รหัสโครงการ SUT7-719-57-12-63

รายงานการวิจัย

การผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียจากฟาร์มกุ้ง

(BIOGAS PRODUCTION FROM SHRIMP FARMING WASTES)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่ผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-719-57-12-63

รายงานการวิจัย

การผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียจากฟาร์มกุ้ง

(BIOGAS PRODUCTION FROM SHRIMP FARMING WASTES)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อัมพรรค์ วรรณโกมล

สาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี

สำนักวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่ผู้เดียว

กรกฎาคม 2560

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2557 และงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์ตัวอย่างของเสียจากนากุ้งและข้อมูลที่สำคัญจากฟาร์มกุ้งโดยผู้ประกอบการหลายท่าน ที่จังหวัดฉะเชิงเทรา และได้รับความอนุเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์จาก บริษัท สงวนวงษ์อุตสาหกรรม จำกัด จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้วิจัย

กรกฎาคม 2560

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและวัสดุหมักร่วมต่างๆ ด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบแบตช์ เป็นระยะเวลา 30 วัน ภายใต้การทดลองที่อุณหภูมิห้องและใช้ปริมาณสัดส่วนของเชื้อจุลินทรีย์และสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน 3 2 และ 1 ต่อ 1 ตามลำดับ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งเพียงอย่างเดียวนั้นให้ปริมาณผลผลิตของก๊าซชีวภาพ 0.21 0.34 และ 0.00 mL/g VS การย่อยสลายของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งร่วมกับฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุหมักร่วมให้ปริมาณผลผลิตของก๊าซชีวภาพ 0.29 0.67 และ 1.11 mL/g VS ตามลำดับ การย่อยสลายของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งโดยใช้วัสดุหมักร่วมเป็นฟางข้าวแสดงปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนมากที่สุด คือ 53.71 mL CH_4/g VS ผลการศึกษาที่ได้ยังบ่งชี้ให้เห็นอีกด้วยว่าการเพิ่มปริมาณสัดส่วนของเชื้อจุลินทรีย์และสารตั้งต้นนั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อปริมาณผลผลิตของก๊าซมีเทนที่มีสารตั้งต้นแตกต่างกัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the potential of biogas production from shrimp farming waste and from the different co-digesting under batch anaerobic digestion. The batch test was conducted for 30 days under room temperature condition at different inoculum to substrate ratios of 3, 2 and 1:1, respectively. The results showed the determined biogas yield was 0.21, 0.34 and 0.00 mL/g VS for shrimp farming waste, 0.29, 0.67 and 1.11 mL/g VS for co-digesting substrate of shrimp farming waste and rice straw, respectively. The shrimp farming waste using rice straw as co-digesting substrate displayed the maximum methanogenic activity 53.71 mL CH_4/g VS. Results of the study was also indicated that the increasing of inoculum to substrate ratio was directly proportional to the methane yield from different substrate.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ง
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.3.1 สถานที่ดำเนินงานวิจัย	2
1.3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและชีวภาพของของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย	3
1.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง	4
1.6.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน	4
1.6.1.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศและการเกิดก๊าซชีวภาพ	5
1.6.1.2 ข้อดีและข้อเสียของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	11
1.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	12
1.6.3 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)	23
1.6.4 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ (Biogas utilization)	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.6.5 การศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential, BMP)	28
1.6.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	28
บทที่ 2 วิธีการวิจัย	
2.1 วัสดุหมักที่ใช้ในการทดลอง	35
2.2 ระบบที่ใช้ในการทดลอง	37
2.3 การทดสอบระบบถังปฏิกรณ์	38
2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้หมัก	38
2.5 การวิเคราะห์ตะกอนของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและตะกอนของเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมันสำปะหลังและฟางข้าว	39
2.6 การทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพ	41
2.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	42
2.8 การคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี	43
บทที่ 3 ผลการทดลอง	
3.1 คุณสมบัติของวัสดุหมักที่ใช้ในการทดลอง	45
3.1.1 คุณสมบัติของของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง	45
3.1.2 คุณสมบัติของฟางข้าว	45
3.1.3 คุณสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมันสำปะหลัง	46
3.1.4 คุณสมบัติของของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งผสมกับฟางข้าว	46
3.2 ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการแบบแบตช์	46
3.3 การประเมินทางด้านค่าพลังงานที่ได้จากการใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งเพียงอย่างเดียวและการใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและฟางข้าว	59
3.4 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทน	60
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
4.1 สรุปผลการวิจัย	63
4.2 ข้อเสนอแนะ	64

บรรณานุกรม 65
ประวัติผู้วิจัย 71

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ความเข้มข้นในการกระตุ้นและยับยั้งของไอออนประจุบวกของโลหะเบา 19
ตารางที่ 1.2 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีผลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน 20
ตารางที่ 1.3 ระดับความเป็นพิษของโลหะหนักในการย่อยสลายภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน 22
ตารางที่ 1.4 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพโดยทั่วไป 24
ตารางที่ 1.5 คุณสมบัติก๊าซชนิดต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ 25
ตารางที่ 1.6 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซมีเทน 26
ตารางที่ 1.7 การเปรียบเทียบก๊าซชีวภาพกับเชื้อเพลิงต่างๆ 27
ตารางที่ 1.8 ปัจจัยพื้นฐานที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเกิดก๊าซมีเทน 32
ตารางที่ 2.1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้หมัก 38
ตารางที่ 2.2 วัสดุผสมและอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน 42
ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนและค่าที่วัดได้ ก่อนและสิ้นสุดการเดินระบบ 47
ตารางที่ 3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลองแบบ Biochemical Methane Potential (BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน 51
ตารางที่ 3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในการทดลองแบบ Biochemical Methane Potential (BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน 53
ตารางที่ 3.4 ตารางสรุปผลการผลิตก๊าซชีวภาพ (มีเทน) และค่าของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ จากการทดลองหาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน 58
ตารางที่ 3.5 ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในระยะเวลา 1 ปีในแต่ละสัดส่วนผสมที่ได้จากการทดลองที่สภาวะมาตรฐาน 60
ตารางที่ 3.6 การนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในระยะเวลา 1 ปี จากการทดลองที่สภาวะมาตรฐานมาเป็นพลังงานทดแทน 61

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 แผนผังขั้นตอนในการดำเนินการศึกษา 3
รูปที่ 1.2 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ 5
รูปที่ 1.3 การทำงานของจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดก๊าซมีเทน 10
รูปที่ 1.4 การเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในรูป COD เป็นก๊าซมีเทนด้วยปฏิกิริยาชีวเคมี แบบไร้ออกซิเจน 11
รูปที่ 1.5 ผลของอุณหภูมิต่อระยะเวลาการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพ 13
รูปที่ 1.6 ผลของค่าพีเอชต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ 14
รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอช ความเข้มข้นของ HCO_3^- และความเข้มข้นของ CO_2 15
รูปที่ 1.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) 21
รูปที่ 1.9 ข้อเสนอแนะในการใส่สารต่างๆในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน 29
รูปที่ 1.10 อุปกรณ์การทดลองเพื่อใช้ในการวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน 31
รูปที่ 1.11 ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ Methanogenic 32
รูปที่ 2.1 ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งในจังหวัดฉะเชิงเทรา 35
รูปที่ 2.2 ฟางข้าวที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการบด 36
รูปที่ 2.3 เชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานมันสำปะหลังสงวนวงษ์อุตสาหกรรม 36
รูปที่ 2.4 แบบจำลองระบบหมักแบบแบตช์และวิธีการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพโดยการแทนที่น้ำ 37
รูปที่ 2.5 เครื่องก๊าซโครโมโทกราฟฟี รุ่น GC 6890A (Agilent Technology, USA) 43
รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TS และ VS ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน 49
รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TS และ VS ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน 49
รูปที่ 3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่อัตราส่วนต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน ที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน 55
รูปที่ 3.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่อัตราส่วนต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน 55
รูปที่ 3.5 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่อัตราส่วนต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน 56

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

BMP	ค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของวัสดุหมักภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน แสดงในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมซีโอดีของของเสียที่ถูกย่อยสลายไป (Biochemical Methane Potential)
C/N ratio	อัตราส่วนของปริมาณธาตุคาร์บอนต่อปริมาณธาตุไนโตรเจน
COD	ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand)
HRT	ระยะเวลากักเก็บ (Hydraulic Retention Time)
MS	สารตั้งต้นหมักร่วมผสมสองชนิด (Mixed Substrates)
OLR	อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate)
SRT	ค่าของมวลของของแข็งภายในระบบต่อมวลของของแข็งที่ปล่อยออกจากระบบต่อวัน (Solid Retention Time)
SW	ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง (Shrimp Wastes)
TOC	ปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon)
TS	สิ่งที่เหลืออยู่ภายหลังการระเหยของน้ำออกจนหมดและอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C (Total Solids)
VFA	กรดอินทรีย์ (ไขมัน) ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid)
VS	ของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solids)
W	จุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักแบบไร้ออกซิเจน (Wastes)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

เป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าพลังงานจากใต้ดินกำลังจะหมดไป มนุษย์จึงได้พยายามคิดค้นพลังงานจากบนดินขึ้นมา ไม่ว่าจะเป็นพลังงานจากลม แสงแดด ของเสียหรือแม้กระทั่งการสั่นไหวของเครื่องยนต์ต่างๆ แต่หนึ่งในเทคโนโลยีที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย นั่นคือ แก๊สชีวภาพ เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด ทั้งยังสามารถลดต้นทุนและลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการส่งเสริมการศึกษาและการวิจัยเรื่องแก๊สชีวภาพมากขึ้น เนื่องจากสามารถนำมาทำเป็นเชื้อเพลิง ไม่ว่าจะเป็นเตาหุงต้ม เครื่องยนต์สันดาปภายใน เครื่องยนต์ผลิตไฟฟ้า เซลล์เชื้อเพลิง (นฤมล เซาะกระโทก, 2556) จากเหตุผลดังกล่าวนี้จึงได้มีการนำก๊าซชีวภาพมาใช้อย่างจริงจัง ทั้งขนาดครอบครัว ชุมชนและขนาดอุตสาหกรรม

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้นำการส่งออกและแปรรูปผลิตภัณฑ์จากกุ้ง โดยปริมาณการส่งออกเพิ่มขึ้นทุกๆปี แต่หนึ่งปัญหาที่ยังคงเกิดขึ้นต่อเนื่องตามปริมาณการส่งออกที่เพิ่มมากขึ้น ก็คือปัญหาเรื่องการทำลายสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็น กลิ่น ระบบนิเวศ และการหมักหมมของของเสียที่ยังไม่ถูกกำจัดจนทำให้เกิดโรค หนึ่งในหนทางที่สามารถช่วยแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น นั่นคือ การนำสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้น ในที่นี้คือ ของเสียที่เกิดจากการทำฟาร์มกุ้ง มาทำให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยสามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทนด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน นอกจากนี้กากที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายยังสามารถนำไปทำเป็นปุ๋ยอินทรีย์ได้ โดยส่วนใหญ่จะทำการตากแห้งเพื่อให้ง่ายต่อการขนส่งและเก็บรักษา

จังหวัดฉะเชิงเทรา เป็นหนึ่งในจังหวัดที่มีการเลี้ยงกุ้งมากที่สุดในประเทศไทย เนื่องด้วยธรรมชาติที่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของกุ้ง แต่ด้วยการจัดการและการบำบัดของเสียของผู้เลี้ยงกุ้งที่ยังไม่ได้มาตรฐานเพียงพอ จึงทำให้การปล่อยของเสียที่เกิดขึ้นจากการเลี้ยงกุ้งเป็นการทำลายระบบนิเวศโดยตรง โดยที่ผู้เลี้ยงกุ้งมิได้ตั้งใจ ไม่ว่าจะเป็น ค่าความเป็นกรด – ด่างของระบบนิเวศ ค่าความเค็ม เศษอาหาร มูลของเสียในรูปแอมโมเนียและไนไตรท์ตกค้างมาจากการให้อาหารในบ่อกุ้ง หรือแม้กระทั่งก๊าซมีเทน เป็นต้น

จากที่กล่าวมา พบว่า ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นนั้น สามารถนำมาทำเป็นพลังงานทางเลือกในระดับชุมชนได้ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงได้มีความคิดในการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนโดยกระบวนการแบบแบตช์ ระหว่างของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งร่วมกับฟางข้าว โดยทำการทดลองในขวดหมักขนาด 250 ml เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสม ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมและลดต้นทุนในการบำบัดของเสียฯ และยังสามารถนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มาเป็นพลังงานในระดับชุมชนและประเทศต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ทำการทดลองเพื่อหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential, BMP) จากของเสียที่ได้จากบ่อเลี้ยงกุ้ง โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) แบบแบตช์ (Batch) ขั้นตอนเดียว

2. ศึกษาและวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและชีวภาพ รวมถึงคุณสมบัติในการให้ค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากของเสียจากการทำฟาร์มกุ้ง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

1. ฟาร์มกุ้งตำบลบางกระเจ็ด อำเภอบางคล้า จังหวัดฉะเชิงเทรา

2. บริษัท สงวนวงษ์ อินดัสทรี จำกัด จังหวัดนครราชสีมา

3. ห้องปฏิบัติการ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และสาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและชีวภาพของของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง

1. การทดลองเป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน สำหรับกระบวนการแบบแบตช์ขั้นตอนเดียว

2. อุณหภูมิที่ใช้ในการย่อยสลาย ใช้อุณหภูมิในห้องปฏิบัติการ

3. ขนาดของขวดที่ใช้ในการย่อยสลาย คือ 300 ml และมีปริมาณของเสียฯ 250 ml

4. จุลินทรีย์ในการย่อยสลายจากบริษัท สงวนวงษ์ อินดัสทรี จังหวัดนครราชสีมา

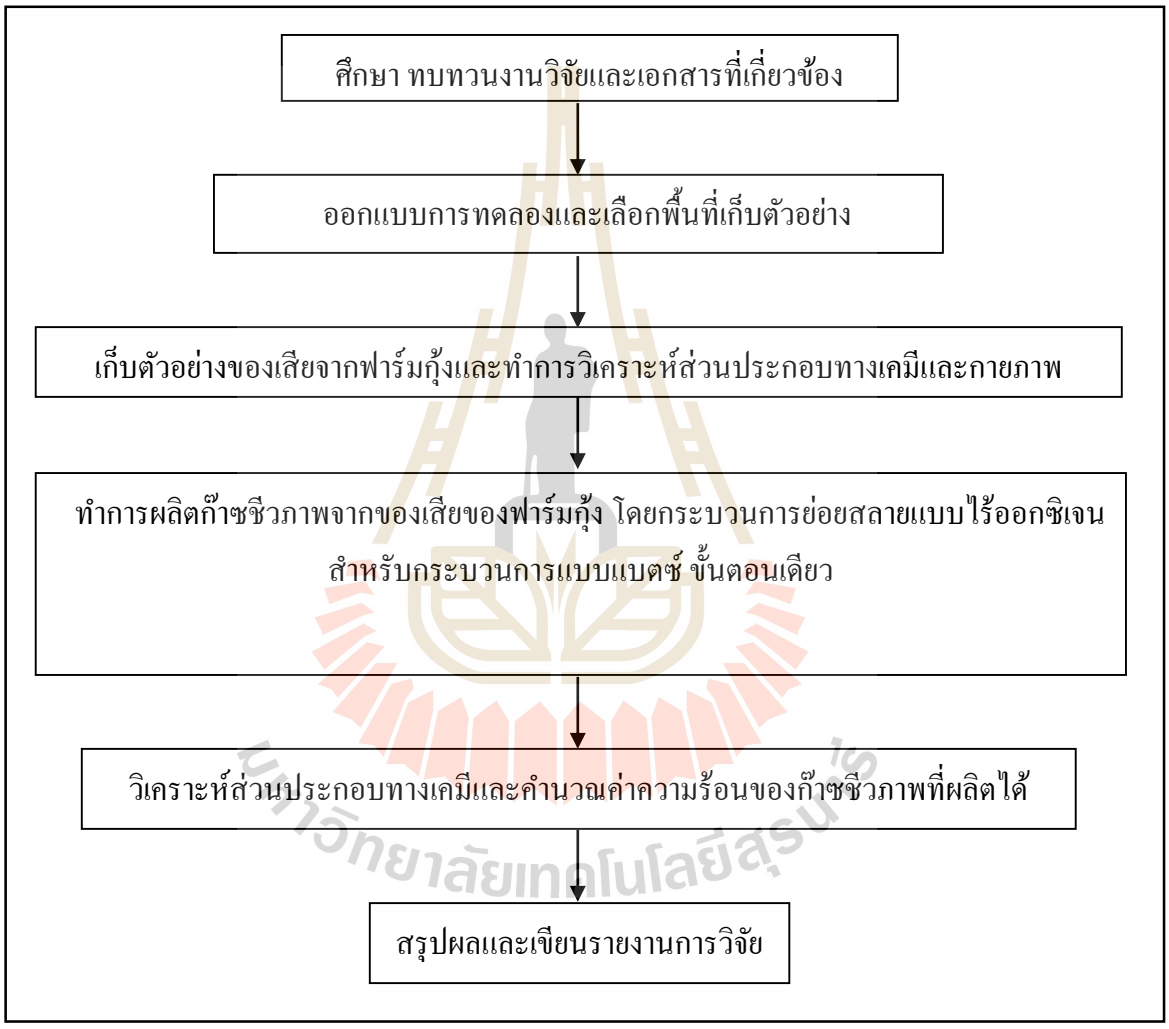
5. ใช้สารอาหารเสริม ตามการทดลองของ Raposo *et al.* (2006)

6. เวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย 30 วัน

7. ค่าความเป็นกรด – ด่างอยู่ระหว่าง 6 – 8 และไม่มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในระหว่างทำการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน สำหรับกระบวนการแบบแบตซ์ ขั้นตอนเดียว

1.4 ขั้นตอนของการศึกษาวิจัย

สำหรับขั้นตอนในการศึกษาวิจัยสามารถเขียนแผนผังดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.1 วิธีดำเนินการวิจัยโดยละเอียดได้แสดงไว้ในบทที่ 2



รูปที่ 1.1 แผนผังขั้นตอนในการดำเนินการศึกษา

1.5 ประโยชน์ที่ได้จากการวิจัย

1. เป็นการนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสำหรับกระบวนการแบบแบตซ์ ขั้นตอนเดียวมาทำเป็นพลังงานทางเลือกและหาจุดคุ้มทุนในทางเศรษฐศาสตร์

2. ทราบอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและวัสดุร่วม คือ ฟางข้าว ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสำหรับกระบวนการแบบแบตช์ ขั้นตอนเดียว

3. ช่วยลดภาวะโลกร้อนจากการใช้พลังงานชีวมวล

4. เป็นแนวทางในการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการลดปริมาณของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและปัญหาสิ่งแวดล้อม

1.6 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศที่เกี่ยวข้อง

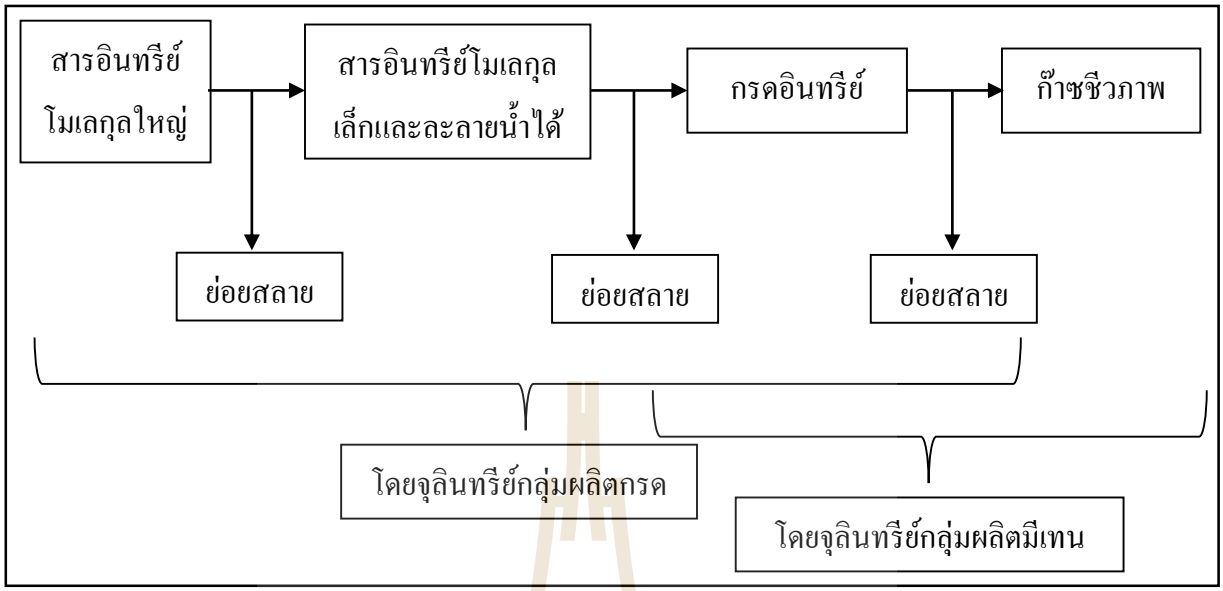
ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นพื้นฐานและแนวทางสำหรับอัตราส่วนที่เหมาะสมในการทดลองหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน โดยทำการเดินระบบแบบแบตช์ ผลการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังแสดงไว้ในลำดับหัวข้อถัดไป ดังนี้

1.6.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion)

การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Anaerobic digestion or Biomethanation or Methane fermentation) เป็นกระบวนการทางชีววิทยาของจุลินทรีย์หลายชนิดในสภาพปราศจากออกซิเจน ซึ่งมีหน้าที่แตกต่างกัน เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน (CH_4), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซอื่นๆ (สมการที่ 1.1) (Sterling *et al.*, 2001 ; Chandra *et al.*, 2012a) เนื่องมาจากของเสียที่ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งมีโมเลกุลขนาดใหญ่ ทำให้จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ไม่สามารถใช้สารอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่นี้ได้ จึงต้องอาศัยจุลินทรีย์อีกกลุ่ม ที่ชื่อว่า จุลินทรีย์กลุ่มไม่สร้างมีเทน (Non-methanogenic bacteria) มาย่อยสลายสารให้มีขนาดเล็กลง จุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทนสามารถนำไปใช้งานได้ โดยสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยนั้นจะมีขนาดเล็กลงและคงตัวมากขึ้น (นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

$$Organic matter \xrightarrow{Anaerobic digestion} CH_4 + CO_2 + H_2 + NH_3 + H_2S \quad (1.1)$$

ในการผลิตก๊าซชีวภาพนั้นต้องป้องกันไม่ให้อากาศเข้าไปสัมผัสกับจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน เพราะจะทำให้การผลิตก๊าซมีเทนลดลง ก๊าซชีวภาพสามารถเกิดขึ้นเองได้ตามธรรมชาติ เมื่อมีจุลินทรีย์สารอินทรีย์และอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมในสภาวะที่ไม่มีอากาศ ในธรรมชาตินั้นก๊าซชีวภาพมักจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการหมัก เช่น ก้นบ่อ ก้นแม่น้ำ ก้นทะเลสาบ หนองน้ำ บึง หรือนาข้าวที่มีน้ำท่วมขัง เป็นต้น กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพแสดงได้ตามรูปที่ 1.2 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)



รูปที่ 1.2 กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ (คัดลอกและดัดแปลงจาก กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

1.6.1.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศและการเกิดก๊าซชีวภาพ

ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion or Biomethanation or Methane fermentation) มีทั้งหมด 4 ขั้นตอน (Chandra *et al*., 2012a) ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซีส (Hydrolysis)

เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่และไม่ละลายน้ำ เช่น เซลลูโลส โปรตีน และไขมัน ให้เป็นสารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลเล็กที่สามารถละลายน้ำได้จะเกิดขึ้นได้ต้องใช้จุลินทรีย์ 2 กลุ่มนี้เท่านั้น ได้แก่ กลุ่มที่สามารถมีชีวิตอยู่ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น (Obligatorily anaerobic micro-organism) และกลุ่มที่สามารถมีชีวิตอยู่ได้ทั้งที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultative anaerobic micro-organism) (Chandra *et al*., 2012a) โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นแค่การเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่เป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กเท่านั้น ยังไม่มีการลดสารอินทรีย์แต่อย่างใด (นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการแอซิโดเจนีซีส (Acidogenesis)

สารประกอบอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลเล็กที่สามารถละลายน้ำได้ ที่ได้มาจากกระบวนการไฮโดรไลซีส (Hydrolysis) จะถูกจุลินทรีย์ทั้งกลุ่มที่สามารถมีชีวิตอยู่ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น (Obligatorily anaerobic micro-organism) และจุลินทรีย์ที่สามารถดำรงชีพอยู่ได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มี

ออกซิเจน (Facultative anaerobic micro-organism) ใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงานในการหมักและย่อยสลาย โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (Acidogenic bacteria) ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ซึ่งโมเลกุลมีอะตอมของคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอม เช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดโพรพิออนิก (C_2H_5COOH) กรดบิวทีริก (C_3H_7COOH) และแอลกอฮอล์ (Alcohol) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวกำหนดผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา (Chandra *et al*., 2012a) นอกจากนี้แล้วชนิดของจุลินทรีย์สร้างกรดที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นและสภาพแวดล้อมของปฏิกิริยาด้วย (นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการแอซิโตเจนีซีส (Acetogenesis)

กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้น จะถูกจุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจนนิค (Acetogenic bacteria) เปลี่ยนให้เป็นกรดอะซิติก (CH_3COOH) โดยแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจนนิค (Acetogenic bacteria) สามารถอยู่ร่วมกับจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทน(Methane forming bacteria)ได้เป็นอย่างดี แบบให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน นั่นคือ กรดอินทรีย์และแอลกอฮอล์ถูกแปลงเป็นกรดอะซิติกและกรดอะซิติกที่ได้นี้ก็จะถูกนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทน(Methane forming bacteria) (Chandra *et al*., 2012a) โดยจุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจนนิค (Acetogenic bacteria) สามารถแบ่งย่อยได้อีก 2 ชนิด (นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

จุลินทรีย์ชนิดแรก เรียกว่า Hydrogen producing acetogenic bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม และเอทานอลจากขั้นตอนอะซิโดเจนีซีส (Acidogenesis) ให้เป็นอะซิเตท ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) (Macleod *et al.*, 1990) นอกจากนี้จุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถอยู่ร่วมกับจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซมีเทน(Methane forming bacteria)ได้เป็นอย่างดี แบบให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน โดยก๊าซไฮโดรเจนที่สร้างขึ้นนั้นมีบทบาทสำคัญส่งผลต่อค่าพีเอช (pH) ในระบบ จนกระทั่งสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ แต่ถ้าหากในระบบนั้นๆ มีจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic forming bacteria) อยู่ด้วยก๊าซไฮโดรเจนจะถูกใช้รีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ให้กลายเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) ในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนส่งผลให้ระบบสามารถทำงานต่อไปได้ ตัวอย่างของปฏิกิริยาการเกิดอะซิเตท ดังแสดงในสมการที่ 1.2 ถึง 1.5 ดังนี้

$$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2 \quad (1.2)$$

$$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COOH + 2H_2 \quad (1.3)$$

$$CH_3CHOHCOOH + H_2O \rightarrow CH_3COOH + CO_2 + 2H_2 \quad (1.4)$$

$$CH_3CH_2O + H_2O \rightarrow CH_3COOH + 2H_2 \quad (1.5)$$

โดยจุลินทรีย์ชนิดนี้จะย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) ให้กลายเป็นกรดอะซิติกในขั้นตอนสุดท้าย ดังสมการที่ 1.2-1.5 จากสมการดังกล่าวจะมีก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น โดยสารสองตัวนี้จะถูกใช้เป็นสารประกอบสำคัญในการสร้างก๊าซมีเทน ในขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนสำคัญในการหลีกเลี่ยงการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย และจุลินทรีย์อีกกลุ่มหนึ่งเรียกว่า Homoacetogenic bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่ใช้ย่อยสารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอม เช่น ฟอร์เมท (Formate), ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ให้เป็นอะซิเตท (Acetate) แต่ถ้าใช้สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอม เช่น น้ำตาลกลูโคส, แลคเตท และไพรูเวท จะได้ผลผลิตออกมาทั้งอะซิเตทและบิวทิเรต ดังสมการที่ 1.6 และ 1.7

$$H_2 / CO_2 \xrightarrow{Butyribacterium\ methylotrophicum} Acetate \quad (1.6)$$

$$Glucose \xrightarrow{Butyribacterium\ methylotrophicum} Acetate + Butyrate \quad (1.7)$$

ขั้นตอนที่ 4 กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis)

ผลผลิตจากขั้นตอนการผลิตกรด ได้แก่ อะซิแตท ฟอร์เมท ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จะถูกนำมาใช้เพื่อสร้างมีเทนโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic forming bacteria) ในขั้นตอนนี้การเกิดก๊าซมีเทนจะมีได้เฉพาะสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเท่านั้น (Strict anaerobic condition) (Chandra *et al*., 2012a) เนื่องจากออกซิเจนจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มนี้และสามารถเติบโตได้ดีในช่วงพีเอชที่เป็นกลางประมาณ 6.8-7.2 (Rajeshwari *et al*., 2000 ; นฤมล เซาะกระโทก, 2556) อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะเจริญเติบโตช้ากว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่น ในขั้นตอนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน การแบ่งเซลล์จะเพิ่มจำนวนเป็นสองเท่าต้องใช้เวลา 3-5 วัน และมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมได้น้อยกว่า เช่น ไม่อาจทนต่อออกซิเจนที่มีปริมาณเล็กน้อยได้ หรือถ้าพีเอชไม่เหมาะสมก็ไม่สามารถเจริญเติบโตได้เป็นต้น และนอกจากนี้ยังมีสารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอมเท่านั้น เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ฟอร์เมท เมทานอล และเมทิลามีน ดังแสดงในสมการที่ 1.8 – 1.13

$$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \quad (1.8)$$

$$4HCOO^- + 4H^+ \rightarrow CH_4 + 3CO_2 + 2H_2O \quad (1.9)$$

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2 \quad (1.10)$$

$$4CH_3OH \rightarrow 3CH_4 + CO_2 + 2H_2O \quad (1.11)$$

$$4(CH_3)_3N + H_2O \rightarrow 9CH_4 + 3CO_2 + 6H_2O + 4NH_3 \quad (1.12)$$

$$4CO + 2H_2O \rightarrow CH_4 + 3CO_2 \quad (1.13)$$

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่ง Methanogenic forming bacteria ออกเป็น 2 กลุ่มย่อยได้แก่ Acetoclastic methanogenic bacteria และ CO_2 reducing methanogenic bacteria (H_2 oxidizing methanogenic bacteria) โดยอาศัยหลักการใช้สารอาหารที่แตกต่างกัน (Mahendra *et al.,* 1991; John *et al.,* 1994; นฤมล เซาะกระโทก, 2556) ได้แก่

- Acetoclastic methanogenic bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนจากหมู่เมทิลในอนุมูลอะซิเตท ดังสมการที่ 1.14 พบว่ามีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นประมาณร้อยละ 72 จากการใช้อนุมูลอะซิเตทของจุลินทรีย์กลุ่มนี้

$$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2 \quad (1.14)$$

- Hydrogen-utilizing methane bacteria หรือ H_2 oxidizing methanogenic bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 1.15 พบว่ามีก๊าซมีเทนประมาณร้อยละ 28 เกิดขึ้นจากจุลินทรีย์กลุ่มนี้

$$4H_2 + CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \quad (1.15)$$

สำหรับสารอื่นจุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถใช้อนุมูลฟอร์เมทได้เพียงอย่างเดียว ทั้งนี้เนื่องจากอนุมูลฟอร์เมทสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย ดังสมการที่ 1.16

$$HCOOH \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (1.16)$$

โดยการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม Acetoclastic bacteria ย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายแล้ว จะเปลี่ยนให้เป็นก๊าซต่างๆ ที่สำคัญ คือ ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 1.17 และส่วนที่เหลือเกิดจากปฏิกิริยาชีวเคมีระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน โดยการทำงานของจุลินทรีย์ชนิด Hydrogen-utilizing methane bacteria โดยที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น จากการย่อยสลายในขั้นตอนการสร้างกรด จะละลายอยู่ในน้ำและทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ในระบบซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาของแอมโมเนียจากการย่อยสลายโปรตีน เมื่อทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ไฮดรอกไซด์ไอออนซึ่งเป็นแหล่งไฮดรอกไซด์ไอออนที่สำคัญ ดังสมการที่ 1.18 การทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับไฮดรอกไซด์ไอออนในระบบจะเกิดกรดคาร์บอนิก และจะทำปฏิกิริยากับก๊าซ

ไฮโดรเจน โดยจุลินทรีย์ชนิด Hydrogen-utilizing methane เป็นก๊าซมีเทน ดังสมการที่ 1.19 (นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

$$(CH_3COO)^+ + H_2O \rightarrow CH_4 + (HCO_3)^- + พลังงาน \quad (1.17)$$

$$NH_3 + H_2O \leftrightarrow (NH_4)^+ + (OH)^- \quad (1.18)$$

$$H_2CO_3 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 3H_2O \quad (1.19)$$

ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นนี้ไม่ละลายน้ำ จึงสามารถที่จะเก็บแล้วนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนจะออกไปในรูปของก๊าซและบางส่วนละลายน้ำแล้วทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออนในระบบเกิดเป็นไบคาร์บอเนตไอออน (HCO^-_3) ผลของการหมุนเวียนคาร์บอนไดออกไซด์นี้ส่งผลต่อระบบมากมาย เช่น ค่าพีเอช ความเข้มข้นของไบคาร์บอเนต อุณหภูมิและความเข้มข้นของสารอาหาร เป็นต้น ซึ่งจุลินทรีย์พวกที่สร้างกรดจะทนต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า พีเอช อุณหภูมิ และมีอัตราการเจริญเติบโตที่เร็วกว่ากลุ่มที่สร้างมีเทนมาก ความแตกต่างของอัตราการเจริญเติบโตและความไวต่อปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ทำให้จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนเป็นตัวหลักในการควบคุมปฏิกิริยาทั้งหมดในระบบเรียกว่า Rate-limiting step ของกลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้ออกซิเจน เมื่อสิ้นสุดการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่นๆ อีกเล็กน้อย เช่น ไนโตรเจน ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารอาหารจะถูกทำให้คงตัวอย่างสมบูรณ์ สมการทั่วไปของการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเพื่อคำนวณปริมาณสารในระบบเป็นไปดังสมการที่ 1.20 (นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

$$C_cH_hO_oN_nS_s + yH_2O \longrightarrow xCH_4 + (c\text{-}x)CO_2 + nNH_3 + sH_2S \quad (1.20)$$

เมื่อ c = จำนวนอะตอมของคาร์บอน (C) h = จำนวนอะตอมของไฮโดรเจน (H)

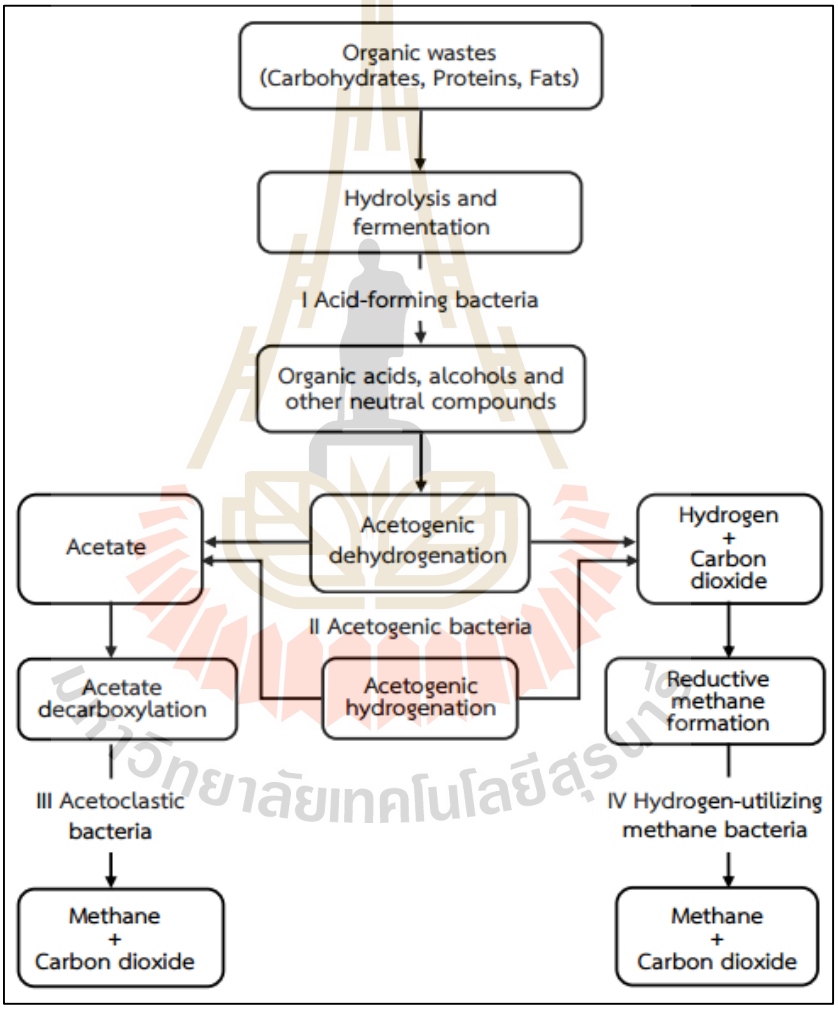
o = จำนวนอะตอมของออกซิเจน (O) n = จำนวนอะตอมของไนโตรเจน (N)

s = จำนวนอะตอมของซัลเฟอร์ (S) x = 1/8(4c + h -2o -3n – 2s)

y = 1/4 (4c – h -2o +3n +3s)

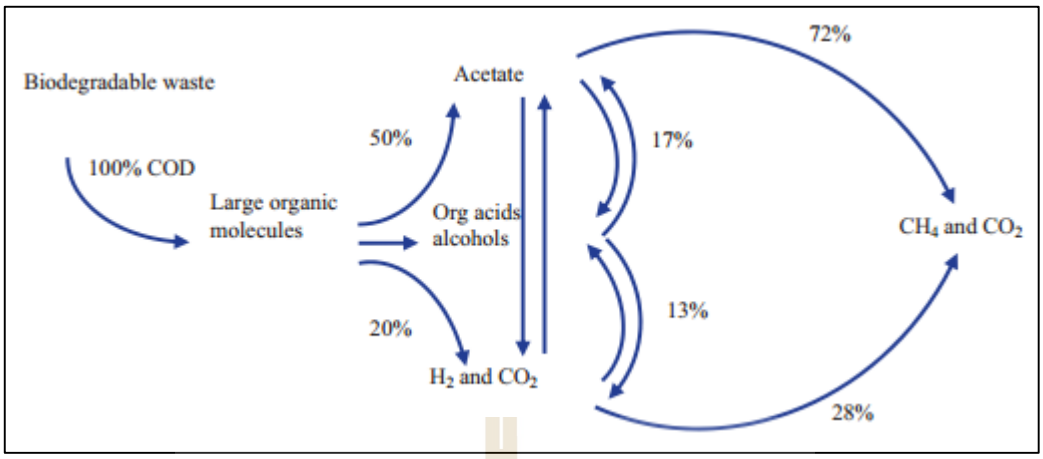
อัตราการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไปเป็นก๊าซมีเทนจะเป็นตัวจำกัดการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะทำให้ค่าพีเอชลดลงและระบบอาจล้มเหลวได้ แต่การกวนผสมก็เป็นสิ่งสำคัญอย่างหนึ่งของการช่วยรักษาความสมดุลในการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่างๆ ไปเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งแบคทีเรียสร้างไฮโดรเจนและจุลินทรีย์สร้างมีเทนสามารถอยู่

ในสภาพไร้ออกซิเจนเท่านั้น รูปที่ 1.3 แสดงขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนด้วยปฏิกิริยาชีวเคมีแบบไร้ออกซิเจน และนอกจากนี้แล้ว McCarty (1964) พบว่าการสร้างก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในสภาวะไร้ออกซิเจนสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเกิดจากจุลินทรีย์ที่เรียกว่า Acetoclastic bacteria จะเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทนประมาณร้อยละ 72 ของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ และส่วนที่ 2 เกิดจาก Hydrogen-utilizing methane bacteria จะเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทน ประมาณร้อยละ 28 โดยร้อยละ 13 เกิดจากกรดโพรไพโอนิคและร้อยละ 15 เกิดจากกรดอินทรีย์ระเหยง่ายอื่นๆ ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.3 การทำงานของจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดก๊าซมีเทน

(คัดลอกจาก Brown and Tata, 1985 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)



รูปที่ 1.4 การเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ในรูป COD เป็นก๊าซมีเทนด้วยปฏิกิริยาชีวเคมีแบบไร้ออกซิเจน (คัดลอกจาก Chandra *et al*., 2012a)

1.6.1.2 ข้อดีและข้อเสียของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

(เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543 และ Rao et al., 2000 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

ข้อดี 1. มีสลัดจ์ที่ต้องนำไปบำบัดและกำจัดน้อย

2. เกิดก๊าซมีเทนหรือก๊าซหุงต้มที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อย่างดี

3. สามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้มากๆ

4. ตะกอนสลัดจ์ระบบไร้ออกซิเจนสามารถเลี้ยงเก็บไว้ใช้ได้นานหลายๆ เดือน

5. ตะกอนอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์สามารถใช้เป็นปุ๋ยหมักหรือวัสดุปรับปรุงดินที่มีคุณภาพ

6. สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหาการกำจัดของเสียต่างๆได้

7. สามารถลดปรากฏการณ์เรือนกระจกจากก๊าซที่มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศโดยการเปลี่ยนมาเป็นพลังงาน

ข้อเสีย 1. ต้องควบคุมค่าพีเอชในระบบให้ดี

2. ใช้เวลาในการเริ่มเดินระบบค่อนข้างนาน

3. หลังจากน้ำเสียผ่านระบบกำจัดแบบไร้ออกซิเจนแล้ว ควรมีการบำบัดสุดท้ายด้วยระบบอื่น

4. คุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดนี้ โดยส่วนมากจะไม่ได้มาตรฐานน้ำทิ้ง ($BOD_5 \leq 20mg/l$)

