง ซึ่งเกิดจากกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีที่ผ่านการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาวะไร้ออกซิเจน นับว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงที่มีศักยภาพสูงกระบวนการหนึ่งในการนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์ ขณะนี้ได้มีหน่วยงานทั้งภาครัฐและภาคเอกชนให้ความสนใจในการที่จะให้เกษตรกรนำก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้มและให้แสงสว่างในครัวเรือน นอกจากนี้ยังนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อให้แสงสว่างและสูบน้ำเพื่อใช้ในการเกษตรในระดับชุมชน โดยก๊าซชีวภาพต่างๆ เหล่านี้ได้มาจากการหมักขยะของเสียชนิดต่างๆ เช่น เปลือกถั่วเขียว เปลือกกล้วย เปลือกสับปะรด ต้นข้าวโพด ขยะจากบ้านเรือน ผักผลไม้และมูลสุกร เป็นต้น

ข้าวโพดเป็นพืชที่ปลูกง่าย นิยมปลูกในภาคเหนือและภาคอีสาน ใช้เวลาให้ผลผลิต 3-4 เดือน จากรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ได้กล่าวถึงจำนวนพื้นที่การปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ใน 40 จังหวัด มีพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด 6,081,656 ไร่ เกษตรกรจะปลูกข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดขายเพียงอย่างเดียว เมื่อเก็บเกี่ยวฝักข้าวโพดแล้วเกษตรกรปล่อยให้ลำต้นข้าวโพดแห้งตายอยู่ในบริเวณแปลงเพาะปลูก รอจนถึงฤดูกาลเพาะปลูกใหม่เกษตรกรจึงจะไถกลบหรือเผาทิ้งก่อนจะเริ่มปลูกใหม่ ซึ่งผลผลิตของข้าวโพดจากการสำรวจในปี 2552 มีผลผลิตถึง 4,616,119 ตันต่อปี และมีปริมาณชีวมวลที่เหลือใช้ถึง 3,343,316.51 ตันต่อปี โดยชีวมวลนั้นเป็นในส่วนของซังและลำต้นข้าวโพด ซึ่งมีค่าความร้อนถึง 18.04 MJ/kg (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552 : ออนไลน์) ซึ่งยังไม่มีการศึกษาถึงความ

เป็นไปได้ในการนำลำต้นข้าวโพดมาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานอย่างแท้จริง จากองค์ประกอบที่กล่าวมา ทำให้กล่าวได้ว่า ข้าวโพดนับเป็นชีวมวลของประเทศไทยชนิดหนึ่งที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนในอนาคตและยังเป็นการลดภาระในการกำจัดลงไปได้อีกด้วย

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพวัตถุดิบที่นำมาผลิตควรผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นก่อน เพราะปัญหาอย่างหนึ่งของการใช้ของแข็งเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพก็คือ ปัญหาการลอยตัวของวัตถุดิบและกาก ทำให้เกิดเป็นชั้นของของแข็งจับกันหนาบริเวณด้านบนของของเหลว ถ้าหนามากจะทำให้ก๊าซที่เกิดขึ้นในถังหมักดันออกมาไม่ได้ จากเหตุผลดังกล่าวจะเห็นได้ว่าในการหมักผลิตก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบที่มีความเป็นกรดสูงและเป็นของแข็ง ควรจะทำการปรับสภาพเบื้องต้น ซึ่งจะทำให้การควบคุมระบบทำได้ง่ายขึ้นและจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพดีขึ้นด้วย นอกจากนั้นส่วนเส้นใยของชีวมวลยังมีส่วนปกป้องจากการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ โดยวิธีการปรับสภาพเบื้องต้น ทำให้เส้นใยเหล่านั้นย่อยสลายได้ง่ายขึ้น สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นกว่าชีวมวลที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น การปรับสภาพเบื้องต้นมีหลายวิธีเช่น การลดขนาด การใช้ความร้อน การใช้เอนไซม์ การใช้ด่าง การใช้กรดหรือการใช้การปรับสภาพเบื้องต้นหลายวิธีร่วมกัน โดยความเหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ความชื้น องค์ประกอบด้านเคมีต่างๆ เป็นต้น

จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า มีงานวิจัยเรื่องการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียที่เป็นเศษผักผลไม้หรือของเสียประเภทกากสับปะรดและกากมันสำปะหลัง เปลือกและเศษผลไม้ในโรงงานอุตสาหกรรมที่สามารถย่อยสลายและเป็นแหล่งอาหารที่ดี ส่วนการผลิตก๊าซชีวภาพจากข้าวโพดนั้น ส่วนใหญ่เป็นการนำซังข้าวโพดมาทำการวิจัย แต่แทบไม่พบการนำลำต้นหรือใบมาศึกษาวิจัยเลย ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาความเป็นไปได้และความเหมาะสมของการผลิตก๊าซชีวภาพจากลำต้นและใบจากต้นข้าวโพดไปผ่านการปรับสภาพทางกายภาพและสารเคมีที่แตกต่างกัน เพื่อเพิ่มมูลค่าให้แก่ต้นข้าวโพดและเป็นแนวทางส่งเสริมให้เกษตรกรสามารถลดรายจ่ายด้านพลังงานจากการนำลำต้นและใบจากต้นข้าวโพดมาผลิตก๊าซชีวภาพได้ในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลกระทบของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนสารละลายด่างและหมักร่วมกับมูลสุกรที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพด

2. ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพแล้วเบื้องต้นร่วมกับของเสียกลีเซอรอล

3. ศึกษาสมรรถภาพของระบบถังหมักแบบกวนสมบูรณ์ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น

ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

1. การทดลองนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ระบบหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 การทดลอง โดยศึกษาเปรียบเทียบปริมาณของการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อนและสารละลายด่างกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ รวมทั้งศึกษาต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น แล้วนำมาหมักร่วมกับมูลสุกรและของเสียกลีเซอรอล โดยทำการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ในแต่ละชุดการทดลองแต่ละชนิดจะถูกลดขนาดและปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีทางกายภาพและทางเคมีได้แก่ การให้ความร้อนและการแช่ในสารละลายด่างตามลำดับ โดยกำหนดปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (VSS) เริ่มต้นในแต่ละชุดการทดลอง เท่ากับร้อยละ 1.5 หรือ 15,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2. วัสดุหมักร่วมที่ใช้ในชุดการทดลองหมักย่อยร่วม (Co-digestion) ได้แก่ มูลสุกรและของเสียกลีเซอรอล โดยกำหนดอัตราส่วน C/N เริ่มต้นในการทดลองผสมกับมูลสุกรให้อยู่ในช่วง 20-30

3. พารามิเตอร์ที่ทำการตรวจวิเคราะห์ ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิในระบบ อุณหภูมิห้องปริมาณของแข็งทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต่อวัน ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทน ซีโอดีทั้งหมด ซีโอดีกรองกรดไขมันระเหยง่าย สภาพความเป็นด่าง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงวิธีการปรับสภาพต้นข้าวโพดที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพในปริมาณสูงที่สุด

2. เพื่อเป็นการนำเศษวัสดุที่เหลือใช้ทางการเกษตรมาทำให้เกิดประโยชน์ เนื่องจากประเทศไทยมีปริมาณชีวมวลที่เหลือใช้ประเภทลำต้นและใบข้าวโพดอยู่เป็นจำนวนมาก นับว่าเป็นการลดปริมาณขยะลงไปได้อีกด้วย

3. เพื่อเป็นการพัฒนาทางเลือกใหม่ในแง่ของพลังงานทดแทนและสามารถนำมาปรับใช้จริง

บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พืชชีวมวล

ประเทศไทยเป็นประเทศแห่งเกษตรกรรมที่มีผลผลิตทางการเกษตรหลากหลายชนิด เช่น น้ำตาล มันสำปะหลัง ยางพาราและน้ำมันปาล์ม เป็นต้น ผลผลิตบางส่วนมีเหลือเพียงพอที่จะส่งออกไปยังต่างประเทศ เป็นการสร้างรายได้ให้แก่ประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาท อย่างไรก็ตาม ระหว่างขั้นตอนในการเก็บเกี่ยวและการแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรเหล่านี้ ก่อให้เกิดชีวมวลหรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจำนวนมากเช่น เศษไม้ยางพารา แกลบ ฟางข้าว กากอ้อย ซังข้าวโพด เป็นต้น ชีวมวลบางส่วนก็จะถูกนำมาแปรรูปเป็นปุ๋ย เชื้อเพลิงบางส่วนก็จะถูกเผาทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งพลังงานชีวมวลที่เกิดขึ้นในแต่ละปีเทียบเท่าถ่านหินลิกไนต์ 54 ล้านตัน

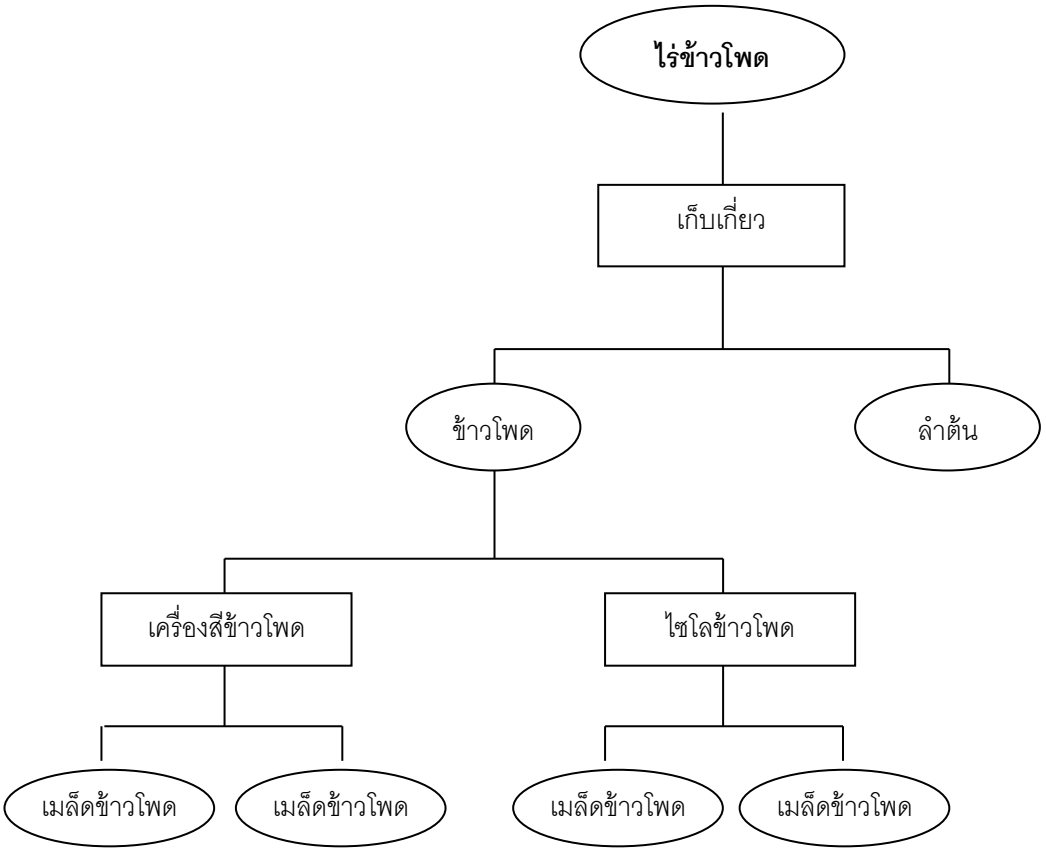
ชีวมวลมาจากการประกอบด้วยคำสองคำคือ ชีวและมวล คือ สิ่งมีชีวิตเช่น มนุษย์ พืช และสัตว์ มวลคือ วัตถุสิ่งของต่างๆ ดังนั้นชีวมวลจึงหมายถึง วัตถุหรือสสารที่ได้จากสิ่งมีชีวิต อีกความหมายหนึ่งของชีวมวลคือ เป็นแหล่งกักเก็บพลังงาน เนื่องจากพืชต้องอาศัยแสงอาทิตย์ในการสังเคราะห์แสงและการเจริญเติบโต จากนั้นแปรเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็งเช่น เศษไม้ ข้าวโพด ต้นอ้อยหรือแปรสภาพเป็นของเหลวเช่น น้ำยางพารา น้ำมันพืช ไบโอดีเซลและเอทานอล ด้วยความหลากหลายประเภทของชีวมวล จึงมีการให้นิยามความหมายของชีวมวลให้เข้าใจตรงกันไว้ว่า ชีวมวลเป็นเศษวัสดุเหลือใช้จากการแปรรูปสินค้าทางการเกษตรหรือจากการเก็บเกี่ยว (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, มูลนิธิพลังงานและสิ่งแวดล้อม, 2549)

ข้าวโพดเป็นพืชที่ปลูกง่าย นิยมปลูกในภาคเหนือและภาคอีสาน จากรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้กล่าวถึงจำนวนพื้นที่การปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ใน 40 จังหวัด มีพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด 6,081,656 ไร่ เกษตรกรจะปลูกข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดขายเพียงอย่างเดียว เมื่อเก็บเกี่ยวฝักข้าวโพดแล้ว เกษตรกรปล่อยให้ลำต้นข้าวโพดแห้งตายอยู่ในบริเวณแปลงเพาะปลูก รอจนถึงฤดูกาลเพาะปลูกใหม่ เกษตรกรจึงจะไถกลบหรือเผาทิ้งก่อนจะเริ่มปลูกใหม่ ซึ่งผลผลิตของข้าวโพดจากการสำรวจในปี 2552 มีผลผลิตถึง 4,616,119 ตันต่อปี และมีปริมาณชีวมวลที่เหลือใช้ถึง 3,343,316.51 ตันต่อปี โดยชีวมวลนั้นเป็น

ในส่วนของซังและลำต้นข้าวโพด ซึ่งมีค่าความร้อนถึง 18.04 MJ/kg (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2552) ซึ่งยังไม่มีการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำลำต้นข้าวโพดมาใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานอย่างแท้จริง จากองค์ประกอบที่กล่าวมาทำให้กล่าวได้ว่า ข้าวโพดเป็นชีวมวลของประเทศไทยชนิดหนึ่งที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนในอนาคตและยังเป็นการลดภาระในการกำจัดขยะลงไปได้อีกด้วย

2.2 **ความรู้ทั่วไปของต้นข้าวโพด**

ข้าวโพดจัดเป็นพืชล้มลุกชนิดหนึ่งที่ที่ปลูกง่ายและให้ผลผลิตในระยะเวลาที่ค่อนข้างเร็ว ในประเทศไทยนั้นนิยมปลูกข้าวโพดเป็นจำนวนมาก ซึ่งข้าวโพดที่นิยมปลูกกันเป็นจำนวนมากในประเทศไทยจะมี 2 ประเภทคือ ข้าวโพดหวานสำหรับการบริโภคโดยตรงและข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ สำหรับใช้เป็นส่วนผสมในอาหารสำหรับเลี้ยงสัตว์ ช่วงเวลาที่เริ่มปลูกกันคือ ช่วงต้นฤดูฝนประมาณเดือนเมษายนถึงเดือนมิถุนายน บริเวณที่มีการปลูกข้าวโพดเป็นจำนวนมากคือ บริเวณภาคเหนือ ภาคอีสานตอนล่างและภาคกลาง ในเขตภาคเหนือและภาคอีสานตอนบนจะปลูกข้าวโพดเป็นอาชีพ ในเขตภาคอีสานบางจังหวัดจะปลูกสลับกับมันสำปะหลัง โดยพิจารณาจากราคาพืชผลในปีนั้นๆ ข้าวโพดยังเป็นพืชที่หน่วยงานราชการสนับสนุนให้ปลูกแทนข้าวนาปรังเพราะต้องการน้ำน้อย เมื่อข้าวโพดแก่จัดจึงจะเริ่มทำการเก็บเกี่ยว วิธีการเก็บเกี่ยวนั้นจะใช้ไม้หรือเหล็กแหลมแทงปลายฝัก ปอกเปลือกลง แล้วหักข้าวโพดใส่กระสอบ นำไปกองรวมไว้เพื่อเตรียมรอสี ส่วนที่เป็นเมล็ดจะถูกนำไปขาย แต่ในพื้นที่บางแห่งซังข้าวโพดจะถูกเผาทิ้งหรือบางพื้นที่อาจจะนำไปขาย



ภาพที่ 2.1 การเก็บเกี่ยวข้าวโพด

ที่มา: ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, มูลนิธิพลังงานและสิ่งแวดล้อม, 2549

2.2.1 **เศษวัสดุเหลือใช้จากข้าวโพด** (ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล มูลนิธิพลังงานและสิ่งแวดล้อม, 2549)

- **ซังข้าวโพด**

ซังข้าวโพดนับเป็นวัตถุดิบสำคัญ ปัจจุบันได้มีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมยาเป็นจำนวนมากซังข้าวโพดสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อีกหลายอย่างเช่น เป็นเชื้อเพลิงอบเมล็ดข้าวโพดในไซโลข้าวโพด นำมาเผาผลิตเป็นถ่านอัดแท่ง นำไปผสมกับอาหารสัตว์และทำปุ๋ย เป็นต้น

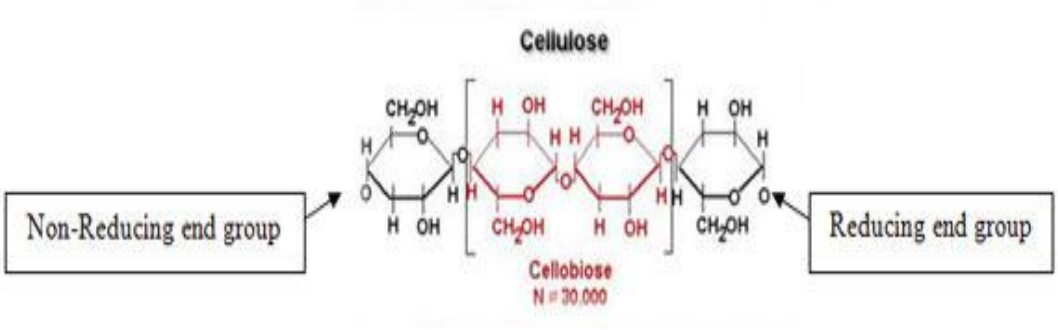
- **ลำต้นข้าวโพด**

เมื่อชาวไร่ดึงฝักเข้าโพดออกจากลำต้นแล้ว ลำต้นข้าวโพดจะถูกทิ้งอยู่ในไร่ให้แห้งและย่อยสลายตามธรรมชาติ ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีรายงานที่ชัดเจนว่ามีการนำไปใช้ประโยชน์แต่อย่างใด

2.3 โครงสร้างเซลล์พืช

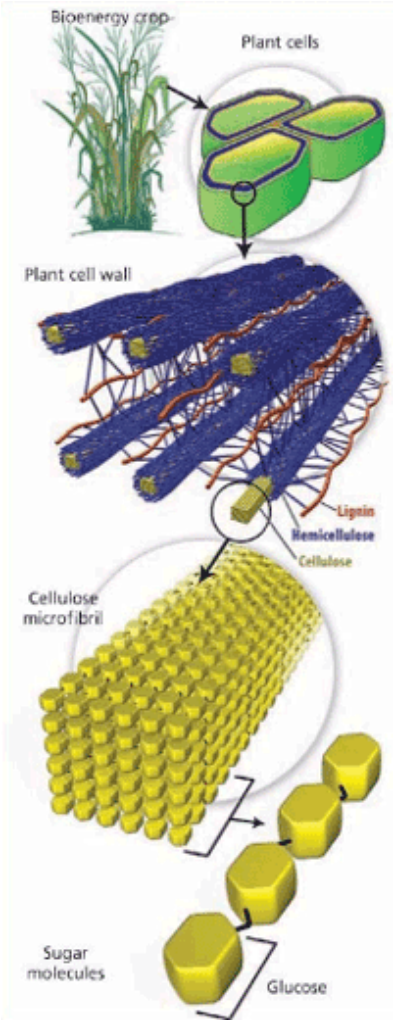
2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลส (Cellulose) จัดเป็นโพลีแซ็กคาร์ไรด์ที่ประกอบด้วยกลูโคสหลายๆ โมเลกุลมาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาว เป็นพอลิเมอร์สายตรง ไม่มีกิ่งก้านสาขา และเป็นโฮโมพอลิเมอร์ (Homopolymer) ของ ß-D-glucose ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ ß-1,4-glucosidic linkage โดยมีค่าdegree of polymerization อยู่ในช่วงประมาณ 100 ถึงมากกว่า 10,000 ซึ่งเกาะรวมกันภายใน crystalline microfibrils เซลลูโลสมีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 20,000 ถึง 75,000 ดาลตัน ซึ่งเท่ากับ 100-4,000 หน่วยกลูโคส โมเลกุลของเซลลูโลสเรียงตัวเป็นมัดเรียกว่า ไฟบริล โดยมีพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลกลูโคสที่อยู่ใกล้กันของเซลลูโลสสายหนึ่งกับเซลลูโลสอีกสายหนึ่งเชื่อมต่อกันเป็นไฟบริล (ปาริชาต คนซื่อ, 2549) เซลลูโลสมีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $C_6H_{10}O_5$ ส่วนปลายของทั้งสองข้างจะเรียกว่า Reducing eng group เป็นส่วนที่ทำปฏิกิริยาได้ง่ายที่สุดและ Non-Reducing end group ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยา เซลลูโลสจะมีสมบัติไม่ละลายน้ำและ ตัวทำละลายอินทรีย์สะเทิน (Neutral organic solvent) แต่จะละลายได้ดีใน กรดเกลือและกรดกำมะถันเข้มข้น (สุรชัย ศรีชินราช, 2553)



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างเซลลูโลส

ที่มา: สุรชัย ศรีชินราช, 2553

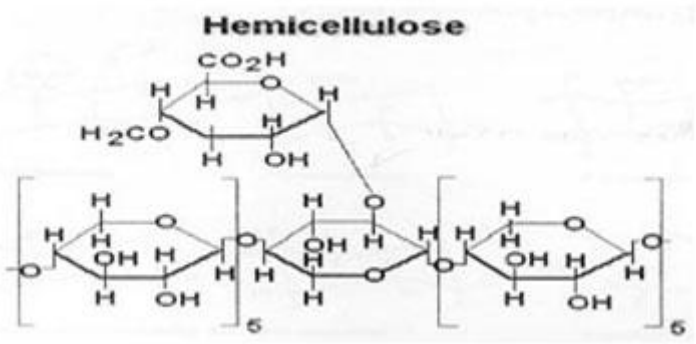


ภาพที่ 2.3 โครงสร้างเซลลูโลส

ที่มา: Yarris, L., 2010

2.3.2 **เฮมิเซลลูโลส** (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก มีสีขาวและไม่ละลายน้ำ สามารถละลายในด่างได้ดีกว่าละลายในกรด โครงสร้างมีลักษณะเป็นกิ่งจับกันอย่างหลวมๆ เป็นโพลีแซ็กคาร์ไรด์ที่พบมากในผนังเซลล์พืชเช่นกันแต่เป็นสารโพลีเมอร์ของพวก D-ไซโลสซึ่งมีแขนงข้างเป็นน้ำตาลอะราบิโนสหรือน้ำตาลชนิดอื่นๆ เฮมิเซลลูโลสจะมีสายสั้นกว่าเซลลูโลส (อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555) เฮมิเซลลูโลสทำหน้าที่เป็นสารยึดเซลลูโลสไว้ด้วยกันและช่วยให้ความแข็งแรงกับเส้นใยด้วย เฮมิเซลลูโลสสามารถแบ่งตามชนิดของน้ำตาล ได้แก่ แมนแนนและกาแลกแทน ซึ่งพืชต่างชนิดกันจะมีโครงสร้างหลักเหมือนกันแต่จะแตกต่างกันเฉพาะชนิดจำนวนและตำแหน่งของสายโซ่ ซึ่งสายโซ่ได้แก่ D-xylopyranos, L-arabinose furanose หรือ D-glucoronic (รุสนี โตะกีเล, 2552)



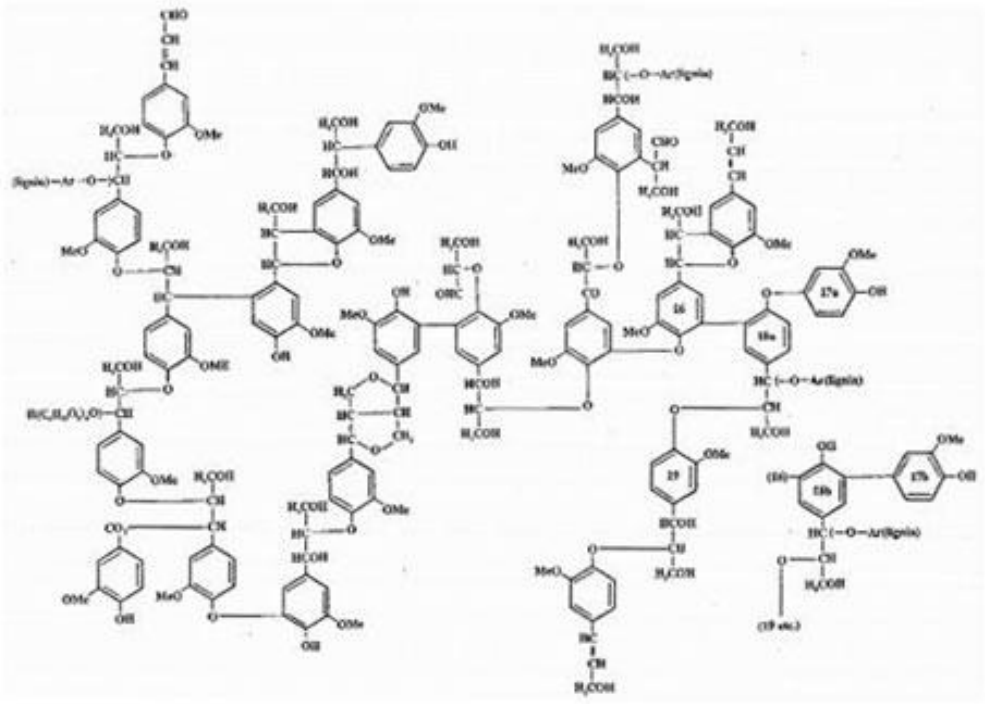
ภาพที่ 2.4 โครงสร้างเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: สุรชัย ศรีชินราช, 2553

2.3.3 **ลิกนิน** (Lignin)

