

การพัฒนาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างโดยใช้หัวเชื้อกากตะกอนจากกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2566

การพัฒนาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างโดยใช้หัวเชื้อกากตะกอนจากกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาระบบสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การพัฒนาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างโดยใช้หัวเชื้อจากตะกอนจากกระบวนการ
หมักย่อยแบบไร้อากาศ

ญาณิกา บุญยวง

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติกร สาสุจิตต์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.ภคมน ปินตานา)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.ชยานนท์ สวัสดิ์นฤนาท)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างโดยใช้หัวเชื้อกากตะกอนจากระบบการหมักย่อยแบบไร้อากาศ
ชื่อผู้เขียน	นางสาวญาณิกา บุญยวง
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรณ นิรัญศิลป์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากมูลช้างโดยใช้หัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 4 ชนิด ได้แก่ กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค (ADCM) กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกร (ADPM) กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร (ADFW) และกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ (ADCHM) ซึ่งอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ (S:I) เท่ากับ 1:2, 1:1 และ 2:1 gVS_{added} ควบคุมอุณหภูมิ 35 ± 2 °C โดยงานวิจัยครั้งนี้ศึกษา (1) คุณสมบัติของวัตถุดิบมูลช้างที่ใช้ในการทดลอง (2) คุณสมบัติของหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง (3) ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการแบบกะ ขนาด 1000 mL (4) ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศใน ขนาด 30 L แบบกึ่งต่อเนื่อง ผลจากการทดลองพบว่า การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศที่ S:I เท่ากับ 2:1 มีความเหมาะสมที่สุด โดยวัตถุดิบมูลช้างร่วมกับหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกร แสดงการผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่มีค่าสูงเท่ากับ 775.91 NmL/ gVS_{added} และมีค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงถึง 57% ตามด้วย วัตถุดิบมูลช้างร่วมกับหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค เศษอาหารและมูลไก่ ที่สามารถผลิตก๊าซมีเทนสะสมได้ 430.32, 790.02 และ 208.00 NmL/ gVS_{added} ตามลำดับ มีค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุดถึง 48, 48.50 และ 27.20% ตามลำดับ ในระยะเวลาการทดลอง 60 days นอกจากนี้ ยังพบว่าประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพแบบเติมกึ่งต่อเนื่องในระบบขนาด 30 L โดยหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรที่อัตราส่วน 2:1 พบว่า การหมัก แบบเติมกึ่งต่อเนื่องให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกับแบบกะ โดยให้ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเท่ากับ 54.56% อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์ 1,580.44 NL/kg VS_{added} ดังนั้นวัตถุดิบมูลช้างที่ทำการหมักด้วยหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนทั้งแบบกะและแบบเติมกึ่งต่อเนื่อง ผลงานวิจัยนี้ถือเป็นแนวทางเลือกหนึ่งในการจัดการและใช้ประโยชน์จากมูลช้าง รวมถึงแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของหัว

เชื้ออากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ผ่านการบำบัดในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศในการ
ย่อยสลายมูลช้างให้อยู่ในรูปแบบของก๊าซชีวภาพที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและยังเป็นพลังงานที่ยั่งยืน

คำสำคัญ : การหมักย่อยแบบไร้อากาศ, มูลช้าง, ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน, หัวเชื้ออากตะกอนจาก
ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ



Title	DEVELOPMENT OF BIOGAS PRODUCTION FROM ELEPHANT DUNG BY USING ANAEROBICAL DIGESTATE AS INOCULUM
Author	Miss Yainka Boonyuang
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Rotjapun Nirunsin

ABSTRACT

This research studies the methane potentials of elephant dung (ED) using 4 different anaerobically digested organic materials, including cattle manure (ADCM), pig Mnure (ADPM), food waste (ADFW), and chicken manure (ADCHM) as inoculums. In addition, the substrate-to-inoculum ratios (S:I) were set as 1:1, 1:2, and 2:1 (based on VS), and the operating temperature was controlled at 35 ± 2 °C. The purposes of this research are to (1) determine the characteristics of the collected elephant dung, (2) examine the characteristics of all inoculums used in this study, (3) perform the laboratory-scaled anaerobic digestion (AD) operated in batch mode, (4) perform the bench-scaled anaerobic digestion operated in semicontinuous mode using 30L-bioreactor. The results indicated that during 60 days of experiments, the most appropriate S:I of AD of ED was 2:1, and the batch using ADPM as inoculum presented the highest methane yield of 775.91 NmL/gVS_{added} following by ADCM, ADFW, and ADCHM, respectively. The methane content also followed the same trend as methane yield. The maximum methane content from ADPM was high, as 57% following by ADCM, ADFW, and ADCHM at 48, 48.50, and 27.20%, respectively. For the semicontinuous experiment in the 30-L bioreactor using ADPM as an inoculum, it was found that the biogas production efficiency is similar to that of the batch experiment with an average methane content of 54.56% and average methane yield of 1,580.44 NL/kg VS_{added}. Thus, both reactor operation modes could be used for AD of ED. Finally, the information from this research could be an alternative for

managing and valorizing ED. In addition, using anaerobically digested animal manures and organic material as effective inoculums for AD of ED could simultaneously produce environmentally friendly and renewable gaseous fuel (i.e., biogas).

Keywords : Anaerobic digestion, Elephant dung, Biochemical methane potential, Anaerobical digastate as inoculum



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงผ่านไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุน และได้รับความร่วมมือ คำชี้แนะ และแนวทางการแก้ปัญหาเป็นอย่างดีจากบุคคลหลาย ๆ ท่านดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรธม นิธิฤทธิศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติกร สาสุจิตต์ อาจารย์ ดร.ภคมน ปินตนา และ อาจารย์ ดร.ชยานนท์ สวัสดิ์ดินถนาท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษารวมทั้งให้กำลังใจในการทำเล่มวิทยานิพนธ์ตลอดมา อีกทั้งยังช่วยตรวจทาน แก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤกษ์ อักกะรังสี ประธานกรรมการสอบ ที่ได้ให้เกียรติมาเป็นประธานการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่รวมถึงเครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ การศึกษาในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากวิทยาลัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ "โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา" ประจำปี 2564 ขอขอบพระคุณ ทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ "ทุนศิษย์ก้นกุฏิ" ประจำปี 2564 และขอขอบพระคุณ ทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่งบประมาณด้านวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมประเภททุนสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2566

ท้ายที่สุดนี้ต้องขอขอบคุณครอบครัวที่ได้ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนพี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ ที่มีส่วนช่วยเหลือและเป็นกำลังใจทำให้การทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ญาณิกา บุญยวง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
อักษรย่อและสัญลักษณ์.....	1
บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญ.....	2
วัตถุประสงค์.....	5
ขอบเขตการศึกษา.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร.....	7
ความหมายของก๊าซชีวภาพ.....	7
ขั้นตอนและปฏิกิริยาในการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	9
องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	11
สภาวะแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	12
ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน.....	16
การทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน.....	17
ระบบเทคโนโลยีในการผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ในประเทศไทย.....	18
มุลข้าง.....	21
ตรวจสอบเอกสาร.....	22

บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการวิจัย.....	27
การเตรียมวัตถุดิบ.....	28
วิธีการทดลองระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างขนาด 1,000 mL.....	30
การทดสอบในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างขนาด 30 mL.....	32
อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	35
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์.....	37
คุณสมบัติของวัตถุดิบมูลช้างที่ใช้ในการทดลอง.....	37
คุณสมบัติของหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง.....	38
ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการแบบกะ ขนาด 1,000 mL.....	39
1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง.....	40
2. การบำบัดของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยง่าย.....	42
3. ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) และค่าความเป็นด่าง (Alk) ในระบบการหมักก๊าซชีวภาพ.....	47
4. อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทน และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน.....	53
ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศในขนาด 30 L แบบกึ่งต่อเนื่อง.....	66
1. การบำบัดของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยได้.....	66
2. ค่ากรดไขมันระเหยง่าย และค่าความเป็นด่าง ในระบบการหมักก๊าซชีวภาพ.....	68
3. อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทน และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน.....	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	74
สรุปผลการวิจัย.....	74
ข้อเสนอแนะ.....	76
บรรณานุกรม.....	77
ภาคผนวก.....	84
ภาคผนวก ก ตารางแสดงผลการวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	85

ภาคผนวก ข บทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในระดับชาติและนานาชาติ 93

ประวัติผู้วิจัย..... 110



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ระดับความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย.....	15
ตารางที่ 2 วิธีวิเคราะห์คุณลักษณะของมูลช้าง	29
ตารางที่ 3 คุณลักษณะของวัตถุดิบมูลช้าง.....	38
ตารางที่ 4 คุณลักษณะของกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	38
ตารางที่ 5 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกะ	86



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 สัดส่วนการจัดหาก๊าซธรรมชาติ.....	2
ภาพที่ 2 สัดส่วนการใช้ก๊าซธรรมชาติรายสาขา	3
ภาพที่ 3 วงจรระบบผลิตก๊าซชีวภาพและการนำไปใช้งาน	8
ภาพที่ 4 ขั้นตอนและปฏิกิริยาในการเกิดก๊าซชีวภาพ	9
ภาพที่ 5 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบถังกวนสมบูรณ์ (CSTR).....	20
ภาพที่ 6 มูลช้าง	22
ภาพที่ 7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	27
ภาพที่ 8 มูลช้างผ่านการปรับสภาพ.....	28
ภาพที่ 9 หัวเชื้อกากตะกอนจากระบบการหมักย่อยแบบไร้อากาศ.....	29
ภาพที่ 10 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 1,000 mL.....	30
ภาพที่ 11 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 1,000 mL.....	31
ภาพที่ 12 วิธีวัดปริมาตรและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	31
ภาพที่ 13 แผนภาพระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 30 L.....	32
ภาพที่ 14 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 30 L.....	33
ภาพที่ 15 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบผลของการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ	35
ภาพที่ 16 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. ค่า pH อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. ค่า pH อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. ค่า pH อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1).....	41
ภาพที่ 17 การกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. %TS _{removal} อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. %TS _{removal} อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. %TS _{removal} อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1).....	44

ภาพที่ 18 การกำจัดปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้ออากากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. %VS_{removal} อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. %VS_{removal} อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. %VS_{removal} อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1)..... 46

ภาพที่ 19 ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้ออากากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. ค่า VFA อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. ค่า VFA อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. ค่า VFA อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1) 48

ภาพที่ 20 ค่าความเป็นด่าง (Alk) ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้ออากากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. ค่า Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. ค่า Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. ค่า Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1)..... 50

ภาพที่ 21 ค่า VFA/Alk ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้ออากากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. ค่า VFA/Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. ค่า VFA/Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. ค่า VFA/Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1)..... 52

ภาพที่ 22 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นรายวันในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศจากวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้ออากากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1) 54

ภาพที่ 23 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศจากวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้ออากากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1) 57

ภาพที่ 24 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศจากวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้ออากากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1) 60

ภาพที่ 25 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศจากวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้ออากากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1) 62

ภาพที่ 26 ปริมาณความเข้มข้นก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศจากวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้ออากากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1) 65

ภาพที่ 27 แสดงปริมาณการกำจัดของแข็งทั้งหมด (%TS) ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง67

ภาพที่ 28 แสดงปริมาณการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (%VS) ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง.....	68
ภาพที่ 29 แสดงปริมาณค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง....	69
ภาพที่ 30 แสดงปริมาณค่าความเป็นด่าง (ALK) ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง	70
ภาพที่ 31 แสดงปริมาณค่า VFA/ALK ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง	70
ภาพที่ 32 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นรายวันในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง	71
ภาพที่ 33 ค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง.....	72
ภาพที่ 34 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นรายวันในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง.....	72
ภาพที่ 35 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง	73



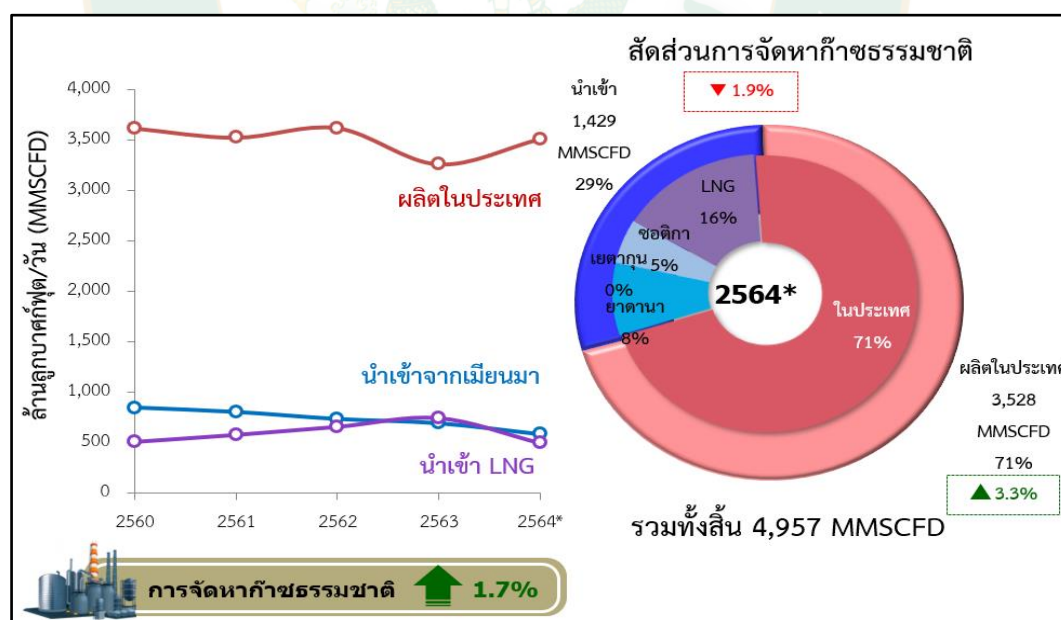
อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
COD	ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการ ย่อยสลายสารอินทรีย์	mg/L
HRT	ระยะเวลาในการกักเก็บของเหลว	day
BOD	ปริมาณการใช้ออกซิเจนในการย่อยสลาย สารอินทรีย์	mg/L
pH	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	-
TS	ของแข็งทั้งหมด	mg/L
VS	ของแข็งระเหย	mg/L
VFA	ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย	mg CH ₃ COOH/L
Alk	ค่าความเป็นด่าง	mg CaCO ₃ /L
C/N ratio	สัดส่วนระหว่าง คาร์บอน (C) ต่อ ไนโตรเจน (N)	-
ADPM	กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกร	-
ADCM	กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค	-
ADCHM	กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่	-
ADFW	กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษ อาหาร	-
S/I ratio	อัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบหลักต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์	gVS _{added}

บทที่ 1

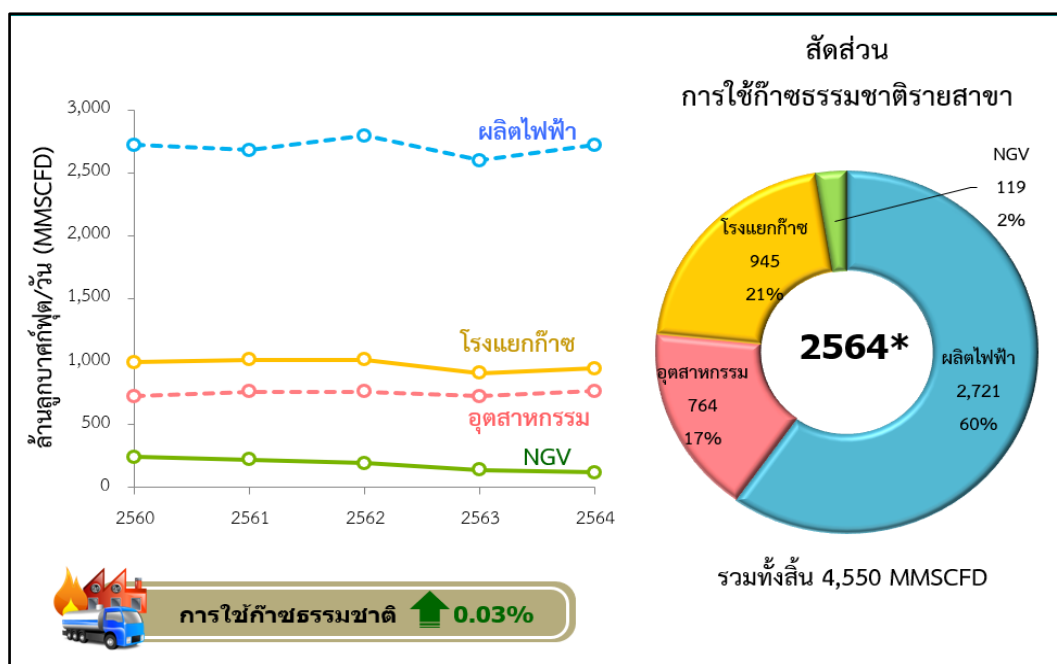
ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันโลกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว มีจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นและมีมาตรฐานความเป็นอยู่ที่สูงขึ้น ส่งผลให้มีความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น เพื่อใช้ในการดำเนินชีวิตและพัฒนาขยายตัวในด้านต่าง ๆ ได้แก่ ด้านเศรษฐกิจ ด้านสังคม และด้านวัฒนธรรม ขณะเดียวกันพลังงานที่โลกต้องการเพิ่มขึ้นนั้น ต้องส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด เพื่อเป็นการยับยั้งการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบเป็นวงกว้าง ในหลายประเทศจึงมีการออกนโยบายด้านการใช้พลังงาน รวมทั้งมีการศึกษาค้นคว้าหาพลังงานจากแหล่งที่มีคาร์บอนต่ำ ศึกษาเทคโนโลยีและนวัตกรรมที่ช่วยให้พลังงานสะอาดขึ้นและมีปริมาณมากขึ้น ในส่วนของประเทศไทยเองมีการประเมินและตรวจสอบการใช้พลังงานภายในประเทศ จากการศึกษาที่รัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานทดแทนในประเทศเพิ่มมากขึ้น พบว่าในปี พ.ศ. 2564 ช่วงเดือนมกราคมจนถึงเมษายนมีสัดส่วนการจัดการกาก๊าซธรรมชาติเพิ่มขึ้น 1.7% โดยมีสัดส่วนการนำเข้าก๊าซธรรมชาติจากต่างประเทศลดลง 1.9% ที่ตรงข้ามกับปริมาณการผลิตเองในประเทศที่เพิ่มขึ้น 3.3% และยังพบว่าในช่วง 2 เดือนนี้มีการใช้ก๊าซธรรมชาติรายสาขาต่าง ๆ เพิ่มขึ้น 0.03% (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน, 2564) ดังแสดงในภาพที่ 1 และภาพที่ 2



ภาพที่ 1 สัดส่วนการจัดการกาก๊าซธรรมชาติ

ที่มา : สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (2564)



ภาพที่ 2 สัดส่วนการใช้ก๊าซธรรมชาติรายสาขา

ที่มา : สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (2564)

จากสถานการณ์การใช้พลังงานและความต้องการใช้พลังงานหลักฟอสซิลที่เพิ่มสูงขึ้น โดยเฉพาะเชื้อเพลิงหลัก 3 ชนิด คือ น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน ซึ่งในปัจจุบันพลังงานเหล่านี้มีปริมาณที่ลดลงอย่างต่อเนื่อง (กระทรวงพลังงาน, 2563) จึงต้องมีการจัดหาพลังงานทดแทนแหล่งใหม่หรือพลังงานที่มีอยู่ในธรรมชาติอย่างไม่จำกัด เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานชีวมวล และพลังงานชีวภาพ เป็นต้น (กระทรวงพลังงาน, 2563) พลังงานทดแทนหรือพลังงานทางเลือกเป็นทางเลือกหนึ่งที่หลายประเทศให้ความสนใจ โดยพลังงานชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนประเภทหนึ่งที่ประเทศไทยมีนโยบายให้มีการส่งเสริมการผลิต เพื่อใช้ทดแทนพลังงานหลักฟอสซิล เนื่องจากพลังงานชีวภาพหรือก๊าซชีวภาพสามารถผลิตได้จากของเหลือทิ้งทางการเกษตร ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เศษอาหาร และมูลสัตว์ เป็นต้น ซึ่งนอกจากจะทำให้เกิดกระบวนการสร้างพลังงานขึ้นมาใช้งานแล้ว ยังเป็นการแก้ไขปัญหาจำนวนของขยะที่มีมากเกินไปและเป็นวิธีการกำจัดของเสียได้ดีและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก (กลิ่นประทุม ปัญญาปิง, 2563) โดยพลังงานชีวภาพผลิตได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยแบคทีเรียภายใต้สภาวะไร้อากาศ ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ ในการนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อการผลิตไฟฟ้าและความร้อน รวมทั้งเป็นเชื้อเพลิงที่ใช้ในการหุงต้มอาหารใน

คร่าวเรือนหรือเป็นก๊าซเชื้อเพลิงสำหรับใช้ในเครื่องยนต์ ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับก๊าซธรรมชาติ จากการสำรวจและรายงานในต้นปี 2562 ที่ผ่านมาปางช้างในเขตภาคเหนือของประเทศไทยได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการท่องเที่ยวทำให้เศรษฐกิจของชุมชนดีขึ้น และจากรายงานของการท่องเที่ยวภายในประเทศไทย พบว่าจำนวนประชากรช้างเลี้ยงในประเทศไทยมีประมาณมากกว่า 2,700 เชือก โดยมากกว่าสามในสี่ พบว่าอยู่ในพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย โดยเฉพาะจังหวัดเชียงใหม่ ที่มีปางช้างจำนวน 9 ปาง เช่น ปางช้างแม่แตง ปางช้างกีดช้าง ปางช้างแม่แตงมาน เป็นต้น (สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม, 2562) โดยในแต่ละวันปางช้างจะมีปริมาณเศษวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมากซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยมูลช้างเป็นหลัก เนื่องจากช้างจะถ่ายมูลประมาณ 30 kg ซึ่งองค์ประกอบหลักของมูลช้างมีประเภทลิกโนเซลลูโลส และสารอินทรีย์ในปริมาณที่สูง ดังนั้นมูลช้าง (Elephant Dung, ED) ที่ขับถ่ายออกมาเฉพาะเขตพื้นที่ภาคเหนือสามารถผลิตได้มากกว่า 61 ton/days และอาจเป็นหนึ่งในต้นเหตุของมลพิษประเภทต่าง ๆ ที่ส่งผลโดยตรงต่อสิ่งแวดล้อม (Chayanon et al., 2021) อย่างเช่นปัญหาด้านกลิ่น และปัญหาของหมอกควัน ที่เกิดจากการนำมูลช้างบางส่วนมาทำการเผาทำให้เกิดหมอกควันปกคลุมในพื้นที่ ซึ่งชุมชนอาจได้รับผลกระทบในเรื่องสุขภาพอีกด้วย

จากข้อมูลดังกล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับเศษวัสดุเหลือจากปางช้างซึ่งใช้วัตถุดิบมูลช้างเป็นหลัก โดยนำมูลช้างมาผลิตก๊าซชีวภาพด้วยเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศแบบกะ และมีการใช้หัวเชื้อที่แตกต่างกัน 4 ชนิด ได้แก่ กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลไก่ และกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลเศษอาหาร เนื่องจากหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเป็นหัวเชื้อมีจุลินทรีย์ที่มีความคงตัวทางชีวภาพในกรณีที่ไม่ใช้อากาศและมีทำการย่อยสลายอาหารที่มีลักษณะใกล้เคียงกับมูลช้างที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นลิกโนเซลลูโลส (Dhamodharan et al., 2015) ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 1,000 mL และศึกษาในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน 3 เงื่อนไข เพื่อนำไปขยายผลศึกษาต่อในระบบถังปฏิกรณ์ขนาด 30 L โดยงานวิจัยนี้จะเป็นแนวทางหนึ่งในการจัดการปัญหามูลช้างที่มีมากเกินไปในปางช้างด้วยเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและประโยชน์มากที่สุด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดและอัตราส่วนที่เหมาะสมของหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบการหมักย่อยแบบไร้อากาศที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้าง
2. เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างแบบกึ่งต่อเนื่องโดยใช้กากตะกอนจากระบบการหมักย่อยแบบไร้อากาศที่เหมาะสม

ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาเรื่อง ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งมูลช้างร่วมกับกากตะกอนจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพมูลสัตว์แบบกะ มีขอบเขตในการวิจัยดังนี้

1. ทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการหมักแบบกะในชุดทดลองขนาด 1,000 mL
2. วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพคือ มูลช้าง
3. ทำการปรับสภาพวัตถุดิบเชิงกล ให้มีขนาดประมาณ 0.7-1 mm
4. หัวเชื้อกากตะกอนที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ มีจำนวน 4 ชนิด ประกอบด้วย
 - 1) กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร
 - 2) กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค
 - 3) กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลไก่
 - 4) กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเศษอาหาร
5. อัตราส่วนวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนที่ได้รับการคัดเลือก ได้แก่ 1:1, 1:2 และ 2:1
6. ควบคุมการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้อุณหภูมิในช่วง 35 ± 2 °C
7. ระยะเวลาในการทดลอง 60 days
8. เลือกอัตราส่วนที่ดีที่สุดในชุดการทดลอง BMP มาทำการทดลองในระบบแบบกึ่งต่อเนื่องขนาดของถังปฏิกิริยาในการทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพ 30 L ที่กำหนด OLR เท่ากับ $1 \text{ kg VS/m}^3\text{-day}$
9. ระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง มีการกวน โดยทำการกำหนดอัตราการกวนผสมทุก ๆ 45 min และทำการกวนรอบละ 15 min

10. ค่าพารามิเตอร์ในการผลิตก๊าซชีวภาพที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าพีเอช ค่ากรดไขมัน ละเอียด ค่าความเป็นด่าง ค่าของแข็งระเหย และค่าของแข็งทั้งหมด เป็นต้น

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบแนวทางของศักยภาพหัวเชื้อแต่ละชนิดที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพหมักร่วมกับจาก มูลช้าง
2. เกิดเป็นองค์ความรู้ในการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนในรูปแบบของพลังงานด้านก๊าซชีวภาพในการจัดการมูลช้าง
3. ได้แนวทางในการใช้มูลช้างให้เกิดประโยชน์สูงสุดในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ



บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

การศึกษาทฤษฎีและการตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย ความหมายของก๊าซชีวภาพ กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศ องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ทั่วไปในปัจจุบัน ปริมาณของศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน รวมถึงการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ความหมายของก๊าซชีวภาพ

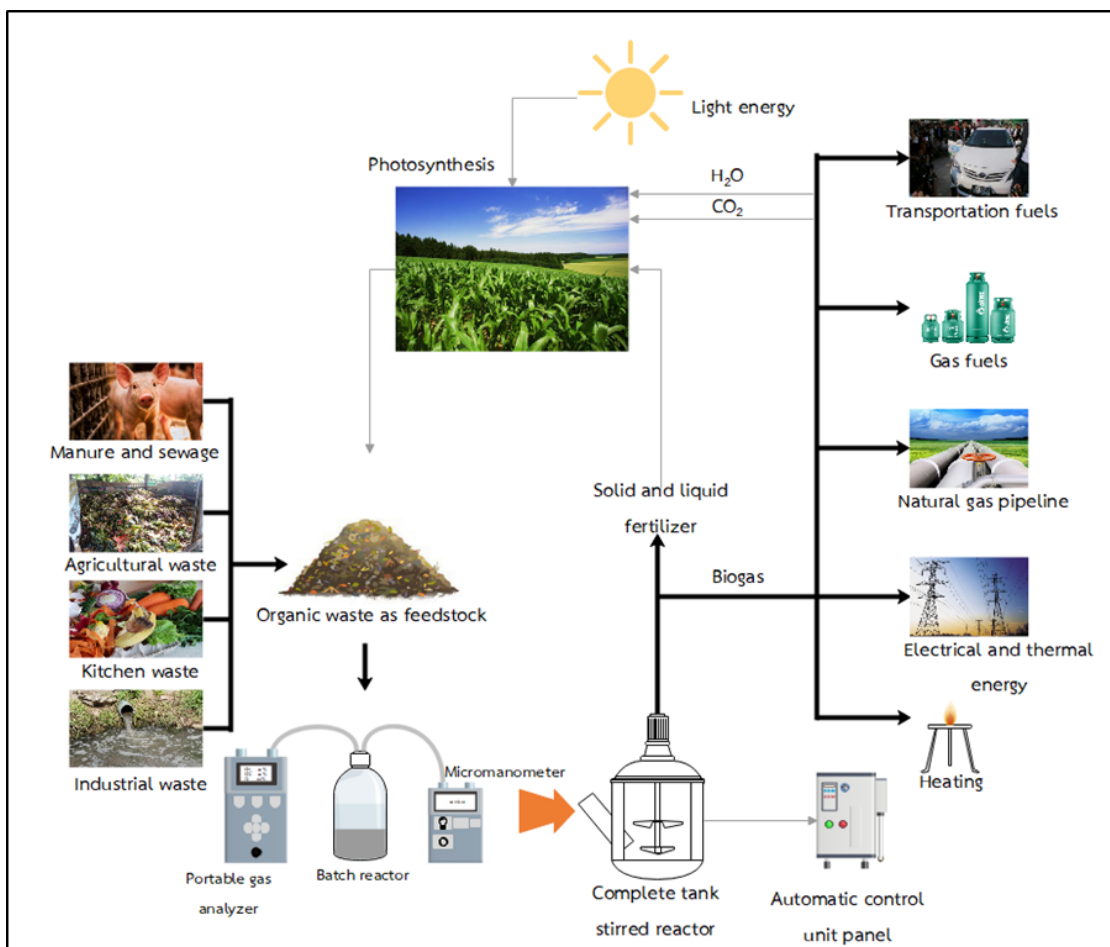
ก๊าซชีวภาพ (Biogas) คือ ก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ จากการย่อยสลายอินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic digestion) วัสดุที่นิยมใช้ในการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพเป็นวัสดุเศษเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีองค์ประกอบหลักคือ คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) โปรตีน (Protein) และเซลลูโลส (Cellulose) ที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า ชีวมวล ก๊าซชีวภาพจะมีอากาศเบากว่าอากาศเล็กน้อย มีอุณหภูมิที่ติดไฟประมาณ 700 °C อุณหภูมิของเปลวไฟประมาณ 870 °C (สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2564) โดยประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น องค์ประกอบทางเคมีของสารตั้งต้น ประสิทธิภาพในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ อุณหภูมิ และสภาวะอื่น ๆ กลไกในการเกิดก๊าซชีวภาพ เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในชีวมวลโดยอาศัยจุลินทรีย์ เพื่อเกิดเป็นก๊าซมีเทน ดังสมการที่ 1 ดังนี้



สมการที่ 1

โดยในปัจจุบันกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นอีกหนึ่งวิธีในการผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวล สำหรับกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้อากาศสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ แบบแห้ง (Dry digestion) และแบบเปียก (Wet digestion) ซึ่งมีการควบคุมการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดของระบบ (Total Solid Content, TSC) ประมาณ 20-40% และน้อยกว่า 20% ตามลำดับ (นคร ทิพยาวงค์, 2553) กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ จะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่และมีความซับซ้อน ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และ

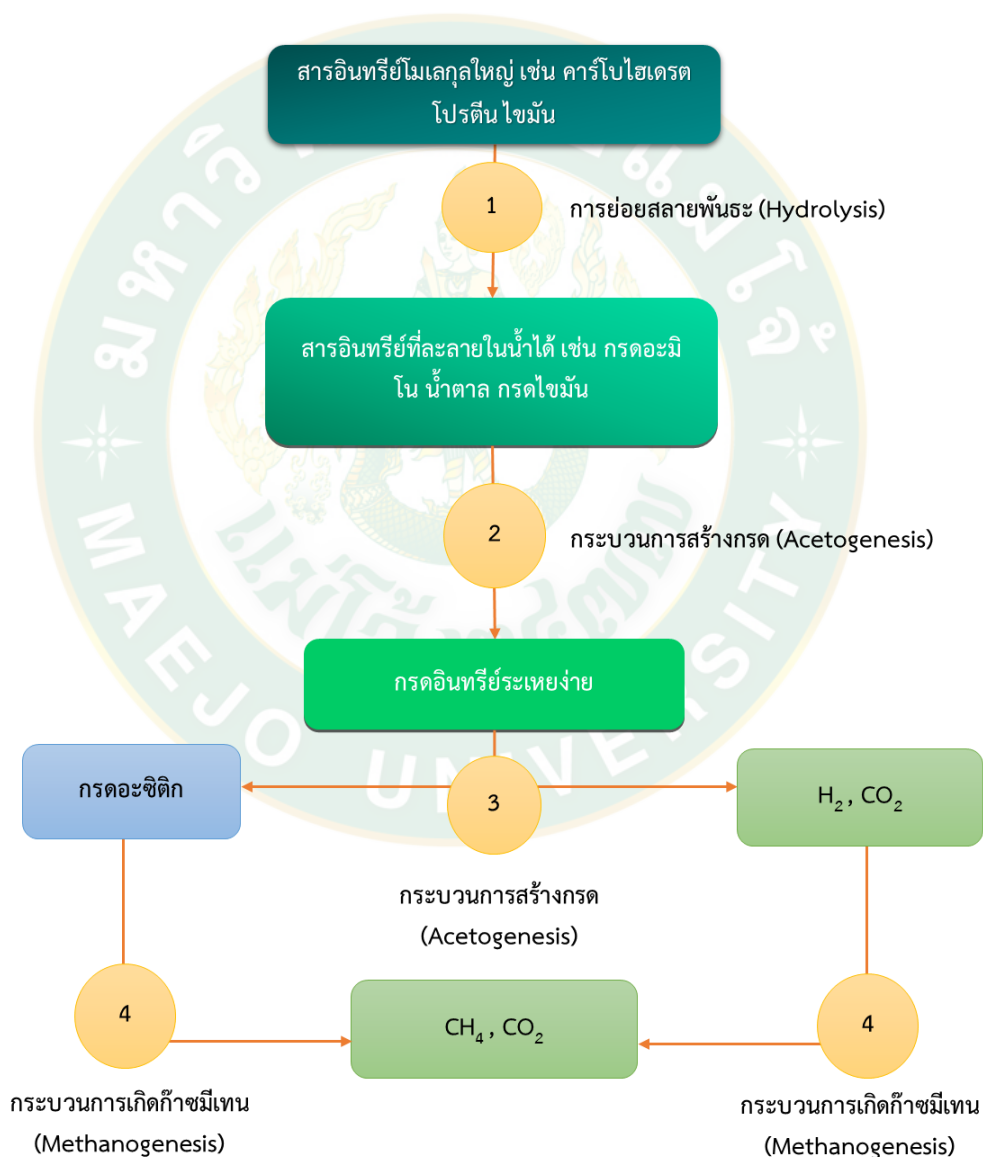
ไขมัน ด้วยการอาศัยเชื้อแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน คือ เชื้อแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการหายใจ และสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอัตราส่วนไนโตรเจนต่อคาร์บอนสูง ผลผลิตที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ เรียกว่า ก๊าซชีวภาพ กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศประกอบด้วยกระบวนการทางจุลชีววิทยา (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2556) ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 วงจรระบบผลิตก๊าซชีวภาพและการนำไปใช้งาน

ขั้นตอนและปฏิกิริยาในการเกิดก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพเกิดจากการหมักของสารอินทรีย์โดยมีจุลินทรีย์จำพวกแบคทีเรีย เช่น จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methane-producing bacteria) และจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (Acid-producing bacteria) มาช่วยย่อยภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยจุลินทรีย์ต่าง ๆ จะทำปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากให้มีความซับซ้อนน้อยลง สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 4 ขั้นตอนและปฏิกิริยาในการเกิดก๊าซชีวภาพ