5. มีสีดำและกลิ่นเหม็น เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์

1.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

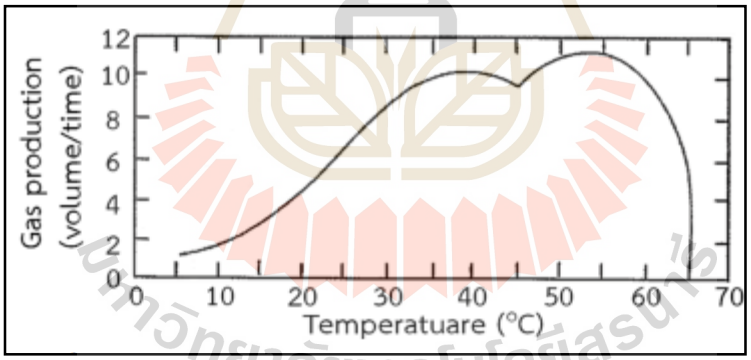
เนื่องจากในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนต้องอาศัยจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่สร้างมีเทนและกลุ่มที่สร้างมีเทน ซึ่งหากเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในจุลินทรีย์กลุ่มใดกลุ่มหนึ่งย่อมมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการทำงานทั้งระบบ ดังนั้น จึงจำเป็นที่ต้องทำการรักษาสภาวะให้เหมาะสม เพื่อให้จุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่มนี้สามารถอยู่ร่วมกันได้ โดยปัจจัยที่มีผลต่อสภาวะแวดล้อมของระบบมีดังนี้ (Tchobanaglous and Burton, 1991 และ Grady *et al.*, 1999 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

1. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน C/N

อัตราส่วน C/N มีความสำคัญในการย่อยสลายทางชีวภาพมาก เพราะคาร์บอนและไนโตรเจนจะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ อัตราส่วน C/N ที่เหมาะสมในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน คือ 20-30 (Yen and Brune, 2007 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556) ถ้าอัตราส่วนไนโตรเจนสูงเกินไป ไนโตรเจนจะถูกใช้หมดอย่างรวดเร็ว มีผลทำให้การเกิดเซลล์จุลินทรีย์ลดลง ทำให้ผลิตก๊าซได้น้อยลง ในทางกลับกันหากอัตราส่วน C/N ต่ำเกินไป ไนโตรเจนที่มากเกินความจำเป็นของจุลินทรีย์จะเปลี่ยนมาสะสมอยู่ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจนซึ่งเป็นตัวยับยั้งการทำงานของระบบเนื่องจากความเป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบ แต่การมีแอมโมเนียไนโตรเจนในระดับที่เหมาะสมก็เป็นสิ่งจำเป็นที่สามารถลดการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระบบได้ เนื่องจากแอมโมเนียมไอออนทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ควบคุมค่าพีเอชและสร้างบัฟเฟอร์ให้แก่ระบบ (Shanmugam and Horan, 2009 และ จิรวัฒน์ ชาลีวรรณ, 2546 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556) การปรับอัตราส่วน C/N ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสามารถแก่การย่อยสลายทำได้โดยการผสมวัสดุที่มีอัตราส่วน C/N สูงกับวัสดุที่มีอัตราส่วน C/N ต่ำ หรือการเติมไนโตรเจนโดยตรงให้กับวัสดุที่มีอัตราส่วน C/N สูง ส่วนใหญ่นิยมเติมปุ๋ยยูเรีย เนื่องจากจุลินทรีย์หลายชนิดสามารถเปลี่ยนยูเรียไปเป็นแอมโมเนียได้

2. อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิที่เหมาะสมนั้นมี 2 ช่วงอุณหภูมิได้แก่ อุณหภูมิระหว่าง 30-40 °C (Mesophilic temperature) จุลินทรีย์ที่ทำงานในช่วงนี้ เรียกว่า Mesophilic bacteria และอุณหภูมิระว่าง50-60°C (Thermophilic temperature) จุลินทรีย์ที่ทำงานช่วงนี้ เรียกว่า Thermophilic bacteria จุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนจะหยุดทำงานเมื่ออุณหภูมิต่ำหรือสูงเกินไป โดยทั่วไปอัตราการผลิตก๊าซมีเทนและอัตราการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง Thermophilic temperature (Ahn and Forster, 2002 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556) อัตราการเกิดปฏิกิริยาและประสิทธิภาพของระบบจะมีค่ามากกว่าช่วง Mesophilic temperature จึงส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นด้วยการใช้ระยะเวลาในการหมักที่สั้นลงและปริมาตรถังหมักที่ลดลง (Pagilla *et al*., 2000 และ Zupancic and Ros, 2003 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556) แต่ Thermophilic bacteria ก็มีข้อเสีย คือ จะทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ไม่ดีเท่า Mesophilic bacteria ส่งผลโดยตรงต่อการควบคุมระบบ จึงมีความเสี่ยงสูงต่อความล้มเหลวของระบบและนอกจากนี้แล้วยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของระบบอีกด้วย ผลของอุณหภูมิต่อระยะเวลาการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพดังแสดงไว้ในรูปที่ 1.5

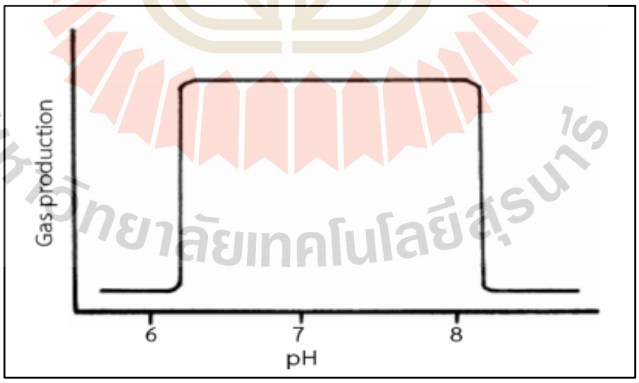


รูปที่ 1.5 ผลของอุณหภูมิต่อระยะเวลาการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพ
(คัดลอกจาก Price and Cheremisinoff, 1981 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

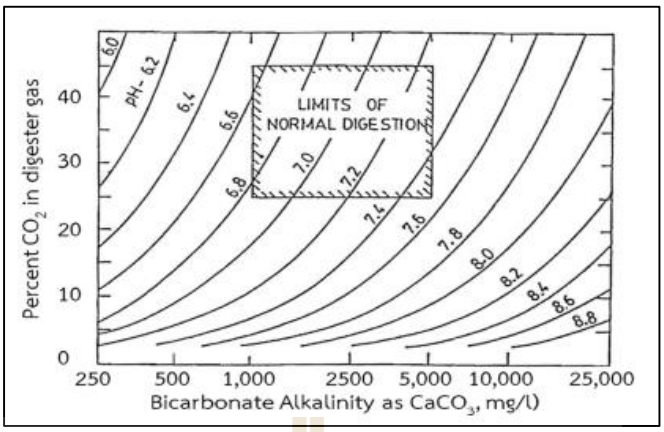
3. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นปัจจัยที่สำคัญของระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากจุลินทรีย์สร้างกรดและจุลินทรีย์สร้างมีเทนจะทำงานได้ดี ก็ต่อเมื่อมีค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เหมาะสมประมาณ 6.8-7.2 ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่าง สูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง ดังรูปที่ 1.6

และรูปที่ 1.7 และถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.6 หรือสูงกว่า 7.6 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว (McCarty, 1964 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556) เนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถใช้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายได้ทัน ทำให้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเกิดการสะสมมากขึ้น มีผลทำให้ค่าพีเอชลดลงอย่างรวดเร็ว และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำกว่า 6.5 จะทำให้ Methanogenic bacteria หยุดการเจริญเติบโตทันที แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารเคมีชนิดด่างแก่ลงไป เช่น ปูนขาว (CaO) โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) โซดาไฟ (NaOH) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นต้น หรืออาจลดปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบลง สำหรับการใช้ด่างแก่หรือคาร์บอเนตปรับสภาพนั้น จะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำเกิดสมดุลชั่วคราว เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศถูกดึงเข้าไปทดแทนคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ เพื่อทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง เพิ่มขึ้น แต่เมื่อจุลินทรีย์สร้างคาร์บอนไดออกไซด์มาแทนที่จะทำให้จุดสมดุลเปลี่ยนแปลงไปจนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำสมดุลกับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ สิ่งหนึ่งที่ใช้บ่งบอกสภาวะภายในระบบแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง แต่มีข้อเสียคือ เป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงช้า ในขณะที่กรดระเหยง่ายมากขึ้นแต่ค่าความเป็นกรด-ด่าง อาจเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจาก ผลของบัฟเฟอร์ของความเป็นด่างภายในระบบ ดังนั้นการใช้ค่าความเป็นกรด-ด่าง สำหรับการแก้ไขสภาวะภายในระบบอาจไม่ทันการ เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามข้อดีของการหาค่าความเป็นกรด-ด่าง ก็คือหาง่ายและรวดเร็ว



รูปที่ 1.6 ผลของค่าพีเอชต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ (คัดลอกจาก Gray, 1989 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)



รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชความเข้มข้นของ HCO_3^- และความเข้มข้นของ CO_2
(คัดลอกจาก McCarty, 1964 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

4. กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA)

กรดอินทรีย์ระเหยง่ายในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นค่าของกรดอินทรีย์โมเลกุลสั้นที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และการสร้างกรดของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด เช่น กรดแอซิติก กรดโพรไพโอนิคและกรดบิวทิริก ซึ่งจะถูกจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนนำไปใช้เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงาน โดยปกติแล้วกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบควรมีความเข้มข้นของกรดแอซิติกประมาณ 50-500 mg/l (Halbert, 1981 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556) ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะมีความสำคัญต่อค่าพีเอช คือ เมื่อปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่าสูงขึ้น ค่าพีเอชจะลดลงเกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ หากระดับของกรดอะซิติก มีค่ามากกว่า 800 mg/l หรืออัตราส่วนของกรดโพรไพโอนิค ต่อกรดแอซิติกเกิน 1.4 จะทำให้ระบบล้มเหลวได้ (Marchaim and Krause, 1993 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556) แต่ถ้าในระบบมีบัฟเฟอร์ที่ดีระบบจะไม่ล้มเหลว การแก้ไขความเป็นพิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย สามารถทำได้โดยลดอัตราการป้อนสารอินทรีย์ลง การเติมสารปรับสภาพและเพิ่มระยะเวลาในการกักเก็บ

5. สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

ค่าสภาพความเป็นด่างในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นมีความสำคัญต่อการหมักวัสดุที่มีความเป็นกรดสูง เพราะเป็นบัฟเฟอร์ที่ควบคุมค่าพีเอชของระบบไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากหลังจากที่เติมวัสดุหมัก ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปไบคาร์บอเนตที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง

แอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตดังสมการที่ 1.21 – 1.23

$$NH_4^+ + OH^- \leftrightarrow \ NH_3 + H_2O \quad (1.21)$$

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow \ H^+ + HCO_3^- \quad (1.22)$$

$$NH_4^+ + OH^- + H^+HCO_3^- \leftrightarrow \left(NH_4^+ + HCO_3^-\right)_{salt} + H_2O \quad (1.23)$$

ค่าสภาพความเป็นด่าง เป็นค่าที่บ่งบอกความเป็นบัฟเฟอร์ที่ดีให้แก่ระบบที่ใช้ควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เมื่อความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบเพิ่มมากขึ้น ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตก็จะถูกทำลายไป การทำลายความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์เป็นสาเหตุทำให้ค่าพีเอชลดลง โดยทั่วไปค่าสภาพความเป็นด่างในระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ควรมีค่าประมาณ 1,000-5,000 ml/l as $CaCO_3$ (Osman and Delia, 2005 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556) ส่วนใหญ่แล้วค่าพีเอชที่เหมาะสมควรมีค่าระหว่าง 6.8-7.2 มีเพียงระบบไบคาร์บอเนตซัลไฟด์และฟอสเฟตที่สำคัญ โดยปกติระบบไบคาร์บอเนตเท่านั้นที่เป็นส่วนสำคัญในการควบคุมค่าสภาพความเป็นด่างของระบบ

ค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมดจะมีความสำคัญน้อยกว่าค่าสภาพความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนต เนื่องจากค่าสภาพความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนตทำหน้าที่ควบคุมความเป็นกรดในระบบ การเปลี่ยนแปลงของค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมดจึงน้อยกว่าค่าสภาพความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนต เมื่อมีความเข้มข้นของกรดเพิ่มขึ้น ค่าสภาพความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนตจะทำปฏิกิริยาดังสมการที่ 1.24 และ 1.25

$$HCO_3^- + CH_3CHOOH \rightarrow CH_3COO^- + H_2CO_3 \quad (1.24)$$

$$H_2CO_3 \rightarrow CO_2 + H_2O \quad (1.25)$$

เมื่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นไปอย่างสมดุลแล้ว แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตจะเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช ซึ่งจะลดสภาพความเป็นกรดที่เกิดจากกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ดังสมการที่ 1.26 – 1.28

$$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{Acid formers}} 3CH_3COOH \quad (1.26)$$

$$3CH_3COOH + 3NH_4HCO_3 \xrightarrow{\text{Intermediate}} 3CH_3COONH_4 + 3H_2O + 3CO_2 \quad (1.27)$$

$$3CH_3COONH_4 + 3H_2O \xrightarrow{Methane\ formers} 3CH_4 + 3NH_4HCO_3 \qquad (1.28)$$

จากสมการดังกล่าว ถ้าน้ำเสียมีปริมาณไนโตรเจนเพียงพอและเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์สมบูรณ์ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ซึ่งเป็นบัฟเฟอร์ที่ทำปฏิกิริยากับกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากกระบวนการสร้างกรดอินทรีย์ ซึ่งได้ผลิตภัณฑ์เป็นแอมโมเนียมแอซิเตต (CH_3COONH_4) ซึ่งจะถูกย่อยสลายเป็นโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและได้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตกลับคืนมา แต่ถ้าปริมาณไบคาร์บอเนตบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับกรดอินทรีย์ระเหยง่ายแล้วจะทำให้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าพีเอชในระบบลดลงจนกระทั่งจุลินทรีย์สร้างมีเทนไม่สามารถย่อยสลายแอมโมเนียมแอซิเตตได้ นอกจากนี้แล้วยังพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชยังขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

วิธีการควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมแก่กระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน มีดังนี้

$$BA = TA - (0.85)(0.833)TVA \qquad (1.29)$$

เมื่อ BA = สภาพด่างไบคาร์บอเนต (mg/l as $CaCO_3$)

TA = สภาพด่างทั้งหมด (mg/l as $CaCO_3$)

TVA = กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (mg/l as CH_3COOH)

0.85 = กรดอินทรีย์ระเหยง่ายมี CH_3COOH 85% เมื่อใช้วิธีไตเตรทถึงค่าพีเอช 4

0.833 = (น้ำหนักสมมูลย์ของ $CaCO_3$)/(น้ำหนักสมมูลย์ของ CH_3COOH)

การพิจารณาว่าค่าสภาพความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนตมีกำลังสูงเพียงพอหรือไม่เพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชในระบบ นอกจากค่าสภาพความเป็นด่างจะอยู่ในรูปไบคาร์บอเนตแล้ว

อีกหนึ่งค่าที่ต้องพิจารณา คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่างในรูปไบคาร์บอเนตด้วย (TVA/BA) ซึ่งค่าที่เหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 0.4 - 0.8 (สุภกิจ ดีโสภา , 2545 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สำหรับการปรับสภาพความเป็นด่างทำได้ 3 แบบ ดังนี้

1. การเติมสารเคมี เช่น ปูนขาวหรือโซเดียมไบคาร์บอเนต ผลจากการเติมสารเคมีต่างชนิดกันจะให้ผลไม่เหมือนกัน เช่น ปูนขาวหรือโซดาไฟสามารถดึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศมาทำปฏิกิริยา หรือแม้แต่สารชนิดเดียวกัน เมื่อเติมในถังปฏิกรณ์ที่มีสภาพภายในถังต่างกันก็อาจให้ผลต่างกัน เช่น เมื่อเติมปูนขาวหรือโซดาไฟในถังปฏิกรณ์ที่มีสภาพภายในเป็นกรด ไอออนของแคลเซียมจะจับกับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดเป็นโซเดียมไบคาร์บอเนต แต่ถ้าสภาพภายในถังเป็นด่างแล้วไอออนของแคลเซียมจะจับกับคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการตกตะกอนเป็นแคลเซียมไบคาร์บอเนตทำให้ความเป็นด่างลดลง แต่มีข้อดี คือ ปัญหาฝ้าไขมันที่ลอยบนผิวของถังปฏิกรณ์จะลดลง ดังนั้นวัสดุที่มีความเหมาะสมในการปรับสภาพด่าง คือ วัสดุที่มีไขมันสูง เช่น กากกาแฟ เป็นต้น

2. การใช้วัสดุหมักร่วมกับวัสดุหมักอื่นที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบสูง สามารถช่วยเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์จากการเพิ่มขึ้นของไนโตรเจนและยังช่วยกำจัดวัสดุหมักชนิดอื่นด้วย

3. การนำส่วนที่เป็นสารละลายจากตะกอนที่ออกจากระบบกลับมาใช้อีก ทำให้การนำความร้อน จุลินทรีย์และธาตุอาหารรองกลับเข้าสู่ระบบอีกด้วย

6. สารอาหาร (Nutrient)

แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ธาตุอาหารหลัก (Macronutrient) ได้แก่ คาร์บอน(C) ไนโตรเจน(N) ฟอสฟอรัส(P) และกำมะถัน(S) และธาตุอาหารรอง (Micronutrient) ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี(Zn) แมงกานีส(Mn) ทองแดง(Cu) โคบอลต์(Co) เหล็ก(Fe) และนิกเกิล(Ni) ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่จุลินทรีย์ต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะแบบไม่ใช้ออกซิเจนอย่างน้อยที่สุดต้องมีอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 100:1.1:0.2 (McCarty, 1964 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556) โดยใช้คาร์บอนในการสังเคราะห์พลังงาน ไนโตรเจนในการสังเคราะห์โปรตีนและฟอสฟอรัสในการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก ดังนั้นจึงต้องเตรียมการให้เหมาะสมแก่ความต้องการ เพราะของเสียที่เข้าสู่ระบบนั้นมีความแตกต่างกัน เช่น ขยะของเสียจำพวกอาหาร ผักผลไม้ มีสารอาหารเหล่านี้ในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ แต่ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางอย่างไม่มี จึงจำเป็นต้องเติมสารอาหารเหล่านี้เพิ่ม ส่วนสารอาหารรองมีความต้องการน้อยมากและในธรรมชาติก็มีเพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์อยู่แล้ว

7. สารพิษ (Toxic substance)

สารบางอย่างหากมีความเข้มข้นสูงเกินไปก็อาจทำร้ายจุลินทรีย์ได้ ซึ่งสิ่งที่จะบ่งบอกได้ คือ ชนิดและปริมาณของสารพิษ เช่น ไอออนประจุบวกของโลหะเบา (Light metal cation) ได้แก่ โซเดียม

(Na^+) โพแทสเซียม(K^+) แคลเซียม(Ca^{2+}) และแมกนีเซียม(Mg^{2+}) ซึ่งเกิดขึ้นมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือการเติมสารเคมีเพื่อปรับค่าพีเอชในระบบมีผลเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ตามตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ความเข้มข้นในการกระตุ้นและยับยั้งของไอออนประจุบวกของโลหะเบา

(คัดลอกจาก McCarty, 1964 และ Izarail and Mathai, 2006 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

ไอออนประจุบวก	**ความเข้มข้น (mg/l)**		
	กระตุ้น	**เริ่มยับยั้ง**	**ยับยั้งอย่างรุนแรง**
โซเดียม (Na^+)	100-200	3,500-5,500	8,000
โพแทสเซียม (K^+)	200-400	2,500-4,500	12,000
แคลเซียม (Ca^{2+})	100-200	2,500-4,500	8,000
แมกนีเซียม (Mg^{2+})	75-150	1,000-1,500	3,000

ความเป็นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาแต่ละชนิดรุนแรงไม่เท่ากัน ไอออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีวาเลนซี่เท่ากับ 1 จะมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์น้อยกว่าไอออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีวาเลนซี่เท่ากับ 2 ซึ่งพิษของ Ca^{2+} และ Mg^{2+} จะมากกว่าพิษของ Na^+และ K^+ ถึง 10 เท่า ดังนั้นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาจะเพิ่มขึ้นเมื่อวาเลนซี่สูงขึ้น ความเป็นพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบานั้นสามารถลดลงได้ ถ้ามีไอออนประจุบวกของโลหะเบาอีกชนิดหนึ่งอยู่ด้วย โดยจะทำให้ความเป็นพิษของไอออนของประจุบวกของโลหะชนิดแรกลดลง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Antagonism แต่ในทางตรงกันข้ามไอออนของโลหะเบาบางชนิดจะไปเพิ่มพิษของไอออนประจุบวกของโลหะเบาอีกชนิดหนึ่งเมื่ออยู่ร่วมกัน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Synergism