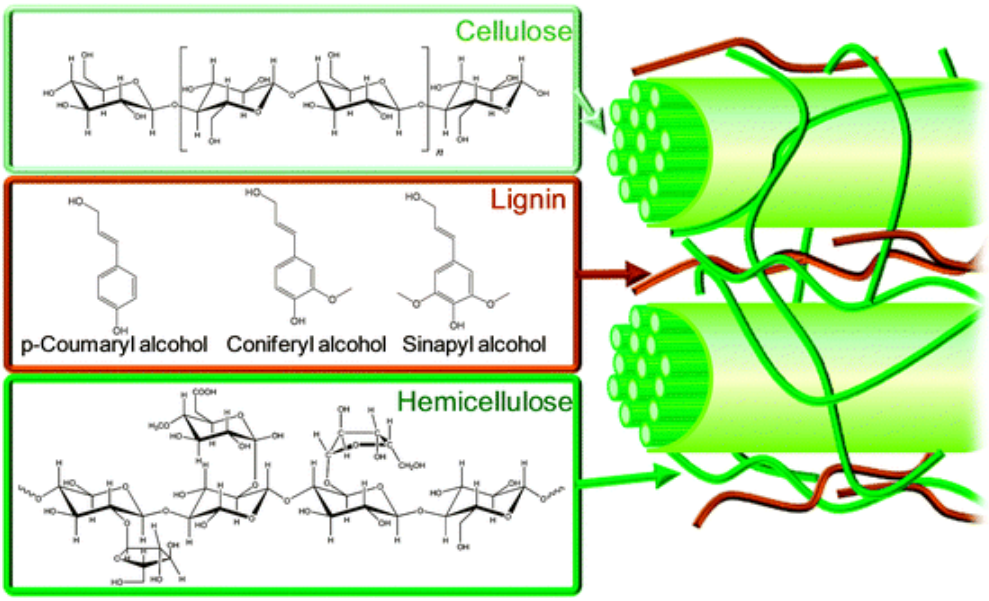
ลิกนินจัดเป็น aromatic polymer ชนิดหนึ่ง โดยมีหน่วยฟีนิลโพรเพนที่เรียงต่อกันแบบสุ่ม พันธะที่อยู่ภายในโครงสร้างหลักนั้นมีมากถึง 10 กว่าชนิด เช่น พันธะเอสเทอร์ (C-O-C) ซึ่งจะทนต่อการย่อยสลายของกรดมากและพันธะเอสเทอร์ (C-C) นั้นจะมีความทนทานต่อการย่อยสลายของกรดและด่างเช่นกัน ลิกนินจึงถูกจัดว่ามีโครงสร้างที่แข็งแรง ลิกนินมีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ$(C_{10}H_{12}O_4)_n$ ลิกนินจะมีสมบัติไม่ละลายน้ำแต่จะสามารถละลายได้ในตัวทำ

ละลายอินทรีย์บางชนิด เช่น เอทานอลหรือเมทานอลที่ร้อนและสารละลายโซเดียมไฮกดรอกไซน์ (รุสนี โตะกีเล, 2552) ลิกนินมีลักษณะทางโครงสร้างของผนังเซลล์ที่มีซับซ้อนกว่า Cellulose กับ Hemicellulose ลิกนินยังสามารถทำให้เนื้อเยื่อไม้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยกระบวนการลิกนิฟิเคชัน (Lignifications) คือ กระบวนการเจริญเพิ่มจำนวนลิกนินเพื่อเติมเต็มช่องว่างระหว่างเส้นใยเซลลูโลสและสายเฮมิเซลลูโลสของผนังเซลล์พืชและลิกนินไม่สามารถถูกย่อยได้ด้วยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศแต่จะถูกย่อยสลายได้ในภาวะที่มีออกซิเจนโดยพวกเชื้อราประเภท White rot fungi และ Moulds (อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555)



ภาพที่ 2.5 สูตรโครงสร้างของลิกนิน

ที่มา: สุรชัย ศรีชินราช, 2553

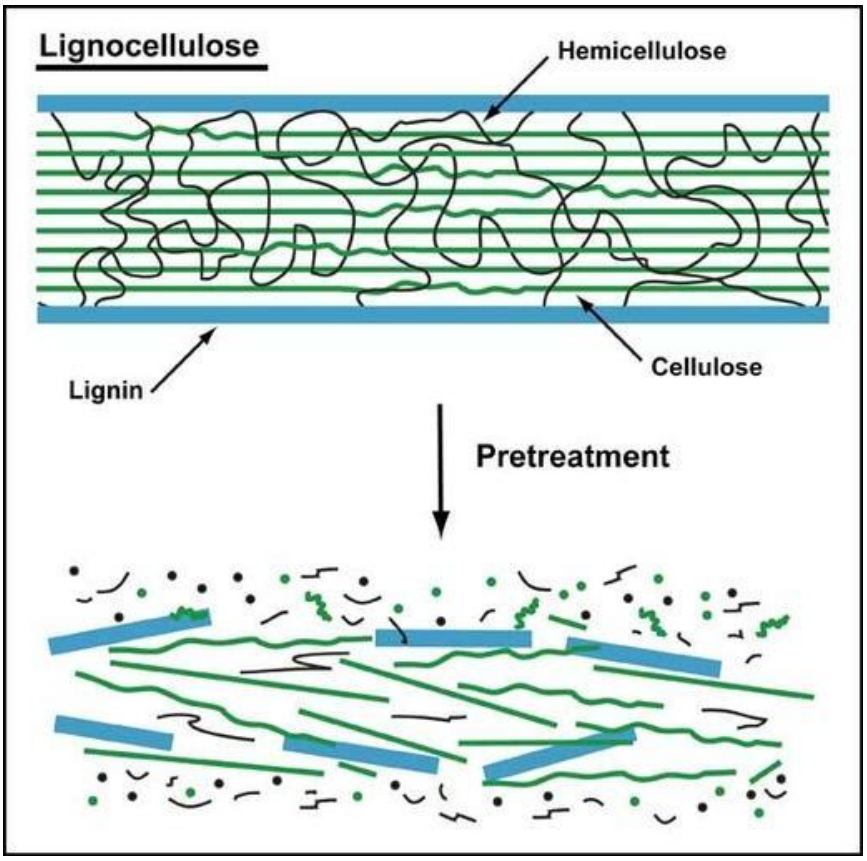


ภาพที่ 2.6 โครงสร้างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินในเซลล์พืช

ที่มา: Alonso, M. D., Wettstein, G. S., Dumesic, A. J., 2012

2.3 เทคโนโลยีสำหรับการทำ Pre-treatment สำหรับวัสดุที่มีเซลลูโลส

การปรับสภาพเบื้องต้นเป็นการปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของวัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลส ให้มีความเหมาะสมต่อกระบวนการย่อย การปรับสภาพเบื้องต้นหรือการทำ Pre-treatment นั้นมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะส่งผลต่อโครงสร้างวัตถุดิบที่แตกต่างกัน ผลจากการปรับสภาพเบื้องต้นวัตถุดิบดังภาพที่ จึงจำเป็นต้องทราบถึงชนิดของวัตถุดิบ โครงสร้างทางเคมีและองค์ประกอบอื่นๆ เพื่อให้การย่อยมีประสิทธิภาพมากที่สุด นอกจากนั้นการคำนึงถึงค่าใช้จ่ายที่จะนำมาใช้ในการดำเนินการก็มีความสำคัญที่ต้องนำมาใช้ในการเลือกวิธี (ภูมิหทัย คูประเสริฐยิ่ง และ ประมุข ภระกูลสุขสถิตย์, 2554) การปรับสภาพเบื้องต้นที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 5 วิธีหลัก ได้แก่



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและสิกนินที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น

ที่มา: Asturias, R. et al., 2007

2.3.1 Mechanical pretreatment

เป็นการลดขนาดของวัตถุดิบเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่อยู่ข้างในจะแตกออก เช่น วิธีการ การหั่น การทุบ การสับหรือการบด วิธีนี่นับว่าให้ผลค่อนข้างดีและยังใช้ต้นทุนต่ำ สามารถลดปริมาณการใช้เอนไซม์ในการย่อยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสลงอีกด้วย

2.3.2 Physical pretreatment

การเพิ่มอุณหภูมิและการแผ่รังสี เป็นวิธีการทางกายภาพที่ประสบผลสำเร็จมากที่สุดวิธีหนึ่ง วิธีการที่เรียกว่า Thermogravimeric treatment โดยเพิ่มอุณหภูมิเป็น 1,100 เคลวิน ภายใต้สภาวะทั้งที่มีก๊าซเฉื่อยและตัวออกซิแดนท์ สามารถทำให้เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส

และลิกนินย่อยสลายได้ดี ส่วนวิธีการเผาแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Pyrolysis) จะนิยมใช้กับพวกเปลือกถั่วชนิดต่าง ๆ ฟางข้าวหรือพวกขี้เลื่อย ที่อุณหภูมิ 600-1,200 เคลวิน ซึ่งจะให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นพวกถ่าน ของเหลวและก๊าซมากกว่า วิธีธรรมดาทั่วไป 55% สำหรับการแผ่รังสีด้วยคลื่นไมโครเวฟที่ 700 W ด้วยเวลานานต่างๆ กัน พบว่ามีการสูญเสียน้ำหนักของวัตถุดิบไปบ้าง เนื่องจากมีการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน แต่ทำให้อัตราการย่อยสลายโดยใช้ด่างร่วมด้วยเพิ่มขึ้นมาก

2.3.3 Physico-chemical pretreatment

เป็นการนำ 2 วิธีมาใช้ร่วมกันระหว่างวิธี Chemical หรือการใช้สารเคมีมาใช้ร่วมกับวิธี Physical treatment หรือวิธีทางกายภาพ สารเคมีที่จะนำมาใช้นั้นควรเลือกให้มีความเหมาะสมต่อวัตถุดิบ เช่น การเลือกจากโครงสร้างของวัตถุดิบ ชนิดหรือองค์ประกอบของวัตถุดิบ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดโดยวิธีการปรับสภาพทางกายภาพที่นำมาใช้ร่วมกันก็ควรเลือกให้เหมาะสมกับสารเคมีและวัตถุดิบ วิธีที่นิยมนำมาใช้ร่วมกัน เช่น การวิธี steam explosion หรือการใช้แรงดันไอน้ำภายใต้ความดันสูงร่วมกับการใช้สารละลายด่าง สารละลายด่างที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ เช่น สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากสามารถกำจัดลิกนินได้ดี ซึ่งนอกจากกำจัดลิกนินแล้วยังสามารถกำจัดเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนออกไปได้ด้วย ทั้งนี้การนำสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มาใช้ต้องคำนึงถึงระยะเวลา อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อวัตุดิบที่นำมาใช้ด้วย แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ก็จัดว่าเป็นสารเคมีที่นิยมเช่นกัน แต่ข้อเสียของการใช้แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์คือ ต้องใช้เวลานานกว่าสารละลายเดียมไฮดรอกไซด์และยังไม่สามารถกำจัดลิกนินออกได้หมด วิธีการอื่นที่ใช้กันในปัจจุบัน ได้แก่ วิธี wet oxidation pretreatment วิธี Liquid hot water pretreatment เป็นต้น

2.3.4 Chemical pretreatment

การใช้สารละลายกรดในการปรับสภาพ สารละลารกรดจะช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสนั้นสามารถย่อยสลายในสารละลายกรดได้ดีกว่าเซลลูโลส ส่วนการปรับสภาพโดยการใช้สารละลายด่างจะช่วยเพิ่ม

ปริมาณการละลายของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ (ชัชนันท์ นิวาสวงษ์ และ เฉลิม เรืองวิริยะชัย, 2555)

2.3.5 Biological pretreatment

Biological pretreatment เป็นการ Pretreatment ที่ต้องพึ่งพาจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่เป็นแบคทีเรียและเชื้อรา รวมทั้งเอนไซม์ที่ผลิตจากจุลชีพ เช่น เชื้อรา แบคทีเรีย เพราะจุลชีพเหล่านี้สามารถย่อยสลายเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ เชื้อราและแบคทีเรียเหล่านี้ได้แก่ Penicillium camemberti, Trichoderma spp, Streptomyces griseus, Aspergillus terreus เป็นต้น ส่วนเอนไซม์ที่ใช้ย่อยลิกโนเซลลูโลสเช่น Cellulases, Lignin peroxidase, Laccase, Acetylesterase, Xylanese เป็นต้น (อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555)

2.4 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ เป็นจัดรูปแบบพลังงานทดแทนชนิดหนึ่งที่สะอาด เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม ได้แก่ แบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียผลิตมีเทน (Methane producing bacteria) โดยแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตกรดนั้น จะทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็ก จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตมีเทนจะนำสารอินทรีย์ที่มีขนาดโครงสร้างโมเลกุลที่เล็กลงแล้วมาใช้เป็นสารอาหารและจะย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) นอกจากนี้อาจจะมีก๊าซอื่นๆ เกิดขึ้น แต่เกิดในปริมาณที่น้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) แอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น (ดังแสดงในตารางที่ 2.3) ในกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพจะต้องระวังไม่ให้อากาศเข้าไป หากอากาศเข้าไปสัมผัสกับแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ผลิตมีเทน จะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตมีเทนลดลงได้ (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้และสภาวะต่างๆ ของการหมัก ซึ่งก๊าซชีวภาพที่นำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้จะต้องมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 50

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	อัตราส่วน
มีเทน (CH_4)	50 - 80 % vol.
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	20 – 50 % vol.
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	50-5,000 ppm
แอมโมเนีย (NH_3)	0-300 ppm
ออกซิเจน (O_2)	< 1 % vol.
ไนโตรเจน (N_2)	1 - 4 % vol.
ความชื้น (H_2O)	2-5 % wt (อิ่มตัว)

ที่มา: กลุ่มพัฒนามาตรฐานน้ำมันเชื้อเพลิง สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง, 2554

2.4.1 **กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ**

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เกิดจากกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาแบบสภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic process) กระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาจะต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดไร้ออกซิเจนหลายกลุ่ม โดยปฏิกิริยาทางชีวเคมีเกิดขึ้นต้องอาศัยเอนไซม์หรือตัวเร่งปฏิกิริยามาช่วยในการเข้าทำปฏิกิริยา กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน มีรายละเอียดดังนี้

2.4.1.1 **กระบวนการไฮโดรลิซิส** (Hydrolysis)

กระบวนการไฮโดรลิซิส (Hydrolysis) เกิดขึ้นเป็นขั้นตอนแรก เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ พวกโปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมัน ให้มีขนาดเล็กลง ขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ของแบคทีเรีย โดยอาศัยเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาเพื่อใช้ในการย่อยสลาย จนแบคทีเรียสามารถดูดซึมเข้าสู่เซลล์ได้ โดยแบคทีเรียกลุ่มที่ทำหน้าที่ในขั้นตอนนี้นั้นจะเรียกว่า ไฮโดรไลซิงแบคทีเรีย

2.4.1.2 **กระบวนการสร้างกรด** (Acidogenesis)

กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) เป็นปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก จำพวกน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดอะมิโนและกรดไขมัน ให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเช่น กรดอะซิติก กรดบิวไทริกและกรดโพรไพโอนิก เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการผลิตไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วย ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของสับสเตรทและความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น

2.4.1.3 **กระบวนการผลิตกรดอะซิติค** (Acetogenesis)

กระบวนการผลิตกรดอะซิติค (Acetogenesis) เป็นปฏิกิริยาย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่ระเหยง่ายที่เกิดจากขั้นตอนของปฏิกิริยาการเกิดกรดให้เป็นกรดอะซิติกจากแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างกรดอะซิติก (Acetogenic) ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่สำคัญของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยอาศัยจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ผลิตก๊าซมีเทนต้องการสารอาหารที่มีความจำเพาะสูง เป็นจุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอมให้เป็นกรดอะซิติกได้ ได้แก่ จุลินทรีย์ที่สร้างไฮโดรเจน (Hydrogen producing acetogenic bacteria) ผลผลิตที่ได้นั้น ได้แก่ กรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน

2.4.1.4 **กระบวนการสร้างมีเทน** (Methanogenesis)

ปฏิกิริยาการสร้างก๊าซมีเทน เป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจน ให้เป็นก๊าซมีเทนภายใต้ภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างมีเทน (Methanogen) จะเป็นแบคทีเรียที่มีอัตราการเจริญเติบโตช้ามากและยังเป็นแบคทีเรียที่สามารถใช้สารตั้งต้นได้เพียงไม่กี่ชนิดคือ สารที่มีคาร์บอนเพียง 1 หรือ 2 คาร์บอนเท่านั้น ส่วนกรดอินทรีย์ที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตเป็นก๊าซมีเทนได้ จึงทำให้แบคทีเรียในกลุ่มนี้ต้องอาศัยแบคทีเรียชนิดอื่นๆ ให้ทำการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ ให้เป็นกรดอะซิติกหรือก๊าซไฮโดรเจน หลังจากนั้นแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนจะนำสารเหล่านั้นมาย่อยสลายต่อได้ นอกจากนั้นแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทนยังเป็นแบคทีเรียที่มีความไวต่อสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมากเช่น ไม่อาจทนต่อก๊าซออกซิเจนและอาจเจริญเติบโตได้ไม่ดีเมื่ออยู่ในช่วงพีเอชนอกเหนือจากช่วง 6.8 – 9.2 เป็นต้น

2.4.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้อง

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ ต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดร่วมกัน ซึ่งแบคทีเรียที่มีบทบาทต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (Methane producint bacteria)

2.4.2.1 แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria)

แบคทีเรียส่วนใหญ่ในกลุ่มนี้ คือ Facultative anaerobic bacteria ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะแวดล้อมที่มีและไม่มีอากาศ โดยได้รับพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย แอลกอฮอล์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ สภาวะที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตได้ดีในช่วงค่าพีเอช 4.0 – 6.5 และทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มดังนี้

- อะซิโดเจนนิคแบคทีเรีย แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นกลุ่มใหญ่ที่สุดในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ สามารถใช้อาหารได้หลายชนิด มีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบคทีเรียกลุ่มนี้ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำได้ ผลผลิตที่ได้จากการย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิออนิก กรดบิวทีริก กรดฟอร์มิก เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้สารประกอบพวกแอลกอฮอล์ คีโตน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน แบคทีเรียในกลุ่มนี้ประกอบด้วย แบคทีเรียกลุ่มที่ไม่สามารถสัมผัสกับอากาศได้และแบคทีเรียกลุ่มที่เจริญได้ทั้งที่มีและไม่มีอากาศ (Facultative anaerobic bacteria)

- อะซิโตเจนนิคแบคทีเรีย แบคทีเรียกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายในกระบวนการไฮโดรไลซีสและอะซิโดเจนีซีส แล้วเปลี่ยนเป็นให้กรดอะซิติก สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย กลุ่มแรกคือ กลุ่ม Hydrogen producing acetogenic bacteria ซึ่งจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซีสให้เป็นกรดอะซิติกและ

ก๊าซไฮโดรเจนหรือกรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน กลุ่มที่ 2 คือ กลุ่ม Homoacetogenic bacteria โดยจะแบ่งให้ Autotroph ใช้สารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอม เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนในการเจริญเติบโตและได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นอะซิเตต (หรือกรดอะซิติก) ส่วนกลุ่ม Heterotroph จะใช้สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอมในการเจริญเติบโต ให้ได้ผลผลิตเป็นอะซิเตตและโพรพิออเนต ซึ่งเป็นสารตัวกลางที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน

2.4.2.2 **แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน** (Methane producing bacteria)

แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนสามารถใช้สารอาหารได้ไม่กี่ชนิด แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถแบ่งตามชนิดการใช้สารอาหารตั้งต้นได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือ กลุ่ม Hydrogenotrophic methanogens หรือ Hydrogen utilizing chemolithotrophs ซึ่งเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไปเป็นก๊าซมีเทน แบคทีเรียกลุ่มนี้มีบทบาทสำคัญคือ จะใช้ก๊าซไอโดรเจนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศขั้นตอนที่ 2 โดยช่วยคงสภาวะให้มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่ำลง ซึ่งมีผลต่อการเกิดอะซิเตตอย่างต่อเนื่อง อีกกลุ่มก็คือ กลุ่ม Acetotrophic methanogens หรือ Acetoclastic bacteria ซึ่งจะเปลี่ยนอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นประมาณ 2 ใน 3 นั้นเกิดจากการเปลี่ยนอะซิเตตไปเป็นก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่ม Acetotrophic methanogens ที่เหลือจะเป็นผลของปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน โดยแบคทีเรียกลุ่ม Hydrogenotrophic methanogens

2.4.3 ***สภาวะแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้อากาศ***

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศจำเป็นต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดที่เจริญเติบโตร่วมกัน ดังนั้นในการเริ่มต้นเดินระบบจึงต้องมีสภาวะแวดล้อมและปัจจัยในระบบที่เหมาะสม หากสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป จะทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่เจริญเติบโต ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจนอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ ดังนั้นจึงต้องเข้าใจถึงสภาวะแวดล้อมต่างๆ ที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรีย สภาวะแวดล้อมและปัจจัยดังกล่าวนั้น มีดังต่อไปนี้

2.4.3.1 **อุณหภูมิ**

อุณหภูมิมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาชีวเคมีจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้นและอุณหภูมิที่แบคทีเรียเจริญเติบโตได้ เป็นอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของเซลล์และกิจกรรมของเอนไซม์ภายในเซลล์ อุณหภูมิถูกแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ

- ช่วงไซโครฟิลิค (Psychrophillic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20 °C
- ช่วงมีโซฟิลิค (Mesophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20 – 45 °C
- ช่วงเทอร์โมฟิลิค (Thermophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 45 °C

สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ จะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วงที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นในระบบได้ดีคือ ช่วง 30 – 38 °C และช่วง 48 – 57 °C อย่างไรก็ตาม การเดินระบบที่ช่วงอุณหภูมิสูงมีข้อเสียที่ Thermophilic bacteria ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ไม่ดีเท่ากับ Mesophilic bacteria จึงมีความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของระบบสูงและการเดินระบบที่อุณหภูมิสูงยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์อีกด้วย

2.4.3.2 **ค่าความเป็นกรด-ด่าง** (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ เป็นตัวที่วัดค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบ สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม ควรอยู่ในช่วง 6–7.4 ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศนั้น มีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง เกิดขึ้นอยู่เป็นประจำ สาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง ภายในถังปฏิกรณ์คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ถ้ามีการป้อนสารอินทรีย์เข้าในปริมาณมากเกินไป ก็จะทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดผลิตกรดอินทรย์ระเหยง่ายในปริมาณมากจนแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่สามารถใช้ได้ทัน จึงเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ ส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบลดลง ดังนั้นระบบจะต้องมีความสามารถในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-

ด่างที่ดี เพื่อรับมือกับกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบ หากระบบมีค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) ที่มากพอ ก็จะสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบได้

2.4.3.3 **ค่าความเป็นด่าง** (Alkalinity: Alk)

ค่าความเป็นด่าง เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของระบบ ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด - ด่าง และยังเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของระบบ กล่าวคือ ถ้าระบบมีค่าความเป็นด่างสูง แสดงว่า ระบบมีปริมาณบัฟเฟอร์สูง ระบบสามารถรักษาค่าความเป็นกรด - ด่าง ให้คงตัวอยู่ได้นาน ซึ่งค่าความเป็นด่างภายในระบบควรมีอยู่ในช่วง 1,000 – 3,000 มิลลิกรัมของ $CaCO_3$/ลิตร ค่าความเป็นด่างที่มีในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ ไม่ควรจะต่ำกว่า 1,000 มิลลิกรัมของ $CaCO_3$/ลิตร เพื่อช่วยต้านทานกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด - ด่าง ดังนั้น ในการควบคุมระบบให้ทำงานเป็นปกติ จำเป็นต้องรักษาค่าความเป็นด่างไม่ให้มีค่าต่ำจนเกินไป เพื่อรักษาระดับค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบบำบัด

2.4.3.4 **กรดอินทรีย์ระเหยง่าย** (Volatile fatty acids: VFA)

ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย มีความสำคัญในการตรวจสอบสถานะสมดุลของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ กรดอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทีริกและกรดโพรพิออนิก เป็นต้น ผลผลิตเหล่านี้เป็นสารตัวกลางส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด หากพบว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีมากขึ้น จะเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบ ในระบบที่มีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณมาก (> 2,000 มิลลิกรัมของกรดอะซิติก/ลิตร) ช่วงแรกจะทำให้ค่าความเป็นด่างของระบบลดลง แล้วถ้ายังไม่มีการกำจัดปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายให้น้อยลง จะทำให้ความเป็นกรด–ด่างของระบบลดต่ำลงและถ้าค่าความเป็นกรด–ด่างมีค่าต่ำกว่า 6.5 จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน หากยังไม่ได้ทำการแก้ไขปล่อยให้ค่าความเป็นกรด–ด่างลดต่ำลงถึง 4.5 - 5.0 ก็จะทำให้ระบบเสียสมดุล

เป็นผลให้ระบบล้มเหลวได้ ในสภาวะปกติปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายภายในถังปฏิกรณ์ไม่ควรเกิน 2,000 มิลลิกรัมของกรดอะซิติก/ลิตร และวิธีการควบคุมระบบที่ดีที่สุด ควรให้มีค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อค่าความเป็นด่างไม่ควรเกิน 0.3–0.4 เมื่อระบบเกิดกรณีฉุกเฉิน จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องรีบทำการแก้ไขให้ระบบกลับสู่สภาพสมดุล วิธีการที่จะแก้ไข ได้แก่ ทำการตรวจสอบที่มาของการป้อนสารอินทรีย์ที่มากเกิน เพื่อเป็นการหาสาเหตุของปัญหา หรืออาจทำการลดการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบและอาจควรมีบ่อเก็บน้ำเสียสำรอง ส่วนอีกวิธีหนึ่งนั้นเป็นการแก้ไขกรณีฉุกเฉินที่ยังไม่ทราบสาเหตุของปัญหาคือ ควบคุมค่าความเป็นกรด–ด่างให้เหมาะสมกับระบบ อาจโดยการเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นต้น แต่ไม่ควรใช้ปูนขาว $Ca(OH)_2$ เนื่องจากอาจจะทำให้เกิดการอุดตันในระบบได้

2.4.3.5 **อัตราภาระการรับสารอินทรีย์** (Organic loading rate: OLR)

อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ มีหน่วยเป็นน้ำหนักของซีโอดีที่อยู่ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดต่อปริมาตรของบ่อบำบัดต่อวัน (kg COD/m^3.วัน) อัตราภาระการรับสารอินทรีย์มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด (Feeding rate) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการรักษาเสถียรภาพของระบบให้คงที่ การเปลี่ยนอัตราภาระการรับสารอินทรีย์ นั้นอาจใช้การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดแต่อาจจะมีผลต่อระยะเวลาการกักเก็บน้ำเสีย (Hydraulic retention time: HRT) ภายในระบบบำบัดด้วย หรือใช้การเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำเสียซึ่งวิธีนี้จะค่อนข้างยาก เนื่องจากน้ำทิ้งของโรงงานแต่ละประเภทมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน

ดังนั้น ในทางปฏิบัติการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดทำได้ง่ายกว่า จะต้องมีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดให้สัมพันธ์กับระยะเวลาที่เหมาะสมในการสัมผัสกันระหว่างแบคทีเรียกับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เพื่อให้ระบบบำบัดสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.4.3.6 **สารพิษ** (Toxic substances)

โดยทั่วไปในน้ำเสียมักมีสารพิษหลายชนิดปะปนเป็นองค์ประกอบอยู่ ซึ่งระดับความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิด และปริมาณของสารนั้น ๆ หากมีการสะสมของสารบางอย่างภายในถังปฏิกรณ์ในปริมาณที่มากเกิน จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ โดยอาจมีผลต่อการยับยั้ง (Inhibition) การเจริญเติบโต จนถึงทำให้แบคทีเรียตายได้ และจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพ หรือเสถียรภาพของระบบลดลง

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ ได้แบ่งสารพิษที่มีผลต่อแบคทีเรีย เช่น พิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งมีผลต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน พิษของสารโลหะหนักชนิดต่างๆ พิษของแอมโมเนียมอิออน (NH_{4+}) เป็นต้น ขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นของสารพิษที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศ สำหรับโลหะหนักบางชนิดเช่น นิเกิล (Ni) โคบอลท์ (Co) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) นั้นจัดเป็นธาตุอาหาร (Trace element) ที่จำเป็นต่อแบคทีเรียด้วย ซึ่งมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียมีความต้องการในปริมาณที่ต่ำมาก ดังนั้นหากมีปริมาณที่มากจนเกินไป อาจเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนได้

2.4.4 **ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่นิยมใช้**

เมื่อองค์ประกอบต่างๆ ครบถ้วน เช่น มีแบคทีเรีย สารอินทรีย์ อาหารเสริมและสิ่งแวดล้อมอื่นๆ มีความเหมาะสม โดยเป็นสภาวะที่ปราศจากก๊าซออกซิเจน กระบวนการสร้างก๊าซชีวภาพก็จะสามารถเกิดได้ตามธรรมชาติทันที ดังนั้นในธรรมชาติการเกิดก๊าซชีวภาพนั้นเกิดในบ่อที่มีการหมัก แต่กระบวนการที่เกิดในธรรมชาตินั้นอัตราการสร้างก๊าซชีวภาพจะเร็วหรือช้าจะถูกกำหนดโดยธรรมชาติ ซึ่งปัจจุบันสามารถสร้างระบบขึ้นมาได้ โดยควบคุมสิ่งแวดล้อมต่างๆ ให้เหมาะสม เพื่อให้แบคทีเรียสามารถทำงานได้ตามความต้องการ ระบบก๊าซชีวภาพที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่

ระบบบ่อไร้อากาศ (Anaerobic ponds) เป็นระบบบ่อที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากค่าใช้จ่ายถูกสุด แต่มีข้อเสียคือ เกิดกลิ่นเหม็นรบกวน และใช้พื้นที่มาก

2.4.4.1 ระบบบ่อไร้อากาศแบบคลุมบ่อ (Anaerobic covered lagoons) เป็นระบบที่ถูกดัดแปลงมาจากระบบบ่อไร้อากาศ โดยมีการคลุมคลุมบ่อเพื่อเก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและนำไปใช้ประโยชน์ ข้อดีของระบบนี้คือ ไม่มีกลิ่นเหม็นรบกวนและสามารถใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพได้

2.4.4.2 ระบบกวนสมบูรณ์ (CSTR) โดยทั่วไปมักเป็นถังเหล็กหรือถังคอนกรีตเสริมเหล็ก ภายในถังมีการกวนผสมกันอย่างทั่วถึง เพื่อให้สารอาหารสามารถสัมผัสกับแบคทีเรียได้อย่างทั่วถึง แต่ข้อเสียของระบบ คือ น้ำทิ้งที่ไหลออกจากถังจะมีแบคทีเรียปะปนออกไปด้วย ทำให้ความสามารถการทำงานของระบบลดต่ำลง

2.4.4.3 ระบบแอนแอโรบิคคอนแทค (Anaerobic contact) เป็นระบบที่พัฒนาจากระบบกวนสมบูรณ์คือ มีการนำน้ำที่ไหลออกจากระบบกวนสมบูรณ์ไปแยกตะกอนออก โดยใช้ถังตกตะกอนแล้วสูบตะกอนกลับเข้ามายังถังกวนสมบูรณ์ใหม่ เพื่อทำหน้าที่ผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป

2.4.4.4 ระบบถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic filter) เป็นระบบที่มีการใส่ตัวกลางลงไป ส่วนมากจะใช้เป็นพลาสติก เพื่อให้แบคทีเรียยึดเกาะติดและไหลออกไปจากถังผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อน้ำไหลออกนอกถังระบบนี้จะทำให้ปริมาณของแบคทีเรียในระบบมีมาก ทำให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี

2.4.4.5 ระบบยูเอเอสบี (UASB) เป็นระบบที่นิยมอย่างมากทั่วโลก แบคทีเรียในระบบจะรวมตัวจับกันเป็นเม็ดมีลักษณะคล้ายกับเม็ดแมงลัก ขนาด 0.4 – 2 มิลลิเมตร การรวมตัวของแบคทีเรียปริมาณมาก (ซึ่งแต่ละเซลมีขนาดเพียงประมาณ 0.001 มิลลิเมตร) จะทำให้เม็ดตะกอนจมตัวและสะสมในระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้มาก ทำให้ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี

2.4.4.6 ระบบอีจีเอสบี (EGSB) เป็นระบบที่พัฒนาต่อเนื่องมาจากระบบยูเอเอสบี โดยจะเน้นที่การสัมผัสและการถ่ายเทมวลสารระหว่างแบคทีเรียและสารอาหารให้ดีขึ้น แต่ต้องออกแบบระบบให้ดีและมีการหมั่นตรวจสอบการทำงานของระบบอย่างสม่ำเสมอ

2.4.4.7 ระบบย่อยสลัดจ์แบบราง (Plug flow digester) เป็นระบบที่นิยมใช้ในฟาร์มหมู เนื่องจากมีสารแขวนลอยอยู่ค่อนข้างมาก

2.5 กระบวนการหมัก (Fermention)

การหมัก (Fermention) เป็นการสร้างพลังงานจากกระบวนการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ โดยมีสารอินทรีย์เป็นทั้งตัวรับอิเล็กตรอน ส่วนการหมักในทางจุลชีววิทยาอุตสาหกรรม หมายถึง กระบวนการผลิตผลผลิตใดก็ตาม ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์จำนวนมาก (Mass culture) ซึ่งจะครอบคลุมทั้งกระบวนการแบบใช้และไม่ใช้ออกซิเจน ในขณะที่การหมักทางชีวเคมีจะหมายถึงเฉพาะกระบวนการแบบไม่ใช้ออกซิเจนเท่านั้น

2.5.1 ชนิดของการหมัก

หากใช้ความต้องการอากาศเป็นเกณฑ์ในการแบ่งประเภทของการหมักแล้ว สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดคือ ชนิด Aerobic fermentation เป็นการหมักที่ต้องการอากาศ เช่น การหมักกรดอะซิติกและกรดซิตริก และชนิด Anaerobic fermentation เป็นการหมักที่ไม่ต้องการอากาศเช่น การหมักอะซิโตนและบิวทานอล แต่ถ้าหากใช้ลักษณะของกระบวนการหมักมาใช้เป็นตัวแบ่งประเภท จะแบ่งได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

2.5.1.1 Batch fermentation เป็นการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งทำในระบบปิดที่มีสารอาหารเริ่มต้นปริมาณจำกัด เมื่อใส่จุลินทรีย์ที่ต้องการเพาะเลี้ยงลงไปในระบบแล้ว จะไม่มีการเติมสารอาหารใดๆ เพิ่มลงไปอีก

2.5.1.2 Continuous fermentation เป็นการหมักแบบต่อเนื่อง โดยมีการเติมอาหารใหม่และถ่ายอาหารเก่าออกจากระบบในอัตราเดียวกันตลอดเวลา ทำให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเพิ่มจำนวนได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีข้อจำกัดในเรื่องอาหาร

2.5.1.3 Fed – batch fermentation เป็นการหมักที่มีการเติมสารอาหารบางอย่างเพิ่มลงไปในอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยงจุลินทรีย์เป็นระยะๆ เพื่อให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตและสามารถใช้สารอาหารได้อย่างเต็มที่ โดยไม่มีการถ่ายอาหารเก่า การหมักแบบนี้ส่วนใหญ่ใช้เพื่อ

แก้ปัญหาเกี่ยวกับข้อกำจัดเรื่องความเข้มข้นของสารอาหารเริ่มต้น ซึ่งถ้าใช้มากไปอาจมีผลยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ได้หรืออาจทำให้มีปัญหาในการให้ออกซิเจนในปริมาณที่เพียงพอได้ยาก

2.5.2 การหมักร่วม

หลักเกณฑ์พื้นฐานสำหรับการเลือกวัตถุดิบในการหมักร่วมเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพคือ วัตถุดิบต้องประกอบไปด้วย วัตถุดิบหลักและวัตถุดิบรอง โดยวัตถุดิบหลักส่วนใหญ่เป็นพวกมูลสัตว์หรือกากตะกอนและวัตถุดิบรองเป็นพวกที่มีเส้นใยในปริมาณที่สูง เนื่องจากเส้นใยจะมีสารประกอบพวกเซลลูโลสในปริมาณมาก ส่งผลให้การเกิดก๊าซมีเทนได้เพิ่มขึ้น การหมักร่วมจะช่วยให้เกิดความสมดุลระหว่างค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) และช่วยเพิ่มค่า C/N Ratio ให้สูงขึ้นกว่าการหมักด้วยวัตถุดิบเพียงชนิดเดียว โดยค่า C/N Ratio มีส่วนช่วยยับยั้งการเปลี่ยนไนโตรเจนส่วนเกินไปเป็นแอมโมเนีย อันเป็นตัวยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยทั่วไปค่า C/N Ratio ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศอยู่ช่วง 8 – 23

ผลพลอยได้ของการผลิตก๊าซชีวภาพคือ กากตะกอนที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพ สำหรับการปลูกพืชแทนการใช้ปุ๋ยเคมีที่มีราคาสูงได้ เนื่องจากกากตะกอนจากการหมักจะประกอบด้วยธาตุอาหารหลักธาตุ อาหารรองและธาตุอาหารเสริมที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ กระบวนการหมักร่วมแบบไร้อากาศจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจที่จะนำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพและการกำจัดของเสีย รวมทั้งได้ปุ๋ยชีวภาพในปริมาณที่มากขึ้นกว่าการหมักโดยใช้วัตถุดิบจากมูลสัตว์เพียงชนิดเดียว

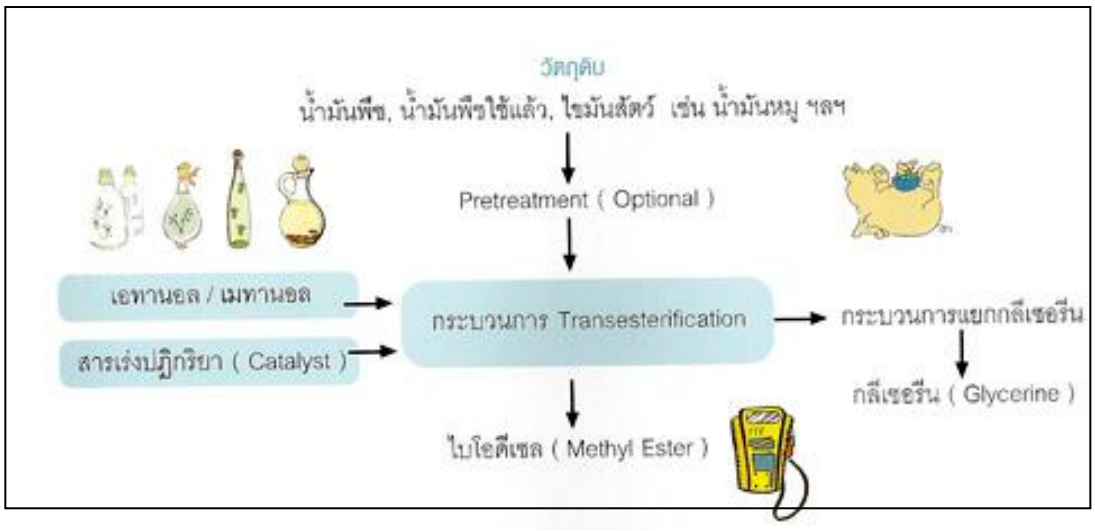
2.6 การผลิตไบโอดีเซล

ไบโอดีเซล คือ น้ำมันเชื้อเพลิงที่เป็นพลังงานทดแทนน้ำมันดีเซล ซึ่งได้มาจากน้ำมันพืชหรือน้ำมันสัตว์ โดยผ่านกระบวนการทางเคมีกับแอลกอฮอล์หรือกระบวนการทรานเอสเทอริฟิเคชั่น ซึ่งเป็นกระบวนการที่นำน้ำมันพืช ไขมันสัตว์หรือจากน้ำมันใช้แล้ว มาทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ โดยมีเบส (ด่าง) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ส่วนใหญ่นิยมใช้เมทานอล และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (โซดาไฟ) ปฏิกิริยานี้จะเกิดผลิตภัณฑ์ที่ผสมระหว่างไบโอดีเซลและกลีเซอรอล จึงต้องมีการแยก

ชั้นกลีเซอรอลออกจากไบโอดีเซลแล้วนำไบโอดีเซลที่ได้มาล้างน้ำ จากนั้นแยกน้ำออกจนได้ไบโอดีเซลที่บริสุทธิ์ วัตถุดิบที่นำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลได้แก่ น้ำมันพืชใช้แล้วและน้ำมันพืชสกัดใหม่จากปาล์มน้ำมัน มะพร้าว ถั่วเหลือง ละหุ่ง งา เมล็ดทานตะวัน โดยปาล์มน้ำมันเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซลที่มีศักยภาพสูงสุดในประเทศไทย เนื่องจากมีต้นทุนการผลิตต่ำ ปริมาณผลผลิตสูงและราคาต่ำกว่าพืชน้ำมันอื่น จึงถูกกำหนดให้เป็นวัตถุดิบหลักสำหรับผลิตไบโอดีเซล

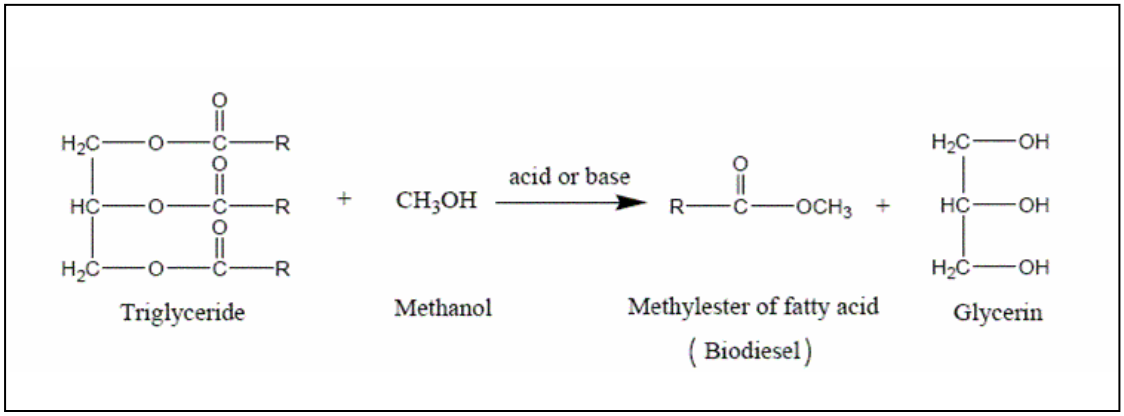
นอกจากนี้ ไบโอดีเซลได้เป็นที่นิยมใช้ในต่างประเทศมากกว่า 20 ปี โดยในต่างประเทศมีกำลังการผลิตไบโอดีเซลหลายพันล้านลิตรต่อปี ใช้ไบโอดีเซลในสูตร B20 (ไบโอดีเซล 20% ผสมในน้ำมันดีเซล 80%) ในส่วนของประเทศไทยมีการผลิตและจำหน่ายไบโอดีเซลในเชิงพาณิชย์ในสูตร B5 (ไบโอดีเซล 5% ผสมในน้ำมันดีเซล 95%) ของปั๊มปตท. และบางจาก ปัจจุบันมีการผลิตไบโอดีเซลใช้เองของชาวบ้านและชุมชน ที่รวมกลุ่มกันผลิตอีกเป็นจำนวนมาก

ไบโอดีเซลจึงเป็นพลังงานทดแทนที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทยและยังเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยพัฒนาประเทศ เนื่องจากผลิตได้จากวัตถุดิบหลักที่มีอยู่แล้วในประเทศไทย ทำให้สามารถลดการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมจากต่างประเทศ ลดการขาดดุลการค้าและช่วยเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศไทยอีกประการหนึ่งด้วย



ภาพที่ 2.8 แผนผังแสดงกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

ที่มา: ชมพูนุท พรเจริญนพ, 2551

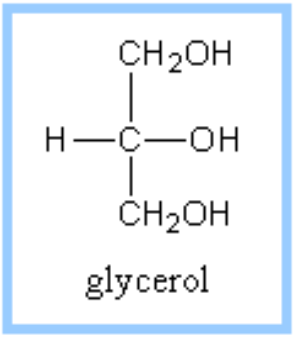


ภาพที่ 2.9 ปฏิกิริยาทรานเอสเทอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์ที่มีอยู่ในน้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์

ที่มา: ชมพูนุท พรเจริญนพ, 2551

2.7 กลีเซอรอล

กลีเซอรอล หรือกลีเซอรีน 1,3-โพรเพนไตรออล (1,3-Propantriol) หรือไกลซิลแอลกอฮอล์ (Glycyl alcohol) ไกลเซอริทอล (Glyceritol) สูตรเคมี $C_3H_5(OH)_3$ จัดเป็นแอลกอฮอล์ชนิด Trihydric alcohol ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีรสหวาน มีความหนืดและมีจุดหลอมเหลวที่ 17.8 °C จุดเดือด 290 °C ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์ของกลีเซอรอลในด้านอุตสาหกรรมอาหาร ยาและเครื่องสำอาง เป็นต้น



ภาพที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของกลีเซอรอล

ที่มา: Diwan, J. J., 2007

2.7.1 การใช้ประโยชน์ของกลีเซอรอลดิบ จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล

กลีเซอรอลดิบที่มาจากการผลิตไบโอดีเซลนั้นราคาค่อนข้างต่ำและยังเป็นปัญหาต่อผู้ผลิตไบโอดีเซลในแง่ของการกำจัด ในการกำจัดนั้นมีหลายวิธีเช่น วิธีทางเคมีนั้นจะแยกกลีเซอรอลดิบออก เพื่อให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น เป็นการเพิ่มมูลค่าของกลีเซอรอลวิธีหนึ่ง แต่กระบวนการต่างๆ ในวิธีนี้มีต้นทุนสูงมาก เนื่องจากต้องใช้ความดันและอุณหภูมิสูงและประสิทธิภาพของปฏิกิริยาจะค่อนข้างต่ำถ้ากลีเซอรอลดิบมีสิ่งปนเปื้อนที่สูงเกินไป ส่วนวิธีทางชีวภาพ ทำได้โดยอาศัยกิจกรรมของจุลินทรีย์เพิ่มมูลค่าของผลพลอยได้ โดยการแปรรูปกลีเซอรอลดิบให้เป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าเพิ่มเช่น สาร 1,3-โพรเพนไดออล (1,3-Propanediol) Biobutanol/bioethanol hydrogen Propionic acid Succinic acid Citric acid และน้ำมันเซลล์เดียวจากจุลินทรีย์ (Single cell oil) เป็นต้น

- สาร 1,3-โพรเพนไดออล (1,3-Propanediol)

การผลิตผ่านวิธีทางชีวภาพทำให้ 1,3-โพรเพนไดออล มีบทบาทสำคัญต่ออุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกชีวภาพ โดยใช้กลีเซอรอลดิบเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอน จากนั้นอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีเอนไซม์เฉพาะ เช่น 1,3-Propanediol dehydrogenase (1,3-Propanediol xidoreductase) ในการทำหน้าที่ผลิต 1,3-โพรเพนไดออลออกมา ตัวอย่างจุลินทรีย์ที่สามารถผลิต 1,3-โพรเพนไดออลจากกลีเซอรอลได้ เช่น Citrobacter freundii Klebsiella pneumoniae และ Clostridium butiricum เป็นต้น

- Propionic acid (CH_3CH_2COOH)

การผลิตกรดโพรพิโอนิคจากกลีเซอรอลดิบนั้น จะใช้วิธีตรึงเซลล์แบคทีเรีย Propionibacteria acidipropionici และ Propionibacteria freudenreichii spp. Shermanii บนแคลเซียมอัลจิเนต จากการทดลองให้ผลผลิตได้สูงถึง 42 กรัมต่อลิตร ในแง่ของประโยชน์กรดโพรพิโอนิคนั้น นับว่ามีประโยชน์มากมายเช่น เป็นสารยับยั้งการเจริญของเชื้อราและแบคทีเรีย จะใช้เป็นส่วนผสมในแป้งฝุ่นสำหรับทาเท้าเพื่อป้องกันเชื้อรา ใช้เป็นสารเติมแต่งป้องกันการเน่าเสียของอาหารและยังใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเซลลูโลสสังเคราะห์ได้อีกด้วย

- Biobutanol/bioethanol

บิวทานอล ($C_4H_{10}O$) จัดอยู่ในกลุ่มไขมันคือ เมธานอล เอธานอล โพรพานอล และบิวทานอล บิวทานอลนับว่ามีศักยภาพในการใช้เป็นเชื้อเพลิงสูงและให้ค่าออกเทนสูงกว่าแอลกอฮอล์อื่นๆ ในตระกูลเดียวกัน จากการศึกษาการผลิตบิวทานอลโดยใช้กลีเซอรอลเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนเช่น การหมักเชื้อ Clostridium pasteurianum โดยใช้กลีเซอรอลดิบด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศพบว่า สามารถให้ผลผลิตบิวทานอลได้สูงสุดถึง 19 กรัมต่อลิตร

- Hydrogen

พลังงานไฮโดรเจน จัดว่าพลังงานสีเขียวหรือพลังงานสะอาด ในการจัดการไฮโดรเจนในกลีเซอรอลดิบนั้น ปัจจุบันมีการใช้เทคโนโลยีต่างๆ ได้แก่ การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) การแยกสารประกอบไฮโดรคาร์บอนด้วยไอน้ำร้อน (Reforming) การใช้ความร้อนจากใต้ดินและดวงอาทิตย์ในการแยกน้ำ (Thermochemical cycles) นอกจากนั้นยังมีการใช้วิธีทางชีวภาพอีกด้วยคือ กระบวนการ Biological production โดยใช้สาหร่ายและแบคทีเรียมาทำการหมักแบบต่อเนื่องภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน พบว่าสามารถให้ผลผลิต H_2 ได้ถึง 30 มิลลิโมลต่อลิตรต่อชั่วโมง

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สมจินตนา ลิ้มสุข และคณะ (2554) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารร่วมกับกลีเซอรอลที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ รวมระยะเวลาการหมักทั้งสิ้น 111 วัน ปริมาตรที่ใช้เท่ากับ 200 L (เป็นของเหลว 185 L) ในตอนเริ่มต้นของการเดินระบบจะป้อนแต่เศษอาหารอย่างเดียวที่อัตราภาระสารอินทรีย์เฉลี่ยในช่วง 0.306 - 1.245 g/L reactor-day (56.6 - 230.2 g/day) ซึ่งสามารถให้ผลผลิตมีเทนเฉลี่ย 0.455 m^3 CH_4 /kg COD ที่อุณหภูมิห้อง และให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 0.789 m^3 biogas /kg COD และเมื่อทำการป้อนกลีเซอรอลร่วมกับเศษอาหาร จะมีอัตราการป้อนอาหารที่ 1.245 g/L reactor-day ซึ่งจะทำให้ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น จาก 36.8 L/day เป็น 72.2 L/day เมื่อเติมกลีเซอรีน 30.8 ml/day และเพิ่มขึ้นเป็น 90.4 8 L/day เมื่อเติมกลีเซอรีน 46.3 ml/day

เฉลิมเดช ณ ลำพูน (2553) ได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนสารอาหารต่อการผลิตก๊าซชีวภาพร่วมกัน ระหว่างกลีเซอรอลและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงสกัดน้ำมันปาล์ม โดยทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกลีเซอรอล ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนและสัดส่วนที่เหมาะสม (COD: N) ในการเติมกลีเซอรอลพบว่า กลีเซอรอลเป็นสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนสูงมาก แต่กลับมีปริมาณไนโตรเจนต่ำและศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพถึงร้อยละ 81 สัดส่วน COD : N ที่แตกต่างกันจะส่งผลทำให้การผลิตก๊าซมีเทนแตกต่างกันด้วย กล่าวคือ เมื่ออัตราส่วน COD : N ลดลง จะส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าต่ำลงด้วย

Carrère et al. (2009) ได้ทำการเพิ่มประสิทธิภาพการหมักมูลสุกรเป็นก๊าซชีวภาพด้วยการใช้ความร้อนและเคมีความร้อน การให้ความร้อน (70 -190 °C) และเคมีความร้อน (pH = 10 และ12 อุณหภูมิ 25 °C และ 90 - 190 °C) เมื่อใช้วิธีทางชีวเคมีโดยใช้อุณหภูมิปานกลางแบบไม่ต่อเนื่อง ได้ผลที่ดีที่สุดเมื่อให้อุณหภูมิสูงที่สุด (190 °C) เมื่อใช้วิธีเตรียมแบบเคมีความร้อนที่ pH = 12 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของมูลสุกรที่เป็นของเหลว และมูลสุกรทั้งหมดก็ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของมูลสุกรทั้งหมดดีขึ้นจากการเตรียมที่ pH = 10 และอุณหภูมิอยู่ในช่วงจาก 150 ถึง 190 °C แต่ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของมูลสุกรส่วนที่เป็นของเหลวลดลงอย่างมาก ยกเว้นเมื่อให้อุณหภูมิ 190 °C ทั้งสองกรณีของวิธีที่ให้ความร้อน และการใช้เคมีความร้อนที่ pH = 10 ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพของมูลสุกรที่สูงขึ้นเชื่อมโยงกับการลดลงของส่วนที่เหมือนเฮมิเซลลูโลส