ขั้นตอนที่ 1 : ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นขั้นตอนของการย่อยสลายสารอินทรีย์ โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ทั้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เป็นต้น ให้มีขนาดโครงสร้างโมเลกุลเล็กที่สามารถละลายน้ำได้ ผลของปฏิกิริยาจะได้สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาลกลูโคส (Glucose) กรดอะมิโน (Amino acid) และกรดไขมัน (Fatty acid) เป็นต้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรดหรือค่าความเป็นด่าง ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียและองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ แบคทีเรียกลุ่มที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้คือ แบคทีเรียกลุ่มไฮโดรไลติก (Hydrolytic bacteria) และกลุ่มเฟอร์เมนเตทีฟ (Fermentative bacteria) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

ขั้นตอนที่ 2 : อะซิโตเจเนซิส (Acidogenesis) สารประกอบอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลเล็กที่ละลายน้ำซึ่งถูกสร้างโดยกระบวนการไฮโดรไลซิส จะถูกแบคทีเรียที่ดำรงชีพอยู่ได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มีอากาศคือแบคทีเรียแฟคัลเตทีฟ (Facultative bacteria) ใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงาน โดยในช่วงแรกของการย่อยสลายขั้นตอนนี้ ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งที่โมเลกุลมีอะตอมของคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid, CH_3COOH) กรดโพรพิโอนิก (Propionic acid, $\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$) กรดบิวทีริก (Butyric acid, $\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$) เป็นต้น และสารอื่น ๆ เช่น เอทานอล (Ethanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) ไฮโดรเจน (Hydrogen, H_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO_2) เป็นต้น (นคร ทิพยาวงศ์, 2553) แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) ซึ่งชนิดของแบคทีเรียจะถูกเรียกแตกต่างกันไปตามชนิดของสารอินทรีย์นั้น ๆ ขั้นตอนต่อมากรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นดังกล่าวข้างต้นจะถูกแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจเนติก (Acetogenic bacteria) เปลี่ยนให้เป็นอะซิเตต ฟอรัมเมต ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน ปฏิกิริยานี้ถือเป็นปฏิกิริยาสำคัญในการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงพอที่จะยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน แบคทีเรียกลุ่มนี้อาจเรียกว่า แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen forming bacteria) เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มผลิตไฮโดรเจนมักสร้างกรดอินทรีย์ด้วย แต่ตัวที่ผลิตกรดได้อาจไม่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ จึงถือว่าแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็นชนิดของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดด้วย แบคทีเรียทั้ง 2 ชนิด อาจรวมเรียกว่าเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ผลิตก๊าซมีเทน (Non-methanogenic bacteria) (ชลลดา แดงประดับ, 2554)

ขั้นตอนที่ 3 : อะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) เป็นกระบวนการสร้างกรดอะซิติก โดยแบคทีเรียสร้างกรด จะได้กรดอะซิติกในปริมาณมากที่สุด สร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นด้วย แบคทีเรียสร้างกรดจะมีอัตราการเจริญเติบโตสูงและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน, 2564)

ขั้นตอนที่ 4 : เมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis) เป็นกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (Methane, CH₄) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน โดยแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methane forming bacteria) การสร้างก๊าซมีเทน เกิดได้ 2 แบบ แบบแรกจะเกิดจากการเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทน โดยคิดเป็น 70% ของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบ อีกแบบหนึ่งเกิดจากการรวมตัวกันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทน และมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide, H₂S) เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ โดยผลผลิตของก๊าซชีวภาพที่ได้จะมีก๊าซหลายชนิดผสมอยู่ด้วย ดังนี้

- ก๊าซมีเทน เป็นส่วนประกอบหลัก มีคุณสมบัติจุดไฟติดได้ดีสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ มีสัดส่วนประมาณ 50-75%
- ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นส่วนประกอบรอง มีคุณสมบัติเป็นก๊าซเฉื่อย ไม่ติดไฟ มีประมาณ 36-39%
- ก๊าซอื่น ๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ประมาณ 1-3%

โดยทั่วไปแล้วก๊าซชีวภาพ 1 m³ ที่ประกอบด้วยก๊าซมีเทน 60% จะมีค่าความร้อนประมาณ 21 MJ ซึ่งเทียบเท่ากับ น้ำมันดีเซล 0.60 L หรือ น้ำมันเบนซิน 0.67 L หรือ น้ำมันเตา 0.55 L หรือ พลังงานไฟฟ้า 1.2 kWh หรือ ก๊าซหุงต้ม 0.46 kg หรือ ไม้ฟืน 1.5 kg (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน, 2564)

สภาวะแวดล้อมและปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศจำเป็นต้องอาศัยการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดที่เจริญเติบโตร่วมกัน ดังนั้นในการเริ่มต้นเดินระบบจึงต้องมีสภาวะแวดล้อมและปัจจัยในระบบที่เหมาะสม หากสภาวะแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไปทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่เจริญเติบโต จะทำให้ระบบเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจนระบบเกิดล้มเหลวได้ ดังนั้นต้องเข้าใจถึงสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียสภาวะแวดล้อมและปัจจัยดังกล่าวมีดังนี้

1. อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาชีวเคมีจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น และอุณหภูมิที่แบคทีเรียเจริญเติบโตได้เป็นอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของเซลล์และกิจกรรมของเอนไซม์ภายในเซลล์ อุณหภูมิถูกแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ

ก) ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20 °C

ข) ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20-45 °C

ค) ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 45 °C

สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วงที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นในระบบได้ดีคือ ช่วง 30-38 °C และช่วง 48-57 °C อย่างไรก็ตามการเดินระบบที่ช่วงอุณหภูมิสูง มีข้อเสียที่ทำให้แบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิสูง (Thermophilic bacteria) ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ไม่ดีเท่ากับ แบคทีเรียที่ชอบอุณหภูมิมานกลาง (Mesophilic bacteria) เกิดเป็นความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของระบบสูง และการเดินระบบที่อุณหภูมิสูงยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์อีกด้วย (จุฑาภรณ์ ชนะถาวร, 2560)

2. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of Hydrogen ion, pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศเป็นตัวที่วัดค่าความเป็นกรดหรือด่างในระบบ สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 6.6-7.4 ซึ่งเป็นค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ซึ่งพบว่าในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างเกิดขึ้นอยู่เป็นประจำโดยสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างภายในถังปฏิกรณ์ คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ โดยหากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าในปริมาณมากเกินไป จะทำให้แบคทีเรีย

กลุ่มผลิตภัณฑ์ ผลิตภัณฑ์ระเหยง่ายในปริมาณมาก จนแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่สามารถใช้ได้ทัน ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบลดลง ดังนั้นระบบต้องมีความสามารถในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างที่ดี เพื่อรับมือกับกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบ หากระบบมีค่าความเป็นด่างที่มากพอจะสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบได้ (จุฬารัตน์ ชนะถาวร, 2560)

3. ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity, Alk)

ค่าความเป็นด่างเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ของระบบ ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างและยังเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของระบบ กล่าวคือถ้าระบบมีค่าความเป็นด่างสูง แสดงว่าระบบมีปริมาณบัฟเฟอร์สูง สามารถรักษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ของระบบให้คงตัวอยู่ได้นาน โดยไม่เกิดการแปรปรวนของค่าความเป็นกรด-ด่าง ได้ง่ายเมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเพิ่มขึ้นในระบบ โดยพบว่าค่าความเป็นด่างภายในระบบควรมีอยู่ในช่วง 1,000-3,000 mg/L ค่าความเป็นด่างที่มีในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศไม่ควรจะต่ำกว่า 1,000 mg/L ที่จะช่วยต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังนั้นในการควบคุมระบบให้ทำงานเป็นปกติ (นงลักษณ์ นิธิกุลรัตนนา, 2559) จำเป็นต้องรักษาค่าความเป็นด่างไม่ให้มีค่าต่ำจนเกินไป เพื่อรักษาระดับค่าความเป็นกรด-ด่าง ในระบบบำบัด

4. กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA)

ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีความสำคัญในการตรวจสอบสถานะสมดุลของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ กรดอินทรีย์ระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทิริกและกรดโพรพิออนิก เป็นต้น ผลผลิตเหล่านี้เป็นสารตัวกลางส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด หากพบว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีมากขึ้น มักเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบ (ชลลดา แดงประดับ, 2554) ในระบบที่มีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณมาก (> 2,000 mg/L) ช่วงแรกจะทำให้ค่าความเป็นด่างของระบบลดลง และถ้ายังไม่มีการกำจัดปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายให้น้อยลง ต่อมาค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบก็จะลดต่ำลง และถ้าค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าต่ำกว่า 6.5 จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน หากยังไม่ได้ทำการแก้ไขปล่อยให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดต่ำลงถึง 4.5-5.0 จะทำให้ระบบเสียสมดุลเป็นผลให้ระบบล้มเหลวได้ ในสภาวะปกติปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายภายในถังปฏิกรณ์ไม่ควรเกิน 2,000 mg/L และวิธีการควบคุมระบบที่ดีที่สุดควรให้มีค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อค่าความเป็นด่างไม่ควรเกิน 0.3-0.4

วิธีการแก้ไขให้ระบบกลับสู่สภาพสมดุล อาจทำได้ดังนี้

- ตรวจสอบที่มาของการป้อนสารอินทรีย์ที่มากเกินไป

- การแก้ไขอาจเป็นการลดการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบ และควรมีบ่อเก็บน้ำเสียสำรอง
- กรณีฉุกเฉินถ้าต้องการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างให้เหมาะสมกับระบบ อาจจะใช้วิธีการเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต (Sodium bicarbonate, NaHCO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) หรือ โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate, Na_2CO_3) เป็นต้น ไม่ควรใช้ปูนขาว (Hydraulic lime, Ca(OH)_2) เนื่องจากอาจทำให้เกิดการอุดตันในระบบได้ (นงลักษณ์ นิธิกุลรัตน์, 2559)

5. อัตราภาระการรับสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)

อัตราภาระการรับสารอินทรีย์มีหน่วยเป็นน้ำหนักของซีโอดีที่อยู่ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดต่อปริมาตรของบ่อบำบัดต่อวัน ($\text{kg COD/m}^3\text{day}$) อัตราภาระการรับสารอินทรีย์มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด (Feeding rate) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการรักษาเสถียรภาพของระบบให้คงที่การเปลี่ยนอัตราภาระการรับสารอินทรีย์สามารถทำได้ 2 วิธีคือ

ก) ทำการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด ซึ่งวิธีนี้จะมีผลต่อระยะเวลาการกักเก็บน้ำเสีย (Hydraulic retention time, HRT) ภายในระบบบำบัดด้วย

ข) การเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำเสีย ซึ่งวิธีนี้ค่อนข้างทำได้ยากเนื่องจากน้ำทิ้งของโรงงานแต่ละประเภทมีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน

ดังนั้นในทางปฏิบัติการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดทำได้ง่ายกว่า โดยต้องมีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดให้สัมพันธ์กับระยะเวลาที่เหมาะสมในการสัมผัสกันระหว่างแบคทีเรียกับสารอินทรีย์ในน้ำเสียเพื่อให้ระบบบำบัดสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด (นฤมล เชาวะกระโทก, 2556)

6. สารพิษ (Toxic substances)

โดยทั่วไปในน้ำเสียมักมีสารพิษหลายชนิดปะปนเป็นองค์ประกอบอยู่ ซึ่งระดับความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารนั้น ๆ หากมีการสะสมของสารบางอย่างภายในถังปฏิกรณ์ในปริมาณที่มากเกินไปจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ โดยอาจมีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตจนถึงทำให้แบคทีเรียตายได้ และจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพหรือเสถียรภาพของระบบลดลง (ชลลดา แดงประดับ, 2554)

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศได้แบ่งสารพิษที่มีผลต่อแบคทีเรีย เช่น พิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งมีผลต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน พิษของสารโลหะหนักชนิดต่าง ๆ พิษของแอมโมเนียมไอออน (Ammonium ion, NH_4^+) เป็นต้น ระดับความเข้มข้นของสารพิษที่เป็นอันตราย

ต่อแบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน แสดงดังตารางที่ 1 สำหรับโลหะหนักบางชนิดนั้นจัดเป็นธาตุอาหาร ที่จำเป็นต่อแบคทีเรียด้วย ซึ่งมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียมีความต้องการในปริมาณที่ต่ำมาก

ตารางที่ 1 ระดับความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย

สารพิษ	ความเข้มข้นสูงสุด ที่ไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรีย (mg/L)
Copper (Cu)	1
Zinc (Zn)	5
Hexavalent chromium (Cr ⁶⁺)	5
Trivalent chromium compound (Cr ³⁺)	2,000
Total chromium (Cr)	5
Nickel (Ni)	2
Cadmium (Cd)	0.02
Sulfur (S ⁻)	100
Lead (II) sulfate (SO ₄ ²⁻)	500
Ammonia (NH ₃)	1,500
Sodium (Na ⁺)	3,500
Potassium (K ⁺)	2,500
Calcium (Ca ²⁺)	2,500
Magnesium (Mg ²⁺)	1,000
Acrylonitrile (C ₃ H ₃ N)	5
Benzene (C ₆ H ₆)	50
Carbon tetrachloride (CCl ₄)	10
Chloroform (CHCl ₃)	0.1
Pentachlorophenol (C ₆ HCl ₅ O)	0.4

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน (2564)

7. สารอาหาร (Nutrients)

ไนโตรเจน (Nitrogen, N) และฟอสฟอรัส (Phosphorus, P) เป็นธาตุที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมในระบบ เพื่อให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตแก๊สชีวภาพได้ดีควรมีอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 100:2.2:0.4 หรือ BOD:N:P เท่ากับ 100:1.1:0.2 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน, 2564)

8. การกวน (Mixing)

การกวนผสมในถังหมักมีความสำคัญเพราะจะทำให้แบคทีเรียมีโอกาสพบอาหารได้ทั่วถึง และสารอาหารต่าง ๆ ที่แบคทีเรียขับออกจะเกิดการกระจายได้ดีขึ้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

ศักยภาพการผลิตมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) คือ กระบวนการเติมวัตถุดิบพร้อมกับเชื้อจุลินทรีย์เพียงครั้งเดียวภายใต้กระบวนการไร้ออกซิเจน ซึ่งจะทำให้ทราบถึงปริมาณการเกิดต่อวันต่อปริมาณวัตถุดิบที่เติมและจำนวนวันทั้งหมดที่มีการเกิด จำนวนวันที่วัตถุดิบจะหมักย่อยได้หมด โดยแสดงในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมซีโอดีหรือกรัมของแข็งระเหย จากของวัตถุดิบที่เข้าสู่ระบบหมัก (สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, 2562) ค่า BMP ที่ได้จะแสดงถึงศักยภาพการผลิตมีเทนสูงสุด และประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบหมักชีวภาพจากวัตถุดิบในแต่ละชนิด โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณหาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน มีรายละเอียดดังนี้

1. การคำนวณหาปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกย่อยสลาย

$$VS_{\text{Removal}} = VS_{\text{In}} - VS_{\text{Out}} \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ VS_{Removal} คือ ค่าของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด, mg/L

VS_{In} คือ ค่าของแข็งระเหยเข้าระบบ, mg/L

VS_{Out} คือ ค่าของแข็งระเหยออกระบบ, mg/L

2. การคำนวณหาปริมาณซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ที่ถูกย่อยสลาย

$$\text{COD}_{\text{Removal}} = \text{COD}_{\text{In}} - \text{COD}_{\text{Out}} \quad \text{สมการที่ 3}$$

เมื่อ $\text{COD}_{\text{Removal}}$ คือ ค่าความสกปรกที่ถูกกำจัด, mg/L

COD_{In} คือ ค่าความสกปรกเข้าระบบ, mg/L

COD_{Out} คือ ค่าความสกปรกออกจากระบบ, mg/L

3. ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความสกปรกของเสีย (COD)

$$\% \text{COD}_{\text{Removal}} = [(\text{COD}_{\text{In}} - \text{COD}_{\text{Out}}) / \text{COD}_{\text{In}}] \times 100 \quad \text{สมการที่ 4}$$

เมื่อ $\% \text{COD}_{\text{Removal}}$ คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความสกปรกของเสีย, %

4. การเปลี่ยนแปลงเทียบหน่วยปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน

$$\text{ปริมาณก๊าซชีวภาพ (Nm}^3\text{/gVS}_{\text{added}}) = \frac{[\text{Pressure Blank} \times 819 \times (273.15 + 0)]}{[(273.15 + 35) \times 1,013.25] / @\text{STP}}$$

สมการที่ 5

ที่มา : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (2560)

การทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

การทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเป็นการทดสอบเพื่อประเมินการย่อยสลายสารอินทรีย์เคมีที่ใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนในสภาวะไร้อากาศ โดยเป็นการตรวจวัดแรงดันที่เพิ่มขึ้นในระบบทดสอบ ซึ่งอ้างอิงวิธีทดสอบฐาน VDI 4630 (Fermentation of organic materials characterization of the substrate sampling collection of material data fermentation tests) มีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. เตรียมเชื้อตั้งต้น (Seed) โดยการกรองเอากากออก แล้วนำส่วนที่กรองได้แช่เย็นที่ 4 °C (ให้มีตะกอนประมาณ 70-80% ของปริมาตรทั้งหมด)

2. ทดสอบปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solid, VS) ของเชื้อตั้งต้นและวัตถุดิบ เพื่อนำมาคำนวณหาอัตราส่วนสำหรับการหมักย่อย (ก่อนการหมักให้นำเชื้อตั้งต้นไปเก็บที่อุณหภูมิ 35 °C ประมาณ 7-10 days)

3. คำนวณอัตราที่ใช้ในการหมักย่อย โดยกำหนดอัตราส่วนของแข็งระเหยง่าย (VS) ของวัตถุดิบต่อเชื้อตั้งต้นเท่ากับ 0.5

4. บรรจุเชื้อตั้งต้นและวัตถุดิบตามอัตราส่วนในข้อ 3 ลงในขวดหมัก ไล่อากาศในแต่ละขวด ด้วยก๊าซไนโตรเจน 2-3 min แล้วปิดฝา
5. นำชุดการทดสอบทั้งหมดไปเก็บที่อุณหภูมิ 35 ± 2 °C เป็นเวลา 1 hr เขย่าขวดแล้วนำเข็มแทงผ่านแผ่นยาง เพื่อไล่อากาศที่ค้างอยู่ในขวดออก บันทึกแรงดันอากาศเบื้องต้น
6. บันทึกแรงดันก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน
7. วัดองค์ประกอบก๊าซเมื่อแรงดันประมาณ 300 mbar โดยเมื่อวัดเสร็จแล้วให้ปล่อยแรงดันออกให้หมด
8. ฝ้าติดตามจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองโดยสังเกตจากปริมาณก๊าซที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่า 1% ของปริมาณก๊าซสะสม ซึ่งจะใช้เวลาการหมักประมาณ 30-60 days

ระบบเทคโนโลยีในการผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ในประเทศไทย

- ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์

1. ระบบบ่อหมักแบบโดมคงที่ (Fixed dome digester)

ส่วนใหญ่จะสร้างด้วยคอนกรีตหรือก่ออิฐโอบปูนฝังอยู่ในดิน มีท่อเพื่อเติมมูลสัตว์และท่อให้มูลสัตว์ไหลออก ส่วนเก็บก๊าซจะสร้างด้วยคอนกรีตหรือก่ออิฐฉาบปูนติดกับตัวบ่อหมัก ซึ่งทำให้แรงดันของก๊าซไม่คงที่ จะขึ้นอยู่กับปริมาตรของก๊าซภายในบ่อ (สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, 2562)

2. ระบบบ่อหมักแบบราง (Plug flow digester)

เป็นบ่อซึ่งก่อสร้างด้วยคอนกรีต ตัวบ่อมีรูปร่างยาวคล้ายรางหรือคลองส่งน้ำซึ่งมีชื่อเรียกว่า Channel digester ส่วนบนบ่อหมักมีพลาสติกคลุมเพื่อใช้เก็บก๊าซชีวภาพ ตัวบ่อหมักจะถูกฝังอยู่ในดิน มีท่อเติมมูล และท่อนำมูลออกอยู่ทางหัวและท้ายบ่อ เนื่องจากใช้พลาสติกเป็นตัวเก็บก๊าซ ดังนั้นจึงมีแรงดันก๊าซค่อนข้างต่ำจำเป็นต้องมีอุปกรณ์เพิ่มแรงดันเพื่อนำก๊าซไปใช้งาน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน, 2564)

3. ระบบบ่อหมักแบบปิด (Cover lagoon digester)

รูปแบบของระบบนี้ได้นำรูปแบบถังเก็บก๊าซของบ่อแบบ Plug flow มาสร้างครอบไปบนบ่อรวบรวมมูลสัตว์ที่มีอยู่แล้ว ซึ่งอาจเป็นบ่อคอนกรีตหรือดินขุด ในกรณีที่เป็นบ่อดินขุด อาจปูแผ่นยางที่ใช้ปูสระเก็บน้ำมาปูทับ เพื่อให้เกิดการรั่วซึมของของเสียลงใต้ดิน

4. ระบบบ่อหมักแบบชั้นตะกอนจุลินทรีย์ใรร้าอากาศแบบไหลขึ้น (Up-flow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)

น้ำเสียจะถูกสูบเข้ากันถัง ซึ่งตะกอนแบคทีเรียที่กันถังแบ่งเป็น 2 ชั้น ชั้นล่าง (Sludge bed) เป็นตะกอนเม็ด (Granular bacteria) ขนาด 2-5 mm เป็นแบคทีเรียใยยาว (Filaments bacteria) เกาะกันมีความหนาแน่นสูง ส่วนชั้นบนเรียกว่า Sludge blanket ส่วนบนของบ่อหมัก UASB จะมีอุปกรณ์ที่เรียกว่า (Gas solid separator, GSS) ทำหน้าที่แยกก๊าซและป้องกันไม่ให้ตะกอนแบคทีเรียหลุดออกไปกับน้ำเสีย (สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, 2562)

5. ระบบบ่อหมักแบบแยกบ่อตะกอนและบ่อมุลสัตว์ (High suspension solid Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket, H-UASB)

พัฒนาจากระบบ UASB เพื่อแก้ปัญหาการอุดตันระบบหัวจ่ายน้ำเนื่องจากตะกอนของมุลสัตว์มีบ่อหรือถัง ทำหน้าที่แยกตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำเสียและมุลสัตว์ให้มีปริมาณน้อยที่สุด และนำพลาสติกพีอีที่ใช้คลุมบ่อหมักก๊าซชีวภาพแบบราง มาคลุมบ่อ ทำหน้าที่เก็บก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากระบบ UASB (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน, 2564)

- ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม

1. ระบบบ่อหมักแบบมีชั้นตะกอนแบคทีเรียลอย

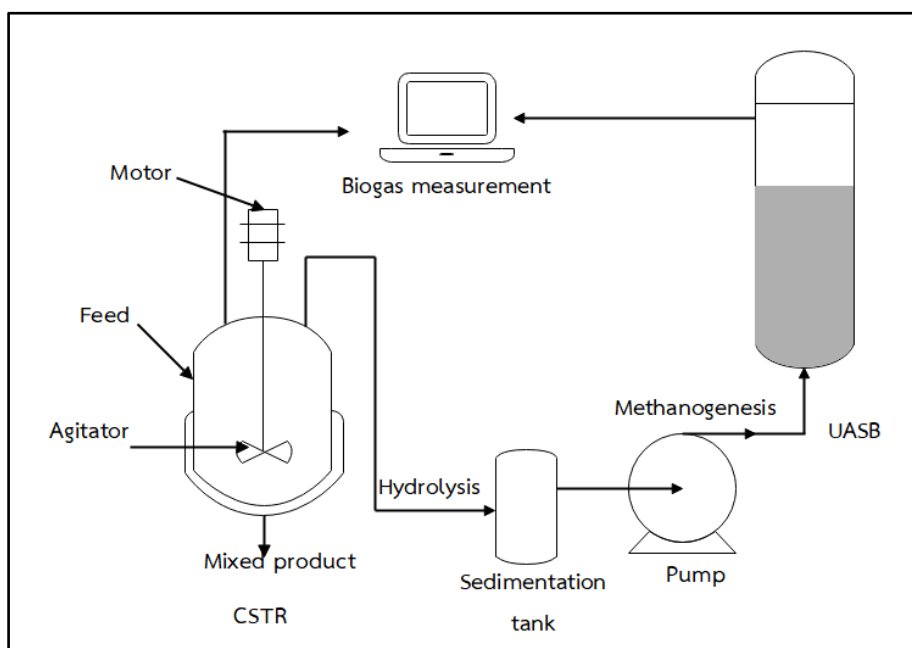
น้ำเสียจะถูกสูบเข้ากันถัง ตะกอนแบคทีเรียที่กันถัง แบ่งเป็น 2 ชั้น ชั้นล่าง เป็นตะกอนเม็ด ส่วนชั้นที่ 2 เรียกว่า Sludge blanket เป็นแบคทีเรียตะกอนเบา ช่วงบนของถังหมักจะมีอุปกรณ์แยกก๊าซชีวภาพและตะกอนแบคทีเรีย (Gas-solid separator) ไม่เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง

2. ระบบบ่อหมักแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film, AFF)

เป็นถังหมักที่ให้จุลินทรีย์เกาะบนวัสดุตัวกลางภายในถังในลักษณะของฟิล์มชีวะ ซึ่งสามารถลดการสูญเสียจุลินทรีย์ที่หลุดออกไปจากระบบบำบัดพร้อมกับน้ำเสียได้ และสามารถฟื้นตัวกลับเข้าสู่สภาวะทำงานปกติได้อย่างรวดเร็ว หากเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของน้ำเสียที่ไหลเข้าระบบหรือเกิดภาวะอินทรีย์สูงเกินไป (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

3. ระบบบ่อหมักแบบกวนผสม (Completely Stirred Tank Reactor, CSTR)

มีการกวนผสมภายในถังอย่างทั่วถึง (Mixing system) วิธีกวนผสม อาจใช้ก๊าซชีวภาพที่ผลิตขึ้นวนกลับภายในถัง หรือการกวนโดยใช้เครื่องกวนผสม ทำให้มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูง สามารถรับภาระปริมาณการเติมสารอินทรีย์สูง ช่วยลดระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในถังหมัก (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน, 2564) โดยเทคโนโลยีของการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นระบบที่ออกแบบซึ่งอาศัยกลุ่มของแบคทีเรียชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยระบบหรือบ่อหมักจะทำหน้าที่ควบคุมให้เกิดสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในระบบ โดยใช้เวลานานประมาณ 20-50 days จึงจะก่อให้เกิดก๊าซชีวภาพ โดยระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่นิยมใช้สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ระบบบ่อหมักแบบ CSTR ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบถังกวนสมบูรณ์ (CSTR)

4. ระบบบ่อบำบัดแบบบ่อยาว (Anaerobic Baffle Reactor, ABR)

เป็นบ่อยาวและมีแผ่นกั้นในแนวตั้งหลายแผ่นวางสลับกัน เพื่อบังคับทิศทางการไหลขึ้นลงสลับกันไป โดยมีความเร็วในการไหลขึ้นประมาณ 0.2-0.4 m/h ระบบนี้สามารถใช้กับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง มีขนาดใหญ่ ต้องใช้พื้นที่มาก

5. ระบบบ่อบำบัดแบบบ่อสี่เหลี่ยมคลุมแผ่นพลาสติก (Modified Covered Lagoon, MCL)

มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการคลุมด้วยแผ่นพลาสติก (High density polyethylene, HDPE) เพื่อให้เกิดสภาพไม่ใช้ออกซิเจนและใช้เป็นตัวเก็บรวบรวมก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยอาจคลุมทั้งบ่อหรือคลุมเฉพาะในส่วนที่มีการสร้างมีเทนก็ได้ มีการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของตะกอนแบคทีเรียกับน้ำเสียให้มากขึ้น และพัฒนาระบบการดักกักตะกอนภายในบ่อ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

มูลช้าง

ของเสียที่เกิดจากการเลี้ยงช้าง สำหรับปางช้างจากข้อมูลการสำรวจช้างเป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลก ในปัจจุบันมี 2 สายพันธุ์ คือ ช้างแอฟริกากับช้างเอเชีย ช้างไทยอยู่ในสายพันธุ์เอเชียมีคุณลักษณะพิเศษอันเป็นที่ยอมรับและยกย่องมานานว่า เป็นสายพันธุ์ที่ดงามและเฉลียวฉลาดที่สุด (กลีนประทุม ปัญญาปิง, 2563) ในประเทศไทยเรามีทั้งช้างป่าและช้างบ้าน ช้างบ้านคือ ช้างป่าที่นำมาฝึกเลี้ยงไว้ใช้งานต่อมามีลูกหลานออกมามากมายจนกลายเป็นสัตว์เลี้ยง ในธรรมชาติช้างถือเป็นสัตว์บก เป็นผู้ให้ร่มเงาแก่ป่าและสัตว์ใหญ่ทั้งหลาย โดยช้างจะเป็นผู้เบิกทางภายในป่า และดึงรังยอต้นไม้ ใบไม้ที่มีอยู่ในชั้นเรือนยอดลงมาเป็นอาหารแก่ตัวเองและสัตว์ป่าอื่น ๆ นอกจากนี้ช้างยังเป็นสัตว์กินมังสวิรัต ที่บริโภคอาหารจำพวกพืช ผัก และธัญญาหาร ในแต่ละวันด้วยปริมาณมาก ประมาณ 6-12% ของน้ำหนักตัว และขับถ่ายออกมา 60% ของอาหารที่ได้รับประทานเข้าไป (Chayanon et al., 2021)

1. ลักษณะการบริโภคอาหารของช้าง

ช้างเป็นสัตว์ที่มีการบริโภคอาหารจำพวกพืชมากกว่า สัตว์เคี้ยวเอื้องถึง 2 เท่าจึงส่งผลทำให้ช้างมีความต้องการอาหารในปริมาณที่มากและสามารถกินพืชอาหารได้หลากหลายชนิด โดยปกติแล้วช้างจะบริโภคอาหารเฉลี่ยวันละ 150-200 kg ซึ่งระยะเวลาการกินอาหารจะเฉลี่ยที่ 12 hr/days พืชอาหารที่ช้างบริโภคจะประกอบด้วย หญ้า เปลือกไม้ และต้น หรือ ผลไม้ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ประเภท (กลีนประทุม ปัญญาปิง, 2563) ดังนี้

1) หญ้าพง หญ้าแฉม หญ้าอ้อ หญ้าคา หญ้าตองก้ง หญ้าเอื้องหมายนา หญ้าแพรก หญ้ายอนหู หญ้าปล้อง หญ้ากระเดือยหนู หญ้าปากควาย หญ้ากังกาย เป็นต้น

2) ไม้ไผ่ จำพวกใบไม้ไผ่ที่ลักษณะเป็นใบ ยอดอ่อน และหน่อของไม้ไผ่ เช่น ไผ่ข้าวหลาม ไผ่ซาง ไผ่ป่า ไผ่หอม ไผ่บง เป็นต้น

3) เถวัลย์ อย่างเช่น สลอดน้ำ บอระเพ็ด ส้มป่อย เครือเขาขึ้น หลายเครือเขาน้ำ และเถวัลย์แดง เป็นต้น

2. ลักษณะของมูลช้าง

มูลช้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยเส้นใยหรือพวกเซลลูโลสและธาตุอาหารปริมาณที่สามารถนำไปผลิตก๊าซชีวภาพที่มีคุณภาพได้ จากการวิเคราะห์ การหมักมูลช้างจากการทำปุ๋ยหมัก พบว่า pH 7.3 อินทรีย์วัตถุ 36.56% ปริมาณไนโตรเจน 1.2% ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ 3.75% และปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ 1.35% ดังแสดงในภาพที่ 6 (กลิ่นประทุม ปัญญาปิง, 2563)



ภาพที่ 6 มูลช้าง

ที่มา : กลิ่นประทุม ปัญญาปิง (2563)

ตรวจสอบเอกสาร

สำหรับการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในเรื่องการพัฒนาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างโดยใช้หัวเชื้อจากตะกอนจากระบบการหมักย่อยแบบไร้อากาศ จะทำการศึกษาเอกสารเกี่ยวกับการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบกะ ระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ มีข้อมูลดังต่อไปนี้

1. การปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

กิตติยา ป้อมเงิน และคณะ (2559) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจาก ผักตบชวาที่การปรับสภาพด้วยการนึ่งและไม่ทำการปรับสภาพ โดยใช้เวลา 60 min ในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบการหมักแบบไร้อากาศแบบกะ และทำการควบคุมปริมาตรสารทำงานเท่ากับ 0.25 L โดยใช้ผักตบชวาร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วน 1:4 (w/w) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) เท่ากับ 17.96:1.00 ที่อุณหภูมิ 33 °C โดยใช้ระยะเวลาในการทดลอง 40 days จากการศึกษา

พบว่า การปรับสภาพมีผลต่อโครงสร้างของผักตบชวาและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย โดยหลังการปรับสภาพพบว่ามีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน คิดเป็น 41.61%, 16.27% และ 12.53% (w/w) ตามลำดับ โดยการศึกษาผักตบชวาที่ทำการปรับสภาพสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้สูงสุด 175.67 mL

จุฬารัตน์ ชนะถาวร (2560) ได้ศึกษาเกี่ยวกับวัตถุดิบซังและเปลือกข้าวโพดที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยการเติมวัตถุดิบที่มีคาร์บอนสูงในระบบการหมักแบบไร้อากาศร่วมกับน้ำเสีย จากการเตรียมเบดดิงใส่เดือนที่มีปริมาณไนโตรเจนสูง มีผลทำให้ประสิทธิภาพการหมักและการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) และพบว่า มีค่า R^2 เท่ากับ 0.989 ซึ่งถือว่าเป็นตัวแบบสมการที่มีความเหมาะสมต่อการทดลอง โดยพบว่า ณ สภาวะการหมักที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 12% ที่สัดส่วนการหมักเปลือกข้าวโพดต่อซังข้าวโพดในอัตราส่วนร้อยละ 50:50 มีศักยภาพการผลิตมีเทนสูงสุดเท่ากับ 26.91% ค่าความเข้มข้นก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 83% จากการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นผิวด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่าโครงสร้างพื้นผิวถูกทำลายอย่างชัดเจน รวมทั้งเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างของพื้นผิวซังและเปลือกข้าวโพด

นิลวรรณ และคณะ (2559) ได้ดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากวัตถุดิบหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระ ทั้งแบบสดและแบบผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง เพื่อแสดงให้เห็นศักยภาพของหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระ ในการนำมาเพิ่มคุณค่าโดยนำมาแปรรูปให้อยู่ในรูปของก๊าซชีวภาพที่เป็นพลังงานทางเลือกในอนาคต โดยวิธีการปรับสภาพเบื้องต้นทางกายภาพด้วยการบดให้มีขนาดเล็กประมาณ 2 mm จากนั้นทำการปรับสภาพด้วยสารละลายต่าง 2 ชนิด ได้แก่ สารละลายโซดาไฟและน้ำปูนขาวความเข้มข้น 1% (w/v) ด้วยเวลา 1 และ 2 hr ของทุกการทดลองที่อุณหภูมิ 27 °C ภายใต้ความดันบรรยากาศ 1 atm ผลจากการทดลองพบว่า หญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระแบบสดและแบบผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายต่างมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ที่ 0.181 และ 0.273 $m^3/kg VS_{added}$ ตามลำดับ โดยเมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยการแช่สารละลายโซดาไฟเข้มข้น 1% (w/v) นาน 1 hr ให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นถึง 30% สำหรับการปรับสภาพด้วยน้ำปูนขาวให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระแบบสด

Natthanicha Sukasem et al. (2017). ได้ดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับผลของการปรับสภาพผักตบชวาสดและแห้งที่ใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ คือ มูลสุกร มูลช้าง และมูลค่างควาด้วยกรดและด่าง ประกอบด้วย 1) ผักตบชวาสด 2) ผักตบชวาแห้ง 3) ผักตบชวาสดปรับสภาพด้วยกรดมะนาว 4)