8. ก๊าซบางชนิด

แอมโมเนีย (Ammonia) เป็นสารที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์จำพวกโปรตีนที่ประกอบด้วยไนโตรเจน ภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจนเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) หรือ ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) โดยทั้งสองตัวนี้จะเปลี่ยนไปมาขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังสมการที่ 1.30 และ รูปที่ 1.8

$$NH_3 + H_2O \leftrightarrow \ NH_4^+ + OH^- \qquad (1.30)$$

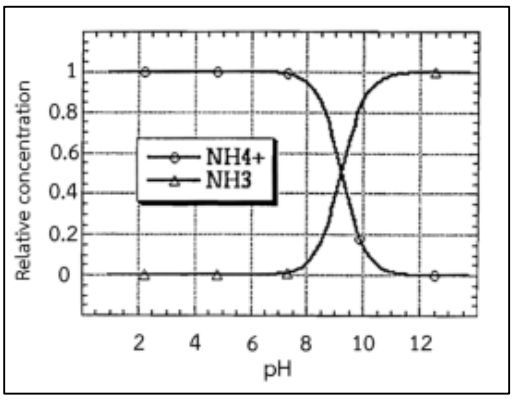
ถ้าค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่ำกว่า 7.2 จะมี (NH_4^+) มากกว่า แต่ถ้าความเป็นกรด-ด่าง มีค่ามากกว่า 7.2 จะมี NH_3 มากกว่า ซึ่งจะยับยั้งการทำงานและมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียมากกว่า NH_4^+ ปกติหากแอมโมเนียเมื่ออยู่ในรูปของ NH_3 จะเป็นพิษก็ต่อเมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 100 mg/l (Sterling *et al*., 2001 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556) แต่ถ้าหากอยู่ในรูปของ NH_4^+ จะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้นเท่ากับ 7,000-9,000 mg/l

ตารางที่ 1.2 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน
(คัดลอกจาก McCarty, 1964 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

แอมโมเนียไนโตรเจน (mg/l)	**ผลต่อระบบ**
50-200	ปริมาณพอเหมาะ
200-1,000	ยังไม่เกิดผลเสีย
1,500-3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อพีเอชสูง
>3,000	เป็นพิษโดยตรง

Sterling *et al*. (2001) ศึกษาการย่อยสลายมูลวัวนมภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน พบว่า แอมโมเนียไนโตรเจนมีผลต่อการสร้างก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และการลดลงของของแข็งระเหยในถังหมัก โดยแอมโมเนียไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยมีผลทำให้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น แต่เมื่อมีแอมโมเนียไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้น จะมีผลยับยั้งการสร้างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน การผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดจะลดลงไปร้อยละ 50 ของอัตราการผลิตเดิม

Sung and Lui (2003) ศึกษาพบว่า แอมโมเนียในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจนความเข้มข้น 4.92 และ 5.77 g/l มีผลทำให้การผลิตก๊าซมีเทนลดลงร้อยละ 39 และ 64 ตามลำดับ แต่ถ้ามีการปรับสภาพจุลินทรีย์พวก Acetoclastic methanogen ด้วยแอมโมเนียไนโตรเจนความเข้มข้นสูง จะทำให้สามารถทนต่อปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นและช่วงค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่กว้างขึ้น ความเข้มข้นของแอมโมเนียไนโตรเจนที่สามารถยับยั้งได้สมบูรณ์ เกิดในช่วง 8-13 g/l ขึ้นอยู่กับการปรับสภาพและค่าความเป็นกรด-ด่าง ของระบบ



รูปที่ 1.8 ความสัมพันธ์ระหว่างแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3)
(คัดลอกจาก สุรพล สายพานิช, 2540 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

ซัลไฟด์ (Sulfide) เกิดขึ้นในระบบที่ไม่ใช้ออกซิเจนจากซัลเฟต (Sulfate) ที่มีอยู่ในของเสียเข้าสู่ระบบ หรือสามารถเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์จำพวกโปรตีนที่มีซัลเฟอร์ ซึ่งซัลไฟด์ที่ละลายน้ำเท่านั้นและมีความเข้มข้นสูงกว่า 200 mg/l ที่เป็นพิษต่อแบคทีเรีย (Sastry and Vickineswaty, 1995 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556) โลหะหนักทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์สร้างผลึกที่ไม่ละลายน้ำขึ้น ดังนั้นการเติมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก สามารถลดความเป็นพิษของซัลไฟด์ละลายน้ำได้ ซัลไฟด์จะถูกแยกออกมาอยู่ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ดังนั้นความเข้มข้นของซัลไฟด์ละลายน้ำจึงขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-ด่าง ของของเหลวและส่วนประกอบของก๊าซ

9. โลหะหนัก (Heavy metal)

โลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แคดเมียม โคบอล โครเมียม และนิกเกิล เป็นต้น ซึ่งไอออนของโลหะหนักเหล่านี้เป็นพิษต่อจุลินทรีย์และพิษของโลหะหนักก็ขึ้นอยู่กับว่าเกลือของโลหะหนักนั้นจะละลายน้ำได้มากน้อยเพียงใด และพิษของโลหะหนักจะมากหรือน้อยก็ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีอยู่ในของเสียนั้นตามตารางที่ 2.3 เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์รวมตัวกับโลหะหนักเกิดเป็นเกลือซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำและตกตะกอน ถ้าของเสียมีปริมาณซัลไฟด์ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนได้ ก็จะต้องเติมเกลือซัลไฟด์ หรือเกลือซัลเฟต ลงไป เกลือทั้งสองชนิดนี้จะถูกรีดิวซ์ไปเป็นซัลไฟด์ภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้สามารถลดพิษของโลหะหนักลงได้

Wong and Cheung (1995) ได้ทำการศึกษาแล้วพบว่าปริมาณโลหะหนักต่อการย่อยสลายตะกอนของเสียภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน พบว่ามีโลหะหนักพวก Cr, Cu, Ni และ Zn ในปริมาณสูง นอกจากนี้ยังพบว่าระดับความเป็นพิษของโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด เรียงลำดับจากมากไปน้อยได้ คือ Cr > Ni > Cu > Zn

ตารางที่ 1.3 ระดับความเป็นพิษของโลหะหนักในการย่อยสลายภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน (คัดลอกจาก Hayes and Theis, 1978 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (mg/l)		
	ยับยั้ง	เป็นพิษ	หยุดทำงาน
Cr (III)	130	260	<200
Cr (VI)	110	420	<180
Cu	40	70	<50
Ni	10	30	>30
Cd	-	>20	>10
Pb	340	>340	>250
Zn	400	600	<1,700

10. อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)

เป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้กำหนดความสามารถของการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน การปรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้มีค่าแตกต่างกัน สามารถทำได้โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของของเสียที่ไหลผ่านถังหมัก หรือเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของของแข็งหรือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าไป การเปลี่ยนแปลงอัตราการป้อนสารอินทรีย์มีผลต่อระยะเวลากักเก็บด้วย

11. ระยะเวลากักเก็บ (Hydraulic Retention Time, HRT)

ความเร็วของการย่อยสลายเพิ่มขึ้นตามระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง จากนั้นจะลดลงจนกระทั่งถึงระดับหนึ่งที่จุลินทรีย์ถูกล้างออกจากระบบ (Wash out) ในอัตราที่เร็วกว่าจุลินทรีย์ที่เพิ่มจำนวนขึ้น (Wen *et al.*, 1999 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556) และจะเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลวได้ เราสามารถแก้ไขปัญหาจุลินทรีย์ถูกล้างออกจากระบบได้โดยการเพิ่มระยะเวลากักเก็บให้นานขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลากักเก็บยังเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบการหมัก การคำนวณสามารถทำได้โดยการหารปริมาตรถังหมักด้วยปริมาตรของเสียที่เติมลงในถังหมักต่อหน่วยเวลาของระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบ (Solid Retention Time, SRT) หมายถึง มวลของของแข็งภายในระบบ

หารด้วยมวลของของแข็งที่ปล่อยออกจากระบบต่อวัน ในถังหมักธรรมดาที่ไม่มีการหมุนเวียนตะกอน ระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบจะเท่ากับระยะเวลากักเก็บของเสีย (SRT = HRT) แต่ในถังหมักที่มีการหมุนเวียนตะกอนจะมีระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ภายในระบบมากกว่าระยะเวลากักเก็บของเสีย (SRT > HRT)

$$HRT = SRT = volume/flow\ rate = V/Q \quad (1.31)$$

12. การกวน (Mixing)

การกวนทำให้สารอินทรีย์อยู่ในสภาพแขวนลอยเพื่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างสารอาหารกับจุลินทรีย์เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ และยังช่วยป้องกันการสะสมของสารอินทรีย์ตามจุดต่างๆของถังหมัก และยังช่วยทำให้ของเหลวภายในถังหมักมีสภาพเป็นเนื้อเดียวกัน วิธีการกวนของเหลวในถังหมักมีหลายวิธี เช่น ใช้เครื่องกวนสูบอัดก๊าซไปทางด้านก้นของถังหมัก หมุนเวียนตะกอนด้วยปั๊ม และใช้การสูบผ่านท่อน้ำ เป็นต้น ซึ่งแต่ละข้อมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป การจะเลือกวิธีใดต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายๆด้านประกอบกัน

จากการศึกษาของ Salminen and Rintala (2002) พบว่าระยะเวลาการกักเก็บและอัตราการป้อนสารอินทรีย์ของระบบย่อยสลายของเสียจากโรงฆ่าสัตว์ปีกภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน พบว่าการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ดีเมื่อมีระยะเวลากักเก็บ (HRT) เท่ากับ 50-100 วัน และอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (OLR) เท่ากับ 0.8 kg VS/m^3.d (VS หรือ Volatile Solids คือของแข็งที่สลายไปเมื่อเผาที่อุณหภูมิ 550-600 °C) แต่ถ้าระยะเวลากักเก็บลดลงและอัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันสายยาวและกรดอินทรีย์ (ไขมัน) ระเหยง่าย (VFA) ในถังหมัก ทำให้ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้มีค่าลดลง

1.6.3 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่ได้มาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน โดยมีจุลินทรีย์หลายชนิดทำหน้าที่ย่อยสลาย ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซผสมระหว่างก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้อาจมีก๊าซไนโตรเจน (N_2) ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ปนอยู่บ้างเล็กน้อย แต่ก๊าซชีวภาพที่เกิดจากกระบวนการหมักจะมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้และสภาวะของกระบวนการหมักด้วย องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพโดยทั่วไปดังแสดงไว้ในตารางที่ 1.4 และก๊าซชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้นั้นจะต้องมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 45 (Dieter and Angelika, 2008 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

ตารางที่ 1.4 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพโดยทั่วไป

(คัดลอกจาก Teodolita *et al*., 2008 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

องค์ประกอบ	**ร้อยละ**
ก๊าซมีเทน (CH_4)	50-75
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	25-45
ก๊าซไฮโดรเจน (H_2)	<1
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	<1

ปริมาณค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพมีค่าแปรผันตามปริมาณก๊าซมีเทนที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพ (ชิตชนก คงแดง, 2554) ถ้าก๊าซชีวภาพมีปริมาณมีเทนอยู่ระหว่างร้อยละ 65-70 จะมีค่าความร้อนประมาณ 21-25 kJ/m^3 แต่ถ้าก๊าซชีวภาพมีปริมาณก๊าซมีเทนลดลงมาเหลือแค่ประมาณร้อยละ 50-55 ค่าความร้อนจะลดลงมาเหลือประมาณ 18-20 kJ/m^3 ดังตารางที่ 1.5 และลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซมีเทนดังแสดงในตารางที่ 1.6 ดังนั้นปริมาณค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือระดับความบริสุทธิ์ของก๊าซชีวภาพ สำหรับก๊าซธรรมชาติที่มีสัดส่วนของก๊าซมีเทน ก๊าซโพรเพนและก๊าซบิวเทนให้ค่าความร้อนประมาณ 3.73 kJ/m^3 (Metcalf and Eddy, 2004 อ้างถึงใน ชิตชนก คงแดง, 2554) เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถทดแทนเชื้อเพลิงจากแหล่งอื่นได้ เช่น ฟืน ถ่าน น้ำมัน ก๊าซหุงต้ม เป็นต้น จึงทำให้เราสามารถนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ โดยหากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีขนาดใหญ่ ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า (Electric Energy) พลังงานความร้อนโดยใช้เครื่องยนต์ก๊าซ (Gas Engine) กังหันก๊าซ (Gas Turbine) หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม (Boiler) ส่วนระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีขนาดเล็กระดับชุมชนหรือครัวเรือน ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สามารถนำมาใช้สำหรับตะเกียงก๊าซ (Biogas Lamp) เตาหุงต้ม หรือเครื่องปั๊มน้ำได้เหมือนก๊าซธรรมชาติ แต่มีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าการใช้ฟืนหรือถ่าน อีกทั้งยังปราศจากควันและเขม่า จึงทำให้สถานที่ที่ใช้ก๊าซนี้มีความสะอาดกว่า สามารถใช้ก๊าซชีวภาพได้โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องมือใดๆ เพียงแต่ปรับสัดส่วนอากาศให้เหมาะสม ก๊าซชีวภาพ 1 m^3 สามารถทดแทนก๊าซหุงต้มได้ 0.46 kg (เครือข่ายสารสนเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย, 2550 อ้างถึงใน ชิตชนก คงแดง, 2554)

ตารางที่ 1.5 คุณสมบัติก๊าซชนิดต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

(คัดลอกจาก ชิตชนก คงแดง, 2554)

ชนิดของก๊าซ/คุณสมบัติ	CH_4	CO_2	H_2	H_2S	60%CH_4 40%CO_2	65%CH_4 34%CO_2 1% อื่นๆ
ค่าความร้อน (kJ)	35.64	-	10.8	22.68	21.6	23.40
สัดส่วนติดไฟในอากาศ (% ในอากาศ)	5-15	-	4-80	4-45	6-12	7.7-23
อุณหภูมิติดไฟ (°C)	650-750	-	585	-	650-750	650-750
ความดันเปลี่ยนสถานะ (bar)	47	75	13	89	75-89	75-89
อุหณภูมิเปลี่ยนสถานะ (°C)	-82.5	31	-240	100	-82.5	-82.5
ความหนาแน่น (g/L)	0.72	1.98	0.09	1.54	1.2	1.15
ความจุความร้อน (kJ/m^3/°C)	1.6	1.6	1.3	1.4	1.6	1.6

1.6.4 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ (Biogas utilization)

ปัจจุบันสารอินทรีย์ที่มักนำมาใช้เพื่อให้เกิดก๊าซชีวภาพ คือ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม โรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานเบียร์ และโรงงานผลไม้กระป๋อง เป็นต้น รวมทั้งน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ โดยน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการดังกล่าวมีค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical oxygen demand, COD) ลดลงมากกว่าร้อยละ 80 และได้ก๊าซชีวภาพ 0.3 – 0.5 m^3/kg $COD_{removal}$ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำเสียแต่ละประเภท ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการบำบัดส่วนใหญ่จะอิ่มตัวด้วยไอน้ำ ในเบื้องต้นก่อนการนำไปใช้ประโยชน์ ในเบื้องต้นก่อนนำไปใช้ประโยชน์ต้องทำการแยกไอน้ำออกด้วยเครื่องควบแน่น โดยก๊าซชีวภาพสามารถนำไปใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เช่นเดียวกับก๊าซธรรมชาติ ดังตารางที่ 1.7 แสดงการเปรียบเทียบก๊าซชีวภาพกับเชื้อเพลิงอื่นๆ (นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

ตารางที่ 1.6 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซมีเทน (คัดลอกจาก Diaz *et al.*, 1993 อ้างถึงใน ชิตชนก คงแดง, 2554)

สูตรเคมี	**CH_4**
น้ำหนักโมเลกุล	16.042
จุดเดือดที่ 14.696 psia (760 mm)	-161.49°C
จุดเยือกแข็งที่ 14.696 psia (760 mm)	-182.48°C
ความดันวิกฤต	47.363 kg/m^3
อุณหภูมิวิกฤต	-82.5°C
ความถ่วงจำเพาะ : ของเหลว °C : -164 °C	0.415
ความถ่วงจำเพาะ : ก๊าซ °C: 25°C:และ 770 mm	0.000658
ปริมาตรจำเพาะ °C : 15.5°C และ 760 mm	1.47 L/g
ค่าความร้อน °C : 15.5 °C และ 760 mm	38,130.71 kJ/m^3
ความต้องการอากาศสำหรับการเผาไหม้	0.27 m^3
ความสามารถในการติดไฟ	5 – 15 % โดยปริมาตร
อัตราออกเทน	130
อุณหภูมิการเผาไหม้	650°C
สมการการเผาไหม้	$CH_4+2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$
อัตราส่วน O_2/CH_4 ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์	3.98 โดยน้ำหนัก
อัตราส่วน O_2/CH_4 ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์	2.00 โดยปริมาตร
อัตราส่วน CO_2/CH_4 ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์	2.74 โดยน้ำหนัก
อัตราส่วน CO_2/CH_4 ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์	1.00 โดยปริมาตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 1.7 การเปรียบเทียบก๊าซชีวภาพกับเชื้อเพลิงต่างๆ (คัดลอกจาก เครือข่ายสารสนเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย, 2550 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

ก๊าซชีวภาพ 1.0 m^3 เทียบเท่า	
ก๊าซหุงต้ม (LPG)	0.46 kg
น้ำมันดีเซล	0.60 l
น้ำมันเตา	0.55 l
ไฟฟ้า	1.20 kW/h

การผลิตก๊าซชีวภาพให้ประโยชน์หลายๆ ด้าน (นฤมล เซาะกระโทก, 2556) ได้แก่

1. ทางด้านพลังงาน
   - เป็นเชื้อเพลิงให้พลังงานความร้อน ทดแทนการใช้น้ำมันเตา
   - ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า
   - เป็นพลังงานร่วม โดยใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าและให้ความร้อนกับกระบวนการผลิตร่วมกัน
2. ด้านเศรษฐกิจ
   - ช่วยลดต้นทุนในการผลิต
   - สร้างรายได้จากการขายไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าขนาดเล็กมาก (Very Small Power Producer, VSPP)
   - สร้างรายได้จากการขายคาร์บอนเครดิต
3. ด้านสิ่งแวดล้อมและการจัดการของเสีย
   - ลดการตัดไม้ทำลายป่า
   - ลดเขม่าจากการใช้ฟืนในการหุงต้ม
   - เป็นเทคโนโลยีการบำบัดของเสียที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
   - สามารถแก้ไขปัญหากลิ่นเหม็น สัตว์พาหะนำโรคที่เกิดจากการกำจัดของเสียที่ไม่ถูกหลักวิชาการ
   - หมุนเวียนขยะมูลฝอยอินทรีย์กลับมาใช้ใหม่ในรูปของสารปรับสภาพดิน
   - ลดการใช้พื้นที่ในการกำจัดของเสีย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

- สามารถใช้หมักร่วมกับของเสียอินทรีย์ประเภทอื่น (Co-digestion) เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร มูลสัตว์ต่างๆ และของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

นอกจากนี้แล้วยังสามารถนำน้ำที่ผ่านการบำบัดไปใช้เป็นปุ๋ยน้ำ และสามารถนำตะกอนที่ผ่านการย่อยสลายไปใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพ

1.6.5 การศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential, BMP)

เป็นการทดลองเพื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของวัสดุหมักภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน แสดงในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมซีโอดีของของเสียที่ถูกย่อยสลายไป มีขั้นตอนในการดำเนินการดังต่อไปนี้ (นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

1. นำวัสดุหมักที่ต้องการทดลองใส่ในขวดหมักตามสัดส่วนที่กำหนด จากนั้นเติมเชื้อตะกอนแบคทีเรีย ปรับพีเอชอยู่ในช่วงระหว่าง 6.8-7.2 ด้วยสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ปิดฝาขวดหมักให้สนิท

2. นำขวดหมักที่ได้ดำเนินการทดลองตามอุณหภูมิตามที่กำหนด แล้วทำการเขย่าขวดเพื่อให้เกิดการกวนผสมระหว่างจุลินทรีย์กับวัสดุหมัก

3. วัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นทุกวันจดบันทึกค่า จนสิ้นสุดปฏิกิริยาคือ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นน้อยกว่า 5 ml จึงหยุดทำการทดลอง

4. วัดก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซด้วยเครื่องก๊าซโครโมโทกราฟฟี

5. ทำตัวอย่างที่ไม่มีสารละลายที่ต้องการตรวจวัด (Blank) โดยการใช้น้ำกลั่นแทนวัสดุหมักแล้วทำเหมือนข้อ 1-4 เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์ที่นำมาทดลองอาจมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ จึงต้องนำค่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากตัวอย่างที่ไม่มีสารละลายที่ต้องการตรวจวัด (Blank) นี้ไปลบกับก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากวัสดุหมัก

6. นำค่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นไปคำนวณหาค่าศักยภาพในการเกิดก๊าซมีเทน

1.6.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Raposo *et al.* (2006) ศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้นด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจนของซังข้าวโพดเดินระบบการหมักแบบแบตช์ ปริมาตรถังหมัก 5 L ที่อุณหภูมิ 35°C โดยทำการทดลองที่อัตราส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้น (ISRs) ที่ 3.0 2.0 1.5 และ 1.0 ตามลำดับ โดยกำหนดค่าของ

ของแข็งระเหยง่าย (VS) ของเชื้อจุลินทรีย์คงที่ที่ 15 g VS/l เพิ่มเติมด้วยการใส่ธาตุอาหารหลักและรองลงไปด้วยเพื่อความสมบูรณ์อาหารของจุลินทรีย์ พบว่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยอยู่ที่ 211±6 ml CH_4/gVS_{added} และอัตราส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้น (ISRs) ที่ 1.0 มีความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทนมากที่สุด

Angelidaki *et al.* (2009) ได้อธิบายแนวทางปฏิบัติที่เชื่อถือได้และสามารถนำไปปฏิบัติได้จริงในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน (BMP) ระหว่างสารอินทรีย์ของเสียร่วมกับพืชเศรษฐกิจ โดยเดินระบบแบบ Batch พบว่า

- สารตั้งต้นจำเป็นที่จะต้องบอกลักษณะพิเศษโดยเฉพาะอย่างยิ่งค่าของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยง่าย (VS) ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) หรือปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (TOC)