Zhu et al. (2010) ได้ทำการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการย่อยซังข้าวโพดแบบไม่ใช้ออกซิเจน ด้วยการปรับสภาพวัตถุดิบเบื้องต้น โดยการใช้ด่างที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 1 2.5 5.0 และ 7.5 (W/W) จากการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยด่างแล้ว พบว่า สามารถย่อยสลายลิกนิน ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ยากต่อการทำลายของวัตถุดิบได้เพิ่มขึ้น จากร้อยละ 9.1 เมื่อใช้ด่างที่มีความเข้มข้น 1% และสามารถสลายลิกนินได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 46.2 เมื่อใช้ด่างที่มีความเข้มสูงขึ้นเป็น 7.5% จากผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่า การใช้ด่างที่ร้อยละ 1 ไม่สามารถ

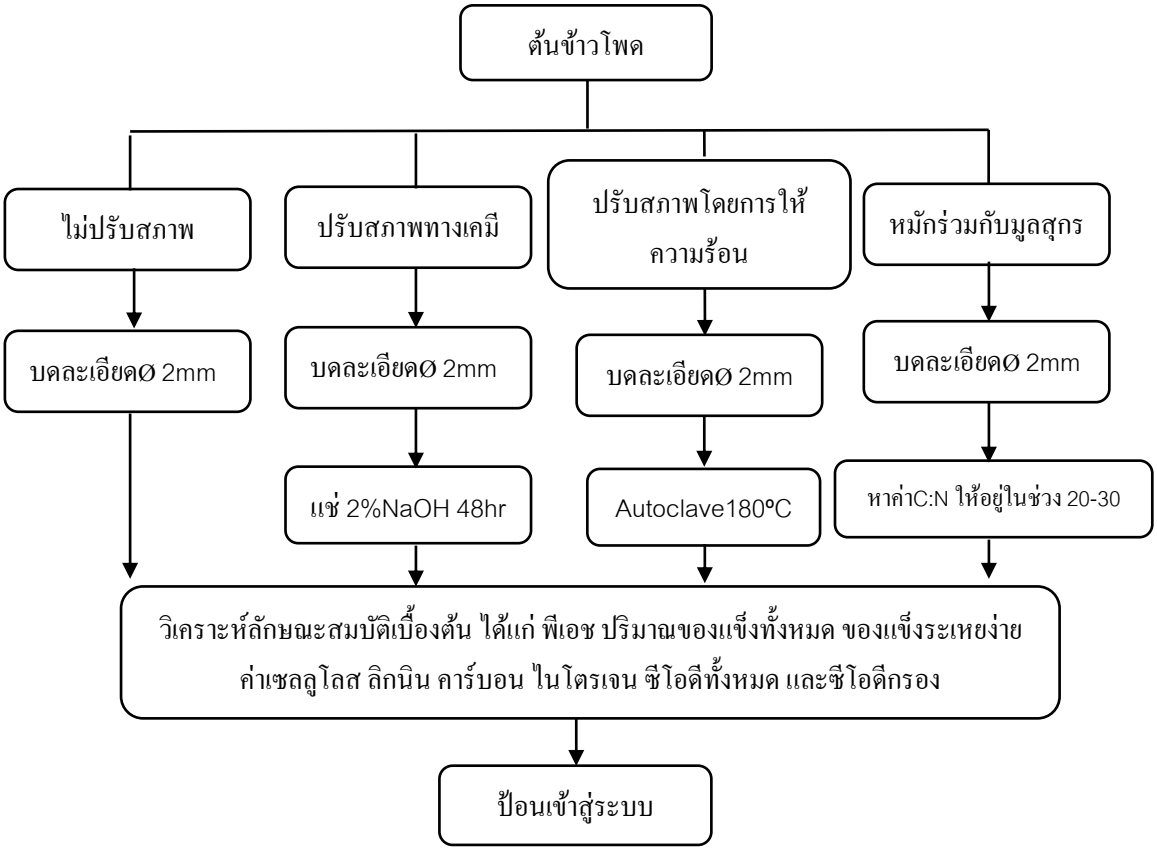
ส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อมีการใช้ด่างที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นเป็นร้อยละ 5 สามารถส่งผลให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดถึง 372.4 L/kg VS ซึ่งสูงกว่าการใช้ซังข้าวโพดที่ไม่มีการปรับสภาพถึงร้อยละ 37 แต่เมื่อใช้ด่างที่ความเข้มข้นร้อยละ 7.5 จะทำให้มีการสร้างกรดไขมันระเหยได้เร็วขึ้นในระหว่างขั้นตอนการย่อย และปฏิกิริยาการสร้างกรดอินทรีย์ซึ่งยับยั้งปฏิกิริยาการสร้างมีเทน

Zheng et al. (2009) ได้ทำการศึกษาเรื่องการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากข้าวโพดแบบไม่ใช้อากาศด้วยการแช่ด่าง (NaOH) พบว่า หลังการแช่ด้วยด่างที่ความเข้มข้น 2% นาน 3 วัน สามารถให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด ด้วยอัตราการเติมข้าวโพด 65 กรัม/ลิตร ทำให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นถึง 72.9% ผลผลิตมีเทนสูงขึ้น 73.4% และหลังจากการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยด่างแล้ว ปริมาณของลิกนินลดลง 9.3% ปริมาณเซลลูโลสลดลง 18% ปริมาณเฮมิเซลลูโลสลดลง 19.1% (W/W) ซึ่งจากการทดลองจะพบว่า อัตราการเสื่อมสลายของโครงสร้างจะแตกต่างกันออกไป โดยเฮมิเซลลูโลสจะสลายตัวมากกว่าลิกนินกับเซลลูโลส เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับสารละลายด่าง (NaOH) ของเฮมิเซลลูโลสนั้นมีมากกว่าลิกนินและเซลลูโลส จึงทำให้หลังจากการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยด่างมีการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นในเวลาที่เท่ากัน สามารถเกิดขึ้นได้เร็วกว่าวัตถุดิบที่ไม่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น

Xiao et al. (2010) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยมูลสุกรกับกากของพืช 3 ชนิดได้แก่ ซังข้าวโพด ฟางข้าวโอ๊ตและฟางข้าวสาลี เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้วัสดุที่ผ่านการเตรียมด้วยการหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำมาบดให้มีอนุภาคเล็กกว่า 0.422 มิลลิเมตร ก่อนใส่ลงในถังปฏิกิริยา โดยควบคุมสภาวะแวดล้อมของทุกถังอยู่ที่อุณหภูมิ 37+0.1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 วัน จากผลการทดลองพบว่า การผลิตก๊าซชีวภาพมีปริมาณสูงขึ้นทุกอัตราส่วน C/N โดยซังข้าวโพดเป็นพืชที่ให้ผลดีที่สุดคือ สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึง 11.4 เท่าต่อวัน ฟางข้าวโอ๊ต 8.5 เท่าต่อวัน และฟางข้าวสาลี 6.12 เท่าต่อวัน แต่อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองนี้คือ อัตราส่วน C/N อยู่ที่ 20 : 1

บทที่ 3
ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-scale) ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) การทดลองเป็นแบบแบตช์ (Batch) โดยใช้ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์เติมหัวเชื้อจุลชีพ (Seed) ปริมาณร้อยละ 40 ของปริมาตรถังหมัก ซึ่งการทดลองจะทำศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับของเสียกลีเซอรอล การทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่หนึ่งจะเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีที่แตกต่างกันคือ การปรับสภาพเบื้องต้นทางกล การปรับสภาพเบื้องต้นทางเคมีและการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการใช้ความร้อน ขั้นตอนที่สองจะเป็นการทดลองหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล โดยแปรผันอัตราส่วนของต้นข้าวโพดต่อปริมาณของเสียกลีเซอรอล ปริมาตรรวมทั้งระบบ 3 อัตราส่วนคือ 99.5 : 0.5, 99 : 1 และ 98 : 2 (ปริมาตร/ปริมาตร)



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ

3.1 ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากข้าวโพดที่ทำการปรับสภาพเบื้องต้น

เป็นการทดลองการย่อยสลายทางชีวภาพของต้นข้าวโพดโดยใช้ระบบถังหมักแบบไร้ออกซิเจน ด้วยการลดขนาดและปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีการทางกายภาพและเคมีก่อนป้อนเข้าสู่ระบบ โดยแบ่งชุดการทดลองได้ดังต่อไปนี้

3.1.1 ชุดการทดลองที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด (ชุดควบคุม)

3.1.2 ชุดการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการใช้สารละลายด่าง (NaOH 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง)

3.1.3 ชุดการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการให้ความร้อน (Steam 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที)

3.1.4 ชุดการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วน 95 : 5

3.2 ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล

การหมักต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับของเสียจากกลีเซอรอลเป็นการทดลองการย่อยสลายทางชีวภาพของต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพแล้วร่วมกับวัสดุหมักร่วมได้แก่ ของเสียซึ่งกลีเซอรอลในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจน โดยใช้อัตราส่วนที่แตกต่างกัน 3 ค่า ดังต่อไปนี้

- ต้นข้าวโพด : กลีเซอรอล ในอัตราส่วน 99.5 : 0.5 (ปริมาตร/ปริมาตร)
- ต้นข้าวโพด : กลีเซอรอล ในอัตราส่วน 99 : 1 (ปริมาตร/ปริมาตร)
- ต้นข้าวโพด : กลีเซอรอล ในอัตราส่วน 98 : 2 (ปริมาตร/ปริมาตร)

3.3 การเตรียมตะกอนจุลชีพ

หัวเชื้อตะกอนจุลชีพที่ใช้ในงานวิจัยได้มาจากระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB) จากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทผลิตน้ำผลไม้ โดยนำหัวเชื้อจุลชีพมาเลี้ยงให้ปรับตัวและเกิดความคุ้นเคยกับต้นข้าวโพดเป็นระยะเวลาประมาณ 2 สัปดาห์ ดังภาพที่ 3.2 นำตะกอนจุลชีพที่ผ่านการเลี้ยงมาวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (VS) เจือจางความเข้มข้นของตะกอนจุลชีพก่อนเข้าระบบ โดยกำหนดให้ปริมาณของของแข็งแขวนลอยระเหยเริ่มต้นเท่ากับ 25,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อนเติมลงในระบบปริมาณร้อยละ 40 ของระบบการทดลอง

ภาพที่ 3.2 ตะกอนจุลชีพจากระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket : UASB) จากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทผลิตน้ำผลไม้

3.4 การเตรียมวัตถุดิบ

แต่ละชุดการทดลองจะต้องทำการเตรียมข้าวโพด เพื่อป้อนเข้าระบบแตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

3.4.1 การเตรียมต้นข้าวโพดในชุดทดลองที่ปรับสภาพโดยการลดขนาด (ชุดควบคุม)

เริ่มจากนำต้นข้าวโพดแห้งมาสับและบดละเอียดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มิลลิเมตร (ภาพที่ 3.3) จากนั้นนำข้าวโพดที่บดละเอียดแล้วมาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้นได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย เซลลูโลส ลิกนิน คาร์บอน ไนโตรเจน

ภาพที่ 3.3 ต้นข้าวโพดที่ผ่านการบดให้ละเอียด โดยให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มิลลิเมตร

3.4.2 การเตรียมต้นข้าวโพดในชุดทดลองปรับสภาพเบื้องต้นทางเคมี

เริ่มต้นจากนำต้นข้าวโพดที่ทำการลดขนาดแล้วมาแช่ในสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 2 เป็น เวลา 48 ชั่วโมง (ดังภาพที่ 3.4) หลังจากนั้นนำมาล้างให้สะอาดด้วยน้ำ แล้ววิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้นได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย ค่าเซลลูโลส ลิกนิน คาร์บอน ไนโตรเจน

ภาพที่ 3.4 ต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องด้วยการลดขนาดและแช่ในสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.4.3 การเตรียมต้นข้าวโพดในชุดทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยความร้อน

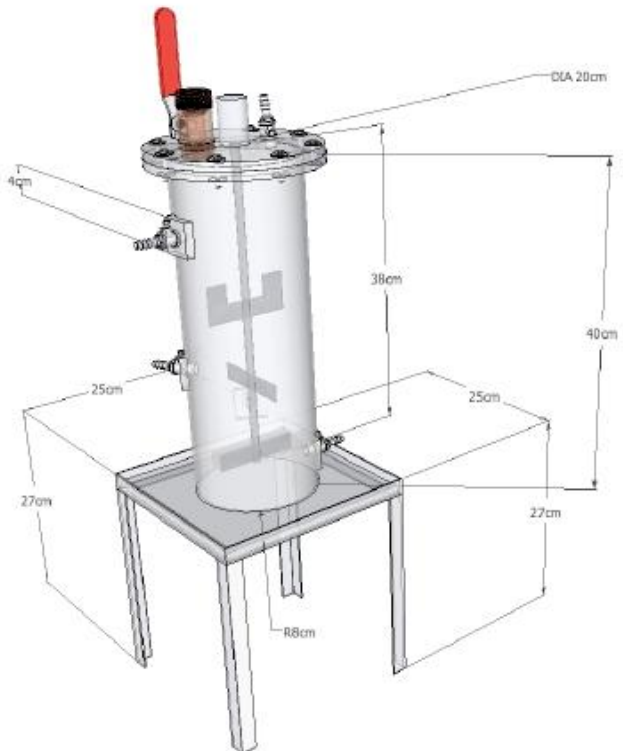
เริ่มต้นจากนำต้นข้าวโพดที่ทำการลดขนาดแล้วมาให้ความร้อนโดยการนึ่งด้วยหม้อนึ่งความดันสูง (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (ดังภาพที่ 3.5) จากนั้นนำต้นข้าวโพดที่ได้มาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้นได้แก่ พีเอช ปริมาณของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่าย เซลลูโลส ลิกนิน คาร์บอน ไนโตรเจน

ภำพที่ 3.5 ต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการลดขนาดแล้วนำไปนึ่งด้วยหม้อนึ่งความดันสูง (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส

3.5 ระบบถังหมักไร้ออกซิเจนแบบสมบูรณ์ (Continuous Stirred Tank Reactor : CSTR)

3.5.1 ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์

ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์ จะลักษณะรูปทรงกระบอก กำหนดปริมาตรการใช้งาน (Working volume) เท่ากับ 6 ลิตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร สูง 40 เซนติเมตร ตามลำดับ ตัวถังหมักทำจากอะคีลิคใส (Acrylic) ซึ่งติดตั้งชุดอุปกรณ์สำหรับการกวนผสมได้แก่ มอเตอร์และใบพัดกวนอัตราเร็ว 50 รอบต่อนาที เพื่อกวนผสมต้นข้าวโพดและจุลชีพให้สัมผัสกันอย่างทั่วถึงและมีการติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาการย่อยสลายของภายในระบบ ดังภาพที่ 3.6 และ 3.7



ภาพที่ 3.6 ภาพจำลองถังหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์

ภาพที่ 3.7 ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบกวนสมบูรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.5.2 อุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซชีวภาพโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ

อุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซชีวภาพโดยใช้หลักการแทนที่น้ำประกอบด้วย เครื่องวัดปริมาณก๊าซ (Gas counter) ซึ่งทำจากวัสดุอะคลิริคใส รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ภายในมีการติดตั้งระบบเซ็นเซอร์ เพื่อตรวจนับปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในระบบดังภาพที่ 3.8

ภาพที่ 3.8 อุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซชีวภาพโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ

3.6 วิธีการทดลอง

3.6.1 การเดินระบบ

การเดินระบบหมักชีวมวลทั้งแบบ Biomass Digestion และการเดินระบบ Biomass Co-digestion เริ่มต้นจากการเติมหัวเชื้อตะกอนจุลชีพที่มีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยเท่ากับ 25,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในถังปฏิกิริยาปริมาณร้อยละ 40 ของปริมาตรถัง จากนั้นนำต้นข้าวโพดที่บดละเอียดและผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นตามที่กำหนดไว้ใน

ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบของแต่ละชุดการทดลองลงในถังปฏิกิริยา แล้วเติมน้ำสะอาดให้เต็มปริมาตรการใช้งานของระบบ ส่วนการเดินระบบ Biomass Co-digestion ให้ทำการเติมมูลสุกรลงในระบบ เพื่อปรับค่าอัตราส่วน C/N ให้อยู่ในช่วง 20-30 เนื่องจากอัตราส่วน C/N เป็นหนึ่งในปัจจัยของการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบ ส่วนชุดการทดลองในระบบ Biomass Co-digestion โดยการเติมของเสียจากกลีเซอรอลนั้น จะทำการผสมของเสียกลีเซอรอลตามสัดส่วนที่แตกต่างกันตามที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นทั้ง 2 ชุดการทดลองจะทำเหมือนกันคือ จะทำการเพิ่มสภาพความเป็นด่างและปรับค่าพีเอชโดยเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ให้มีพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 8 แล้วทำการปิดระบบให้สนิทพร้อมติดตั้งมอเตอร์และชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซ ทำการกวนด้วยอัตราเร็ว 50 รอบต่อนาที จากนั้นเก็บน้ำตัวอย่างและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ตามที่ได้กำหนดไว้ โดยขั้นตอนการเดินระบบ Biomass digestion และระบบ Biomass Co-digestion

3.6.2 การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดที่มีการปรับสภาพเบื้องต้น

- ขั้นตอนการเดินระบบ Biomass digestion

ขั้นตอนแรกเติมหัวเชื้อตะกอนจุลชีพ ที่ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยเริ่มต้นเท่ากับ 25,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในถังปริมาณร้อยละ 40 ของปริมาตรถัง จากนั้นเติมต้นข้าวโพดที่บดละเอียดและผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นแล้วลงในระบบ แล้วเติมน้ำสะอาดให้เต็มปริมาตรการใช้งานของระบบ เติมโซเดียมไบคาร์บอเนตในระบบเพื่อเพิ่มสภาพด่างและปรับพีเอชให้มีค่าประมาณ 8 แล้วทำการกวนด้วยอัตราเร็ว 50 รอบต่อนาที จึงปิดระบบให้สนิท จากนั้นทำการเก็บน้ำตัวอย่างและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ตามวันและเวลาที่กำหนด

- ขั้นตอนการเดินระบบ Biomass Co-Digestion

ขั้นตอนแรกเติมหัวเชื้อตะกอนจุลชีพที่ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยระเหยเริ่มต้น เท่ากับ 25,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงในถังปริมาณร้อยละ 40 ของปริมาตรถัง เติมต้นข้าวโพดที่บดละเอียดและผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น แล้วเติมมูลสุกรเพื่อปรับค่าอัตราส่วน C/N ให้อยู่ในช่วง 20–30 จากนั้นเติมต้นข้าวโพดที่บดละเอียดและผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น แล้วเติมกลีเซอรอล 3 อัตราส่วน คือ 99.5 : 0.5, 99 : 1, 98 : 2 (ปริมาตร/ปริมาตร) แล้วเติมน้ำสะอาดให้เต็มปริมาตรการใช้งานของระบบ เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO3) ในระบบเพื่อเพิ่มสภาพด่างและปรับพีเอชให้มีค่าประมาณ 8 แล้วทำการกวนด้วยอัตราเร็ว 50 รอบต่อนาที จากนั้นจึงปิดระบบให้สนิท ทำการเก็บน้ำตัวอย่างและวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ตามวันและเวลาที่กำหนด

3.6.3 การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ผล

การเก็บตัวอย่างของก๊าซชีวภาพจากถังหมัก จะใช้หลอดเก็บตัวอย่างก๊าซต่อกับจุกเก็บก๊าซตัวอย่าง เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซ Gas Chromatograp (GC-TCD) Shimadzu GC - 14B ในส่วนของน้ำเสียที่เกิดจากการหมักนั้นจะทำการเก็บไปวิเคราะห์ โดยทำการเก็บตัวอย่างในปริมาตร 100 มิลลิลิตรต่อครั้ง โดยจะนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ ของแข็งแขวนลอย ของแข็งที่ระเหยได้ ของแข็งทั้งหมด ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต่อวัน ร้อยละการผลิตก๊าซมีเทน ซีโอดีทั้งหมด ซีโอดีละลาย กรดไขมันระเหยง่ายและสภาพความเป็นด่าง โดยความถี่และวิธีการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.1

พารามิเตอร์	หน่วย	วิธีการวิเคราะห์	จำนวนครั้งที่วิเคราะห์
พีเอช	-	pH meter	ทุกวัน
อุณหภูมิห้อง	องศาเซลเซียส	Thermometer	ทุกวัน
อุณหภูมิในระบบ	องศาเซลเซียส	Thermometer	ทุกวัน
ปริมาณก๊าซสะสม	มิลลิลิตร	Gas Counter	ทุกวัน
ร้อยละก๊าซมีเทน	ร้อยละ	Gas Chromatography	เก็บ 3 ช่วงในการทดลอง
ของแข็งแขวนลอย	มิลลิกรัมต่อลิตร	Gravimetric method	3 ครั้งต่อสัปดาห์
ของแข็งระเหยได้	มิลลิกรัมต่อลิตร	Gravimetric method	3 ครั้งต่อสัปดาห์
ของแข็งทั้งหมด	มิลลิกรัมต่อลิตร	Gravimetric method	3 ครั้งต่อสัปดาห์
ซีโอดีทั้งหมดซีโอดีละลาย	มิลลิกรัมต่อลิตร	Potassium Dichromate Digestion	3 ครั้งต่อสัปดาห์
กรดไขมันระเหยง่าย	มิลลิกรัมต่อลิตร	Titration method	3 ครั้งต่อสัปดาห์
สภาพความเป็นด่าง	มิลลิกรัมต่อลิตร	Titration method	3 ครั้งต่อสัปดาห์

บทที่ 4
ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะสมบัติทางเคมีของต้นข้าวโพด

ต้นข้าวโพดที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้เป็นต้นข้าวโพดที่ผู้ผลิตต้องการฝักข้าวโพด ในส่วนของลำต้นได้ปล่อยให้แห้ง ต้นข้าวโพดที่นำมาวิจัยจึงมีลักษณะแห้ง จากนั้นได้นำมาสับและบดจนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 มิลลิเมตร ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติทางเคมีพบว่า ปริมาณของลิกนินที่เหลืออยู่มีปริมาณค่อนข้างสูงเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มพืชที่ใช้มวลชีวภาพเหนือดินทั้งหมดเป็นวัตถุดิบผลิตพลังงานเช่น อ้อย มันสำปะหลัง ฟางข้าว (พรชัย ไพบูลย์ และคณะ, 2555) ซึ่งลิกนินจัดว่าเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายบางชนิด เช่น เอทานอล เมทานอล สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และในที่ร้อน มีลักษณะโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์แบบวงหรือสารประกอบอะโรมาติก (สุรพงศ์ นนทประเสริฐ, 2553) จากสมบัติต่างๆ เหล่านี้ แสดงว่าในการย่อยหรือลดขนาดโมเลกุลนั้นค่อนข้างยากหรือใช้เวลานาน ทำให้ระยะเวลาในการหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพนานขึ้นด้วย ดังนั้นจึงมีการนำต้นข้าวโพดมาปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ เพื่อสามารถนำมาหมักให้เกิดก๊าซชีวภาพได้ง่ายและใช้ระยะเวลาที่สั้นลง แต่ในการปรับสภาพเบื้องต้นนั้นมีวิธีการหลายแบบ ซึ่งวิธีที่นำมาใช้วิจัยนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน สมบัติทางเคมีของต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยมีวิธีต่างๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางเคมีของต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ

ลักษณะทางเคมี	ร้อยละ		
	ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด (ชุดควบคุม)	ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการใช้สารละลายด่าง	ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการให้ความร้อน
ปริมาณเซลลูโลส	74.88	95.62	97.57
ปริมาณเฮมิเซลลูโลส	22.54	3.97	1.91
ปริมาณลิกนิน	2.58	0.41	0.52
ปริมาณความชื้น	2.04	19.08	84.25
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	97.96	80.92	15.75
ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด	95.75	79.7	14.2
ปริมาณคาร์บอน	52.04	28.69	37.13
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	0.61	0.19	0.22
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	85 : 1	151 : 1	137 : 1

ภาพที่ 4.1 ต้นข้าวโพดที่ยังไม่มีการปรับสภาพ

ภาพที่ 4.2 ต้นข้าวโพดที่มีการปรับสภาพโดยการลดขนาด

ภาพที่ 4.3 ข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยใช้สารละลายด่าง

ภาพที่ 4.4 ข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยการให้ความร้อน

เมื่อนำต้นข้าวโพดที่ผ่านการลดขนาดมาปรับสภาพเบื้องต้น ด้วยการใช้สารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2% และการให้ความร้อน แล้วมาวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นทางเคมี พบว่ามีปริมาณของลิกนินร้อยละ 2.58 เมื่อผ่านการปรับสภาพโดยการใช้สารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 มีปริมาณลิกนินลดลงเหลือเพียงร้อยละ 0.41 สารละลายด่างจะช่วยเพิ่มปริมาณการละลายของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ (ชัชนันท์ นิวาสวงษ์ และ เฉลิม เรืองวิริยะชัย, 2555) และต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยการใช้ความร้อน มีปริมาณลิกนินเหลือเพียงร้อยละ 0.52 แสดงว่าการปรับสภาพเบื้องต้นตามวิธีที่กล่าวมานั้น ทำให้ปริมาณของลินินลดลงมาก จุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพสามารถเติบโตได้ดี เนื่องจากลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจนและออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด มีโครงสร้างเป็นพอลิเมอร์แบบวงหรือสารประกอบอะโรมาติก โดยที่ลิกนินจะไม่ละลายน้ำ ไม่ยืดหยุ่น ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้แก่ลำต้น โดยจะแทรกตัวไปในช่องว่างระหว่างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ยากแก่การย่อยสลาย (ริกาญจน์ ฉัตรสกุลวิไล, 2555 : ออนไลน์) ในส่วนปริมาณของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสก็มีปริมาณลดลงเช่นเดียวกัน เฮมิเซลลูโลสนั้นทำหน้าที่เสริมสร้างผนังเซลล์พืชให้แข็งแรง ปริมาณที่ลดลงนั้น แสดงว่าโครงสร้างของพืชได้เปลี่ยนแปลงไป สามารถเกิดการย่อยและนำไปในการผลิตก๊าซชีวิภาพได้ง่ายและรวดเร็วขึ้น การปรับสภาพเบื้องต้นนั้นยังเป็นการปรับระดับความชื้นให้เหมาะสมอีกด้วย คือ อยู่ในช่วงร้อยละ 60-80 ปริมาณของคาร์บอนที่วิเคราะห์ได้มีค่าค่อนข้างสูง การปรับสภาพเบื้องต้นนั้นจะช่วงลดปริมาณคาร์บอนลง แต่อาจยังมี

ปริมาณที่มากเกินพอต่อความต้องการของระบบ ด้วยสาเหตุนี้อาจทำให้การเกิดก๊าซชีวภาพมีปริมาณที่ลดลงได้