ผักตบชวาแห้งปรับสภาพด้วยกรดมะนาว 5) ผักตบชวาสดปรับสภาพด้วย NaOH และ 6) ผักตบชวาแห้งปรับสภาพด้วย NaOH ทำการกำหนดค่าความเข้มข้นของกรดมะนาวและต่าง NaOH เท่ากับ 2% (w/v) ในสภาวะอุณหภูมิควบคุม 140 °C เป็นระยะเวลา 4 hr จากนั้นศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วย BMP ที่ปริมาตรขวดซีรัม เท่ากับ 1,000 mL และปริมาตรใช้งาน คือ 500 mL ซึ่งสัดส่วนของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อน้ำเท่ากับ 400 g : 400 g : 200 ml ทำการทดลองภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิควบคุม 37±2 °C เป็นระยะเวลา 30 days จากการทดลองพบว่า ผักตบชวาสดที่ทำการปรับสภาพด้วยกรดมะนาวร่วมกับมูลสุกรจะให้สัดส่วนก๊าซมีเทนมากที่สุด เท่ากับ 63.65% และผักตบชวาแห้งปรับสภาพด้วยต่าง NaOH ร่วมกับมูลช้างจะให้สัดส่วนก๊าซมีเทนมากที่สุด เท่ากับ 37.75%

2. การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบข้าง และวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

ณัฐวุฒิ ดุษฎี และคณะ (2557) ได้ทำการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีการหมักภายใต้สภาวะแบบไร้อากาศแบบแห้งที่มีระบบการหมุนเวียนตะกอน และทำการปรับสภาพต้นข้าวโพดด้วย NaOH และการต้ม จากการศึกษาและทดลองพบว่า ส่วนของต้นข้าวโพดที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการปรับสภาพ ได้ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ 12.9 L/kg และส่วนของต้นข้าวโพดสดมีค่าใกล้เคียงกับการปรับสภาพด้วย NaOH 2% (w/v) ในระยะเวลา 48 hr และการนำไปต้มที่ 100 °C เป็นระยะเวลา 1 hr เท่ากับ 15.2 และ 13.5 L/kg ตามลำดับ

รุ่งนภา เนินหาด (2553) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษผักเหลือทิ้งร่วมกับมูลสุกรภายในขวดทดลองขนาด 1 L ในระบบการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบกะ ณ อุณหภูมิห้อง โดยใช้ระยะเวลาทดลอง 12 days ทั้งนี้ใช้เศษผักเหลือทิ้ง 150 g ร่วมกับมูลสุกรที่ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% (w/w) อีกทั้งมีการใช้ลูกโป่งเป็นกักเก็บก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ทุก ๆ 3 days จากการศึกษาในข้างต้น พบว่าที่อัตราส่วนการผสมระหว่างเศษผักร่วมกับมูลสุกรที่ 50% (w/w) สามารถผลิตปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดที่ 1,248 mL

ลาแพน หล้าคำมี. (2553) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะเลสาบปาล์ม โดยใช้หัวเชื้อมูลสุกรในกระบวนการหมัก 2 แบบ คือ แบบกะ และแบบกึ่งกะ โดยการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกะ เริ่มต้นด้วยการหมักทะเลสาบปาล์มใช้มูลสุกรเป็นหัวเชื้อเริ่มต้นในอัตราส่วนน้ำหนักแห้ง 100 g : หัวเชื้อมูลสุกร 400 ml ทำการศึกษาเป็นระยะเวลา 12 days พบว่ามีปริมาณชีวภาพสะสม 937 cm³ และมีปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 78.08 cm³/day ในส่วนของการผลิตชีวภาพแบบกึ่งกะ นั้นได้ทำการหมักทะเลสาบปาล์ม 70 g น้ำหนักแห้ง แล้วเติมทะเลสาบปาล์มครั้งละ 10 g ทุก ๆ 3 days โดยมีหัวเชื้อ

มูลสุกรเป็นหัวเชื้อ 400 ml และเติมทะเลายปาล์มให้ครบ 100 g ทำการหมักเป็นเวลา 12 days จากผลการศึกษาในข้างต้น พบว่า การผลิตชีวภาพแบบต้นแบบกึ่งกะ สามารถผลิตได้ดีกว่าแบบกะ โดยจะมีค่าปริมาตรก๊าซสะสมที่ $1,268 \text{ cm}^3$ และมีปริมาณชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ $105.67 \text{ cm}^3/\text{day}$

Chayanon Sawatdeenarunat et al. (2021) ได้ทำการศึกษาศึกษาการตรวจสอบศักยภาพของ ก๊าซมีเทนทางชีวเคมีจากของเสียในปางช้างที่แตกต่างกัน 3 ชนิด คือ มูลช้างสด น้ำล้างมูลช้าง และ มูลช้างที่เหลือจากการชะล้าง โดยใช้หัวเชื้อเป็นกากตะกอนมูลวัวจากบ่อหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนในเชิงพาณิชย์ และดำเนินการทดลองภายในขวดขนาด 1 L ภายใต้สภาวะการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบกะ ที่ควบคุมอุณหภูมิประมาณ $35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ในระยะเวลา 60 days โดยกำหนดอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ 1:2 และกำหนดปริมาณสารทำงานที่ 400 mL จากการทดลองพบว่า ผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการทดสอบทางชีวเคมีที่มากที่สุดเท่ากับ $275.7 \pm 1.6 \text{ NmL/gVS}_{\text{added}}$ ซึ่งได้จากมูลช้างสด

Tyagi Malini et al. (2016) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานมูลช้างเป็นวัตถุดิบ ในการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเสนอทางออกที่ยั่งยืนในการจัดการของเสียจากปางช้างและช่วยจัดตั้งการใช้พลังงานหมุนเวียน โดยใช้หัวเชื้อมูลวัวในการทดลอง 3 ชุด คือ (1) มูลช้างผสมน้ำ อัตราส่วน 1:1.5 (2) มูลช้างผสมน้ำ อัตราส่วน 1:3 และ (3) มูลช้างผสมเศษอาหาร อัตราส่วน 1:1 ในการทดลอง ภายใต้สภาวะการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบกะ ระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 1 m^3 และมีถังเก็บแก๊สขนาด 20 L จากการทดลองพบว่า ก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากมูลช้างด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ในอัตราส่วนที่ 1:1.5, 1:3 และ 1:1 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 82%, 85% และ 86.3% ตามลำดับ โดยในชุดที่มูลช้างผสมเศษอาหาร อัตราส่วน 1:1 มีปริมาณผลผลิตมีเทนที่สูงถึง 86.3% ในวันที่ 28 ของการย่อยอาหาร แสดงให้เห็นว่าก๊าซชีวภาพจากมูลช้างสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลได้

3. การผลิตก๊าซชีวภาพจากอิทธิพลของชนิดและอัตราส่วนที่เหมาะสมของหัวเชื้อ

ชาญ แซ่ม้า (2553) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากพืชผักร่วมกับส่วนผสมของมูลสุกรและ มูลโค โดยทำการผสมระหว่างพืชผักต่อมูลสัตว์ในอัตราส่วนที่ 60:40 (w/w) และทำการศึกษาที่ ระยะเวลา 12 days ทั้งนี้ได้เก็บก๊าซชีวภาพที่ผลิตทุก ๆ 3 days จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่าที่ อัตราส่วนการผสมของมูลสุกรต่อมูลโคที่ 70:30 (w/w) ที่อัตราส่วนการผสมที่สามารถให้ปริมาณ สะสมสูงสุดที่ 1,100 mL

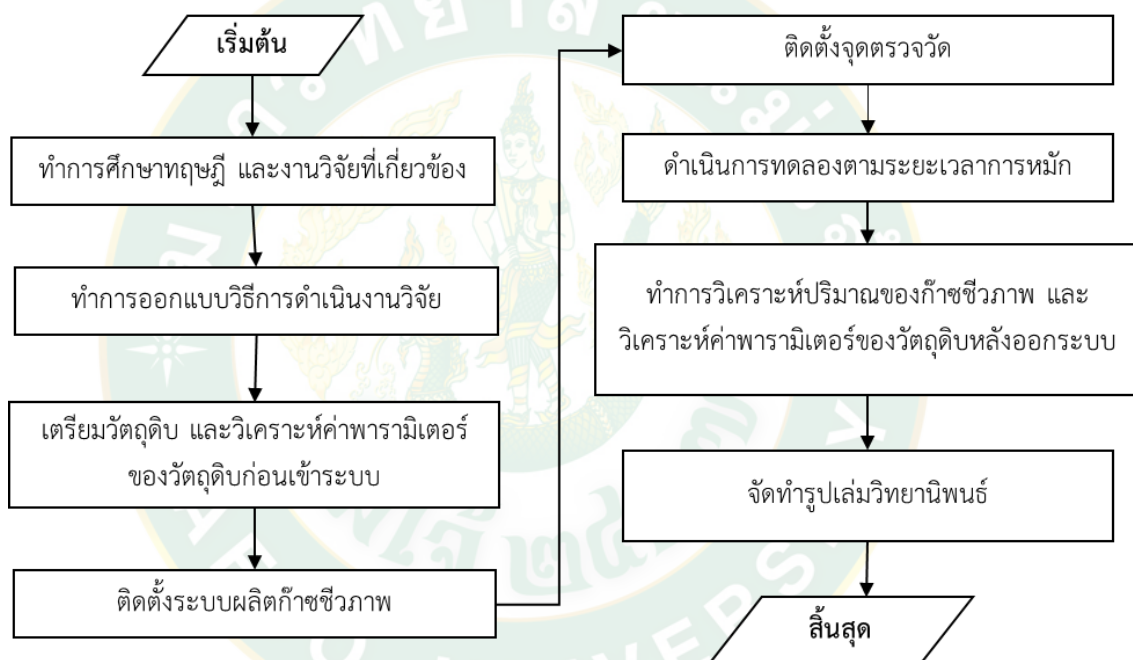
Kondusamy Dhamodharan et al. (2016) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพและเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซชีวภาพจากการใช้หัวเชื้อจากมูลสัตว์ที่แตกต่างกัน 5 ชนิด คือ มูลไก่ (Poultry dung, PD) มูลแพะ (Goat dung, GD) มูลวัว (Cow dung, CD) มูลสุกร (Piggery dung, PGD) และมูลแรด (Rhinoceros dung, RD) ต่อการย่อยเศษอาหารภายใต้สภาวะการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบกะ โดยใช้เวลา 60 days และปริมาตรสารทำงานที่ 400 mL โดยทำการเติมหัวเชื้อในระบบ 100 mL และเติมเศษอาหาร 300 mL หลังจากทำวิเคราะห์ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าหัวเชื้อ CD, PGD และ PD เหมาะสำหรับการย่อยเศษอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจนมากกว่ามูลสัตว์ชนิดอื่น เพราะในช่วง 30 days มีอัตราก๊าซมีเทนสะสมมากที่สุดของ PGD CD PD GD และ RD เท่ากับ 491 mL/day, 488 mL/day, 434 mL/day, 426 mL/day และ 335 mL/day ตามลำดับ ดังนั้นสรุปได้ว่า CD, PGD และ PD สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากที่สุดและมีการย่อยสลายที่ดีที่สุดในบรรดาหัวเชื้อมูลสัตว์ทั้งหมด

Kondusamy Dhamodharan et al. (2015). ได้ดำเนินการศึกษาเกี่ยวกับผลของหัวเชื้อที่แตกต่างกันในการหมักย่อยเศษอาหารภายใต้สภาวะแบบไร้อากาศ โดยได้ศึกษาหัวเชื้ออยู่ 5 ชนิด ได้แก่ 1) มูลสัตว์ปีก 2) มูลแพะ 3) มูลแรด 4) มูลโค และ 5) มูลสุกร ใช้การทดลองในขนาด 1,000 L มีปริมาตรสารทำงานรวมทั้งหัวเชื้อและวัตถุดิบหลักประมาณ 600 L ดำเนินการวิเคราะห์ก๊าซมีเทนโดยแบ่งช่วงระยะเวลาการวัดประมาณ 7 days ในช่วงแรกของการย่อยสลายสารอินทรีย์พบว่า ในระบบที่ใช้หัวเชื้อมูลสุกรมีประมาณการผลิตก๊าซมีเทนมากที่สุดเท่ากับ 231 mL/day ส่วนหัวเชื้อมูลสัตว์ปีก มูลแพะ มูลแรด และมูลโค มีประมาณการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 210 mL/day 45 mL/day 149 mL/day และ 155 mL/day ตามลำดับ หลังจากการศึกษาทำการทดลองพบว่าการศึกษาการใช้หัวเชื้อที่แตกต่างทั้ง 5 ชนิด หัวเชื้อมูลโคและมูลสุกรมีประสิทธิภาพและสามารถผลิตก๊าซมีเทนสะสมมากที่สุดเท่ากับ 488 mL/day และ 491 mL/day ตามลำดับ ในการศึกษาทางานวิจัยนี้จึงบ่งบอกได้ว่าหัวเชื้อสามารถส่งผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้มีจุดประสงค์ เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างโดยใช้หัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยจะกล่าวถึงวัตถุดิบและการออกแบบวิธีการดำเนินงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ มีขั้นตอนและวิธีการทดลองดังแสดงในภาพที่ 7 ต่อไปนี้



ภาพที่ 7 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การเตรียมวัสดุคืบ

วัสดุคืบที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เตรียมมูลข้าง และ ส่วนที่ 2 เตรียมหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยรายละเอียดต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. การเตรียมมูลข้าง

สำหรับการเตรียมมูลข้าง ที่มีส่วนประกอบที่มีกากใยหรือพวกเซลลูโลสจำนวนมาก ในขั้นตอนแรกนำมูลข้างไปตากแดดหลังจากนั้นทำการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการปรับสภาพเชิงกลผ่านการบดย่อยด้วยเครื่องบดให้ได้ขนาดของวัสดุหมักขนาดประมาณ 0.7-1 mm โดยการกรองด้วยตะแกรงขนาด 26 mesh ประมาณ 0.71 mm (Sawatdeenarunat et al., 2021) ดังแสดงในภาพที่ 8



(ก) มูลข้างที่ผ่านการตากแดด



(ข) มูลข้างหลังปรับสภาพ

ภาพที่ 8 มูลข้างผ่านการปรับสภาพ

2. การเตรียมหัวเชื้อกากตะกอนระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

หัวเชื้อกากตะกอนจากระบบการหมักย่อยแบบไร้อากาศ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มี 4 ชนิด ได้แก่ กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลไก่ และกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเศษอาหาร ดังแสดงในภาพที่ 9 โดยก่อนนำวัสดุคืบมูลข้างเข้าสู่ระบบจะต้องทำการปรับสภาพหัวเชื้อกากตะกอนจุลินทรีย์ โดยการนำหัวเชื้อจุลินทรีย์กากตะกอนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพก่อน เพื่อให้หัวเชื้อกาก

ตะกอนจุลินทรีย์เกิดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้สิ้นสุดกระบวนการก่อนเป็นระยะเวลา 7 days เพื่อลดผลกระทบของหัวเชื้อที่จะส่งผลกระทบต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัตถุดิบหลักมูลช้างด้วยกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบกะ



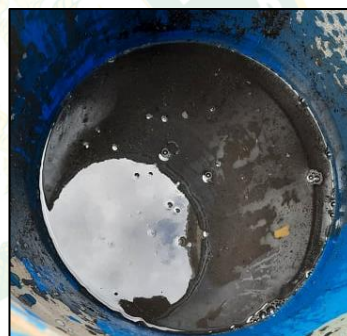
(ก) กากตะกอนมูลหมู



(ข) กากตะกอนมูลวัว



(ค) กากตะกอนมูลไก่



(ง) กากตะกอนเศษอาหาร

ภาพที่ 9 หัวเชื้อกากตะกอนจากกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ

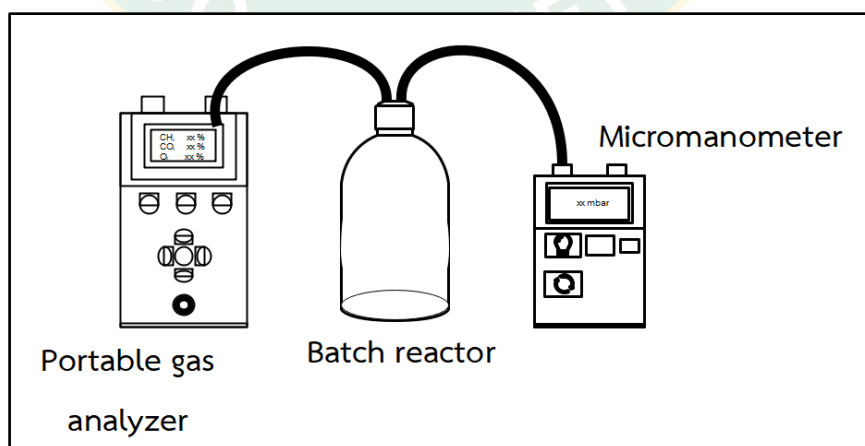
ตารางที่ 2 วิธีวิเคราะห์คุณลักษณะของมูลช้าง

พารามิเตอร์	หน่วย
pH	-
COD	mg/L
TS	mg/g
VS	mg/g
VFA	mg CH ₃ COOH/L
Alk	mg CaCO ₃ /L
C/N ratio	-

ก่อนทำการป้อนหัวเชื้อกากตะกอนเข้าระบบ ต้องทำการแยกเศษวัสดุอื่น ๆ ที่ติดมากับหัวเชื้อออกก่อน พร้อมทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ก่อนเข้าระบบ โดยทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์ โดยรายละเอียดการวิเคราะห์องค์ประกอบของหัวเชื้อกากตะกอน มีดังแสดงในตารางที่ 2

วิธีการทดลองระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างขนาด 1,000 mL

สำหรับวิธีการทดลองระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างขนาด 1,000 mL ได้ทำการปรับปรุงจากขั้นตอนมาตรฐาน VDI 4630 โดยใช้ขวดสุติบมูลช้างและหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 4 ชนิด ที่ได้เตรียมไว้มาทำการทดลอง โดยกำหนดเงื่อนไขอัตราการหมักวัตถุดิบต่อหัวเชื้อกากตะกอนในการทดลองออกเป็น 3 เงื่อนไข ได้แก่ 1:2 1:1 และ 2:1 ทำการทดลองประกอบด้วย QC (Micro crystalline) 1 ขวด Blank 3 ขวด และตัวอย่างการทดลอง 3 ขวด มีปริมาตรสารทำงานในขวดทดลองทั้งหมด 400 ml ทำการทดลองภายใต้สภาวะแบบไร้อากาศแบบกะ มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 35 ± 2 °C โดยใช้ฮีตเตอร์ น้ำ และปั๊ม ที่ให้ความร้อนและกระจายความร้อนในการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งในการทดลองมีระยะเวลา 60 days มีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ pH VFA Alk TS และ VS ทั้งก่อนและหลังการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 และทำการเก็บก๊าซชีวภาพที่ได้จากระบบทุกวัน มีการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซสัปดาห์ละครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 1,000 mL

ตัวอย่างชุดขวดหมักชีวภาพขนาด 1,000 mL แสดงดังภาพที่ 11 และวิธีวัดปริมาณและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพแสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 11 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 1,000 mL

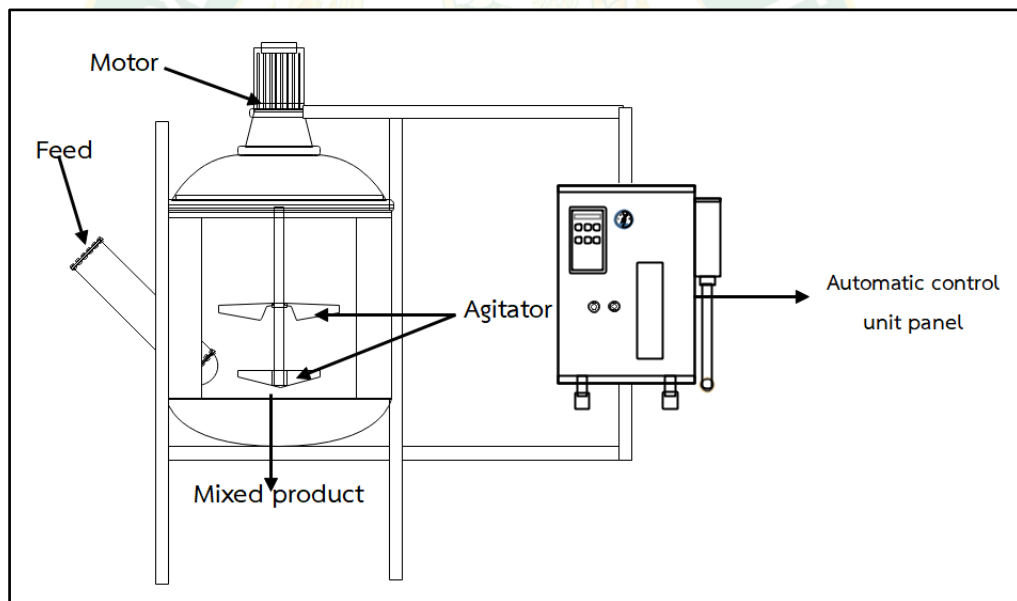


ภาพที่ 12 วิธีวัดปริมาตรและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

การทดสอบในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างขนาด 30 mL

ส่วนที่ 1 ถังปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง

สำหรับถังปฏิกรณ์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในภาพที่ 13 และภาพที่ 14 ถูกออกแบบให้มีลักษณะของถังปฏิกรณ์เป็นทรงกระบอก และบริเวณของก้นถังเป็นก้นกลม เพื่อให้วัตถุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถผสมเข้ากันอย่างทั่วถึง โดยขนาดของถังปฏิกรณ์ที่ใช้จะมีปริมาตรโดยรวม เท่ากับ 30 L ในกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ทำให้เกิดสารประกอบอินทรีย์ที่มีฤทธิ์เป็นกรดหลากหลายชนิด ทำให้ความเป็นกรดภายในระบบสูง ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาในการกักความร้อนของวัสดุที่ใช้สร้าง ดังนั้นถังปฏิกรณ์ที่ใช้ต้องมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการทางเคมี



ภาพที่ 13 แผนภาพระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 30 L



ภาพที่ 14 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 30 L

ส่วนที่ 2 ระบบการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน

สำหรับระบบการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนภายในระบบ ดังแสดงในภาพที่ 13 มีการกำหนดระยะเวลาในการกวนผสมทุก ๆ 45 min โดยทำการกวนรอบละ 15 min เนื่องจากการกวนผสมส่งผลให้จุลินทรีย์และสารอินทรีย์ในระบบสามารถกระจายตัวเข้ากันได้อย่างทั่วถึง ซึ่งส่งผลโดยตรงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น (ศักรินทร์ หมูเทพ, 2555) ถึงอัตราการกวนผสมในช่วงนี้จะส่งผลโดยตรงให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพลดลง อย่างไรก็ตามการใช้อัตราการกวนน้อยที่สุดจะดีกว่าการกวนแบบต่อเนื่องตลอดเวลา

ส่วนที่ 3 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

การเก็บรวบรวมก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ถูกเก็บไว้ในถุงเก็บก๊าซชีวภาพที่ทำการออกแบบให้มีการเชื่อมต่อเข้ากับตัวถังปฏิกรณ์ เพื่อให้สะดวกต่อการวัดปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นคือ ก๊าซชีวภาพจะไหลออกจากถังปฏิกรณ์มาเข้าไปยังถุงเก็บก๊าซชีวภาพ จากนั้นจะทำวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยการนำก๊าซชีวภาพที่อยู่ในถุงเก็บก๊าซมาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ (Biogas Analyzer) ซึ่งสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ประกอบด้วย ก๊าซมีเทน (Methane, CH₄), คาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide, CO₂) และ ออกซิเจน (Oxygen, O₂) ในหน่วย % และ ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (Hydrogen sulfide, H₂S) ในหน่วย ppm ตามลำดับ และสำหรับการพิจารณา

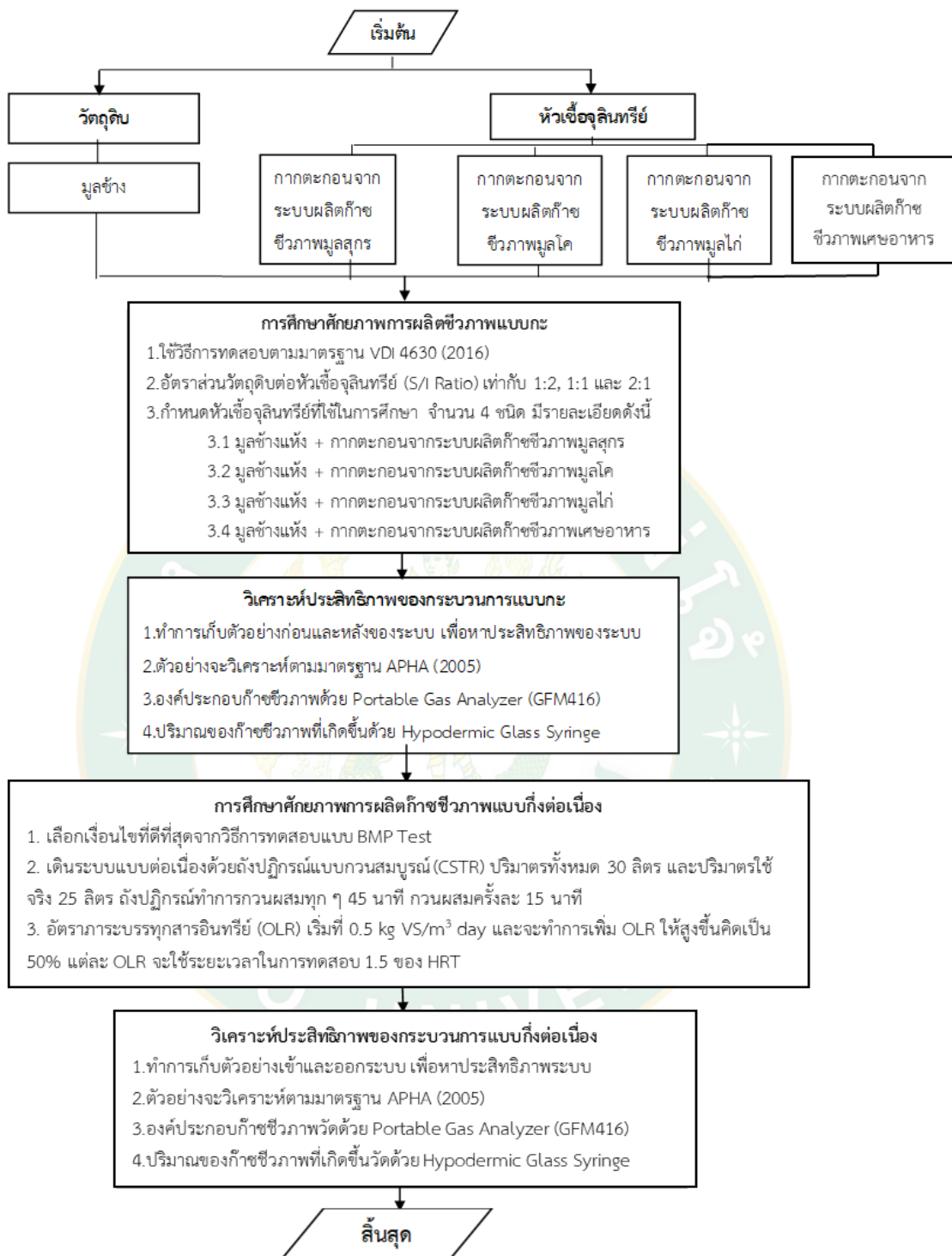
ปริมาณของถังเก็บก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่า BMP ที่ทำการทดลองในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ขนาด 1,000 mL ของมูลช้าง

วิธีการทดลองในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างขนาด 30 mL

สำหรับการทดสอบการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบมูลช้างด้วยกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบกะ ขนาด 30 L ปริมาตรใช้งาน 25 L ระยะเวลาการทดลอง 80 days โดยการทดลองจะกำหนดอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนทุก ๆ 45 min รอบละ 15 min ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ได้แก่ pH VFA Alk TS และ VS ทั้งก่อนและหลังการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 และทำการเก็บก๊าซชีวภาพที่ได้จากระบบทุกวัน มีการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซสัปดาห์ละครั้ง ดังแสดงในภาพที่ 10 โดยมีขั้นตอนการทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างในระบบขนาด 1,000 mL และ 30 L ที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในภาพที่ 15

การวิเคราะห์ผลการทำงานของระบบก๊าซชีวภาพ

เพื่อหาปริมาณและประสิทธิภาพของก๊าซชีวภาพรวมทั้งปริมาณและประสิทธิภาพของก๊าซมีเทนที่สามารถผลิตได้จากระบบโดยจะทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบของระบบ จากสมการที่ 1 นำเสนอในทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง สามารถเขียนขั้นตอนการทำการวิเคราะห์ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้าง ประกอบด้วย ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน ตามลำดับ



ภาพที่ 15 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบผลของการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นของวัดคุณภาพ
อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือ	ชื่อเครื่องมือ	ยี่ห้อ/รุ่น
	เครื่องวิเคราะห์ก๊าซแบบพกพา	GFM416; Gas Data Limited, United Kingdom
	เครื่องไมโครคอนโทรลเลอร์	MP 112; KIMO Instrument, France
	เครื่องชั่งเชิงวิเคราะห์ Nimbus® (4 ตำแหน่ง)	Nimbus®; NBL 254i
	Magnetic Stirrer & Heater	Slendor Magnetic Stirrer SH-2 Hot
	Desiccators	
	Hot Air Oven (ตู้อบลมร้อน)	Binder; FD115

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

สำหรับการพัฒนาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างโดยใช้หัวเชื้อกากตะกอนจากระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ สามารถแบ่งหัวข้อในการวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 4 หัวข้อ ดังนี้

หัวข้อที่ 1 คุณสมบัติของวัตถุดิบมูลช้างที่ใช้ในการทดลอง

หัวข้อที่ 2 คุณสมบัติของหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง

หัวข้อที่ 3 ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการแบบกะ ขนาด 1,000 ml

หัวข้อที่ 4 ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศในขนาด 30 L แบบกึ่งต่อเนื่อง

คุณสมบัติของวัตถุดิบมูลช้างที่ใช้ในการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบมูลช้างที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งในปางช้างด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ขนาด 1,000 mL ดังแสดงในตารางที่ 3 คุณลักษณะของวัตถุดิบมูลช้าง พบว่า ค่า pH เท่ากับ 7.30 เนื่องจากมูลช้างมีการเปลี่ยนแปลงด้วยการย่อยของเอนไซม์ของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการตกตะกอนที่เรียกว่ากรดแล็กติกได้ยาก จึงทำให้มีค่าค่อนข้างเป็นกลาง (Malini et al., 2015) โดยมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sawatdeenarunat et al. พบว่า ค่า pH มูลช้างมีค่าเป็นกลางอยู่ในช่วง 6.80-7.30 และเนื่องจากมูลช้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยหญ้าเนเปียร์ที่เป็นกลุ่มลิกโนเซลลูโลส มีองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด คือ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน (Thaemngoan et al., 2020) ทำให้ในสัดส่วนปริมาณของแห้งทั้งหมด และของแห้งระเหยได้ ที่ได้ทำการวิเคราะห์ มีค่าเท่ากับ 92.32% และ 74.40% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยอัตราส่วน VS/TS เท่ากับ 0.81 ซึ่งค่าอัตราส่วน VS/TS ที่ได้เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศ โดยค่าอัตราส่วน VS/TS มาตรฐานจะอยู่ในช่วง 0.69-0.95 (Aditi et al., 2018)

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของวัตถุดิบมูลช้าง

คุณสมบัติ	หน่วย	ปริมาณ
pH	-	7.30
TS	mg/L	923,182.96
VS	mg/L	743,986.70
VS/TS Ratio	-	0.81
C/N Ratio	-	54/1

คุณสมบัติของหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง

ผลจากวิเคราะห์คุณสมบัติของหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง 4 ชนิด ได้แก่ กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลไก่ และกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเศษอาหาร มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนี้

ตารางที่ 4 คุณสมบัติของกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

คุณสมบัติ	หน่วย	ปริมาณกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ			
		มูลสุกร	มูลโค	มูลไก่	เศษอาหาร
pH	-	7.03	7.05	9.31	7.65
Chemical Oxygen Demand (COD)	mg/L	16,848.00	17,612.00	15,408.00	9,648.00
C/N Ratio	-	9.31/1	5/1	0.2/1	8/1
TS	mg/L	70,953.33	62,090.00	40,085.00	150,715.00
VS	mg/L	43,266.67	40,965.00	17,360.00	60,505.00
VS/TS Ratio	-	0.61	0.66	0.43	0.89
VFA	mg CH ₃ OOH/L	1,042.17	2,982.13	2,844.12	756.02
Alk	mg CaCO ₃ /L	4,685.76	6,276.23	14,036.00	2,784.10
VFA/Alk Ratio	mg CH ₃ OOH/mg CaCO ₃	0.25	0.47	0.20	0.27

โดยหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร และกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค มีลักษณะก่อนการทดลองแสดงในตารางที่ 4 กากตะกอนข้างต้นที่ได้กล่าวมามีค่า pH ค่อนข้างเป็นกลาง (Sawatdeenarunat et al., 2021) คือ 7.03, 7.05 และ 7.65 ตามลำดับ โดยหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลไก่ ค่าเป็นต่าง เนื่องจากหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลไก่เป็นหัวเชื้อที่ผ่านกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศทำให้มีแอมโมเนียที่สูง ทำให้เกิดกระบวนการสร้างเอนไซม์ย่อยจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดกรดจากแบคทีเรียที่สร้างกรดแล็กติกได้ช้า (Wu et al., 2016) เป็นผลให้หัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลไก่มีค่า pH เท่ากับ 9.31 และมีค่า TS เท่ากับ 0.62%, 0.71%, 0.40% และ 1.51% ตามลำดับ สำหรับหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลไก่ และกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเศษอาหาร และมีค่า VS มีค่าเท่ากับ 0.41%, 0.44%, 0.17% และ 0.61% ตามลำดับ สำหรับ VFA/ALK เท่ากับ 0.47, 0.25, 0.20 และ 0.27 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือน้อยกว่า 0.40 (Chen, 2018) เนื่องจาก VFA/ALK ที่เหมาะสมในการหมักย่อยแบบไร้อากาศที่จะมีค่าน้อยกว่า 0.40 และกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพทั้ง 4 ชนิด ที่ผ่านการหมักย่อยสลายในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศจะมีความคงตัวทางชีวภาพในกรณีที่ไม่ใช้อากาศมากกว่าการใช้วัตถุดิบที่ถูกนำมาใช้เป็นหัวเชื้อโดยตรง อย่างเช่นมูลสัตว์ต่าง ๆ เนื่องจากจุลินทรีย์จากหัวเชื้อกากตะกอนอาศัยอยู่ในระบบที่มีสภาวะแวดล้อมเหมือนกัน ทำให้มีประสิทธิภาพในการใช้เป็นหัวเชื้อมากกว่ามูลสัตว์ที่ไม่ได้ผ่านการหมักแบบไร้อากาศมาก่อน (Dhamodharan et al., 2015)