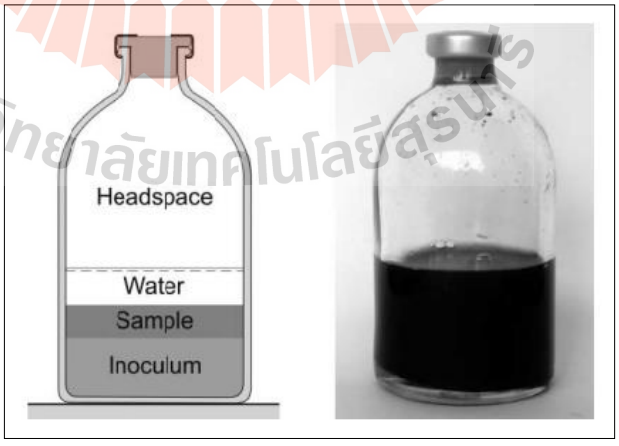
- ขนาดของสารตั้งต้นมีส่วนในการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นอย่างมาก

- เชื้อจุลินทรีย์ เป็นตัวช่วยในการเร่งการเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้นและลดระยะเวลาในการเกิดก๊าซชีวภาพให้เร็วขึ้น

- อาหารเพาะเชื้อเป็นสิ่งที่ช่วยให้เกิดปฏิกิริยาการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด

- ตัวอย่างที่ไม่มีสารละลายที่ต้องการตรวจวัด (Blank) เป็นตัวที่ทำให้รู้ว่าการหมักเฉพาะเชื้อจุลินทรีย์กับน้ำกลั่นหรืออาหารเพาะเชื้ออย่างเดียว นั้น มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพมากน้อยเพียงใด

- การกวนเป็นการป้องกันไม่ให้สารต่างๆในถังหมักเกิดการตกตะกอน



รูปที่ 1.9 ข้อเสนอแนะในการใส่สารต่างๆสำหรับการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

(คัดลอกจาก Angelidaki *et al.*, 2009)

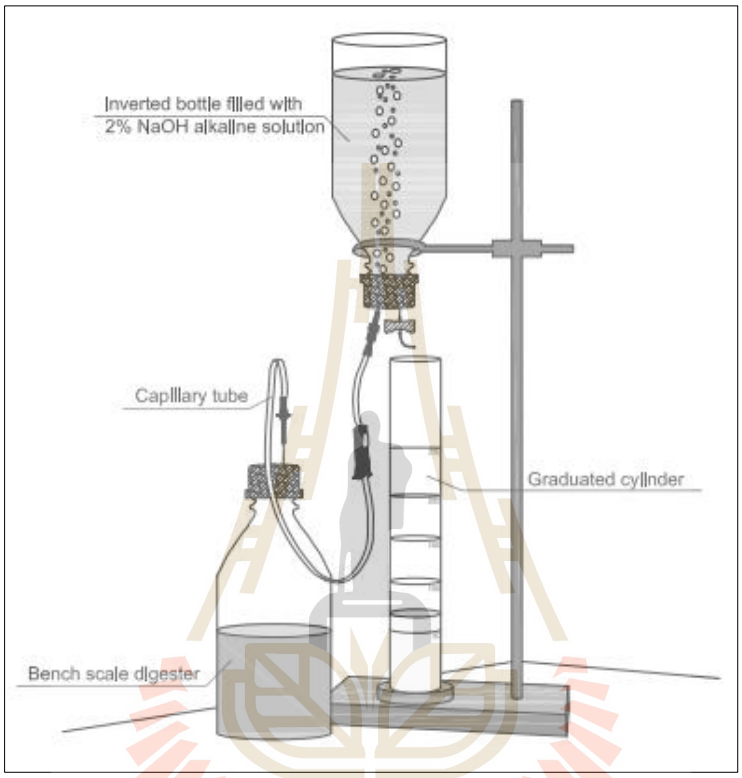
Lui *et al.* (2009) รายงานเรื่องผลของอัตราส่วนของสารตั้งต้นต่อเชื้อจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพของเศษอาหารและของเสียที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิ 35°C และ 50°C โดยสัดส่วนสารตั้งต้นผสมระหว่างของเสียและเศษอาหารเทียบตามของแข็งระเหยง่าย (VS) คือ 50:50 ทดลองช่วงแรกที่อุณหภูมิ 50°C (Thermophilic) ที่อัตราส่วนสารตั้งต้นต่อเชื้อจุลินทรีย์ ได้แก่ 1.6 3.1 4.0 และ 5.0 มีปริมาณก๊าซชีวภาพตามสัดส่วนต่างๆดังนี้ 778 742 784 และ 396 ml/gVS ตามลำดับสำหรับสารตั้งต้นเป็นเศษอาหาร 631 529 524 และ 407 ml/gVS ตามลำดับ สำหรับของเสียที่ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม 716 613 671 และ 555 ml/gVS ตามลำดับสำหรับสารตั้งต้นผสม พบว่าสัดส่วนที่ให้การผลิตก๊าซมีเทนดีที่สุด คือ อัตราส่วนที่ 3.1 แล้วนำมาทดลองที่อุณหภูมิ 35°C (Mesophilic) เป็นระยะเวลา 25 วัน ในขวดหมักปริมาตร 1 L พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มากที่สุดมาจากสารตั้งต้นที่เป็นเศษอาหาร คือ 430 ml/gVS โดยมีปริมาณก๊าซมีเทน 245 ml/gVS

Singh *et al*. (2010) อธิบายถึงการใช้เชื้อจุลินทรีย์ผสมหลายชนิดเพื่อเพิ่มปริมาณมีเทนในการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียที่ได้จากเทศบาล โดยเดินระบบแบบแบตช์ในถังหมักขนาด 10 L ที่อุณหภูมิ 35°C เป็นระยะเวลาทั้งหมด 41 วัน พบว่าของเสียที่ได้จากเทศบาลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนสูงสุด คือ 0.547 l/gVS และ 0.323 l/gVS ตามลำดับและมีสัดส่วนปริมาณสูงสุดถึงร้อยละ 68

อรรถวิโรจน์ (2553) ได้ทำการศึกษาเรื่องแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อเลี้ยงกุ้งโดยวิธีการระบุเอกลักษณ์ ทำการทดลองแบบแบตช์ เป็นระยะเวลา 35 วัน ในถังหมักขนาด 80 ลิตร พบว่าจากการทดลองนี้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 424.35 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวัน และในการทดลองเป็นเวลา 30 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 663.667 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อวัน จากผลวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งสอง ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทนไม่เกินร้อยละ 50

Eskicioglu *et al.* (2011) ได้เปรียบเทียบอัตราส่วนของเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้นในการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนของกากส่าพืชที่ช่วงอุณหภูมิ Mesophilic เดินระบบแบบแบตช์ ที่อัตราส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้น 3.67 1.83 0.92 และ 0.46 gVS/gVS ตามลำดับ ในปริมาตรขวดหมัก 125 ml กวนผสมที่ 90 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 82 วัน พบว่าอัตราส่วนต่างๆ ดังกล่าวไม่มีผลต่ออัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์เมื่อเวลาผ่านไป 22 วัน และอัตราส่วนที่ให้ปริมาณก๊าซมีเทนมากที่สุดร้อยละ 65.4 คือ อัตราส่วนของเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้น 0.46 และการย่อยสลายสารอินทรีย์หมดและเริ่มคงที่ตั้งแต่วันที่ 15-16 ของการทดลอง

Esposito *et al*. (2012) ศึกษาการทดสอบการวัดปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้หลักการแทนที่น้ำจากขี้หมูและของเสียจากร้านขายผักและผลไม้ โดยมีการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2 โมลาร์ เป็นตัวดักจับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน ดังรูปที่ 1.10



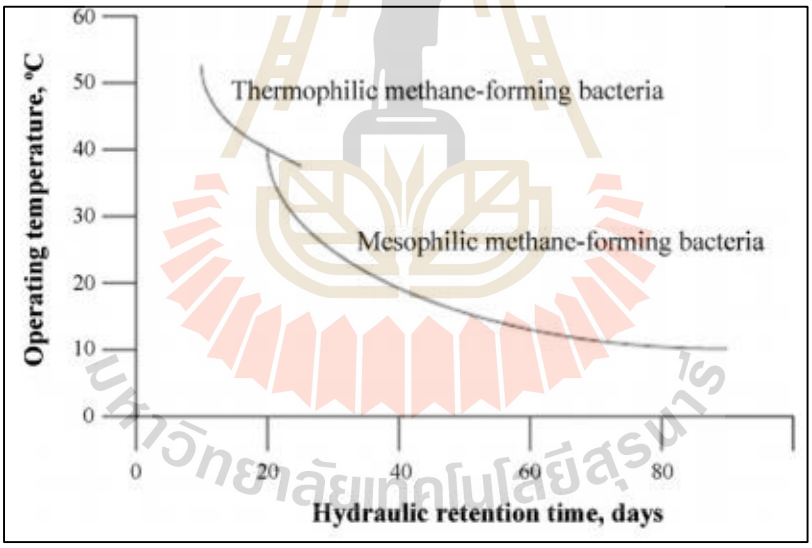
รูปที่ 1.10 อุปกรณ์การทดลองเพื่อใช้ในการวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน
(คัดลอกจาก Esposito *et al*., 2012)

Chandra *et al.* (2012b) ปริทัศน์การผลิตก๊าซมีเทนจากของเสียจากการทำเกษตรกรรม ตั้งแต่แหล่งกำเนิดทรัพยากรชีวมวลและชีวมวลจากเกษตรกรรม ทฤษฎีกระบวนการเกิดก๊าซมีเทนและปัจจัยพื้นฐานที่จำเป็นต้องใช้ในกระบวนการเกิดก๊าซมีเทน โดยสรุปปัจจัยพื้นฐานที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนดังแสดงไว้ในตารางที่ 1.8 และรูปที่ 1.11

ตารางที่ 1.8 ปัจจัยพื้นฐานที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เกิดกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน

(คัดลอกจาก Chandra *et al.*, 2012b)

Parameter	**Hydrolysis/Acidogenesis**	**Methane formation**
Temperature	25-35°C	Mesophilic: 32-42°C thermophilic: 50-58°C
pH value	5.2–6.3	6.7-7.5
C:N ratio	10:1-45:1	20:1-30:1
DM content	<40% DM	<30% DM
Redox potential	+400 to -300mV	<-250mV



รูปที่ 1.11 ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ Methanogenic

(คัดลอกจาก Chandra *et al.*, 2012b)

Dechrugsa *et al.* (2013) ได้รายงานอัตราส่วนของเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้นในการหมักแบบไร้ออกซิเจน เดินระบบแบบแบตช์ มีสารตั้งต้นเป็นหญ้าและขี้หมู ควบคุมที่อุณหภูมิ 35°C ตลอดการทดลอง

ในปริมาตรขวดหมัก 120 ml กวนผสมที่ 120 รอบต่อนาที เป็นระยะเวลา 45 วัน และมีการใส่ธาตุอาหารหลักและรองลงไปด้วย โดยทำการเปรียบเทียบเชื้อจุลินทรีย์จาก 2 แหล่ง คือ โรงงานผลิตยางและฟาร์มหมู ที่อัตราส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้นผสมระหว่างหญ้าและขี้หมู ดังนี้ 1 2 3 และ 4 พบว่าที่อัตราส่วนเชื้อจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้นผสม 3 และ 4 จะผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีที่สุด คือ 519.5 ml/gTS_a และ 521.9 ml/gTS_a ตามลำดับและการใช้เชื้อจุลินทรีย์จากฟาร์มหมูจะให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากกว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่มาจากโรงงานยาง

Kafle *et al.* (2014) ศึกษาผลกระทบอัตราส่วนสารตั้งต้นต่อเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนในผักกาดหอมจีนภายใต้ช่วงอุณหภูมิ Mesophilic และ Thermophilic โดยมีอัตราของสารตั้งต้นต่อเชื้อจุลินทรีย์ที่ 0.5 1.0 และ 2.0 ในขวดหมักปริมาตร 1.5 L เป็นระยะเวลา 96 วัน พบว่าที่ช่วงอุณหภูมิ Mesophilic ผลิตปริมาณก๊าซชีวภาพได้มากกว่าที่ช่วงอุณหภูมิ Thermophilic นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อดำเนินการตามอัตราส่วนต่างๆเป็นระยะเวลา 33-35 วัน ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจะคงที่และอัตราส่วนที่ให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่มากที่สุด คือ 0.5 ประมาณร้อยละ 62.8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 2
วิธีการวิจัย

การดำเนินงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพทางชีวเคมีจากการหมักร่วมระหว่างของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและฟางข้าว โดยดำเนินงานวิจัยและรวบรวมข้อมูลที่ห้องปฏิบัติการสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และสาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งมีรายละเอียดการวิจัยดังนี้

2.1 วัสดุหมักที่ใช้ในการทดลอง

1. ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง

ของเสียที่ใช้ได้มาจากการทำฟาร์มกุ้งในจังหวัดฉะเชิงเทรา ดังรูปที่ 2.1

รูปที่ 2.1 ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งในจังหวัดฉะเชิงเทรา

2. ฟางข้าว

วัสดุร่วมที่ใช้ในการหมักในการศึกษาครั้งนี้คือฟางข้าว (รูปที่ 2.2) ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการทำเกษตรกรรมซึ่งได้จากฟาร์มวัวของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยทำการบดฟางข้าวให้มีขนาดเล็กกว่า 1 mm จากนั้นเก็บวัตถุดิบไว้ในถุงพลาสติกเพื่อกันความชื้น

รูปที่ 2.2 ฟางข้าวที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการบด

3. เชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานมันสำปะหลัง สงวนวงษ์อุตสาหกรม

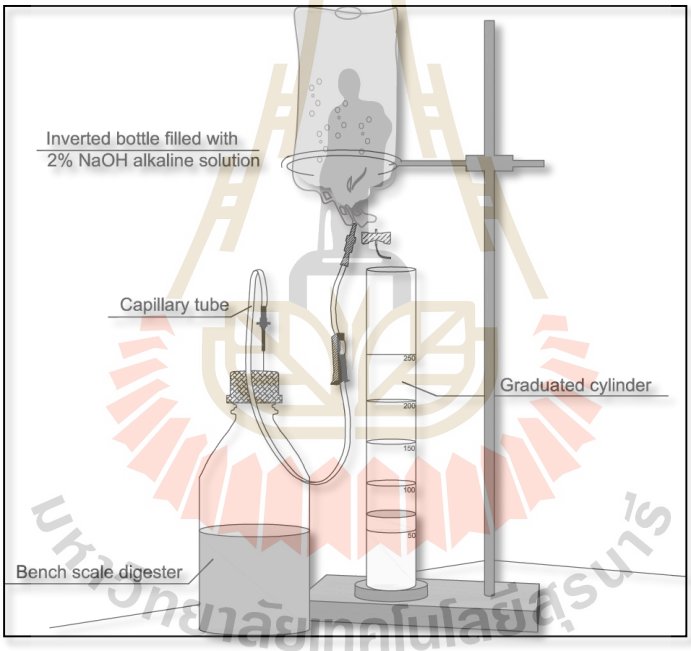
เชื้อตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นเชื้อตะกอนแบคทีเรียจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนของโรงงานมันสำปะหลัง สงวนวงษ์อุตสาหกรรม ในจังหวัดนครราชสีมา (รูปที่ 2.3)

รูปที่ 2.3 เชื้อตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานมันสำปะหลัง สงวนวงษ์อุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.2 ระบบที่ใช้ในการทดลอง

ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อเป็นพื้นฐานและแนวทางสำหรับการทดลองหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน โดยทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการหาและเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพระหว่างวัสดุหมักชนิดเดียว และวัสดุหมักร่วม 2 ชนิด คือ ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและฟางข้าว ด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจน ทำการทดลองโดยเดินระบบแบบแบตช์ ซึ่งประกอบด้วยชุดหมักแก๊สชีวภาพปริมาตร 250 มิลลิลิตร และชุดวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ทำการเขย่าชุดทดลองทุกวัน วันละหนึ่งนาทีก่อนวัดปริมาตรทุกครั้ง ดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (28±3 °C) ตลอดการทดลอง โดยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกวัดปริมาตรโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบจำลองระบบหมักแบบแบตช์และวิธีการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพโดยการแทนที่น้ำ (คัดลอกจาก Esposito *et al*., 2012)

2.3 การทดสอบระบบถังปฏิกรณ์

นฤมล เซาะกระโทก (2556) ได้แนะนำไว้ว่าในการทดลองระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน การตรวจสอบรอยรั่วของระบบถังปฏิกรณ์เป็นสิ่งสำคัญยิ่ง เนื่องจากระบบมีความจำเป็นที่ระบบจะต้องปิดอย่างแท้จริง มิฉะนั้นแล้วจะทำให้ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นรั่วซึมออกมาตามรอยรั่วต่างๆได้ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แรงดันไม่มากพอที่จะแทนที่น้ำในระบบวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ในการทดสอบระบบสามารถทำได้ด้วยการเติมน้ำเข้าไปในถังปฏิกรณ์ให้ระดับน้ำอยู่สูงกว่ารอยต่อต่างๆ แล้วสังเกตการรั่วซึมจากทุกด้าน ส่วนการทดสอบการรั่วซึมของก๊าซชีวภาพดำเนินการทดสอบโดยการใช้น้ำยาล้างจานทาบริเวณโดยรอบของรอยต่อทุกจุด แล้วเป่าลมเข้าถังปฏิกรณ์ หากมีฟองอากาศเกิดขึ้นตรงจุดใดต้องทำการอุดรอยรั่วด้วยกาวซิลิโคนและกาวร้อน

2.4 การวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้หมัก

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุหมักที่ใช้ในการทดลองก่อนทำการหมักเพื่อศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุที่ใช้หมักก่อน โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง ฟางข้าว และเชื้อจุลินทรีย์ คือ พีเอช อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหยได้ ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้หมัก

(คัดลอกจากนฤมล เซาะกระโทก , 2556)

ตัวแปร	วิธีการวิเคราะห์
ค่าพีเอช* (pH)	pH meter
อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) **	CHNS device
ของแข็งทั้งหมด*** (TS)	อบในเตาอบ 103-105°C
ของแข็งระเหยได้ (VS)	เผาที่อุณหภูมิ 550°C

หมายเหตุ: * ตัวอย่างของเหลวจากขวดเก็บตะกอนปริมาณ 5 ml ก่อนตรวจวัด

** ตัวอย่างตะกอนเทียบตามน้ำหนักแห้ง 1 g ก่อนตรวจวัด

*** ตัวอย่างตะกอนเทียบตามน้ำหนัก 10 g ก่อนตรวจวัด

2.5 การวิเคราะห์ตะกอนของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและตะกอนของเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมันสำปะหลังและฟางข้าว

1) การวิเคราะห์ความชื้น (Moisture) (อุดมผล พืชน์ไพบูลย์, 2551 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

ความชื้น หมายถึง ปริมาณน้ำที่มีอยู่ในตัวอย่าง

1.1 อุปกรณ์

1. ตู้อบ (Hot air oven)
2. ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)
3. เครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 g
4. โถดูดความชื้น (Desiccator)

1.2 วิธีการ

1. นำถ้วยกระเบื้องไปอบที่อุณหภูมิ 103-105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น นำไปชั่ง จดน้ำหนักที่ได้

2. นำตัวอย่างที่ทำการสุ่มตัวอย่างแล้วประมาณ 2 กรัม ใส่ในถ้วยกระเบื้องที่ทราบน้ำหนักที่แน่นอน นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105°C จนตัวอย่างแห้งสนิท คือ น้ำหนักตัวอย่างคงที่ ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น นำตัวอย่างไปชั่ง จดน้ำหนักที่ได้

1.3 การคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น (\%)} = \frac{(\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ})}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ}} \times 100 \qquad (2.1)$$

2) การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid, TS) และปริมาณของแข็งระเหยได้ (Volatile Solid, VS) (อุดมผล พืชน์ไพบูลย์, 2551 อ้างถึงใน นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

ปริมาณของแข็งทั้งหมด หมายถึง ปริมาณตัวอย่างแห้ง

ปริมาณของแข็งระเหยได้ หมายถึง ปริมาณของตัวอย่างที่เผาไหม้ได้

2.1 อุปกรณ์

1. ตู้อบ (Hot air oven)
2. ถ้วยกระเบื้อง (Crucible)
3. เครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 g
4. โถดูดความชื้น (Desiccator)

5. เตาเผา (Muffle furnace)

2.2 วิธีการ

1. นำถ้วยกระเบื้องไปเผาที่อุณหภูมิ 550±50°C ประมาณ 1 ชั่วโมง นำออกจากเตาเผาทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้นประมาณ 2 ชั่วโมง นำถ้วยกระเบื้องไปชั่ง จดน้ำหนักที่ได้ (A)

2. นำตัวอย่างใส่ในถ้วยกระเบื้องประมาณ 2 กรัม (B) นำไปอบให้แห้งในตู้อบประมาณ 2 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่อบแห้งสนิทแล้วใส่ในโถดูดความชื้นประมาณ 2 ชั่วโมง จากนั้นนำตัวอย่างไปชั่ง จดน้ำหนักที่ได้ (C)

3. นำตัวอย่างไปเผาที่อุณหภูมิ 550±50°C ประมาณ 1 ชั่วโมง นำตัวอย่างที่ได้ใส่ในโถดูดความชื้นทิ้งไว้ให้เย็น ประมาณ 2 ชั่วโมง นำตัวอย่างไปชั่ง จดน้ำหนักที่ได้ (D)