4.2 สมบัติเบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์

ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำผลไม้และผลไม้กระป๋อง จะนำมาใช้หมักต้นข้าวโพดเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ในการทดลองจะเป็นการหมักสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic digestion) เพื่อให้จุลินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียทำการย่อยสลายสารอินทรีย์และนำสารอาหารเหล่านั้นไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป ก่อนทำการทดลองได้ทำการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์ไว้ดังตารางที่ 4.2 นี้

ตารางที่ 4.2 สมบัติเบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์	ปริมาณที่วิเคราะห์ได้
ค่าทีเคเอ็น (mg/L)	2,198
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (mg/L)	45,580
ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (mg/L)	30,050

จากการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์ พบว่า ค่าทีเคเอ็นที่วิเคราะห์ได้มีค่าค่อนข้างสูง ถ้านำมาหมักร่วมกับต้นข้าวโพด อาจช่วยปรับสภาวะความสมดุลของปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจนของระบบให้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากปริมาณไนโตรเจนในต้นข้าวโพดค่อนข้างต่ำ หากนำมาหมักร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ระบบจะมีความเหมาะสมในอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็นผลดีต่อระบบการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้นด้วย

4.3 สมบัติเบื้องต้นของมูลสุกร

มูลสุกร จัดว่าเป็นมูลสัตว์ชนิดหนึ่งที่มีธาตุอาหารค่อนข้างสูงและยังมีสารอินทรีย์อยู่หลายชนิด ด้วยสมบัติเหล่านี้ มูลสุกรจึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่ปริมาณธาตุอาหารจะเป็นชนิดใด มีปริมาณมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของอาหารที่สัตว์กินเข้าไป ระบบการย่อยอาหารของสัตว์ วิธีการให้อาหาร เป็นต้น ก่อนจะนำไปใช้เป็นตัวหมักร่วมจึงมีการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้น เพื่อทราบถึงองค์ประกอบในมูลสุกรและคำนวณปริมาณที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้หมักร่วมในการผลิตก๊าซชีวภาพ มูลสุกรที่นำมาใช้ในการทดลองมีสมบัติดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมบัติเบื้องต้นของมูลสุกร

สมบัติเบื้องต้นของมูลสุกรที่ใช้	ค่าที่วิเคราะห์ได้
ปริมาณคาร์บอน (%)	5.99
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (%)	0.47
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	12.75 : 1

4.4 **สมบัติเบื้องต้นของกลีเซอรอลดิบ**

กระบวนการผลิตไบโอดีเซล เป็นกระบวนการทางเคมีที่เรียกว่ากระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification process) โดยให้น้ำมันพืชทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอลหรือเอทานอล และมีด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดเป็นไบโอดีเซลและกลีเซอรอล ซึ่งกลีเซอรอลที่ได้นั้นจะมีความบริสุทธิ์ที่ต่ำ ทำให้ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ หากจะนำไปใช้ต้องนำไปผ่านกระบวนการที่ทำให้เกิดความบริสุทธิ์ก่อน ซึ่งค่อนข้างยุ่งยากและใช้ต้นทุนสูง กลีเซอรอลดิบจึงเป็นของเสียที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล (สุธิดา อรรถยานันทน์ และอมรชัย อาภรณ์วิชานพ, 2555) งานวิจัยนี้ได้นำกลีเซอรอลดิบที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลมาใช้ เนื่องจากกลีเซอรอลดิบต่างก็เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์จะต้องใช้สารอินทรีย์ในการเจริญเติบโต กลีเซอรอลดิบที่นำมาใช้ในการทดลองมีสมบัติทางเคมี ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 สมบัติทางเคมีของกลีเซอรอล

สมบัติทางเคมีของกลีเซอรอลที่ใช้	ค่าที่วิเคราะห์ได้ (mg/l)
ซีโอดี (mg/L)	1,541,509
ทีเคเอ็น (mg/L)	1,204
ฟอสเฟต (mg/L)	122
อัตราส่วน COD : N : P	12,635 : 10 : 1

4.5 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้น

4.5.1 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด (ชุดควบคุม)

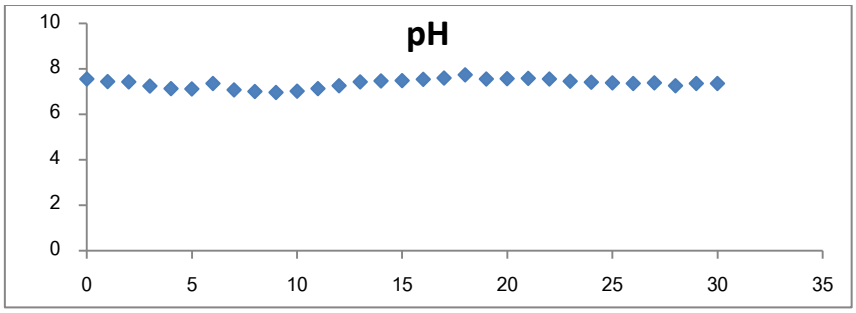
จากการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพของข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดหรือชุดควบคุมจะกำหนดให้อัตราของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (VS) ของการเติมข้าวโพดชุดควบคุมให้มีค่าเท่ากับ 15,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม สามารถคำนวณปริมาณการใช้ข้าวโพดชุดควบคุมได้ที่ใช้ได้เท่ากับ 58 กรัม โดยคิดปริมาณการใช้ข้าวโพดชุดควบคุมเป็นร้อยละ 60 และกำหนดการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ โดยกำหนดให้ปริมาณของของแข็งแขวนลอยระเหยเริ่มต้นเท่ากับ 25,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ก่อนเติมลงในระบบปริมาณร้อยละ 40 จากปริมาตรของถังที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดคือ 6 ลิตร

หลังจากเริ่มทำการทดลองได้ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ค่าพีเอช อุณหภูมิทั้งภายในระบบและนอกระบบ วิเคราะห์ค่าซีโอดี ของแข็งทั้งหมด ของแข็งที่ระเหยได้ตะกอนหนัก และพบว่าค่าพีเอชของระบบจะอยู่ในช่วง 6.95-7.73 (ดังภาพที่ 4.5 (ก)) ค่าของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่าสูงสุดในวันที่ 9 ของการทดลอง มีค่าสูงถึง 806 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายก็ค่อยๆ เริ่มลดต่ำลง จนวันที่ 30 กรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่าเท่ากับ 205 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการทดลอง 30 วันพบว่าค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่าอยู่ในช่วง 25–810 มิลลิกรัมต่อลิตร กรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่าลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์มีการย่อยสารอินทรีย์ ได้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนสามารถนำไปใช้เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อพิจารณาอัตราส่วน VFA/Alk พบว่ามีค่าต่ำกว่า 0.4 ตลอดการทดลอง แสดงว่าระบบมีเสถียรภาพดี (ดังภาพที่ 4.5 (ข)) ค่าซีโอดีช่วงแรกจะมีค่าสูงและค่อยๆ ลดลงถึงวันที่ 9 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 11,200 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงวันที่ 11–23 ค่าซีโอดีมีค่าไม่คงที่ ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 24,000–40,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นจึงค่อยๆ ลงลง จนถึงในวันที่ 30 ของการทดลองมีค่าซีโอดีเท่ากับ 15,484 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังภาพที่ (4.5 (ค))

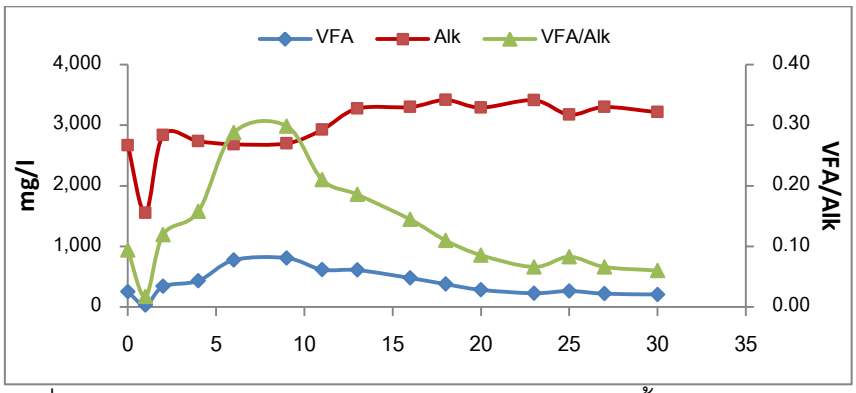
จากผลการทดลองพบว่า อาจเป็นไปได้ว่าการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันมีปริมาตรน้อยจนไม่สามารถสามารถวัดปริมาตรด้วย Gas counter ได้ สังเกตว่าค่อนข้างใช้ระยะเวลานาน เนื่องจากต้นข้าวโพดชุดควบคุมนั้นมีปริมาณลิกนินค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับต้นข้าวโพดชนิดอื่นๆ

เนื่องจากโครงสร้างของลิกนินมีพันธะที่จับตัวกันอย่างแข็งแรง ทำให้จุลินทรีย์ใช้เวลาในการย่อยสลายค่อนข้างนาน

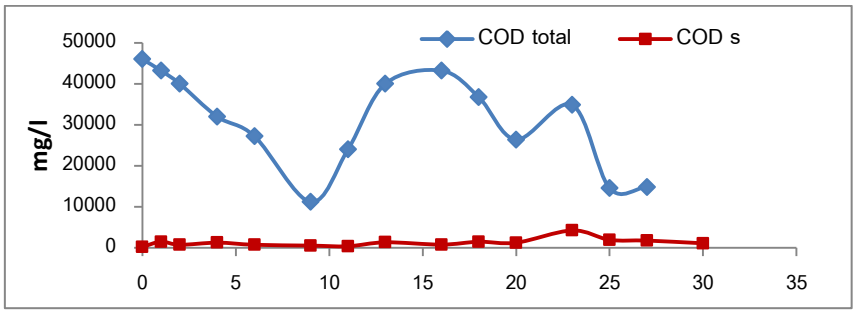
จากการเก็บตัวอย่างก๊าซในระบบ เพื่อวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีแล้ว ไม่พบปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน



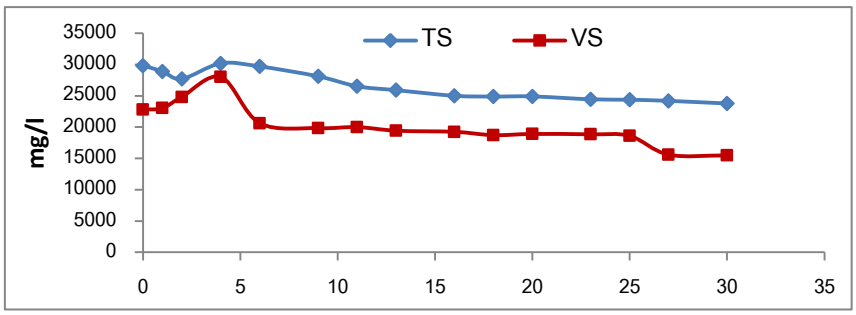
ภาพที่ 4.5 ก) ค่าพีเอชของระบบ



ภาพที่ 4.5 ข) ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย ค่าความเป็นด่างทั้งหมดและอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด



ภาพที่ 4.5 ค) ค่าซีโอดี



ภาพที่ 4.5 ง) ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด

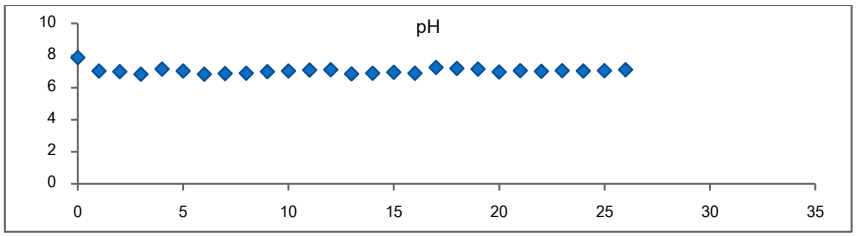
ภาพที่ 4.5 (ก-ง) พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากชุดข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด (ชุดควบคุม)

4.5.2 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการใช้สารละลายด่าง (NaOH 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง)

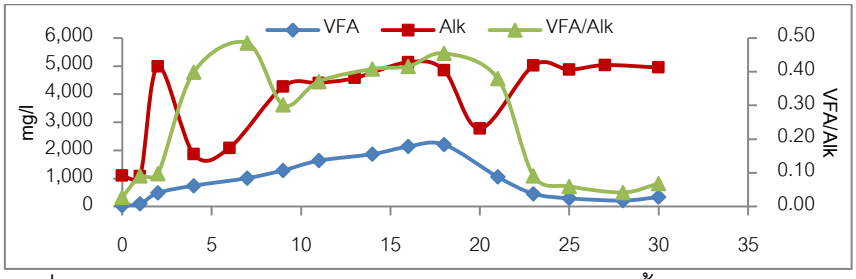
จากการทดลองในชุดควบคุมพบว่า การทดลองใช้เวลาในการผลิตก๊าซชีวภาพค่อนข้างนาน ดังนั้นจึงมีการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลง โดยทดลองปรับสภาพเบื้องต้นต้นข้าวโพดก่อนที่จะนำไปหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ในการปรับสภาพเบื้องต้นนั้นต่างมีหลากหลายวิธี ซึ่งการใช้สารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์นั้น ก็เป็นวิธีหนึ่ง โดยจะใช้ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 2 เนื่องจากเป็นค่าที่สามารถเปลี่ยนโครงสร้างได้ดี สามารถเกิดการผลิตก๊าซมีเทนได้ในปริมาณที่สูงไม่ต่างจากการเตรียมด้วยความเข้มข้นสูงกว่า 2% และยังเป็นการประหยัดสารเคมีลงได้อีกด้วย (Zheng et al., 2009) จากการทดลองสมบัติเบื้องต้นเมื่อทำการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการลดขนาดร่วมกับการใช้สารละลายด่างพบว่าปริมาณลิกนินลดลงจำนวนมากถึงร้อยละ 84.15 เหลือเพียงร้อยละ 0.41 ซึ่งไม่มีผลกระทบต่อจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนจะนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย

การทดลองนี้กำหนดปริมาณต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายด่างที่ใช้เท่ากับ 68 กรัม หลังจากเริ่มทำการทดลอง ได้ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ค่าพีเอชเมื่อเริ่มทำการทดลองเท่ากับ 7.72 หลังจากนั้นค่าพีเอชค่อนข้างคงที่ ไม่เปลี่ยนมากนัก แต่ในวันที่ 7 ของการทดลองค่าพีเอชลดต่ำลงถึง 6.5 หลังจากก็เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ โดยค่าพีเอชเฉลี่ยจะอยู่ที่ 6.9 -7.4 ซึ่งถือเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อระบบ (ดังภาพที่ 4.6 (ก)) ค่าพีเอชที่ต่ำลงเกิดจากการที่จุลินทรีย์ทำการย่อยสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ให้เล็กลงและเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย สามารถสังเกตได้จากค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีค่าสูงขึ้นตั้งแต่เริ่มทำการทดลองและมีค่าสูงสุดในวันที่ 18 ของการเดินระบบ (2,205 มิลลิกรัมต่อลิตร) และลดลงต่ำสุดในวันที่ 28 (ดังภาพที่ 4.6 (ข)) อย่างไรก็ตามพบว่าค่าอัตราส่วน VFA/Alk ในช่วงวันที่ 4-10 ของการเดินระบบมีค่าสูงกว่า 0.4 บ่งชี้ว่าระบบมีเสถียรภาพต่ำกว่าชุดการทดลองชุดควบคุม อาจเนื่องจากมีกรดอินทรีย์เกิดสูงมากในระบบ ค่าซีโอดีก็สอดคล้องกันคือ ช่วงแรกค่าซีโอดีจะมีค่าสูงหลังจากนั้นค่าซีโอดีก็ลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากช่วงแรกที่จุลินทรีย์ทำการย่อยสารอินทรีย์เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายซึ่งละลายลงในน้ำขณะถูกย่อยทำให้ค่าซีโอดียังไม่ลดลง แต่เมื่อจุลินทรีย์มีการนำกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไปใช้ค่าของซีโอดีก็จะมีค่าลดลง และเมื่อจุลินทรีย์ย่อยและใช้สารอินทรีย์หมดแล้วจุลินทรีย์ตายลงและถูกย่อยสลายปะปนลงในน้ำ ทำให้ในช่วงหลังๆ ของการทดลองค่าซีโอดีจะมีค่าสูงขึ้น (ดังภาพที่ 4.6 (ค))

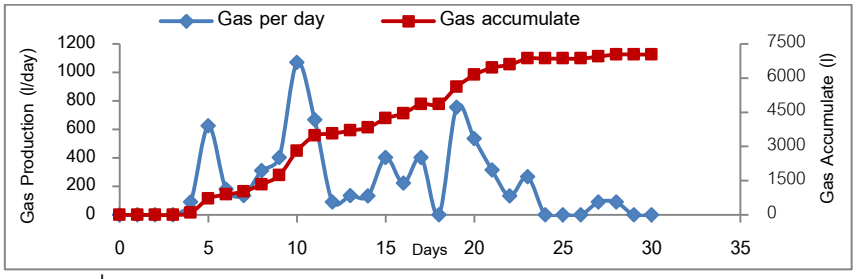
การตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบ พบว่าระบบเริ่มผลิตก๊าซชีวภาพในวันที่ 4 ของการเดินระบบและผลิตได้จนถึงวันที่ 20 ของการเดินระบบ ซึ่งสอดคล้องกับการตรวจวิเคราะห์ค่ากรดอินทรีย์ระเหย โดยพบว่าต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพโดยการแช่ในด่างร้อยละ 2 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้รวม 7.031 ลิตร คิดเป็นปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเท่ากับ 0.08 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม TVS removed หรือ 0.103 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม biomass และมีปริมาณก๊าซมีเทนร้อยละ 54 คิดเป็น 0.06 ลูกบาศก์เมตร CH_4/กิโลกรัม biomass หรือ 0.04 ลูกบาศก์เมตร CH_4/กิโลกรัม VS removed



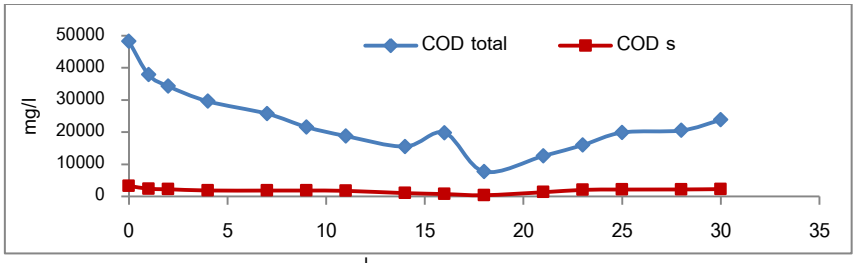
ภาพที่ 4.6 ก) ค่าพีเอชของระบบ



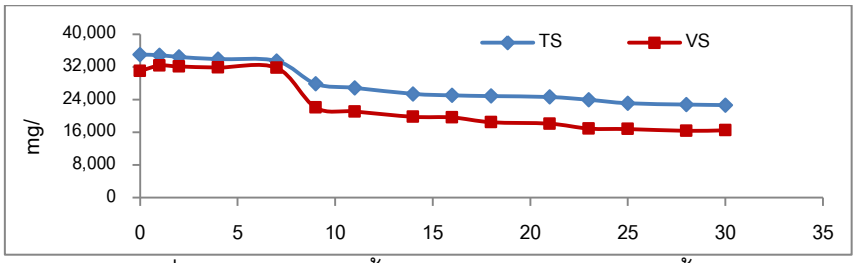
ภาพที่ 4.6 ข) ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย ค่าความเป็นด่างทั้งหมดและอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด



ภาพที่ 4.6 ค) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 4.6 ง) ค่าซีโอดี



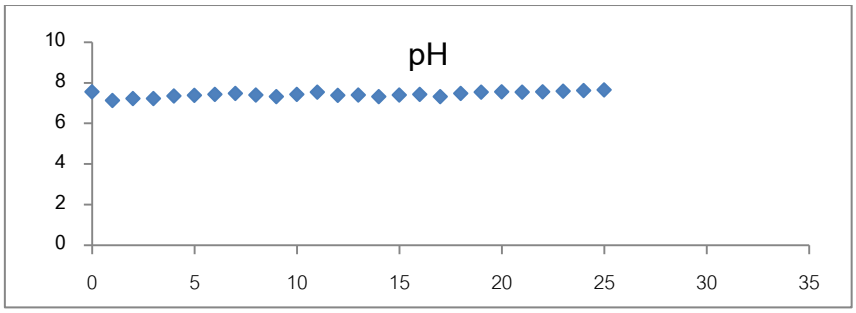
ภาพที่ 4.6 จ) ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด

ภาพที่ 4.6 (ก-จ) พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการใช้สารละลายด่าง (NaOH 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง)

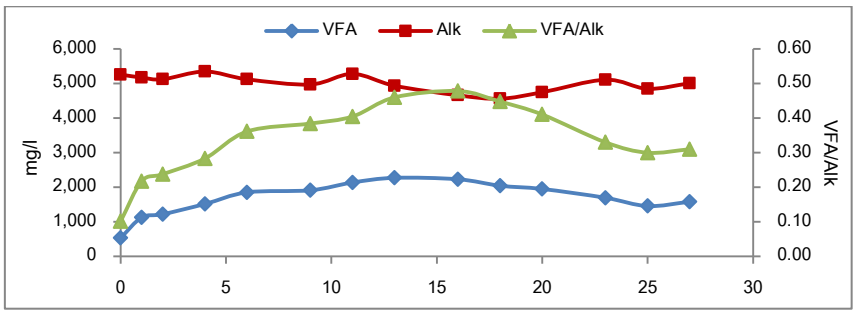
4.5.3 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการให้ความร้อน (Steam 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที)

จากการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพของข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการให้ความร้อนคือ การนำต้นข้าวโพดไปนึ่งด้วยความดันที่ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยกำหนดปริมาณการใช้ข้าวโพดที่ใช้เท่ากับ 380 กรัม ก่อนเดินระบบ ได้นำต้นข้าวโพดที่ได้ทำการลดขนาดและนึ่งด้วยความดันที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ไปวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นพบว่าปริมาณลินนินลดลงมากเช่นกัน และยังลดลงในปริมาณที่น้อยกว่าการปรับสภาพต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการใช้สารละลายด่าง แต่ก็ยังสามารถช่วยลดปริมาณลิกนิน ซึ่งจัดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงและยากต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ หลังจากเริ่มทำการทดลองได้ทำการทดสอบค่าพีเอชจะอยู่ในช่วง 7.12-7.64 นับว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก จากการวิเคราะห์ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายก็มีปริมาณสูงขึ้นโดยสูงสุดอยู่ที่วันที่ 13 สูงถึง 2,273 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะมีค่าลดลงจนถึงวันที่ 27 เท่ากับ 1,580 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อค่าความเป็นด่างมีค่าสูง ซึ่งเป็นผลเสียต่อระบบ ค่าซีโอดีในวันแรกนั้นมีค่าสูงถึง 72,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นมีค่าไม่คงที่ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 15,000–53,000 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากวันที่ 18 มีค่าลดลงและในวันที่ 27 ค่าซีโอดีมีค่าเท่ากับ 16,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรายละเอียดภาพที่ 4.7

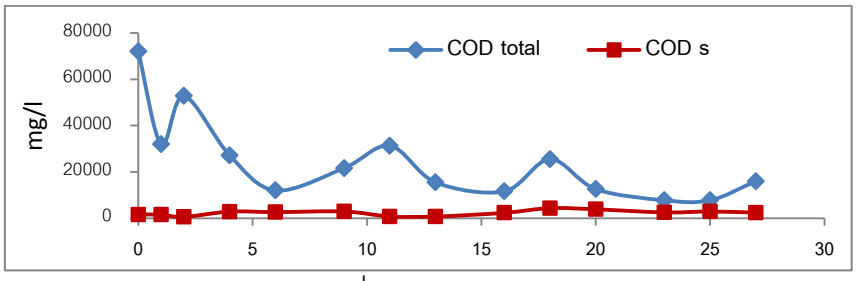
จากผลการทดลองพบว่าก๊าซชีวภาพมีปริมาณต่ำมาก อาจเป็นไปได้ว่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นต่อวันนั้นมีปริมาณน้อยจนไม่สามารถวัดด้วย Gas counter ได้



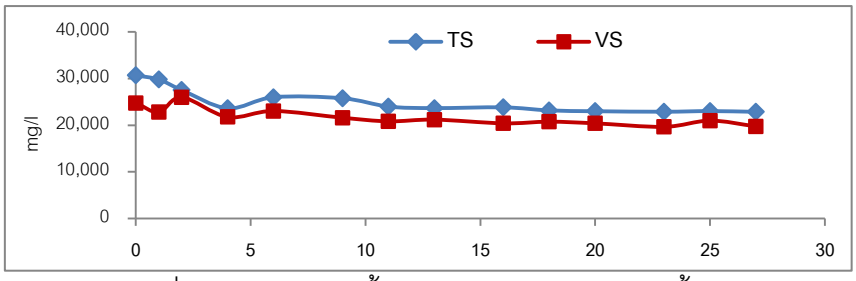
ภาพที่ 4.7 ก) ค่าพีเอช



ภาพที่ 4.7 ข) ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย ค่าความเป็นด่างทั้งหมดและอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด



ภาพที่ 4.7 ค) ค่าซีโอดี



ภาพที่ 4.7 ง) ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด

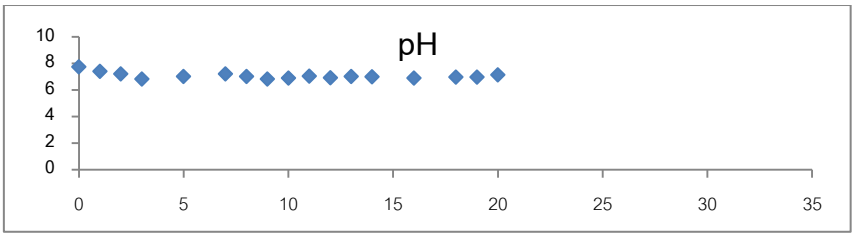
ภาพที่ 4.7 (ก-ง) พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการให้ความร้อน (Steam 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที)