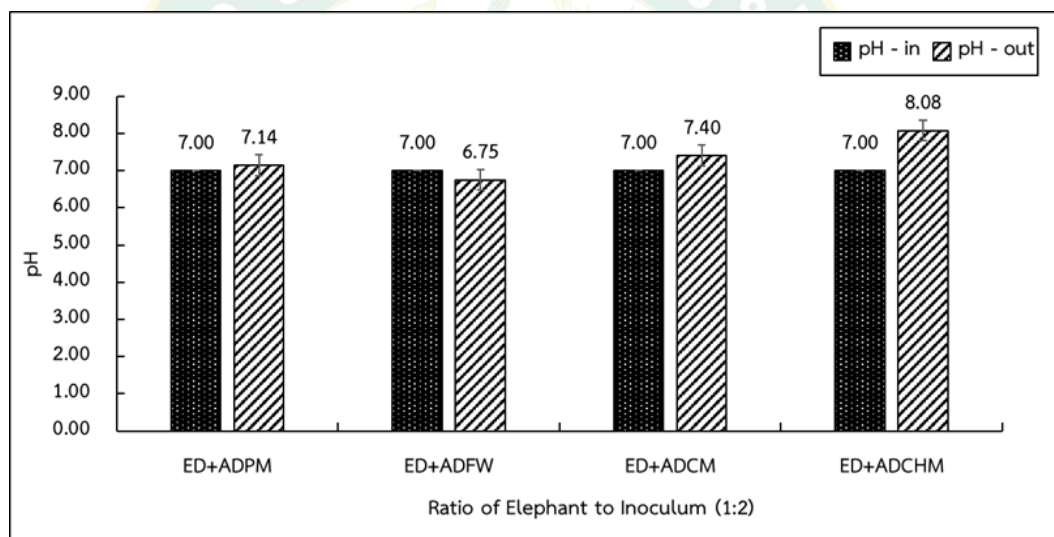
ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการแบบกะ ขนาด 1,000 ml

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมีที่มีสภาวะมาตรฐานของ VDI4630 โดยทำการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน 4 ชนิด คือ กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลไก่ และกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเศษอาหาร โดยได้ทำการศึกษาอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อในการทดลอง 3 อัตราส่วน ได้แก่ 1:2, 1:1 และ 2:1 ตามลำดับ ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อในทุกอัตราส่วนก่อนและหลังการทดลอง ได้แก่ pH, TS, VS, VFA และ Alk ทำการเก็บก๊าซชีวภาพที่ได้จากระบบทุกวัน และเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์หองค์ประกอบก๊าซชีวภาพสัปดาห์ละครั้ง จนครบระยะเวลาในการทดลอง

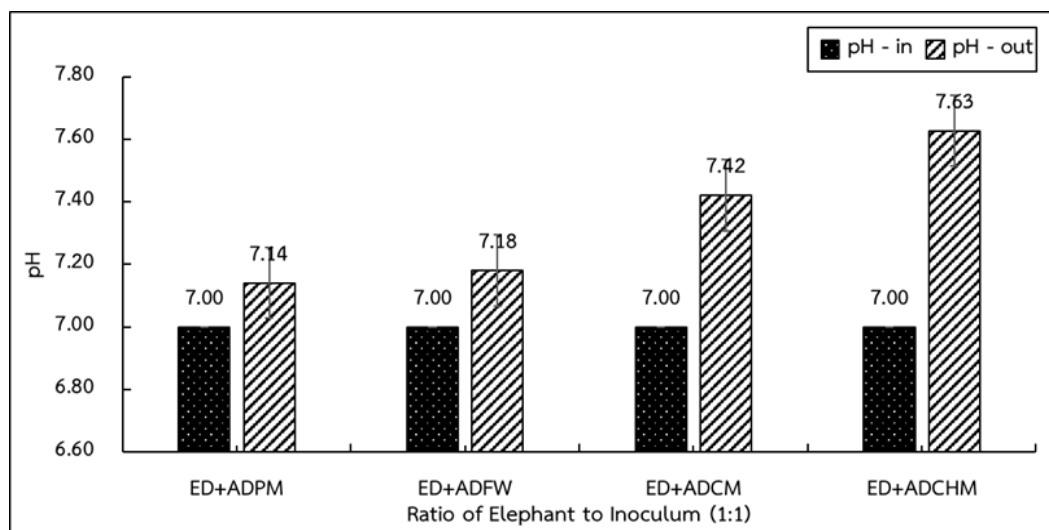
ที่ 60 days ด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ผลการทดลองและการวัดค่าต่าง ๆ มีรายละเอียดในการวิเคราะห์ผลการทดลองดังนี้

1. ค่าความเป็นกรด-ด่าง

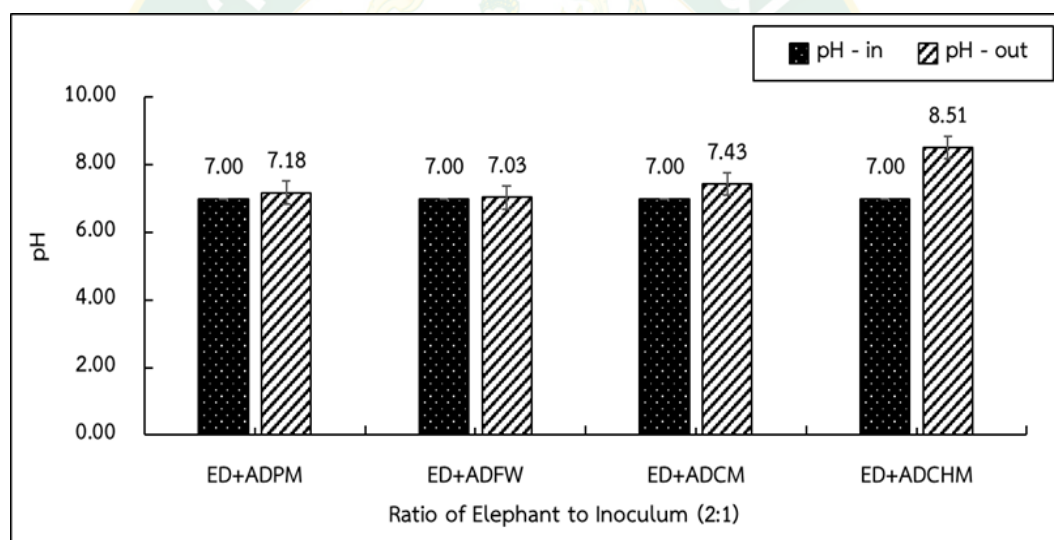
จากการศึกษาศักยภาพการผลิตมีเทนของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการศึกษาวัตถุดิบมูลช้าง ที่ทำการหมักด้วยหัวเชื้อที่แตกต่างกัน 4 ชนิด ได้แก่ หัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค มูลสุกร มูลไก่ และเศษอาหาร โดยมีระยะเวลาการหมัก 60 days ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 16



a. ค่า pH อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2



b. ค่า pH อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1



c. ค่า pH อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1

ภาพที่ 16 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้ออากาศก่อนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. ค่า pH อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. ค่า pH อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. ค่า pH อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1)

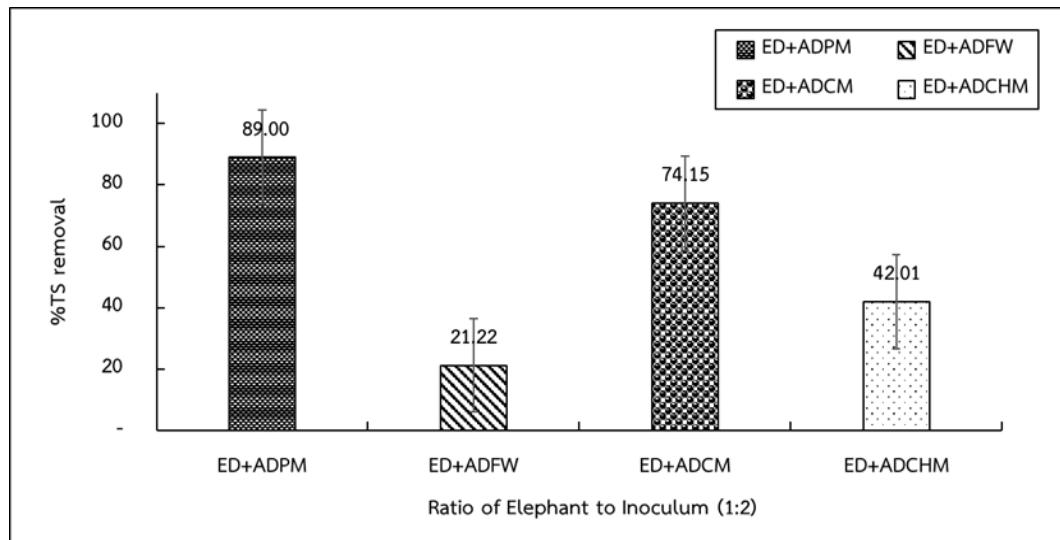
จากภาพที่ 16 แสดงผลการศึกษาค่า pH ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้ออากาศก่อนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน ในอัตราส่วนการทดลองที่ 1:2, 1:1 และ 2:1 โดยจากการทดลองได้ปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง ก่อนทำการทดลองในทุกอัตราส่วนผสมด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 0.1 M ให้มีค่าอยู่ในช่วง 6.9-7.2 (Raposo et al.,2006) ซึ่งเป็นค่าที่

เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน เนื่องจากถ้าค่า pH สูงกว่า 7.60 หรือต่ำกว่า 6.60 จะส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพราะสภาวะนี้เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน (Chandra et al., 2012b ; นฤมล เชาวะระโทก, 2556) โดยค่า pH หลังจากการทดลองพบว่า อัตราส่วนวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร มูลโค และเศษอาหารที่ 1:2, 1:1 และ 2:1 มีค่า pH อยู่ในช่วงที่ 6.75-7.43 เนื่องจากจุลินทรีย์มีการสร้างกรดอินทรีย์และสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้ง่าย โดยไม่มีการสะสมของกรดอินทรีย์ขึ้นในระบบทำให้ค่า pH ยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน (นฤมล เชาวะระโทก, 2556) ส่วนวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลไก่ พบว่าค่า pH อยู่ในช่วง 7.63-8.51 ซึ่งมีค่าเป็นต่างเกิดจากจุลินทรีย์มีการผลิตไนโตรเจนที่ถูกปล่อยออกมาสะสมในรูปแอมโมเนียทำให้มีค่าความเป็นด่างเพิ่มขึ้นถึง 8.50 และไปยับยั้งจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน ส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่ำลง (Córdoba et al., 2018) โดยวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในทุกอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ทำการทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Malini, 2016) ที่พบว่า ค่า pH ที่เพิ่มขึ้นยังคงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ โดยการเปลี่ยนแปลงของค่า pH มีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยเฉพาะในขั้นตอนการผลิตมีเทน ค่า pH ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 6.8-7.2 เป็นสภาวะที่เหมาะสม และหากค่า pH ในระบบมีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่าดังกล่าว จะส่งผลให้มีประสิทธิภาพการผลิตชีวภาพลดลง (จุฑาภรณ์ ชนะถาวร, 2560) ซึ่งจากภาพที่ 16a, 16b. และ 16c. แสดงให้เห็นชัดเจนว่าหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรมีค่า pH อยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามทฤษฎีที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงถือได้ว่าหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรสามารถนำมาใช้เป็นหัวเชื้อในการผลิตก๊าซชีวภาพได้มีประสิทธิภาพดีที่สุดในบรรดาหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบการหมักย่อยแบบไร้อากาศที่นำมาทำการทดลอง เนื่องจากการทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบการหมักแบบไร้อากาศนั้น ค่า pH มีความสำคัญต่อการทำงานของระบบเนื่องจากบ่งบอกสภาวะความเป็นกรดและด่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (Malini, 2016)

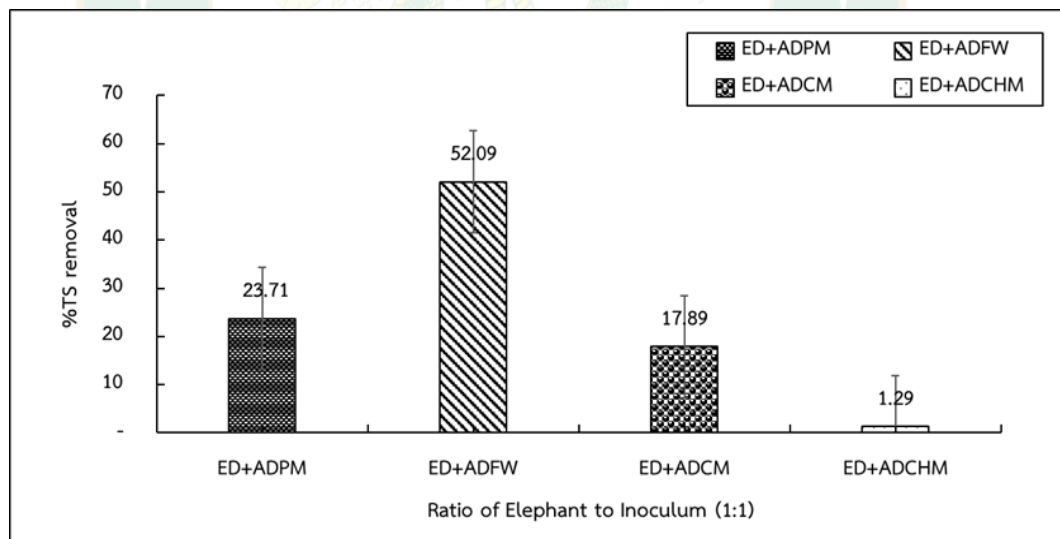
2. การบำบัดของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยง่าย

จากภาพที่ 17 แสดงผลการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และของแข็งระเหยง่าย (VS) ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน 4

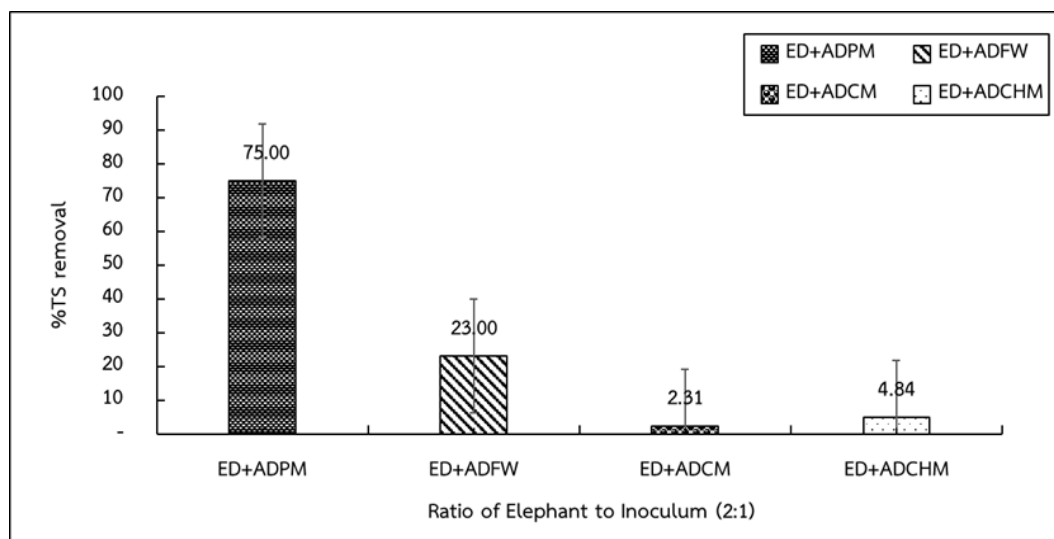
ชนิด ได้แก่ หัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค มูลสุกร มูลไก่ และเศษอาหาร โดยทำการศึกษาในอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ 1:2, 1:1 และ 2:1 จากระยะเวลาการหมัก 60 days ผลการศึกษาแสดงดังภาพที่ 17 และภาพที่ 18



a. %TS_{removal} อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2



b. %TS_{removal} อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1

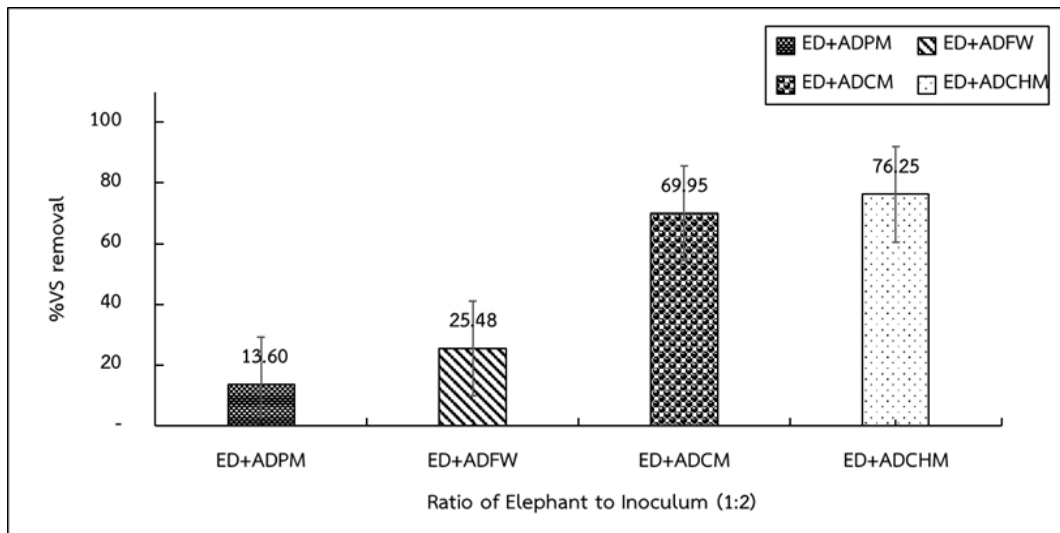


c. $\%TS_{\text{removal}}$ อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1

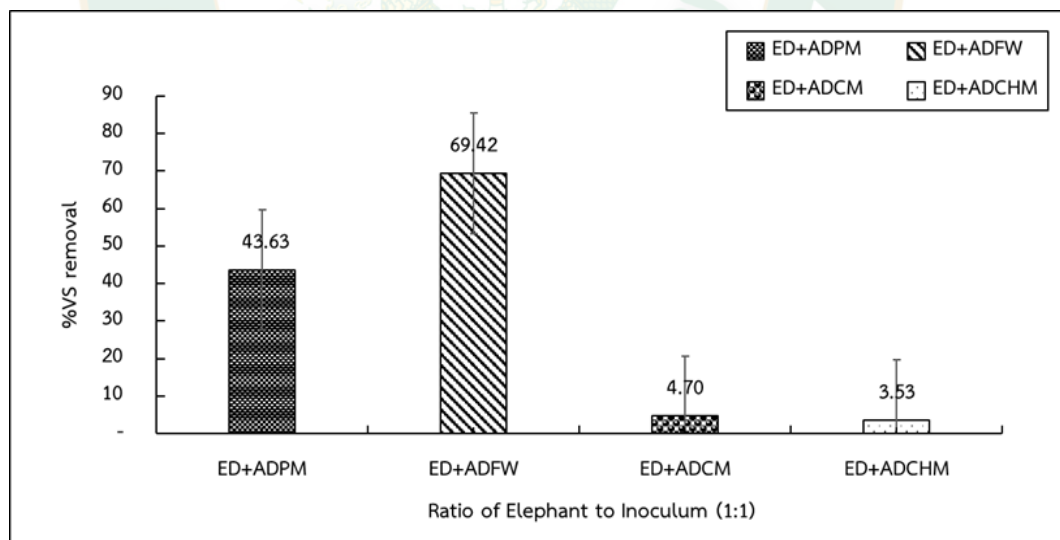
ภาพที่ 17 การกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. $\%TS_{\text{removal}}$ อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. $\%TS_{\text{removal}}$ อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. $\%TS_{\text{removal}}$ อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1)

จากการทดลองในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในระยะเวลาการหมัก 60 days พบว่า ในอัตราส่วนวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ทั้ง 4 ชนิด มีค่า TS ก่อนเข้าระบบสำหรับอัตราส่วนในการศึกษาที่ 1:2 1:1 และ 2:1 อยู่ในช่วง 10,475.00-68,955.00 mg/L, 12,740.00-42,745.00 mg/L และ 31,850.00-66,260.00 mg/L ตามลำดับ และมีค่า TS หลังออกระบบมีค่าอยู่ในช่วง 7,140.00-16,160.00 mg/L, 6,250.00-30,500.00 mg/L และ 27,005.00-64,745.00 mg/L ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า TS มีปริมาณลดลงหลังจากผ่านกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศที่เกิดจากการย่อยของจุลินทรีย์ (Thaemngoen et al., 2020) โดยจากภาพที่ 17 แสดงผลของการกำจัดปริมาณ TS ระหว่างการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค มูลสุกร มูลไก่ และเศษอาหาร ในอัตราส่วนที่ 1:2, 1:1 และ 2:1 อยู่ในช่วง 21.22-89.00%, 1.29-52.09% และ 2.31-23.00% ตามลำดับ โดยค่าการกำจัดปริมาณ TS เป็นหนึ่งในตัวบ่งบอกถึงลักษณะของประสิทธิภาพในการย่อยสลายหรือลดปริมาณของเสียในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศซึ่งสอดคล้องกับอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในอัตราส่วนที่มีปริมาณของวัตถุดิบ (Córdoba et al., 2018) โดยผลการวิเคราะห์ในภาพที่ 17a. การกำจัดค่า TS ในอัตราส่วนที่ 1:2 แสดงให้เห็นว่า การหมักระหว่างวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรที่มีอัตราส่วนของหัวเชื้อในปริมาณที่มากกว่าวัตถุดิบมีผลการกำจัดปริมาณ TS ได้มากกว่า เมื่อ

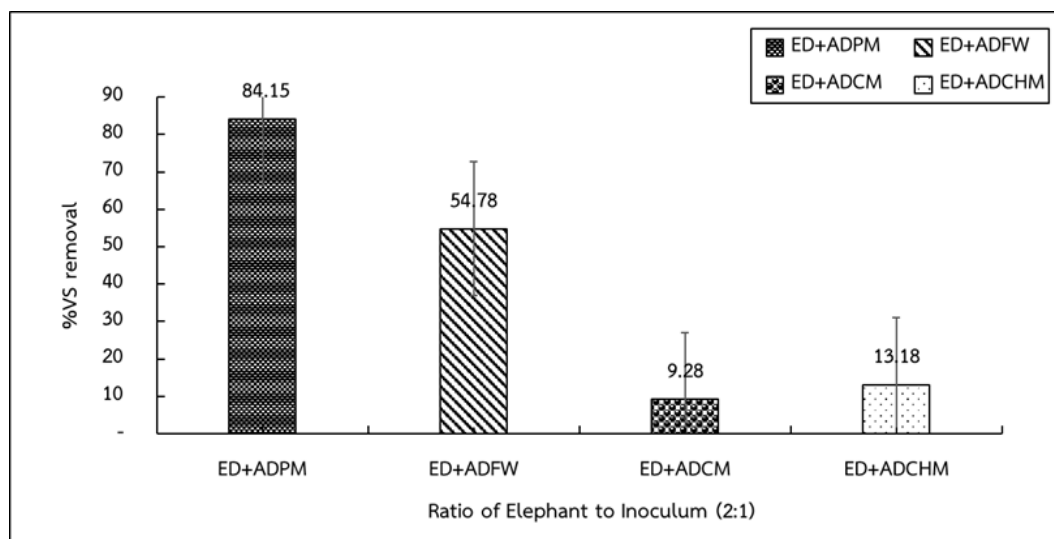
เทียบกับอัตราส่วน 1:1 และ 2:1 ที่มีวัตถุดิบมากกว่าปริมาณของหัวเชื้อ แต่เมื่อวัตถุดิบอยู่ในระบบหมักนานขึ้นจึงทำให้เกิดกระบวนการไฮโดรไลซิสได้นานและสามารถย่อยสลาย TS ได้เพิ่มขึ้น (Thaemngoen et al., 2020) โดยมีความสอดคล้องกับปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันของระบบผลิตก๊าซชีวภาพในภาพที่ 22



a. %VS_{removal} อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2



b. %VS_{removal} อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1



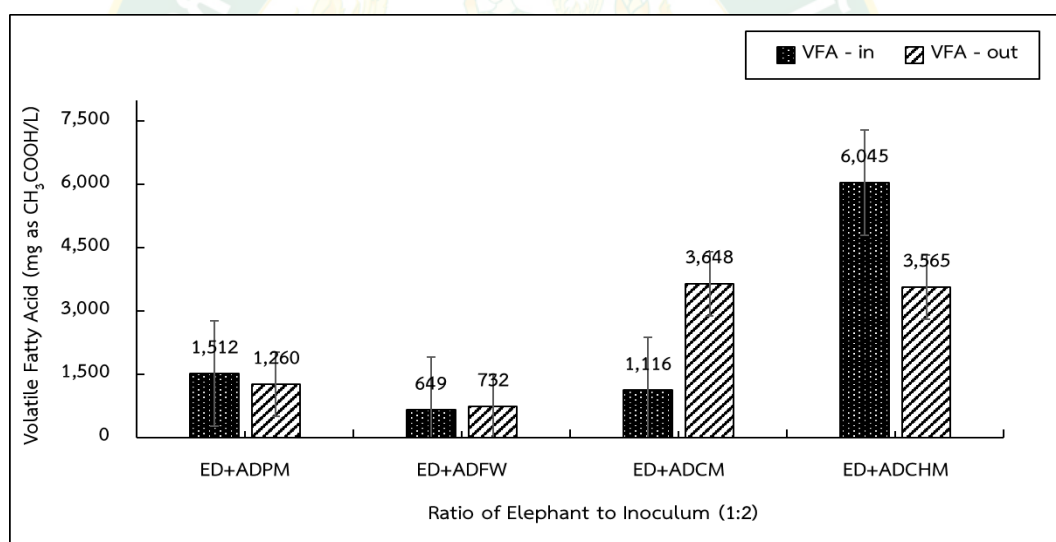
c. $\%VS_{\text{removal}}$ อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1

ภาพที่ 18 การกำจัดปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. $\%VS_{\text{removal}}$ อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. $\%VS_{\text{removal}}$ อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. $\%VS_{\text{removal}}$ อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1)

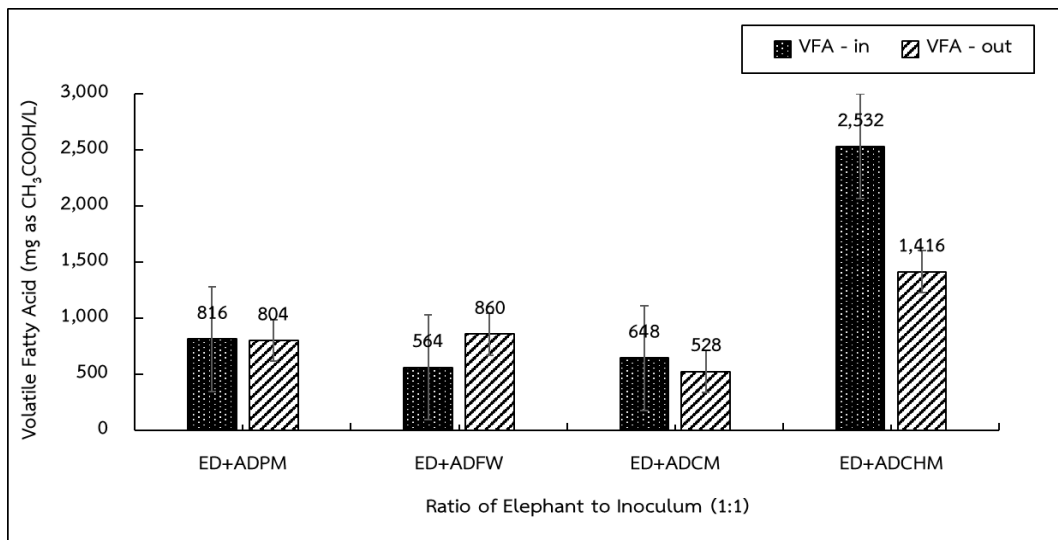
สำหรับผลการทดลองในส่วนของประสิทธิภาพ $\%VS_{\text{removal}}$ จะสอดคล้องกับการกำจัด TS ซึ่งสามารถสังเกตเห็นว่า อัตราส่วนวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ต่างกัน ทั้ง 4 ชนิด ในภาพที่ 18 มีการกำจัดปริมาณ VS ในอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ 1:2, 1:1 และ 2:1 มีค่าอยู่ในช่วง 25.48-91.35%, 1.29-52.09% และ 1.18-54.78% ตามลำดับ สำหรับหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร มูลโค มูลไก่ และเศษอาหาร โดยจากการวิเคราะห์จะพบว่าอัตราส่วนที่มีปริมาณวัตถุดิบมูลช้างน้อยกว่าหัวเชื้อ มีผลการกำจัดปริมาณ VS ที่สูง ดังแสดงในภาพที่ 17a. ซึ่งตรงข้ามกับอัตราส่วนวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อที่ 2:1 ในภาพที่ 18c. มีการกำจัดปริมาณ VS ที่ต่ำ เนื่องจากการย่อยสลาย VS ขึ้นอยู่กับกระบวนการไฮโดรไลซิสที่จุลินทรีย์จะทำการสร้างเอนไซม์ที่ทำการสร้างกรดมาทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในการสร้างมีเทน ซึ่งแปรผันตรงกับค่า TS_{removal} และค่า VS_{removal} ยังบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ที่ทำการย่อยสลายในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้ (ณัฐวุฒิ ดุษฎี และคณะ, 2557) โดยจุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์และสร้างก๊าซมีเทนได้มากขึ้นตามระยะเวลาการทดลองที่นานขึ้น (ธนพร วิชัย และวรรรัตน์ ปัตร์ประกร, 2554)

3. ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) และค่าความเป็นด่าง (Alk) ในระบบการหมักก๊าซชีวภาพ

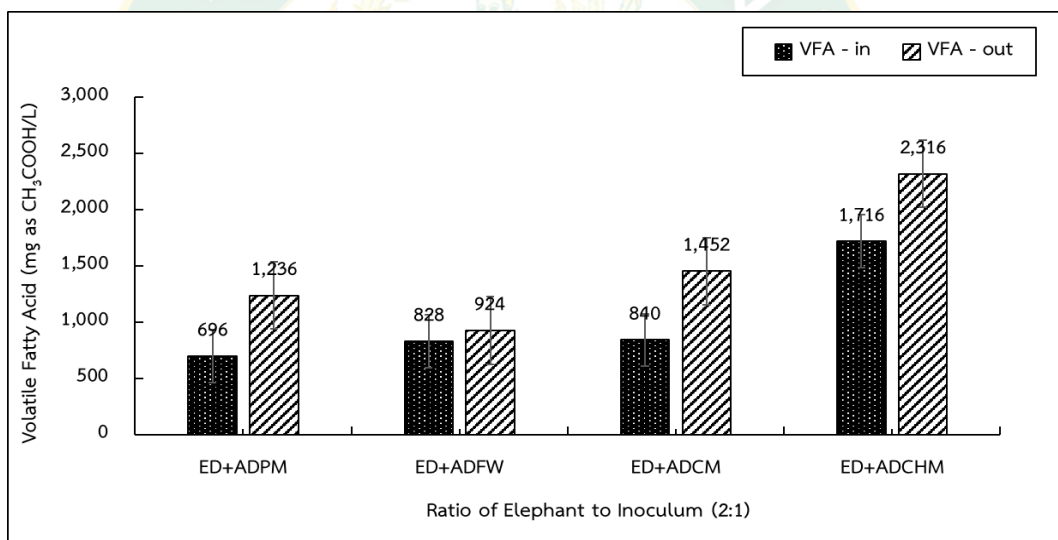
สำหรับค่า VFA เป็นสารอินทรีย์ชนิด โพรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต เป็นต้น โดยสารอินทรีย์เหล่านี้เมื่อเข้าสู่กระบวนการหมักแบบไร้อากาศจะถูกจุลินทรีย์ กลุ่มสร้างกรด เช่น กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิกและกรดบิวทิริก นำไปใช้เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงาน (นฤมล เชาวะกรโทก, 2556) และค่า Alk เป็นค่าที่บ่งบอกความเป็นด่างในระบบหมักแบบไร้อากาศ ส่วนใหญ่อยู่ในรูปไบคาร์บอเนต โดยบอกถึงความสามารถของน้ำหรือของเหลวในการรับโปรตอนที่เกิดมาจากการทำปฏิกิริยาของระหว่างแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2557) ความเป็นด่างนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงบัฟเฟอร์ที่ดีให้แก่ระบบที่จะควบคุม pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ในระบบของการผลิตก๊าซชีวภาพระหว่างวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อและอัตราส่วนในการทดลองที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 19



a. ค่า VFA อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2



b. ค่า VFA อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1

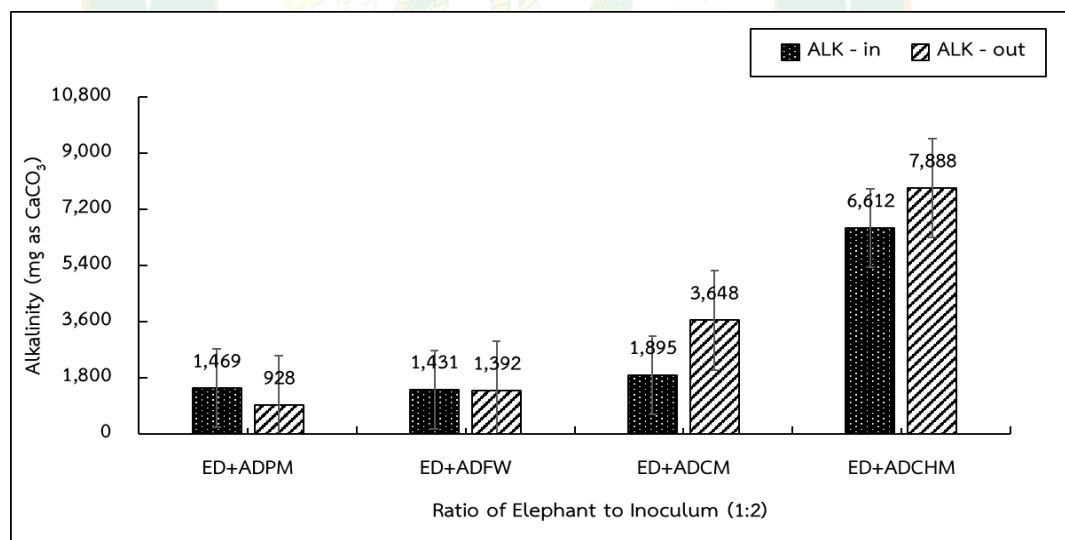


c. ค่า VFA อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1

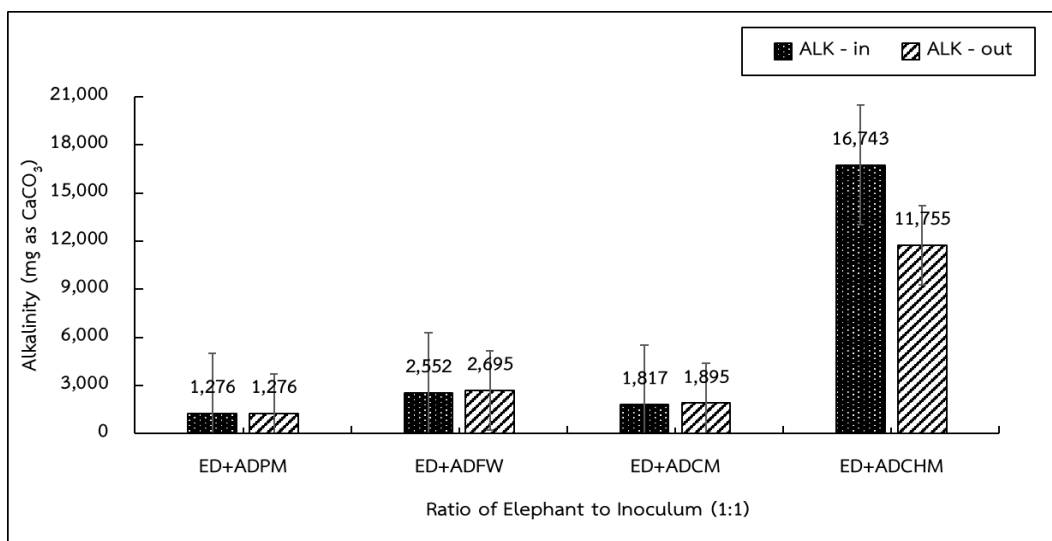
ภาพที่ 19 ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. ค่า VFA อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. ค่า VFA อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. ค่า VFA อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1)