2.3 การคำนวณ

การคำนวณปริมาณของแข็งทั้งหมด $$\text{Total Solid (\%)} = \frac{(C-A) \times 100}{B} \quad (2.2)$$

เมื่อ A = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องก่อนอบ

B = ปริมาณตัวอย่าง

C = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องและตัวอย่างหลังอบ

การคำนวณปริมาณของแข็งระเหยได้ $$\text{Volatile Solid (\%)} = \frac{(D-C) \times 100}{B} \quad (2.3)$$

เมื่อ B = ปริมาณตัวอย่าง

C = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องและตัวอย่างหลังอบ

D = น้ำหนักถ้วยกระเบื้องและตัวอย่างหลังเผา

3. การวิเคราะห์ค่าพีเอช (pH) (นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

3.1 อุปกรณ์และเครื่องแก้ว

1. เครื่องชั่งความละเอียด 0.0001 g
2. กระบอกตวง (Measuring cylinder) ขนาด 100 มิลลิลิตร
3. เครื่องวัดค่าพีเอช (pH meter)
4. บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร
5. แท่งแก้วคนสาร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.2 วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่าง 5 กรัม ใส่ในบีกเกอร์

2. เติมน้ำกลั่นลงไป 25 มิลลิลิตร ทำให้ได้สัดส่วนตัวอย่างต่อน้ำเท่ากับ 1:5

3. คนตัวอย่างจนผสมเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 1 นาที หลังจากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนประมาณ 30 นาที จึงวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ส่วนที่เป็นน้ำใส

2.6 การทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพ

การทดลองนี้ได้นำของเสียจากโรงงานมันสำปะหลังสงวนวงษ์อุตสาหกรรม คือ ตะกอนจุลินทรีย์มาใช้ประโยชน์โดยการหมักร่วมกับของเสียที่ได้จากการทำเกษตรกรรมด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจนแบบแบตซ์ ทำการทดลองซ้ำสองครั้ง มีการทดลองดังนี้

วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่สภาวะมาตรฐานโดยใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งหมักร่วมกับฟางข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ในการหาอัตราส่วนทำการทดลองโดยเดินระบบแบบแบตซ์ ซึ่งเป็นการหมักแบบไร้ออกซิเจน ประกอบด้วย ชุดหมักก๊าซชีวภาพมีปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยมีวัสดุหมักร่วมสองชนิด ดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิห้องและทำการเขย่าทุกวัน วันละหนึ่งนาทีก่อนทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ตลอดการทดลองใช้ระยะเวลา 30 วัน ทำการทดลองทั้งหมด 7 ชุด แต่ละชุดทำการทดลองซ้ำสองครั้ง โดยใช้น้ำกลั่นหมักร่วมกับของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและฟางข้าว ทำการทดลองแบบ BMP อ้างอิงตาม Raposo *et al.* (2006) และ Dechrugsa *et al.* (2013) ที่อัตราส่วนตะกอนจุลินทรีย์ต่อสารตั้งต้น ($r_{I/S}$) 3 2 และ 1 โดยเทียบอัตราส่วนตาม gVS/l มีค่าตามลำดับดังนี้ 15:5 gVS/l, 15:7.5 gVS/l และ 15:15 gVS/l ตามขั้นตอนต่างๆดังนี้

1. เติมเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากโรงงานมันสำปะหลัง 15 gVS/l ลงในขวดทดลองขนาด 250 มิลลิลิตร (Working Volume)

2. เติมวัสดุผสม คือ ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง, ฟางข้าว ตามอัตราส่วนที่ได้คำนวณไว้ตาม gVS/l

3. เติมสารอาหาร stock nutrient solution 1% ของปริมาตรขวดทดลอง

4. เติมสารละลายด่าง $NaHCO_3$ 50 g/l 10% ของปริมาตรขวดทดลอง

5. ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 250 มิลลิลิตร

6. ปรับความเป็นกรด-ด่าง ด้วย NaOH 0.1 M หรือ HCl 0.1 M ให้อยู่ในช่วง 6.8 – 7.2

7. ทำการหมักวัตถุดิบในขวดหมักและบรรจุก๊าซไนโตรเจนประมาณ 1-2 นาที แล้วปิดให้สนิท เพื่อไม่ให้สัมผัสกับอากาศ ดำเนินการหมักภายใต้อุณหภูมิห้อง (28±3 °C)

8. เขย่าถังหมักวันละ 1 ครั้ง ครั้งละ 1 นาที

สัดส่วนและปริมาณ (กรัม) ของเชื้อจุลินทรีย์ (W) ของเสียจากฟาร์มกุ้ง (SW) และของผสมระหว่างของเสียจากฟาร์มกุ้งและฟางข้าว (MS) ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 วัสดุผสมและอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน

วัสดุหมัก	**อัตราส่วนเทียบตาม VS**						
	15W:5SW	**15W:7.5SW**	**15W:15SW**	**15W:5MS**	**15W:7.5MS**	**15W:15MS**	**Blank**
ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง (g)	46.3	70	139	23.2	35	70	0
ฟางข้าว (g)	0	0	0	0.93	1.4	2.8	0
เชื้อจุลินทรีย์ (g)	190	190	190	190	190	190	190

จากนั้นทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุผสม โดยจะบันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันจนสิ้นสุดปฏิกิริยา นั่นคือมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นน้อยกว่า 5 ml/d (นฤมล เซาะกระโทก, 2556) จึงหยุดทำการทดลองและนำชุดหมักมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ซ้ำสองครั้ง ตามตารางที่ 2.2 และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพเมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาเป็นระยะเวลา 30 วัน ด้วยเครื่องก๊าซโครโมโทกราฟฟี (Gas Chromatography, GC) ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นดังกล่าวจะถูกระบายออกจากขวดหมักมาแทนที่น้ำที่อยู่ในขวดเป็นการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำ (นฤมล เซาะกระโทก, 2556 และ Esposito *et al.,* 2012) ดังรูปที่ 2.4

2.7 การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกวัดปริมาตรโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ และทำการเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพซึ่งประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) โดยทำการวัดก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง Gas Chromatography (GC) รุ่น

GC7890A (Agilent Technology, USA) ใช้ตัววัดสัญญาแบบ Thermal Conductivity Detector (TCD) คอลัมน์ที่ใช้ คือ Packed column (Shincarbon Restek 19808) ใช้ก๊าซฮีเลียมเป็น carrier gas ที่อัตราการไหล 20 ml/min อุณหภูมิของ Injection inlet Oven และ Detector เท่ากับ100 200 และ 250 °C ตามลำดับ

รูปที่ 2.5 เครื่องก๊าซโครโมโทกราฟฟี รุ่น GC 7890A (Agilent Technology, USA)

วิธีการวิเคราะห์

ทำการฉีดตัวอย่างก๊าซชีวภาพโดยใช้เข็มฉีดตัวอย่าง (Syringe) แบบ Gas Tight Syringe ขนาด 1 mm ดูดก๊าซชีวภาพจากหลอดสุญญากาศที่ใช้เก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพมา 1 ml ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครโมโทกราฟฟี ปริมาณร้อยละของก๊าซมีเทน คำนวณจากความสูงของกราฟ (Peak area)

2.8 การคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี

การคำนวณหาปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกย่อยสลายได้ดังสมการที่ 2.4 (กลิ่นประทุม ปัญญาปิง และคณะ, 2555)

ของแข็งระเหย $_{(เข้า)}$ – ของแข็งระเหย $_{(ออก)}$ = ของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด

$$VS_{(IN)}\ (mg/l) - VS_{(OUT)}\ (mg/l) = VS_{(Removed)}\ (mg/l) \quad (2.4)$$

การคำนวณประสิทธิภาพในการบำบัด TS และ VS สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5

$$\%\ การบำบัด VS = \frac{VS_{in}\,(mg/l) - VS_{out}\,(mg/l)}{VS_{in}\,(mg/l)} x100 \quad (2.5)$$

การคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Specific Methane Yield) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.6

$$Methane\ yield \quad \frac{l\,CH_4}{g\,VS_{removal}} = \frac{Cummulativ\,e\ methane\ (l)}{TVS_{input} - TVS_{output}} x(\%\,CH_4) \qquad (2.6)$$

เมื่อ TVS_{input} คือปริมาณของแข็งระเหยได้ที่เข้าสู่ระบบทั้งหมด

TVS_{output} คือปริมาณของแข็งระเหยได้ที่ได้ออกมาจากระบบทั้งหมด

การหาศักยภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้ก๊าซมีเทน (% BMP) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.7

$$\%\ \text{BMP} = \frac{\text{อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์}\ x\ 100}{\text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี}} \qquad (2.7)$$

หมายเหตุ จากทฤษฎี COD 1 kg เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ 350 L

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 3

ผลการศึกษาและการอภิปรายผล

3.1 คุณสมบัติของวัสดุหมักที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 คุณสมบัติของของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง พบว่าของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งมีสภาพค่อนข้างเป็นกลาง เนื่องจากค่าพีเอชที่ตรวจได้มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.5 เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของอรรถวิโรจน์ เขียวนาค (2553) พบว่าค่าพีเอช 7.7 และ 8.3 ซึ่งมีค่าค่อนข้างไปทางด่าง ในของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งมีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) 570.55 g/l ของแข็งระเหยได้ (VS) 64.325 g/l และ อัตราส่วน VS/TS เท่ากับ 11.27 นอกจากนี้มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) ประมาณ 8 พบว่าหากเปรียบเทียบงานวิจัยของ Chandra *et al*. (2012b) และ นฤมล เซาะกระโทก (2556) และตามทฤษฎี พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) มีค่าต่ำมากซึ่งมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน นั่นคือ อัตราการเกิดจุลินทรีย์ลดลง การผลิตก๊าซก็ลดลงด้วย เนื่องจากอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 20:1 – 30:1 และอัตราส่วนอย่างน้อยที่ทำให้การผลิตก๊าซมีค่าสูงสุด คือ 25:1

3.1.2 คุณสมบัติของฟางข้าว

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของฟางข้าว พบว่ามีค่าพีเอชเฉลี่ยประมาณ 6.7-7.0 มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยได้ (VS) และอัตราส่วน VS/TS เท่ากับ 440.254 g/l 320.437 g/l และ 72.76 g/l ตามลำดับ นอกจากนี้มีค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน(C:N ratio) ประมาณ 57.8 พบว่าหากเปรียบเทียบงานวิจัยของ Chandra *et al*. (2012b) และ นฤมล เซาะกระโทก (2556) และตามทฤษฎี พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) มีค่าสูง ซึ่งมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน นั่นคือ เนื่องจากอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 20:1 – 30:1 และอัตราส่วนอย่างน้อยที่ทำให้การผลิตก๊าซมีค่าสูงสุด คือ 25:1

3.1.3 คุณสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมันสำปะหลัง

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมมันสำปะหลังพบว่ามีค่าพีเอชเฉลี่ย 6.77 มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยได้ (VS) และอัตราส่วน VS/TS เท่ากับ 230.675 g/l 210.675 g/l และ 91.33 g/l ตามลำดับ

3.1.4 คุณสมบัติของของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งผสมกับฟางข้าว

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุผสมใช้อัตราส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จากโรงงานมันสำปะหลังปริมาณ 190 ml ต่อของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งตามอัตราส่วนต่างๆ ก่อนนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ โดยผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุผสมระหว่างของของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งผสมกับฟางข้าว พบว่า วัสดุผสมที่ใช้ในการทดลองมีสภาพเป็นกลาง เนื่องจากมีค่าพีเอชเฉลี่ยประมาณ 6.7 ปริมาณสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบในรูปของของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยได้ (VS) เฉลี่ยเท่ากับ 542 g/l และ 533 g/l ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วได้มีการใส่สารอาหารหลักและสารอาหารรองลงไปด้วย

3.2 ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการแบบแบตช์

การศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน โดยใช้การหมักของวัสดุร่วมสองชนิด คือ ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งผสมกับฟางข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ ในการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนระหว่างวัสดุหมักร่วม 2 ชนิด คือ ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและฟางข้าวด้วยการหมักแบบไร้ออกซิเจนในการอัตราส่วนทำการทดลองโดยเดินระบบแบบแบตช์ ดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ทำการทดลองทั้งหมด 6 อัตราส่วน คือ 15W:5SW 15W:7.5SW 15W:15SW 15W:5MS 15W:7.5MS และ15W:15MS ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัสดุผสมก่อนและหลังการทดลอง ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ปริมาณของแข็งที่ระเหยได้ (VS) และทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทุกวันและเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพหลังการทดลองที่ 30 วัน ด้วยเครื่องก๊าซโครโมโทกราฟฟี (Gas Chromatography) ผลการทดลองและการวัดค่าต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.1 ซึ่งมีรายละเอียดในการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนและค่าที่วัดได้ก่อนและสิ้นสุดการเดินระบบ

อัตราส่วน	pH_{IN}	pH_{OUT}	TS_{IN} (mg/l)	TS_{OUT} (mg/l)	VS_{IN} (mg/l)	VS_{OUT} (mg/l)
15W:5SW	6.69	7.33	569.99	133.68	554.81	126.61
15W:5MS	6.86	6.9	606.43	39.85	1262.67	19.25
15W:7.5SW	6.74	7.08	567.2	119.83	541	167.42
15W:7.5MS	6.75	6.81	424.42	55.28	600.28	22.29
15W:15SW	7.23	8.83	489.16	8.5	487.27	1.87
15W:15MS	6.72	6.99	537.61	44.38	529.99	14.99

1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จากการทดลองได้ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ของวัสดุผสมก่อนการทดลองในทุกๆอัตราส่วนผสมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 M ให้มีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 7 (Raposo *et al.,* 2006) ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน ถ้าพีเอชสูงกว่า 7.6 หรือต่ำกว่า 6.6 นี้ประสิทธิภาพในระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะสภาวะนี้จะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ (Chandra *et al.,* 2012b และ นฤมล เซาะกระโทก, 2556) ถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.5 จะทำให้ Methanogenic bacteria หยุดการเจริญเติบโต โดยจากผลการทดลองทั้งสองชุดการทดลองพบว่า ค่าพีเอชของระบบที่ตรวจวัดได้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการหมักแบบไร้ออกซิเจน จึงทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ จากการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง ของวัสดุหมักเมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่าในแต่ละอัตราส่วนผสมมีค่าความเป็นกรด-ด่าง เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับความเป็นกรด-ด่าง ก่อนการทดลอง ซึ่งยังมีแนวโน้มอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบการหมักแบบไร้ออกซิเจน ยกเว้นที่อัตราส่วนผสม 15W:15SW มีค่าพีเอชมากกว่า 7.6 คือ มีค่า 8.83 ทำให้อัตราส่วนนี้ไม่สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ เนื่องจากมีค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ไม่เหมาะแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

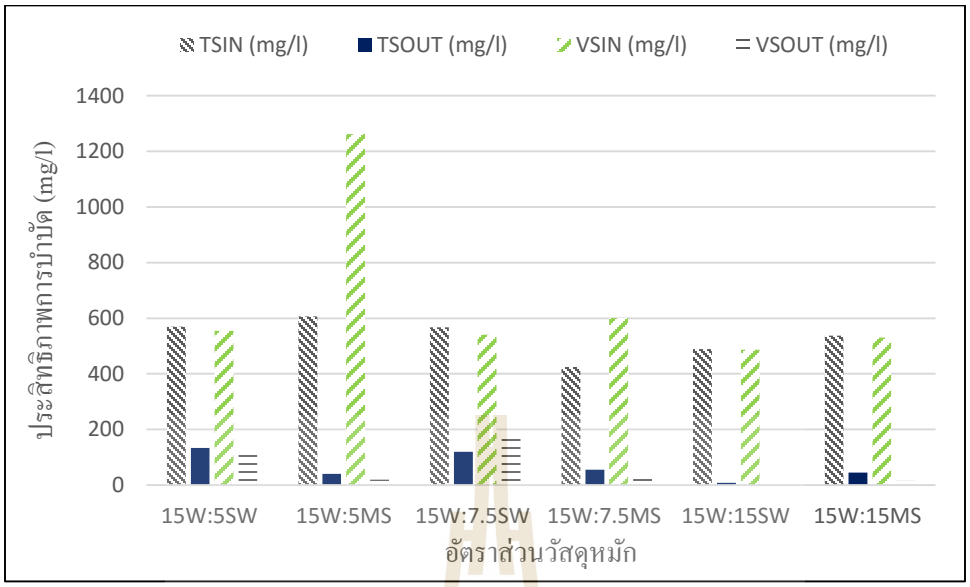
2. อุณหภูมิ (Temperature)

ในการทดลองดำเนินการภายใต้อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิที่ตรวจวัดได้มีค่าอยู่ในช่วง 25-29.8°C ซึ่งทั้งสองชุดการทดลองมีช่วงอุณหภูมิภายใต้สภาวะการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม Mesophilic ที่มีช่วงอุณหภูมิ 20-45°C (Chandra *et al.,* 2012b) ดังนั้นจึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของระบบและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน

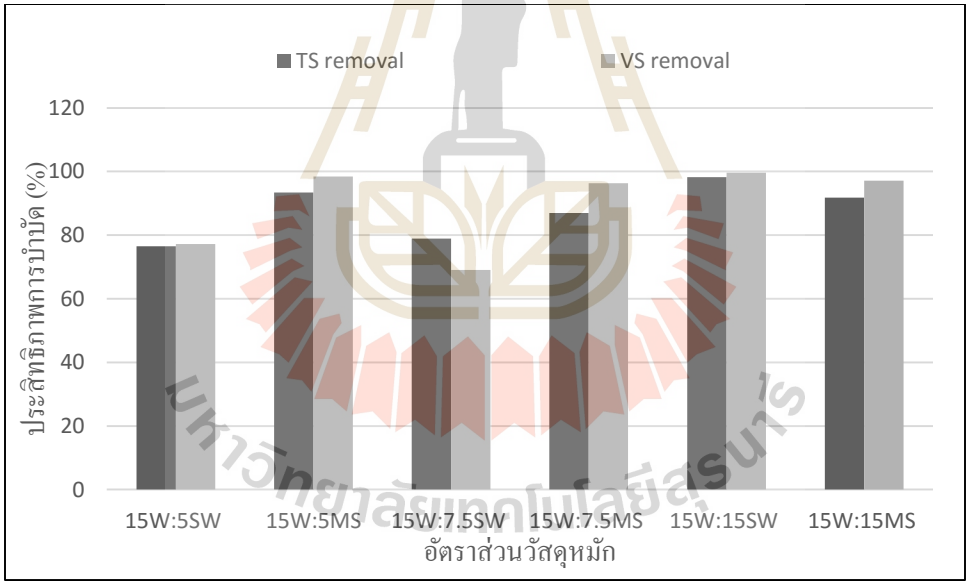
3. การบำบัดของแข็งทั้งหมด (Total Solid, TS) และของแข็งระเหยได้ (Volatile Solid, VS)

จากการทดลองในแต่ละอัตราส่วนมีการเติมของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและฟางข้าวในปริมาณที่แตกต่างกัน ซึ่งอัตราส่วนที่มีปริมาณ TS สูงเฉพาะวัสดุหมักชนิดเดียว คือ 15W:7.5SW ดังรูปที่ 3.1 เนื่องจากต้องใช้ระยะเวลาในการเกิดกระบวนการ Hydrolysis เนื่องจากมีสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากปริมาณมากและความสามารถของจุลินทรีย์ในระบบจะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายก่อนจึงจะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยยาก สอดคล้องกับอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในอัตราส่วนที่มีการเพิ่มปริมาณวัสดุหมักจะมีปริมาณก๊าซชีวภาพในช่วงแรกต่ำและจะค่อยๆสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการทดลองมากขึ้น เนื่องจากวัสดุอยู่ในระบบหมักนานขึ้นจึงทำให้เกิดกระบวนการ Hydrolysis ได้นานและสามารถย่อยสลาย TS ได้เพิ่มขึ้น โดยในการทดลองนี้เป็นการเติมวัสดุหมักเพียงครั้งเดียว ดังนั้น เมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณสารอินทรีย์และ TS จะลดลง เนื่องจากถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอาหารอย่างต่อเนื่อง ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้าลงเรื่อยๆ เมื่อปริมาณสารอินทรีย์ในระบบลดลงจึงไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ ส่งผลให้จุลินทรีย์ในระบบบางส่วนหายไปและประสิทธิภาพการบำบัด TS ในระบบลดลง เช่นเดียวกับอัตราส่วนที่มีปริมาณ TS สำหรับวัสดุหมักร่วมสองชนิด คือ 15W:5MS เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า การหมักที่มีอัตราส่วนผสม 15W:15SW มีประสิทธิภาพในการบำบัด TS สูงสุดเท่ากับร้อยละ 98 ดังรูปที่ 3.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TS และ VS ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน



รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัด TS และ VS ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน

สำหรับผลการทดลองในส่วนของประสิทธิภาพการบำบัด VS จะคล้ายกับการบำบัด TS จะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในอัตราส่วนที่มีการเพิ่มปริมาณของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งอย่างเดียวนั้นจะมีปริมาณก๊าซชีวภาพในช่วงแรกสูงแต่ปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้ต่ำ เนื่องจากในช่วงแรกเกิด