4.5.4 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วน 95 : 5

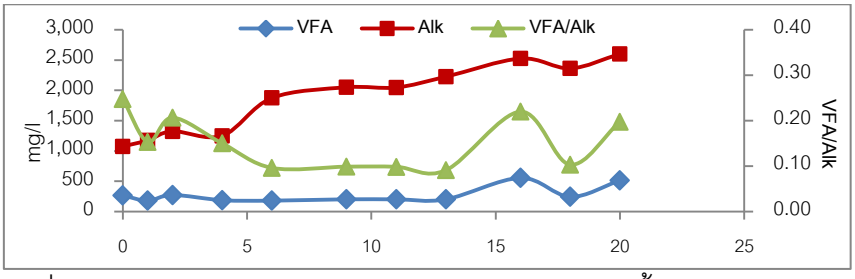
จากการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพของข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดหมักร่วมกับมูลสุกร ซึ่งจะทำการผสมสุกรในอัตราส่วน 95:5 และกำหนดปริมาณการใช้ข้าวโพดชุดควบคุมได้ที่ใช้ได้เท่ากับ 58 กรัม หลังจากการเริ่มทำการทดลองเดินระบบพบว่าค่าพีเอชมีค่าลดลงในช่วงแรก เนื่องจากจุลินทรีย์มีการสร้างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายทำให้ค่าพีเอชของระบบมีค่าลดลงไป ซึ่งค่าพีเอชโดยรวมของระบบจะมีค่าอยู่ที่ 6.8-7.2 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก จนมีค่าสูงขึ้นสูงสุดในวันที่ 16 มีค่าสูงถึง 555 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังรายละเอียดในภาพที่ 4.8 (ข) ซึ่งอาจเป็นผลมากจากการที่เติมมูลสุกรลงไปทำให้จุลินทรีย์ต้องใช้เวลาช่วงหนึ่งในการปรับตัวก่อน จากนั้นจึงสามารถทำงานได้ปกติและอีกสาเหตุหนึ่งก็คือ อัตราส่วนค่าคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ค่อนข้างสูงกว่าค่าที่เหมาะสม ซึ่งค่าอัตราส่วนไนโตรเจนต่อคาร์บอนที่เหมาะสมของระบบหมักแบบไร้อากาศควรอยู่ที่ 20-30 จึงทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการทำงานไม่ดีเท่าที่ควร

จากการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น รวมทั้งวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีแล้ว พบว่ามีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาตรรวมเท่ากับ 0.697 ลิตร และคิดเป็นปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเท่ากับ 0.02 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม TVS removed หรือ 0.01 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม biomass และมีปริมาณก๊าซมีเทนร้อยละ 45.9 คิดเป็น 0.01 ลูกบาศก์เมตร CH_4/กิโลกรัม biomass หรือ 0.01 ลูกบาศก์เมตร CH_4/กิโลกรัม VS removed

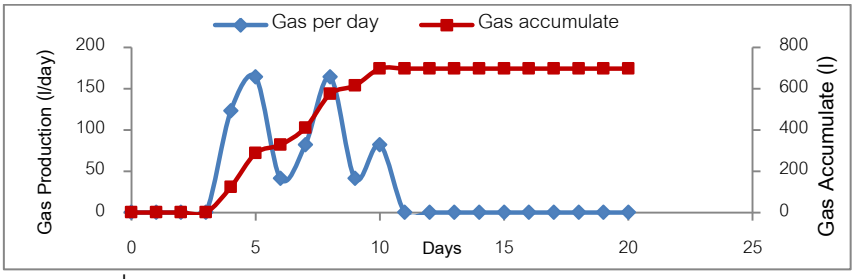
สรุปผลจากการทดลองพบว่าการใช้มูลสุกรเป็น Co digestion ในการหมักต้นข้าวโพดจะช่วยลดระยะเวลาในการหมักลงได้มากกว่าครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับชุดข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยด่าง โดยระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สมบูรณ์ภายใน 10 วันแรกเท่านั้น และเมื่อพิจารณาอัตราส่วน VFA/Alk พบว่ามีค่าต่ำมาก ต่ำกว่า 0.4 ตลอดการทดลอง บ่งชี้ว่าระบบมีเสถียรภาพดี แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้มีปริมาณต่ำกว่าชุดการทดลองปรับสภาพด้วยด่างมาก โดยต้นข้าวโพดแห้ง 1 กิโลกรัม เมื่อนำมาหมักร่วมกับมูลสุกรร้อยละ 5 จะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.01 ลูกบาศก์เมตร หรือ ก๊าซมีเทน 0.01 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งต่ำกว่าชุดการทดลองต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายด่าง ซึ่งอีกในกรณีหนึ่งอาจเป็นไปได้เช่นกันว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นอาจมาจากมูลสุกรเท่านั้น จุลินทรีย์ไม่สามารถนำต้นข้าวโพดมาใช้ได้ เนื่องจากต้นข้าวโพดในชุดการทดลองนี้เป็นต้นข้าวโพดที่ผ่านการบดเท่านั้น ยังไม่มีการปรับสภาพจึงทำให้ปริมาณก๊าซที่ได้มีค่าค่อนข้างต่ำ



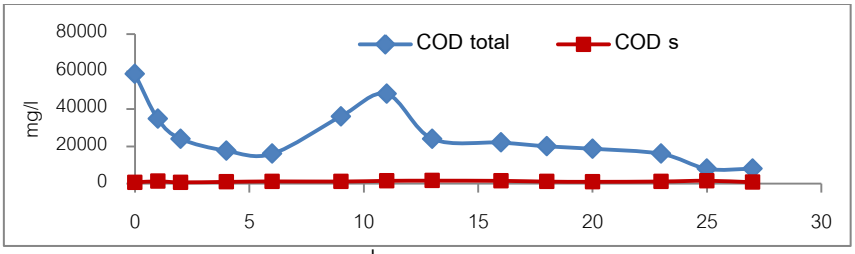
ภาพที่ 4.8 ก) ค่าพีเอชของระบบ



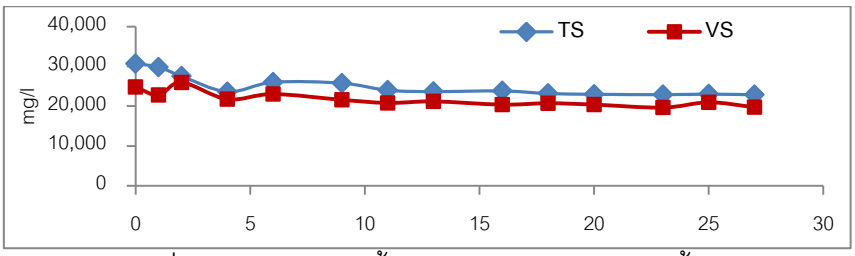
ภาพที่ 4.8 ข) ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย ค่าความเป็นด่างทั้งหมดและอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด



ภาพที่ 4.8 ค) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ



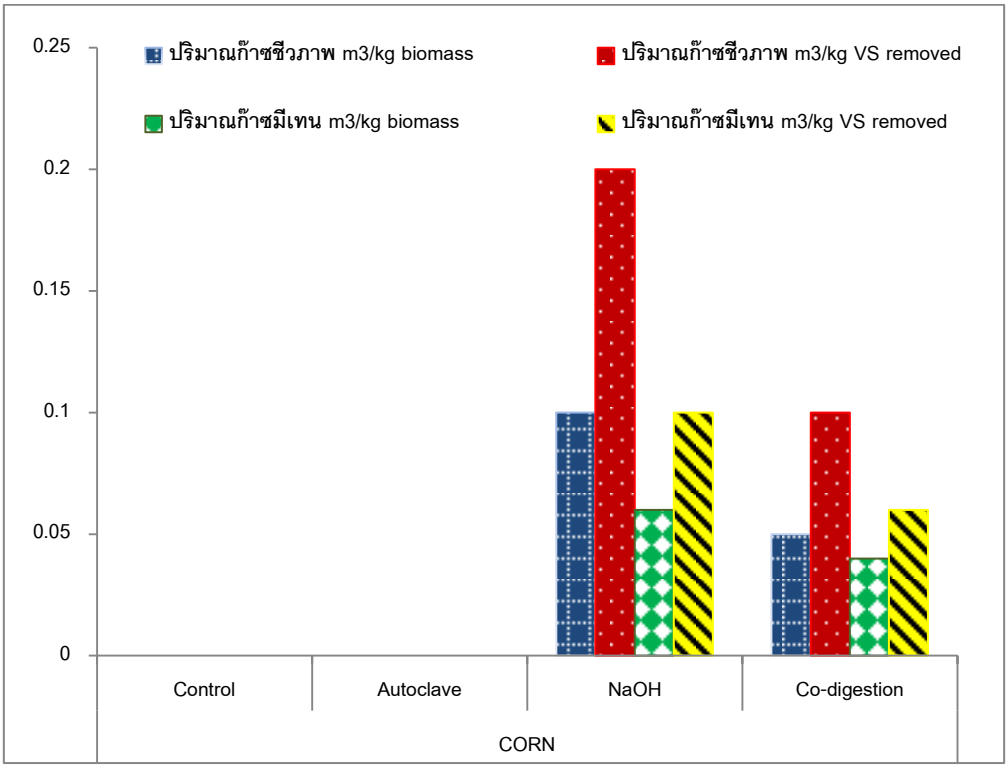
ภาพที่ 4.8 ง) ค่าซีโอดี



ภาพที่ 4.8 จ) ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด

ภาพที่ 4.8 (ก-จ) พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากข้าวโพดที่การปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วน 95 : 5

4.6 การเปรียบเทียบปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นต่อวันและปริมาณก๊าซสะสมของต้นข้าวโพดที่ทำการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 4.9 การเปรียบเทียบการเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนจากการปรับสภาพด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

จากการทดลอง ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นจากการแช่ด้วยสารละลายด่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง) สามารถเกิดก๊าซชีวภาพได้ปริมาณสูงสุดเท่ากับ 0.1 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม biomass และ 0.08 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม VS removed รองลงมาได้แก่ ชุดต้นข้าวโพดที่มีการลดขนาดแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรให้ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.01 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม biomass และ 0.02 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม VS removed ส่วนชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด (ชุดควบคุม) และชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการให้ความร้อน (Steam 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที) ไม่เกิดก๊าซชีวภาพ

จากการทดลอง ปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ ปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นจากการแช่ด้วยสารละลายด่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2% เป็นเวลา 48

ชั่วโมง) สามารถเกิดก๊าซมีเทนได้ปริมาณสูงสุดเท่ากับ 0.06 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม biomass และ 0.1 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม VS removed รองลงมาคือ ชุดต้นข้าวโพดที่มีการลดขนาดแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรให้ปริมาณก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.04 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม biomass และ 0.06 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม VS removed

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าในการปรับสภาพเบื้อต้นด้วยวิธีต่างๆ วิธีการปรับสภาพต้นข้าวโพดเบื้องต้นโดยการแช่ด้วยสารละลายด่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนได้ปริมาณสูงสุด จึงนำต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยด่างนี้ ไปทดลองเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่อ โดยนำไปหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอลต่อไป

4.7 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นของข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล

จากการศึกษาต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ แล้วพบว่า การปรับสภาพเบื้องต้นที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดคือ การปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2%) ดังนั้นเพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพให้มากขึ้น จึงได้ทำการศึกษาและทดลองนำต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายด่างมาหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล เนื่องจากกลีเซอรอลดิบเป็นของเสียชนิดหนึ่งที่เหลือใช้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล มีความบริสุทธิ์ต่ำ หากจะกำจัดเสียค่าใช้จ่าย ซึ่งกลีเซอรอลนั้นเป็นสารอินทรีย์ชนิดหนึ่ง สามารถเป็นอาหารของจุลินทรีย์ได้ ในการนำมาใช้เป็นตัวหมักร่วมกับต้นข้าวโพดเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ นับว่าเป็นการลดของเสียลงและยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดได้อีกด้วย

ในการทดลองจะศึกษาการเติมกลีเซอรอลในสัดส่วนที่แตกต่างกันได้แก่ 0.5% 1% 2% และ 3% ตามลำดับ ผลจากการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

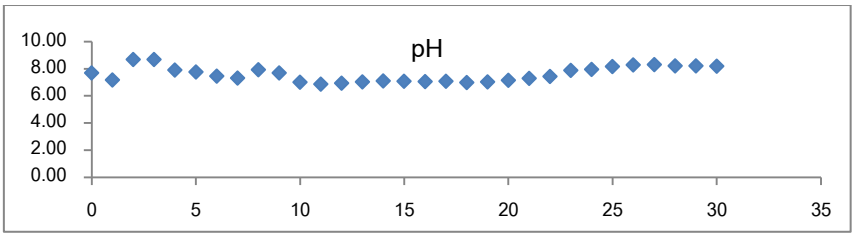
4.7.1 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 0.5%

จากการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพของข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดและนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้ม 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ได้กำหนดให้อัตราของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (VS) ของการเติมข้าวโพดชุดควบคุมให้มีค่าเท่ากับ 15,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และกำหนดการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ให้มีปริมาณของของแข็งแขวนลอยระเหยเริ่มต้น เท่ากับ 25,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นจึงเติมของเสียกลีเซอรอลในสัดส่วน 0.5% ปริมาตร/ปริมาตร หลังการทดลองพบว่าการเติมของเสียกลีเซอรอลเป็นตัวหมักร่วมจะช่วยเพิ่มค่าความเป็นกรด - ด่างของระบบ เนื่องจากของเสียกลีเซอรอลเป็นสารที่มีค่าความเป็นกรด - ด่างสูง จากการทดลองเห็นได้ว่าในช่วงสองวันแรกของการเติมของเสียกลีเซอรอลทำให้ค่าความเป็นกรด - ด่างของระบบจะมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย เมื่อเวลาผ่านไประบบสามารถที่จะเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่อยู่ในของเสียกลีเซอรอลไปเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบมีค่าลดลง ดังภาพที่ 4.10 (ก) (สมจินตนา ลิ้มสุขและคณะ, 2554) ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายนั้นแปรผันตรงกับเวลาคือ ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น การย่อยสลายของสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์นั้น ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและกรดอินทรีย์ระเหยง่าย จากนั้นจุลินทรีย์จะนำสารอินทรีย์ไปใช้ แต่ในชุดการทดลองนี้ได้มีการเติมของเสีย

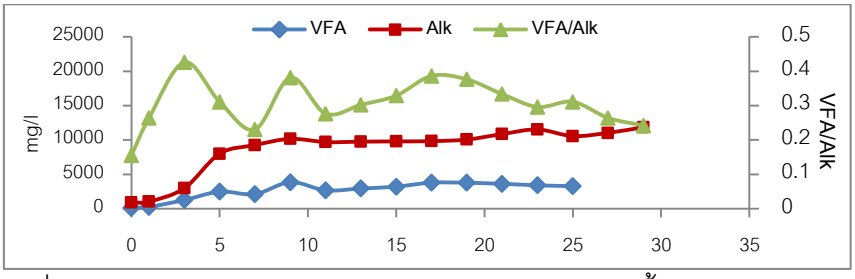
กลีเซอรอลลงไป อาจทำให้จุลินทรีย์ต้องใช้เวลาในการปรับสภาพในระยะเวลาหนึ่ง ทำให้ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะค่อยๆ สูงขึ้นอย่างช้าๆ จนถึงวันที่ 17 ถึงค่อยๆ มีค่าลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์มีการนำสารอินทรีย์ไปใช้ ซึ่งสอดคล้องกับค่าซีโอดีที่ในช่วงแรกยังมีปริมาณต่ำอยู่ แต่หลังจากที่จุลินทรีย์มีการสร้างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็ก อาจมีการปะปนของสารอินทรีย์ลงในน้ำ ทำให้ค่าของซีโอดีสูงขึ้น จากนั้นจึงค่อยๆ ลดลง จนช่วงท้ายของการทดลองค่าซีโอดีมีค่าสูงขึ้น เพราะจุลินทรีย์มีการย่อยสารอินทรีย์หมด ทำให้จุลินทรีย์ไม่มีอาหารที่จะใช้ในการเจริญเติบโตต่อไป จุลินทรีย์ที่ตายอาจถูกย่อยสลายปะปนลงในน้ำ ส่งผลทำให้ค่าซีโอดีสูงขึ้นได้และจะเห็นได้ว่าค่าซีโอดีเริ่มต้นค่อนข้างสูง เนื่องจากมีการเติมของเสียกลีเซอรอลลงไป อาจส่งผลทำให้ค่าซีโอดีในน้ำสูงขึ้นด้วย ชุดการทดลองนี้ได้เติมของเสียกลีเซอรอลเพียงแค่ 0.5% ปริมาตร/ปริมาตร จึงทำให้ค่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่าไม่แตกต่างจากชุดที่ไม่มีการเติมของเสียกลีเซอรอลมากนัก ระบบโดยรวมถือว่ามีประสิทธิภาพดี แต่จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่ากลีเซอรอลจัดเป็นสารอินทรีย์ประเภทแอลกอฮอล์ที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้เกือบทั้งหมด (เฉลิมเดช ณ ลำพูน, 2553) แต่ปริมาณคาร์บอนค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับปริมาณไนโตรเจน ทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนไม่เหมาะสมนัก

ชุดการทดลองเติมกลีเซอรอล 0.5% เริ่มเกิดการผลิตก๊าซชีวภาพในวันที่ 6 ปริมาตร 84 มิลลิลิตร และเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุดในวันที่ 11 ปริมาตร 672 มิลลิลิตร เมื่อครบ 30 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ทั้งหมด 5,008 มิลลิลิตร พบว่ามีคิดเป็นปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเท่ากับ 0.15 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม TVS removed หรือ 0.05 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม biomass และมีปริมาณก๊าซมีเทนร้อยละ 46.7 คิดเป็น 0.02 ลูกบาศก์เมตร CH_4/กิโลกรัม biomass หรือ 0.07 ลูกบาศก์เมตร CH_4/กิโลกรัม VS removed

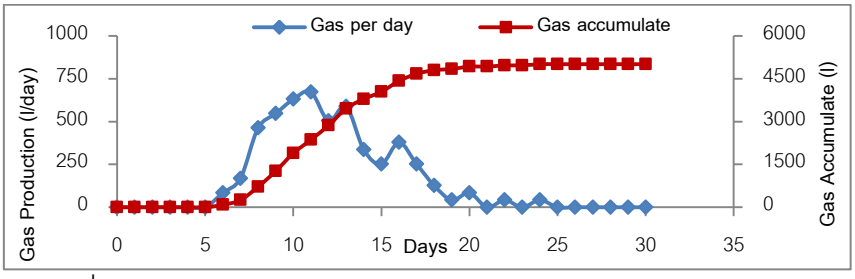
จากการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี จึงกล่าวได้ว่าการเติมของเสียกลีเซอรอล 0.5% ปริมาตร/ปริมาตร ไม่ส่งผลให้ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสูงขึ้น



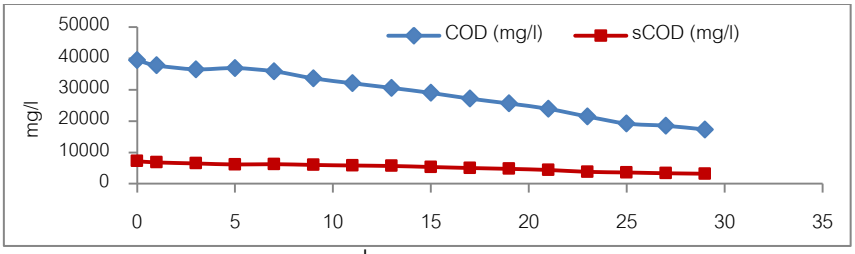
ภาพที่ 4.10 ก) ค่าพีเอชของระบบ



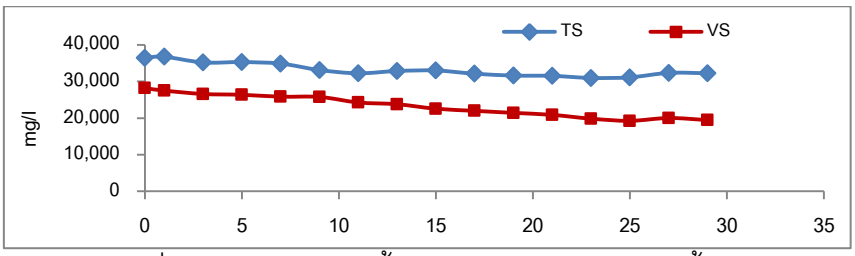
ภาพที่ 4.10 ข) ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย ค่าความเป็นด่างทั้งหมดและอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด



ภาพที่ 4.10 ค) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 4.10 ง) ค่าซีโอดี



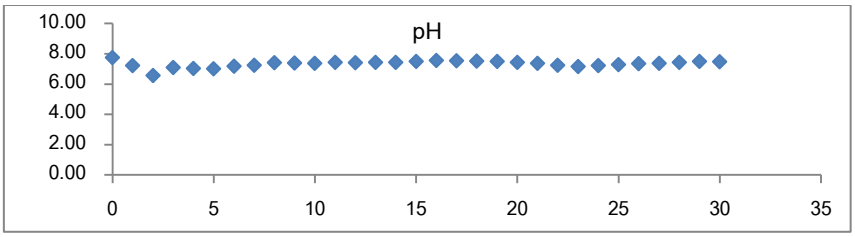
ภาพที่ 4.10 จ) ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด

ภาพที่ 4.10 (ก-จ) พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากชุดต้นข้าวโพดที่การปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 0.5%

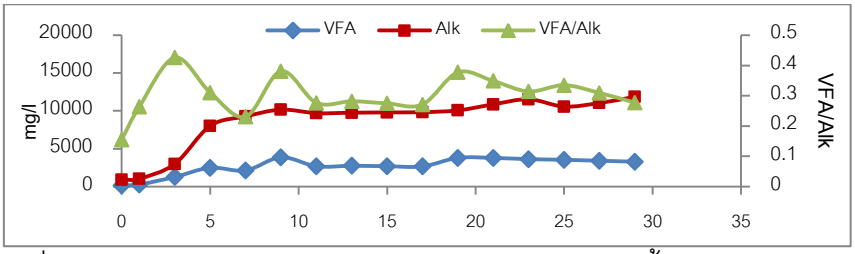
4.7.2 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 1%

จากการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพของข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดแล้วนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้ม 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง และหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอลในสัดส่วน 1 % ปริมาตร/ปริมาตร ในช่วงแรกค่าพีเอชจะมีค่าไม่คงที่นัก โดยจะลดต่ำสุดในวันที่ 2 ลดลงอยู่ที่ 6.55 จึงมีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) เพื่อปรับสภาพช่วยรักษาสมดุลของระบบ จากวันแรกที่ทำการทดลองค่ากรดอินทรีย์ระเหยมีค่าเพิ่มขึ้นในแต่ละวัน เนื่องจากจุนลินทรีย์มีการย่อยสารอินทรีย์ส่งผลทำให้ค่ากรดระเหยง่ายมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 3,800 มิลลิกรัมต่อลิตรในวันที่ 17 ที่ทำการทดลอง อัตรส่วนระหว่างกรดอินทรีย์ระเหยกับสภาพความเป็นด่างอยู่ในค่าที่เหมาะสม มีค่าไม่เกิน 0.4 แสดงว่าระบบมีสมดุลระหว่างกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นกับปริมาณคาร์บอเนตที่มีในระบบ ค่าซีโอดีในช่วงแรกจะมีค่าสูง เนื่องจากจุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างกรดและสร้างก๊าซมีเทนยังไม่สามารถที่จะนำสารอินทรีย์ไปใช้ได้ต้องผ่านกระบวนการย่อยและมีค่าลดลงในระยะเวลาต่อมา ซึ่งสอดคล้องกับค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายที่แปรผกผันกับเวลาที่ทำการทดลอง เพราะจุลินทรีย์มีการย่อยและนำสารอินทรีย์ไปใช้ในการเจริญเติบโต เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป ดังภาพที่ 4.1 (ข)

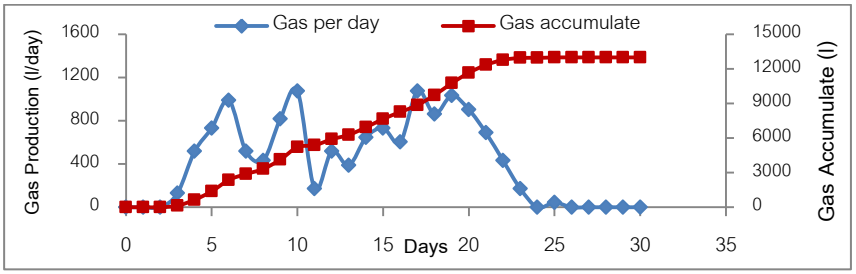
ชุดการทดลองที่เติมของเสียกลีเซอรอล 1% เริ่มมีการผลิตก๊าซชีวภาพในวันที่ 3 ปริมาตร 129 มิลลิลิตร และเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุดในวันที่ 10 ปริมาตร 1,075 มิลลิลิตร และเมื่อครบ 30 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ทั้งหมด 12,986 มิลลิตรและจากการวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีแล้ว พบว่ามีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเท่ากับ 124.87 ลิตร/กิโลกรัม biomass หรือ 170.05 ลิตร/กิโลกรัม VS removed และมีปริมาณก๊าซมีเทนอยู่ร้อยละ 57.3 คิดเป็น 71.55 ลิตร/กิโลกรัม biomass



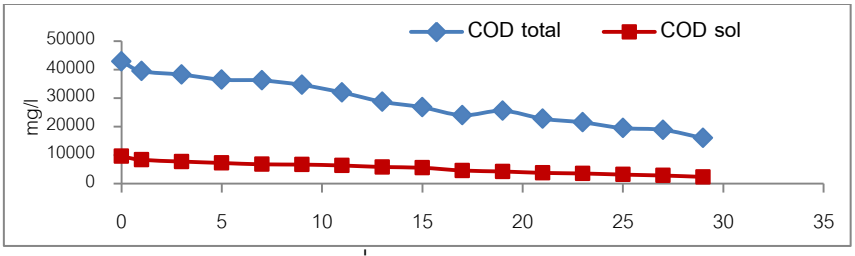
ภาพที่ 4.11 ก) ค่าพีค่าพีเอชของระบบ



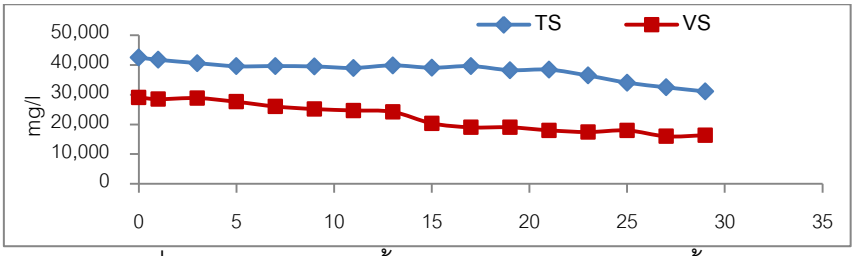
ภาพที่ 4.11 ข) ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย ค่าความเป็นด่างทั้งหมดและอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด



ภาพที่ 4.11 ค) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 4.11 ง) ค่าซีโอดี

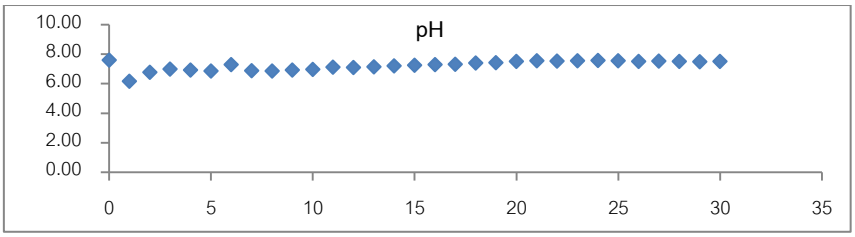


ภาพที่ 4.11 จ) ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด

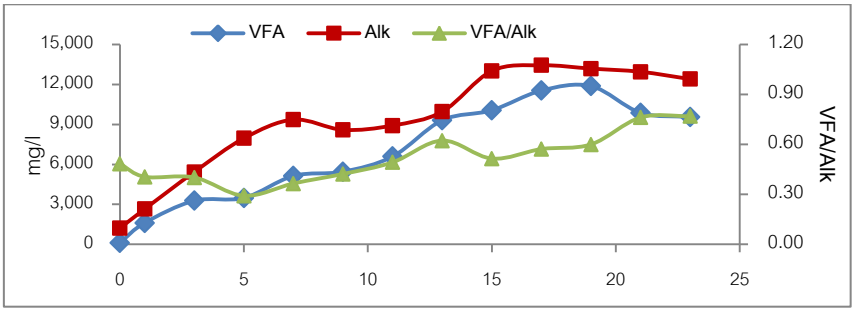
ภาพที่ 4.11 (ก-จ) พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากชุดต้นข้าวโพดที่การปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 1%

4.7.3 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 2%

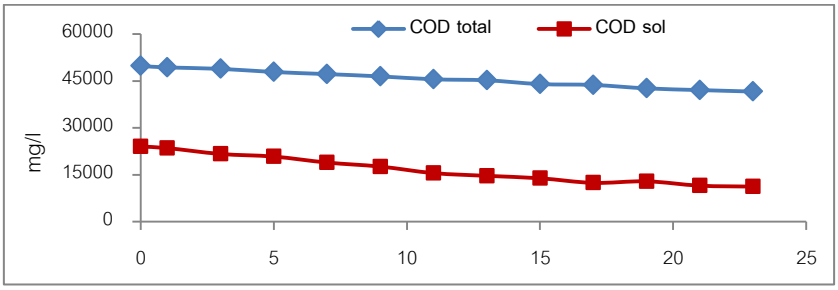
จากการศึกษาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพของข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดและนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้ม 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอลในสัดส่วน 2 % ปริมาตร/ปริมาตร จากการทดลองค่าพีเอชในวันแรกมีค่าเท่ากับ 7.58 และลดลงที่ 6.5 ในวันต่อมา ซึ่งค่าพีเอชที่ 6.5 ค่าพีเอชที่เหมาะสมควรอยู่ 6.6 – 7.4 เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบจึงเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ลงไป เพื่อช่วยลดสภาพความเป็นกรดลง แต่อาจส่งผลทำให้แบคทีเรียชนิดผลิตมีเทนไม่สามารถทนอยู่ได้ ในช่วง 10 แรกพีเอชลดลงมากต้องใช้เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ช่วยปรับสภาพให้อยู่ในช่วง 6.6 – 7.4 ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรด - ด่างของระบบที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ถ้าค่าความเป็นกรด - ด่างลดลงต่ำกว่า 6.6 จะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2553) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีค่าสูงขึ้นจะส่งผลให้ค่าพีเอชลดลง ในวันแรกของการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่าเท่ากับ 118 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าสูงสุดในวันที่ 19 มีค่าสูงถึง 11,887.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสภาวะปกตินั้นระบบมีค่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสูง อาจทำให้ระบบเสียสมดุล อาจส่งผลผลให้ระบบล้มเหลวได้ จากการวิเคราะห์ค่าพีเอชและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายพบว่าการที่การเติมของเสียกลีเซอรอลที่ความเข้มข้น 2% ลงไปทำให้ระบบมีภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากเกินไป ซึ่งการเติมของเสียกลีเซอรอลในสารตั้งต้นปริมาณมากจนเกินไปนั้น จะทำให้การย่อยสลายกลีเซอรอลทางชีวภาพเกิดขึ้นเร็วกว่าการย่อยสลายโพรไพโอเนททางชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงว่า หากในถังปฏิกิริยามีภาระบรรทุกกลีเซอรอลมากเกินไปความเข้มข้นของไพโอเนทก็จะสูงขึ้น จะเกิดผลเสียต่อระบบได้ (สมจินตนา ลิ้มสุขและคณะ, 2554) ด้วยเหตุผลที่กล่าวมานี้ การเติมของเสียกลีเซอรอลที่ความเข้มข้น 2% นั้นมากเกินไป ทำให้เกิดผลเสียต่อระบบทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการทำงานลดลง จึงทำให้ไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น



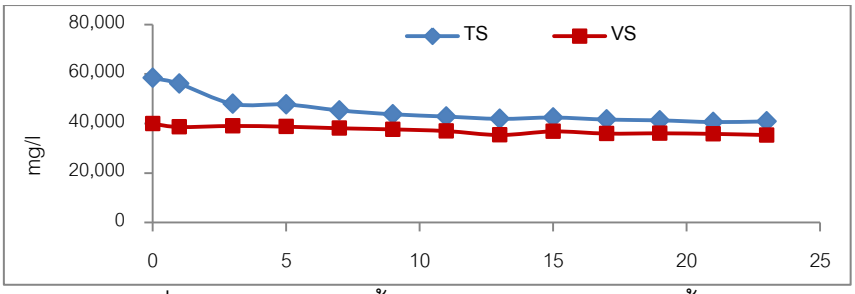
ภาพที่ 4.12 ก) ค่าพีค่าพีเอชของระบบ



ภาพที่ 4.12 ข) ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย ค่าความเป็นด่างทั้งหมดและอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อความเป็นด่างทั้งหมด



ภาพที่ 4.12 ค) ค่าซีโอดี



ภาพที่ 4.12 ง) ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด

ภาพที่ 4.12 (ก-ง) พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์จากชุดต้นข้าวโพดที่การปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 2%

4.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองต่าง ๆ

ข้าวโพดเป็นชีวมวลชนิดหนึ่งที่มีลิกโนเซลลูโลสสูงประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานของลิกนินคือ Phenylpropane ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนแต่จะถูกย่อยสลายได้ในสภาวะที่มีออกซิเจนโดยพวกเชื้อราประเภท White rot fungi และ Moulds (อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555) การปรับสภาพเบื้องต้นจึงเป็นวิธีที่จะช่วยลดปริมาณของลิกนินและช่วยย่อยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพื่อให้จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ง่ายยิ่งขึ้น ระยะเวลาในการเกิดก๊าซชีวภาพก็จะเร็วขึ้นตามด้วย จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าชุดการทดลองชุดควบคุมไม่สามารถเกิดก๊าซชีวภาพได้ในระยะเวลา 30 วัน การเกิดก๊าซชีวภาพจะใช้เวลาค่อนข้างนานเพราะจุลินทรีย์ไม่สามารถนำเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสไปใช้ได้เลย ต้องทำการย่อยโดยผลิตเอนไซม์ออกมานอกเซลล์ เพื่อย่อยให้ชีวมวลมีโครงสร้างเล็กลงจนสามารถดูดซึมไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ ในขณะที่ชุดการทดลองที่มีการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการใช้สารละลายด่าง ซึ่งเรียกว่า Chemical pretreatment หรือการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารเคมี การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารเคมีเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถให้ผลได้รวดเร็วและค่าใช้จ่ายไม่สูงมากนัก สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นที่นิยมใช้กันมากเพราะให้ผลดี หาง่าย ราคาไม่สูงมากนักและไม่ส่งผลกระทบต่อธรรมชาติ ในการทดลองชุดที่ 2 นี้จึงเลือกใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นที่ 2% จากการทดลองสามารถอธิบายได้ว่าต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายด่าง สามารถช่วยลดเวลาการเกิดก๊าซชีวภาพลงได้ รวมถึงปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่ได้มีค่ามากกว่าชุดการทดลองต้นข้าวโพดที่ลดขนาดเท่านั้น (ชุดควบคุม) หลายเท่าตัว ดังผลจากตารางที่ 4.4 จึงสามารถกล่าวได้ว่าการปรับสภาพต้นข้าวโพดโดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซจากต้นข้าวโพดได้หลายเท่าเมื่อเทียบกับชุดต้นข้าวโพดที่ลดขนาดเท่านั้น (ชุดควบคุม) แต่เมื่อนำต้นข้าวโพดไปปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการลดขนาดร่วมกับการให้ความร้อน (Steam 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที) พบว่าไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น อาจเกิดจากปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวันนั้นมีปริมาณน้อยจนไม่สามารถวัดปริมาตรด้วย Gas counter ได้และเวลาที่ใช้ในการ Steam 30 นาทีอาจยังไม่สามารถโครงสร้าง

ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสแตกตัวได้ สุรพงศ์ นนทประเสริฐ (2553) ได้ทำการศึกษาการบำบัดเบื้องต้นโดยใช้วิธีทางความร้อนและชีวภาพต่อความสามารถในการย่อยสลายของใบอ้อยในระบบไร้อากาศ จากผลการทดลองสามารถกล่าวได้ว่า ระยะเวลาที่ใช้ในการบำบัดเบื้องต้นมีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในใบที่ออกมาอยู่ในรูปของเหลว โดยการบำบัดความร้อนเบื้องต้นที่เวลา 60 นาที สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีในใบได้ดีกว่าการใช้ระยะเวลา 15 และ 30 นาที ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ถ้าใช้ในการบำบัดเบื้องต้นมากขึ้น จะส่งผลให้การย่อยสลายสารอินทรีย์สูงขึ้นตามไปด้วย การปรับสภาพเบื้องต้นจ้นข้าวโพดด้วยการลดขนาดร่วมกับการให้ความร้อน (Steam 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที) อาจใช้เวลาในการ Steam น้อยเกินไปที่ จนทำให้โครงสร้างของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสยังไม่แตกตัว จึงทำให้ยังไม่มีการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น การใช้ความร้อนที่สูงและใช้เวลาค่อนข้างนาน อาจทำให้สูญเสียพลังงานมากขึ้น ต้นทุนในการผลิตก๊าซชีวภาพก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน วิธีนี้จึงไม่เป็นที่นิยมเท่าวิธีการอื่นๆ การปรับสภาพเบื้องต้นต้นข้าวโพดโดยการลอขนาดแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วน 95 : 5 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบตลอดการเดินระบบ 30 วันนั้นอยู่ในระดับดี แต่ปริมาณผลก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าชุดการทดลองการปรับสภาพต้นข้าวโพดโดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2

ชุดการทดลองต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วน 95 : 5 ตลอดระยะเวลาของการเดินระบบค่าพีเอชอยู่ในระดับที่เหมาะสม อัตราส่วน VFA/Alk พบว่ามีค่าต่ำมาก ต่ำกว่า 0.4 ตลอดการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพ แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้มีค่าน้อยกว่าการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการใช้ด่าง อาจเนื่องจากมูลสุกรที่เติมลงไปมีปริมาณธาตุอาหารที่น้อยกว่าความต้องการของจุลินทรีย์ อัตราส่วน C:N ratio นับเป็นปัจจัยหนึ่งที่สามารถบ่งชี้ว่า การย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านั้นจะมีไนโตรเจนเพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์และการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือไม่ ซึ่งจากการวิเคราะห์มูลสุกรที่นำมาใช้ในการทดลอง (รายละเอียดดังตารางที่ 4.3) ปริมาณไนโตรเจนที่น้อยเกินไป เพราะปริมาณคาร์บอนในต้นข้าวโพดค่อนข้างสูง (รายละเอียดดังตารางที่ 4.2) จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องเพิ่มปริมาณไนโตรเจนลงไปอีก เนื่องจากอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพควรมีค่าประมาณ 23 ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงมากไนโตรเจนจะถูก Methanogen

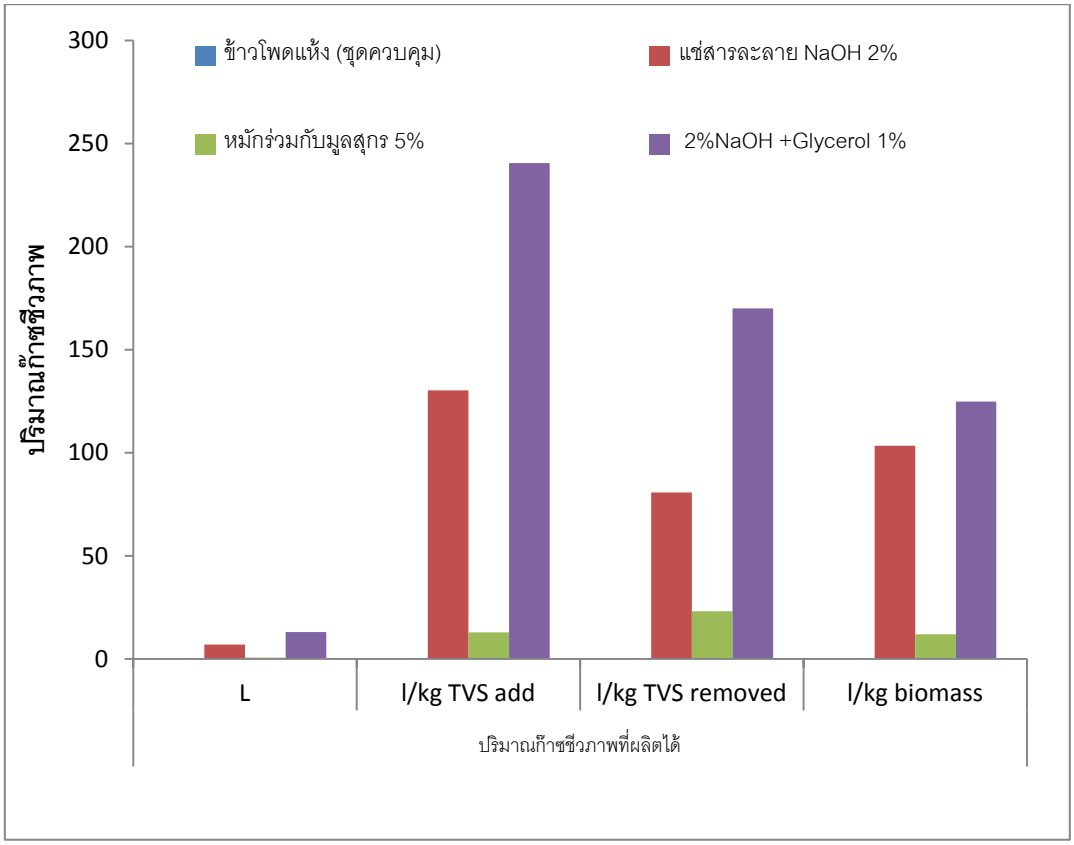
นำไปใช้พื่อเสริมโปรตีนให้ตัวเองและจะหมดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ได้ก๊าซน้อย (สถานจัดการและอนุรักษ์พลังงาน, 2554) จากการปรับสภาพเบื้องต้นวิธีต่างๆ สามารถสรุปได้ว่าการปรับสภาพเบื้องต้นต้นข้าวโพดโดยการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2% ช่วยให้ระบบมีประสิทธิในการผลิตก๊าซชีวภาพมากขึ้น สามารถให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด โดยปริมาณก๊าซชีวภาพมีค่ามากกว่าชุดควบคุมถึง 7 เท่า (รายละเอียดดังตารางที่ 4.5)

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักข้าวโพดที่ปรับสภาพสภาวะต่างๆ

ชุดทดลอง	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้				CH4 %	CH_4/ kg biomass (l/kg)
	l	l/kg TVS add	l/kg TVS removed	l/kg biomass		
ข้าวโพดแห้ง (ชุดควบคุม)	-	-	-	-	-	-
การปรับสภาพด้วย NaOH 2%	7.03	130.2	80.69	103.4	54.0	56.1
การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยนึ่งที่ความดัน 180 ºC นาน 30 นาที	-	-	-	-	-	-
หมักร่วมกับมูลสุกร 5%	0.697	12.91	23.1	12.02	45.9	5.52
การปรับสภาพด้วย NaOH 2% หมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 0.5%	5.008	92.74	148.1	48.15	46.7	22.49
การปรับสภาพด้วย NaOH 2% หมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 1%	12.986	240.48	170.05	124.87	57.3	71.55
การปรับสภาพด้วย NaOH 2% หมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 2%	-	-	-	-	-	-

จากผลการทดลองในการปรับสภาพเบื้องต้นต้นข้าวโพด การใช้สารละลายด่างสามารถเกิดก๊าซชีวภาพได้ปริมาณสูงสุด ซึ่งสามารถให้ปริมาณก๊าซชีวภาพได้มากกว่าการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการลดขนาดแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วน 95 : 5 ถึง 10 เท่า และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพมากขึ้นจึงนำกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาใช้เป็นตัวหมักร่วมเพื่อเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในระบบ จากการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วนต่างๆ

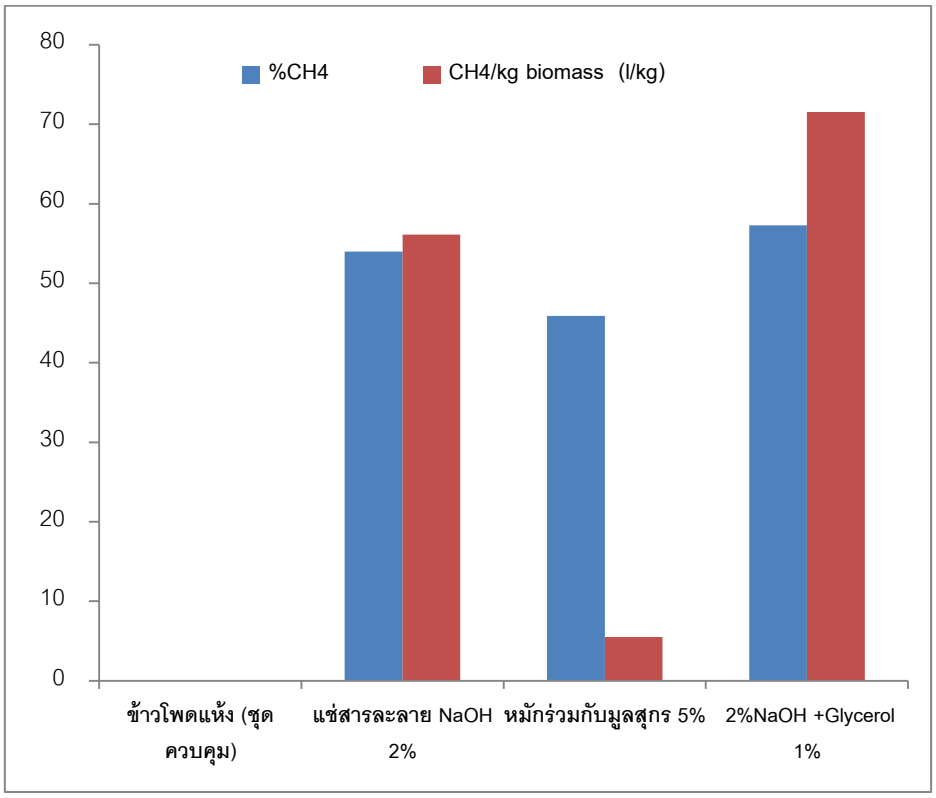
พบว่าการเติมกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 1% มีประสิทธิภาพสูงสุด สามารถให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงขึ้นถึง 12.986 ลิตร เมื่อเปรียบเทียบการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการใช้ด่างที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 7.03 ลิตร การเติมกลีเซอรอลที่ 1% ลงไปสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เพิ่มขึ้นถึง 12.986 ลิตร ซึ่งคิดเป็นปริมาณก๊าซชีวภาพที่เพิ่มขึ้นถึง 84.72% (ดังภาพที่ 4.13)



ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบการเกิดก๊าซชีวภาพของชุดควบคุม การปรับสภาพด้วย NaOH 2% หมักร่วมกับมูลสุกร 5% และการปรับสภาพด้วย NaOH 2% หมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 1%

เมื่อพิจาราณาปริมาณก๊าซมีเทนพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก การปรับสภาพเบื้องต้นด้วย NaOH 2% หมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 1% ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดถึง 57.3% คิดเป็น 71.55 ลิตร CH_4/ กิโลกรัม biomass และชุดการปรับสภาพเบื้องต้นโดยใช้สารละลายด่างให้ปริมาณก๊าซมีเทน 54% คิดเป็น 56.1 ลิตร CH_4/ กิโลกรัม biomass และการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการลดขนาดแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วน 95 : 5 ให้ปริมาณก๊าซมีเทน 45.9% คิดเป็น 5.52 ลิตร CH_4/ กิโลกรัม biomass ตามลำดับ เช่นเดียวกับปริมาณของก๊าซชีวภาพ หาก

พิจารณา % CH_4 จะสังเกตว่าการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการลดขนาดแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรให้เปอร์เซ็นก๊าซมีเทนไม่ต่างกับชุดการทดลองที่เหลือมากนัก ต่างจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยการลดขนาดแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรให้ปริมาณต่ำ (ดังภาพที่ 4.14)



ภาพที่ 4.14 การเปรียบเทียบการเกิดก๊าซมีเทนของชุดควบคุม การปรับสภาพด้วย NaOH 2% หมักร่วมกับมูลสุกร 5% และการปรับสภาพด้วย NaOH 2% หมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 1%

4.9 การเปรียบเทียบผลการวิจับกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากผลการทดลองพบว่าการปรับสภาพเบื้องต้นต้นข้าวโพดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2% ในระยะเวลา 30 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพปริมาณสูงสุดถึง 130.2 ลิตร/กิโลกรัม TVS add และพบปริมาณก๊าซมีเทน 54% หรือ 56.1 ลิตร CH_4/กิโลกรัม biomass ซึ่งต้นข้าวที่ทำการลดขนาดแต่ไม่มีการปรับสภาพเบื้องต้น ในระยะเวลา 30 วัน ยังไม่พบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น อาจต้องใช้ระยะเวลามากกว่า 30 วันในการผลิตก๊าซชีวภาพ จากผลการทดลองจึงกล่าวได้ว่าการปรับสภาพเบื้องต้นช่วยลดระยะในการผลิตก๊าซชีวภาพลงได้ เพื่อเพิ่ม

ประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงนำของเสียกลีเซอรอลมาใช้เป็นตัวหมักร่วมกับต้นข้าวโพดที่มีการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายด่าง ซึ่งการเติมของเสียกลีเซอรอลที่อัตราส่วน 1% สามารถผลิตก๊าซชีวภาพปริมาณสูงสุดถึง 248.48 ลิตร/กิโลกรัม TVS add และพบปริมาณก๊าซมีเทน 57.3% หรือ 71.55 ลิตร CH_4/กิโลกรัม biomass จากผลการทดลองจึงกล่าวได้ว่าการเติมของเสียกลีเซอรอลช่วยเพิ่มเพิ่มประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองอื่นๆ ที่ใกล้เคียงกันพบว่า ผลของปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้อยู่ในเกณฑ์ปานกลางถึงดี แต่ผลปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้ไม่สูงมากนัก (รายละเอียดข้อมูลแสดงดังตารางที่ 4.6) ซึ่งองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพโดยทั่วไปจะประกอบด้วยก๊าซมีเทนอยู่ประมาณ 60-70% คุณสมบัติของก๊าซชีวภาพที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงจะขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซมีเทน ซึ่งในกรณีที่ก๊าซชีวภาพที่ได้มีสัดส่วนของก๊าซมีเทน (CH_4) ต่ำมากจนถือว่าอยู่ในระดับที่ติดไฟยากคือ ปริมาณก๊าซมีเทน (CH_4) ที่พบต่ำกว่า 45% ซึ่งในกรณีนี้อาจจำเป็นที่ต้องแก้ไขซึ่งสาเหตุอาจมาจากปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นมากเกินไป ต้องลดปริมาณปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลง ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่สูงก็เป็นสาเหตุที่ทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนต่ำเช่นกัน (พิชญ รัชฎาวงศ์, 2553) จากการวิเคราะห์สมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบที่ใช้ (รายละเอียดดังตารางที่ 4.1) อาจเป็นไปได้ว่าด้วยปริมาณคาร์บอนที่สูงมาก และจุลินทรีย์ มูลสุกรหรือกลีเซอรอลที่เติมลงไปมีปริมาณไนโตรเจนต่ำเกินไปที่จะทำให้อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อการระบบการผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศ ซึ่งระบบที่ทำการทดลองไม่มีการเติมสารอาหาร ซึ่งถ้าหากมีการเติมสารอาหารที่มีปริมาณไนโตรเจนสูง อาจทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงขึ้น

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบประสิทธภาพการทดลองกับงานวิจัยอื่นๆ

งานวิจัย	สารตั้งต้น	ปริมาณก๊าซเฉลี่ย	องค์ประกอบก๊าซ
จิรวัฒน์ ชาลีวรรณ (2546)	วัสดุเหลือทิ้งจากผลไม้บรรจุกระป๋อง	0.157–0.68 L/g VS	ก๊าซมีเทน ร้อยละ 40.24
สุรพงศ์ นนทประเสริฐ (2553)	ใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยไอน้ำ	ก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.954 L/g VS	ก๊าซมีเทน ร้อยละ 50.3
	ใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นด้วยน้ำร้อน	ก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.405 L/g VS	ก๊าซมีเทน ร้อยละ 49.69
	มูลวัวและใบอ้อยอัตราส่วน 1:3	ก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.436 L/g VS	ก๊าซมีเทน ร้อยละ 40.9
	มูลวัวและใบอ้อยอัตราส่วน 1:2	ก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.516 L/g VS	ก๊าซมีเทน ร้อยละ 61.6
สมจินตนา ลิ้มสุข และคณะ (2554)	เศษอาหารจากโรงอาหารหมักร่วมกับกลีเซอรีนได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลชุมชน	ก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.789 m^3biogas/kgCOD	ปริมาณก๊าซมีเทน เท่ากับ 0.465 m^3CH_4/kgCOD หรือ 0.445 m^3CH_4/kgVS
Carrère, Sialve and Bernet (2009)	ของมูลสุกรผ่านการการเตรียมด้วยความร้อน 190 ºC	-	ก๊าซมีเทน 4,963 L/m^3manure
	ของมูลสุกรที่ผ่านการเตรียมด้วยเคมีความร้อน ที่ pH 10 190 ºC	-	ก๊าซมีเทน 7,015 L/m^3manure
เฉลิมเดช ณ ลำพูน (2553)	กลีเซอรอลและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงสกัดน้ำมันปาล์มโดยทำการป้อนอาหารแบบกะ	-	ก๊าซมีเทน 0.24 L CH_4/g glycerol
	กลีเซอรอลและน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากโรงสกัดน้ำมันปาล์มโดยทำการป้อนอาหารแบบกึ่งต่อเนื่อง	-	ก๊าซมีเทน 0.29 L CH_4/g glycerol
Zhu, Wan and Li (2010)	ซังข้าวโพด (ชุดควบคุม)	ก๊าซชีวภาพเท่ากับ 275.9 L/kg VS	-
	ซังข้าวโพดที่เตรียมด้วย NaOH 1%	ก๊าซชีวภาพเท่ากับ 278.9 L/kg VS	-
	ซังข้าวโพดที่เตรียมด้วย NaOH 2.5%	ก๊าซชีวภาพเท่ากับ 300.7 L/kg VS	-
	ซังข้าวโพดที่เตรียมด้วย NaOH 5%	ก๊าซชีวภาพเท่ากับ 372.4 L/kg VS	-

Zheng et al., (2009)	ต้นข้าวโพดที่ผ่านการเตรียมด้วย NaOH	ก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น 72.9%	ผลผลิตมีเทนสูงขึ้น 73.4 %
การทดลองนี้*	ต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วย NaOH 2 %	ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 130.2 L/kg TVS add หรือ 80.69 L/kg TVS removed	ปริมาณก๊าซมีเทน 56.1 L CH_4/ kg biomass
	ต้นข้าวโพดที่หมักร่วมกับมูลสุกร 5%	ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 12.91 L/kg TVS add	ปริมาณก๊าซมีเทน 5.52 L CH_4/ kg biomass
	ต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH 2% และหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 0.5%	ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 92.74 L/kg TVS add	ปริมาณก๊าซมีเทน 22.49 L CH_4/ kg biomass
	ต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพด้วย NaOH 2 % และหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 1%	ปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 248.48 L/kg TVS add	ปริมาณก๊าซมีเทน 71.55 L CH_4/ kg biomass

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

ข้าวโพดจัดว่าเป็นพืชที่มีลิกโนเซลลูโลสที่สูง ซึ่งยากต่อการย่อยสลายของแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นจึงทำให้มีอัตราการย่อยสลายและการผลิตก๊าซชีวภาพในปริมาณที่ต่ำ การปรับสภาพเบื้องต้นเป็นขั้นตอนหนึ่งที่ช่วยทำให้เกิดการย่อยสลายเร็วยิ่งขึ้น ในการปรับสภาพเบื้องต้นก็มีหลากหลายวิธี ในการเลือกควรคำถึงความเหมาะสม เช่น วัตถุดิบ ความชำนาญของผู้ทดลอง ต้นทุนและเกิดผลกระทบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพน้อยที่สุด ซึ่งจากผลการทดลองสรุปได้ ดังนี้

5.1 การใช้สารละลายด่าง (แช่ NaOH เข้มข้น 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด โดยสามารถผลิตได้ 80.7 L/kg VS removed และสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 43.6 L/kg VS removed อธิบายเพิ่มได้ว่า ระบบมีเสถียรภาพดี มีค่าอัตราส่วน VFA/Alk ต่ำกว่า 0.4 ตลอดการทดลอง ปริมาณของของแข็งระเหยลดลงร้อย 46.8 ตะกอนสลัดจ์ที่เหลือมีองค์ประกอบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.094% และ 0.023% ตามลำดับ

5.2 การหมักต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายด่าง (แช่ NaOH เข้มข้น 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง) ร่วมกับตัวหมักร่วม (Co-digestion) กลีเซอรอล พบว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น โดยการเติมกลีเซอรอลที่ร้อยละ 1% โดยปริมาตรให้ระบบจะให้ผลดีที่สุดสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด (170.1 L/kg VS removed สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงขึ้นร้อยละ 52.6 และสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 85.4 L/kg VS removed อธิบายเพิ่มเติมได้ว่า ระบบมีเสถียรภาพดี มีค่าอัตราส่วน VFA/Alk ต่ำกว่า 0.4 ตลอดการทดลอง ปริมาณของของแข็งระเหยลดลงร้อยละ 43.8 ตะกอนสลัดจ์ที่เหลือมีองค์ประกอบของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.087% และ 0.017% ตามลำดับ

5.3 เนื่องจากการที่จะทำให้กระบวนการย่อยของระบบมีความเสถียร การเติมกลีเซอลรอลลงไปเป็นตัวหมักร่วมจะต้องจำกัดความเข้มข้นของกลีเซอรอลที่เติมลงไปจะต้องมีวิธีควบคุมจำนวนกลีเซอรอลที่เติมลงไปเพื่อไม่ให้มีภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากเกินไป จากผลการทดลองสรุปได้ว่า การเติมกลีเซอรอลที่ 1% (ปริมาตร/ปริมาตร) สามารถเพิ่มการผลิต CH_4 โดยมีการย่อยกลีเซอรอลไปหมดทำนองเดียวกับงานวิจัย

ของ Fountoulakis และคณะ (2010) และนอกจากนี้ ก็ยังทำให้ชีวมวลที่แอคทีฟในระบบมีการเจริญเติบโตมากขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากมีการเติมกลีเซอรอลในสารตั้งต้นมากกว่า 1% จะทำให้การย่อยสลายกลีเซอรอลทางชีวภาพเกิดขึ้นเร็วกว่าการย่อยสลายโพรไพโอเนททางชีวภาพ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นจึงเป็นการแสดงว่าหากในถังปฏิกิริยามีภาระบรรทุกกลีเซอรอลมากเกินไปความเข้มข้นของไพโอเนทก็จะสูงขึ้น จึงควรที่จะต้องควบคุมปริมาณกลีเซอรอลที่ป้อนเข้าไปในกระบวนการอย่างระมัดระวังเพราะถ้าระบบมีภาระบรรทุกมากเกินไปจะเกิดผลเสียต่อระบบได้ นอกจากนี้ปัจจัยต่างๆ และสภาวะแวดล้อมก็มีส่วนสำคัญเช่นกันได้แก่ ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการเกิดก๊าซชีวภาพได้ดีควรอยู่ในช่วง 6.8 – 7.2 และระบบจะมีประสิทธิภาพลดลงทันทีเมื่อพีเอชของระบบต่ำกว่า 6.2 เนื่องจากแบคทีเรียที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนมีความไวต่อค่าพีเอชที่เปลี่ยนแปลงมาก อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมของแบคทีเรียนผลิตมีเทนอยู่ที่ 20–30 ซึ่งถ้าหากมีค่าแตกต่างจากนี้มากจนเกินไปอาจทำให้ประสิทธิภาพของระบบในการผลิตมีเทนลดลง อุณหภูมิ ปริมาณความชื้น ขนาดของอนุภาคสารอินทรีย์ กรดอินทรีย์ระเหย ความเป็นด่าง ปริมาณสารอาหารที่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ รวมทั้งสารพิษที่มีผลต่อจุลินทรีย์ต่างก็มีส่วนสำคัญต่อประสิทธิภาพระบบด้วยเช่นกัน (กนิษฐ วิมลรัตน์, 2552) ดังนั้นเพื่อให้ระบบสามารถมีประสิทธิภาพสูง ปัจจัยต่างๆที่กล่าวมานี้ต้องควบคุมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เฉลิมเดช ณ ลำพูน. การศึกษาผลของอัตราส่วนสารอาหารต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2553.

ชมพูนุท พรเจริญนพ. ไบโอดีเซลพลังงานทางเลือกใหม่ในยุคน้ำมันแพง. ข่าวรามคำแหง (21-27 กรกฎาคม 2551) : 6.

ชัชนันท์ นิวาสวงษ์ และ เฉลิม เรืองวิริยะชัย. การผลิตเซลลูโลซิกเอทานอลในประเทศไทย. วารสารวิทยาศาสตร์ มข 40 ฉบับที่ 4 (2555) : 1073-1088.

ปาริชาต คนซื่อ. การคัดเลือกและการผลิตเอนไซม์อาหารสัตว์จากเชื้อราชอบร้อน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2549.

พิชญ รัชฎาวงศ์. ก๊าซชีวภาพ. วารสารช่างพูด 4 (กันยายน-ตุลาคม 2553) : 12-13.

พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, กรม. ศักยภาพชีวมวลในประเทศไทย [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th/dede/index.php?option=com_content&view=article&id=130%3A2010-05-07-08-10-57&catid=58%3A2010-04-06-09-36&Itemid=68&lang=en [22 มกราคม 2555]

ริกาญจน์ ฉัตรสกุลวิไล. ลิกนิน-แทนนิน [ออนไลน์]. 2555. แหล่งที่มา: http://www2.diw.go.th/research/%E0%CD%A1%CA%D2%C3%E0%BC%C2%E1%BE%C3%E8/%C5%D4%A1%B9%D4%B9.pdf [20 มีนาคม 2556]

รุสนี โตะกีเล. คุณสมบัติเพื่อการประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมของเอนไซม์ผสมที่ผลิตจากจุลินทรีย์สารเร่ง พด.1โดยใช้ซานอ้อยและเปลือกถั่วลิสงเป็นแหล่งคาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2552.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. เล่มที่ 1. กรุงเทพมหานคร : กรมควบคุมมลพิษ, 2546.

มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่ม 2, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานมหาวิทยาลัยเชียงใหม่. สาระน่ารู้เกี่ยวกับพลังงาน [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.erdi.or.th/knowledge3.php [4 มกราคม 2555]

สมจินตนา ลิ้มสุข, ปุณยวี เพียรธรรม และ อนุรักษ์ ปีติรักษ์สกุล. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารร่วมกับกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล. วิศวกรรมสาร มข 38 ฉบับที่ 2 (เมษายน-มิถุนายน 2554) : 101-110.

สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ. กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพพื้นฐานและการคำนวณออกแบบ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สยามสเตชั่นเนอรี่ซัพพลายส์ แผง 22 จตุจักร , 2552.

สุธิดา อรรถยานันทน์ และ อมรชัย อาภรณ์วิชานพ. มาทำความรู้จักกับกลีเซอรอลว่าที่แหล่งพลังงานทดแทนในอนาคต. Technology promotion 39 (December 2012-January 2013) : 49-52

สุรชัย ศรีชินราช. องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: http://www.buranapagroup.com/knowledge_chemical.php [4 พฤษภาคม 2556]

สุรพงศ์ นนทประเสริฐ. การบำบัดเบื้องต้นโดยใช้วิธีทางความร้อนและทางชีวภาพต่อความสามารถในการย่อยสลายของใบอ้อยในระบบไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.

ศูนย์ส่งเสริมพลังงานชีวมวล, มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม. ชีวมวล. 2,000 เล่ม, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: คิวพริ้นท์แมเนจเม้นท์, 2549.

อรุณี ศุภสินสาธิต. พลังงานจากชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสสูง. วารสารสิ่งแวดล้อม 16 ฉบับที่ 2 (เมษายน-มิถุนายน 2555) : 36-43.

อุตสาหกรรม,กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบการผลิตการควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas)สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. 500 เล่ม, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553.

ภาษาอังกฤษ

Aloneso, D.M., Wettstein, S.G. and Dumesic, J.A. Bimetallic catalysts for upgrading of biomass to fuels and chemicals. Chemical Society Reviews 24 (2012) : 8075-8098

Asturias, R. et al., Opportunities and Challenges Involved in the Production of Cellulose-based Alcohol [online]. 2007. Available from: http://dc108.4shared.com/doc/newkmwil/preview.html [8 May 2013]

Carrère, H., Sialve, B. and Bernet, N. Improving pig manure conversion into biogas by thermal and thermo-chemical pretreatments. Bioresource Technology 100 (2009) : 3690-3694.

Diwan, J. J., Lipids and Membrane Structure. [online]. 2007. Available from: http://www.rpi.edu/dept/bcbp/molbiochem/MBWeb/mb1/part2/lipid.htm[10 May 2013]

Fountoulakis, M.S., Petousi, I. and Manios, T. 2010. Co-digestion of sewage sludge with glycerol to boost biogas production. Waste Management.30 1849–1853.

Wu, X., Yao, et al. Biogas and CH_4 productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source. Bioresource Technology 101 (2010) : 4042-4047.

Yarris, L. The Evolutionary Road to Biofuels [online]. 2010. Available from: http://www.lbl.gov/Publications/YOS/Feb/ [5 May 2013]

Zheng, M., et al. Enhancing anaerobic biogasification of corn stover through wet state NaOH pretreatment. Bioresource Technology 100 (2009) : 5140-5145.

Zhu, J., Wan, C. and Li, Y. Enhanced solid-state anaerobic digestion of corn stover by alkaline pretreatment. Bioresource Technology 101 (2010) : 7523-7528.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด (ชุดควบคุม)

ตารางที่ ก-1 พีเอช อุณหภูมิและปริมาณก๊าซสะสมของชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด (ชุดควบคุม)

วันที่	พีเอช	อุณหภูมิ (ºC)	ก๊าซชีวภาพ (ml)
0	7.55	27.4	0
1	7.43	26.3	0
2	7.41	31.3	0
3	7.23	31.5	0
4	7.12	31.9	0
5	7.1	31.9	0
6	7.34	31.8	0
7	7.07	31.5	0
8	6.99	31.4	0
9	6.95	31.3	0
10	7.01	31.5	0
11	7.12	31.9	0
12	7.25	30.5	0
13	7.42	29.2	0
14	7.46	29.2	0
15	7.48	29.1	0
16	7.53	29.1	0
17	7.58	30.2	0
18	7.73	29.9	0
19	7.54	31.4	0
20	7.56	30	0
21	7.57	34.4	0
22	7.54	31.9	0
23	7.44	31.7	0
24	7.40	31.2	0
25	7.38	31.8	0
26	7.35	30.8	0
27	7.37	31.1	0
28	7.25	31.2	0
29	7.34	31.9	0
30	7.35	31.9	0

ตารางที่ ก-2 ปริมาณซีโอดี (COD) ตะกอน หนัก (SS) และ ของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด (ชุดควบคุม)

วันที่	COD (mg/l)	SS (mg/l)	VS (mg/l)
0	46,000	23,800	22,800
1	43,200	20,750	23,050
2	40,000	24,500	24,830
4	32,000	28,200	28,010
6	27,200	21,150	20,630
9	11,200	20,650	19,840
11	24,000	21,800	20,010
13	40,000	20,700	19,430
16	43,200	20,300	19,250
18	36,750	19,700	18,720
20	26,400	19,850	18,910
23	34,840	20,210	18,850
25	14,545	20,050	18,600
27	14,820	19,670	15,600
30	15,483.87	19,800	15,480

ตารางที่ ก-3 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) สภาพความเป็นด่าง (Alk) และอัตราส่วน VFA/Alk ของชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาด (ชุดควบคุม)

วันที่	VFA (mg/l)	Alk (mg/l)	VFA/Alk
0	250	2,667	0.09
1	26	1,550	0.02
2	338	2,835	0.12
4	431	2,735	0.16
6	773	2,685	0.29
9	806	2,700	0.30
11	615	2,925	0.21
13	608	3,275	0.19
16	476	3,300	0.14
18	375	3,417	0.11
20	281.25	3,292	0.09
23	225	3,413	0.07
25	262.5	3,175	0.08
27	217.5	3,300	0.07
30	205	3,215	0.06

ภาคผนวก ข

ผลการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้น
โดยการลดขนาดร่วมกับการใช้สารละลายด่าง (NaOH 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง)

ตารางที่ ข-1 พีเอช อุณหภูมิและปริมาณก๊าซสะสมของชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการใช้สารละลายด่าง (NaOH 2% เป็นเวลา 48

วันที่	พีเอช	อุณหภูมิ (ºC)	ก๊าซชีวภาพ (ml)
0	7.72	26.7	0
1	7.44	28.6	0
2	7.37	29.1	0
3	7.34	30.5	0
4	7	31.9	89
5	6.98	20.8	712
6	9.88	31.1	890
7	6.5	37.6	1,025
8	6.8	37.5	1,335
9	7	37.8	1,737
10	7.02	31.2	2,805
11	6.92	34.2	3,471
12	7.01	31.4	3,560
13	7.00	30.8	3,695
14	7.01	34.3	3,827
15	6.98	34.5	4,229
16	7.03	34.5	4,450
17	7.18	36.9	4,852
18	7.25	35	4,852
19	7.18	35.5	5,607
20	7.31	37.1	6,141
21	7.18	37	6,454
22	-	-	6,586
23	7.32	32.4	6,853
24	-	-	6,853
25	7.30	38.2	6,853
26	7.21	37.3	6,853
27	7.29	38.3	6,942
28	7.32	37.6	7,031
29	7.32	37.3	7,031
30	7.33	37.1	7,031

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ ข-2 ปริมาณซีโอดี (COD) ตะกอนหนัก (SS) และ ของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการใช้สารละลายด่าง (NaOH 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง)

วันที่	COD (mg/l)	SS (mg/l)	VS (mg/l)
0	48,251	33,750	31,000
1	37,900	33,700	32,320
2	34,285	30,100	32,100
4	29,600	20,700	31,840
7	25,750	22,750	31,760
9	21,600	34,400	22,050
11	18,800	24,200	21,080
14	15,540	22,800	19,780
16	19,825	22,630	19,630
18	7,742	21,650	18,450
21	12,600	21,400	18,100
23	15,971	20,800	16,900
25	19,890	20,680	16,780
28	20,530	19,800	16,350
30	23,818	19,380	16,480

ตารางที่ ข-3 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) สภาพความเป็นด่าง (Alk) ปริมาณซีโอดี (COD) ตะกอนหนัก (SS) และ ของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดร่วมกับการใช้สารละลายด่าง (NaOH 2% เป็นเวลา 48 ชั่วโมง)

วันที่	VFA (mg/l)	Alk (mg/l)	VFA/Alk
0	30	1,105	0.03
1	98	1,075	0.09
2	488	4,987.5	0.10
4	743	1,863	0.40
7	1,013	2,088	0.49
9	1,290	4,275	0.30
11	1,635	4,400	0.37
14	1,868	4,575	0.41
16	2,138	5,141	0.42
18	2,205	4,850	0.45
21	1,053.75	2,775	0.38
23	457.5	5,025	0.09
25	292.5	4,875	0.06
28	213.75	5,037.5	0.04
30	337.5	4,950	0.07

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วน 95 :

ตารางที่ ค-1 พีเอช อุณหภูมิและปริมาณก๊าซสะสมของชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วน 95 : 5

วันที่	พีเอช	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (ml)
0	7.71	30	0
1	7.39	31.5	0
2	7.19	31	0
3	6.8	31.3	0
4	-	-	123
5	7	30.8	287
6	-	-	328
7	7.2	29.9	410
8	7	30.4	574
9	6.8	29.8	615
10	6.88	30.3	697
11	7.02	29.7	697
12	6.91	30.4	697
13	7.00	31.2	697
14	6.98	31.3	697
15	-	-	697
16	6.87	32.4	697
17	-	-	697
18	6.96	31.9	697
19	6.94	31.8	697
20	7.11	32	697

ตารางที่ ค-2 ปริมาณซีโอดี (COD) ตะกอนหนัก (SS) และ ของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วน 95 : 5

วันที่	COD (mg/l)	SS (mg/l)	VS (mg/l)
0	58,640	25,500	24,780
1	34,640	23,700	22,800
2	24,000	26,200	25,980
4	17,600	22,450	21,760
6	16,000	25,050	23,050
9	36,000	23,050	21,600
11	48,000	22,100	20,830
13	24,000	21,050	21,200
16	22,000	21,600	20,400
18	20,000	21,850	20,750
20	18,700	20,900	20,400
23	16,000	20,300	19,650
25	8,000	21,050	20,980
27	8,000	20,450	19,750

ตารางที่ ค-3 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) สภาพความเป็นด่าง (Alk) และอัตราส่วน VFA/Alk ของชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วน 95 : 5

วันที่	VFA (mg/l)	Alk (mg/l)	VFA/Alk
0	266	1,075	0.25
1	180	1,175	0.15
2	274	1,325	0.21
4	188	1,250	0.15
6	180	1,875	0.10
9	203	2,050	0.10
11	202	2,047	0.10
13	203	2,225	0.09
16	555	2,525	0.22
18	244	2,363	0.10
20	513.75	2,600	0.20

ภาคผนวก ง
ผลการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 0.5%

ตารางที่ ง-1 พีเอช อุณหภูมิและปริมาณก๊าซสะสมของชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 0.5%

วันที่	พีเอช	อุณหภูมิ (ºC)	ก๊าซชีวภาพ (ml)
0	7.68	32	0
1	7.15	29.7	0
2	8.67	31.7	0
3	8.66	32.5	0
4	7.89	32.7	0
5	7.75	33.1	0
6	7.43	32.3	84
7	7.3	34.9	252
8	7.9	33.1	714
9	7.67	32.9	1,260
10	6.99	33	1,890
11	6.84	32.9	2,362
12	6.91	33	2,866
13	7.02	33.2	3,454
14	7.07	32.8	3,790
15	7.05	32.4	4,042

วันที่	พีเอช	อุณหภูมิ (ºC)	ก๊าซชีวภาพ (ml)
16	7.03	32.1	4,420
17	7.06	31.6	4,672
18	6.97	32.5	4,798
19	7.02	32.5	4,840
20	7.14	32.6	4,924
21	7.28	32.8	4,924
22	7.4	33.1	4,966
23	7.86	32	4,966
24	7.92	32.6	5,008
25	8.14	32.2	5,008
26	8.26	32.5	5,008
27	8.28	32.9	5,008
28	8.18	33	5,008
29	8.2	32.9	5,008
30	8.16	33.1	5,008

ตารางที่ ง-2 ปริมาณซีโอดี (COD) ตะกอนหนัก (SS) และ ของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 0.5%

วันที่	COD (mg/l)	SS (mg/l)	VS (mg/l)
0	39,400	28,550	28,200
1	37,750	26,700	27,516.667
3	36,500	28,000	27,200
5	36,900	26,850	27,493
7	35,860	25,500	26,594.2
9	33,630	24,450	26,370
11	32,050	23,400	25,850
13	30,570	21,725	25,783.333
15	28,980	19,316.667	24,276.67
17	27,150	21,750	23,783.333
19	25,600	19,500	23,594
21	23,900	19,100	23,270
23	21,450	17,600	23,018
25	19,200	16,700	22,924
27	18,500	16,250	22,720
28	17,300	15,750	22,564

ตารางที่ ง-3 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) สภาพความเป็นด่าง (Alk) และอัตราส่วน VFA/Alk ต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 1%

วันที่	VFA (mg/l)	Alk (mg/l)	VFA/Alk
0	975	4,890	0.2
1	1,012.5	5,075	0.2
3	1,650	9,100	0.18
5	975	9,150	0.11
7	2,512.5	8,375	0.3
9	3,900	8,750	0.45
11	4,125	8,800	0.47
13	3,712.50	9,475	0.39
15	3,820	9,782	0.39
17	3,794	9,812	0.39
19	3,714	10,025	0.37
21	3,624	9,967	0.36
23	3,518	9,842	0.36
25	3,424	9,760	0.35
27	3,306	9,715	0.34
29	3,263	9,590	0.34

ภาคผนวก จ
ผลการทดลองการปรับสภาพเบื้องต้นของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 1%

ตารางที่ จ-1 พีเอช อุณหภูมิและปริมาณก๊าซสะสมของชุดต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 1%

วันที่	พีเอช	อุณหภูมิ (ºC)	ก๊าซชีวภาพ (ml)
0	7.74	30.1	0
1	7.21	32.8	0
2	6.55	33.4	0
3	7.07	31.1	129
4	7.02	30.9	645
5	6.99	31.1	1,376
6	7.16	32.8	2,365
7	7.22	31.3	2,881
8	7.39	31.9	3,311
9	7.37	32.1	4,128
10	7.35	32.1	5,203
11	7.41	32.5	5,375
12	7.39	32.5	5,891
13	7.42	32.2	6,278
14	7.41	32.1	6,923
15	7.47	32.0	7,654

วันที่	พีเอช	อุณหภูมิ (ºC)	ก๊าซชีวภาพ (ml)
16	7.54	33.2	8,256
17	7.53	33.4	8,858
18	7.51	33.1	9,718
19	7.47	32.9	10,750
20	7.41	32.7	11,653
21	7.35	32.5	12,341
22	7.23	32.5	12,771
23	7.14	32.1	12,943
24	7.21	33.6	12,943
25	7.26	33.7	12,986
26	7.33	33.3	12,986
27	7.35	32.6	12,986
28	7.42	30.3	12,986
29	7.47	31.3	12,986
30	7.45	31.5	12,986

ตารางที่ จ-2 ปริมาณซีโอดี (COD) ตะกอนหนัก (SS) และ ของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอ1%

วันที่	COD (mg/l)	SS (mg/l)	VS (mg/l)
0	42,890	25,700	29,081
1	39,500	23,330.33	28,480
3	38,250	27,111.11	28,841
5	36,500	29,850	27,592
7	36,200	27,216.667	26,014
9	34,640	26,594.2	25,141
11	32,000	25,700	24,682
13	28,750	24,998.6	24,218
15	26,820	23,700	20,350
17	24,000	22,914	19,563
19	25,600	21,900	19,013
21	22,800	20,724	18,012
23	21,500	19,540	17,421
25	19,500	18,400	17,984
27	18,900	18,090	15,984

ตารางที่ จ-3 ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) สภาพความเป็นด่าง (Alk) และอัตราส่วน VFA/Alk ต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพแล้วหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 1%

วันที่	VFA (mg/l)	Alk (mg/l)	VFA/Alk
0	142.5	917.4	0.16
1	277.2	1,050	0.26
3	1,278.125	3,000	0.42
5	2,490	8,016.667	0.31
7	2,136.667	9,266.667	0.23
9	3,875	10,166.667	0.38
11	2,683.333	9,700	0.28
13	2,950	9,760	0.30
15	3,225	9,801	0.33
17	3,800	9,833.333	0.39
19	3,789	10,066.667	0.38
21	3,624	10,864	0.33
23	3,416	11,536	0.30
25	3,288	10,568	0.31
27	2,918	11,042	0.26

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ข้าพเจ้า นางสาวชนกพร วงษ์วัน ชื่อเล่น กวาง เกิดเมื่อวันที่ 4 เมษายน 2531 เกิดที่จังหวัดลำปาง บิดาชื่อ พ.ต.อ. จิตตพล วงษ์วัน และ มารดาชื่อ นางจินตนา วงษ์วัน จบชั้นประถมศึกษาจากโรงเรียนไตรภพวิทยา จังหวัดลำปาง จบชั้นมัธยมศึกษาจากโรงเรียนบุญวามทย์วิทยาลัย จังหวัดลำปาง สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยศิลปากรในปีการศึกษา 2553 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2553