จากภาพที่ 19 ค่า VFA ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร มูลโค มูลไก่ และเศษอาหาร ในการทดลองอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อหัวเชื้อเท่ากับ 1:2 1:1 และ 2:1 ตามลำดับ พบว่าค่า VFA ที่ได้ทำการวิเคราะห์ก่อนเข้าระบบมีค่าอยู่ในช่วง 649-6,045 mg CH₃COOH/L, 564-2,532 mg CH₃COOH/L และ 696-1,716 mg CH₃COOH/L

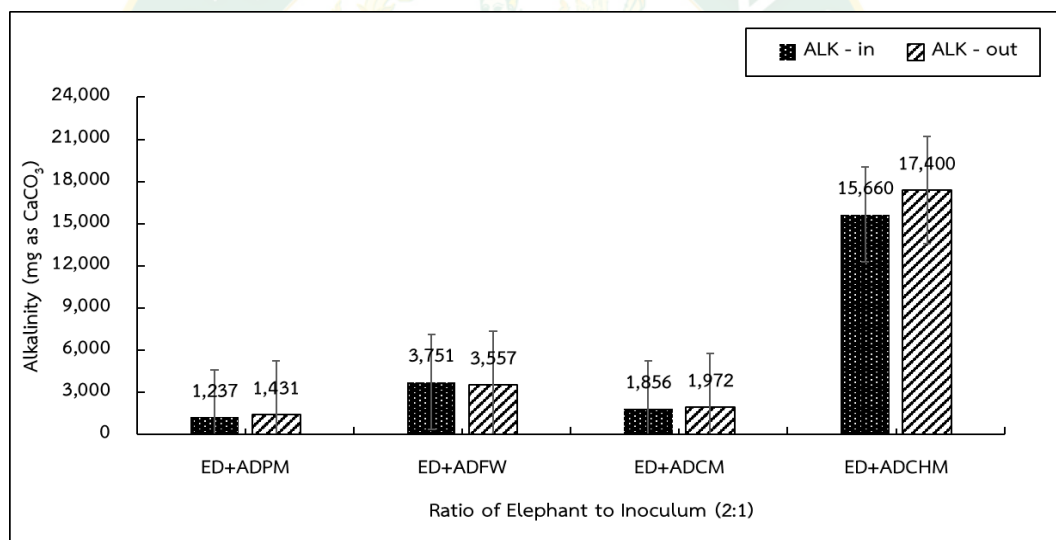
ตามลำดับ และมีค่าหลังออกระบบเท่ากับ 732-3,648 mg $\text{CH}_3\text{COOH/L}$, 528-1,416 mg $\text{CH}_3\text{COOH/L}$ และ 924-2,316 mg $\text{CH}_3\text{COOH/L}$ ตามลำดับ พบว่า ค่า VFA ก่อนเข้าระบบของอัตราส่วนวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลไก่มีค่าสูงกว่า 800 mg/L ที่เป็นค่า VFA มาตรฐานที่บ่งบอกถึงค่าความเป็นกรดสูง ที่อาจส่งผลให้ระบบมีค่าบัฟเฟอร์สูงส่งผลให้ค่า pH ลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุให้ระบบล้นเหลว (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์ พลังงานกระทรวงพลังงาน, 2557) ซึ่งมีความสอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพที่ระบบสามารถผลิตได้ โดยวิธีการแก้ไขสามารถทำได้โดยลดอัตราการป้อนสารอินทรีย์ลง การเติมสารปรับสภาพและเพิ่มระยะเวลาในการกักเก็บ (นฤมล เชาวกระโทก, 2556 ; จุฑาภรณ์ ชนะถาวร, 2560) และหลังจากที่จุลินทรีย์สามารถปรับตัวเข้ากับระบบได้ค่า VFA จะเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ มีค่าต่ำกว่า 2,000 mg/L โดยจากภาพที่ 19 พบว่าอัตราส่วนวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร มีค่า VFA หลังออกระบบน้อยกว่าก่อนเข้าระบบ ซึ่งแสดงถึงปริมาณกรดที่สะสมภายในระบบและกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ดี เนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะบอกถึงความสมดุลในการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายกับจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างก๊าซมีเทน (ชุตินา คุณภักดีตร, 2560)



a. ค่า Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2



b. ค่า Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1

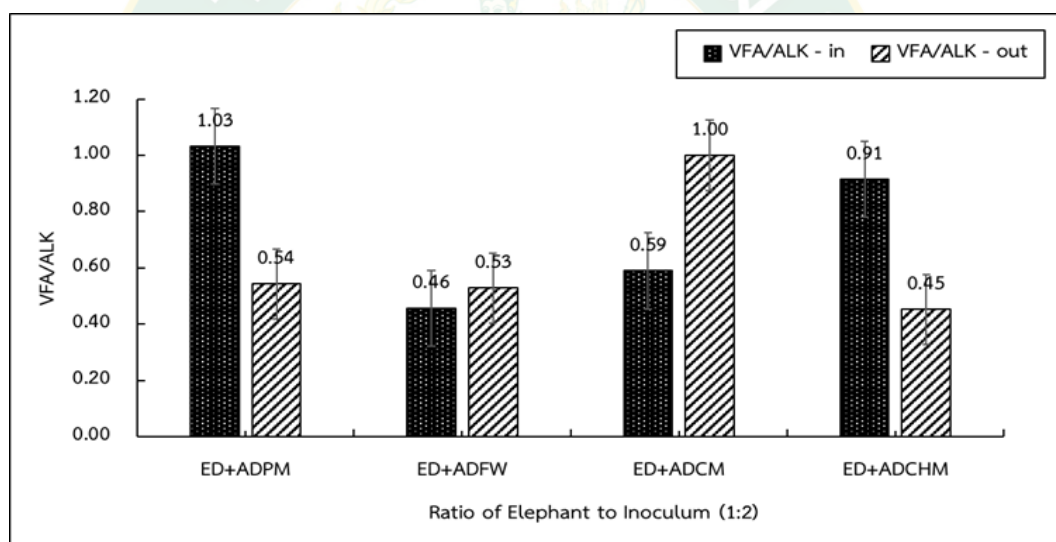


c. ค่า Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1

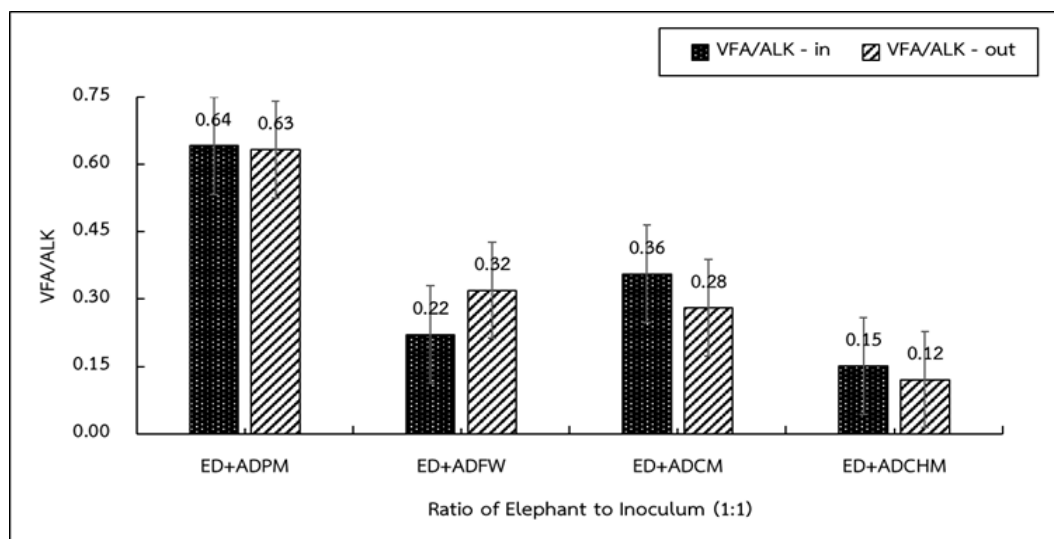
ภาพที่ 20 ค่าความเป็นด่าง (Alk) ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. ค่า Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. ค่า Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. ค่า Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1)

จากภาพที่ 20 พบว่า ค่า Alk ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน 4 ชนิด ได้แก่ หัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค มูล

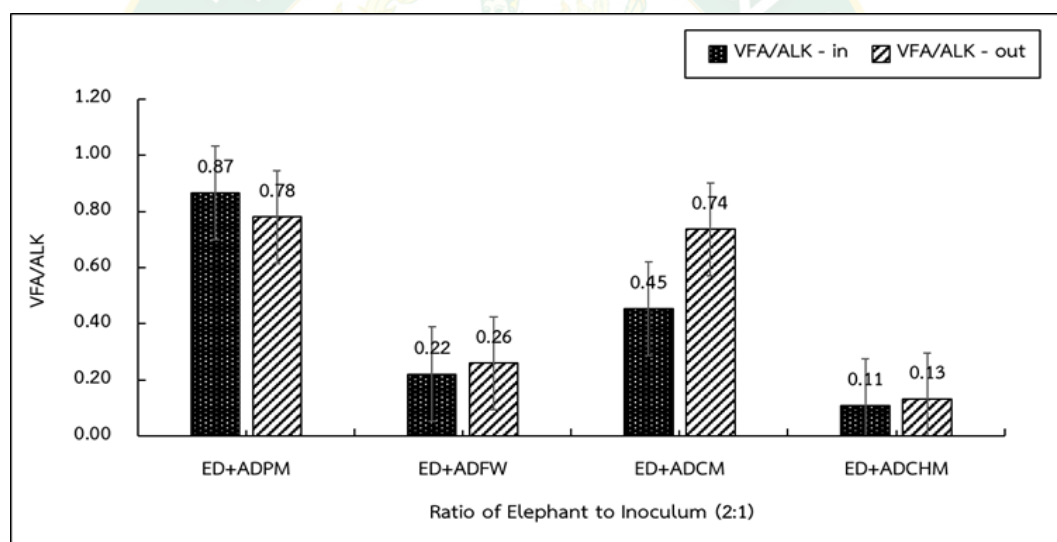
สุกร มูลไก่ และเศษอาหาร ในการทดลองอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อหัวเชื้อเท่ากับ 1:2, 1:1 และ 2:1 ตามลำดับ พบว่าค่า Alk ก่อนเข้าระบบอยู่ในช่วง 1,431-6,612 mg CH₃COOH/L, 1,276-16,743 mg CH₃COOH/L และ 1,237-15,660 mg CH₃COOH/L ตามลำดับ และมีค่าหลังออกระบบเท่ากับ 928-7,888 mg CH₃COOH/L, 1,276-11,755 mg CH₃COOH/L และ 1,431-17,400 mg CH₃COOH/L ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนที่ 1:2, 1:1 และ 2:1 ตามลำดับ พบว่า ค่า Alk หลังการทดลองของทุกอัตราส่วนยังคงมีค่า Alk อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์อยู่ในช่วง 2,000–3,000 mg CaCO₃/L (ชุตินา คุณภักดีตร, 2560) โดยค่าความเป็นด่างนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงบัฟเฟอร์ที่ดีให้แก่ระบบที่จะควบคุม pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ค่าความเป็นด่างในระบบย่อย สลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศจะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต (ปฏิรูป ผลจันทร์ และคณะ, 2557 ; และชุตินา คุณภักดีตร, 2560)



a. ค่า VFA/Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2



b. ค่า VFA/Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1



c. ค่า VFA/Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1

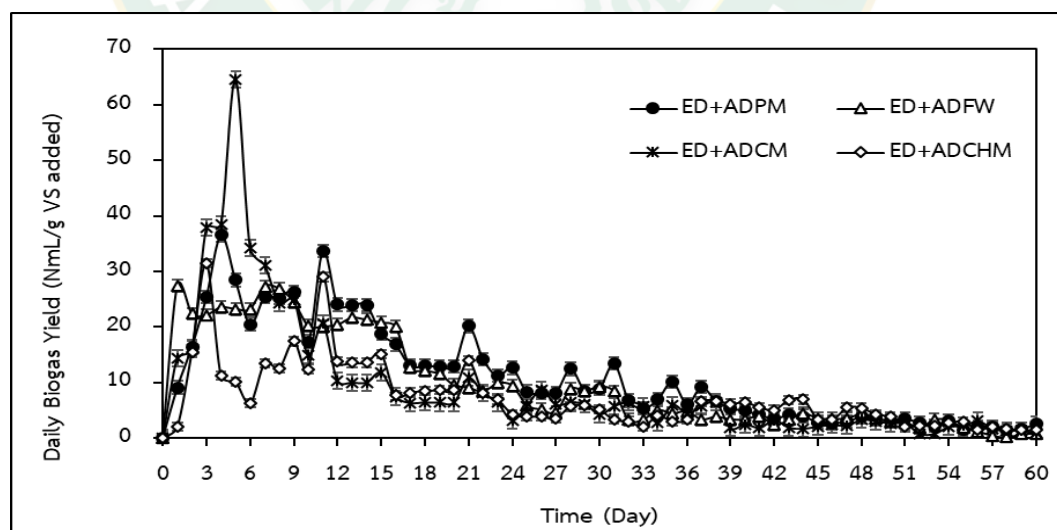
ภาพที่ 21 ค่า VFA/Alk ของการหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อออกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. ค่า VFA/Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. ค่า VFA/Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. ค่า VFA/Alk อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1)

สำหรับการทดลองนอกจากจะวิเคราะห์ค่า VFA และ Alk แล้ว ยังพิจารณาถึงค่าอัตราส่วน VFA/Alk ดังแสดงในภาพที่ 21 โดยจากการผลการพิจารณาพบว่า ก่อนเข้าระบบมีค่าอัตราส่วน VFA/Alk อยู่ในช่วง 0.46-1.03 0.15-0.64 และ 0.11-0.87 mg/L as CH₃COOH

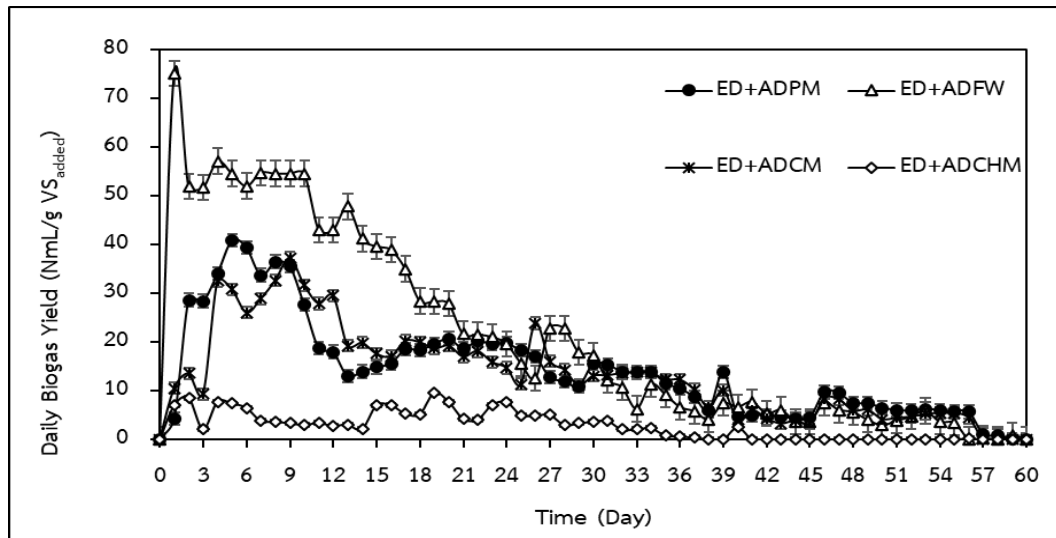
ตามลำดับ และมีค่าหลังออกระบบเท่ากับ 0.45-1.00 0.12-0.63 และ 0.13-0.78 mg/L as CH_3COOH ตามลำดับ สำหรับอัตราส่วนที่ 1:2 1:1 และ 2:1 ตามลำดับ โดยพบว่าค่าหลังออกระบบดังกล่าวอยู่ในช่วงที่ระบบมีกำลังบำบัดของระบบที่ไม่ต่ำมาก ยกเว้นอัตราของวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้ออากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโคที่มีค่าอัตราส่วน VFA/Alk สูงเกิน 0.8 ส่งผลให้ระบบมีค่าบำบัดของระบบมีค่าต่ำมากซึ่งอาจส่งผลให้ระบบเกิดการดำเนินงานที่ล้มเหลว เนื่องจากอัตราส่วนที่เหมาะสมของ VFA/Alk ควรต่ำกว่า 0.4 ที่แสดงว่ากำลังในการบำบัดสูง (สุตารัตน์ ภัคดี, 2551) และไม่ควรมากเกิน 0.8 เนื่องจากหากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่ากำลังบำบัดของระบบมีค่าต่ำมากอาจทำให้ระบบเกิดการล้มเหลวได้ (Amornpan et al., 2020)

4. อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทน และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

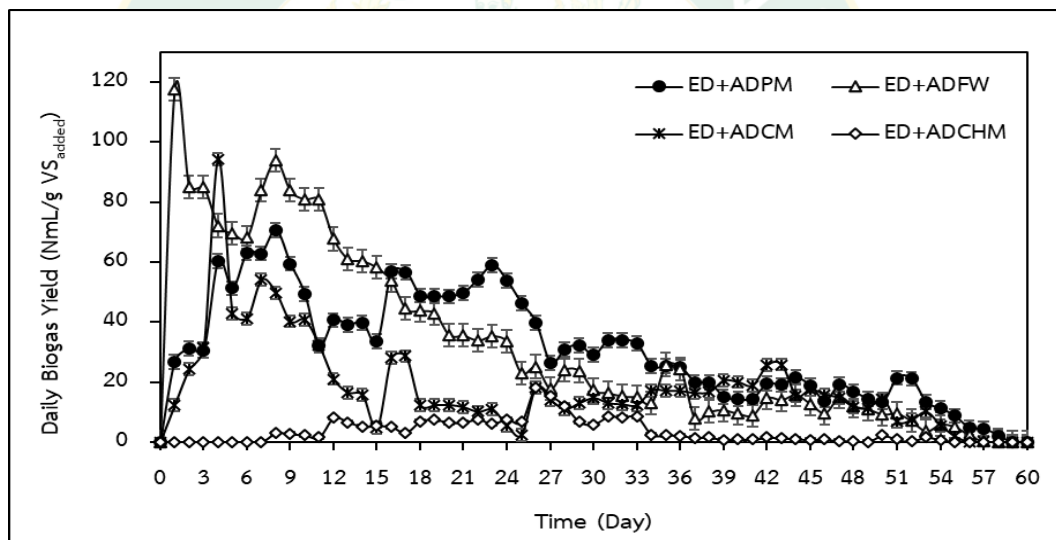
สำหรับปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพในแต่ละวันของวัตถุดิบมูลช้างเหลือทิ้งในปางช้าง โดยใช้หัวเชื้ออากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 4 ชนิด คือ หัวเชื้ออากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค มูลสุกร มูลไก่ และเศษอาหาร ซึ่งศึกษาอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ 1:2 1:1 และ 2:1 $\text{gVS}_{\text{added}}$ ดังแสดงในภาพที่ 22



a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2



b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1



c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1

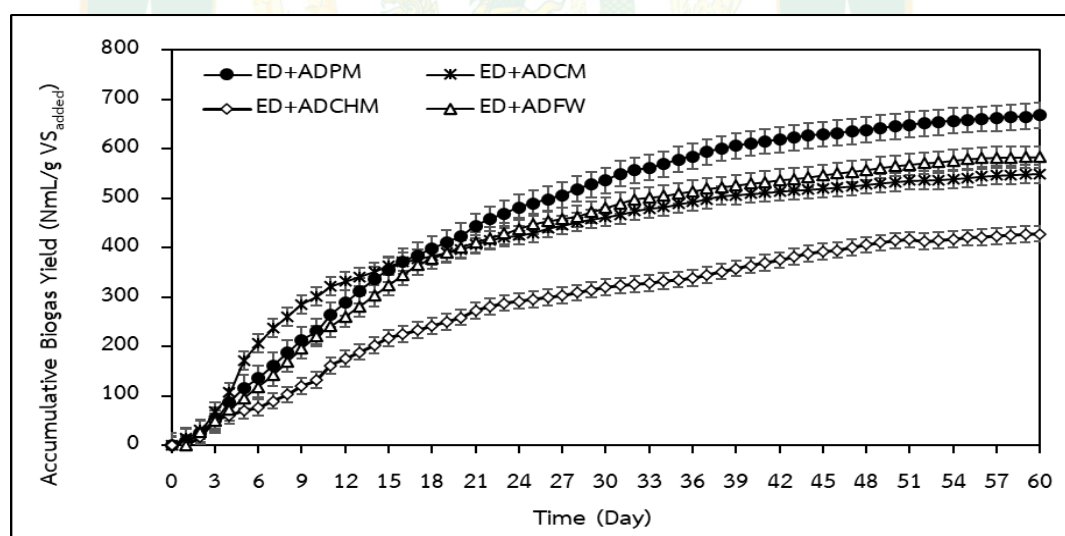
ภาพที่ 22 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นรายวันในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศจากวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้ออากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1)

จากการทดลองพบว่า ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพรายวันสูงที่สุดของมูลช้างต่อหัวเชื้อทั้งหมดที่ได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เกิดขึ้นในช่วง 10 วันแรก โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้วัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อแต่ละชนิดนั้นพบว่าอัตราส่วนการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันสูงที่สุดของทุกหัวเชื้อคืออัตราส่วนที่ 2:1 ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราส่วนที่ 2:1 มีปริมาณของสารอินทรีย์มากกว่าอัตราส่วนอื่น

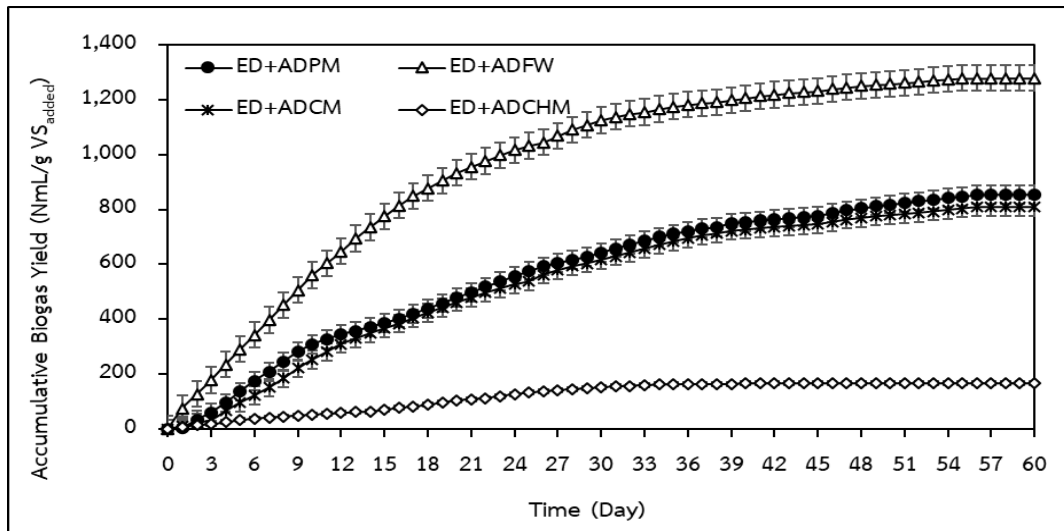
ส่งผลให้ระบบมีปริมาณสารอินทรีย์ที่มีปริมาณ TS สูง ทำให้ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพรายวันได้มากกว่า (Córdoba et al., 2018 ; Thaemngoen et al., 2020) ซึ่งสังเกตได้จากการเปรียบเทียบกราฟในภาพที่ 22 ทั้ง 3 กราฟจะพบว่าช่วงวันที่ 32 ถึง 44 ของอัตราส่วนที่ 2:1 นั้นระบบยังคงมีการผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ โดยสอดคล้องกับอัตราส่วนที่ 1:2 และ 1:1 ที่มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงแรกที่สูงแล้วค่อย ๆ ลดลงตามระยะเวลาในการทดลองที่นานขึ้น (Dhamodharan et al., 2016 ; Panin et al., 2021 ; Malini et al., 2016) เนื่องจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราส่วนที่ 1:1 และ 1:2 มีปริมาณหัวเชื้อมากกว่าปริมาณวัตถุดิบที่ถูกเติมในระบบแบบกะ ส่งผลให้จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดผลิต VFA สูง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพต่ำกว่าอัตราส่วนที่ 2:1

โดยผลผลิตก๊าซชีวภาพรายวันสูงที่สุดสำหรับวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค มูลสุกร มูลไก่ และเศษอาหารในอัตราส่วนที่ 2:1 ผลิตก๊าซชีวภาพรายวันได้สูงที่สุดถึง 94.40, 70.61, 18.32 และ 117.59 NmL/gVS_{added} ตามลำดับ ตามด้วยอัตราส่วนที่ 1:1 มีค่าเท่ากับ 37.23, 40.87, 9.45 และ 75.05 NmL/gVS_{added} ตามลำดับ และผลผลิตก๊าซชีวภาพรายวันสูงที่สุดในอัตราส่วนที่ 1:2 มีค่าเท่ากับ 64.61, 36.54, 31.47 และ 27.43 NmL/gVS_{added} ตามลำดับ จากผลของปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันสูงที่สุดของวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน ในอัตราส่วนที่ 2:1 จะสังเกตเห็นว่าวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารสามารถผลิตก๊าซชีวภาพรายวันสูงสุดเท่ากับ 117.59 NmL/gVS_{added} ในช่วงวันที่ 2 ของการทดลองเท่านั้น แต่หลังจากระยะเวลาในการทดลองเพิ่มขึ้นจะพบว่าสามารถผลิตก๊าซชีวภาพรายวันได้สูงเพียง 15 วันเท่านั้น โดยเมื่อเทียบระยะเวลาการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันของวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรและวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค จะพบว่าวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรสามารถผลิตก๊าซชีวภาพรายวันที่สูงได้นานกว่าถึง 26 วัน (Cazier et al., 2015 ; Panin et al., 2021 ; Córdoba et al., 2018 ; Thaemngoen et al., 2020) เนื่องจากกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารที่ถูกนำมาเติมในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแต่ละครั้งมีปริมาณสารอินทรีย์ที่ต่างกันมาก อย่างเช่น โปรตีน วิตามิน และคาร์โบไฮเดรต เป็นต้น และไม่สามารถที่จะควบคุมปริมาณสารอินทรีย์เหล่านี้ได้ (Dhamodharan et al., 2016 ; Panin et al., 2021) ส่งผลทำให้กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันได้ไม่เท่าหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกร (Collins, 1991 ; Dhamodharan et al., 2016) ส่วนกากตะกอนมูลสัตว์เนื่องจากมูลสัตว์ที่ได้มักมาจากฟาร์มที่มีการเลี้ยงหรือให้อาหารในรูปแบบเดิมทำใน

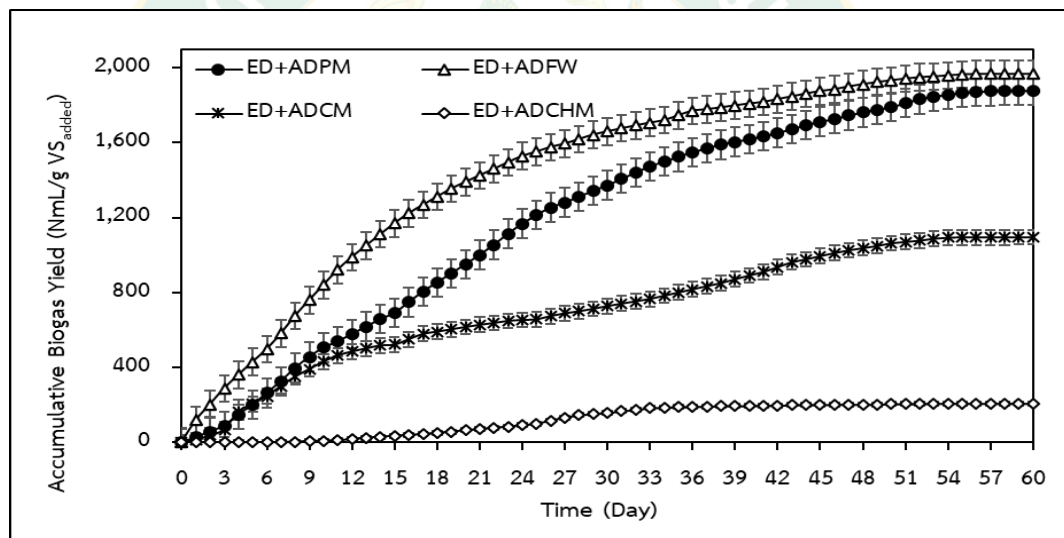
ค่าพารามิเตอร์และองค์ประกอบอื่นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อเทียบกับเศษอาหารที่มีปริมาณสารอินทรีย์ในแต่ละวันไม่เท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lui et al. 2009 ศึกษาผลของอัตราส่วนของเศษอาหารต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่าเศษอาหารมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน แต่เศษอาหารต่างที่กันจะมีองค์ประกอบสารอินทรีย์ไม่เหมือนกัน ส่วนกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรมีศักยภาพในการนำมาเป็นหัวเชื้อในการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่ากากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโคและมูลไก่ เนื่องด้วยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ใกล้เคียงกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค และมีค่าความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 57% และหลังจากเริ่มดำเนินการทดลองจะพบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 3-4 วันถัดไปและค่อย ๆ ลดลงจนระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้น้อยกว่าที่จะทำการวัดได้ โดยรวมระยะเวลาการทดลองสิ้นสุดใน 60 วัน ซึ่งคล้ายกับการศึกษาของ Bernard et al. 2019 และ Thaemngoan et al. 2020 ที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษขยะเหลือทิ้งที่เป็นของแข็งและพบว่า ในช่วงการทดลองสองสามวันปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่างรวดเร็วและวันถัดไปจึงค่อยลดลงเรื่อย ๆ จนสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งแปรผันตรงกับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมดังแสดงในภาพที่ 20



a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2



b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1



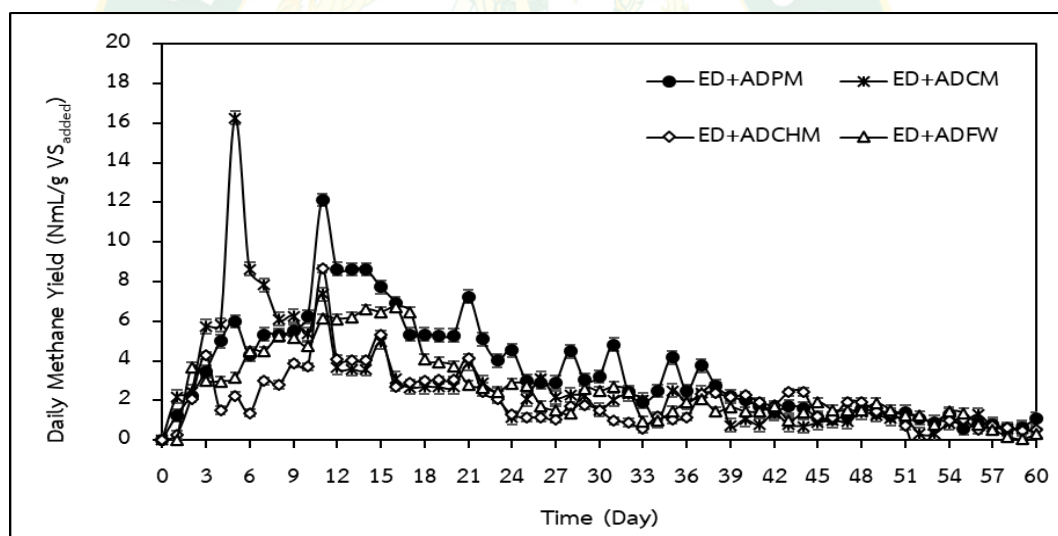
c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1

ภาพที่ 23 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศจากวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1)

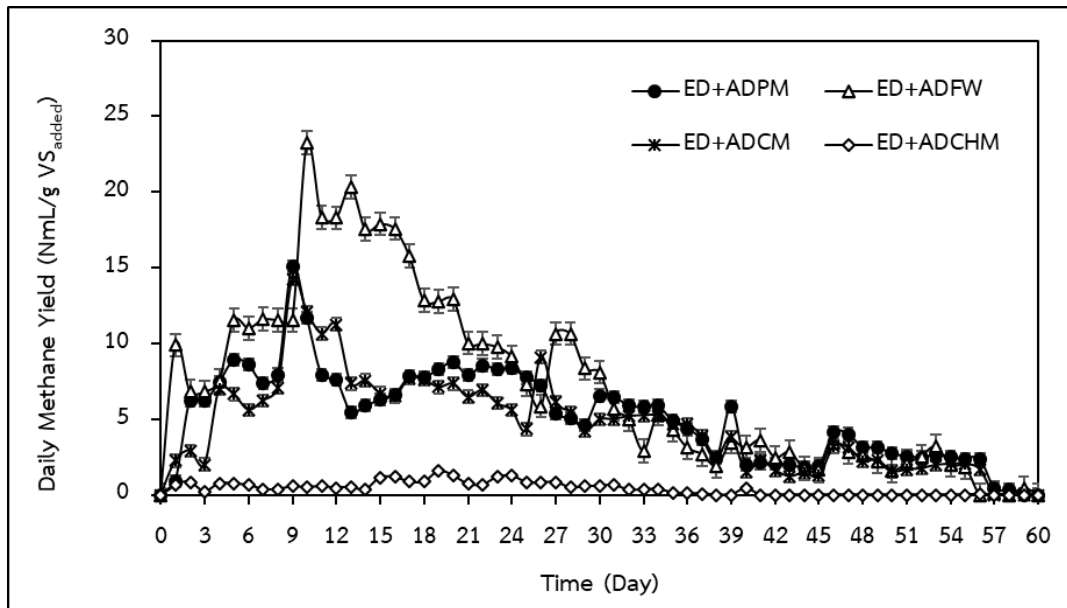
จากภาพที่ 23 แสดงให้เห็นถึงปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 4 ชนิด คือ กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค มูลสุกร มูลไก่ และเศษอาหาร จากการทดสอบด้วยอัตราส่วนวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราส่วนที่ 1:1 1:2 และ 2:1 gVS_{added} ที่แปรผันตรงกับปริมาณผลผลิตก๊าซ

ชีวภาพรายวันดังแสดงในภาพที่ 25 ซึ่งแสดงให้เห็น การผลิตก๊าซชีวภาพในการทดลองช่วง 0-10 วันแรก ว่ามีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Xu et al., 2019 ; Achinas et al., 2016 ; Córdoba et al., 2018) เนื่องจากหัวเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในช่วงปรับตัวให้เข้ากับวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักและทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยง่ายก่อน เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่ จากนั้นจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากต่อไป (Achinas et al., 2016) ซึ่งสังเกตได้จากการดำเนินทดลองจะเห็นว่าระยะเวลาที่นานขึ้นนั้นสารอินทรีย์ในระบบค่อย ๆ ลดลง เกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศ ที่บ่งบอกถึงศักยภาพของหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (Dhamodharan et al., 2016 ; Sawatdeenarunat et al., 2021) โดยจากผลกราฟการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมในภาพที่ 20 ของทุกหัวเชื้อและอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ 1:2 และ 1:1 เริ่มขึ้นน้อยลงและค่อย ๆ เข้าสู่สภาวะคงที่ ในช่วงวันที่ 48 ของการทดลอง ยกเว้นเส้นกราฟของปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมในอัตราส่วนที่ 2:1 วัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกร ที่จะสังเกตเห็นว่ามีความชันมากกว่าหัวเชื้อในอัตราส่วนอื่น ๆ นอกจากนี้ ผลของการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมในอัตราส่วนที่ 1:1 พบว่า วัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค (807.87 NmL/gVS_{added}) และวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ (166.54 NmL/gVS_{added}) มีค่าต่ำกว่า วัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกร (855.24 NmL/gVS_{added}) อย่างมีนัยสำคัญ ปรากฏการณ์นี้อาจเกิดจากตัวจุลินทรีย์ที่ลักษณะการย่อยใกล้เคียงกันของกากตะกอนมูลสัตว์ที่ได้จากฟาร์มที่มีการเลี้ยงหรือให้อาหารในรูปแบบเดิมเหมือนกัน ยกเว้น วัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารที่มีค่าเท่ากับ 1,279.37 NmL/gVS_{added} (Collins, 1991 ; Dhamodharan et al., 2016) ส่วนผลของการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมในอัตราส่วนที่ 1:2 พบว่า วัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้เท่ากับ 667.83 NmL/gVS_{added} และวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค (549.54 NmL/gVS_{added}) ตามด้วย วัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ (428.21 NmL/gVS_{added}) มีค่าต่ำกว่า วัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร (583.67 NmL/gVS_{added}) ตั้งแต่ช่วงวันที่ 18 ถึงวันที่ 60 ของการทดลองอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha=0.05$) ที่อาจเกิดจากศักยภาพของกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารที่นำมาจากระบบที่ทำการหมักย่อยวัตถุดิบที่มีความหลากหลายทางอินทรีย์ (Sawatdeenarunat et al., 2018 ; Lui, 2009) อัตราส่วนที่ 2:1 ของวัตถุดิบหลักมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค และวัตถุดิบหลักมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกร มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ (Dhamodharan et al., 2016 ; Xu et al., 2019) เนื่องจากหัวเชื้อกากตะกอน

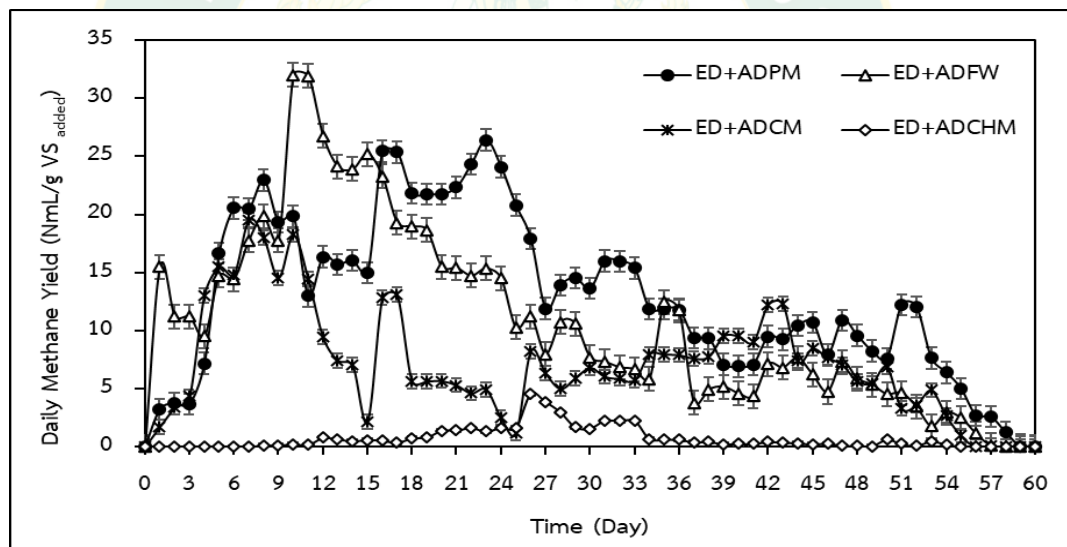
จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโคและมูลสุกรเป็นกากตะกอนที่ได้จากมูลสัตว์จากฟาร์มที่มีรูปแบบการให้อาหารแบบเดิมเหมือนกัน ยกเว้นหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารทำให้จุลินทรีย์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพสะสมในช่วงแรกของหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโคและมูลสุกรใกล้เคียงกัน (Achinas et al., 2016 ; Córdoba et al., 2018) เนื่องด้วยช่วงแรกจุลินทรีย์มีการปรับตัวให้คุ้นเคยกับวัตถุดิบที่ใช้ในการหมักและทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยง่ายก่อน ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยยากอย่างเช่นสารอินทรีย์จำพวกเฮมิเซลลูโลส เป็นต้น โดยจะแสดงให้เห็นดังในภาพที่ 20 ซึ่งจะพบว่าวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 1,215.95 NmL/gVS_{added} ซึ่งมากกว่า วัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโคและมูลไก่ที่ผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 722.06 และ 208.00 NmL/gVS_{added} ตามลำดับ และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้ใกล้เคียงกับวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารที่มีปริมาณเท่ากับ 1,465.92 NmL/gVS_{added}



a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2



b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1

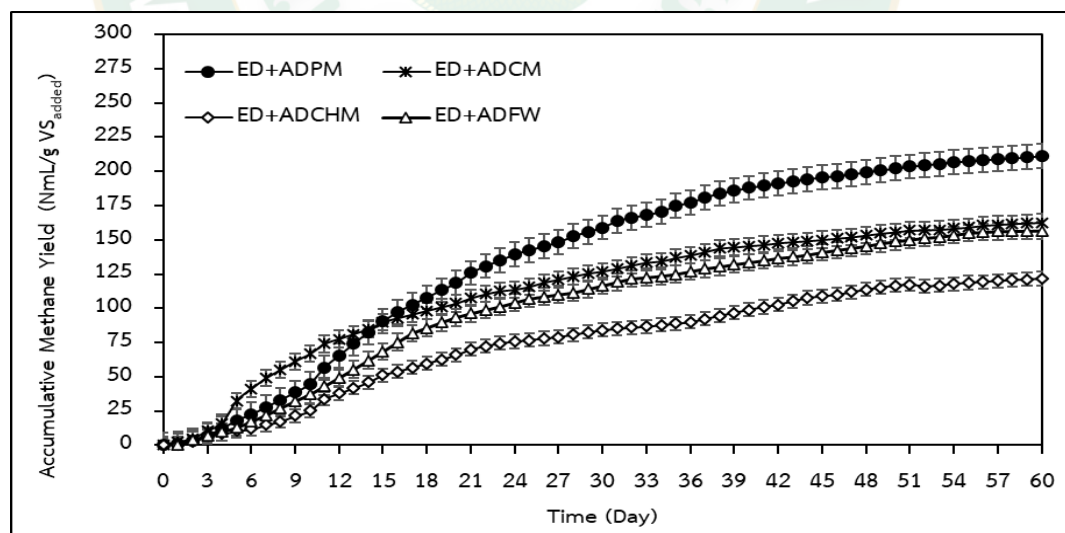


c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1

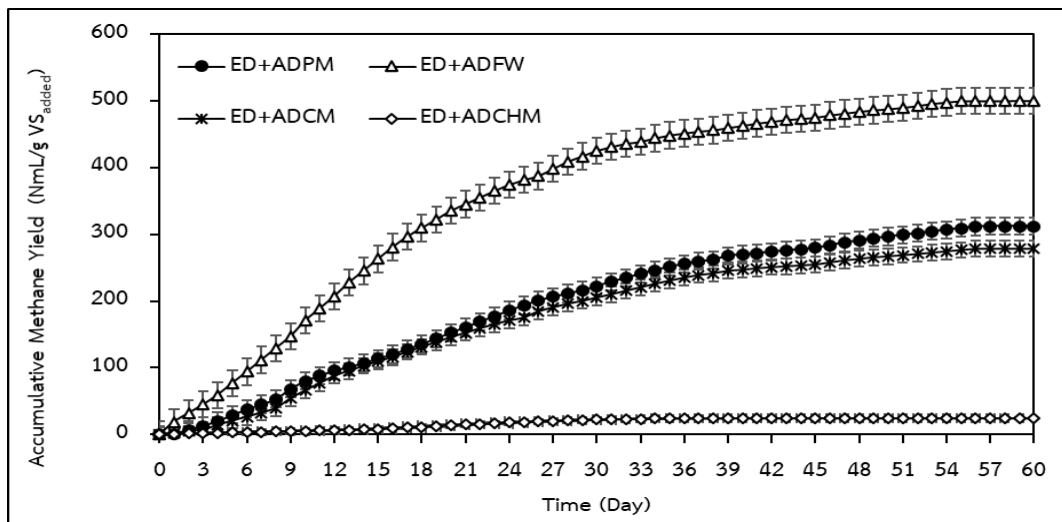
ภาพที่ 24 ปริมาณก๊าซมีเทนรายวันที่เกิดขึ้นในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศจากวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1)

สำหรับการผลิตก๊าซมีเทนรายวันเป็นตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาผลของหัวเชื้อต่อการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการทดสอบศักยภาพก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (BMP) ตามขั้นตอนมาตรฐาน VDI4630 (VDI 4630, 2004) ที่ทำการเติมวัตถุดิบพร้อมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์เพียงครั้งเดียวภายใต้การหมักแบบ

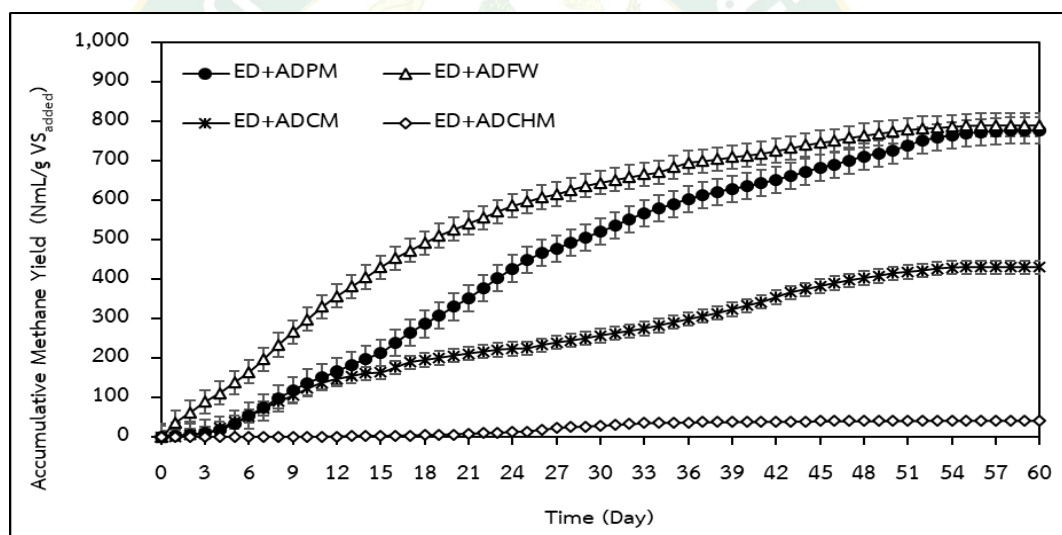
ไร้อากาศ โดยแสดงผลลัพธ์ในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบ (Collins, 1991 ; Dhamodharan et al., 2016) ซึ่งในการศึกษานี้พบว่าการผลิตก๊าซมีเทนรายวันมีศักยภาพสูงที่สุดของวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค มูลสุกร มูลไก่ และเศษอาหาร ดังแสดงในภาพที่ 24 คือ อัตราส่วนของสารตั้งต้นต่อหัวเชื้อเท่ากับ 2:1 มีผลการผลิตก๊าซมีเทนของมูลช้างต่อหัวเชื้อที่แตกต่างกันเท่ากับ 19.52, 26.41, 4.52 และ 32.02 NmL/gVS_{added} ตามลำดับ ตามด้วย อัตราส่วนของสารตั้งต้นต่อหัวเชื้อที่ 1:1 มีผลการผลิตก๊าซมีเทนรายวันเท่ากับ 14.22, 23.24, 1.59 และ 15.07 NmL/gVS_{added} ตามลำดับ และอัตราส่วนของสารตั้งต้นต่อหัวเชื้อที่ 1:2 มีผลการผลิตก๊าซมีเทนรายวันเท่ากับ 16.26, 12.11, 8.65 และ 16.73 NmL/gVS_{added} ตามลำดับ โดยปริมาณของก๊าซมีเทนในช่วงแรกของทุกหัวเชื้อและอัตราส่วนทั้งหมดจะมีปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้ต่ำเมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันของมูลช้างต่อหัวเชื้อที่แตกต่างกันในภาพที่ 22 เนื่องจากช่วงแรกในกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดมีการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็น VFA ได้มาก (Dhamodharan et al., 2016 ; Cazier et al., 2015 ; Panin et al., 2021) แต่มีจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนที่ทำการย่อย VFA น้อย ทำให้ระบบในช่วงแรกมีการผลิตก๊าซมีเทนได้น้อยและค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาในการทดลอง (Córdoba et al., 2018 ; Panin et al., 2021) ซึ่งสอดคล้องกับก๊าซมีเทนสะสมที่ ดังแสดงในภาพที่ 25



a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2



b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1

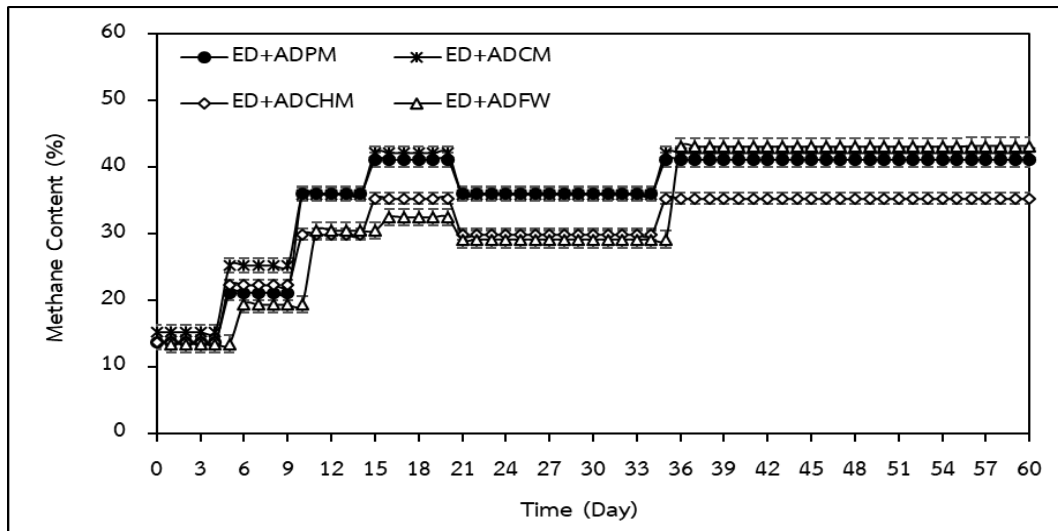


c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1

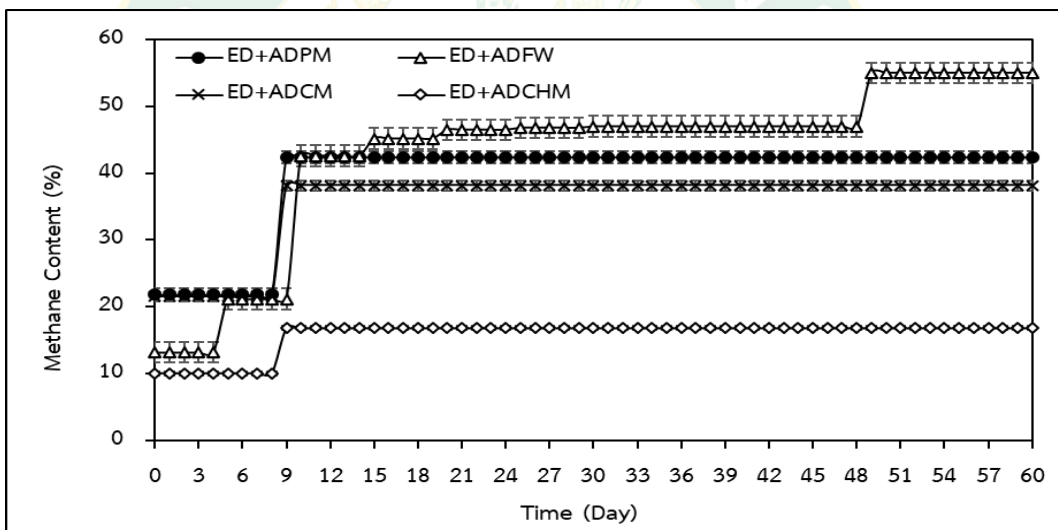
ภาพที่ 25 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศจากวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1)

สำหรับปริมาณก๊าซมีเทนสะสมของวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค มูลสุกร มูลไก่ และเศษอาหาร จากการทดสอบด้วยอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อในอัตราส่วนที่ 1:2 1:1 และ 2:1 gVS_{added} ที่แปรผันตรงกับปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพรายวันดังแสดงในภาพที่ 21 ที่แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนที่มีการผลิตก๊าซมีเทนสะสมที่มากที่สุดคือ 2:1 เนื่องจากเป็น

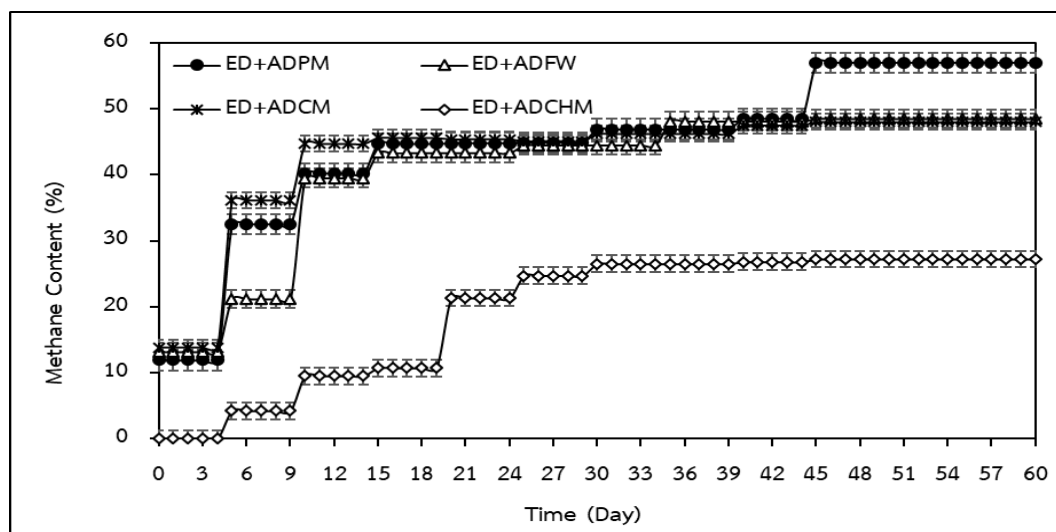
อัตราส่วนที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงที่สุด เนื่องด้วยมีปริมาณสารอินทรีย์ในระบบมากกว่า และมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรด และชนิดสร้างมีเทนในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนมากที่สุด (Dhamodharan et al., 2016) โดยส่วนผลการผลิตก๊าซมีเทนสะสมของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราส่วนที่ 2:1 ที่มีปริมาณมากกว่าอัตราส่วนอื่น ที่ค่าเท่ากับ 430.32, 775.91, 42.53 และ 790.02 NmL/gVS_{added} ตามลำดับ สำหรับวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค มูลสุกร มูลไก่ และเศษอาหาร ตามด้วยผลการผลิตก๊าซมีเทนสะสมของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราส่วนที่ 1:1 เท่ากับ 278.08, 312.05, 24.84 และ 499.69 NmL/gVS_{added} ตามลำดับ และผลการผลิตก๊าซมีเทนสะสมของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราส่วนที่ 1:2 เท่ากับ 211.37, 162.74, 121.64 และ 156.75 NmL/gVS_{added} ตามลำดับ โดยจากกราฟในภาพที่ 25 จะแสดงให้เห็นปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนสะสมของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรและหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเศษอาหารในช่วงวันที่ 51-60 ว่ามีนัยสำคัญ ($\alpha=0.05$) ที่อาจเกิดจากศักยภาพของกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารที่นำมาจากระบบที่ทำการหมักย่อยวัตถุดิบที่มีความหลากหลายทางอินทรีย์ (Lui et al., 2009) และศักยภาพของหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรที่มีความเข้มข้นจากฟาร์มที่มีรูปแบบการให้อาหารแบบเดิมเหมือนกัน ส่วนวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมน้อยกว่าหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรและหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลเศษอาหาร ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kaparaju and Rintala, 2011 ที่พบว่าการผลิตก๊าซมีเทนในหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโคมีความช้าและต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร ที่อาจเป็นผลมาจากการยับยั้งการย่อยสลายอาหารที่มีไฟเบอร์ปริมาณมากในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศของหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค (Kaparaju et al, 2011)



a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2



b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1



c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1

ภาพที่ 26 ปริมาณความเข้มข้นก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศจากวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน (a. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:2), (b. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 1:1) และ (c. อัตราส่วน S/I เท่ากับ 2:1)

จากการศึกษาศักยภาพของหัวเชื้อต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบมูลช้าง พบว่า กระบวนการหมักแบบไร้อากาศของวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรมีค่าสัดส่วนมีเทนสูงที่สุดที่ 57.00% ตามด้วยวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร และกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ ที่มีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเท่ากับ 48.00, 48.50 และ 27.20% ตามลำดับ โดยวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรมีผลของศักยภาพในการทดลอง BMP ดีที่สุดและมากกว่าวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค และวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร ในอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ 2:1 นอกจากนี้ได้ทำการวิเคราะห์ผลของหัวเชื้อกากตะกอนที่แตกต่างกันในการผลิตชีวภาพ พบว่า วัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโคมีกราฟการผลิตก๊าซมีเทนที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟการผลิตก๊าซมีเทนของวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรในการผลิตก๊าซมีเทน (Kaparaju et al, 2011) ดังแสดงให้เห็นในภาพที่ 25 และภาพที่ 26 จากการเปรียบเทียบหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกันทั้ง 4 ชนิด กับวัตถุดิบมูลช้างจากปางช้าง ทำให้ทราบว่าอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ 2:1 ของวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรมีประสิทธิภาพมากที่สุด และพบว่าวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบ

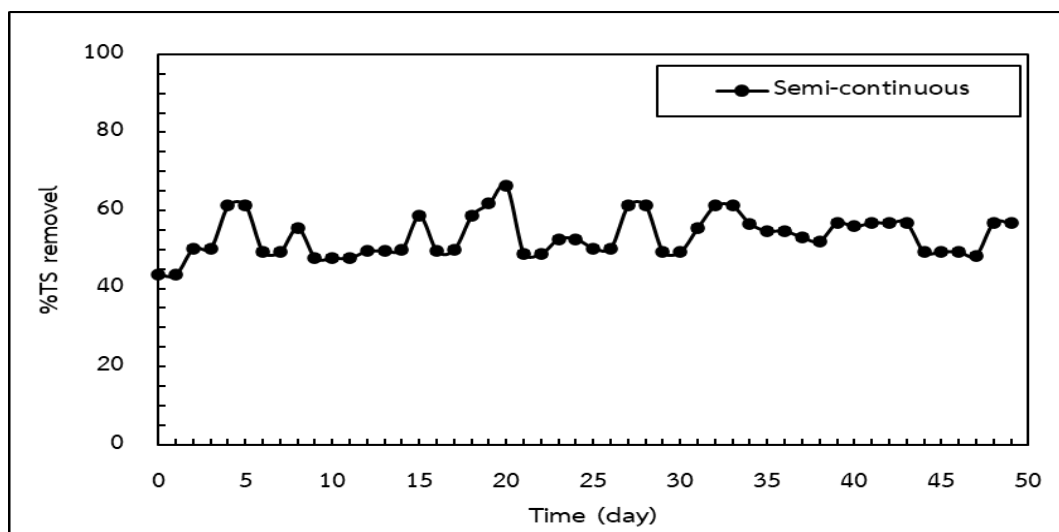
ผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค มูลสุกร มูลไก่ และเศษอาหาร มีค่าสัดส่วนมีเทนของอัตราส่วนที่ 1:2 เท่ากับ 42.07, 41.03, 35.23 และ 43.00% ตามลำดับ ตามด้วยวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโค มูลสุกร มูลไก่ และเศษอาหาร มีค่าสัดส่วนมีเทนของอัตราส่วนที่ 1:1 เท่ากับ 38.20, 42.40, 16.08 และ 55.03% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Dhamodharan et al., 2016 ที่ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากหัวเชื้อมูลสัตว์ที่แตกต่างกัน หมักร่วมกับวัตถุดิบเศษอาหาร และใช้ผลค่าความเข้มข้นของการผลิตก๊าซมีเทนและผลของการผลิตก๊าซมีเทนรายวันเป็นตัวเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัวเชื้อมูลสัตว์ในการเลือกหัวเชื้อที่ดีที่สุด

ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศในขนาด 30 L แบบกึ่งต่อเนื่อง

สำหรับผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศในขนาด 30 L แบบกึ่งต่อเนื่อง มีการกวน โดยทำการกำหนดอัตราการกวนผสมทุก ๆ 45 min และทำการกวนรอบละ 15 min ที่กำหนด OLR เท่ากับ $1 \text{ kg VS/m}^3\text{-day}$ นั้นใช้วัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร ในอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ 2:1 ที่มีผลของศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุดจากการศึกษาและวิเคราะห์ทางวิธีการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (BMP) ปรับปรุงตามขั้นตอนมาตรฐาน VDI4630 (VDI 4630, 2004) จากการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน

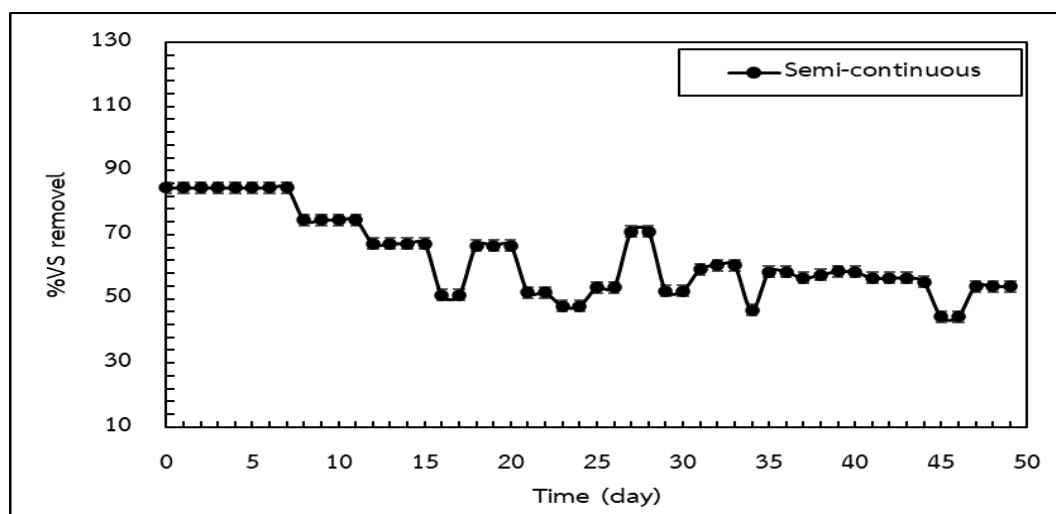
1. การบำบัดของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยได้

สำหรับผลของการวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวอย่างของการผลิตชีวภาพแบบไร้อากาศจากวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรในอัตราส่วน 2:1 โดยใช้การหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง พบว่า เมื่อพิจารณาการบำบัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยได้ มีผลแสดงดังภาพที่ 27 และภาพที่ 28



ภาพที่ 27 แสดงปริมาณการกำจัดของแข็งทั้งหมด (%TS) ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง

จากภาพที่ 27 เป็นการแสดงผลการวิเคราะห์ค่า $\%TS_{\text{removal}}$ จากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศจากวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรในอัตราส่วน 2:1 พบว่า ระบบมีค่า $\%TS_{\text{removal}}$ ในระบบแบบกึ่งต่อเนื่องมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมีความใกล้เคียงกับกระบวนการหมักแบบกะที่ได้ทำการทดลอง โดยระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่องสามารถกำจัดของแข็งทั้งหมดในระบบผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดได้เท่ากับ 66.30% ในช่วงของวันที่ 20 ของการดำเนินการทดลอง เนื่องจากระบบมีการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักเกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการหมักและมีการควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 35-37 °C ซึ่งอุณหภูมิภายในระบบจะแปรผันตามอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม โดยอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์เป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตในช่วงเมโซฟิลิก ช่วงอุณหภูมิ 20-45 °C โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุดคือ 37 °C (Guangying et al., 2010) พร้อมทั้งมีตัวกวนที่ช่วยกวนให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถกระจายตัวเข้าถึงสารอาหารได้อย่างทั่วถึง ทำให้จุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายวัตถุดิบได้เพิ่มขึ้น (เววมิกส์, 2562) และนอกนี้การวิเคราะห์ค่าการกำจัด $\%VS_{\text{removal}}$ สูงสุดมีค่าเท่ากับ 62.99% ดังแสดงในภาพที่ 28 ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Elsamadony and Tawfik, 2015 ที่ได้ทำการได้ทำการศึกษาประเมินผลในระยะยาวของ Mesophilic Up-flow โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์เป็นระยะ ๆ (UISTR) สำหรับการผลิตไฮโดรเจนจากสารอินทรีย์ของขยะมูลฝอยที่ได้รับจากเทศบาล โดยพบว่าระบบที่มีการกวนสามารถทำการย่อยสลายได้ถึง 72.0%

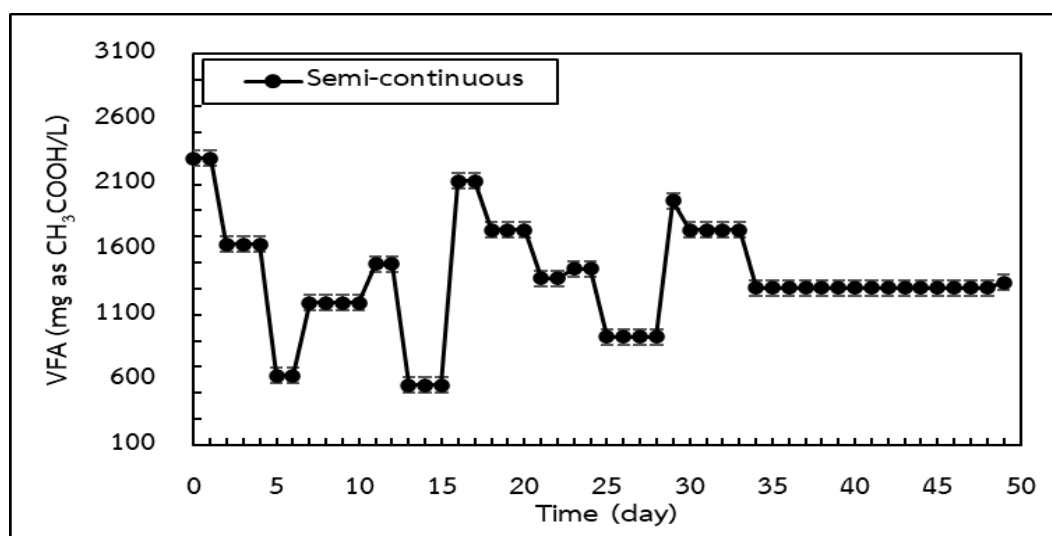


ภาพที่ 28 แสดงปริมาณการกำจัดของแข็งระเหยง่าย (%VS) ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง

2. ค่ากรดไขมันระเหยง่าย และค่าความเป็นด่าง ในระบบการหมักก๊าซชีวภาพ

สำหรับผลการวิเคราะห์การใช้วัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร ในอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ 2:1 ในการวิเคราะห์ค่า VFA และค่า Alk ในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาแบบกึ่งต่อเนื่อง ได้ผลการแสดงดังภาพที่ 29 และภาพที่ 30 โดยผลการศึกษาพบว่า ภายในระบบมีค่า VFA อยู่ในช่วงที่ 558.90-2,297.70 mg CH₃COOH/L ซึ่งมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนทำให้เกิดการสะสมของกรดในช่วงวันที่ 2 และ 16 ของการทดลอง ซึ่งเป็นผลมาจากในช่วงแรกของการกระบวนการย่อยสลายจะเกิดกระบวนการสร้างกรดไขมันระเหยง่าย คือ จุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนการไฮโดรไลซิส และการสร้างกรดของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด เช่น กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก และกรดบิวทิริก ซึ่งจะถูกจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนนำไปใช้เป็นสารอาหารและแหล่ง เพื่อใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน แต่เมื่อเข้าสู่วันที่ 5 พบว่าค่า VFA กลับเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยค่า VFA เป็นค่าที่บ่งบอกค่ากรดไขมันระเหยง่ายของระบบหมักแบบไร้อากาศ โดยปกติจะมีค่ามาตรฐานที่เหมาะสมอยู่ในช่วงที่ 50-500 mg/l (นฤมล เชาวะกระโทก, 2556) ซึ่งปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายจะส่งผลต่อค่า pH ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่า

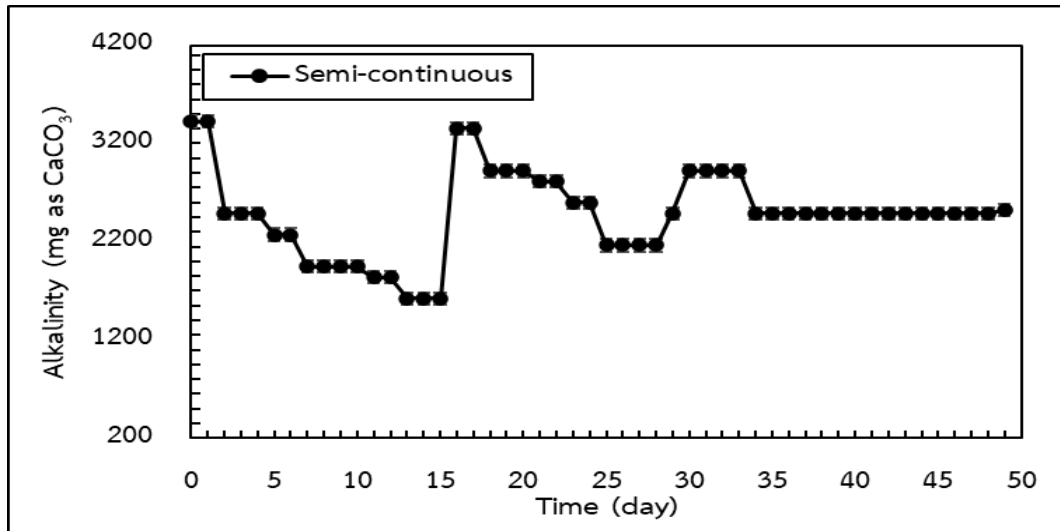
pH ที่ลดลงจะมีค่าตรงข้ามกับค่า VFA ที่มีค่าสูงขึ้น (นฤมล เชาวระโทก, 2556) ซึ่งสามารถสังเกตได้จากค่า pH และค่า VFA ดังแสดงตามเส้นกราฟในภาพที่ 16 และภาพที่ 29 ที่เกิดขึ้นในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และหลังจากที่จุลินทรีย์สามารถปรับตัวเข้ากับระบบได้ค่า VFA จะเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ มีค่าต่ำกว่า 2,000 mg/L (จุฑาภรณ์ ชนะถาวร, 2560) ซึ่งมีค่าเช่นเดียวกับกับค่า Alk ที่มีค่าแสดงดังในภาพที่ 30



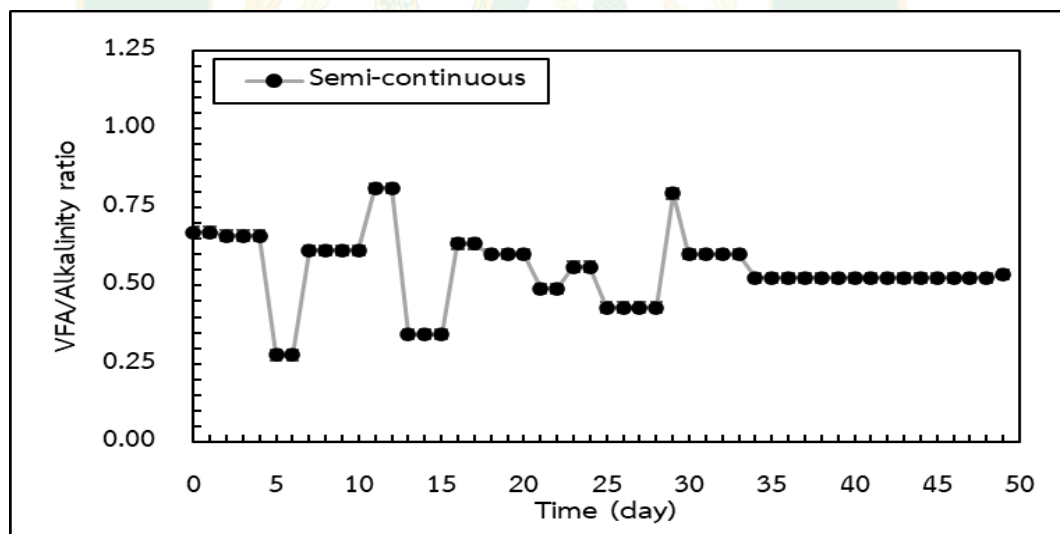
ภาพที่ 29 แสดงปริมาณค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง

จากภาพที่ 30 แสดงค่าปริมาณค่า Alk ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาแบบกึ่งต่อเนื่อง มีค่าอยู่ในช่วง 1,514.24-4,110.08 mg CaCO₃/L โดยค่า Alk คงที่และมีค่าที่ใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรในอัตราส่วนที่ 2:1 ที่นำมาศึกษาต่อในแบบกึ่งต่อเนื่องขนาด 30 L เนื่องจากค่า Alk ที่เหมาะสมต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ควรอยู่ในช่วง 1,000-5,000 mg CaCO₃/L (ทวิรัตน์ สเลอาด, 2554) นอกจากนี้ค่า Alk ยังบ่งบอกถึง ปริมาณสารบัพเฟอร์ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะช่วยในการรักษาและป้องกันจุลินทรีย์ประเภทสร้างมีเทนให้ทนทานต่อสภาพความเป็นกรดที่เกิดจากกรดไขมันระเหยง่ายของวัตถุดิบตั้งต้น เช่นเดียวกับกับอัตราส่วนค่า VFA/Alk ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.55 ตลอดระยะเวลาการทดลอง 50 days ดังแสดงในภาพที่ 31 ซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.8 แสดงให้เห็นว่ากำลังบัพเฟอร์ของระบบยังมีค่าการบัพเฟอร์ที่สูงทำให้ระบบยังคงผลิตก๊าซมีเทนต่อได้ (Amornpan. et al., 2020) ซึ่งอัตราส่วนค่า VFA/ALK มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของค่า pH โดยอัตราส่วน VFA/ALK ในรูปของไบคาร์บอเนตมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่ากำลังในการบัพเฟอร์สูง หาก

อัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่ากำลังบัฟเฟอร์ของระบบมีค่าต่ำมาก (ทวินันท์ สเลอาด, 2554)



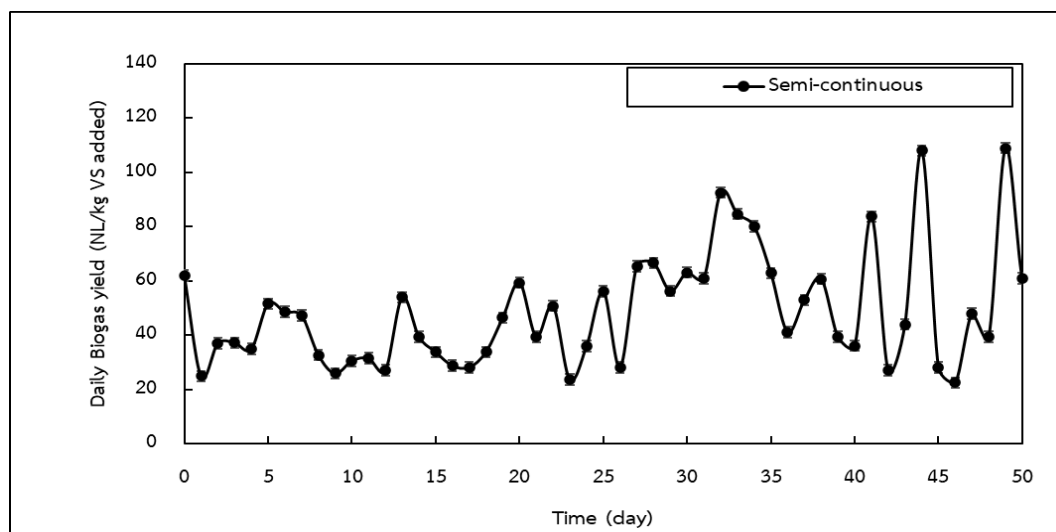
ภาพที่ 30 แสดงปริมาณค่าความเป็นด่าง (Alk) ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง



ภาพที่ 31 แสดงปริมาณค่า VFA/ALK ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง

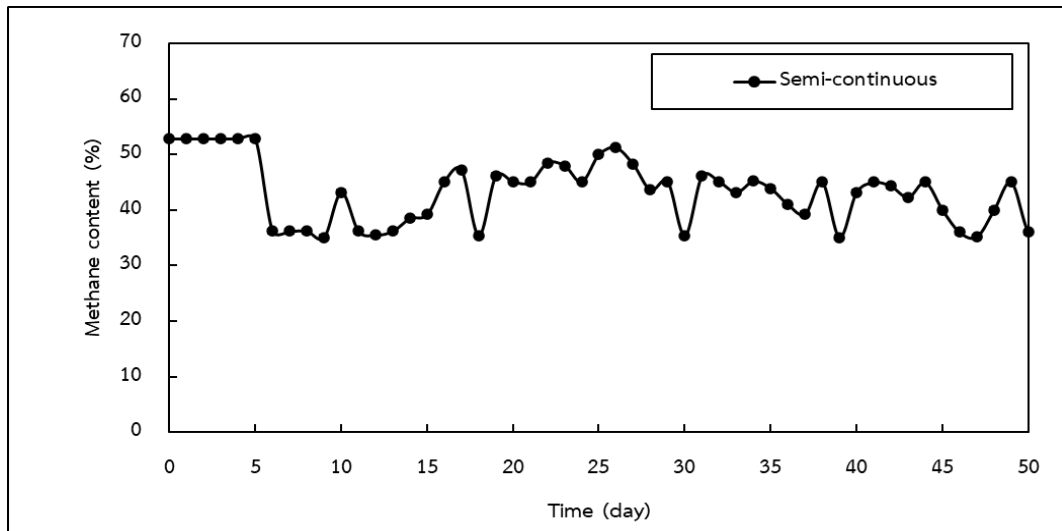
3. อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทน และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

สำหรับปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทน และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนในระบบ 30 L ในอัตราของวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรที่ 2:1 ดังแสดงในภาพที่ 32 ถึงภาพที่ 35



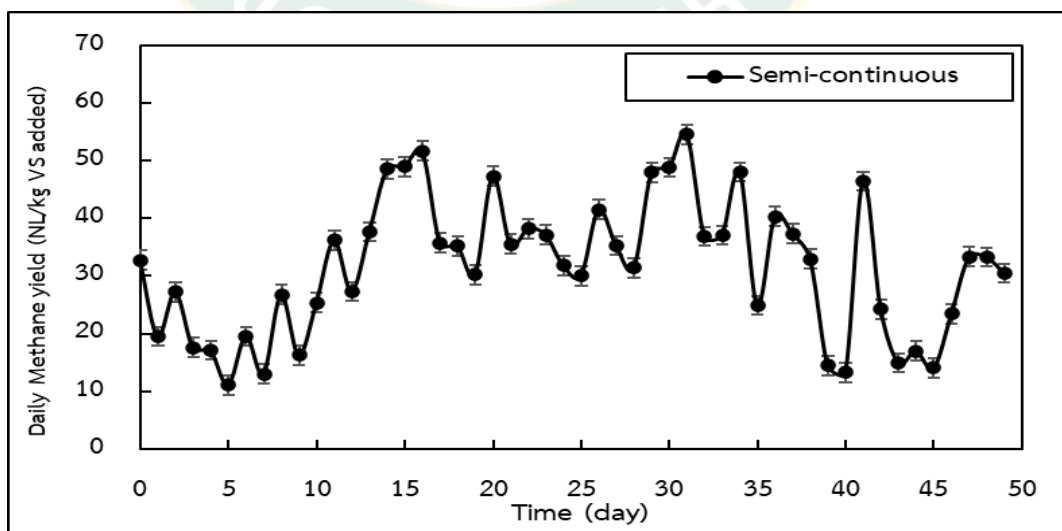
ภาพที่ 32 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นรายวันในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง

จากการทดลองพบว่า ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพรายวันสูงที่สุดของระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาแบบกึ่งต่อเนื่องได้เท่ากับ 117.51 NL/kgVS_{added} ดังแสดงในภาพที่ 32 ในช่วงวันที่ 20 ของการทดลอง โดยระบบมีปริมาณของสารอินทรีย์ที่มากกว่า ส่งผลให้ระบบมีปริมาณสารอินทรีย์ที่มีปริมาณ TS สูง ซึ่งสังเกตได้จากค่า %VS_{removal} ในภาพที่ 28 จะพบว่าเมื่อระยะเวลาการทดลองเพิ่มขึ้นระบบจะสามารถทำการกำจัดของแข็งระเหยง่ายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้น้อยลง เนื่องจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่องเป็นระบบที่มีการเติมสารอินทรีย์ทุก 24 hr ทำให้มีระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบที่น้อยกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองแบบกะ โดยแบบกึ่งต่อเนื่องจะมีปริมาณของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยง่าย มีปริมาณไม่สม่ำเสมอ ตรงข้ามกับกระบวนการหมักเป็นแบบกะที่จุลินทรีย์จะทำการย่อยสารอินทรีย์ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจนหมด โดยส่งผลต่อปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันโดยตรง (นิลวรรณ ไชยทนต์, 2552) ซึ่งแปรผันตรงกับปริมาณก๊าซชีวภาพมีเทนรายวันดังแสดงในภาพที่ 34



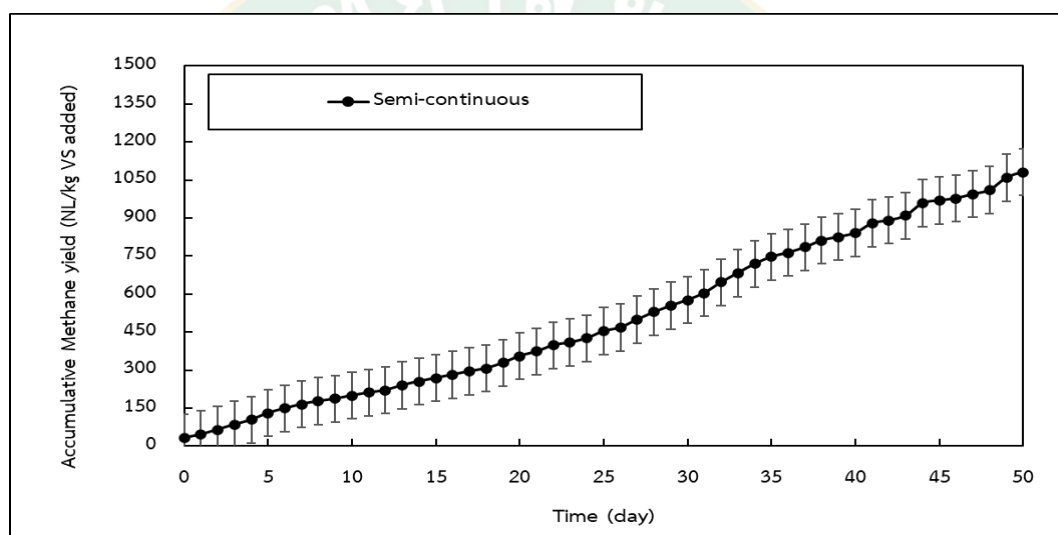
ภาพที่ 33 ค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง

สำหรับค่าความเข้มข้นก๊าซมีเทนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาแบบกึ่งต่อเนื่องที่แสดงในภาพที่ 33 สามารถผลิตได้พบว่ามีค่าเท่ากับ 54.56% ซึ่งค่าความเข้มข้นก๊าซมีเทนเป็นตัวบ่งบอกถึงศักยภาพของหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรที่นำมาใช้หมักรวมกับวัตถุดิบมูลช้างในการนำก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์ต่อไป (นฤมล เชาวะกระโทก, 2556) นอกจากนี้ปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวันจะแปรผันโดยตรงตามค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน โดยปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวันภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาแบบกึ่งต่อเนื่อง ของมูลช้างมีค่าอยู่ในช่วง 11.08-54.56% ในภาพที่ 34



ภาพที่ 34 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นรายวันในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง

จากภาพที่ 35 ปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ตลอดระยะเวลา 50 days มีค่าเท่ากับ 1,080.96 NL/kgVS_{added} ซึ่งปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมตลอดระยะเวลา 50 days แปรผันโดยตรงกับปริมาณของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ต่อวันของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (นิลวรรณ ไชยทनु, 2552) โดยผลของศักยภาพการผลิตมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องของวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรที่ 2:1 พบว่า แบบเติมกึ่งต่อเนื่องให้ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนและมีปริมาตรก๊าซสะสมค่อนข้างสม่ำเสมอ ซึ่งระบบแบบกึ่งต่อเนื่องให้ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนใกล้เคียงกันกับระบบแบบเติมกึ่งต่อเนื่อง



ภาพที่ 35 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการพัฒนาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างโดยใช้หัวเชื้อกากตะกอนจากระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ 4 ชนิด ได้แก่ กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค มูลสุกร มูลไก่ และเศษอาหาร ซึ่งอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อเท่ากับ 1:2, 1:1 และ 2:1 gVS_{added} ภายใต้ อุณหภูมิ 35±2 °C โดยงานวิจัยนี้ศึกษา (1) คุณสมบัติของวัตถุดิบมูลช้างที่ใช้ในการทดลอง (2) คุณสมบัติของหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ในการทดลอง (3) ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการแบบกะ ขนาด 1,000 mL (4) ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศใน ขนาด 30 L แบบกึ่งต่อเนื่อง โดยสามารถสรุปผลการศึกษาได้ ดังนี้

1. การวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบมูลช้าง พบว่า ค่า pH เท่ากับ 7.30 เนื่องจากมูลช้างมีการเปลี่ยนแปลงด้วยการย่อยของเอนไซม์ที่เกิดกรดจากแบคทีเรียที่สร้างกรดแล็กติกได้ยาก จึงทำให้มีค่าค่อนข้างเป็นกลาง และมีค่า VS เท่ากับ 743,986.70 mg/L เนื่องจากมูลช้างส่วนใหญ่ประกอบด้วยกลุ่มลิกโนเซลลูโลส มีองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด คือ เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ทำให้มูลช้างจัดอยู่ประเภทวัตถุดิบที่มีการย่อยได้ช้า

2. หัวเชื้อกากตะกอนจากระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ 4 ชนิด ได้แก่ กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค มูลสุกร มูลไก่ และเศษอาหาร พบว่า หัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเศษอาหาร ค่าค่อนข้างเป็นกรด เนื่องจากระบบที่มีการเติมวัตถุดิบที่หลากหลายทางสารอินทรีย์ ทำให้เกิดกระบวนการสร้างเอนไซม์ย่อยจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดกรดจากแบคทีเรียที่สร้างกรดแล็กติกได้ง่าย เป็นผลให้หัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเศษอาหารมีค่า pH เท่ากับ 4.28 และมีค่า VFA/Alk เท่ากับ 0.47, 0.25, 0.20 และ 0.27 ตามลำดับ สำหรับหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลโค มูลสุกร มูลไก่ และเศษอาหาร ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมคือน้อยกว่า 0.40 (Chen, 2018).

-เนื่องจาก VFA/Alk ที่เหมาะสมในการหมักย่อยแบบไร้อากาศที่จะมีค่าน้อยกว่า 0.40 และกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพทั้ง 4 ชนิด ที่ผ่านการหมักย่อยสลายในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศจะมีความคงตัวทางชีวภาพในกรณีที่ไม่มียาฆ่าเชื้อมากกว่าการใช้วัตถุดิบที่ถูกลำนำมาใช้เป็นหัวเชื้อ

โดยตรง อย่างเช่นมูลสัตว์ต่าง ๆ เนื่องจากจุลินทรีย์จากหัวเชื้อกากตะกอนอาศัยอยู่ในระบบที่มีสภาวะแวดล้อมเหมือนกัน ทำให้มีประสิทธิภาพในการใช้เป็นหัวเชื้อมากกว่ามูลสัตว์ที่ไม่ได้ผ่านการหมักแบบไร้อากาศมาก่อน (Dhamodharan et al. 2015)

3. การผลิตชีวภาพจากมูลช้างโดยใช้หัวเชื้อที่แตกต่างกัน ในอัตราส่วน S:I ที่ 1:2, 1:1 และ 2:1 gVS_{added} จากผลการทดลองพบว่า มูลช้างต่อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร ในอัตราส่วน S:I ที่ 2:1 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 775.91 NmL/ gVS_{added} การหมักระหว่างวัตถุดิบมูลช้างและหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรให้ปริมาณความเข้มข้นของมีเทนสูงกว่ามูลสัตว์อื่น ๆ ที่หมักร่วมกับมูลช้าง โดยการผลิตก๊าซมีเทนของมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรเท่ากับ 57%

4. การผลิตก๊าซชีวภาพในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศใน ขนาด 30 L แบบกึ่งต่อเนื่องโดยหมักวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรที่อัตราส่วน 2:1 พบว่า การหมัก แบบเติมกึ่งต่อเนื่องให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกับแบบกะ โดยให้ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเท่ากับ 54.56% อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์ 1,580.44 NL/kg VS_{added} ดังนั้น วัตถุดิบมูลช้างที่ทำการหมักด้วยหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนทั้งแบบกะและแบบเติมกึ่งต่อเนื่อง

ดังนั้นวัตถุดิบมูลช้างต่อหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน จากผลงานวิจัยถือ เป็นการพัฒนาและศึกษาระบบการจัดการมูลช้าง และเป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตชีวภาพในอนาคตที่ยั่งยืน

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบเซลล์โลส เฮมิเซลล์โลส และลิกนิน เนื่องจากวัตถุดิบเป็นกลุ่มประเภทลิกโนเซลล์โลส
2. ควรมีการศึกษาการนำกากตะกอนที่เกิดจากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ต่อในการนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทั้งอัดเม็ด หรืออัดแท่ง เพื่อเป็นการจัดการกับวัตถุดิบมูลช้างอย่างครบวงจร
3. ควรมีส่งวิเคราะห์ค่าอัตราส่วน C/N ของระบบทั้งก่อนและหลังการทดลอง เนื่องจากสารประกอบคาร์บอนและไนโตรเจนของสารอินทรีย์ เป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน
4. สัดส่วนปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผสมอยู่ในก๊าซชีวภาพนั้น ส่งผลทำให้ค่าความร้อนรวมของก๊าซลดลงและยังส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนไม่คงที่ ดังนั้นควรทำการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ หรือการลดสัดส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพลง โดยเทคนิคการดักจับด้วยน้ำ การดูดซับโดยการเปลี่ยนความดัน การดูดซับด้วยสารเคมีโดยใช้สารละลายเอมีน หรือการแยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน เป็นต้น
5. ควรศึกษาและพัฒนาการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างที่เหมาะสมกับปางช้างในการจัดการมูลช้างที่มีปริมาณมากในแต่ละวัน
6. ควรมีการวิเคราะห์สมดุลพลังงาน (Energy Balance) และคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Carbon Footprint) ที่มีการปล่อยมลพิษสู่สิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะไร้อากาศ

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- กระทรวงพลังงาน. 2563. **แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561 – 2580.** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา. <http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015.pdf>. (13 กรกฎาคม 2564).
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2556. **คู่มือไบโอแก๊สเซฟตี้.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). ศูนย์บริการวิชาการด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 17 เชียงสะพาน กษัตริย์ศึก แขวงรองเมือง เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 13030.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2557. **คู่มือการลงทุนระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงานแบบครบวงจรในโรงงานอุตสาหกรรม.** พิมพ์ครั้งที่ 1. 1 ธันวาคม พ.ศ. 2557.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2564. **ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพ.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). ศูนย์บริการวิชาการด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 17 เชียงสะพาน กษัตริย์ศึก แขวงรองเมือง เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 13030.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. **คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรมโรงงานอุตสาหกรรม 75/6 ถนนพระรามที่ 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ
- กลิ่นประทุม ปัญญาปิง. 2563. **เทคโนโลยีการเปลี่ยนของเสียอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพ.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). บริษัท สยามพิมพ์นานา จำกัด 108 ซอยพงษ์สุวรรณ ตำบลศรีภูมิ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่.
- กิตติยา ป้อมเงิน, ประภา ชีวะสลาม และรัชพล พะวงศรีรัตน์. 2559. **การผลิตแก๊สชีวภาพจากผักตบชวาที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยการนึ่งร่วมกับมูลวัวโดยกระบวนการหมักแบบกะ.** วารสารมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปีที่ 8 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2559. หน้า 129-139.
- จุฑาภรณ์ ชนะถาวร. 2560. **การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของวัสดุเหลือทิ้งคาร์บอนสูงและน้ำเสียจากการเตรียมเบตดิงไล่เดือน.** รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ชลลดา แดงประดับ. 2554. **ผลของเวลาเก็บกักต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดหมักโดยกระบวนการไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน.** ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- ชาญ แซ่ม้า 2553. **ผลิตชีวภาพจากพืชผักร่วมกับส่วนผสมของมูลสุกรและมูลโค**. โรงเรียนบ้านตาก ประชาวิทยาการ อ. บ้านตาก จ. ตาก.
- ชุติมา คุณภักดีตร กลยกร ขวัญมา และสุภาวดียอดทองดี. 2560. **การพัฒนาระบบผลิต ก๊าซชีวภาพจากการย่อยร่วมของเชื้อจุลินทรีย์มูลไก่ และหญ้าเนเปียร์ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพระบบบ่อปิดแบบน้ำวน**. การประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยบัณฑิตศึกษา ระดับชาติและนานาชาติ 2560. วันที่ 10 มีนาคม 2560 ณ อาคารพจน์ สารสิน มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ณัฐภูมิ ดุษฎี, กมลดารา เจริญสุวรรณ, ชีโนรส ศรีศิริ, อัครินทร์ อินทนิเวศน์, ฐปน ชื่นบาล, กิตติกร สาสุจิตต์และอัญชลี สายเขียว. 2557. **การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีการหมักในสภาพไร้อากาศแบบแห้งที่มีการหมุนเวียนตะกอน**. การศึกษาวิจัยเชิงเทคนิค. ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่.
- ทวิวัฒน์ สเลอาด. 2554. **ผลของเวลาการกวนผสมและการเวียนตะกอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร โดยระบบหมักแบบไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง**. วิทยานิพนธ์. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธนพร วิชัย และวรรณรัตน์ ปัตร์ประกร. 2554. **การผลิตกรดแลคติกจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดย *Lactobacillus caseisubsp. rhamnosus* ในการเพาะเลี้ยงแบบอาหารเหลว**. การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21 10-11 พฤศจิกายน 2554, อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา.
- นคร ทิพยาวงศ์. 2553. **เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล**. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
- นงลักษณ์ นิธิกุลรัตนนา, วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์ และสรวิศ เผ่าทองสุข. 2559. **การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนอินทรีย์ของระบบหมุนเวียนน้ำ สำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ**. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย. ปีที่ 30 ฉบับที่ 3, หน้า 47-55.
- นฤมล เชางกระโทก. 2556. **การผลิตชีวภาพจากตะกอนดีแคเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง**. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- นิลวรรณ ไชยหนูและพฤกษ์ อักกะรังสี. 2552. **ต้นแบบของการใช้ระบบหมักไร้อากาศแบบถังกวนต่อเนื่องในสถานะเทอร์โมฟิลิก สำหรับบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร**. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. 4-7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่. หน้า 1-9.
- ปวีรุป ผลจันทร์ ปวันรัตน์ บุญอ่อน และภัทรวดี สุขสุวรรณ. 2557. **โครงการผลของชนิด และปริมาณมูลสัตว์ ระยะเวลาในการกวนผสม และความเข้มข้นของแข็งต่อประสิทธิภาพใน**

- การ ผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์โดยถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์. ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์. 2560. **คู่มือการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตก๊าซ ชีวภาพสู่ชุมชน เพื่อแก้ปัญหาการกำจัดผักตบชวาอย่างยั่งยืน.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา. http://www.thaiexplore.net/file_upload/submitter/file_doc/445.pdf. (23 กรกฎาคม 2561).
- รุ่งนภา เนินหาด. 2553. การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษผักร่วมกับมูลสุกร. โรงเรียนดัด ดรุณี อ. เมือง จ. ฉะเชิงเทรา.
- ลาแพน หล้าคำมี. 2553. การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะเลสาบปลาหมอโดยใช้มูลสุกรเป็น หัวเชื้อเริ่มต้นแบบกะและแบบกึ่งกะ. โรงเรียนราชประชานุเคราะห์ อ. ร้องกวาง จ. แพร เวณิกส. 2562. **ส่วนประกอบของเครื่องกวนผสม และการไหลของเหลว.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.wellmix.net/wellmix/dt02.html>. (12 กันยายน 2562).
- ศักรินทร์ หมูเทพ. 2555. **ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อด้วยระบบถังกวนสมบูรณ์.** วิทยานิพนธ์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2562. **วัสดุอ้างอิงเพื่อการ ตรวจวัด ปริมาณ ก๊าซ มีเทน ใน อากาศ .** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา . [http://www.nimt.or.th/etrm/ upload/basicdescription.pdf](http://www.nimt.or.th/etrm/upload/basicdescription.pdf). (24 กรกฎาคม 2564).
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2564. **สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย.** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา. <http://www.eppo.go.th/epposite/index.php/th/energy-information>. (14 กรกฎาคม 2564).
- สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม. 2562. **โครงการ การวิจัยและ พัฒนาระบบเพื่อการอยู่ร่วมกันระหว่างคนกับช้างป่าอย่างสันติ บนฐานพลเมืองมีส่วนร่วม และ งาน วิจัย เพื่อ อ ง ถิ่น .** [ออนไลน์]. แหล่งที่มา . <https://humanelephantvoices.org/contacts>. (14 กรกฎาคม 2564).
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. 2564. **วัสดุ พลังงานและสิ่งแวดล้อม.** (พิมพ์ ครั้งที่ 1). สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) กระทรวงการ อุดมศึกษาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.) 111 อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี.

- สุดารัตน์ ภัคดี. 2551. การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวุ้นเส้นโดยใช้กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- Achinas, S., & Euverink, G.J.W. (2016). **Theoretical analysis of biogas potential prediction from agricultural waste.** Resource-Efficient Technologies. 2: 143–147. <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.08.001>.
- Aditi, D., Tanvi, G., Abhilash, K.T., Julie, M., Kylie, F., & Rajesh, K.S. 2018. **Thermophilic anaerobic digestion: enhanced and sustainable methane production from co-digestion of food and lignocellulosic wastes.** Energy. 11(2058). 1-1.
- Amorpan T., Kanyarat S., Shao Y L., Chettaphong P., Chayanon S., & Sumate C. 2020. **Anaerobic Digestion of Napier Grass (Pennisetum purpureum) in Two-Phase Dry Digestion System Versus Wet Digestion System.** BioEnergy Research, 13:853-865.
- Bernard, S.S., Srinivasan, T., Suresh, G., PaulaK, A.I., Fowzana KM., & Kishorea, V.A. 2020. **Production of biogas from anaerobic digestion of vegetable waste and cow dung.** Materials Today: Proceedings. 33:1104–1106.
- Cazier, E., Trably, E., Steyer, J.P., & Escudie, R. 2015. **Biomass hydrolysis "inhibition at high hydrogen partial pressure in solid-state anaerobic digestion.** Bioresource Technology. 190:106-113.
- Chandra, R., Takeuchi, H., & 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.
- Chen, Y.C. 2018. **Effects of urbanization on municipal solid waste composition.** Waste Management. 79:828e36.
- Collins NM. 1991. **The conservation atlas of tropical forests: Asia and the Pacific.** London: Macmillan Press.
- Córdoba, V., Fernández, M., & Santalla, E. 2018. **The effect of substrate/inoculum ratio on the kinetics of methane production in swine wastewater anaerobic digestion.** Environmental Science and Pollution Research. 25: 21308–21317.

- Dhamodharan, K., Kumar, V., & Kalamdhad, A.S. 2016. **Effect of different livestock dung as inoculum on food waste anaerobic digestion and its kinetics.** *Bioresource Technology*. 180, 237-241.
- Elsamadony, M., & Tawfik, A. 2015. **Dry anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal waste with paperboard mill sludge and gelatin solid waste for enhancement of hydrogen production.** *Bioresource Technology*. 191, 157– 165.
- Guangyin, C., Zheng, Z., Shiguan, Y., Caixia, F., Xingxing, Z., & Yan, L. 2010. **Experimental co-digestion of corn stalk and vermicompost to improve biogas production.** *Waste Management*, 30(10), 1834-1840.
- Lui, G., Zhang, R., El-Mashad, H., & Dong, R. 2009. **Effect of feed to inoculum ratios on biogas yields of food and green wastes.** *Bioresource Technology*. 100:5103-5108.
- Malini, T., & Narayanan, D. K. 2016. **Evaluation of biogas production potential from elephant dung.** *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 395-0072.
- Malini, A.K., & Narayanan, D.K. 2015. **Evaluation of biogas production potential from elephant dung.** *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2:1780–1784.
- Panin, S., Setthapun, W., Sinsuw, A.A.E., Sintuya, H., & Chu, C.Y. 2021. **Biohydrogen and biogas production from mashed and powdered vegetable residues by an enriched microflora in dark fermentation.** *International Journal of Hydrogen Energy*. 46:14073-14082.
- Raposo, F., Borja, R., Banks, C. J., & Siegart, I. 2006. **Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch test.** *Process Biochemistry* 41: p. 1440-1450.
- Sawatdeenarunat, C., Saipa, S. & Suaisom, P. 2021. **Anaerobic digestion of elephant camp-derived wastes: methane potential, kinetic study, and biorefinery platform.** *Biomass conv. Bioref.* <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01576-w>.

- Sawatdeenarunat, C., Nam, H., Adhikari, S., Sung, S., & Khanal, S.K. 2018. **Decentralized biorefinery for lignocellulosic biomass: integrating anaerobic digestion with thermochemical conversion.** *Bioresource Technology.* 250:140–147. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.020>.
- Shanmugam, P., & 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.
- Sukasem, N., & Prayoonkham, S. 2017. **Biomethane recovery from fresh and dry water hyacinth anaerobic co-digestion with pig dung, elephant dung and bat dung with different alkali pretreatments.** *Energy Procedia.* 138, 294-300.
- Thaemngoen A, Saritpongteeraka K, Leu SY, Phuttaro C, Sawatdeenarunat C, & Chaiprapat S. 2020. **Anaerobic digestion of Napier grass (*Pennisetum purpureum*) in two-phase dry digestion system versus wet digestion system.** *Bioenergy Research.* 13:853–865.
- VDI 4630. 2004. **Fermentation of organic materials - characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests.**
- Wu, S., Ni, P., Li, J., Sun, H., Wang, Y., Luo, H., Dach, J and Dong, D. 2016. **Integrated approach to sustain biogas production in anaerobic digestion of chicken manure under recycled utilization of liquid digestate : dynamics of ammonium accumulation and mitigation control.** *Bioresource Technology.* 205:75–81.
- Xu, ZX., Song, H., Zhang, S., Tong, S.Q., He Z.X., Wang, Q., Li, B., & Hu, X. 2019. **Co-hydrothermal carbonization of digested sewage sludge and cow dung biogas residue: Investigation of the reaction characteristics.** *Energy.* 187:115972.





ภาคผนวก ก
ตารางแสดงผลการวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 5 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกะ

สัปดาห์	ชื่อตัวอย่าง	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ			
		CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)
สัปดาห์ที่ 1	S/I เท่ากับ 1:2				
	ED+ADPM	14.00	28.80	3.40	0.00
	ED+ADCM	15.17	32.30	6.70	0.00
	ED+ADCHM	13.57	30.20	3.20	2,840.00
	ED+ADFW	13.40	29.20	3.30	0.00
	S/I เท่ากับ 1:1				
	ED+ADPM	21.80	35.20	3.50	0.00
	ED+ADCM	21.60	32.10	2.10	0.00
	ED+ADCHM	10.00	52.1	3.40	2,930.00
	ED+ADFW	13.17	25.40	3.80	0.00
	S/I เท่ากับ 2:1				
	ED+ADPM	11.90	13.50	2.30	0.00
	ED+ADCM	13.80	17.60	2.40	0.00
	ED+ADCHM	ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นน้อยมาก			
	ED+ADFW	13.17	15.60	1.20	0.00
	สัปดาห์ที่ 2	S/I เท่ากับ 1:2			
ED+ADPM		21.30	29.50	2.00	0.00
ED+ADCM		25.17	32.10	2.10	0.00
ED+ADCHM		22.20	32.50	1.20	4,390.00
ED+ADFW		19.30	28.40	1.00	0.00
S/I เท่ากับ 1:1					
ED+ADPM		21.80	30.20	1.20	0.00
ED+ADCM		21.60	31.50	2.00	0.00
ED+ADCHM		10.00	50.10	2.00	4,102.00
ED+ADFW		21.17	32.10	1.50	0.00
S/I เท่ากับ 2:1					

สัปดาห์	ชื่อตัวอย่าง	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ			
		CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)
	ED+ADPM	32.50	37.20	1.00	0.00
	ED+ADCM	36.10	42.10	1.20	0.00
	ED+ADCHM	4.20	10.30	2.00	1,830.00
	ED+ADFW	21.17	35.20	1.30	0.00
สัปดาห์ที่ 3	S/I เท่ากับ 1:2				
	ED+ADPM	36.40	44.50	3.20	0.00
	ED+ADCM	35.83	45.60	2.50	0.00
	ED+ADCHM	29.83	33.20	1.20	2,920.00
	ED+ADFW	30.40	42.30	2.10	0.00
	S/I เท่ากับ 1:1				
	ED+ADPM	42.40	44.30	1.00	0.00
	ED+ADCM	38.20	42.10	2.20	0.00
	ED+ADCHM	16.80	23.20	1.00	4,230.00
	ED+ADFW	45.20	44.30	1.20	0.00
	S/I เท่ากับ 2:1				
	ED+ADPM	44.70	42.20	1.00	0.00
	ED+ADCM	45.60	44.80	2.30	0.00
	ED+ADCHM	10.70	27.20	1.00	2,570.00
	ED+ADFW	43.30	44.30	1.00	0.00
	สัปดาห์ที่ 4	S/I เท่ากับ 1:2			
ED+ADPM		36.40	43.50	1.20	0.00
ED+ADCM		42.07	44.20	2.20	0.00
ED+ADCHM		35.23	44.30	1.20	2,950.00
ED+ADFW		29.10	35.00	1.20	0.00
S/I เท่ากับ 1:1					
ED+ADPM		42.40	32.50	2.30	0.00

สัปดาห์	ชื่อตัวอย่าง	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ			
		CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)
	ED+ADCM	38.20	44.20	1.20	0.00
	ED+ADCHM	16.80	26.30	1.10	4,306.00
	ED+ADFW	46.50	45.30	1.20	0.00
	S/I เท่ากับ 2:1				
	ED+ADPM	44.80	45.20	1.20	0.00
	ED+ADCM	45.40	46.20	1.00	0.00
	ED+ADCHM	21.30	33.50	1.30	3,210.00
	ED+ADFW	43.30	44.60	2.00	0.00
สัปดาห์ที่ 5	S/I เท่ากับ 1:2				
	ED+ADPM	36.40	27.50	1.00	0.00
	ED+ADCM	35.80	35.90	1.00	0.00
	ED+ADCHM	30.20	34.50	2.30	3,000.00
	ED+ADFW	29.10	30.40	1.30	0.00
	S/I เท่ากับ 1:1				
	ED+ADPM	42.40	44.30	1.00	0.00
	ED+ADCM	38.20	44.20	1.20	0.00
	ED+ADCHM	16.80	27.40	1.30	4,352.00
	ED+ADFW	46.80	32.20	1.00	0.00
	S/I เท่ากับ 2:1				
	ED+ADPM	44.90	35.20	2.50	0.00
	ED+ADCM	45.10	44.20	2.10	0.00
	ED+ADCHM	24.70	32.60	2.30	4,230.00
ED+ADFW	44.50	34.50	1.90	0.00	
สัปดาห์ที่ 6	S/I เท่ากับ 1:2				
	ED+ADPM	41.20	36.20	1.00	0.00
	ED+ADCM	41.60	35.00	2.30	0.00

สัปดาห์	ชื่อตัวอย่าง	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ				
		CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)	
	ED+ADCHM	34.20	35.60	1.40	3,502.00	
	ED+ADFW	43.00	44.20	1.20	0.00	
	S/I เท่ากับ 1:1					
	ED+ADPM	42.40	45.20	1.20	0.00	
	ED+ADCM	38.20	44.30	1.20	0.00	
	ED+ADCHM	16.80	27.30	1.40	4,523.00	
	ED+ADFW	47.00	44.30	2.00	0.00	
	S/I เท่ากับ 2:1					
	ED+ADPM	46.90	35.20	1.20	0.00	
	ED+ADCM	46.20	40.30	1.20	0.00	
	ED+ADCHM	26.50	29.30	2.30	3,564.00	
	ED+ADFW	44.50	45.23	2.10	0.00	
	สัปดาห์ที่ 7	S/I เท่ากับ 1:2				
		ED+ADPM	41.20	42.30	1.00	0.00
		ED+ADCM	41.60	43.20	1.00	0.00
ED+ADCHM		34.20	27.60	1.60	4,312.00	
ED+ADFW		43.00	45.20	2.00	0.00	
S/I เท่ากับ 1:1						
ED+ADPM		42.40	43.20	1.00	0.00	
ED+ADCM		38.20	44.20	2.20	0.00	
ED+ADCHM		16.80	28.30	1.60	4,120.00	
ED+ADFW		47.00	44.20	1.40	0.00	
S/I เท่ากับ 2:1						
ED+ADPM		46.90	44.20	1.20	0.00	
ED+ADCM		46.20	35.60	2.30	0.00	
ED+ADCHM		26.50	30.20	1.00	3,420.00	
ED+ADFW		48.10	40.30	2.00	0.00	

สัปดาห์	ชื่อตัวอย่าง	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ			
		CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)
สัปดาห์ที่ 8	S/I เท่ากับ 1:2				
	ED+ADPM	41.20	36.40	2.30	0.00
	ED+ADCM	41.60	35.40	3.2	0.00
	ED+ADCHM	34.20	45.20	1.20	4,200.00
	ED+ADFW	43.00	44.20	1.00	0.00
	S/I เท่ากับ 1:1				
	ED+ADPM	42.40	38.50	1.00	0.00
	ED+ADCM	38.20	44.20	2.30	0.00
	ED+ADCHM	16.80	27.20	3.40	4,305.00
	ED+ADFW	47.00	44.20	1.20	0.00
	S/I เท่ากับ 2:1				
	ED+ADPM	48.50	42.03	1.00	0.00
	ED+ADCM	47.50	40.50	2.30	0.00
	ED+ADCHM	26.80	35.20	1.20	4,230.00
	ED+ADFW	48.10	42.80	2.40	0.00
	สัปดาห์ที่ 9	S/I เท่ากับ 1:2			
ED+ADPM		41.20	43.50	1.20	0.00
ED+ADCM		41.60	42.80	1.60	0.00
ED+ADCHM		34.20	29.50	1.10	4,256.00
ED+ADFW		43.00	36.70	1.00	0.00
S/I เท่ากับ 1:1					
ED+ADPM		42.40	35.60	1.50	0.00
ED+ADCM		38.20	27.60	1.20	0.00
ED+ADCHM		16.80	19.40	2.20	3,250.00
ED+ADFW		47.00	39.90	2.00	0.00
S/I เท่ากับ 2:1					

สัปดาห์	ชื่อตัวอย่าง	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ			
		CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)
	ED+ADPM	57.00	26.80	2.00	0.00
	ED+ADCM	48.00	42.20	1.30	0.00
	ED+ADCHM	27.20	37.20	1.00	4,350.00
	ED+ADFW	48.50	35.20	1.00	0.00
สัปดาห์ที่ 10	S/I เท่ากับ 1:2				
	ED+ADPM	44.00	33.20	1.00	0.00
	ED+ADCM	42.40	38.30	2.00	0.00
	ED+ADCHM	35.80	37.20	1.00	3,260.00
	ED+ADFW	43.10	36.70	1.00	0.00
	S/I เท่ากับ 1:1				
	ED+ADPM	42.40	42.80	1.30	0.00
	ED+ADCM	38.20	29.90	1.50	0.00
	ED+ADCHM	16.80	17.60	2.20	3,500.00
	ED+ADFW	55.00	45.80	2.00	0.00
	S/I เท่ากับ 2:1				
	ED+ADPM	57.00	27.60	1.20	0.00
	ED+ADCM	48.00	41.50	1.00	0.00
	ED+ADCHM	27.20	38.30	1.50	>>5,000.00
	ED+ADFW	48.50	42.80	1.00	0.00
	สัปดาห์ที่ 11	S/I เท่ากับ 1:2			
ED+ADPM		44.00	48.20	2.00	0.00
ED+ADCM		42.40	44.20	1.20	0.00
ED+ADCHM		35.80	39.90	1.00	3,000.00
ED+ADFW		43.10	29.90	3.20	0.00
S/I เท่ากับ 1:1					
ED+ADPM	42.40	25.50	1.30	0.00	

สัปดาห์	ชื่อตัวอย่าง	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ			
		CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	O ₂ (%)	H ₂ S (ppm)
	ED+ADCM	38.20	41.20	1.00	0.00
	ED+ADCHM	16.80	27.60	1.00	3,200.00
	ED+ADFW	55.00	48.4	2.00	0.00
	S/I เท่ากับ 2:1				
	ED+ADPM	57.00	30.70	1.20	0.00
	ED+ADCM	48.00	42.80	2.00	0.00
	ED+ADCHM	27.20	38.30	1.00	>>5,000.00
	ED+ADFW	48.50	21.30	1.20	0.00

*หมายเหตุ : เก็บก๊าซชีวภาพที่ได้จากระบบทุกวัน มีการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซสัปดาห์ละครั้ง





ภาคผนวก ข

บทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในระดับชาติและนานาชาติ

The 34th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology and International Conference “Sustainable Bioeconomy : Challenge and Opportunities”



**Thai Society for Biotechnology
International Conference**

“Sustainable Bioeconomy : Challenge and Opportunities”

November 24–25, 2022, Ambassador Hotel Bangkok, Thailand

i



The 34th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology and International
Conference “Sustainable Bioeconomy : Challenge and Opportunities”

Organized by



Thai Society for Biotechnology



**Department of Microbiology, Faculty of Science
King Mongkut's University of Technology Thonburi**

**School of Bioresources and Technology
King Mongkut's University of Technology Thonburi**



AOAC International Thailand Section



CERTIFICATE OF PARTICIPATION

for

YANIKA BOONYUANG

at the 34th Annual Meeting
Of the Thai Society for Biotechnology and International Conference
“Sustainable Bioeconomy : Challenges and Opportunities”
Bangkok, Thailand | November 24-25, 2022

Asst. Prof. Dr. Niyom Kamlangdee
Chairperson of organizing committee

Prof. Dr. Penjitt Srinophakun
President of the Thai Society for Biotechnology





CONTENT

MBO04	Enhancing Soluble Expression of Glutamate Decarboxylase Through Amino Acid Substitution and Chaperone Co-Expression	1
MBO05	Extraction and Characterization of Collagen from Tuna Skin and Its Potential Application in Biomedical 3D Scaffolds	14
MBO06	Isolation and Purification of Bacteriophages Specific to Uropathogenic <i>Escherichia Coli</i> Strains	25
MBO07	3D Culture System with Alginate Hydrogel Supports Survival and Poliferation of Human Mesenchymal Stem Cells	37
MBO08	An <i>In Vivo</i> Selection System for the Directed Evolution of Transcription Factor-Based Biosensors	48
MBO09	Development of DNAzyme Functionalized Magnetic Particles-Based Colorimetric Biosensor for Onsite Lead Ion Detection	60
MBP03	Purification of Anticancer Compound of <i>Micromonospora</i> sp. MCN027 Isolated from Mangrove Sediment in Thailand	73
MBP04	Development of <i>Candidatus Liberibacter Asiaticus</i> Genetic Detection Process for Orange Tree Using Colorimetric Loop-Mediated Isothermal Amplification	85
MBP05	A Comparison of Five Commercial DNA Extraction Kits for Facial Skin Microbiome Study	97
MBP06	Optimization of Jagged1 Protein Production by Transient Transfection in Mammalian Expression System	108
MBP09	Physiological Function Analysis of Redox Stress Responsive Regulator ResR in <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	120
IBO01	Production of Xylolipid as Green Surfactant by the Yeast <i>Meyerozyma guilliermondii</i>	132
IBO02	Potential of Polyhydroxyalkanoates (PHA) Production of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> BSE1 and <i>Bacillus megaterium</i> KLS2	143
IBO11	The Role of Magnesium and Calcium Ions on Light Emission of <i>Vibrio campbellii</i> RMT1 and Glowing on <i>Episcia lilacina</i> Leaves	153
IBO12	Potential of Dual Chamber Microbial Fuel Cell for Sulfide Removal and Electricity Generation	163
IBO16	Isolation and Application of Effective Microorganisms in Reducing COD of Oil-Contaminated Wastewater from Industry	175
IBO18	The Potential of Biogas Production from Elephant Dung with Chicken Manure Sludge Inoculum	183

IBO19	Biogas Production Potential from Black Soldier Fly Larvae Washing Process Wastewater	193
IBP01	D-Lactic Acid Fermentation Platform from Oil Palm Trunk Sap Fermented by <i>Sporolactobacillus terrae</i> SBT-1	205
IBP03	Improvement of a Thermotolerant <i>Acetobacter pasteurianus</i> WS2-16 for Acetic Acid Production at Higher Temperatures	213
IBP04	Modified MRS Medium using Sweet Potatoes as Main Components for <i>Lactobacillus</i> Cultivation	225
IBP07	The <i>shc</i> Gene Overexpression Could Improve Growth of Cyanobacterium <i>Synechocystis</i> sp. PCC 6803 under Alcohol Stress	234
IBP09	Optimization of Enzymatic Cascade Reactions for Linear Alpha-Olefin Production	245
IBP13	Biodegradation of Phthalate Ester by Bacterial Consortia Enriched from Landfill Soil and Maintenance of Activity	252
IBP14	Exploring Microbial Community from the Gulf of Thailand Sediment for Plastic Degradation	265
IBP15	Improving the Di-(2-ethylhexyl) Phthalate-Degradation Performance of a Bacterial Consortium: Optimization of Consortium Member and Ratio	277
IBP16	Stabilization of Synthetic Urine Wastewater by Nitrification in Continuous-Flow Biofilm Reactor	290
FFO01	Physicochemical Properties of Menthol-Based Natural Deep Eutectic Solvents and Their Capability to Extract Oil from Coconut Residue	301
FFO03	Proteomic Profile of novel <i>Saccharomyces cerevisiae</i> RSO4 Strain on Hom Mali Rice Fermentation	313
FFO05	Effect of Ultrasound-Assisted Washing of Salted Jellyfish (<i>Lobonema smithii</i>) on Quality of Desalinated Jellyfish Protein Powder	330
FFO06	Physico-Chemical Change of Mangosteen Peel Kombucha During Fermentation	343
FFP02	Substitution of Sodium Nitrate in Chicken Sausage with Beetroot and Red Radish Powders	356
FFP03	Fermentation of Vinegar from Corn Silk in Stirred Aeration Tank Reactor	368
FFP04	Kombucha from Corn Silk Based Tea	378
FFP08	Effect of Milk Addition on Antioxidants and Quality of Durian Drink During Cold Storage	391
FFP09	Preparation of Swollen Starch Granules from Heat-Moisture Treated Cassava Starch and Its Oil Absorption Capacities	401
FFP10	Imitation Crab Stick from Soy Protein Isolate: Factors Affecting Soy Protein Isolate Gel	414



FFP11	Ultrasound-Assisted Alkaline Extraction of Proteins from Fresh and Hot Air-Dried Duckweed (<i>Wolffia arrhiza</i>) and Their Functional Properties	422
FFP13	Antiglycation and Antioxidant Activities of Fermented Black Mung Bean by <i>Rhizopus oligosporus</i>	435
FFP14	Morphological and Physical Properties of Microcrystalline Cellulose from Alpha-Cellulose Bagasses by Greener Production Process	448
ABO02	Characterization of cassava stem cutting quality by volume density	462
ABO03	A Community-Based Screening for Targeting Plant Growth-Promoting Bacteria from the Sugarcane Microbiome	474
ABO04	Characterization of Potential Probiotic Microbes with Antimicrobial Activity Against <i>Salmonella</i> sp.	487
ABO05	Optimization of Sophorolipid Production in the Yeast <i>Candida riodocensis</i> via Response Surface Methodology	499
ABP01	Immunoproteomic Identification of OmpC of <i>Edwardsiella ictaluri</i> as an Immune Target Protein to Elicit Antibody Response in Nile tilapia	510
ABP02	The Nutritional Value and Antioxidation Activity of Thai Chia Seed	522
ABP05	<i>In-vitro</i> and <i>In-vivo</i> Plant Growth Promoting Activities of Actinomycete Isolates	531
ABP07	Antioxidant Activities of Probiotic <i>Bacillus</i> sp.	544
ABP08	Assessment of Antioxidant Activities of Probiotic Lactic Acid Bacteria	554
ABP09	Exogenous Pectic-Oligosaccharide Derived from Pomelo Peel Improved the Growth of Rice Seedlings	562
ABP12	Effect of Organic Carbon Sources on Biomass, Carotenoid, Lipid and Docosahexaenoic Acid (DHA) Productions in Marine Microalga <i>Aurantiochytrium limacinum</i> TBRC 3648	574
ABP13	Isolation and Identification of Mutations in Methyl Viologen-Resistant Mutant of Cyanobacterium <i>Synechocystis</i> sp. PCC 6803	583
BSO01	Study of Steffimycin Biosynthetic Gene Cluster Distribution among Marine Actinomycetes and Its Molecular Interaction to CDK1 for Anticancer Research	598
BSO02	Comparison of Read-Based and Metagenome Assembled Genome-Based Approaches for Characterizing Microbial Taxonomic Profiles in Sulfate-Rich Wastewater Treatment Systems	611

IBO18

The Potential of Biogas Production from Elephant Dung with Chicken Manure Sludge Inoculum

**Yanika Boonvuang¹ Kittikorn Sasujit¹ Pakamon Pintana¹ Chan Yodle²
Surasak Nummisri² Sasithorn Saipa³ Chayanon Sawatdeenarunat³ and
Rotjapun Nirunsin^{1*}**

¹*Department of Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand*

²*Department of Environmental Science, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University Chiang Mai 50300, Thailand*

³ *Asian Development College for Community Economy and Technology, Chiang Mai Rajabhat University Chiang Mai 50300, Thailand*

*Corresponding author. E-mail: rotjapun@gmail.com

ABSTRACT

The main purposes of this research are to study biochemical potential (BMP) from elephant dung (ED) with inoculum derived from chicken manure anaerobic digester tank (CH-AD). The BMP tests with substrate/inoculum ratio (SIR) at 1:2 1:1 and 2:1 gVS_{added} in the batch reactors were prepared using 1,000 mL glass bottles at 35±2 °C, and all experimental conditions were triplicated. The results showed that at the SIR of 1:2, 1:1, and 2:1 gVS_{added}, the accumulated biogas yields were 42.48±17.80, 160.60±8.60, and 434.10±38.30 NmL/gVS_{added}, respectively. In addition, the cumulative methane yields were 42.40± 18.10, 24.19±8.60, and 123.10±38.40 NmL/gVS_{added}, respectively. The modified Gompertz equation fitted well with the experimental data with an R² more than 0.98. Moreover, the ratio at the SIR of 2:1, showed the highest predicted methane production potential of 123.72±2.06 NmL/gVS_{added}. The methane yield of ratios at 2:1 and 1:1 were significantly different. The methane potential at SIR ratio of 1:2 was relatively low due to the high fiber of the biomass. Therefore, the anaerobic digester of ED with CH-AD as the inoculum at the SIR at 2:1 was the optimized condition of this research.

Keywords: Anaerobic digestion, Biochemical methane potential, Chicken dung, Elephant dung, Modified Gompertz.



INTRODUCTION

At present, fuel consumption in Thailand is in the increasing trend. In 2022, The Department of Energy Business reported that fuel demand increased 13.90% to 153×10^6 d in the first two months. The easing of lockdown measures led to an increase in traveling and enhancing economic activities (Krajangwit, 2022). However, most fossil fuels account for a fifth of the world's total carbon emissions. Thailand's energy sector has been trying to solve this problem by promoting and developing renewable energy (Muangjai et al., 2022).

Biogas is renewable energy which can be produced by agricultural waste, food waste, animal dung, and sewage. Also, this biotechnology could mitigate the stress on depleted natural resources and growing energy insecurity (Muangjai et al., 2022 and Wu et al., 2016). Therefore, an ED can be used for producing biogas. From the Thailand Elephant Status Report 2022, more than 2,700 elephants were used in the tourism industry prior in Thailand. However, each elephant can produce up to 30 kg/d leading to 60 tons of dung in this country (Sawatdeenarunat et al., 2021).

In addition elephant dung ED is major source of many environmental pollutions. The purpose of this research is to evaluate the methane potential from ED. The biochemical methane potential (BMP) tests was operated at three different substrate/inoculum ratios (SIR).

MATERIAL AND METHOD

Elephant dung and inoculum for methane production

The ED used in this study was collected from the elephant camp in Chiang Mai province, Thailand. ED feedstocks were kept at 4 ± 2 °C in the refrigerator. When an experiment started, The chicken manure anaerobic digester (CH-AD) was used as the inoculum and was collected from the commercial-scale anaerobic digester tank that located in Chiang Mai, Thailand. The characteristics of the elephant dung and sludge inoculum used in this study are given in Fig 1.

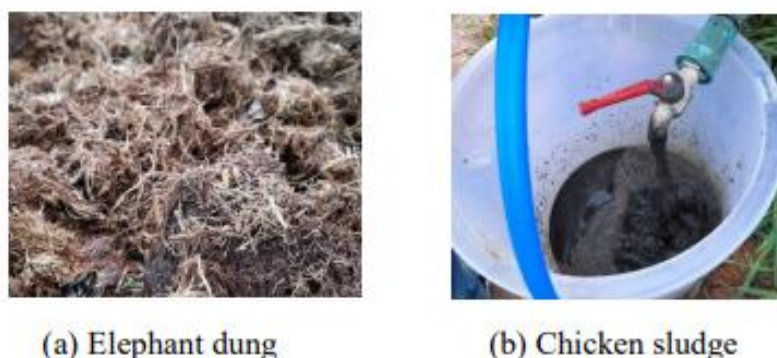


Figure 1. Characteristics of (a) elephant dung and (b) Chicken sludge inoculum.

Experimental setup

The BMP tests were conducted in 1000 mL serum bottles used as the reactors for the batch studies. The ED and CH-AD were mixed at the ratios of 1:1, 1:2, and 2:1 (gVS to gVS). Distilled water was added to adjust the bottle content's volumes to 400 mL. (VDI 4630, 2016) The experiments were done under the mesophilic condition of 35 ± 2 °C and each sample was triplicated. The BMP tests were conducted for 60 days. At the end of the experiment, the reactor contents were analyzed for Total Solid (TS), Volatile Solids (VS), Volatile Fatty Acid (VFA), Alkalinity (ALK) and Potential of Hydrogen ion (pH). The biogas compositions were analyzed periodically using a portable gas analyzer (GFM416; Gas Data Limited, United Kingdom).

RESULTS

The characteristics of Chicken sludge and elephant dung

The characteristics of CH-AD and ED are shown in Table 1. The results indicated that the VS/TS ratio for ED and CH-AD sludges were 0.81 ± 1.75 and 0.43 ± 0.00 , respectively. The VS/TS ratio for ED indicated the potential feedstock for anaerobic digestion. In addition, The C/N ratio of CH-AD is 0.2, which could represent the balance between substrate and inoculum for anaerobic digestion.

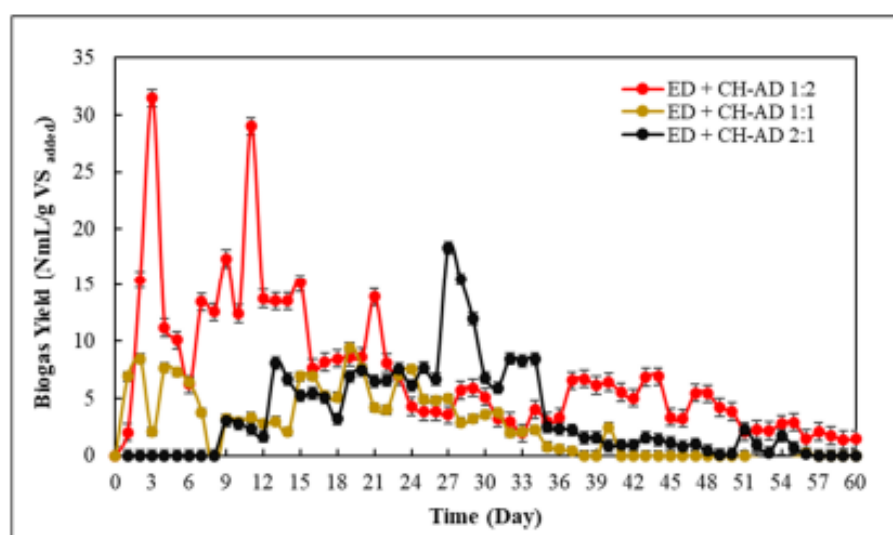
Table 1. The characteristics of Chicken sludge and elephant dung

Characteristics	Unit	Elephant dung	Chicken sludge
pH	-	NA	8.13
TS	%	96.26	4.01
VS	%	74.40	1.74
VS/TS ratio	-	0.81	0.43
C/N ratio	-	54/1	0.2/1
VFA/ALK ratio	-	NA	0.25

NA, Not Applicable

Biogas production and methane components

The daily biogas productions of all SIR were shown in Fig. 2. From the graph, biogas yield of all ratios were produced in the first day and the maximum yield was occurred on the third day with the biogas production of 31.48 NmL/gVS_{added} for 1:2 ratio, and on the twentieth day with the biogas production of 9.45 NmL/gVS_{added} for 1:1 ratio. In addition, the peaks of the graph on the twenty-seventh day with the biogas production of 18.32 NmL/gVS_{added} for 2:1 ratio was observed.


Figure 2. Daily Biogas Yield

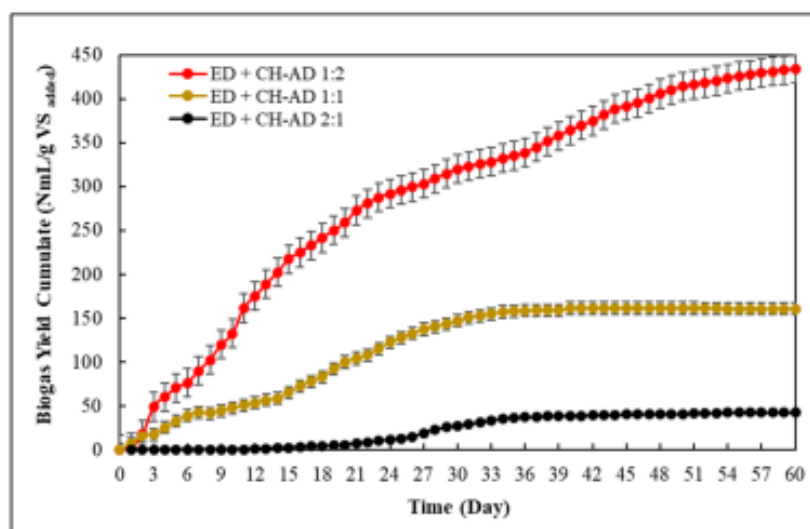


Figure 3. Cumulative Biogas Yield

The curve of cumulative biogas yield of all ratios were the same trend as daily biogas yields as presented in Fig. 3. The results indicated that the cumulative biogas yield of ED:CH-AD were 160.60 ± 8.60 NmL/gVS_{added}, 434.10 ± 38.30 NmL/gVS_{added} and 42.48 ± 17.80 NmL/gVS_{added} for the ratios of 1:1, 1:2, and 2:1, respectively. The final methane contents of 1:1, 1:2, and 2:1 ratios were 26.80%, 34.20% and 16.80% respectively.

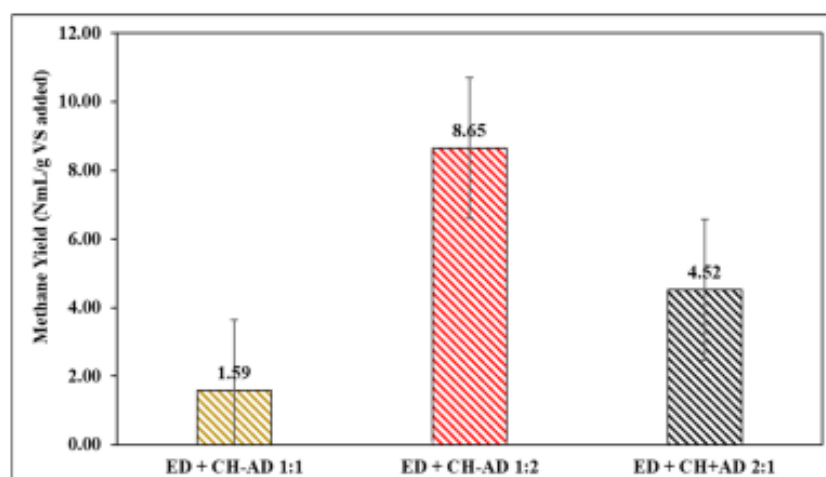


Figure 4. Daily Methane Yield



Figure 4 show the daily methane yield of all ratios. The highest daily methane yields of were 1.59, 8.65, and 4.52 NmL/gVS_{added} for the SIR of 1:1, 1:2, and 2:1, respectively. The cumulative methane yield was a crucial parameter and reliable method to determine the methane potential of a substrate. The cumulative methane yields of all ratios were 24.19±8.60, 123.10±38.40, and 42.40±18.10 NmL/gVS_{added} for 1:1, 1:2, and 2:1, respectively. The kinetic parameters for AD of at the different SIR are presented in Table 2.

Table 2 Kinetic parameters for AD of elephant dung at different substrate/inoculum ratios.

SIR	M (NmL/gVS _{added})	R _m (NmL/gVS _{added})	λ (d)	R ²
1:1	25.21	1.02	5.63	0.98
1:2	123.40	2.53	17.89	0.99
2:1	42.47	3.27	1.41	0.98

DISCUSSION

The characteristics of ED and CH-AD were shown in Table 1, The recommended VS/TS ratio should be in the range of 0.69-0.95 (Malini et al., 2015, Koch et al., 2017 and Abbassi-Guendouz et al., 2012). The VS/TS ratio for ED of 0.95 found in this study was a potential feedstock for serving anaerobic digestion. The finding is similar to the study of Sawatdeenarunat et al., 2021 and Abdulsalam et al., 2015 who reported that typically VS and TS ratio should be in the range of 0.68-0.75. In addition, The ratio of C/N could represent the balance between carbon source and nutrient for AD. The C/N ratio in ED of 54 is higher than the recommended value. Generally, the best C/N ratio is between either 20 Khanal et al. (2008) and Kafle et al. (2016) reported that high C/N ratios could lead to prolonged digestion duration. Whereas, CH-AD with a low C/N ratio tends to produce excessive ammonia, which may cause inhibition in AD.

The daily produced biogas of all SIR ratio results revealed that the maximum biogas yield of all conditions were significantly different. Typically, ED contains lignocellulose, including cellulose, hemicellulose, and

lignin among others (Sawatdeenarunat et al., 2015, Dhamodharan et al., 2016 and Saleem et al., 2016). It should be noted that biogas yields of Napier Grass containing lignocellulosic take a long time for complete digestion. The cumulative biogas yield related with daily biogas yields trend as presented in Fig. 3 The yields increased rapidly on the first and the second day of hydraulic retention time and then the cumulative biogas yield of 2:1 ratio increased slower than those of 1:1 and 1:2 ratios. Besides, the cumulative biogas yield of 2:1 of 42.48 ± 17.80 NmL/gVS_{added} was significantly lower than those of 1:1 of 160.60 ± 8.60 NmL/gVS_{added} and 1:2 of 434.10 ± 38.30 NmL/gVS_{added}. The results that occurred due to the internal structure of ED, which was hard for biologically digested (Sawatdeenarunat et al., 2015).

The methane components of the produced biogas were shown in Fig. 4. The final methane contents of 1:1, 1:2, and 2:1 ratios were 26.80%, 34.20%, and 16.80% respectively. The daily and cumulative methane yields are shown in Fig. 4. The suitable S:I ratios for solid AD range from 0.50 to 2.30 (Zhu et al., 2014 and Pham et al., 2013). From the results of this study, the optimal S:I ratio of lignocellulosic biomass was 1:2, which is within the range obtained from solid AD studies. This study adopted the modified Gompertz model to examine the kinetic parameters. From Table 2, it is clear that the S:I ratio of 1:2 presented the highest methane production potential of 123.40 NmL/gVS_{added} followed by 1:1 and 2:1. The ratio of 2:1 also showed the lowest methane production potential of 42.47 NmL/gVS_{added}. The lag phase is one of the essential indicators for selecting inoculum for the AD process. Typically, the lag phase of AD of the lignocellulosic substrate could be during the early stage of the AD process (Zhu et al., 2014 and Gil et al., 2006). In addition, The modified Gompertz model was accuracy with the experimental data of all ratios with a high R² between 0.98 and 0.99. The modified Gompertz was used to fit the cumulative methane yield data from trials (Lay et al., 1996 and Dechruga et al., 2013).

ED waste management by anaerobic digestion was developed in this study. The optimum methane yield from the BMP test of 123.10 ± 38.40 NmL/gVS_{added} was obtained from SIR ratios is 1:2 ratio. However, the main effecting factor to methane production during 1:2 of ED was most likely degradation. But The C/N ratio for substrates with high nitrogen fractions inhibit the degradation, which may lead to reduced biogas quality and quantity.



CONCLUSION

ED waste management by anaerobic digestion was developed in this study. The optimum methane yield from the BMP test of 123.10 ± 38.40 NmL/gVS_{added} was obtained from SIR ratios of 1:2 ratio. However, the main contributor to methane production during 2:1, 1:2 of ED was most likely degradation of extractives, as indicated by the relatively higher degradation of extractives compared to corn over and wheat straw. But The C/N ratio for substrates with high nitrogen fractions inhibits the degradation, which may lead to reduced biogas quality and quantity.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by scholarship from School of Renewable Energy, Research Grant for New Scholar (RGNS) and Maejo University alumni at Maejo University. Thanks to advisor and co-advisers for commenting to improve the paper. And thanks to everyone in fuel lab, friends and family for all supporting.

REFERENCES

- Abbassi-Guendouz, A., Brockmann, D., Trably, E., Dumas, C., Delgenès, J.P., Steyer, J.P., and Escudie, R. 2012. Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation. *Bioresource Technology*. 111: 55-61.
- Abdulsalam, S., and Yusuf, M. 2015. A kinetic study of biogas produced from cow and elephant dungs using the residual substrate concentration approach. *Chemical Engineering and Science*. 3: 7-11.
- Dechruga, S., Kantachote, D., 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: 101-108.
- Dhamodharan, K., Kumar, V., and Kalamdhad, A.S. 2016. Effect of different livestock dungs as inoculum on food waste anaerobic digestion and its kinetics. *Bioresource Technology*. 180: 237-241.

- Gil, M.M., Teresa, Brandao, T.R.S., Silva, C.L.M. 2006. A modified Gompertz model to predict microbial inactivation under time- varying temperature conditions. *Journal of Food Engineering*. 4200-072.
- Kafle, GK., Chen, L. 2016. Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models. *Waste Management*. 48: 492-502.
- Khanal, SK. 2008. *Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications*. John Wiley & Sons, Inc., Ames, Iowa.
- Koch, K., Lippert, T., and Drewes, J.E. 2017. The role of inoculum's origin on the methane yield of different substrates in Biochemical Methane Potential (BMP) tests. *Bioresource Technology*. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.142>.
- Krajangwit Johjit. 2022. BANGKOK (NNT) - The Department of Energy Business has reported that fuel consumption in Thailand has risen in the first two months of 2022. National news bureau of Thailand. <https://aseanow.com/topic/1255290-fuel-consumption-increases-in-first-two-months-of-2022/>.
- Lay J-J, Li Y-Y, Noike T (1996) Effect of moisture content and of chemical fermentation nature on methane characteristics solid wastes. *Journal of Environmental Systems and Engineering*. 1:101–108.
- Malini, T., and Narayanan, D. K. 2015. Evaluation of biogas production potential from elephant dung. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2395-0072.
- Muangjai, P., Wongsapai, W., Bunchuaidee, R., Tridech, N., Ritkrerkkrai, C., Damrongsak, D., Bhuridej, O. (2022). Estimation of marginal abatement subsidization cost of renewable energy for power generation in Thailand. 8: p. 528-535.
- Pham, C.H., Triolo, J.M., Cu, T.T.T., Pedersen, L., and Sommer, S.G. (2013). Validation and recommendation of methods to measure biogas production potential of animal manure. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 26: 864–873.
- Saleem, M., Yaqoob, N., Rehman, I. Ur. (2016). Eco-Friendly Bleaching of Soda-AQ Chemical Elephant Dung Pulp. *IRA-International Journal of Applied Sciences*. 4: 2455-4499.
- Sawatdeenarunat C., Surendra KC, Takara D, Oechsner H, and Khanal SK 2015. Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: challenges and opportunities. *Bioresour Technol* 178: 178–186.



- Sawatdeenarunat, C., Saipa, S., and Suaisom, P. 2021. Anaerobic digestion of elephant camp-derived wastes: methanepotential, kinetic study, and biorefinery platform. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01576-w>.
- VDI 4630. 2004. Fermentation of organic materials - characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests.
- Wu, S., Ni, P., Li, J., Sun, H., Wang, Y., Luo, H., Dach, J., and Dong, R. 2016. Integrated approach to sustain biogas production in anaerobic digestion of chicken manure under recycled utilization of liquid digestate: Dynamics of ammonium accumulation and mitigation control. *Bioresource Technology*. 190: 451-457.
- Zhu, J., Zheng, Y., Xu, F., and Li, Y. 2014. Solid-state anaerobic co-digestion of hay and soybean processing waste for biogas production. *Bioresource Technology*. 154: 240-247.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวณัฏฐิภา บุญยวง
เกิดเมื่อ	2 กรกฎาคม 2542
ประวัติการศึกษา	2564 – ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมพลังงานทดแทน) วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ GPA = 4.00 วิทยานิพนธ์ เรื่อง การพัฒนาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลช้างโดยใช้หัวเชื้อกากตะกอนจาก กระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ 2560 – 2563 วิทยาศาสตรบัณฑิต (พลังงานทดแทน) วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ GPA = 3.47 เกียรตินิยมอันดับ 2 การค้นคว้าอิสระ เรื่อง การกำจัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพโดยเม็ดเคลือบสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับถ่าน
ประวัติการทำงาน	2563 – ปัจจุบัน ผู้ช่วยนักวิจัย แผนกพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ วิทยาลัยวิทยาลัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้