กระบวนการ Hydrolysis จึงทำให้จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดมีการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็น Volatile Fatty Acid (VFA) ได้มากแต่จุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนมีการเจริญเติบโตช้าจึงย่อยสลาย VFA ที่เกิดขึ้นในระบบเป็นก๊าซมีเทนได้น้อยและจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดลองที่มากขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบสามารถปรับตัวให้คุ้นเคยกับสภาวะแวดล้อมในระบบได้และมีการสร้างเซลล์ใหม่ได้เพิ่มขึ้นทำให้การเปลี่ยน VFA เป็นก๊าซมีเทนได้ดีขึ้น การย่อยสลาย VS จึงสูงขึ้นและเริ่มลดลงเมื่อมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากเหลืออยู่ในระบบ เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า ที่อัตราส่วนที่หมักเฉพาะของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งอย่างเดียวนั้น 15W:15SW มีประสิทธิภาพในการบำบัด VS สูงสุดเท่ากับร้อยละ 99 ส่วนวัสดุหมักร่วมที่อัตราส่วน 15W:5MS มีประสิทธิภาพในการบำบัด VS สูงสุดเท่ากับร้อยละ 98

4. อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทนและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

ในการหมักแบบไร้ออกซิเจนเป็นระยะเวลา 30 วัน ผลที่ได้จากการทดลอง คือ ก๊าซชีวภาพ โดยได้ทำการทดลองวัดปริมาณก๊าซชีวภาพด้วยหลักการแทนที่น้ำ โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในแต่ละวันดังแสดงในตารางที่ 3.2 และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมตลอดช่วงระยะเวลา 30 วัน ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.3

เมื่อนำข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้ในแต่ละวันและปริมาณก๊าซมีเทนสะสมมาพล็อตเป็นกราฟก็ได้กราฟแสดงปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพในแต่ละช่วงเวลาดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่าแนวโน้มในช่วงวันที่ 0-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในการทดลอง ยกเว้นที่อัตราส่วน 15W:15SW และ 15W:7.5SW ในช่วงวันที่ 11-20 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมค่อยๆเพิ่มขึ้นยกเว้นที่อัตราส่วน 15W:15SW เข้าสู่สภาวะคงที่ และปริมาณก๊าซชีวภาพเริ่มมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะคงที่ในทุกอัตราส่วนผสมหลังจากวันที่ 25 เป็นต้นไป จะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในช่วง 10 วันแรกเพิ่มขึ้นสูงในทุกอัตราส่วนและมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นสูงตามด้วย เนื่องจากจุลินทรีย์อยู่ในช่วงปรับตัวให้คุ้นเคยกับวัสดุหมักและทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยง่ายก่อน เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่ จากนั้นจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากต่อไป โดยในระบบหมักในอัตราส่วนที่มีการเติมฟางข้าว จุลินทรีย์ทำการย่อยสลายและสร้างเซลล์ใหม่เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีกว่าอัตราส่วนที่มีเฉพาะของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งในระยะเวลาที่เท่ากันดังรูปที่ 3.2 หลังจากดำเนินการทดลองนานขึ้นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเริ่มลดลงและสัดส่วนในการผลิตก๊าซมีเทนก็ลดลงด้วย เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ในระบบเหลือน้อยลงและย่อยสลายยาก เพราะในการทดลองเป็นการเดินระบบแบบแบตช์ ซึ่งมีการเติมสารตั้งต้นหรือวัสดุหมักเพียงครั้งเดียว เมื่อดำเนินการทดลองจุลินทรีย์จะย่อยสลาย

สารอินทรีย์ทำให้สารอินทรีย์ในระบบค่อยๆ ลดลง โดยอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากการทดลองที่อัตราส่วน 15W:15MS สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดได้ 570 ml ในขณะที่อัตราส่วน 15W:7.5MS 15W:5MS 15W:7.5SW 15W:5SW และ 15W:15SW สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 390 ml 359 ml 125.45 ml 88.5 ml และ 0 ml ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลอง Biochemical Methane Potential (BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน

วันที่	Biogas (ml/day)						
	อัตราส่วน						
	15W:5SW	15W:7.5SW	15W:15SW	15W:5MS	15W:7.5MS	15W:15MS	BLANK
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	28	34	0
2	17	0	0	38	20	11	0
3	5	0	0	54	22	46	0
4	15.5	0	0	50.5	33.5	27	0
5	0	2	0	23	32	41	0
6	12	8.25	0	15	32	33.5	0
7	1	5	0	26	25	48	0
8	2.2	14	0	15	14	29	0
9	2.4	3	0	13	15	25	0
10	2.8	6.4	0	25	12	23	12
11	2.8	5.5	0	8	15	21	5.8
12	2.8	5.5	0	13.5	15	28	4.2
13	2.2	6	0	5	9.5	13.5	1.4
14	2	2.6	0	7	9.5	24	3.2
15	2.2	5.5	0	11	10.5	13.5	3.4
16	2	4.5	0	6	9	13	2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพในการทดลองแบบ Biochemical Methane Potential (BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	Biogas(ml/day)						
	อัตราส่วน						
	15W:5SW	15W:7.5SW	15W:15SW	15W:5MS	15W:7.5MS	15W:15MS	BLANK
17	2	3	0	5	7.5	12	2
18	1	4	0	5	7	18	1
19	5	5	0	13	6.5	9	5
20	0	1	0	0	9	11	0
21	0	10.5	0	0.5	10.5	10.5	0
22	0	6.5	0	1	6.5	11.5	0
23	0	0.5	0	9.5	7	7	0
24	0	13	0	15	9	21	0
25	0.5	0	0	0	9.5	0	0
26	3.4	0	0	0	3.2	0	0
27	1	12	0	0	12	5	0
28	0.5	0	0	0	0	7	2.4
29	0.5	0	0	0	0	8	0
30	2.2	0.5	0	0	0	9	3
31	0.5	1.2	0	0	0	11	8.5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

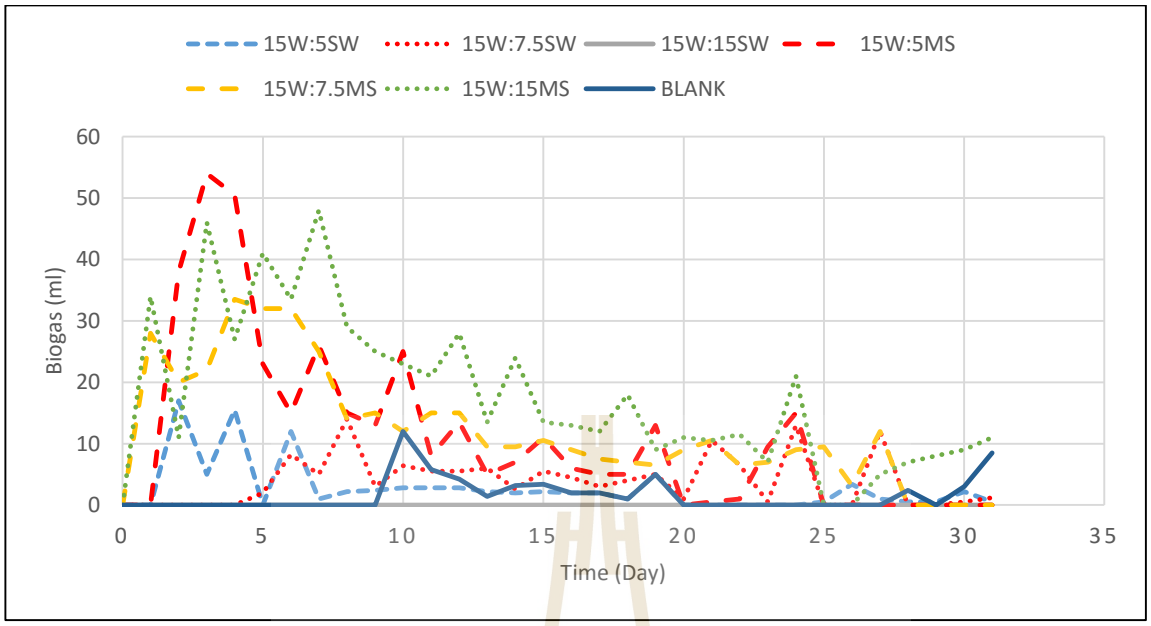
ตารางที่ 3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในการทดลองแบบ Biochemical Methane Potential (BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน

วันที่	Cumulative Biogas(ml/day)						
	อัตราส่วน						
	15W:5SW	15W:7.5SW	15W:15SW	15W:5MS	15W:7.5MS	15W:15MS	BLANK
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	28	34	0
2	17	0	0	38	48	45	0
3	22	0	0	92	70	91	0
4	37.5	0	0	142.5	103.5	118	0
5	37.5	2	0	165.5	135.5	159	0
6	49.5	10.25	0	180.5	167.5	192.5	0
7	50.5	15.25	0	206.5	192.5	240.5	0
8	52.7	29.25	0	221.5	206.5	269.5	0
9	55.1	32.25	0	234.5	221.5	294.5	0
10	57.9	38.65	0	259.5	233.5	317.5	12
11	60.7	44.15	0	267.5	248.5	338.5	17.8
12	63.5	49.65	0	281	263.5	366.5	22
13	65.7	55.65	0	286	273	380	23.4
14	67.7	58.25	0	293	282.5	404	26.6
15	69.9	63.75	0	304	293	417.5	30
16	71.9	68.25	0	310	302	430.5	32
17	73.9	71.25	0	315	309.5	442.5	34
18	74.9	75.25	0	320	316.5	460.5	35
19	79.9	80.25	0	333	323	469.5	40
20	79.9	81.25	0	333	332	480.5	40

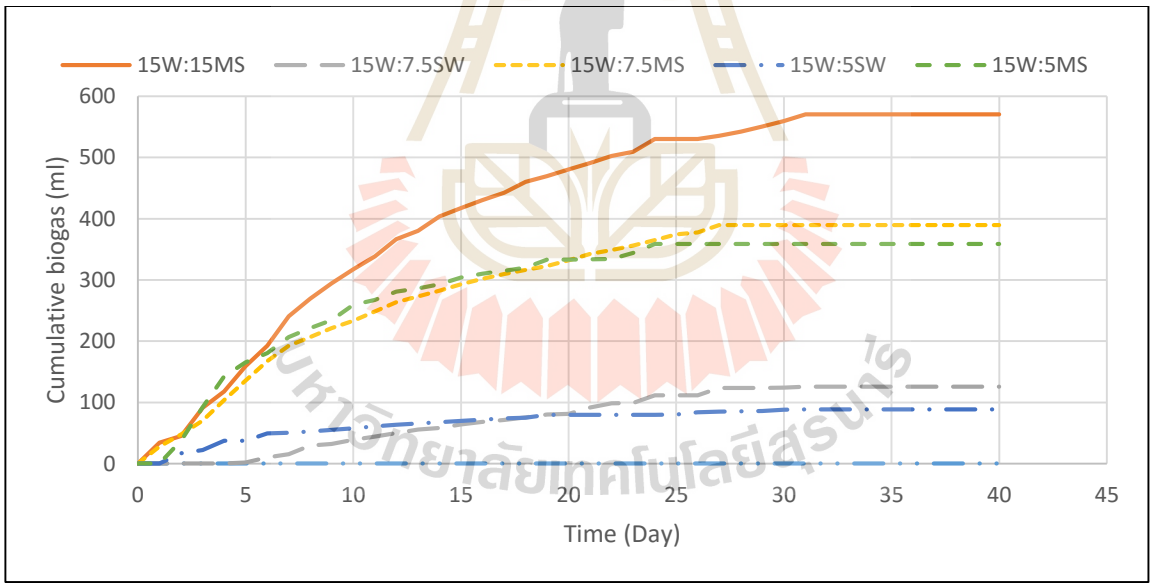
ตารางที่ 3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในการทดลองแบบ Biochemical Methane Potential (BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	Cumulative Biogas(ml/day)						
	อัตราส่วน						
	15W:5SW	15W:7.5SW	15W:15SW	15W:5MS	15W:7.5MS	15W:15MS	BLANK
21	79.9	91.75	0	333.5	342.5	491	40
22	79.9	98.25	0	334.5	349	502.5	40
23	79.9	98.75	0	344	356	509.5	40
24	79.9	111.75	0	359	365	530.5	40
25	80.4	111.75	0	359	374.5	530.5	40
26	83.8	111.75	0	359	377.7	530.5	40
27	84.8	123.75	0	359	389.7	535.5	40
28	85.3	123.75	0	359	389.7	542.2	42.4
29	85.8	123.75	0	359	389.7	550.5	42.4
30	88	124.25	0	359	389.7	559.5	45.4
31	88.5	125.45	0	359	389.7	570.5	53.9

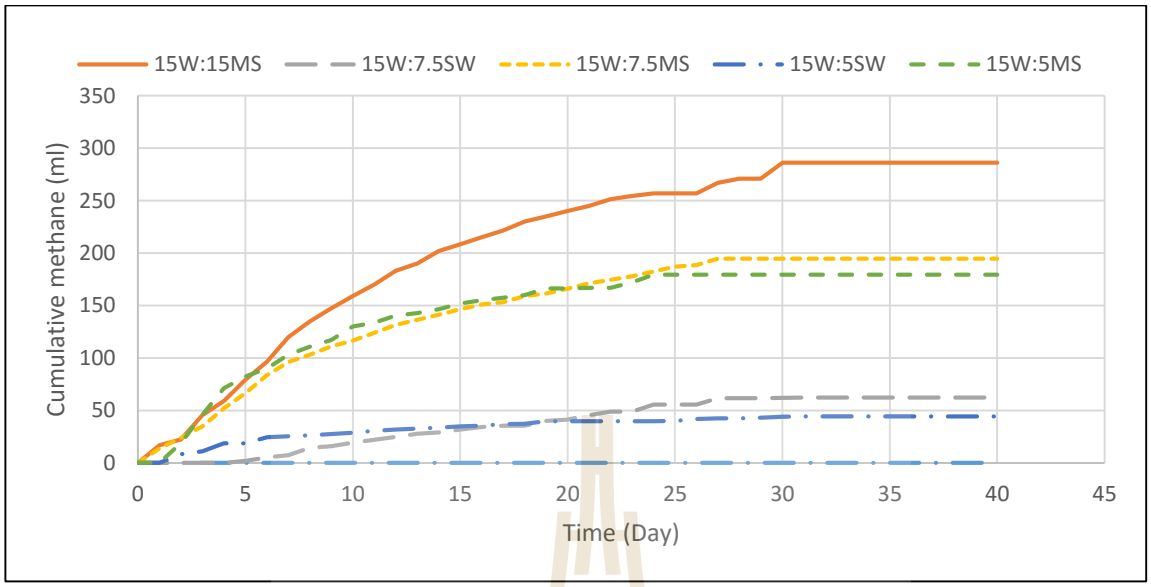
จากผลการทดลองเฉพาะวัสดุหมักชนิดเดียวเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของอรรถวิโรจน์ เขียวนาค (2553) ซึ่งทำการทดลอง BMP เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อกุ้ง พบว่า มีค่าการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าเมื่อใช้วัสดุหมักเพียงชนิดเดียว ในอัตราส่วนที่ 15W:15SW ที่ไม่ให้การผลิตก๊าซชีวภาพเลย สาเหตุเนื่องมาจาก อัตราส่วนของวัสดุหมักและค่าพีเอชในระบบ ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน ทำให้ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยคาดว่าค่าพีเอชมีค่าสูงกว่าที่จุลินทรีย์จะสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ และนอกจากนี้แล้ววัสดุหมักที่ใช้ในการทดลองมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากสูง ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบได้หมด



รูปที่ 3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่อัตราส่วนต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน ที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน



รูปที่ 3.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่อัตราส่วนต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน



รูปที่ 3.5 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่อัตราส่วนต่างๆ ในการทดลอง BMP ที่สภาวะมาตรฐาน

เมื่อพิจารณาการหมักร่วมระหว่างของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและฟางข้าว พบว่า การหมักวัสดุร่วมมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทนและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักด้วยวัสดุหมักจากของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งอย่างเดียว ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการผสมฟางข้าวจะช่วยเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ในระบบหมักสูงกว่า เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนที่สามารถนำมาย่อยสลายเพื่อใช้เป็นสารอาหารสำหรับสร้างเซลล์ใหม่ โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของฟางข้าวมีค่ามากกว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของของเสียที่ได้จากฟาร์มกุ้ง แสดงว่าการผสมฟางข้าวลงไปช่วยปรับอัตราส่วนปริมาณสารอาหารให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นปริมาณการเติมฟางข้าวจะมีผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทนและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

อัตราส่วน 15W:15MS เป็นอัตราส่วนที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ในระบบมากกว่าและมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรด และชนิดสร้างมีเทนในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนมากที่สุด

ในการทดลองนี้เป็นการเดินระบบแบบแบตซ์ คือ มีการเติมวัสดุหมักเพียงครั้งเดียวตอนเริ่มต้น เมื่อดำเนินการทดลองไป จุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่และผลิตก๊าซชีวภาพทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ในระบบลดลง ดังนั้นอัตราส่วนที่มีสารอินทรีย์น้อย จุลินทรีย์จะย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อใช้สร้างเซลล์ใหม่และเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนได้น้อย สำหรับการเพิ่มปริมาณของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งนั้น พบว่า หากเติมของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งมากกว่า 70 gVS จะทำให้

มีปริมาณสารอินทรีย์ในระบบมากเกินความต้องการของจุลินทรีย์ จึงเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเพิ่มขึ้นในระบบ (นฤมล เซาะกระโทก, 2556) เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนไม่สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดจากจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดที่ผลิตขึ้นในระบบได้ทัน แต่จุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนยังสามารถดำรงชีพอยู่ได้เนื่องจากระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง แต่จะส่งผลกระทบโดยตรงต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนในระบบเป็นเหตุให้สัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพต่ำหรือแทบไม่มี นอกจากนี้แล้วในของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากสูง ทำให้จุลินทรีย์ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายนานและจุลินทรีย์บางส่วนอาจตายไปและการสร้างเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนเกิดช้าส่งผลให้ระบบไม่สมดุล และผลการศึกษาของ El-Mashad and Zhang (2010) ที่ทำการหมักวัสดุร่วมสองชนิด คือ เศษอาหารและมูลสัตว์จะมีค่าสูงกว่าการหมักด้วยมูลสัตว์หรือเศษอาหารอย่างเดียว เช่นเดียวกับการทดลองนี้เมื่อทำการหมักของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและฟางข้าวจะมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งเพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ นฤมล เซาะกระโทก (2556) ที่นำของเสียจากโรงงานปาล์มมาหมักร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง พบว่า การหมักร่วมกันของวัสดุทั้งสองประเภทที่ทุกอัตราส่วนมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักด้วยวัสดุหมักชนิดเดียว

จากการทดลองเพื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน โดยใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งเพียงอย่างเดียวและวัสดุร่วม คือ ฟางข้าวที่อัตราส่วนต่างๆ ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการทดลองพบว่า

1. สภาพแวดล้อมในการทำงานของระบบ เมื่อสิ้นสุดการทดลองระยะเวลา 30 วัน พบว่า ในทุกอัตราส่วนมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.8–7.3 ยกเว้นที่อัตราส่วน 15W:15SW พบว่ามีค่าพีเอช 8.8 ซึ่งเป็นค่าพีเอชที่จุลินทรีย์ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ ทั้งนี้อาจเกิดจากการที่ที่อัตราส่วน 15W:15SW นั้นอาจเกิดแอมโมเนีย (Ammonia) ซึ่งเป็นสารที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์จำพวกโปรตีนที่ประกอบด้วยไนโตรเจน ภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจนเป็นแอมโมเนียไนโตรเจนในปริมาณมาก ซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) หรือ ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) โดยทั้ง แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) นั้นจะทำให้ค่า pH ของระบบสูงขึ้นและจะไปยับยั้งการทำงานและมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่ใช้ย่อยสลายฯ ได้

2. ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ เมื่อสิ้นสุดการทดลองระยะเวลา 30 วัน พบว่า ในทุกอัตราส่วนมีประสิทธิภาพการบำบัด TS อยู่ในช่วงร้อยละ 78-98 และ VS อยู่ในช่วงร้อยละ 70-99

3. อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อสิ้นสุดการทดลองระยะเวลา 30 วัน พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมอยู่ในช่วง 93-580 ml ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมอยู่ในช่วง 49-280 ml องค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 0-48.516 ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.4

4. เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าค่า VS ลดลงอย่างมาก แสดงว่าการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ดี ทำให้สารตั้งต้นถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนด้วยปฏิกิริยา Acetogenesis และ Methanogenesis ตามลำดับ สอดคล้องกับทฤษฎีการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน (กลิ่นประทุม ปัญญาปิง และคณะ, 2555)

ตารางที่ 3.4 ตารางสรุปผลการผลิตก๊าซชีวภาพ (มีเทน) และค่าของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ จากการทดลองหาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน

พารามิเตอร์	**อัตราส่วน**					
	15W:5SW	**15W:7.5SW**	**15W:15SW**	**15W:5MS**	**15W:7.5MS**	**15W:15MS**
ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (ml)	44.25	62.5	0	179.5	194.8	286.3
ก๊าซมีเทน (%)	14.19	16.512	0	31.017	36.994	48.516
%การบำบัด VS (mg/l)	77.18	69.05	97.17	98.47	96.3	99.62
Methane Yield (ml/gVS removal)	1.7	2.8	0	4.8	12.5	28.62
BMP (%)	0.42	0.79	0	1.3	3.6	8.2

สรุปผลจากการทดลองการหมักของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง พบว่า การหมักด้วยของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งเพียงอย่างเดียวแบบไม่ใช้ออกซิเจน ให้อัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ 15W:7.5SW ซึ่งเป็นของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง 70 g มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด เท่ากับ 2.8 ml/g VS $_{removal}$ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัด TS VS และ BMP เท่ากับร้อยละ 79 70 และ 0.79 ตามลำดับ แต่หากเพิ่ม ฟางข้าวเป็นวัสดุหมักร่วมจะเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทนและศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนซึ่งมีค่าสูงกว่าการหมักด้วยของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งเพียงอย่างเดียว โดยที่อัตราส่วน15W:15MS ซึ่งเป็นของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง 70 g และฟางข้าว 2.8 g เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด เท่ากับ 28.62 ml/g VS $_{removal}$ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัด TS, VS และ BMP เท่ากับร้อยละ 98.26 99.62 และ 8.2 ตามลำดับ

3.3 การประเมินทางด้านค่าพลังงานที่ได้จากการใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งเพียงอย่างเดียว และการใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและฟางข้าว

การประเมินทางด้านพลังงานเพื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานที่ได้จากการใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งเพียงอย่างเดียว และการใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและฟางข้าว สามารถคำนวณได้ดังนี้

1. ปริมาณของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง

จากการศึกษาพบว่า ปริมาณของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งขึ้นอยู่กับเกษตรกรที่ทำการประมง แต่จากการทดลองพบว่าปริมาณของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งที่ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดอยู่ที่ 70 g หรือ 0.07 kg จากการศึกษาขนาดของบ่อกุ้งโดยกรมประมง กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พบว่าส่วนใหญ่มีขนาดเฉลี่ย 1-5 ไร่ต่อบ่อ ขนาด 25x50 ตารางเมตร ลึก 1 เมตร ลอกบ่อทุกๆ 2 – 3 เดือน ต่อการเลี้ยงกุ้งหนึ่งรอบ พบว่าปริมาณของเสียที่ลอกต่อบ่อปีละ 625 kg/ปี/บ่อ

2. ปริมาณฟางข้าว

จากการศึกษาของ ดร.กฤษณพงศ์ ศรีพงษ์พันธุ์กุล ผู้อำนวยการศูนย์วิจัยพันธุ์ข้าวพระนครศรีอยุธยา กรมการข้าว พบว่า จากการทำนา 1 ไร่ จะให้ฟางข้าวประมาณ 800 กิโลกรัม และจากการประมาณการในแต่ละปีประเทศไทยมีฟางข้าวและตอซังข้าวไม่น้อยกว่า 50 ล้านตัน แต่จากการทดลองพบว่าปริมาณฟางข้าวที่ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดตามสัดส่วนที่กำหนดอยู่ที่ 2.8 g

3. อัตราส่วนของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและฟางข้าวที่ใช้ในการหมักในระยะเวลา 1 ปี

ของเสียที่ได้จากฟาร์มกุ้งที่เกิดขึ้นทั้งหมด = 625 kg/year (ρ = 2.5 g/l)

= 2,500 m^3/year

ฟางข้าวที่เกิดขึ้นทั้งหมด 800 kg = 800 m^3/year (ρ = 0.463 g/l)

= 1,727.86 m^3/year

สำหรับงานวิจัยนี้ พบว่า อัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง 0.07 kg และฟางข้าว 0.028 kg

ดังนั้น ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง 0.07 kg ใช้ฟางข้าว 0.028 kg

ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้ง 2,500 m^3/year ใช้ฟางข้าว $\frac{2500\ (m^3/year) \times 0.028 kg}{0.07\ kg}$

ดังนั้นใช้ฟางข้าวทั้งหมด 1,000 m^3/year

4. ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการหมักในระยะเวลา 1 ปี

จากปริมาณการใช้ของเสียจากฟาร์มกุ้งและฟางข้าวที่คำนวณได้ในขั้นตอนที่ 3 เมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพที่จะเกิดขึ้นได้ในระยะเวลา 1 ปี โดยเทียบกับปริมาณการผลิตและให้ก๊าซมีเทน (Methane yield) ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ พบว่าที่อัตราส่วนผสมต่างๆ จะมีการผลิตก๊าซชีวภาพที่สภาวะมาตรฐานดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในระยะเวลา 1 ปีในแต่ละสัดส่วนผสมที่ได้จากการทดลองที่สภาวะมาตรฐาน

พารามิเตอร์	**อัตราส่วน**					
	15W:5SW	**15W:7.5SW**	**15W:15SW**	**15W:5MS**	**15W:7.5MS**	**15W:15MS**
Methane Yield (ml/g VS removal)	1.7	2.8	0	4.8	12.5	28.62
ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมัก (m^3/year)	4,250	7,000	0	20,294	52,848	121,001

3.4 การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทน

ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาทดแทนใช้เป็นพลังงานความร้อนได้ โดยก๊าซชีวภาพ 1.0 m^3 เทียบเท่าพลังงานความร้อน 39.4 MJ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555) เทียบเท่าพลังงานไฟฟ้า 1.20 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และเทียบเท่าก๊าซ LPG ได้ 0.46 กิโลกรัม (เครือข่ายสารสนเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย, 2550) ถ้าก๊าซ LPG หนึ่งถังขนาด 15 กิโลกรัม ราคา 390 บาท/ถัง สามารถใช้ประกอบอาหารต่อหนึ่งครัวเรือน (3 – 6 คนต่อหนึ่งครัวเรือน) โดยเฉลี่ยประมาณ 3 เดือน (ชิตชนก คงแดง, 2554) หากนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการทดลองมาแทนพลังงานความร้อนจะมีค่าดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 การนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในระยะเวลา 1 ปี จากการทดลองที่สภาวะมาตรฐานมาเป็นพลังงานทดแทน

พารามิเตอร์	อัตราส่วน					
	15W:5SW	15W:7.5SW	15W:15SW	15W:5MS	15W:7.5MS	15W:15MS
ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมัก (m^3/year)	4,250	7,000	0	20,294	52,848	121,001
พลังงานความร้อน (MJ/year)	$1.67x10^5$	$2.75x10^5$	0	$7.99x10^5$	$2.82x10^6$	$4.76x10^6$

ตัวอย่างการคำนวณ

ก๊าซชีวภาพ 1.0 m^3 เทียบเท่าพลังงานความร้อน 39.4 MJ

ก๊าซชีวภาพ 4,250m^3/year เทียบเท่าพลังงานความร้อน 39.4 MJx4,250 m^3/year

ดังนั้นสามารถเปลี่ยนเป็นค่าพลังงานความร้อน = $1.67x10^5$MJ/year

จากการประเมินทางด้านพลังงานพบว่า การหมักด้วยของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งเพียงอย่างเดียวนั้นที่อัตราส่วนที่ดีที่สุด 15W:7.5SW สามารถเปลี่ยนก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานความร้อนได้ $2.75x10^5$MJ/year พบว่าปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นโดยของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งเพียงอย่างเดียวนั้นให้พลังงานค่อนข้างต่ำ แต่ถ้าหากใส่ฟางข้าวลงไป จะช่วยเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานความร้อนได้ $4.76x10^6$MJ/year ซึ่งการประเมินในด้านพลังงาน จะให้พลังงานความร้อนได้มากกว่าการหมักด้วยของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งเพียงอย่างเดียวประมาณ 17 เท่า เมื่อพิจารณาไปที่ต้นทุนการผลิตพบว่า วัสดุหมักทั้งสองชนิดไม่มีต้นทุนหรืออาจมีต้นทุนเพียงเล็กน้อยเนื่องจากเป็นของเหลือใช้ที่ได้จากการทำเกษตรกรรม นอกจากนี้แล้วสามารถนำพลังงานความร้อนที่ได้จากการทดลองไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาหุงต้มในครัวเรือน เชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำในโรงงานผลิตอาหารสัตว์ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้งและใช้กับเครื่องกกลูกสุกร เป็นต้น (ชิตชนก คงแดง, 2554)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

4.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองเพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งร่วมกับฟางข้าวและเชื้อจุลินทรีย์จากโรงงานอุตสาหกรรมมันสำปะหลัง โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งเป็นการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน โดยใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งร่วมกับฟางข้าวและเชื้อจุลินทรีย์จากโรงงานอุตสาหกรรมมันสำปะหลังที่อัตราส่วนต่างๆ ที่ระยะเวลากักเก็บ 30 วัน สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

1. ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนโดยใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งร่วมกับฟางข้าวสูงกว่าการหมักโดยใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งเพียงอย่างเดียว พบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งปริมาณ 70 g หมักร่วมกับฟางข้าว 2.8 g หมักแบบไร้ออกซิเจนที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด เท่ากับ 28.62 ml/g $VS_{removal}$ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ปริมาณของของแข็งที่ระเหยได้ (VS) และมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวภาพ (BMP) เท่ากับร้อยละ 98.26 99.62 และ 8.2 ตามลำดับ

2. การประเมินทางด้านพลังงานพบว่าการหมักโดยใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งร่วมกับฟางข้าวสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานความร้อนได้ $4.76x10^{6}$MJ/year ส่วนการหมักโดยใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งเพียงอย่างเดียว สามารถเปลี่ยนก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานความร้อนได้ $2.75x10^{5}$MJ/year ซึ่งจากการประเมินทางด้านพลังงานของการหมักโดยใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งร่วมกับฟางข้าวสามารถเปลี่ยนก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นพลังงานความร้อนได้มากกว่าการหมักโดยใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งเพียงอย่างเดียวประมาณ 17 เท่า

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการทดลองพบว่าการใช้ของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งร่วมกับฟางข้าวสามารถเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้ จึงควรมีการนำของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งหมักร่วมกับวัสดุอื่นๆ ที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) เป็นองค์ประกอบสูง เช่น แกลบ ซึ่งมีค่า C/N ประมาณ 110-130 (norganics.com/applications/cnratio.pdf) กระดาษ ซึ่งมีค่า C/N ประมาณ 173 หรือขี้เลื่อยจากโรงเลื่อย ซึ่งมีค่า C/N ประมาณ 511 (Chandra *et al.,* 2012b) นำมาผสมเพื่อช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุหมักให้มีความเหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพและเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของวัสดุหมักร่วมได้เพิ่มขึ้น

แต่อย่างไรก็ตามในการทดลองควรมีการตรวจวัดค่าส่วนประกอบ C H และ N ของแต่ละตัวอย่างที่จะใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพเสียก่อน โดยเฉพาะค่าของไนโตรเจนซึ่งอาจจะทำให้เกิดแอมโมเนีย (Ammonia) ซึ่งเป็นสารที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์จำพวกโปรตีนที่ประกอบด้วยไนโตรเจน ภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจนเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) หรือ ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) โดยทั้ง แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) นั้นจะทำให้ค่า pH ของระบบสูงขึ้นและจะไปยับยั้งการทำงานและมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่ใช้ย่อยสลายฯ ได้

2. การนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต ควรมีการพัฒนาการทดลองเป็นระบบบำบัดระดับโรงงานนำร่อง (Pilot plant) โดยนำผลของสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมของการศึกษานี้ ไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงาน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

กฤษณพงศ์ ศรีพงษ์พันธุ์กุล. ปุ๋ยอินทรีย์จากฟางข้าว. http://www.gardencenter.co.th / thai/love_suan /kasat= 4.php (สืบค้นเมื่อวันที่ 21 มกราคม 2558)

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2555). พลังงานก๊าซชีวภาพ www.dede.go.th. (สืบค้นเมื่อวันที่ 15 กันยายน 2557)

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. (2553). คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบการผลิตการควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักงานเทคโนโลยีความปลอดภัย

กลิ่นประทุม ปัญญาปิง, วรวุธ กันอิน, สรานุรักษ์ แสนพรหม และเอกราช คำปัญโญ. (2555). ศักยภาพการย่อยสลายให้ก๊าซมีเทนจากเศษก้านและใบไม้หลายชนิด. Journal of Community Development Research ปีที่ 5 (1) : หน้า 64-73.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. (2543). วิศวกรรมการกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 4. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: มิตรนราการพิมพ์

เครือข่ายสารสนเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย (2550). ทฤษฎีแก๊สชีวภาพ. http://teenrt.chiamgmai.ac.th.htm. (สืบค้นเมื่อ 26 พฤศจิกายน 2557)

จิรวัฒน์ ชาลีวรรณ. (2546). ผลของระยะเวลาเก็บกักต่อการเกิดก๊าซชีวภาพในการหมักแบบไร้ออกซิเจนอัตราการย่อยสูงของวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมผลไม้บรรจุกระป๋อง. วิศวกรรมศาสตร-มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ชิตชนก คงแดง. (2554). การผลิตก๊าซชีวภาพจากใบยางพาราโดยการหมักร่วมกับมูลสุกรสำหรับใช้ในครัวเรือน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 119 หน้า

นฤมล เซาะกระโทก. (2556). การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนดีแคนเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารแช่แข็ง. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร-มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 143 หน้า

สุภกิจ ดีโสภา. (2545). การศึกษาสมรรถนะการหมักมูลฝอยชุมชนแบบไร้ออกซิเจนชนิดสองขั้นตอนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของถังสร้างกรดต่างกัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สุรพล สายพานิช. (2540). การศึกษากระบวนการคอนแทกต์สเตบิไลเซชันไร้อากาศแบบกวนสมบูรณ์. สถาบันวิจัยและพัฒนาคณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรรถวิโรจน์ เขียวนาค. (2553). แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนเลนในบ่อกุ้งโดยวิธีการระบุเอกลักษณ์. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

อุดมผล พืชน์ไพบูลย์. (2551). เทคนิคการวิเคราะห์น้ำ น้ำเสียและขยะมูลฝอย. เทคโนโลยีการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Ahn, J.H., and Forster, C.F. (2002). The effect of temperature variations on the performance of mesophilic and thermophilic anaerobic filters treating a simulated papermill wastewater. Process Biochemistry 37: p. 589-594

Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenick, P., and van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. Water Science and Technology-WST59.5: p. 927-934.

Brown, N.L. and Tata, T.B.S. (1985). Biomethanation. ENSIC Review No. 17/18. Environmental Sanitation Information Center, Asian Institute of Technology, Bangkok.

Chandra, R., Takeuchi, H., Hasegawa, T., and Kumar R. (2012a). Improving biodegradability and biogas production of wheat straw substrates using sodium hydroxide and hydrothermal pretreatments. Energy 43: p. 273-282.

Chandra, R., Takeuchi, H., and Hasegawa, T. (2012b). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews 16: p. 1462-1476.

Dechrugsa, S., Kantachote, D., and Chaiprapat, S. (2013). Effects of inoculum to substrate ratio, substrate mix ratio and inoculum source on batch co-digestion of grass and pig manure. Bioresource Technology 146: p. 101-108.

Diaz, L.F., Savage, G.M., Eggerth, L.L., and Golueke, C.G. (1993). Composting and recycling municipal solid waste. Lewis publishers. New York.

Dieter, D. and Angelika, S. (2008). Biogas from Waste and Renewable Resources. 1st ed. Wiley-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA.

El-Mashad, H. M., and Zhang, R. (2010). Biogas production from co-digestion of diary manure and food waste. Bioresource Technology 101: p. 4021-4028.

Eskicioglu C., Kennedy K. J., Marin J., and Strehler B. (2011). Anaerobic digestion of whole stillage from dry-corn ethanol plant under mesophilic and thermophilic conditions. Bioresour. Technol. 102: p. 1076-1086.

Esposito, G, Frunzo, L., Liotta, F., Panico, A., and Pirozzi. F. (2012). Bio-Methane Potential tests to measure the biogas production from the digestion and co-digestion of complex organic substrates. The Open Environmental Engineering Journal 5: p. 1-8.

Grady, C.P.L. Jr., Daigger G.T. and Lim H.C. (1999). Biological wastewater treatment. 2nd Ed. Marcel Dekker Inc. New York.

Gray, N.F. (1989).Biology of wastewater treatment. New York. Oxford University Press.

Halbert, E.J. (1981). Process operation and monitoring; C poison and inhibitors. Proceeding of the 1st ASEAN Seminar Workshop on Biogas Technology, ASEAN Committee on Science and Technology Manila. Phillipines: p. 369-385

Hayes, T.P., and Theis, T.L. (1978). The distribution of heavy metals in aerobic digestion. Wat. Poll. Control Fed 50 (1): p. 307-313

Izarail, S., and Mathai P.K. (2006). Wastewater sludge processing. 1st ed. USA.: John Wiley & Sons Inc.

John, G.H., Noel, R.K., Peter, H.A.S., James, T.S. and Stanley, T.W. (1994). Bergey's manual of determinative bacteria. 9th Ed. New York. William and Wilkins.

Kafle, G. K., Bhattarai, S., Kim, S.H., and Chen. L. (2014). Effect of feed to microbe ratios on anaerobic digestion of Chinese cabbage waste under mesophilic and thermophilic conditions: Biogas potential and kinetic study. Journal of Environmental Management 133: p. 293-301.

Lui, G., Zhang, R., El-Mashad, H., and Dong, R. (2009). Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes. Bioresource Technology 100: p. 5103-5108.

Mahendra, K.J., Zeikus, J.G., and Bhatnagar, L. (1991). Methanogen. In Levett, P. N., ed. Anaerobic Microbiology. Oxford University, New York: p. 226-246.

Marchaim, U. and Krause, C. (1993). Propionic to acetic acid ratios in overloaded anaerobic digestion.

Bioresourece Technology 43: p. 195-203

Macleod, F.A., Guiot, S.R., Costeron, J.W. (1990). Layered structure and bacterial aggregates produced in an upflow anaerobic sludge bed and filter reactor. Appl. Environ. Microbial. 55(6): p. 1589-1607

McCarty, P.L. (1964). Anaerobic waste treatment fundamental part I, II, III and IV. Process Design. Journal Public Works. 95 p.

Metcalf and Eddy (2004). Treatment disposal and reuse. Wastewater Engineering. 4th Ed. McGraw-Hill Inc.

Osman, N.A., and Delia, T.S. (2005). Effect of alkalinity on a performance of a simulated landfill bioreactor digesting organic solid wastes. Chemosphere 59: p. 871-879

Pagilla, K.R., Kim, H. and Cheunbarn, T. (2000). Anaerobic thermophilic and anaerobic mesophilic treatment of wine waste. Wat. Res. 34(10): p. 2747-2753

Price, E.C., and Cheremisinoff, P.N. (1981). Biogas: production and utilization. Ann Arbor Science.

Rajeshwari, K.V., Barakrishnan, M., Kansal, A., Lata, K. and Kishore, V.V.N. (2000). State of the art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. Renew. Sustain. Energy Rev.4: p. 135-156

Rao, M.S., Singh, S.P. and Sodha, M.S. (2000). Bioenergy conversion studied of the organic fraction of MSW: Assessment of ultimate bioenergy production potential of municipal garbage. Applied Energy 66: p. 75-87

Raposo, F., Borja, R., Banks, C. J., and Siegert, I. (2006). Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch test. Process Biochemistry 41: p. 1440-1450.

Salminen, E.A., and Rintala, J.A. (2002). Semi-continuous anaerobic digestion of solid poultry Slaughterhouse waste: effect of hydraulic retention time and loading. Wat. Res.: p. 1-8

Sastry, C.A. and Vickineswati, S. (1995). Anaerobic Waste Treatment Plants. In Waste Treatment Plants. Edited by Sastry, C.A., Hashim, M.A., and Agamothu, P., New Delhi, Norosa Publishing House.

Shanmugam, P. and Horan, N.J. (2009). Simple and rapid method to evaluate methane potential and biomass yield for a range of mixed solid waste. Bioresource Technology 100: p. 471-474

Singh, R., Mandal, S. K., and Jain, V. K. (2010). Development of mixed inoculum for methane enriched

biogas production. Indian Journal Microbiol (October 2010) 50 (Suppl 1): p. 26-33.

Sterling, M.C. Jr., Lacey, R.E., Engler, C.R. and Ricke, S.C. (2001). Effect of ammonia nitrogen on H_2 and Ch_4 during anaerobic digestion of daily cattle manure. Bioresource Technology 77: p. 9-18

Sung, S. and Lui, T. (2003). Ammonia inhibition on thermophilic anaerobic digestion. Chemosphere: p. 1-10.

Tchobonoglous, G. and Burton, F.L. (1991). Disposal and reuse. Wastewater Engineering Treatment. McGraw Hill Inc. New York.

Teodorita, A.S. et al. (2008). Biogas Handbook. Esbjerk: University of Southern Denmark Esbjerk.

Wen, C., Huang, X. and Qian, Y. (1999). Domestic wastewater treatment using an anaerobic bioreactor coupled with membrane filtration. Process Biochemistry 35: p. 335-340.

Wong, M.H. and Cheung, Y.H. (195). Gas production and digestion efficiency of sewage sludge containing elevated toxic metals. Bioresources Technology 54: p. 261-268.

Yen, H.D. and Brune, D.E. (2007). Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane. Bioresource Technology 98(8): p. 130-134

Zupancic, G.D. and Ros, M. (2003). Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion. Renewable Energy 28: p. 2255-2267

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้วิจัย

นายอัฆพรรค์ วรรณโกมล เกิดเมื่อวันที่ 30 กันยายน 2515 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาขั้นปริญญาตรีสาขาธรณีวิทยา จากภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ขั้นปริญญาโทสาขาวิศวกรรมปิโตรเลียม จากภาควิชาวิศวกรรมเหมืองแร่และปิโตรเลียม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขั้นปริญญาเอก สาขาธรณีวิทยา จากภาควิชาธรณีวิทยา มหาวิทยาลัย Free University ประเทศสหพันธรัฐเยอรมัน ปัจจุบันเป็นอาจารย์และเป็นผู้ช่วยศาสตราจารย์ในสาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเลียม ประจำสาขาวิชาเทคโนโลยีธรณี สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี