

การพัฒนาถึงปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอยสำหรับกระบวนการ
ล้างนอนแมลงวันลาย



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2567

การพัฒนาถังปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพแบบฝาคบลดยสำหรับกระบวนการ
ล้างนอนแมลงวันลาย



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2567

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การพัฒนาถังปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพแบบฝาคบลอยสำหรับกระบวนการ
ล้างนอนแมลงวันลาย

สุรเดช รุ่งทอง

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.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยศ สัมฤทธิ์สกุล)

รักษาการแทนรองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

| | |
|----------------------|--|
| ชื่อเรื่อง | การพัฒนาถังปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพแบบฝาดรอบลอยสำหรับกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย |
| ชื่อผู้เขียน | นายสุรเดช รุ่งทอง |
| ชื่อปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน |
| อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์ |

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาถังปฏิกรณ์แบบฝาดรอบลอยร่วมกับการกวนสารอินทรีย์ด้วยก๊าซชีวภาพขนาด 200 L สำหรับบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง โดยใช้กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรเป็นหัวเชื้อในอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อเริ่มต้น 3:1 โดยปริมาตร ดังนั้นเพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบที่พัฒนาขึ้นจึงแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ การทดลองที่ 1 ศึกษาอัตราการกวนที่เหมาะสมระหว่างการกวนด้วยก๊าซชีวภาพทุก ๆ 6, 12, และ 24 hr ด้วยความเร็วรอบ 70 L/min ครั้งละ 10 min ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 1.00 kgCOD/(m³•day) หลังจากนั้นจึงคัดเลือกอัตราการกวนที่เหมาะสมที่สุดเพื่อนำไปทดลองต่อในการทดลองที่ 2 การศึกษาหาอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate: OLR) ที่เหมาะสม 3 ระดับ สำหรับการเริ่มต้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการเติม 1.00, 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³•day) ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองการทดลองจะศึกษาในอุณหภูมิสถานะแวดล้อมที่ระยะเวลาพักเก็บ 20 days และวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่าง ค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่าย ปริมาณก๊าซชีวภาพ และปริมาณก๊าซมีเทน เป็นต้น ผลการศึกษาอัตราการกวนที่เหมาะสมพบว่า อัตราการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพทุก ๆ 6 hr คือ อัตราการกวนที่เหมาะสมที่สุด โดยสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงที่สุด 66.93% ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 1,346.34 L และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี ของแข็งทั้งหมดของแข็งระเหยง่าย เท่ากับ 65.89%, 72.43% และ 82.61% ตามลำดับ จึงนำอัตราการกวนดังกล่าวไปศึกษาต่อในการศึกษาอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ ผลการทดลองพบว่าอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่ 1.00, 2.00, และ 3.00 kgCOD/(m³•day) ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาดรอบลอยร่วมกับการกวนผสม สามารถสร้างก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ยอยู่ที่ 1,214.17, 1,716.04 และ 1,714.48 L ตามลำดับ และสัดส่วนก๊าซมีเทนเฉลี่ย 66.64%, 69.02% และ 67.22% ตามลำดับ โดยการทดลองที่อัตราการเติม 2.00 kgCOD/(m³•day) คือ อัตราการเติมที่เหมาะสมที่สุด สามารถย่อยสลาย

สารอินทรีย์ได้มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีสูงถึง 66.29% นอกจากนี้ยังสามารถกำจัดของแข็งทั้งหมดและกำจัดของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 65.95% และ 81.15% ตามลำดับ จากงานวิจัยนี้แสดงถึงประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบล้อมกับการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้สูง สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งการผลิตก๊าซชีวภาพและการบำบัดเสียด้วยกัน เพื่อให้เกิดการพัฒนาการใช้พลังงานทดแทนอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์, การกวนผสม, น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย, ก๊าซชีวภาพ, แบบฝาคบรอบล้อม



| | |
|---------------------------------------|--|
| Title | DEVELOPMENT OF FLOATING DRUM BIOGAS REACTOR FOR BLACK SOLDIER FLY LARVAE WASHING PROCESS |
| Author | Mr. Suradech Rungthong |
| Degree | Master of Engineering in Renewable Energy Engineering |
| Advisory Committee Chairperson | Assistant Professor Dr. Rotjapun Nirunsin |

ABSTRACT

This research aimed to develop the floating drum digester and organic mixing by biogas recirculation. The biogas digester was 200 L for the Black Soldier Fly Larvae (BSFL) washing process fed by soybean meal. The inoculum was sludge from a biogas system in a pig farm. The substrate to inoculum ratio was 3:1 by volume. Therefore, to study the biogas production potential of the developed system. The experiment was divided into 2 experimental studies: Experimental 1, studied the appropriate biogas mixing rate every 6, 12, and 24 hr for 10 min/round. The speed of mixing was 70 L/min at an organic loading rate of 1.00 kgCOD/(m³•day). After that, the most appropriate stirring rate was selected to be further tested in Experiment 2. Experimental 2, studied the Organic Loading Rate (OLR) in different 3 levels: 1.00, 2.00, and 3.00 kgCOD/(m³•day), respectively. The experiments were studied at ambient temperature with the hydraulic retention time was 20 days. The parameters were analyzed for biogas production potential such as pH, VFA/ALK, COD, TS, VS, biogas volume, and methane volume, etc. The results of the study of the appropriate stirring rate found that mixing every 6 hr was the most appropriate mixing rate. This mixing rate had the highest methane fraction about 66.93%. The cumulative biogas production was 1,346.34 L. The organic removal efficiency of COD, TS, and VS were 65.89%, 72.43%, and 82.61%, respectively. Therefore, the 6 hr mixing rate was used for study in the OLR. The result showed, that OLR of 1.00, 2.00, and 3.00 kgCOD/(m³•day) on the floating drum digester with biogas mixing produced

1,214.17, 1,716.04 and 1,714.48 L of cumulative biogas volume. The methane fraction of each OLR was 66.64%, 69.02%, and 67.22%, respectively. The OLR of 2.00 kgCOD/(m³•day) was the appropriate organic loading rate. The COD removal efficiency of this OLR was 66.29%. The TS and VS removal efficiencies were 65.95% and 81.15%, respectively. This research shows the high efficiency of the floating drum digester with biogas mixing. The system can be used for organic treatment or wastewater treatment to develop sustainable use of renewable energy.

Keywords : Floating drum digester, Organic Loading Rate, Mixing, Black Soldier Fly Larvae washing process wastewater, Biogas



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง "การพัฒนาถังปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยสำหรับกระบวนการล้าง
หนอนแมลงวันลาย" สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรธณ นิธิรัฐศิลป์ คณะกรรมการสอบและอาจารย์
ที่ปรึกษาหลัก ที่ได้ให้เกียรติสละเวลาให้คำแนะนำตั้งแต่การวางแผนการจัดทำโครงร่างวิทยานิพนธ์
การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การวิเคราะห์ผลและอภิปรายผล ตลอดจนให้กำลังใจในการทำการศึกษ
วิทยานิพนธ์ให้สำเร็จ

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติกร สาสุ
จิตต์ อาจารย์ ดร.ภคมน ปินตานา และ อาจารย์ ดร.วงศ์พันธ์ พรหมวงศ์ ที่ให้ความรู้ คำแนะนำในการ
ปรับปรุงวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ปัจจัยและลักษณะการวางแผนการวิจัยให้เหมาะสมและชัดเจนใน
การศึกษาวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชยานนท์ สวัสดิ์นันทนา ที่ได้ให้
เกียรติมาเป็นประธานคณะกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ตลอดจนได้ให้คำชี้แนะการปรับปรุงแก้ไข
วิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท สยาม ไบโอบิโอสตีส์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านความรู้และ
ปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ของการเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลายจนสามารถทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไป
ด้วยดี

ขอขอบพระคุณแหล่งทุน โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน
ในกลุ่มประเทศอาเซียนระดับบัณฑิตศึกษา จากคณะวิทยาลัยพลังงานทดแทน และทุนศิษย์ก้นกุฎิ
บัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาประกอบการทำวิจัย

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านทั้งที่กล่าวถึงและมีได้กล่าวถึง โดยเฉพาะ
ครอบครัว ซึ่งคอยสนับสนุนทุนทรัพย์และกำลังใจเสมอมาจนสามารถสำเร็จการศึกษา หากผู้วิจัยมี
ข้อบกพร่องหรือผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

สุรเดช รุ่งทอง

สารบัญ

| | หน้า |
|---|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ค |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ช |
| สารบัญ..... | ซ |
| สารบัญตาราง..... | ฅ |
| สารบัญรูปภาพ..... | ฐ |
| อักษรย่อและสัญลักษณ์..... | ฒ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| ที่มาและความสำคัญ..... | 1 |
| วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 5 |
| ขอบเขตของการวิจัย..... | 5 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 5 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร..... | 6 |
| แนวคิด ทฤษฎี..... | 6 |
| 1. ก๊าซชีวภาพ..... | 6 |
| 1.1 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ..... | 7 |
| 1.1.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ..... | 8 |
| 1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ..... | 11 |
| 1.2.1 อุณหภูมิ..... | 11 |
| 1.2.2 ค่าความเป็นกรดต่าง..... | 12 |
| 1.2.3 ความสามารถในการบัฟเฟอร์..... | 12 |

| | |
|---|----|
| 1.2.4 อัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่าง | 12 |
| 1.2.5 การกวนผสม | 13 |
| 1.2.6 ระยะเวลาการเก็บกัก | 14 |
| 1.2.7 อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์..... | 14 |
| 1.3 รูปแบบการหมักแบบไร้อากาศ..... | 15 |
| 1.3.1 การหมักแบบกะ..... | 15 |
| 1.3.2 การหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง | 15 |
| 1.3.3 การหมักแบบต่อเนื่อง..... | 15 |
| 1.4 เทคโนโลยีระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ | 16 |
| 2. แผลงวันลาย | 18 |
| 2.1 ลักษณะและประโยชน์ของแผลงวันลาย..... | 18 |
| 2.2 กระบวนการเลี้ยงหนอนแผลงวันลาย | 19 |
| 3. การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์ | 20 |
| 3.1 วิธีประเมินโดยคิดระยะเวลาต้นทุน | 21 |
| การตรวจสอบเอกสาร..... | 22 |
| 1. วัตถุดิบน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของถั่วเหลืองหรือโปรตีนสูง | 22 |
| 2. การทดสอบระบบผลิตก๊าซชีวภาพและการดำเนินการหมัก | 24 |
| บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ | 30 |
| อุปกรณ์..... | 30 |
| วิธีการ..... | 34 |
| 1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 35 |
| 2. ออกแบบเบื้องต้นของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดทดลอง | 35 |
| 3. การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกระบวนการเลี้ยงหนอนแผลงวันลาย..... | 43 |
| 3.1 ดำเนินการสร้างระบบการผลิตก๊าซชีวภาพต้นแบบและทำการทดลอง | 44 |

| | |
|--|----|
| 4. ทำการติดตั้งจุดตรวจวัดและทดสอบการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ | 46 |
| 5. ขั้นตอนการทดลองระบบผลิตก๊าซชีวภาพ | 48 |
| 6. วิเคราะห์ผลการทดลองระบบการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดทดลอง..... | 49 |
| 7. จัดทำรายงานผลการวิจัย | 49 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ | 50 |
| ผลการวิเคราะห์ลักษณะของวัตถุดิบและหัวเชื้อในการทดลอง | 51 |
| 1. ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย | 51 |
| 2. ลักษณะหัวเชื้อจุลินทรีย์จากตะกอนจากฟาร์มสุกร | 52 |
| ผลของการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ | 55 |
| 1. ค่าความเป็นกรดต่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr | 55 |
| 2. ค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr | 56 |
| 3. ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหยง่ายของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr | 58 |
| 4. ปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อวันและก๊าซชีวภาพสะสมของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr..... | 59 |
| ผลของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ..... | 62 |
| 1. ผลของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี ของแข็งทั้งหมดและค่าของแข็งระเหยง่าย..... | 62 |
| 2. ผลของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่อค่าความเป็นกรดต่างในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ .. | 64 |
| 3. ผลของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่อค่ากรดไขมันระเหยง่ายและสภาพความเป็นต่างในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ | 65 |
| 4. ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของแต่ละอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ | 69 |
| ผลการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบลอยร่วมกับการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพ | 72 |

| | |
|--|-----|
| 1. การวิเคราะห์ต้นทุนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ..... | 73 |
| 2. การประเมินผลตอบแทนจากศักยภาพทางด้านพลังงานของก๊าซชีวภาพ | 73 |
| 3. การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น..... | 74 |
| บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ | 76 |
| สรุปผลงานวิจัย..... | 76 |
| 1. ผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ | 76 |
| 2. ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ | 77 |
| 3. ผลการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ | 77 |
| บรรณานุกรม..... | 79 |
| ภาคผนวก..... | 85 |
| ภาคผนวก ก การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบลดยร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วย ก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองขนาด 200 L..... | 86 |
| ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ..... | 97 |
| ภาคผนวก ค การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ | 100 |
| ประวัติผู้วิจัย..... | 122 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ | 7 |
| ตารางที่ 2 คุณลักษณะของน้ำเสียจากระบบการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย | 20 |
| ตารางที่ 3 เปรียบเทียบก๊าซชีวภาพ 1 m ³ กับพลังงานชนิดอื่น ๆ | 21 |
| ตารางที่ 4 อุปกรณ์สำหรับพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพ..... | 30 |
| ตารางที่ 5 อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพ | 33 |
| ตารางที่ 6 ประเภทของบ่อบำบัดน้ำเสีย..... | 43 |
| ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด | 47 |
| ตารางที่ 8 ลักษณะคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย | 52 |
| ตารางที่ 9 คุณสมบัติของหัวเชื้อจากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร..... | 54 |
| ตารางที่ 10 ต้นทุนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาค่อยรอบล้อมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วย ก๊าซชีวภาพ | 73 |
| ตารางที่ 11 เปรียบเทียบก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้กับการทดแทนเชื้อเพลิงอื่น ๆ | 74 |
| ตารางที่ 12 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น..... | 75 |

สารบัญรูปภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| ภาพที่ 1 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนปี พ.ศ. 2565 | 1 |
| ภาพที่ 2 บ่อเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลายขนาดใหญ่ | 2 |
| ภาพที่ 3 การปล่อยน้ำเสียจากโรงเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย | 3 |
| ภาพที่ 4 กระบวนการหมักเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดก๊าซชีวภาพ | 9 |
| ภาพที่ 5 ลักษณะการกวนผสมของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ | 14 |
| ภาพที่ 6 ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด | 16 |
| ภาพที่ 7 ระบบหมักแบบฝาครอบลอย | 17 |
| ภาพที่ 8 ระบบหมักแบบถังย่อยแบบสัมผัส | 18 |
| ภาพที่ 9 วงจรชีวิตของแมลงวันลาย | 18 |
| ภาพที่ 10 ลักษณะของเสียการแยกหนอนแมลงวันลายจากอาหารเพาะเลี้ยง | 20 |
| ภาพที่ 11 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยขนาด 3,000 L | 26 |
| ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน | 26 |
| ภาพที่ 13 ภาพรวมการออกแบบพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอย | 36 |
| ภาพที่ 14 ลักษณะของถังปฏิกรณ์ | 38 |
| ภาพที่ 15 ทิศทางการกวนผสมภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ | 40 |
| ภาพที่ 16 วงจรไฟฟ้าควบคุมการกวนผสมภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ | 42 |
| ภาพที่ 17 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายขนาด 200 L | 44 |
| ภาพที่ 18 แผนการดำเนินการวิจัย | 45 |
| ภาพที่ 19 จุดตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง | 47 |
| ภาพที่ 20 น้ำเสียของกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง | 51 |
| ภาพที่ 21 ลักษณะหัวเชื้อกากตะกอนระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร | 53 |

| | |
|--|----|
| ภาพที่ 22 ค่าความเป็นกรดต่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr.. | 55 |
| ภาพที่ 23 ค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr..... | 57 |
| ภาพที่ 24 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหยง่ายของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr..... | 58 |
| ภาพที่ 25 ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสมระหว่าง 6, 12 และ 24 hr..... | 60 |
| ภาพที่ 26 ปริมาตรก๊าซชีวภาพและสัดส่วนก๊าซมีเทนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr..... | 61 |
| ภาพที่ 27 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหยง่ายของแต่ละอัตราการบรทุกสารอินทรีย์..... | 63 |
| ภาพที่ 28 ค่าความเป็นกรดต่างของแต่ละอัตราการบรทุกสารอินทรีย์..... | 65 |
| ภาพที่ 29 ค่าสภาพความเป็นต่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แต่ละอัตราการบรทุกสารอินทรีย์. | 66 |
| ภาพที่ 30 ค่ากรดไขมันระเหยง่ายของแต่ละอัตราการบรทุกสารอินทรีย์..... | 67 |
| ภาพที่ 31 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่างที่แต่ละอัตราการบรทุกสารอินทรีย์..... | 68 |
| ภาพที่ 32 ปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อวันของแต่ละอัตราการบรทุกสารอินทรีย์..... | 69 |
| ภาพที่ 33 ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมของแต่ละอัตราการบรทุกสารอินทรีย์..... | 70 |
| ภาพที่ 34 สัดส่วนก๊าซมีเทนของแต่ละอัตราการบรทุกสารอินทรีย์..... | 71 |

อักษรย่อและสัญลักษณ์

| อักษรย่อ | ความหมาย | หน่วย |
|----------|---|-----------------------------|
| ALK | สภาพความเป็นด่าง | mgCaCO ₃ /L |
| B | มูลค่าผลตอบแทนต่อปี | Baht/year |
| BSF | แมลงวันลาย | |
| BSFL | หนอนแมลงวันลาย | |
| COD | ค่าซีโอดี ปริมาณความสกปรก หรือ ปริมาณความต้องการใช้ออกซิเจนทางเคมี | mg/L |
| HRT | ระยะเวลาที่เก็บ | day, days |
| ln(V) | ค่าใช้จ่ายการลงทุนติดตั้งระบบ | Baht |
| LPG | ก๊าซหุงต้ม | |
| OLR | อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ | kgCOD/(m ³ ·day) |
| PB | ระยะเวลาคืนทุน | year |
| pH | ค่าความเป็นกรดต่าง | |
| STP | เงื่อนไข ณ อุณหภูมิมาตรฐาน 0 °C ที่ความดัน 1 atm | |
| t | เวลา | days, months, years |
| TS | ปริมาณของแข็งทั้งหมด | g/L, mg/L |
| V | ปริมาตร | L, mL |
| VFA | ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย | mgCH ₃ COOH/L |
| VS | ปริมาณของแข็งระเหยง่าย | g/L, mg/L |
| W | ปริมาณการผลิตพลังงาน | Kg |

| สัญลักษณ์ | ความหมาย |
|------------------|----------------------|
| CH ₄ | ก๊าซมีเทน |
| CO ₂ | ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ |
| H ₂ O | น้ำ หรือ ไอน้ำ |
| H ₂ S | ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ |
| N ₂ | ก๊าซไนโตรเจน |
| NH ₃ | ก๊าซแอมโมเนีย |
| O ₂ | ก๊าซออกซิเจน |

| ตัวห้อย | ความหมาย |
|---------|-------------------------|
| added | วัตถุดิบที่เติมเข้าระบบ |
| Biogas | ก๊าซชีวภาพ |
| OP | การดำเนินงานโครงการ |



บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานเชื้อเพลิงเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนประชากรภายในประเทศ เป็นผลมาจากการขยายตัวทั้งด้านเศรษฐกิจ สังคม สิ่งแวดล้อม แต่ในทางกลับกันแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่มีอยู่มีปริมาณค่อนข้างจำกัด จึงทำให้มีความพยายามจัดหาแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อเสริมความมั่นคงด้านพลังงาน (Diamantis et al., 2021) ประกอบกับแผนพัฒนาด้านพลังงานที่ยั่งยืนของประเทศไทยที่ให้ความสำคัญต่อการพัฒนาอุตสาหกรรม ที่ถือเป็นหัวใจหลักของเศรษฐกิจและสังคมของประเทศ จึงได้มีการส่งเสริม สร้างแรงจูงใจ ให้งานวิจัยเป็นเครื่องมือในการพัฒนาอุตสาหกรรมพลังงานทดแทนแบบครบวงจร โดยในแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2561-2580 ภายใต้อาณัติแผนพัฒนาพลังงานทดแทน (Alternative Energy Development Plan : AEDP) ได้กำหนดเป้าหมายพัฒนาพลังงานทดแทนจากเดิม 12% เป็น 50% ตามแผน (สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2565) เพื่อกำหนดทิศทางการพัฒนาประเทศดังภาพที่ 1

(ร่าง) แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก



กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
กระทรวงพลังงาน



ภาคความร้อน

ศักยภาพพลังงานทดแทนเพื่อผลิตความร้อน (ktoe)

| | |
|------------------------------|---------------|
| พลังงานแสงอาทิตย์ | 45 |
| ก๊าซชีวภาพ (น้ำเสีย) | 600 |
| ขยะชุมชน | 900 |
| ชีวมวล | 18,000 |
| อื่น ๆ (ไพโรไลซิส, ไฮโดรเจน) | 10 |
| รวมทั้งสิ้น | 19,555 |

ภาคเชื้อเพลิงชีวภาพ

เพิ่มสัดส่วนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพในภาคการขนส่งทางถนน

- ส่งเสริม B10 เป็นเชื้อเพลิงหลักในกลุ่มดีเซล
- ส่งเสริม E20 เป็นเชื้อเพลิงหลักในกลุ่มเบนซิน
- ส่งเสริมเชื้อเพลิงอากาศยานยั่งยืน (SAF)
- ส่งเสริมเชื้อเพลิงชีวภาพทางเลือกอื่น อาทิ ไฮโดรเจน

| เชื้อเพลิงชีวภาพ | 2565 | 2570 | 2575 | 2580 |
|-------------------|----------|------|------|------|
| Ethanol Blend | E10/ E20 | E20 | E20 | E20 |
| Biodiesel Blend | B7 | B7 | B10 | B10 |
| SAF Blend | - | 1-5 | 1-5 | 1-5 |
| อื่น ๆ (Hydrogen) | N/A | N/A | N/A | N/A |

ภาพที่ 1 แผนพัฒนาพลังงานทดแทนปี พ.ศ. 2565

ที่มา : สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (2565)

จากแผนการส่งเสริมงานวิจัยพลังงานทดแทนในด้านต่าง ๆ ของกรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน ได้มุ่งเน้นการพัฒนาตามกรอบการส่งเสริมด้านพลังงานทดแทน ได้แก่ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล และ พลังงานก๊าซชีวภาพ โดยใช้เทคโนโลยีนำมาจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรหรือภาคอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์ (ฝ่ายคุณภาพสิ่งแวดล้อมและห้องปฏิบัติการ, 2565 และ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2565) ประกอบกับการเติบโตของภาคปศุสัตว์ที่มีมากขึ้น ความจำเป็นในการหาแหล่งโปรตีนอาหารสัตว์จึงมีความต้องการที่เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน ทำให้การเลี้ยงหนอนแมลงวันลายเพื่อใช้เป็นโปรตีนอาหารสัตว์ ได้รับความนิยมนำขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งในการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายสามารถนำเศษขยะอินทรีย์มาใช้ในการเพาะเลี้ยง รวมไปถึงวัสดุติดการเกษตรที่เหลือทิ้งจากการแปรรูป อาทิเช่น กากถั่วเหลือง กากถั่วดาวอินคา ซึ่งจากกรณีศึกษากลุ่มวิสาหกิจมีการขยายการเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลายในเชิงพาณิชย์ และได้รับความนิยมนำกากถั่วเหลืองเพื่อช่วยเพิ่มคุณค่าทางอาหารให้กับหนอนแมลงวันลาย ซึ่งในกระบวนการเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลายในขั้นตอนล้างเพื่อคัดแยกตัวหนอนแมลงวันลายก่อนนำไปแปรรูป เกิดน้ำเสียจากกระบวนการล้างปริมาณมากดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 บ่อเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลายขนาดใหญ่

เพื่อลดปัญหาการกำจัดน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายดังกล่าวได้อย่างถูกวิธี และสามารถนำน้ำเสียดังกล่าวมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีในการจัดการน้ำเสียด้วยการเปลี่ยนของเสียเป็นพลังงาน เนื่องด้วยลักษณะน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงที่แสดงออกมาในรูปแบบค่าซีโอดี โดยในประเทศไทย วิสาหกิจและอุตสาหกรรมการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายนิยมใช้กากถั่วเหลือง กากเต้าหู้ และเศษอาหาร จึงมีน้ำเสียจากกระบวนการล้างอาหารที่ใช้เลี้ยงหนอนแมลงวันลายดังภาพที่ 3 ซึ่งมีปริมาณอินทรีย์วัตถุที่ผ่านการย่อยสลายจากหนอนแมลงวันลายแล้วเป็นจำนวนมากประมาณ 20 L ต่อการล้างหนอน 1-5 kg โดยพบว่าค่าความสกปรกน้ำเสียที่เกิดขึ้นจาก

กระบวนการดังกล่าวมีค่าประมาณ 20,000-25,000 mg/L และค่าความสกปรกของน้ำเสียดังกล่าวมีค่าเกินกว่ามาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด จำเป็นต่อการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติ



ภาพที่ 3 การปล่อยน้ำเสียจากโรงเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย

ซึ่งจากการวิจัยการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวด้วยเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพและสามารถประยุกต์ใช้ได้ในระดับวิสาหกิจและอุตสาหกรรม พบว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เป็นแนวทาง ประกอบด้วย งานวิจัยของปรียาและคณะ (2565) ที่ได้ทำการศึกษาบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง โดยศึกษาศักยภาพทำการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องที่ปริมาตรถังปฏิกรณ์เท่ากับ 4 L พบว่าในอัตราส่วน 3:1 สามารถผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 47.10% ในระยะเวลาการทดลอง 25 days เท่ากับ 421.40 NmL/gTS มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีถึง 50.80% การกำจัดของแข็งทั้งหมด 75.83% และการกำจัดของแข็งระเหยง่าย 70.19% สามารถขยายผลต่อในระบบที่ใหญ่ขึ้น และจากงานวิจัยของ Alibe et. al. (2022) ศึกษาเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยจากมูลโคขนาด 1,000 L ผลที่ได้พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากระบบที่มีลักษณะทรงกระบอก ใช้พื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์น้อย สามารถติดตั้งได้ง่ายเหมาะสมสำหรับมีพื้นที่จำกัดและไม่ต้องการการดูแลที่ซับซ้อน และในส่วนของกระบวนการผสมหมวนเวียแนตตะกอนด้วยก๊าซชีวภาพได้ศึกษาจากงานวิจัยของ Mahmoodi-Eshkaftaki and Ebrahim (2019) ที่ได้ศึกษาการกวนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการกวนผสมสามารถเพิ่มการย่อยสลายสารอินทรีย์เฉลี่ย 60% ของอินทรีย์วัตถุที่เข้ามาในระบบและเพิ่มปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ซึ่งมีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้กับน้ำเสียจากกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง เพื่อเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ รวมถึงทำให้ได้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้พื้นที่ติดตั้งในสถานประกอบการน้อย มีขนาดเล็ก ไม่ซับซ้อน และระบบมีประสิทธิภาพสูง (ธจักร, 2557) จาก

กระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทน (Bulak et al., 2020) นอกจากนี้สามารถเป็นแนวทางสู่กลุ่มอุตสาหกรรมสีเขียว (Bio Circular and Green : BCG) ตามมาตรฐานกรมควบคุมมลพิษและสิ่งแวดล้อมในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพิ่มการใช้พลังงานทดแทนตามกรอบการส่งเสริมพัฒนาแผนพัฒนาพลังงานทดแทนโดยการคำนึงถึงแบบ ผลงานงานวิจัยด้านพลังงานทดแทนกับการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนให้เข้าถึงในภาคอุตสาหกรรม และชุมชน

ดังนั้นจากข้อมูลดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยสนใจศึกษาพัฒนาต้นแบบระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย ที่มุ่งเน้นทดสอบประสิทธิภาพการย่อยสลายของการบำบัดน้ำเสีย โดยใช้ถึงปฏิกรณ์แบบฝาครอบลอยร่วมกับการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพ เพื่อนำข้อมูลไปใช้เป็นแนวทางประยุกต์ใช้กับสถานประกอบการ และทำการศึกษาผลของการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพที่เป็นปัจจัยส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียทั้งทางด้านการเกษตร และด้านอุตสาหกรรมต่อไป

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อสร้างและทดสอบถึงปฏิกรณ์แบบฝาครอบลอยร่วมกับการกวนสารอินทรีย์ ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย
- 2) เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ จากน้ำเสียของกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย

ขอบเขตของการวิจัย

- 1) การทดสอบใช้ถึงปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยร่วมกับการกวนสารอินทรีย์
- 2) ถึงปฏิกรณ์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพมีปริมาตรไม่น้อยกว่า 150 L
- 3) วัตถุประสงค์ที่ตั้งต้นที่ใช้ คือ น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย
- 4) หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ คือ กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศของฟาร์มสุกร
- 5) มีการกวนผสมภายในกระบวนการย่อยสลายทุก ๆ 6, 12, และ 24 hr ด้วยความเร็วรอบไม่เกิน 50 rpm ครั้งละไม่เกิน 10 min
- 6) การป้อนสารอินทรีย์วัตถุดิบแบบกึ่งต่อเนื่อง
- 7) ค่าอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 0.5-5.0 kgCOD/(m³·day)
- 8) การศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะไร้อากาศ ณ อุณหภูมิสิ่งแวลดล้อม และมีระยะเวลาในการทดลองไม่เกิน 30 days ต่อการทดลอง

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้พัฒนาต้นแบบระบบผลิตก๊าซมีเทนสำหรับน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นด้วยระบบบำบัดแบบฝาครอบลอยร่วมกับการกวนผสมสารอินทรีย์ด้วยก๊าซชีวภาพ
- 2) เพื่อเป็นการสนับสนุนกลุ่มอุตสาหกรรมสีเขียว
- 4) ใช้ก๊าซชีวภาพทดแทนก๊าซหุงต้ม
- 5) ได้ลดต้นทุนการใช้เชื้อเพลิงในวิสาหกิจชุมชนและอุตสาหกรรม
- 6) สามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อสิ่งแวดล้อม
- 7) การบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร

แนวคิด ทฤษฎี

การวิจัยนี้ได้ศึกษาทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศ ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลถึงการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกระบวนการล้างหนอนแผลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง และปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ การป้อนสารอินทรีย์ เทคโนโลยีการผลิตการผลิตก๊าซชีวภาพ การนำไปใช้ประโยชน์ การควบคุมระบบและตรวจวัด เอกสารสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง เพื่อพัฒนาระบบการผลิตก๊าซชีวภาพดำเนินการวิจัย การกำหนดตัวแปรในงานวิจัยครั้งนี้ โดยใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาประกอบเป็นแนวทางการศึกษาวิจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ หรือ ไบโอก๊าซ (Biogas) เป็นสภาวะที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากเชื้อจุลินทรีย์ในการสร้างก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมักจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการหมัก เช่น ในหลุมขยะ กองมูลสัตว์ ก้นแม่น้ำ หนองน้ำ บึง และนาข้าวที่มีน้ำท่วมขัง เป็นต้น สภาวะที่เหมาะสมต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ คือ สภาวะที่ไม่มีอากาศสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซชีวภาพได้ โดยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีองค์ประกอบของก๊าซหลายชนิด ซึ่งมีสัดส่วนก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 50-70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 20-50% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แอมโมเนีย (NH_3) และ ไอ่น้ำ (H_2O) นอกจากนี้ยังคงมีสิ่งปนเปื้อนอื่น เช่น ซิลอกเซน (Siloxane) สครัม (Scum) เมือก และ ตะกอน เป็นต้น โดยองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งสัดส่วนของก๊าซแต่ละชนิดในก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่เติมเข้าสู่ระบบ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561) โดยวัสดุหรือวัตถุดิบที่นิยมใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะมาจากเศษขยะอินทรีย์หรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีองค์ประกอบหลัก คือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และเซลลูโลส ซึ่งจะถูกลย่อยสลายเป็นก๊าซชีวภาพต่อไป (ปิยะวดี และชุมภาพร, 2563)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

| องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ | ความเข้มข้น (%v/v) |
|----------------------|--------------------|
| CH ₄ | 50-70 |
| CO ₂ | 30-50 |
| H ₂ O | 0-10 |
| N ₂ | 0-5 |
| O ₂ | 0-2 |
| NH ₃ | 0-1 |
| H ₂ S | 50-10,000 ppm |

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2561)

วัสดุทางการเกษตรจะเป็นอาหารจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม คือ จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรด (Acid Forming Bacteria) และจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน (Methane Producing Bacteria) ของสารตั้งต้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในชีวมวลโดยอาศัยจุลินทรีย์ ซึ่งนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงด้านความร้อนได้เป็นอย่างดี (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561) จากกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียในกลุ่มอุตสาหกรรมหลายประเภทและของเสียจากการทำปศุสัตว์ต่าง ๆ เช่น ฟาร์มสุกร ฟาร์มวัว เป็นต้น เพื่อใช้กำจัดของเสียให้เกิดประโยชน์กับอุตสาหกรรมหรือผู้ประกอบการ จึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการเลือกนำไปใช้เป็นพลังงานราคาถูกและการเลือกใช้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบกับปริมาณของน้ำเสียหรือของเสียที่สามารถใช้เทคโนโลยีการบำบัดที่หลากหลายตามความเหมาะสม ซึ่งการผลิตก๊าซชีวภาพมีความเหมาะสมกับประเทศไทยในด้านสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่อุณหภูมิประเทศเฉลี่ย 28-45 °C (ชูมาพร, 2563) จึงได้รับการส่งเสริมในการผลิตก๊าซชีวภาพในครัวเรือน วิสาหกิจชุมชน การเกษตร โดยเฉพาะในระดับอุตสาหกรรม เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนอย่างเป็นรูปธรรมรวมถึงเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อมไปด้วย ซึ่งวิธีการกำจัดของเสียตามที่กฎหมายกำหนด นอกจากนี้ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติในการติดไฟจึงสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ 2 รูปแบบ ได้แก่ พลังงานด้านความร้อนและพลังงานด้านไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้จึงได้นำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนพลังงานทางธรรมชาติ เช่น ก๊าซหุงต้ม (Liquid Petroleum Gas : LPG) น้ำมันเตา หรือ น้ำมันเชื้อเพลิงอื่น ๆ

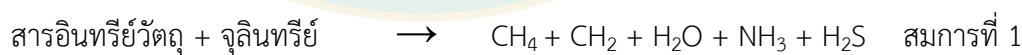
1.1 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

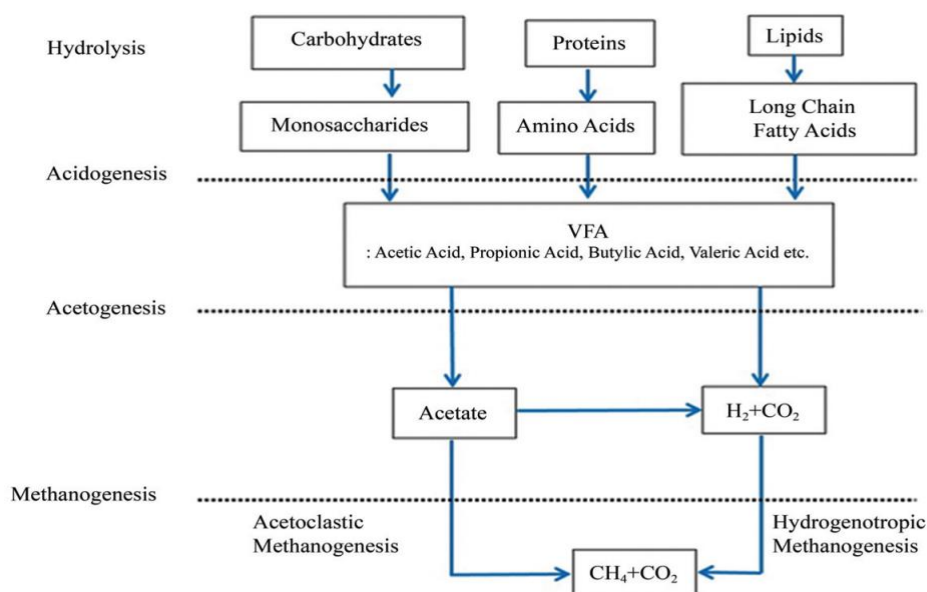
หลักการผลิตก๊าซชีวภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ โดยอาศัยเชื้อจุลินทรีย์หลายกลุ่มเข้าไปย่อยสลายสารอินทรีย์วัตถุ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน โดยทำการเปลี่ยน

สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ขนาดเล็ก โดยอาศัยแบคทีเรียในการสร้างกรดอะซิติกย่อยสลายโมเลกุลให้เล็กลง เหมาะกับกลุ่มแบคทีเรียในขั้นตอนสุดท้ายที่สร้างก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในการควบคุมปฏิกิริยาทั้งหมดเรียกว่า Rate-limiting Step ของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศซึ่งจะลอยตัวขึ้นเหนือผิวน้ำ โดยหลักการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีการศึกษามาอย่างยาวนานก็ยังคงมีการพัฒนาต่อไปอย่างต่อเนื่อง เพื่อพัฒนากระบวนการทำงานของแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561)

1.1.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ

ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยการอาศัยการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ เพื่อสร้างก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น สามารถประมาณได้จากปริมาณซีโอติของสารอินทรีย์ โดยถูกใช้ในการแสดงปริมาณสารอินทรีย์ในของเสีย และใช้ในการประมาณศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพแบบไร้อากาศ ค่าซีโอติที่อยู่ในสารอินทรีย์จะถูกเก็บไว้ในรูปของก๊าซมีเทนซึ่งเป็นผลผลิตสุดท้าย และอยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ โดยในกรณีของสารอินทรีย์ ($C_nH_xO_yN_z$) ที่ย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์ สารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย โดยกลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศ ส่วนสารอินทรีย์อื่น ๆ ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้จะคงอยู่ในวัฏภาคของเหลว (สมมติให้ผลผลิตจุลินทรีย์เป็นศูนย์) ซึ่งในทางทฤษฎีปริมาณที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 1 สมการของ Buswell (รจพรณ, 2563) และปฏิกิริยาชีวเคมีการย่อยสลายของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมีขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศแสดงดังภาพที่ 4 ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนในการย่อยสลายทั้งหมด 4 ขั้นตอน (ปิยะวัติ และ ชูมาพร, 2563) โดยมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนดังต่อไปนี้





ภาพที่ 4 กระบวนการหมักเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดก๊าซชีวภาพ

ที่มา : ปิยะวดี และ ชูมาพร (2563)

1) กระบวนการไฮโดรไลซิส

กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ขั้นตอนนี้จุลินทรีย์กลุ่มเฟอร์เมนเตทีฟ (Fermentative Bacteria) และจุลินทรีย์กลุ่มไฮโดรไลติก (Hydrolytic Bacteria) จะเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น เซลลูโลส ให้อยู่ในรูปโมเลกุลเชิงเดี่ยวที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และ กรดไขมัน โดยจุลินทรีย์ดังกล่าวจะปล่อยเอนไซม์ออกมาภายนอกเซลล์ เพื่อทำการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นสารประกอบเชิงเดี่ยวที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจนสามารถนำเข้าสู่เซลล์ได้ เช่น เซลลูโลสไปเป็นน้ำตาลหรือแอลกอฮอล์ โปรตีนไปเป็นเปปไทด์หรือกรดอะมิโน ซึ่งเอนไซม์จากจุลินทรีย์จะเข้าทำปฏิกิริยาสารอินทรีย์ที่มีอยู่ เช่น ต้องสร้างอะไมเลส (Amylase) เพื่อย่อยสลายแป้งและไกลโคเจนให้เป็น น้ำตาล หรือสร้างไลเปส (Lipase) ย่อยสลายไขมันให้เป็นกลีเซอรอลและกรดไขมัน หรือสร้าง โปรตีเอส (Protease) ย่อยสลายโปรตีนให้กลายเป็นกรดอะมิโน เป็นต้น (รจพรรณ, 2563 และ Benedikt et.al., 2020)

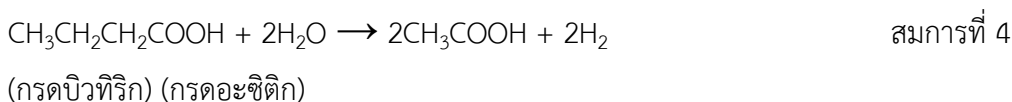
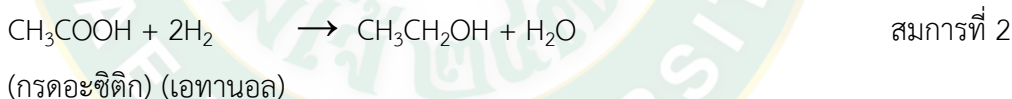
2) กระบวนการหมักกรดอะซิโตนิก

กระบวนการหมักกรดอะซิโตนิก (Acidogenesis) จากสารอินทรีย์โมเลกุลเชิงเดี่ยวแบบที่เรียกว่ามีเทนยังไม่สามารถใช้กรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนอะตอมเกินกว่า 2 อะตอม เช่น

กรดบิวทริก กรดโพรไพโอนิก ได้โดยตรง จึงต้องเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการหมักให้เป็นอะซิเตต พอร์เมต ก๊าซไฮโดรเจน และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจนิก (Acetogenic Bacteria) ที่อาศัยสภาวะของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีความเหมาะสม เป็นช่วงขั้นตอนที่สำคัญในการทำงานของแบคทีเรียที่สร้างกรดเจริญเตบโต้ได้ดีสำหรับเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นรูป กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทริก และเอทานอล ทำให้เป็นกรดไขมันระเหยง่ายที่ได้ในกระบวนการนี้ (รจพรรณ, 2563)

3) กระบวนการสร้างกรดอะซิติก

กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) เนื่องมาจากการที่จุลินทรีย์สร้างมีเทนไม่สามารถใช้กรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนอะตอม เกินกว่า 2 อะตอม เช่น กรดบิวทริก กรดโพรไพโอนิก และกรดอะซิติก ได้โดยตรง จึงต้องเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนการหมักให้เป็นอะซิเตต พอร์เมต ก๊าซไฮโดรเจน และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการผลิตก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจนิก (Acetogenic Bacteria) ขั้นตอนนี้ถือเป็นขั้นตอนสำคัญในการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและก๊าซไฮโดรเจน หากมีการสะสมมากเกินไปจะมีผลไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทนจึงเป็นขั้นตอนที่ต้องให้ความสำคัญระมัดระวังควบคุมปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย และก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานี้ให้มีความเหมาะสม (รจพรรณ, 2563) ดังสมการที่ 2-4



4) กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน

กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis) ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศของเชื้อแบคทีเรียชนิดอะซิจิฟิก และ เมทาโนเจน เป็นกลุ่มแบคทีเรียที่เอื้อประโยชน์ให้ซึ่งกันและกัน ซึ่งผลผลิตสุดท้ายของกระบวนการนี้ คือ ก๊าซมีเทน

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และก๊าซอื่น ๆ ในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซแอมโมเนีย โดยก๊าซมีเทนถูกสร้างขึ้นจากจุลินทรีย์ 2 กลุ่ม ได้แก่ จุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจน โดยจะเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจน และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไปเป็นก๊าซมีเทนและจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (Acetophilic methanogen) ซึ่งจะเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งการเกิดมีเทนเป็นไปตามสมการที่ 5 และ 6 (Vögeli et al., 2014 และ รจพรรณ, 2563) โดยมีการสร้างมีเทนตามสมการต่าง ๆ ดังนี้

การสร้างมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจน



การสร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (Aceticlastic methanogenesis)



โดยทั่วไปจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจนจะผลิตมีเทนประมาณ 30-40% ของมีเทนทั้งหมดที่เกิดขึ้น ในส่วนของจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติกหรือกรดไขมันที่จะสร้างมีเทนประมาณ 60-70% ของมีเทนทั้งหมดที่เกิดขึ้น และจากกรดอะซิติกก็จะเปลี่ยนแปลงเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเช่นกัน ซึ่งจุลินทรีย์ในขั้นตอนนี้มีควมอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมมาก และมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าจุลินทรีย์กลุ่มอื่น ๆ ดังนั้นการเจริญเติบโตและปริมาณของจุลินทรีย์กลุ่มนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (รจพรรณ, 2563)

1.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

ปัจจัยที่มีผลต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ ปัจจัยที่ 1 เป็นสภาพแวดล้อมโดยรอบ เช่น ค่าความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ ธาตุอาหาร เป็นต้น ปัจจัยที่ 2 จะเกี่ยวข้องกับกระบวนการเดินระบบ เช่น อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ ระยะเวลาที่เก็บ การกวนผสม แหล่งที่อยู่อาศัยของแบคทีเรีย เป็นต้น โดยรายละเอียดแต่ละปัจจัยมีดังนี้

1.2.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิ (Temperature) เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อประสิทธิภาพการหมักย่อยแบบไร้อากาศซึ่งส่งผลถึงคุณภาพและปริมาณก๊าซที่ผลิตได้อีกด้วย เช่น การศึกษาของ Rameshprabu and Yuwalee (2016) แบ่งช่วงอุณหภูมิเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นไซโครฟิลิก (Psychrophilic) ที่

อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20 °C ช่วงที่ 2 จะเป็นมีโซฟิลิก (Mesophilic) ที่ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20-45 °C และช่วงที่ 3 เป็นเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) จะมีอุณหภูมิที่สูงกว่า 45 °C (Aditi et al., 2018) ในการหมักย่อยแบบไร้อากาศจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีอยู่ 2 ช่วง ที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน จะเป็นช่วงอุณหภูมิ 35 °C มีโซฟิลิกที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้และในช่วงเทอร์โมฟิลิก 45 °C อย่างไรก็ตามขณะที่อุณหภูมิระบบสูง จะมีข้อเสียต่อระบบที่จะล้มเหลวและการสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์อีกทาง ซึ่งทำให้ระบบได้พลังงานสุทธิต่ำลง (ปยะวัตี และ ชูมาพร, 2563)

1.2.2 ค่าความเป็นกรดต่าง

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH Value) เป็นการวัดค่าความเป็นกรดต่างของระบบการหมักแบบไร้อากาศที่แสดงถึงการทำงานของแบคทีเรียในการควบคุมสภาวะภายในระบบ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนของการหมักต้องการช่วงความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมไม่เท่ากันตามกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งในแต่ละขั้นตอน Acidogenesis จะมีช่วงความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมอยู่ในระหว่าง 5.5-6.8 ซึ่งในการวัดค่าพารามิเตอร์ค่าความเป็นกรดต่างพบว่าของกระบวนการหมักย่อยที่มีผลต่อชนิดกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นจากขั้นตอน Acidogenesis ซึ่งจากการศึกษาของ Herbert and Hong (2002) พบว่าที่ความเป็นกรดต่างต่ำกว่า 5.5 พบกรดบิวทีริก (Butyric Acid) จะพบในช่วงค่าความเป็นกรดต่างมากกว่า 5.5 กับกรดอะซิติก (Acetic Acid) เป็นหลัก แต่ในขณะที่กรดโพรไพโอนิก (Propionic Acid) พบได้มากที่สุดที่ความเป็นกรดต่างค่อนข้างเป็นกลางขณะที่ย่อน้ำตาลกลูโคส ด้วยเหตุนี้ ขั้นตอน Acidogenesis เกิดได้ดีในช่วงค่าความเป็นกรดต่าง 5.5-8.0 รองลงมาเป็นกรดบิวทีริก ซึ่งหากมีการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดต่างอย่างรวดเร็วอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ (รจพรรณ, 2563)

1.2.3 ความสามารถในการบัฟเฟอร์

ความสามารถในการบัฟเฟอร์ (Buffer Capacity) ค่าความเป็นด่างในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เป็นค่าสารละลายที่สามารถรักษาความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนหรือค่าพีเอชที่ใช้ชี้ให้เห็นความเสถียรภาพของการหมัก ถ้าหากระบบมีค่าความเป็นด่างสูง แสดงว่ามีบัฟเฟอร์สูงในการรักษาค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ในสภาพที่เป็นกลาง เพื่อรับกับปริมาณกรดอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นได้อย่างดี (รจพรรณ, 2563)

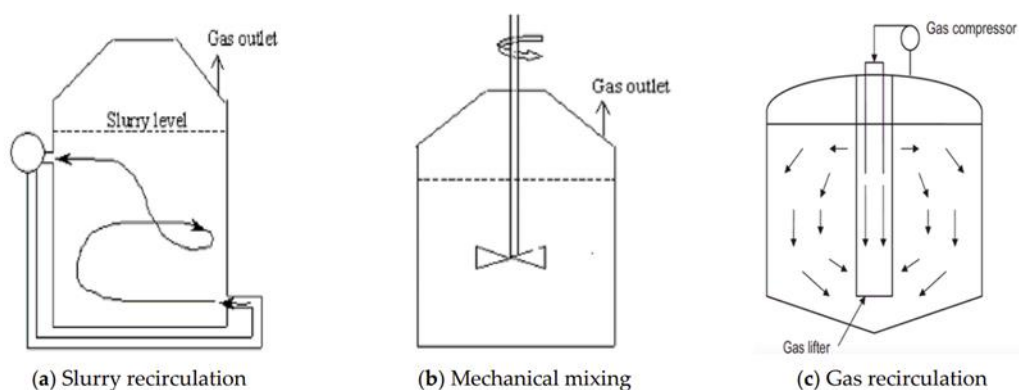
1.2.4 อัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง

อัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง (VFA/ALK) ปริมาณอัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่างมีความสำคัญต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ใน

การย่อยสลายสารอินทรีย์ จะสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรดต่าง เป็นค่าพารามิเตอร์ที่แสดงสภาวะการทำงานของแบคทีเรียในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ โดยปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายจะส่งผลให้ภายในระบบมีความเป็นกรดมากขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid : VFA) ที่อยู่ในรูปของกรดอะซิติกควรมีค่าต่ำกว่า 2,000 mgCH₃COOH/L ถ้าปริมาณมากกว่าค่าดังกล่าวจะทำให้เกิดความเป็นพิษในระบบ สำหรับปริมาณสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity : ALK) ภายในระบบควรอยู่ในช่วง 1,000-3,000 mgCaCO₃/L และอัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายต่อความเป็นด่างที่เหมาะสมควรมีค่าต่ำกว่า 0.8 ถ้าอัตราส่วนมีค่ามากจะทำให้ค่าความเป็นกรดต่างลดลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้นต้องมีการรักษาสมดุลของการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายให้เท่ากับหรือต่ำกว่า ที่จะไปสร้างก๊าซมีเทน แต่หากมีการสร้างกรดไขมันมากเกินไปทำให้ค่าความเป็นกรดต่างของระบบต่ำการสร้างก๊าซมีเทนมีปัญหาจึงต้องรักษาสภาวะที่สมดุล ซึ่งภายในระบบจะต้องมีการรักษาสมดุลที่เป็นปัญหาอยู่บ่อยครั้งในการเริ่มต้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ที่มาสามารถสร้างกรดไขมันระเหยง่ายได้หรือมีปริมาณมากเกินไปทำให้ระบบบัพเฟอร์ เพื่อป้องกันระบบล้มการรักษาสภาพของค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายในระบบ มีค่าเท่ากับปริมาณต่างไบคาร์บอเนตในการหาปริมาณต่างที่ต้องการได้จากปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย อัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนตมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่ากำลังบัพเฟอร์สูง แต่หากมีอัตราส่วนที่สูงกว่า 0.8 แสดงว่าการบัพเฟอร์ของระบบมีค่ามีต่ำ ซึ่งมาจากค่าความเป็นกรดต่างที่ลดลงอย่างรวดเร็วแสดงถึงความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงปริมาณของต่างไบคาร์บอเนตจากกรดไขมันระเหยง่าย (รจพรรณ, 2563)

1.2.5 การกวนผสม

การกวนผสม (Mixing) จะทำให้แบคทีเรียมีโอกาสสัมผัสกับสารอาหารมากขึ้นอย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ ส่งผลให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายเกิดได้เร็วขึ้น อีกทั้งยังทำให้อุณหภูมิภายในระบบทั่วถึง จากการศึกษาของ (Kozłowski et al, 2018) พบว่าการผสมสามารถลดเวลาเก็บกักของถังปฏิกิริยาได้ต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ วิธีการผสมโดยใช้ใบพัดกวนจะช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพสูง เพื่อป้องกันมิให้มีการแยกชั้นของน้ำเสียของตะกอนลอยค่อนข้างสูง หรือของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียมีมากจึงจำเป็นต้องใช้การกวนที่ไร้อากาศเข้าสู่ระบบด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น วิธีที่ 1 ใช้การกวนด้วยใบพัดกวนผสมให้สารอินทรีย์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันต้องใช้พลังงานค่อนข้างสูง วิธีที่ 2 การสูบลมสารอินทรีย์ชนิดของเหลวภายในถังหมักวนเวียนป้อนกลับเข้าด้านบนของถังปฏิกรณ์ วิธีที่ 3 อาศัยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักสารอินทรีย์ โดยการดูดก๊าซบางส่วนกลับเข้าไปกวนผสมสารอินทรีย์ภายในระบบซึ่งเป็นวิธีที่ดีที่จะรักษาสภาพแบบไร้อากาศภายในถังปฏิกรณ์ โดยมีลักษณะดังภาพที่ 5 ต่อไปนี้



ภาพที่ 5 ลักษณะการกวนผสมของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์

ที่มา : Buta (2020)

1.2.6 ระยะเวลาการเก็บกัก

ระยะเวลาการเก็บกัก (Retention Time) เวลาที่เก็บในระบบของการหมักจนกระทั่งหลุดออกจากระบบ เป็นการระบุว่าระยะเวลาที่ให้สารอินทรีย์ผสมอยู่ในบ่อหมักก๊าซชีวภาพ เนื่องจากถ้าระยะเวลาการกักเก็บที่ยาวนานเกินไปจะสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายต่อปฏิกรณ์ แต่หากระยะเวลาสั้นเกินไปการเติบโตไม่ทันเชื้อจุลินทรีย์ก็หลุดออกจากระบบ ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นควรควบคุมระยะเวลาเก็บกักให้เหมาะสม เพื่อให้แบคทีเรียได้ย่อยสลายสารอินทรีย์และใช้เป็นอาหารในการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ให้มากขึ้น ก่อนที่จะถูกถ่ายเทออกจากบ่อหมัก ซึ่งโดยปกติจะใช้เวลาประมาณ 20-50 days (สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย, 2553)

1.2.7 อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์

อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate : OLR) เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบ และเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดแบบไร้อากาศอีกด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในระบบให้กลายเป็นก๊าซมีเทนต้องมีความเข้มข้นของแบคทีเรียในปริมาณพอเหมาะกับปริมาณสารอินทรีย์ จึงจะทำให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้ามากเกินไปหรือน้อยเกินไปจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง เนื่องจากแบคทีเรียบางส่วนถูกทำลายไปเพราะสภาพที่ไม่สมดุล จะทำให้การใช้ปฏิกรณ์ไม่เต็มประสิทธิภาพไม่คุ้มค่าในการลงทุน และยังส่งผลให้ระบบล้มเหลวได้เช่นกัน (จุฑาภรณ์, 2560) อย่างไรก็ตามค่าของอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์จะแตกต่างกันไปตามธรรมชาติและชนิดของน้ำเสีย จึงจำเป็นต้องปรับค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ในการเดินระบบให้เหมาะสมกับน้ำเสียที่ใช้ด้วย สำหรับอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่จะ

ใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบหาได้จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการหรือจากระบบจริงที่มีผู้เดินระบบสำเร็จมาแล้ว

1.3 รูปแบบการหมักแบบไร้อากาศ

รูปแบบการหมักแบบไร้อากาศของการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถแบ่งตามลักษณะการเติมวัตถุดิบเข้าระบบเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

1.3.1 การหมักแบบกะ

การหมักแบบกะ (Batch Fermentation) การหมักแบบกะนั้นเป็นการเติมวัตถุดิบและหัวเชื้อเพียงครั้งเดียวไม่มีการเติมสารอินทรีย์อื่นลงไประหว่างการหมัก หลังจากนั้นจึงปล่อยให้ทิ้งไว้ระยะเวลาหนึ่งให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น ซึ่งรูปแบบการหมักแบบกะเป็นรูปแบบที่นำไปออกแบบปฏิกรณ์สำหรับการหมักที่สะดวกต่อการดูแลมากที่สุด จึงเหมาะสำหรับผู้ไม่มีวัตถุดิบในการเติมอย่างต่อเนื่อง ไม่สามารถควบคุมเติมตลอดเวลาได้ รวมถึงมีต้นทุน แต่การหมักแบบกะนั้นก็มีข้อจำกัดในเรื่องปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิด ระบบการผลิตจะมีความผันผวนสูงต่อระยะเวลา ระบบการผลิตต้องมีการควบคุมอุณหภูมิ เพื่อให้เกิดความเสถียรในการผลิตก๊าซชีวภาพ จึงเหมาะกับการสังเกตความแปรปรวนของการผลิตก๊าซชีวภาพในห้องปฏิบัติการ (Vögeli et al., 2014)

1.3.2 การหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง

การหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi – continuous Fermentation) เป็นการหมักที่มีลักษณะการเติมอัตราสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบเป็นระยะ ๆ อย่างสม่ำเสมอ และมีการปล่อยกากตะกอนออกในปริมาณที่เท่ากัน ซึ่งเหมาะสำหรับการเติมอัตราสารอินทรีย์และอัตราการถ่ายน้ำหมักออกจากระบบให้เท่ากัน เช่น การควบคุมปริมาณอัตราสารอินทรีย์เข้าระบบทุกวันวันละ 1 ครั้ง จะช่วยให้การทำงานของจุลินทรีย์สามารถสร้างก๊าซมีเทนได้คงที่มากขึ้น การทำงานของระบบมีเสถียรภาพลดลง ปัญหาการเติมสารอาหารแก่แบคทีเรียอย่างกะทันหัน เกิดภาวะความเป็นพิษต่อระบบ (Shock Load) และเกิดการสะสมก๊าซชีวภาพอย่างสม่ำเสมอ จึงมีความนิยมนำไปประยุกต์ใช้ ในระดับอุตสาหกรรม (จุฑาภรณ์, 2560)

1.3.3 การหมักแบบต่อเนื่อง

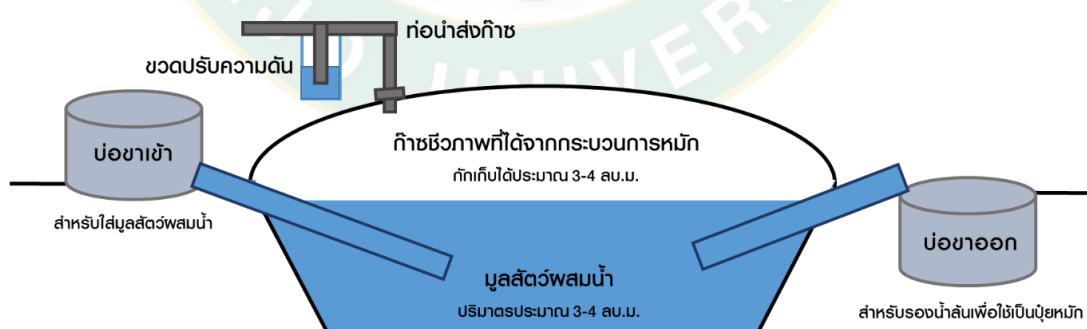
การหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous Fermentation) เป็นการเติมวัตถุดิบและการนำสารอินทรีย์ในระบบเข้าและออกตลอดเวลาอย่างต่อเนื่องและจะมีการหมุนเวียนน้ำหมักบางส่วนกลับเข้าไปในปฏิกรณ์ ซึ่งกระบวนการหมักแบบนี้จะมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่สูงที่สุด แต่ต้องมีปริมาณวัตถุดิบเพียงพอที่จะเติมได้ต่อเนื่องตลอดเวลา ซึ่งอาจต้องเพิ่มเครื่องมือสำหรับสูบลูกสูบเพื่อ

ควบคุมการเติม ในกระบวนการหมักมีความยุ่งยากมากที่ควบคุมอัตราสารอินทรีย์ให้มีความคงที่ ดังนั้นในทางปฏิบัติอาจมีความยุ่งยากสำหรับผู้ใช้งานที่ใช้ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็ก หรือมีค่าใช้จ่ายสูงสำหรับอุปกรณ์ในระบบเพิ่มสูงขึ้นกว่าการหมักรูปแบบอื่น (จุฬารัตน์, 2560)

1.4 เทคโนโลยีระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ

เทคโนโลยีระบบการผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศ สามารถแบ่งประเภทได้หลากหลาย ขึ้นอยู่กับแนวทางที่ใช้ ซึ่งในการจำแนกตามปริมาณของแข็งในระบบแยกออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ระบบการย่อยสลายแบบเปียก (Wet Digestion) และระบบย่อยสลายแบบแห้ง (Dry Digestion) โดยในการทำระบบผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับมูลสัตว์หรือเศษอาหารระดับครัวเรือนจนถึงฟาร์มขนาดเล็กจะใช้ระบบที่มีต้นทุนต่ำ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องเพิ่มวัสดุที่เฉพาะเจาะจง เช่น ฟิล์มดักจุลินทรีย์ แขวนลอย หรือวัสดุป้องกันปัญหาเรื่องสารพิษที่จะส่งผลต่อการเดินระบบ เป็นต้น ซึ่งระบบที่นิยมใช้สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพในประเทศไทยที่ได้เริ่มใช้กับมูลสัตว์ ในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ มีตัวอย่างดังต่อไปนี้

ระบบบ่อปิด (Covered Lagoon) เป็นระบบพื้นฐานโดยการขุดดินเป็นบ่อ หลังจากนั้นจึงปูผ้าใบและคลุมด้วยผ้าใบพลาสติกที่มีความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene : HDPE) เพื่อไม่ให้ให้เกิดการรั่วซึมของของเสียและรองรับการกักเก็บก๊าซชีวภาพในระบบแสดงดังภาพที่ 6 เป็นระบบที่ง่ายต่อการก่อสร้างไม่มีความยุ่งยาก การบำรุงรักษาง่าย แต่ข้อเสีย คือ ระบบต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่ต่อการบำบัดน้ำเสีย มีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่ำ ใช้เวลากักเก็บน้ำเสียได้นาน

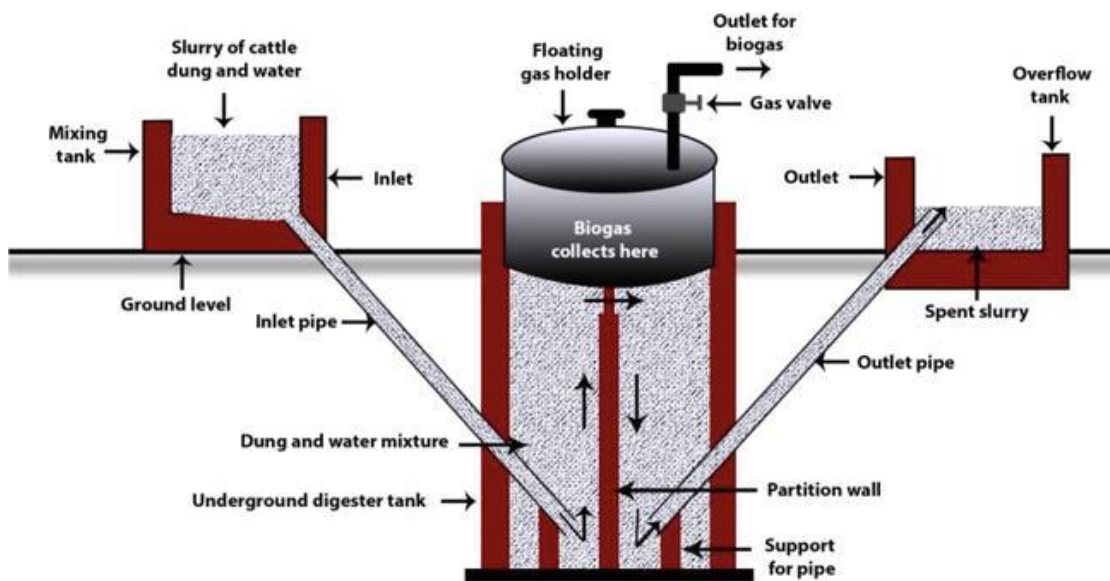


ภาพที่ 6 ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด

ที่มา : มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตกาญจนบุรี (2565)

ระบบหมักแบบฝากรอบลอย (Floating Drum Digester) จะมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก เป็นที่นิยมในประเทศอินเดียส่วนใหญ่ ซึ่งจะถูกติดตั้งไว้ใต้ดินทำหน้าที่หมักมูลสัตว์ ส่วนบนของระบบ

ปฏิกรณ์เป็นแบบฝาครอบลอยเก็บก๊าซทำด้วยโลหะหรือพลาสติกหนา สามารถลอยขึ้นลงตามปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นดังภาพที่ 7 เป็นระบบที่ใช้พื้นที่ในการผลิตก๊าซชีวภาพน้อยเนื่องจากมีรูปทรงกระบอกตัวปฏิกรณ์อยู่ใต้ดิน อุณหภูมิในถังมีความคงที่ ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของน้ำเสีย แต่ข้อเสียของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ คือ การสร้างระบบต้องใช้เทคนิคผู้ชำนาญการ มีต้นทุนในการสร้างสูง มีลักษณะคล้ายคลองว่าติดตั้งไว้ใต้ดินเช่นเดียวกัน แต่มีฝาครอบแบบขยับได้ดังนั้นปริมาณภายในถังสามารถเปลี่ยนแปลงได้

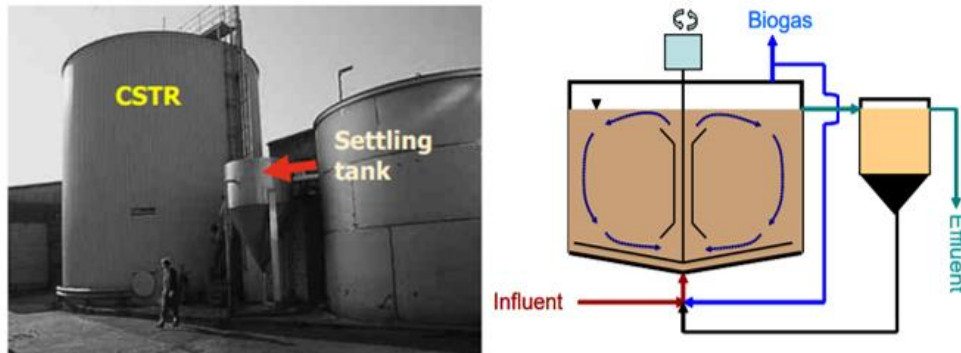


ภาพที่ 7 ระบบหมักแบบฝาครอบลอย

ที่มา : Godwin et al. (2020)

ระบบหมักช้าแบบราง (Plug Flow Digester) เป็นบ่อหมักที่มีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างประมาณ 5:1 มีการกระจายการหมักดังนั้นความดันก๊าซจะเปลี่ยนแปลงได้

ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (Completely Stirred Tank Reactor : CSTR) เป็นถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนผสมซึ่งเหมาะสำหรับของเสียที่มีสารแขวนลอยสูง ช่วยลดความรุนแรงของสารพิษภายในระบบได้ เป็นการกวนผสมภายในถังอย่างทั่วถึง (Mixing System) วิธีการกวนผสม อาจใช้ก๊าซชีวภาพที่ผลิตขึ้นวนกลับภายในถัง หรือการกวนโดยใช้เครื่องกวนผสม ทำให้มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสูง สามารถรับภาระปริมาณการเติมสารอินทรีย์สูง ช่วยลดระยะเวลาในการกักเก็บน้ำเสียในถังปฏิกรณ์แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ระบบหมักแบบถังย่อยแบบสัมผัส

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (2561)

2. แมลงวันลาย

2.1 ลักษณะและประโยชน์ของแมลงวันลาย

แมลงวันลาย (Black Soldier Fly : BSF) มีชื่อวิทยาศาสตร์ *Hermetia illucens* พบได้ทั่วไปในสภาพภูมิอากาศเขตร้อนและเขตอบอุ่น เป็นแมลงที่ไม่เป็นพาหะนำโรค ไม่เป็นศัตรูพืชและไม่ก่อให้เกิดความรำคาญต่อชุมชน ตัวเต็มวัยมีสีดำขนาดความยาวมากถึง 20 mm วงจรชีวิตของแมลงวันลายแสดงดังภาพที่ 9 จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าหนอนแมลงวันลายมีโปรตีน 42-51% ไขมัน 35% พลังงาน 2,900 kcal/kg หนอนแมลงวันลายมีประสิทธิภาพในการกำจัดขยะอินทรีย์รวมที่ 65.5-78.9% และแมลงวันลายจะพบน้อยมากในเดือนเมษายนและไม่พบในเดือนพฤศจิกายน



ภาพที่ 9 วงจรชีวิตของแมลงวันลาย

ที่มา : สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2563)

หนอนแมลงวันลายสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับอาหารสัตว์ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะอินทรีย์รายได้จากการเผยแพร่องค์ความรู้ในการศึกษาดูงานและขายคู่มือสร้างรายได้เป็นอาชีพเสริมให้เกษตรกร ลดการเกิดภาวะโลกร้อน ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการกำจัดขยะอินทรีย์ไม่ถูกหลักสุขาภิบาล พัฒนาอาชีพเสริมสำหรับเกษตรกรหรือผู้ด้อยโอกาส โดยสอดคล้องกับนโยบายของรัฐบาล ในประเด็นโมเดลเศรษฐกิจสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน (BCG in Action BCG in Action/Zero Waste) มุ่งเน้นไปที่แหล่งโปรตีนทางเลือกใหม่จากแมลง และการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ (สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2563)

2.2 กระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย

กระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายเพื่อนำไปผลิตเป็นโปรตีนอาหารสัตว์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ แบบแห้ง และ แบบเปียก โดยลักษณะการเลี้ยงทั้ง 2 แบบ ต่างกันที่ชนิดอาหารที่ใช้สำหรับเลี้ยงตัวอ่อนหนอนและผลพลอยได้หลังจากหนอนโตเต็มวัย แบบที่ 1 แบบแห้ง เป็นลักษณะการเลี้ยงที่นิยมโดยทั่วไปเพื่อบำบัดเศษขยะอินทรีย์ ซึ่งจะเลี้ยงด้วยเศษอาหารเหลือทิ้ง หญ้าแห้ง ฟาง เป็นต้น และได้ผลพลอยได้เป็นปุ๋ยชีวภาพชนิดแห้ง มีลักษณะเป็นผงคล้ายดิน แบบที่ 2 แบบเปียก เลี้ยงด้วยอาหารประเภทกากถั่ว เช่น กากถั่วดาวอินคา กากถั่วเหลือง เป็นต้น เหมาะสำหรับการเพิ่มธาตุอาหารและโปรตีนให้กับหนอนแมลงวันลาย และการอนุบาลตัวอ่อน ซึ่งจะนิยมเลี้ยงด้วยอาหารประเภทดังกล่าวในระดับวิสาหกิจและอุตสาหกรรม โดยกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายตามวัฏจักรชีวิตของแมลงวันลาย มีกระบวนการเลี้ยงทั้งหมด 5 ขั้นตอน (Gahukar, 2016 และ Cecilia et al., 2020) ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 เริ่มต้นโดยการจัดทำบ่อเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย

ขั้นตอนที่ 2 นำเศษวัสดุต่าง ๆ เช่น เศษอาหาร หญ้าแห้ง หรือ กากถั่วเหลือง ลงในบ่อปูน

ขั้นตอนที่ 3 รดน้ำให้ชุ่มทุกวัน ประมาณ 20-30 days โดยสังเกตว่าเศษวัสดุเริ่มย่อยสลาย แสดงว่าสามารถเป็นที่หลบซ่อนหรืออยู่อาศัยของหนอนแมลงวันลายได้

ขั้นตอนที่ 4 นำอาหารเลี้ยงลงในบ่อ เช่น กากถั่วเหลือง กากถั่วดาวอินคา เศษอาหาร เป็นต้น หลังจากนั้นจึงนำหนอนที่มีอายุ 10-20 days ลงไปในบ่อ

ขั้นตอนที่ 5 ใช้เวลาประมาณ 10-15 days ให้หนอนโตเต็มที่ที่สามารถนำไปแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป เช่น อบและนำไปบดแห้งเป็นโปรตีนอาหารสัตว์ หรือปล่อยให้หนอนทำหน้าที่กำจัดเศษอาหาร ขั้นตอนการนำไปแปรรูปของการเลี้ยงหนอนแบบเปียกจะแตกต่างจากแบบแห้ง ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการแยกกากอาหารและตัวหนอนออกเพื่อนำตัวหนอนโตเต็มวัยไปเป็นโปรตีนอาหารสัตว์ ทั้งในรูปแบบสดและแบบอบแห้ง โดยการเลี้ยงหนอนแบบแห้ง จะทำการแยกกากจากตัวหนอนด้วยวิธีการร่อนแยกด้วยตะแกรง สำหรับการเลี้ยงหนอนแบบเปียกจะใช้วิธีการล้างด้วยน้ำสะอาด ซึ่ง

ใน 1 kg จะใช้น้ำในการล้างประมาณ 20-50 L หลังจากแยกหนอนโตเต็มไวออก จะทำการแบ่งหนอนบางส่วนเพื่อเก็บไว้เป็นฟอพันธ์ แม่พันธุ์ โดยการปล่อยให้เป็นดักแด้และกลายเป็นแมลงวันลายภายในโรงเรือนเพาะเลี้ยงโดยเฉพาะ น้ำเสียหลังจากกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายมีคุณลักษณะดังตารางที่ 2 ต่อไปนี้ ซึ่งมีลักษณะน้ำเสียดังภาพที่ 10



A) น้ำเสียจากการล้างแบบเปียก

B) กากของเสียจากการเลี้ยงแบบแห้ง

ภาพที่ 10 ลักษณะของเสียการแยกหนอนแมลงวันลายจากอาหารเพาะเลี้ยง

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย

| คุณสมบัติ | ปริมาณ | หน่วย |
|------------------------|------------|--------|
| ค่าความเป็นกรดต่าง | 5.71 | |
| ปริมาณของแข็งทั้งหมด | 155,405.4 | mgVS/L |
| ปริมาณของแข็งระเหยง่าย | 176,640.93 | mgVS/L |
| ค่าซีไอดี | 18,461.54 | mg/L |

3. การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนทางด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ประเมินศักยภาพความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ ความเป็นไปได้หากเพิ่มขนาดการทดลองเพื่อนำไปใช้จริง โดยทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบลดอยร่วมกับการกวนผสมจากน้ำเสียกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลาย ที่ใช้ในระดับต้นแบบเป็นถึงปฏิกรณ์ขนาด 200 L เมื่อนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้เทียบกับการนำไปใช้ทดแทนทางพลังงาน และราคาต้นทุนการผลิตถึงผลิตก๊าซชีวภาพ (Cost-Benefit Analysis) และประเมินผลตอบแทน (Benefit) ค่าใช้จ่าย (Cost)

ต่าง ๆ เพื่อทำการเปรียบเทียบผลประโยชน์ที่เกิดจากการใช้ก๊าซชีวภาพกับต้นทุนของเงินลงทุนที่ใช้ในการสร้างระบบนี้ จะแสดงให้เห็นทราบว่าถึงประสิทธิภาพของระบบและความประหยัดภายใต้การดำเนินงานการใช้ทรัพยากรมีความคุ้มค่า โดยการประเมินค่าทางเศรษฐศาสตร์มีวิธีการต่าง ๆ ที่นิยมใช้ในการประเมินความเหมาะสมของระบบมีดังนี้ การประเมินโดยคิดระยะเวลาคืนทุน (Simple payback period) (วนัสพรรัตน์, 2564)

3.1 วิธีประเมินโดยคิดระยะเวลาคืนทุน

การคิดระยะเวลาคืนทุน (Simple Payback Period) โดยหาว่าใช้ระยะเวลานานเท่าไร ที่จะได้รับกำไรจึงจะคุ้มกับการลงทุนเริ่มแรกมารวมพิจารณา ซึ่งการพิจารณามูลค่าการลงทุนเบื้องต้นทั้งหมด กำไรที่ได้จากผลิตก๊าซชีวภาพจึงจะคุ้มกับรายจ่ายลงทุนเริ่มแรกเป็นค่าใช้จ่ายก่อนเปิดดำเนินการเปรียบเทียบกับมูลค่าผลตอบแทนที่ได้จากการลงทุนต่อปี ที่ไม่มีการคิดภาษีและนำดอกเบี้ยมาคิดจะทำให้ง่ายแก่การคำนวณ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\text{ระยะคืนทุน} = \frac{\text{ค่าใช้จ่ายในงานวิจัย}}{\text{ผลตอบแทนสุทธิเฉลี่ยต่อปี}} \quad \text{สมการที่ 7}$$

โดยสำหรับความคุ้มค่าของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้จากผลิตภัณฑ์หลักประกอบไปด้วย ก๊าซชีวภาพ ตะกอนชีวภาพ (ที่เป็นส่วนเกินต้องระบายทิ้ง) น้ำเสียหรือสารอินทรีย์ที่ต้องออกจากระบบ ซึ่งในการพิจารณาการลงทุนก่อสร้างและการติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จะต้องพิจารณามูลค่าของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ด้วย เป็นทางเลือกผลพลอยได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพนอกจากระบบบำบัดขั้นต้น และการนำผลพลอยได้นำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเปรียบเทียบสามารถนำไปทดแทนการใช้พลังงานอื่น ๆ ได้ตามตารางที่ 3 ซึ่งเป็นการสร้างมูลค่าที่ได้จากผลิตภัณฑ์ (ศศิธร ไสปลา, 2562)

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบก๊าซชีวภาพ 1 m³ กับพลังงานชนิดอื่น ๆ

| ชนิด | ค่าความร้อนที่เทียบเท่า (ทดแทน) | หน่วย |
|------------------|---------------------------------|-------|
| ก๊าซหุงต้ม (LPG) | 0.46 | kg |
| น้ำมันดีเซล | 0.60 | L |
| น้ำมันเตา | 0.55 | L |
| ไฟฟ้า | 1.2 | kW/h |

การตรวจสอบเอกสาร

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยใช้ น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบสำหรับการนำไปบำบัดในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อศึกษารูปแบบการออกแบบพัฒนาเครื่องผลิตก๊าซชีวภาพให้ยังคงดำเนินการตามปกติ ตามลักษณะของน้ำเสีย จึงศึกษาเกี่ยวกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวัตถุดิบน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสียด้วยเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพรูปแบบต่าง ๆ และการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อประสิทธิภาพการกำจัดน้ำเสีย โดยงานวิจัยที่ศึกษามีรายละเอียดดังนี้

1. วัตถุดิบน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของถั่วเหลืองหรือโปรตีนสูง

Onthong and Juntarachat (2017) ได้ศึกษาประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์ เช่น กากถั่วเหลือง เปลือกมะละกอ ชานอ้อย ฟางข้าว โดยการทดลองแรกเป็นการนำกากที่เหลือทิ้งจากเกษตรกรขนาด 1,000 mL และบดให้มีขนาดเล็ก ใช้หัวเชื้อมูลวัวกับน้ำกลั่นผสมในอัตราส่วน 1:1 (v/v) เข้าสู่ระบบหมักแบบไร้อากาศ ปริมาณวัตถุดิบและปริมาณของเสียทางการเกษตรที่บรรจุในขวดเพื่อหาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนขนาด 1,000 mL การทดลองระยะเก็บกัก (Hydraulic Retention Time : HRT) ที่แตกต่างกันที่ 15, 20, 25, 30, และ 35 days แต่ละครั้งถูกทำซ้ำ 3 ครั้ง ผลที่ได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่ากากถั่วเหลืองให้ก๊าซชีวภาพสูงสุดถึง 560.47 mL ที่ HRT 25 days และด้วยปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่ผลิตขึ้นอย่างมากรุนั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของเมล็ดถั่วเหลืองซึ่งมีโปรตีน 40% ไขมัน 20% คาร์โบไฮเดรต 35% และอื่น ๆ 5% ส่วนประกอบทำให้มีปริมาตรก๊าซชีวภาพที่สูง ต่อมาในการทดลองที่ 2 ทำการผลิตก๊าซชีวภาพในถังขนาด 200 L และมีถังเก็บ 150 L ในการทดลองแบบต่อเนื่องระยะเวลา 60 days มีการเติมอินทรีย์วัตถุแบบต่อเนื่องและบรรจุหัวเชื้อ 100 L ลงในบ่อหมัก ใช้อุณหภูมิและความดันแวดล้อม การผลิตก๊าซชีวภาพรายวันถูกวัดโดยใช้วิธีการแทนที่ด้วยน้ำ พบว่าก๊าซชีวภาพจากกากถั่วเหลืองมีอัตราการเกิดก๊าซมีเทนได้ถึง 57.14% ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยเท่ากับ 63.01 L/days มีเสถียรภาพหลังจากการย่อยแบบไร้อากาศอย่างต่อเนื่องในช่วง 30 days จากการทดลองต่อเนื่อง 60 days ซึ่งพบว่าเกิดก๊าซชีวภาพจากกากถั่วเหลืองได้สูงที่สุดเป็นอันดับแรกในการทดลอง

วัฒนณรงค์ และคณะ (2563) ศึกษาปริมาตรก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร 3 ประเภท ได้แก่ โปรตีน (เนื้อสัตว์) วิตามิน (ผักผลไม้) และคาร์โบไฮเดรต (ข้าว) ในชุดถังปฏิกรณ์ขนาด 0.2 L ดังนี้ ถังหมักโปรตีน ถังหมักวิตามิน และถังหมักคาร์โบไฮเดรต ทำการศึกษาก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร โดยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ระยะเวลาทดลอง 40 days ที่อุณหภูมิแวดล้อมปกติ ซึ่งก๊าซชีวภาพที่

เกิดขึ้นถูกเก็บไว้ในถังเก็บก๊าซ วัดปริมาตรก๊าซด้วยการแทนที่ด้วยน้ำ และนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography : GC) ผลการศึกษาพบว่า ถังปฏิกรณ์ที่ให้ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุด คือ ถังหมักโปรตีน (เนื้อสัตว์:มูลสุกร:กากน้ำตาล:น้ำ) อัตราส่วนระหว่าง 3:1:1:12 โดยปริมาตร ซึ่งให้ปริมาตรก๊าซชีวภาพมากที่สุด $8.8277 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ และมีองค์ประกอบก๊าซมีเทนเฉลี่ย 13.70% ถือได้ว่าเศษอาหารโดยเฉพาะประเภทโปรตีนเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถสร้างพลังงานในรูปของก๊าซมีเทนได้

Wang and Serventi (2019) ศึกษาเกี่ยวกับความยั่งยืนของการแปรรูปผลิตภัณฑ์นมและถั่วเหลืองในเรื่องของการจัดการน้ำเสียและของเสียกลับมาใช้ใหม่ จากการศึกษาพบว่าอุตสาหกรรมการผลิตนมและถั่วซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนทั่วไปที่ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารของคนสร้างน้ำเสียมากถึง 11 L ต่อวัตถุดิบที่ใช้ปริมาณ 1 L โดยน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการแปรรูปถั่วเหลืองมีความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 5.4-6.6 ปริมาณความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (Biochemical Oxygen Demand : BOD) 4,100-6,800 mg/L ค่าซีไอดี 7,500-12,000 mg/L ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่ากับ 370-440 mg/L และ 81-92 mg/L ตามลำดับ นอกจากนี้ น้ำเสียที่เกิดจากการแปรรูปถั่วเหลืองจะมีปริมาณสารอินทรีย์และชีวมวลสูง จึงมีการนำเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ มาใช้ ทั้งการบำบัดทางกายภาพ การบำบัดทางเคมี หรือการบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวมีอุปกรณ์ที่ช่วยให้การย่อยสลายสารอินทรีย์จำนวนมากได้ เช่น ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพแบบถังฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Filters : AFF) มีวัสดุตัวกลาง เช่น เชือกไนลอน ตาข่าย ช่วยเป็นพื้นผิวให้จุลินทรีย์ยึดเกาะมีลักษณะคล้ายตาข่ายกรองสารอินทรีย์ จุลินทรีย์จึงสัมผัสน้ำเสียได้อย่างทั่วถึงและบำบัดน้ำเสียได้ หรือระบบ Up-flow Anaerobic Sludge Blanket ที่เรียกว่า UASB เป็นการพัฒนาระบบการบำบัดขนาดใหญ่ให้ประหยัดพื้นที่ในการใช้ตัวกรองหรือวัสดุตัวกลางในถังปฏิกรณ์ โดยออกแบบให้น้ำไหลจากล่างขึ้นบนทำให้สามารถรักษาตะกอนจุลินทรีย์ช่วยบำบัดน้ำเสียได้โดยไม่ต้องใช้วัสดุตัวกลาง แต่มีข้อจำกัด คือ เหมาะกับจุลินทรีย์ขนาดใหญ่ ความหนาแน่นสูง และมีน้ำหนักรวมถึงต้องติดตั้งอุปกรณ์เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกอนหลุดออกจากระบบ ดังนั้น ในการนำปรับมาใช้กับอุตสาหกรรมการผลิตนมหรือถั่วเหลืองต้องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของน้ำเสียแต่ละพื้นที่ และคัดเลือกเทคโนโลยีหรือพัฒนาระบบที่เหมาะสม

Pualinetti et. al. (2022) ศึกษาการหมักแบบไร้อากาศเพื่อเป็นกระบวนการหลักสำหรับการเป็นโรงกลั่นชีวภาพอย่างยั่งยืนในกระบวนการแปรรูปถั่วเหลือง โดยเฉพาะอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร ขนมปัง หรือ โปรตีนพืชทดแทนโปรตีนจากสัตว์ ซึ่งมีมูลค่าตลาดมากถึง 12.8 billion USD โดยผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมการแปรรูปถั่วเหลืองสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ กากถั่ว

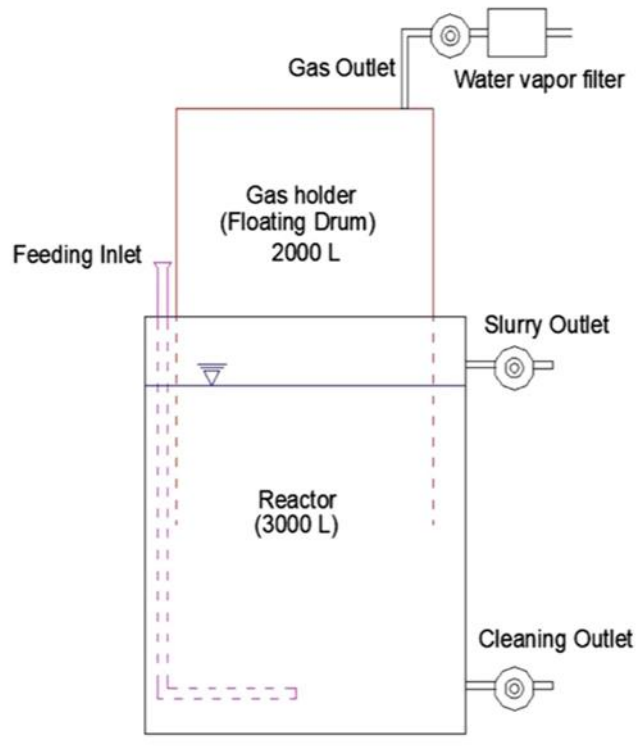
เหลือง และ กลีเซอรินดิบ (Crude Glycerin) ซึ่งส่วนใหญ่ผลพลอยได้ทั้งสองชนิดจะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์เป็นหลักเพื่อเพิ่มโปรตีนหรือวิตามินให้กับสัตว์เลี้ยงและสัตว์เศรษฐกิจ แต่ก็ยังมีความต้องการนำไปใช้อย่างจำกัดทั่วโลก ทำให้เสี่ยงต่อการเป็นของเสียเหลือทิ้ง ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อชดเชยการผลิตและแปรรูปกากถั่วเหลืองที่มากเกินไป จึงมีการศึกษาหาทางเลือกในการกำจัดที่เหมาะสมต่อสิ่งแวดล้อมด้วย โดยเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพ หรือ การหมักแบบไร้อากาศเป็นเทคโนโลยีที่เป็นไปได้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำเสียที่มีส่วนผสมของกากถั่วเหลืองหรือกลีเซอรินมีสารอินทรีย์ปริมาณมาก โดยน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปถั่วมีค่าซีโอดีประมาณ 1,310 g/L ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย 90 mgCaCO₃/L และปริมาณสภาพความเป็นต่างเท่ากับ 0 mgCaCO₃/L สำหรับกลีเซอรินค่าซีโอดีประมาณ 1,674 g/L ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย 5.5 mgCaCO₃/L และปริมาณสภาพความเป็นต่างเท่ากับ 0.92 mgCaCO₃/L ซึ่งการใช้ผลพลอยได้ดังกล่าวมาผลิตในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากถึง 55-75% มีศักยภาพมากพอในการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนต่อไปได้

2. การทดสอบระบบผลิตก๊าซชีวภาพและการดำเนินการหมัก

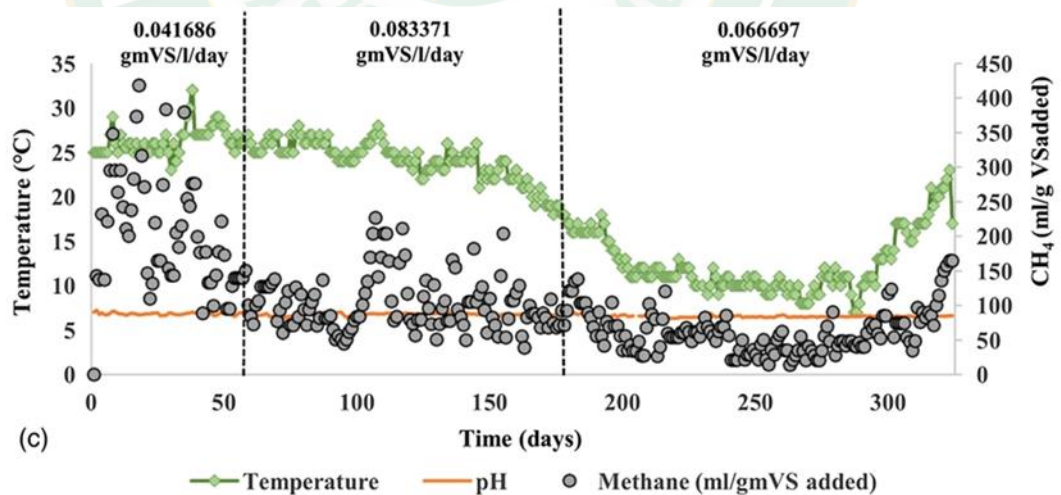
อนุก และคณะ (2564) ศึกษาศักยภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าวโดยระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสีย ขนาดถังปฏิกรณ์ไร้อากาศปริมาตร 50 L จำนวน 5 ถัง ถังทั้งหมดมีการต่อแบบอนุกรมกันภายในมีการบรรจุยางในรถจักรยานยนต์สำหรับการเสริมประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย อินทรีย์วัตถุที่ใช้เป็นเศษข้าวละลายน้ำจะมีค่าซีโอดีอยู่ระหว่าง 2,000-3,000 mg/L ในการทดสอบเป็นการจุดไฟติดจากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ด้วยชุดเตาเพื่อทดสอบศักยภาพและระยะเวลาการจุดติดไฟ โดยงานวิจัยทดลองระบบผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด 3 ชุด ผลการวิจัยที่ได้เมื่อผสมเศษข้าวกับน้ำทำการกวนผสมก่อนเข้าระบบ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่า 20 L/week หรือ 0.08 L/L_{wastewater} ผลการคำนวณการผลิตก๊าซชีวภาพจากค่าซีโอดีที่ถูกกำจัดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.03-0.24 L/gCOD ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพยาวนานขึ้น ระบบนี้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้อากาศทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดซีโอดี 88.9% นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดของแข็งตกตะกอน 99.7% ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการตกตะกอนในระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องหมุนเวียนน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบ สำหรับผสมกับวัตถุดิบก่อนป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นการรักษาอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์

Jürgensen et al. (2018) พัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบผสมผสานระหว่างแบบกวน สมบูรณ์และเอปียาร์ (Anaerobic Buffered Reactor) สำหรับโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์จากนมวัว โดยระบบผลิตก๊าซชีวภาพประกอบด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ขนาด 1 m^3 ควบคุมอุณหภูมิด้วย เซนเซอร์ Pt-100 ที่อุณหภูมิ $38 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ต่อเข้ากับถังปฏิกรณ์แบบเอปียาร์ ซึ่งแต่ละถังจะมีจุดเก็บตัวอย่าง น้ำเสียภายในถังทั้งหมด 3 จุด ได้แก่ ด้านบนถัง กลางถัง และก้นถัง และจุดเก็บก๊าซต่อเชื่อมกันกับถัง เพิ่มแรงดันให้อยู่ในช่วง 10-20 kPa และวัดอัตราการไหลและปริมาตรด้วยรีดเตอร์ดรัม สำหรับการเดินระบบจะเริ่มระบบด้วยหัวเชื้อจากโรงบำบัดน้ำเสียขยะมูลฝอยเป็นเวลา 1 week หลังจากนั้นจึงเติมวัตถุดิบเป็นเวลา 90 days ที่อัตราการไหลคงที่ $0.130 \text{ m}^3/\text{day}$ อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ ระหว่าง $1.3\text{-}4.3 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3\cdot\text{day})$ ซึ่งจะคำนวณจากปริมาตรของถังเอปียาร์ โดยจะวิเคราะห์ อุณหภูมิ ค่ากรดต่าง และปริมาตรการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนทุกวัน ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่า ในช่วง 70 วันแรกค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 6.5-7.0 ซึ่งมีการเกิดก๊าซชีวภาพคงที่ ตั้งแต่วันที่ 74-94 ค่าความเป็นกรดต่างลดลงเหลือ 6.3 และเริ่มคงที่ในวันที่ 100 ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดความ สกปรกลดลงเหลือ 28% โดยสรุปว่าปริมาณความสกปรกเฉลี่ยลดลง 82% ที่ยิลด์ของการผลิตก๊าซ ชีวภาพเท่ากับ $0.26 \text{ m}^3/\text{kgCOD}$ และสัดส่วนมีเทนเฉลี่ย $76\pm 2\%$ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าระบบผลิต ก๊าซชีวภาพแบบผสมผสานระหว่างการกวนสมบูรณ์และเอปียาร์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในของเสีย จากอุตสาหกรรมอาหารได้

Choudhary et. al. (2019) ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิช่วงอุณหภูมิช่วงไซโคฟิลิกส์ ($0\text{-}15 \text{ }^{\circ}\text{C}$) และช่วงมีโซฟิลิกส์ ($15\text{-}27 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดใหญ่ปริมาตรรวม 3,000 L เป็นระยะเวลา 324 days โดยใช้เศษอาหารบดเป็นวัตถุดิบและใช้มูลโคเป็นหัวเชื้อ ซึ่งการทดลองจะ ออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยโดยใช้ถังพีวีซีทรงกระบอกขนาด 3,000 L เป็นถัง ปฏิกรณ์และถังขนาด 2,000 L เป็นถังเก็บก๊าซชีวภาพ ซึ่งลักษณะของถังปฏิกรณ์แสดงดังภาพที่ 11 ติดตั้งไว้ ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสารสนเทศเจปี้ (Jaypee University of Information Technology) มีการเติมวัตถุดิบทุกวัน โดยการกำหนดอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์สัมพันธ์กับ อุณหภูมิที่เกิดขึ้น โดยอุณหภูมิประมาณ $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ควรมีอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ในช่วง $0.08\text{-}0.24 \text{ gVS}/(\text{L}\cdot\text{day})$ โดยกำหนดการเติม 3 ระดับที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.08, 0.07 และ $0.04 \text{ gVS}_{\text{added}}/(\text{L}\cdot\text{day})$ โดยอิงจากการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิโดยรอบ เมื่อก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นแต่ละ วันจะบันทึกผลและคำนวณปริมาตรจากพื้นที่ถังเก็บกับความสูง นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซ ชีวภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซรุ่น Biogas 5000 Geotech และวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับ ปัจจัยการเกิดก๊าซชีวภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของ แข็งระเหยง่าย ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ ปริมาณไนโตรเจน และ สภาพความเป็นด่าง



ภาพที่ 11 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยขนาด 3,000 L
ที่มา : Choudhary et. al. (2019)



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน
ที่มา : Choudhary et. al. (2019)

ผลการศึกษาพบว่า ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 418.3-13.9 mLCH₄/gVS_{added} ที่สัดส่วนก๊าซมีเทนเฉลี่ย 54.8% แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง และ ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน ดังภาพที่ 12 ซึ่งผลการผลิตก๊าซชีวภาพจำเพาะสูงสุดและศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 134.5 mLCH₄/gVS/day และ 34.1 mLCH₄/gVS/day ตามลำดับ เมื่อพิจารณาร่วมกับอุณหภูมิพบว่า อุณหภูมิที่ต่ำมากในช่วงไซโคฟิลิกส์มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพของระบบอย่างมาก ซึ่งอุณหภูมิช่วงมีโซฟิลิกส์มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมากกว่าอุณหภูมิช่วงไซโคฟิลิกส์

Luo et al. (2017) ศึกษาการลดการปล่อยก๊าซชีวภาพจากโรงงานขนาดหมู่บ้านด้วยการพัฒนาถังเก็บก๊าซชีวภาพแบบครอบลอยร่วมกับการหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเดินระบบ โดยเริ่มจากการประเมินทางคณิตศาสตร์ของอัตราการผลิตและอัตราการใช้ก๊าซชีวภาพระยะเวลา 1 year จากหมู่บ้าน ซึ่งมีปริมาตรการหมัก 80 m³ เพื่อนำมาใช้ในการออกแบบปริมาตรระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยที่เหมาะสมซึ่งมีขนาดตรงตามมาตรฐานทั่วไป คือ ต่อหนึ่งครัวเรือนจะมีถังแบบฝาครอบลอยขนาดมากกว่า 0.5 m³ โดยออกแบบปริมาตรการหมักเท่ากับ 0.65 m³ เต็มวัฏจักรอยู่ในช่วง 6-9 days ที่อุณหภูมิแวดล้อม 18.4-28.7 °C ซึ่งได้ผลการผลิตก๊าซชีวภาพรวม 12,847 m³ มีการใช้ก๊าซชีวภาพเท่ากับ 9,813.3 m³ หรือ 32.07 m³/day ดังนั้นจึงมีประสิทธิภาพในการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์เท่ากับ 76.4%

Krishania et al. (2016) ทดสอบการใช้เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่องในการหมักก๊าซมีเทนจากฟางข้าวสาลีที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยมูลโค กระบวนการกึ่งต่อเนื่องดำเนินการในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพสามประเภทที่แตกต่างกัน มีทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนแบบต่อเนื่อง เครื่องปฏิกรณ์แบบตรึงฟิล์มคงที่ (Fixed Film Reactor : FFR) และเครื่องปฏิกรณ์แบบถังฝาครอบลอยแบบธรรมดา โดยนำฟางข้าวสาลีมาบดให้มีขนาดเล็กลง มีการบรรจุสารอินทรีย์ 2.2 kg ในอัตราส่วนฟางข้าวผสมกับมูลโคในสัดส่วน 40:60 ในการย่อยแปรไธอากาต ใช้อุณหภูมิแวดล้อมแปรผันตั้งแต่ 25-30 °C ทำการหมักในถังผลิตก๊าซชีวภาพมีรูปแบบทรงกลมขนาด 1.20 m x 2 m ในการทดลองจะมีการปรับปรุงระบบหมักแบบถังกวนต่อเนื่อง ได้รับการติดตั้งเครื่องกวนผสมที่ทำจากเหล็กสำหรับการกวนผสม ซึ่งช่วยให้อินทรีย์วัตถุเข้าถึงตัวจุลินทรีย์แบบไร้อากาศได้ง่าย เครื่องกวนนี้ทำงานโดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 0.746 kW ที่เชื่อมต่อผ่านกล่องเกียร์ ซึ่งรักษาความเร็วรอบการหมุนของเครื่องกวนไว้ที่ 10 rpm ระบบหมักแบบฟิล์มคงที่ที่ทำจากไม้ไผ่ และติดตั้งในแนวตั้งในระบบแบบฝาครอบลอยแบบธรรมดา ถูกใช้เป็นตัวควบคุมเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์อีกสองเครื่องที่เหลือ มีการตรวจวัดการผลิตก๊าซชีวภาพทุกวัน อุณหภูมิพื้นผิว ค่าความเป็นกรดต่างของสารละลาย กรดไขมันระเหยง่าย และองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ตัวอย่าง

สารละลายจะถูกเก็บทุก ๆ 5 days การวิเคราะห์ของแข็งระเหยง่ายจะใช้วิธีการวิเคราะห์มาตรฐาน ผลการสังเกตพบว่าการกำหนดให้มีระบบแบบตรึงฟิล์มคงที่ทำให้ผลผลิตมีเทนที่ได้เพิ่มขึ้น 41.10% อย่างไรก็ตาม การกำหนดค่าของระบบแบบถังกวนแบบต่อเนื่อง มีผลเพียงเล็กน้อยต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของผลผลิตมีเทน (ผลผลิตเพิ่มขึ้นเพียง 10.6%) เมื่อเทียบกับแบบถังฝาครอบลอยการกำจัดของแข็งระเหยง่ายสำหรับเครื่องย่อยอาหารไม่แตกต่างกันมากนักที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่เท่ากัน จากการศึกษาพบว่าฟางข้าวสาลีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยระบบแบบตรึงฟิล์มคงที่มีการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ $0.342 \text{ m}^3/\text{kgVS}$ ในขณะที่ ระบบแบบถังกวนแบบต่อเนื่อง และ แบบถังฝาครอบลอย มีผลผลิตมีเทนที่ $0.289 \text{ m}^3/\text{kgVS}$ และ $0.264 \text{ m}^3/\text{kgVS}$ ตามลำดับ และการกวนอย่างต่อเนื่อง ต้องใช้พลังงานมากขึ้นในกระบวนการจึงไม่เหมาะด้านการอนุรักษ์พลังงาน

Mahmoodi-Eshkaftaki and Ebrahim (2019) เป็นการศึกษาคุณภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการปรับมุมมองของใบพัดกั้นที่ใบพัดทำมุม 30° , 45° , และ 60° ที่เกี่ยวกับประสิทธิภาพการย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยใช้อินทรีย์วัตถุจากมูลโคร่วมกับชี้เลี้ยง ในแบบจำลองพิจารณาจาก เวลาในการกวนผสม การใช้พลังงาน ปริมาตรก๊าซชีวภาพ และลักษณะของอินทรีย์ที่ย่อยสลาย ในกระบวนการศึกษาการกวนผสมเป็นระยะเวลา 5 และ 10 min แล้วหยุดเป็นเวลา 5 hr พบว่าใบพัดที่มีมุมเอียง 30° ใช้เวลาในการผสม 5 min จะใช้พลังงานน้อยที่สุดในการกวนผสมการหมุนที่ตีขึ้น 26% เท่ากับ 0.181 ขณะที่ปริมาณ CH_4 ที่เกิดขึ้นจากระบบผลิตโดยเฉลี่ย 60% อัตราการย่อยสลายของอินทรีย์วัตถุมากขึ้น เช่น ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่าย และ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน แต่ใบพัดที่มีมุม 60° สามารถลดปริมาณคาร์บอนมอนนอกไซด์ (CO) และ H_2S รวมถึงเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีและค่าบีโอดีมากขึ้นจากการหมุนเวียนตะกอนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการใช้ใบพัดและระยะเวลาในการกวนผสมเป็นวิธีที่เหมาะสมในการเพิ่มปริมาตรก๊าซมีเทนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

Moguel-Castañeda et al. (2020) ศึกษาผลกระทบจากอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศของผลพลอยได้จากการผลิตชีส หรือ เวย์ (Whey) โดยศึกษาจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ UASB ซึ่งมีลักษณะการเติมแบบกึ่งต่อเนื่อง ในระยะเวลาการหมัก 90 days โดยเพิ่มอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เป็น 2 เท่า ทุก ๆ 30 days ($2.5\text{-}10 \text{ gCOD}/(\text{L}\cdot\text{day})$) ควบคุมให้ค่ากรดต่างไม่เกิน 8.0 ด้วยการเติมสารละลายต่างวันละ $5 \text{ gNaHCO}_3/(\text{L}\cdot\text{day})$ ควบคุมอุณหภูมิที่ 35°C และอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อเท่ากับ $16.4 \text{ gCOD}/\text{gVS}$ ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสียในถังปฏิกรณ์เท่ากับ 4 days ซึ่งระหว่างการทดลองจะวิเคราะห์ปริมาณความสกปรก กรดอินทรีย์ระเหยง่าย และการผลิตก๊าซมีเทนวันละ 1 ครั้ง ตามมาตรฐาน American Public Health

Association (APHA) ผลการทดลองพบว่า วัตถุประสงค์นี้มีค่าซีไอดี 126.71 g/L ปริมาณองค์ประกอบโปรตีน 34.45 g/L คาร์โบไฮเดรต 105.47 g_{glucose}/L ปริมาณของแข็งทั้งหมด 115.30 g/L ปริมาณของแข็งระเหยง่าย 102.9 g/L และความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย 0.238 g CH₃COOH/L เมื่อทำการหมักร่วมกับหัวเชื้อพบว่า ในช่วงแรกเติมอัตราภาระบรรทุสารอินทรีย์ที่ 2.5 gCOD/(L·day) กรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในช่วงวันที่ 5 และเริ่มมีความเสถียรมากขึ้นในช่วงวันที่ 20 สำหรับอัตราภาระบรรทุสารอินทรีย์ที่ 5 และ 10 gCOD/(L·day) มีการผลิตก๊าซมีเทนคงที่ตลอดช่วง 30 days ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมด สามารถสร้างต้นแบบทางคณิตศาสตร์แบบไดนามิกประมาณการเติมภาระบรรทุสารอินทรีย์ที่เหมาะสมจากพารามิเตอร์หลัก ได้แก่ ปริมาณความสกปรกค่าซีไอดี ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย และการผลิตก๊าซมีเทนที่สูงที่สุดได้

Duan et al. (2019) ศึกษาผลกระทบของอัตราภาระบรรทุสารอินทรีย์และปริมาณของแข็งทั้งหมดต่อประสิทธิภาพการหมักแบบไร้อากาศจากมูลสุกร ในถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมขนาด 20 L จำนวน 6 ถัง ภายใต้อุณหภูมิมีโซฟิลิกส์ โดยการหมวนน้ำร้อนจากเครื่องทำน้ำร้อนไปรอบ ๆ ตัวถังปฏิกรณ์ กำหนดอัตราการเติมวัตถุดิบตั้งแต่ 1.13-3.03 g/(L·day) และของแข็งรวมเข้มข้น 3-8% เป็นเวลา 22 days ประเมินปริมาตรก๊าซมีเทน อัตราการไหลเชิงมวล ขนาดของบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา และความร้อนที่ถูกถ่ายเทที่เกิดขึ้นจากการหมัก ซึ่งผลปรากฏว่าอัตราภาระบรรทุสารอินทรีย์ที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 1.89 gVS/(L·day) ที่ของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ได้ก๊าซชีวภาพสูงถึง 438.38 mL/gVS เมื่ออัตราภาระบรรทุสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณของแข็งระเหยง่ายจะเพิ่มขึ้นตามกัน ซึ่งกระบวนการหมักแบบไร้อากาศสามารถลดปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายได้มากกว่า 53% เนื่องจากกระบวนการหมักของแต่ละถัง มีค่าความเป็นกรดต่างประมาณ 7.21 ทำให้เกิดการย่อยสลายให้เป็นก๊าซชีวภาพได้ดียิ่งขึ้น

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

สำหรับอุปกรณ์และวิธีการจะนำเสนอรายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินงานโดยแบ่งเป็นอุปกรณ์สำหรับพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอยร่วมกับการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพ และอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพ สำหรับวิธีการจะเป็นการอธิบายขั้นตอนการดำเนินการวิจัยทั้งหมดตั้งแต่กระบวนการศึกษาทฤษฎีและเอกสารที่เกี่ยวข้อง การออกแบบและสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพ การทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองจนกระทั่งการจัดรูปเล่มวิทยานิพนธ์ ซึ่งแต่ละหัวข้อมีรายละเอียดดังนี้

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาพัฒนาถังปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอยสำหรับกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายมีรายละเอียดดังตารางที่ 4 อุปกรณ์สำหรับพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และตารางที่ 5 อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพ ดังนี้

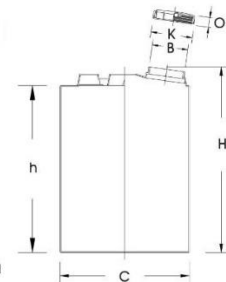
ตารางที่ 4 อุปกรณ์สำหรับพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

| ชื่ออุปกรณ์ | รูปอุปกรณ์ |
|-------------|--|
| เหล็กฉาก |  |
| เหล็กกล่อง |  |

ชื่ออุปกรณ์

รูปอุปกรณ์

ถังพลาสติก



TISI 1379-2551

ท่อพีวีซีและพีอี


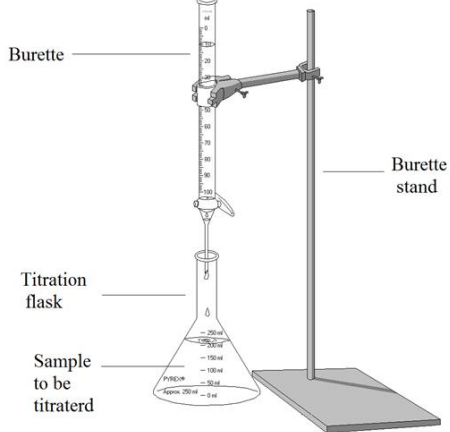




ตู้ควบคุมการกวนผสม



| ชื่ออุปกรณ์ | รูปอุปกรณ์ |
|---|--|
| ปั๊มสุญญากาศ |  |
| เกจวัดแรงดัน |  |
| หัวจ่ายก๊าซชีวภาพ |  |
| อุปกรณ์เชื่อมก๊าซ ได้แก่ เส้นเชื่อมพลาสติก และก๊าซกระป๋อง |  |
| อุปกรณ์อื่น ๆ เช่น สว่าน เครื่องเจียรมือ |  |

ตารางที่ 5 อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพ

| พารามิเตอร์ | รูปอุปกรณ์ | เครื่องมือ/ วิธีการ | มาตรฐาน |
|--|---|---|-----------|
| องค์ประกอบ ก๊าซชีวภาพ (CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S) |  | เครื่องตรวจวัดก๊าซ ยี่ห้อ Gas data รุ่น GFM406 | |
| COD (mg/L) |  | การไตเตรต | APHA 2015 |
| <ul style="list-style-type: none"> - TS (mg/L) - VS (mg/L) |  | ตู้ อบ ล ม ร้อน | APHA 2015 |
| |  | เตาเผา | |

| พารามิเตอร์ | รูปอุปกรณ์ | เครื่องมือ/ วิธีการ | มาตรฐาน |
|--|---|---|------------------------------|
| |  | เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง | |
| pH VFA (mgCH ₃ COOH/L) ALK (mgCaCO ₃ /L) |  | เครื่องวัด ความเป็น กรดต่าง และการ ไทเทรต | Consort 5010 APHA 2015 |

วิธีการ

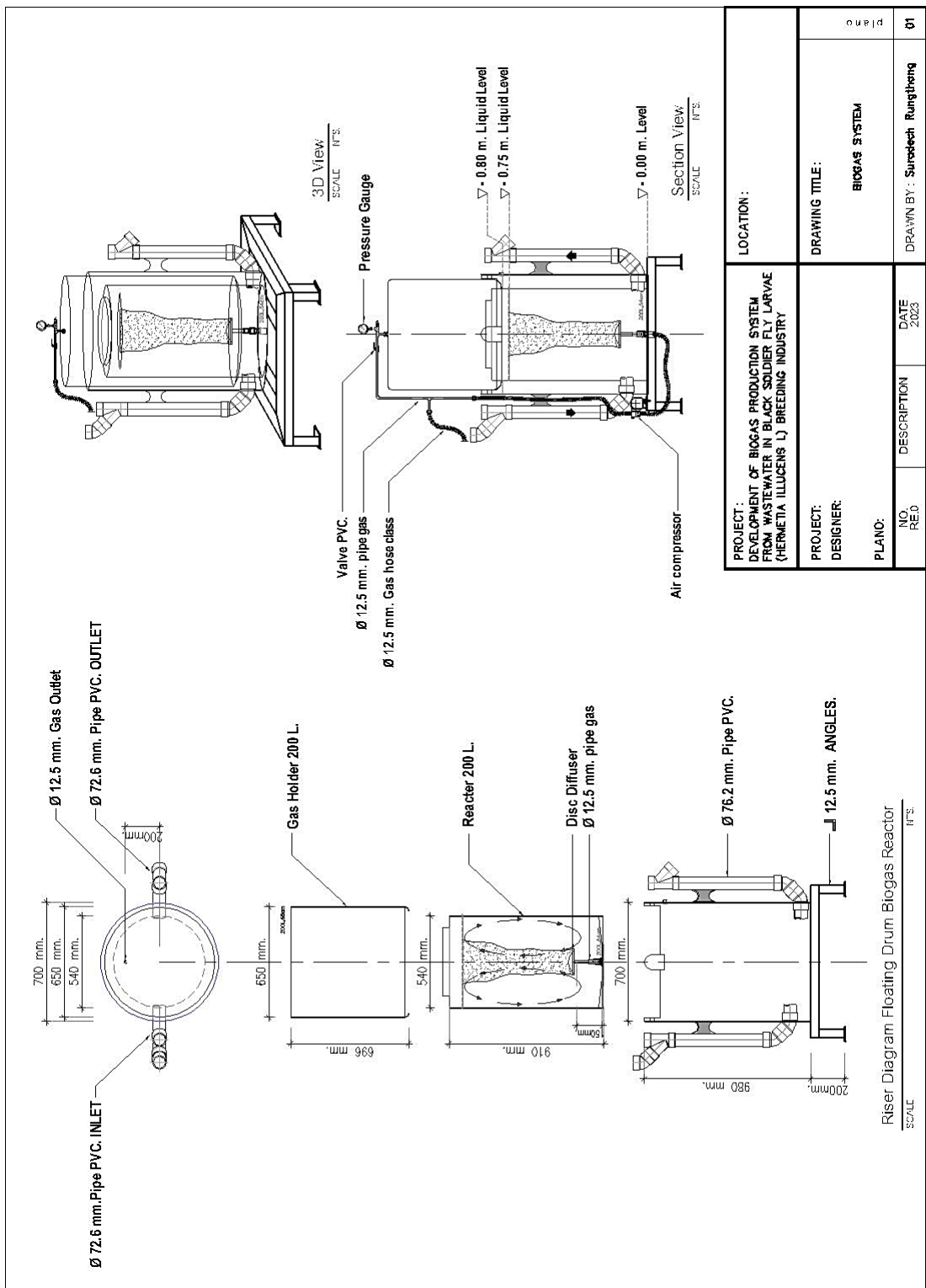
สำหรับขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานในงานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลาย โดยประกอบด้วยขั้นตอนตั้งแต่การศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อนำไปออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดทดลองเบื้องต้น และออกแบบวิธีการทดลองตามขอบเขตที่กำหนด หลังจากนั้นจึงเข้าสู่ขั้นตอนการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ติดตั้งจุดตรวจวัดต่าง ๆ ทดสอบการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพและการตรวจวัด และทำการทดลองตามเงื่อนไข บันทึกผลการทดลองนำไปวิเคราะห์ผล จัดทำรายงานผลและเล่มวิทยานิพนธ์ต่อไป ซึ่งแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาทฤษฎีจะศึกษาเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพ และศึกษาลักษณะของวัตถุดิบกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่จะใช้ในการทดลอง คือ เกี่ยวกับน้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง และ หัวเชื้อสารขึ้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร เพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะของวัตถุดิบ หัวเชื้อจุลินทรีย์ และนำไปออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมต่อไป นอกจากนี้ จะศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการทดลองและการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่เกี่ยวข้องให้มีความเหมาะสม ศึกษาแนวโน้มลักษณะกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบ วิธีการ และเทคโนโลยีที่ใกล้เคียงกันและมีแหล่งอ้างอิงที่น่าเชื่อถือ เพื่อการพัฒนาต้นแบบเพื่อใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป

2. ออกแบบเบื้องต้นของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดทดลอง

การออกแบบเบื้องต้นของระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดทดลองและวิธีการทดลอง จะรวบรวมข้อมูลและสรุปผลจากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และนำมาออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับน้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง ซึ่งในงานวิจัยได้นำปริมาณน้ำเสีย ค่าความสกปรกของน้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลาย มาคำนวณเพื่อออกแบบขนาดถังปฏิกรณ์ที่สามารถรองรับการเติมอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในช่วง 0.5-5.0 kgCOD/(m³·day) แสดงดังภาพที่ 13 และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



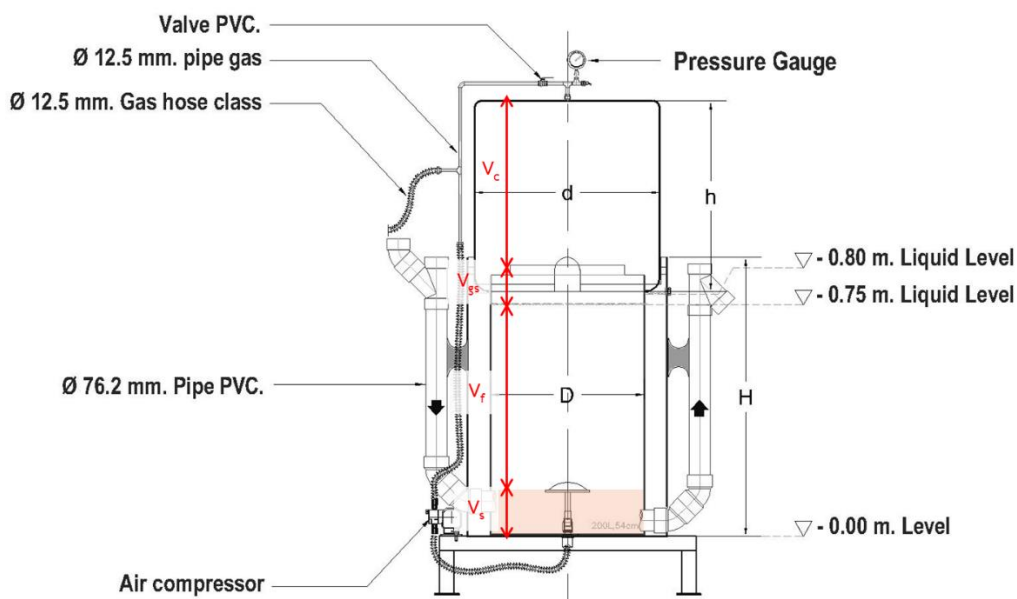
ภาพที่ 13 ภาพรวมการออกแบบพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฟลोटลอย

สำหรับการออกแบบพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายแบบไร้อากาศ ได้ศึกษาต่อเนื่องจากงานวิจัยของ ปรียา และคณะ (2566) ที่ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายในระดับ BMP นำมาพัฒนาสร้างระบบต้นแบบเพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรมในการบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพ โดยนำอัตราส่วน 3:1 นำมาใช้ในการพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝากรอบล้อมกับการกวนผสม เพื่อให้การพัฒนาระบบบำบัดให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นมีความเหมาะสม ซึ่งการพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่จะแปรรูปเป็นโปรตีนอาหารสัตว์ ดังนั้นปัจจัยหลักที่ควรคำนึงถึงในการออกแบบพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ เทคโนโลยีที่เหมาะสมกับวัตถุดิบน้ำเสียและพื้นที่ในการติดตั้ง ปริมาณน้ำเสียที่ต้องการกำจัด ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสีย ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเพื่อนำกลับไปใช้ในกระบวนการเลี้ยงหรือแปรรูปนอนแมลงวันลาย เป็นต้น ซึ่งในเบื้องต้นจึงได้มีการศึกษาออกแบบพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝากรอบล้อม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Alibe et. al. (2022) ซึ่งเป็นระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบแนวตั้ง สามารถลดพื้นที่ในการติดตั้งระบบบำบัดแบบไร้อากาศเมื่อเปรียบเทียบกับระบบผลิตก๊าซชีวภาพชนิดอื่น มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียให้ค่าซีโอดีลดลง การสร้างและการดูแลระบบไม่ซับซ้อน ต้นทุนต่ำ และเนื่องจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ Jürgensen et. al. (2018) และ Mahmoodi-Eshkaftaki and Ebrahim (2019) พบว่า การผสมภายในระบบเป็นการเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยการใช้ก๊าซชีวภาพ ทำการกวนผสมหมุนเวียนน้ำเสีย จะทำให้แบคทีเรียเข้าถึงอินทรีย์วัตถุได้เร็วขึ้น สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียและเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนได้ โดยเฉพาะการบำบัดน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง ดังนั้นจึงมีการใช้ระบบไร้อากาศแบบฝากรอบล้อมพัฒนาร่วมกับระบบการกวนผสมหมุนเวียนตะกอน ทำให้ได้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อย ขนาดเล็ก และมีประสิทธิภาพสูง เหมาะสำหรับน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง ซึ่งประกอบด้วยสารแขวนลอยปริมาณมาก สำหรับการออกแบบพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝากรอบล้อมร่วมกับการกวนผสมแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การออกแบบถังปฏิกรณ์แบบฝากรอบล้อม และ ส่วนที่ 2 การออกแบบระบบการกวนผสม โดยมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1 การออกแบบถังปฏิกรณ์แบบฝากรอบล้อม

การออกแบบถังปฏิกรณ์ หรือ ถังหมักที่รองรับน้ำเสีย จะออกแบบให้มีลักษณะทรงกระบอกใช้พื้นที่ในการติดตั้งอุปกรณ์น้อย สามารถติดตั้งได้ง่าย เหมาะสำหรับสถานประกอบการที่มีพื้นที่จำกัด และไม่ต้องการการดูแลที่ซับซ้อน (Alibe et. al., 2022) แสดงลักษณะของถังปฏิกรณ์ดังภาพที่ 14

โดยถังปฏิกรณ์ขนาดทดลองจะใช้ถังผลิตก๊าซชีวภาพที่มีขนาดความจุ 200 L ซึ่งในการผลิตก๊าซชีวภาพจะมีขั้นตอนที่ทำให้เกิดสารประกอบในการกำจัดสารอินทรีย์ที่ออกฤทธิ์เป็นกรดหลายชนิด ในสภาวะการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศที่เกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นถังปฏิกรณ์ควรทำจากวัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อนและการเปลี่ยนสภาพทางเคมี



ภาพที่ 14 ลักษณะของถังปฏิกรณ์

หมายเหตุ D = เส้นผ่านศูนย์กลางของถังปฏิกรณ์ H = ความสูงของถังปฏิกรณ์

h = ความสูงของถังเก็บก๊าซชีวภาพ, d = เส้นผ่านศูนย์กลางของถังเก็บก๊าซชีวภาพ

สำหรับปริมาตรถังปฏิกรณ์หรือถังหมักของระบบผลิตก๊าซชีวภาพดังภาพที่ 14 กำหนดให้ ปริมาตรของถังหมักมีขนาด 200 L หรือ 0.2 m^3 โดยกำหนดให้ปริมาตรต่าง ๆ มีสัดส่วน ดังนี้

- 1) ให้มีปริมาตรพื้นที่เก็บก๊าซชีวภาพสำหรับการกวนผสม (V_{gs}) $\leq 10\%$
- 2) ให้มีปริมาตรของการหมัก (V_f) $\leq 80\%$
- 3) ให้มีปริมาตรของชั้นตะกอน (V_s) $\leq 10\%$
- 4) มีปริมาตรรวมของถังปฏิกรณ์ (V) = $V_{gs} + V_f + V_s$

เพื่อใช้สำหรับรองรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในของน้ำเสียมีปริมาณเท่ากับ 0.187 m^3 (Sawyer N. al., 2020) ในส่วนตัวถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้ถังพลาสติกโพลีเอทิลีน (Poly Ethylene : PE) ซึ่งมีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี มีความทึบแสง มีความยืดหยุ่น

แข็งแรง เพื่อเก็บก๊าซชีวภาพไว้ภายในระบบใช้สำหรับในกวนผสมหมุ่นเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ และป้องกันของเหลวในระบบไหลออกจากการกวนด้วยก๊าซชีวภาพได้อีกทาง ตัวถังปฏิกรณ์มีการเจาะรูสำหรับช่องเติมน้ำเสียเข้าและออกขนาด 76.2 mm เท่ากันทั้ง 2 ช่อง และมีการเจาะรูตรงกลางที่กั้นถัง โดยมีขนาดของรู 12.5 mm จุดต่อท่อยึดหัวจ่ายก๊าซชีวภาพ (Swirl Diffuser) สำหรับการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพภายในระบบการหมักแบบไร้อากาศ

สำหรับตัวถังเก็บก๊าซชีวภาพ (Gas Holder) จำนวน 1 ถัง เป็นถังพลาสติกขนาด 200 L หรือมีปริมาตรถังปฏิกรณ์เท่ากับ 0.230 m^3 จากการออกแบบความจุสูงสุดของถังเก็บก๊าซชีวภาพด้วยการประเมินอัตราการเติมต่อวันและค่าซีโอดีของน้ำเสีย โดยคิดจากอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุดของเงื่อนไขการทดลองเท่ากับ $3 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ ที่ค่าซีโอดีเข้าระบบของน้ำเสียประมาณ $20,000 \text{ mg/L}$ ดังนั้นจึงต้องเติมน้ำเสีย (Q) ดังนี้

$$Q = \text{OLR} \times V / \text{COD} = 0.02 \text{ m}^3 \text{ หรือ } 20 \text{ L/day}$$

จากทฤษฎีจะได้ว่า ปริมาณค่าซีโอดี 1 g จะสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.35 L โดยกำหนดให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 80% ดังนั้นจะได้ก๊าซชีวภาพสูงสุดดังนี้

$$\frac{\text{CH}_4 \text{ (L)}}{\text{COD (g)}} = 0.35$$

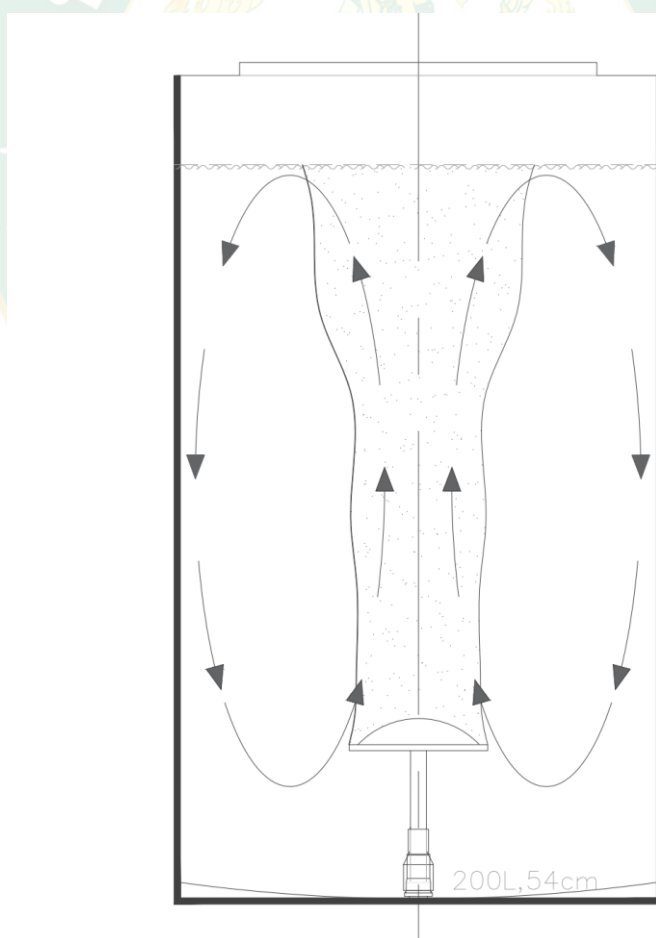
$$\text{ปริมาตรก๊าซชีวภาพ} = 20 \times 20 \times 0.35 \times 0.8 = 112 \text{ L/day}$$

ดังนั้นจึงออกแบบให้ถังเก็บก๊าซชีวภาพมีความจุมากกว่าปริมาณสูงสุดจากการคำนวณอย่างน้อย 40% จึงเลือกใช้ถังเก็บก๊าซชีวภาพขนาด 200 L ปริมาตรการเก็บก๊าซชีวภาพสูงสุด (V_c) $\leq 90\%$ เพื่อเป็นตัวปิดฝาถังปฏิกรณ์และเก็บก๊าซชีวภาพภายในส่วนเดียวกัน ใช้หลักการแทนที่ด้วยน้ำ (Water Displacement) ตัวถังสามารถลอยขึ้นลงได้ขึ้นอยู่กับความดันของก๊าซที่เกิดขึ้น มีจุดต่อท่อส่งก๊าซชีวภาพขนาด 12.5 mm ต่อเข้ากับวาล์วปิดเปิดเพื่อนำมาวิเคราะห์ทางองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

สำหรับตัวถังด้านนอกของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะเป็นแจ็กเก็ตใส่น้ำใช้เป็นถังพลาสติกขนาด 330 L จำนวน 1 ถัง เป็นถังที่มีขนาดใหญ่เพื่อช่วยควบคุมการลอยแทนที่ด้วยน้ำของถังเก็บก๊าซชีวภาพ และป้องกันการรั่วไหลของก๊าซชีวภาพเป็นลักษณะของถังปฏิกรณ์แบบฝาครอบลอย

ส่วนที่ 2 ระบบการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ

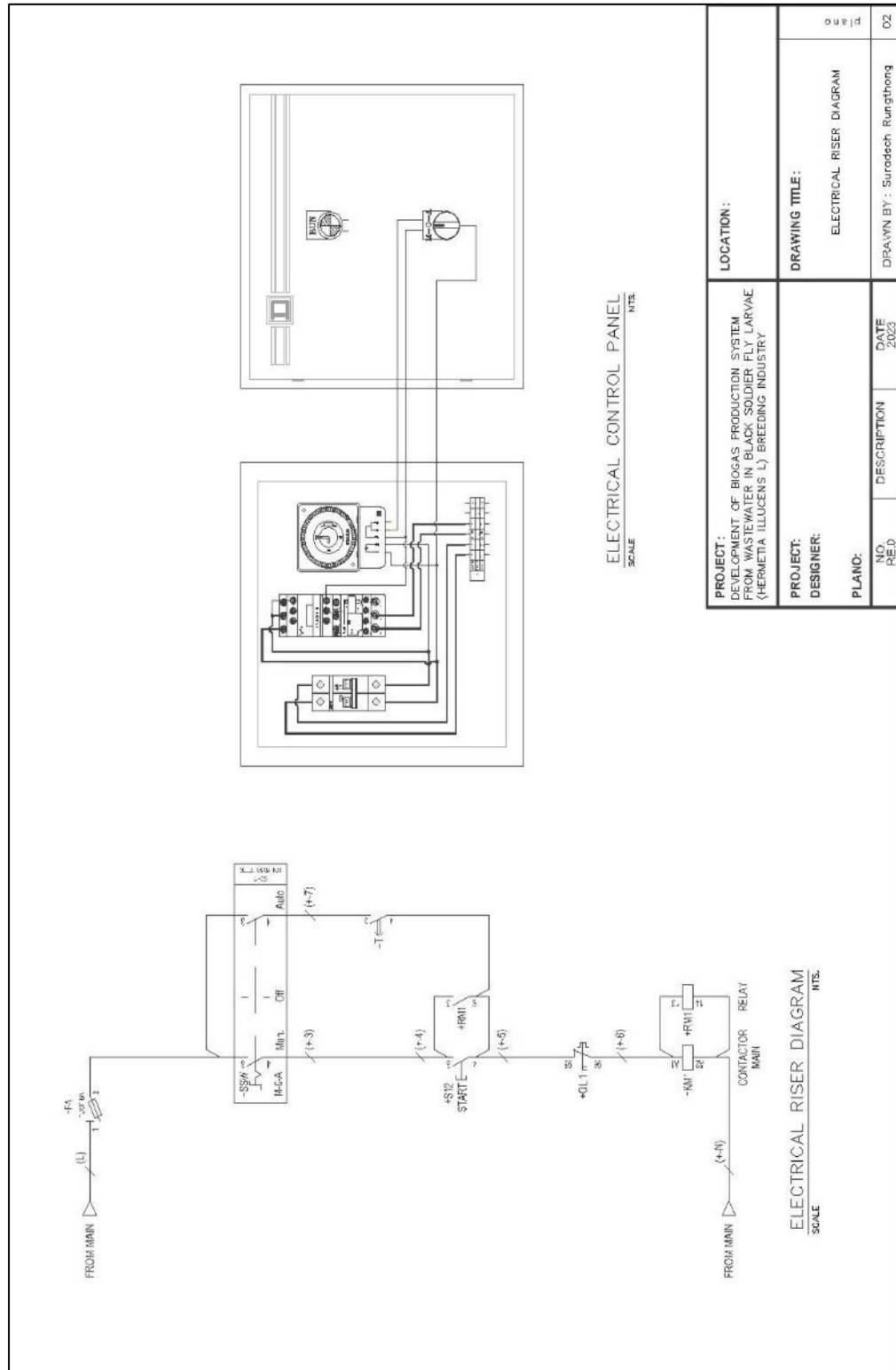
ระบบการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพเหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีของแข็งทั้งหมดไม่เกิน 10% เนื่องจากหากความเข้มข้นของแข็งสูงจะไม่สามารถทำให้เกิดการกวนผสมได้เหมาะสม โดยการกวนผสมเกิดจากการเคลื่อนที่ของก๊าซชีวภาพที่ลอยตัวขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ด้วยความเร็วคงที่ จึงทำให้น้ำเสียถูกบำบัดอย่างรวดเร็ว การกักเก็บอยู่ในระบบไม่นาน คุณภาพน้ำเสียหลังการบำบัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น สำหรับในส่วนระบบกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพแสดงดังภาพที่ 15 จะใช้ปั๊มสุญญากาศอัดก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีวงจรไฟฟ้าควบคุมระบบที่แสดงดังภาพที่ 16 ซึ่งจะระบบควบคุมการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพที่จะนำมากำหนดอัตราการกวนผสมทุก ๆ 6, 12 และ 24 hr รอบละ 10 min ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งอัตราการกวนผสมมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการศึกษางานวิจัยของ (ศศิธร และคณะ, 2563)



ภาพที่ 15 ทิศทางการกวนผสมภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

โดยการทดสอบนี้จะใช้การกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในระบบ ซึ่งเป็นการใช้ลักษณะการลอยตัวขึ้นของฟองก๊าซชีวภาพในแนวตั้งหมุนเวียนสารอินทรีย์ภายในระบบ ใช้ปั๊มดูดอัดก๊าซจากถังเก็บก๊าซชีวภาพไปด้านล่างถึงปฏิกรณ์ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 70 L/min กำลังดูดอัดก๊าซของปั๊มเท่ากับ 5 Pa เป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมกับระบบ ซึ่งอัตราการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมไม่ควรน้อยกว่า 45 L/min เนื่องจากจะส่งผลโดยตรงต่อปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เพิ่มสูงขึ้นและด้วยการไหลของฟองก๊าซชีวภาพ ลอยขึ้นผ่านตัวถังปฏิกรณ์จึงทำให้ของเหลวหมุนเวียนไปในทิศทางเดียวกัน โดยเมื่อมีการกวนอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาและการกวนช้าจะให้ผลดีกว่าการกวนเร็ว แต่ต้องเป็นอัตราการกวนที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียและสารอาหาร เพื่อช่วยให้แบคทีเรียให้เข้าถึงสารแขวนลอยหรือสารอินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพ ซึ่งจำนวนความถี่ในการกวนผสมจะขึ้นอยู่กับสารอินทรีย์วัตถุดิบการย่อยสลายอีกด้วย (ปฏิรูป, 2557 และ Anderson et. al., 2014)





| | | | |
|--|-------------|--|-------------|
| PROJECT: DEVELOPMENT OF BIOGAS PRODUCTION SYSTEM FROM WASTEWATER IN BLACK SOLDIER FLY LARVAE (HERMETIA ILLUCENS L), BREEDING INDUSTRY | | LOCATION: | |
| DESIGNER: | | DRAWING TITLE: ELECTRICAL RISER DIAGRAM | |
| PLANO: | | DRAWN BY : Suradech Rungthong | |
| NO. REV. | DESCRIPTION | DATE 2023 | plano 02 |

ภาพที่ 16 วงจรไฟฟ้าควบคุมการกวนผสมภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับการควบคุมความชื้นด้วยก๊าซของระบบด้วยปั๊มดูดอัดก๊าซชีวภาพเพื่อหมุนเวียนแบบที่เรียกว่าได้เข้าถึงสารอินทรีย์ในน้ำเสียเพิ่ม ซึ่งจากการพิจารณากำลังของปั๊มดูดอัดมอเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมความชื้นด้วยก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ 6 โดยเลือกใช้ที่อัตราการไหล 70 L/min ที่กำลังดูดอัดก๊าซชีวภาพของปั๊ม เท่ากับ 5 Pa ด้วยระบบที่ออกแบบในโรตารีทำให้การดูดอัดก๊าซชีวภาพมีความคงที่สม่ำเสมอต่อเนื่อง การใช้กำลังไฟฟ้าต่ำทำให้มีความประหยัดในการใช้งานในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 6 ประเภทของปั๊มสุญญากาศ

| Model | Unit | SVP115 (MINI) | IM115D | IM125D | IM135D | IM235D | VP280 | VP2100 | IM125D | IM135D |
|---------------------|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|----------------------|--------------------|--------------------|------------------|------------------|
| | | มีเกจ (2 จังหวะ) | มีเกจ (2 จังหวะ) | มีเกจ (2 จังหวะ) | มีเกจ (2 จังหวะ) | มีเกจ (2 จังหวะ) | มีเกจ (2 จังหวะ) | มีเกจ (2 จังหวะ) | มีเกจ (2 จังหวะ) | มีเกจ (2 จังหวะ) |
| Power | V | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 | 220 |
| Supply | Hz | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Pumping Rate | L/min | 50 | 72 | 108 | 150 | 150 | 254 | 340 | 108 | 150 |
| | CFM | 1.8 | 2.3 | 3.6 | 4.6 | 5 | 9 | 12 | 3.6 | 4.6 |
| Limited Pressure | Pa | 5 | 5 | 5 | 5 | 5.7×10^{-2} | 3×10^{-1} | 3×10^{-1} | 5 | 5 |
| Rating Speed | r/min | 1,440 | 1,440 | 1,440 | 1,440 | 1,440 | 1,440 | 1,440 | 1,440 | 1,440 |
| Power W | W | 750 | 120 | 180 | 250 | 370 | 750 | 750 | 180 | 250 |
| | HP | 1/4 | 1/6 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1 | 1 | 1/4 | 1/3 |
| Oiling-Costing (mL) | mL | 230 | 220 | 220 | 300 | 450 | 600 | 700 | 220 | 300 |

ที่มา : บริษัท ฮั่วเฮงหลีกรุ๊ป จำกัด (2566)

3. การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย

การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายจะใช้ถังขนาด 200 L ชนิดพลาสติกโพลีเอทิลีนเน้นใช้อุปกรณ์ที่มีขายทั่วไปในท้องตลาด ซึ่งมีขนาดตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้นแสดงดังภาพที่ 17



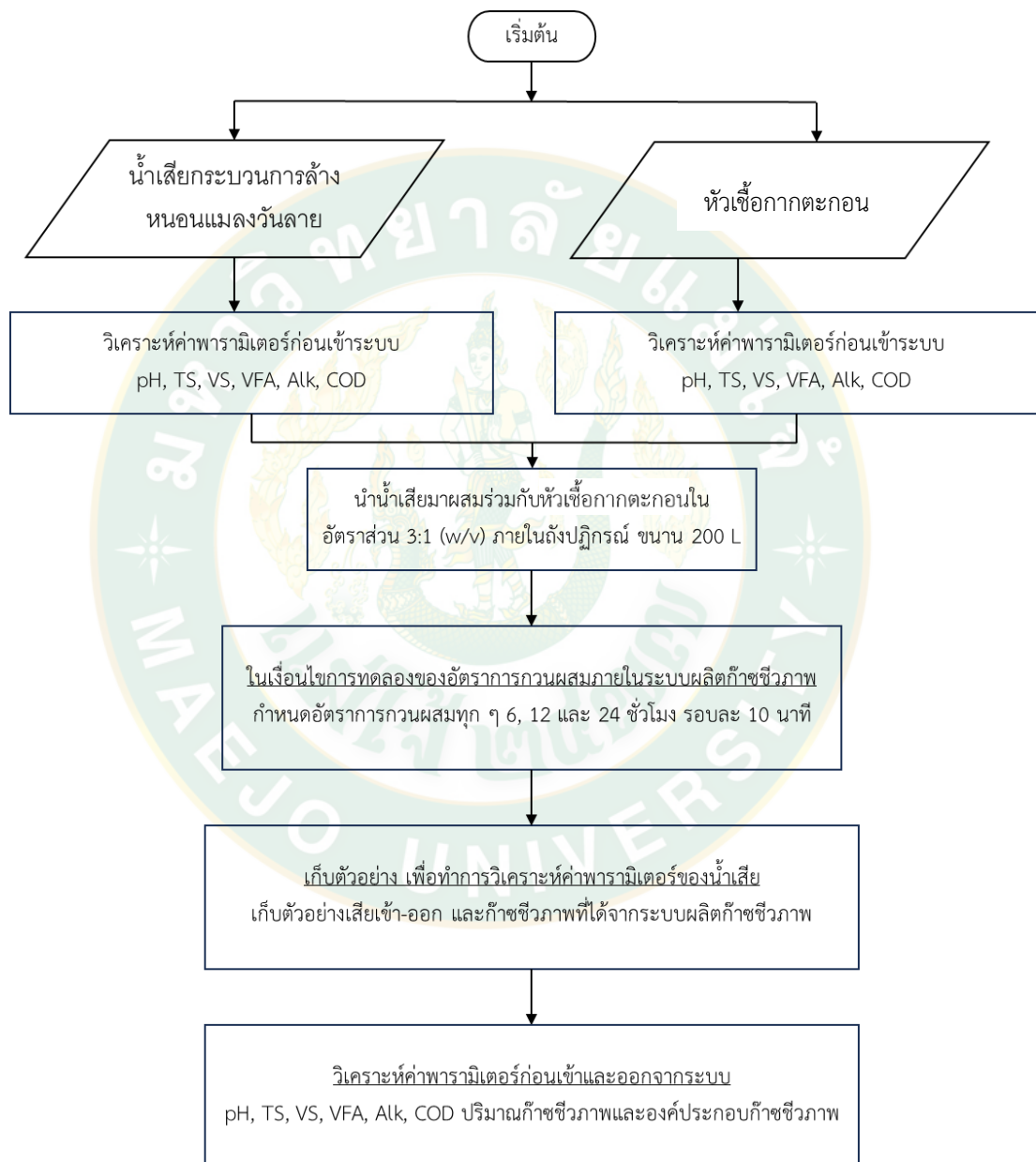
1. ถังปฏิกรณ์ 2. ถังเก็บก๊าซชีวภาพ 3. ถังครอบด้านนอก 4. ตู้ควบคุมปั๊ม
 5. ปั๊มก๊าซ 6. ช่องเติมวัตถุดิบ 7. ช่องน้ำล้าง 8. จุดเก็บตัวอย่างก๊าซ
 9. ท่อส่งก๊าซชีวภาพ

ภาพที่ 17 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกระบวนการล้างหนอนแลงวันลายขนาด 200 L

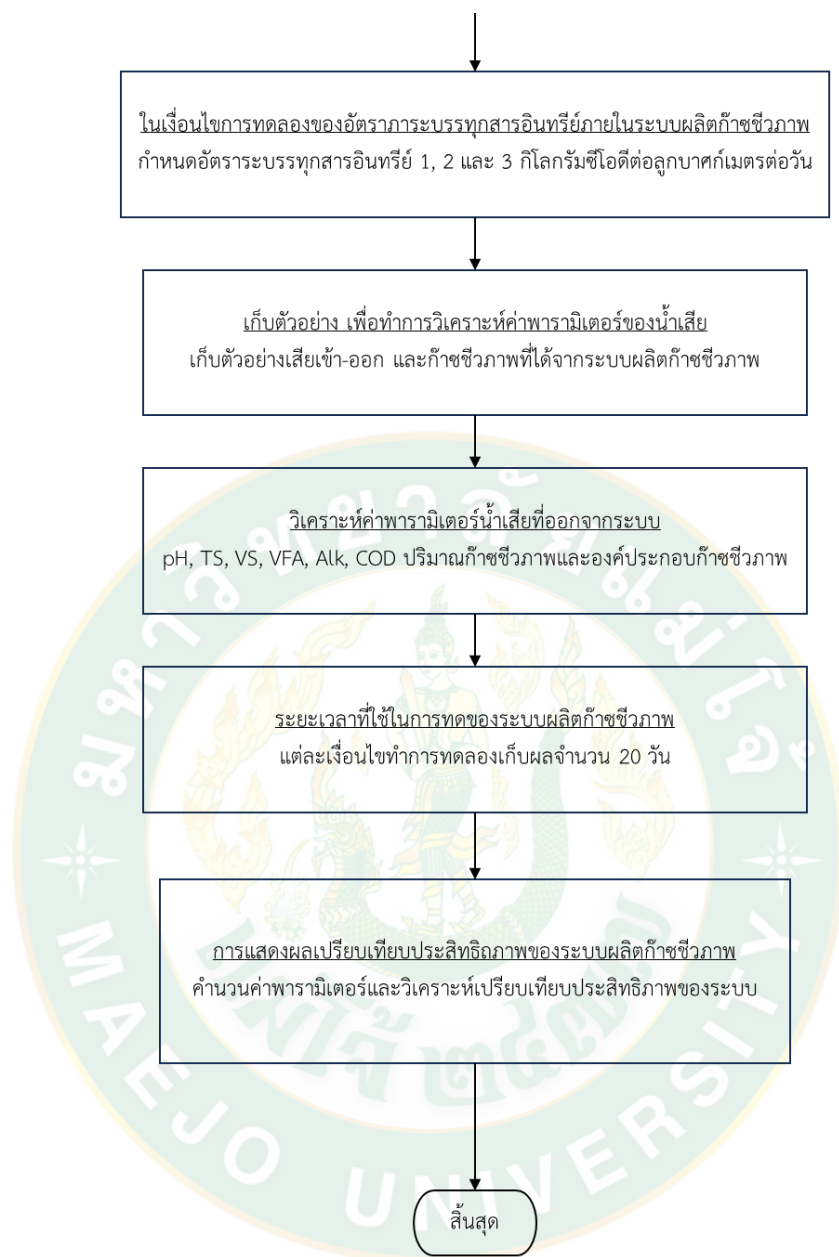
3.1 ดำเนินการสร้างระบบการผลิตก๊าซชีวภาพต้นแบบและทำการทดลอง

เริ่มเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้ออกแบบพัฒนาเพื่อศึกษาอัตราการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพในอัตราส่วนการกวนผสมทุก ๆ 6, 12, และ 24 hr ตามลำดับ และอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่ 1.00, 2.00, และ 3.00 kgCOD/(m³·day) ตามลำดับ โดยนำจุดเด่นของระบบหมักก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยกับระบบการกวนผสมบูรณให้เกิดการสร้างมีเทนที่ดีเหมาะสมสำหรับ

สารอินทรีย์ต่าง ๆ เพื่อนำไปขยายผลในระบบโรงงาน ประกอบไปด้วย 2 ส่วน แสดงดังภาพที่ 17 ได้แก่ ส่วนที่ 1 ถึงปฏิกรณ์ขนาดไม่น้อยกว่า 150 L สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีท่อที่กั้นถึงเป็นจุดเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ ส่วนที่ 2 ถึงเก็บก๊าซชีวภาพ ถึงเก็บก๊าซชีวภาพมีจุดตรวจวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพและส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพได้



ภาพที่ 18 แผนการดำเนินการวิจัย

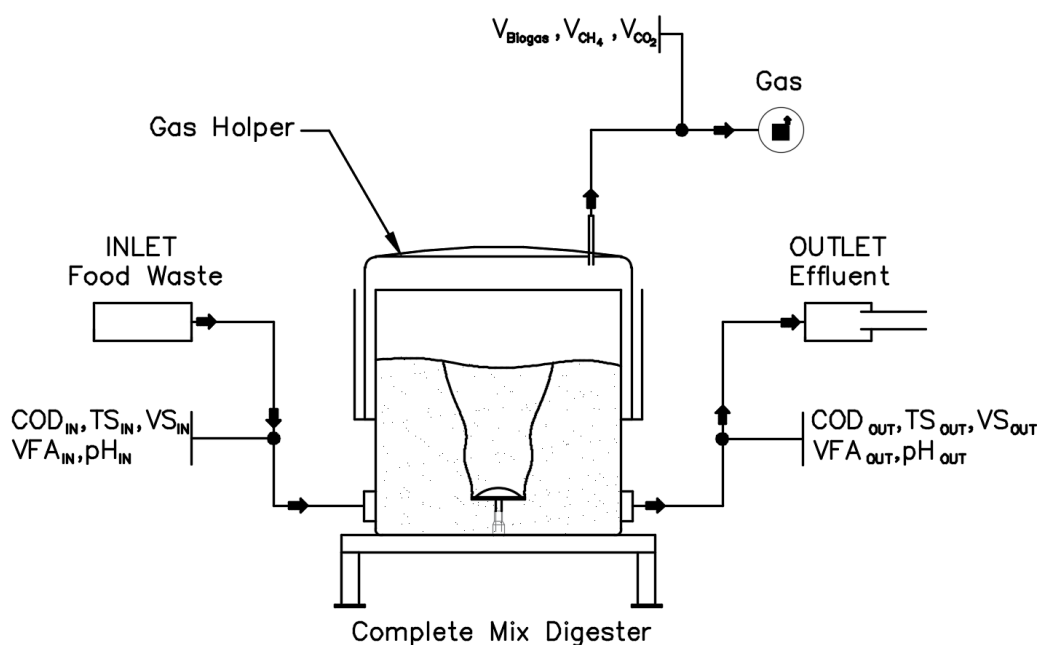


ภาพที่ 18 แผนการดำเนินการวิจัย (ต่อ)

4. ทำการติดตั้งจุดตรวจวัดและทดสอบการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับการตรวจสอบค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ได้ทำการวางตำแหน่งการทดลองและตำแหน่งจุดตรวจวัดแสดงดังภาพที่ 19 ประกอบด้วย การวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่าย การวัดค่าความเป็นกรดต่าง การวัดค่าความสกปรก และการวัด

อัตราส่วนปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง ตลอดจนของเสียที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 19 จุดตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

สำหรับวิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากระบบการเลี้ยงหนองแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง จะทำการวิเคราะห์ซ้ำตัวอย่างละ 2 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ ซึ่งแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดพารามิเตอร์รายละเอียดดังตารางที่ 7 และการวัดอัตราส่วนปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง ตลอดจนของเสียที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 7 พารามิเตอร์ที่ตรวจวัด

| พารามิเตอร์ | วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือ | ระยะเวลาทดสอบ |
|---------------------------|--------------------------|----------------|
| ค่าความเป็นกรดด่าง | pH Meter | ทุก 5 days |
| ค่าสภาพความเป็นด่าง | Titration | ทุก 5 days |
| ปริมาตรก๊าซชีวภาพแต่ละวัน | Water Displacement | ทุก 5 days |
| องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ | Gas Analyzer | ทุก 5 days |
| กรดอินทรีย์ระเหยง่าย | Titration | เข้าและออกระบบ |

5. ขั้นตอนการทดลองระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ในการศึกษานี้จะเป็นการศึกษาในระดับ Pilot Scale เพื่อนำมาใช้เป็นต้นแบบสำหรับโรงงานอุตสาหกรรม ในการใช้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศ ร่วมกับการกวนผสมหมุ่นเวียนด้วยก๊าซชีวภาพน้ำเสียภายในระบบ เพื่อทำการศึกษาหาอัตราการกวนผสมและอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมที่สุด และมีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ รวมทั้งอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุดในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยร่วมกับการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพ โดยมีขั้นตอนการทดลองระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายมีทั้งหมด 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับการเริ่มดำเนินการ โดยจะต้องเตรียมภาคก่อนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร นำมาลงขวด ปล่อยให้หมักทิ้งไว้ 7 days เพื่อทำการปรับสภาพหัวเชื้อภาคก่อนให้มีความพร้อมในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ

ขั้นตอนที่ 2 หลังจากเตรียมหัวเชื้อแล้ว มาทำการเตรียมวัตถุดิบ คือ น้ำเสียจากกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย มีการวัดค่าพารามิเตอร์ก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เช่น ค่าซีไอดี ปริมาณของแข็ง ความเป็นกรดต่าง สภาพความเป็นต่าง เป็นต้น จากนั้นนำน้ำเสียผสมร่วมกับหัวเชื้อภาคก่อนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรในอัตราส่วน $0.5-5 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ แล้วเติมเข้าสู่ถังปฏิกรณ์กวนผสมให้เข้ากัน

ขั้นตอนที่ 3 การกำหนดสัดส่วนการป้อนสารอินทรีย์ที่เติมเข้าสู่ระบบ เมื่อเติมวัตถุดิบให้ นับเป็นวันที่ 1 ของการทดสอบ โดยการเติมอินทรีย์วัตถุจะเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง แบบวันเว้นวันหรือเติม 1 day แล้วทำการงดในวันถัดไป จนครบระยะเวลาทดลอง 20 days

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบการทำงานของระบบกวนให้มีการกวนผสมที่คงที่ตามเงื่อนไขการทดลองทุก ๆ 6, 12, และ 24 hr ครั้งละ 10 min

ขั้นตอนที่ 5 การเก็บตัวอย่างหลังผ่านระบบกวนผสม นำไปวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ ค่าซีไอดี ปริมาณของแข็ง ความเป็นกรดต่าง สภาพความเป็นต่าง เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 6 เมื่อเริ่มดำเนินการกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ จะทำการตรวจวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน โดยสังเกตการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของถังเก็บก๊าซที่ลอยน้ำ และนำปริมาณที่

ได้มาคำนวณตามสมการ และวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซชีวภาพรุ่น Biogas Data GFM406 ซึ่งก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกเก็บตัวอย่างใส่ถุงเก็บก๊าซชีวภาพในช่วงเวลาเดียวกันตลอดระยะเวลาการทดลอง

6. วิเคราะห์ผลการทดลองระบบการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดทดลอง

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อศึกษาระบบการผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคอรอบลอยร่วมกับการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพสำหรับน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากกล้วยเหลืออง จะวิเคราะห์ลักษณะของวัตถุดิบน้ำเสียและหัวเชื้อที่ใช้ในการเริ่มต้นระบบและระหว่างการผลิต วิเคราะห์ผลของการกวนผสม ณ อัตราการกวนทุก ๆ 6, 12 และ 24 hr และผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 1.00, 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³·day) ที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบที่พัฒนาขึ้น หลังจากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์หาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น เพื่อประเมินผลการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้เหมาะสมต่อการใช้งานในระบบอุตสาหกรรมต่อไป

7. จัดทำรายงานผลการวิจัย

สรุปผลจัดทำรายงานโครงการ เพื่อส่งให้อาจารย์ที่ปรึกษาตรวจสอบความถูกต้องและเมื่อผ่านการตรวจสอบ จะนำเสนอเพื่อสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ต่อไป

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

สำหรับการศึกษาระบบการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับน้ำเสียจากระบบการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง โดยใช้ถังปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพแบบฝาคบลอยร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ ซึ่งวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำเสียขาเข้าออก และวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ สามารถแบ่งหัวข้อการวิเคราะห์ผลการวิจัย ดังต่อไปนี้

หัวข้อที่ 1 ผลการศึกษาลักษณะของวัตถุดิบและหัวเชื้อในการทดลอง

หัวข้อที่ 2 ผลของการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

หัวข้อที่ 3 ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

หัวข้อที่ 4 การวิเคราะห์ประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบลอยร่วมกับการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์ลักษณะของวัตถุดิบและหัวเชื้อในการทดลอง

1. ลักษณะน้ำเสียจากระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย

สำหรับการศึกษาลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นของน้ำเสียจากระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองแสดงดังภาพที่ 20 มีลักษณะสีเหลืองขุ่นมีตะกอนสารแขวนลอยปะปน ลักษณะของน้ำเสียอาจส่งกลิ่นเหม็นหากมีการสะสม เนื่องจากการเลี้ยงนอนแมลงวันลายที่ใช้กากถั่วเหลืองร่วมกับการเลี้ยงนอนแมลงวันลายต้องมีความชื้นมากกว่า 60% ตามพฤติกรรมการอยู่อาศัยของนอนแมลงวันลายจะสามารถย่อยอาหารที่มีความอ่อนนุ่มได้ดี (ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอ่าวคุ้งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ, 2565)



ภาพที่ 20 น้ำเสียจากระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง

โดยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง ที่นำมาใช้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพต้นแบบขนาด 200 L มีผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ลักษณะคุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสีย

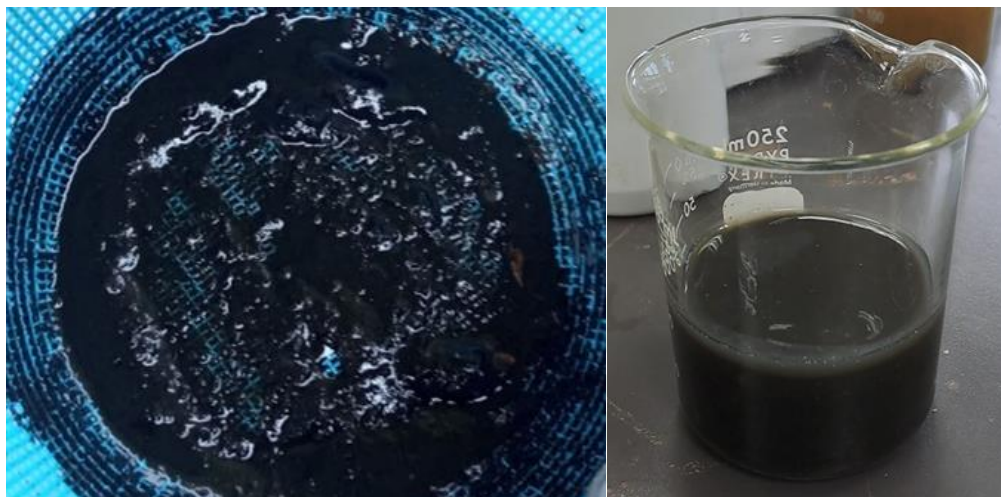
| Parameter | COD (mg/L) | VFA (mg/L) | ALK (mg/L) | TS (mg/L) | VS (mg/L) | pH |
|------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|------|
| wastewater | 25,000 | 2,116.50 | 1,119.10 | 11,257.97 | 7,017.16 | 6.56 |

จากตารางที่ 8 ลักษณะทางเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายก่อนเข้าระบบ ความเป็นกรดต่างมีค่าเท่ากับ 6.56 แสดงถึงความเป็นกรดอ่อน เนื่องจากที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองมีโปรตีนสูง ผ่านการหมักร่วมกับของเสียมูลของหนอนแมลงวันลาย (Bulak et. al., 2020) ทำให้น้ำเสียดังกล่าวยังพบว่ามีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 11,257.97 mg/L โดยเป็นปริมาณสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นวัตถุดิบในระบบผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์และมีค่าของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 7,017.16 mg/L แสดงถึงในน้ำเสียนี้อาจมีปริมาณสารอาหารที่เพียงพอต่อแบคทีเรียในการเปลี่ยนให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพ และน้ำเสียดังกล่าวยังมีค่าซีโอดีที่บ่งบอกถึงความต้องการออกซิเจนทางเคมี เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปของสารละลายน้ำ ปริมาณความสกปรกของเหลว ยังสามารถนำมาประเมินศักยภาพในการเปลี่ยนแปลงไปเป็นก๊าซชีวภาพเบื้องต้นได้ โดยค่าซีโอดีของวัตถุดิบทุก ๆ 1 gCOD จะสามารถเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพได้ 0.35 L ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าซีโอดีจากน้ำเสียดังกล่าวพบว่ามีความใกล้เคียงกับค่าซีโอดีของวัตถุดิบที่แนะนำให้สามารถนำมาผลิตก๊าซชีวภาพควรมีค่าไม่น้อยกว่า 1,200 mg/L (ศักรินทร์ และคณะ 2563) หากมีค่าซีโอดีปริมาณมากจะส่งผลต่อสารอาหารสำหรับแบคทีเรียในน้ำไปย่อยสลายทางชีวภาพใช้สำหรับการขยายเจริญเติบโตได้มาก (Ruffino et. al., 2015) นอกจากนี้การใช้วัตถุดิบร่วมกับหัวเชื้อที่มีศักยภาพจะช่วยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพได้สมบูรณ์มากขึ้น (Bulak et. al., 2020) ซึ่งในงานวิจัยได้ใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรมาเป็นหัวเชื้อร่วมกับวัตถุดิบน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลาย ในการตั้งต้นของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบล้อมร่วมกับการกวนผสมหมวนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ

2. ลักษณะหัวเชื้อจุลินทรีย์จากตะกอนจากฟาร์มสุกร

จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของหัวเชื้อจุลินทรีย์จากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรที่นำมาเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ โดยได้รับความอนุเคราะห์จากฟาร์มสุกรคณะสัตว

ศาสตราจารย์มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้นำมาเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์แสดงดังภาพที่ 21 โดยมีคุณลักษณะเป็นกากตะกอนน้ำสีดำขุ่น มีตะกอนแขวนลอยปะปน



ภาพที่ 21 ลักษณะหัวเชื้อกากตะกอนระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร

สำหรับการศึกษาลักษณะทางเคมีของหัวเชื้อจุลินทรีย์กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นที่ดีจากศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยตัวเอง จากงานวิจัยของ (Zhou et.al., 2019) ได้ศึกษาเกี่ยวกับหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพในฟาร์มสุกร พบว่ามีแบคทีเรียเมทาโนเจนเป็นจำนวนมากที่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนสามารถสร้างองค์ประกอบมีเทนได้ถึง 77% (Latha et. al., 2019) โดยองค์ประกอบทางเคมีหัวเชื้อจุลินทรีย์กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรที่นำมาใช้แสดงดังตารางที่ 9 พบว่าคุณสมบัติทางเคมีของหัวเชื้อจุลินทรีย์กากตะกอนมีค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7.75 มีสภาพความเป็นด่างอ่อนที่สามารถควบคุมสภาวะการทำงานของแบคทีเรียในระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี ซึ่งในกากตะกอนมูลสุกรที่มาจากน้ำชะล้างคอกหมูประกอบด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ที่ทำให้มีค่าความเป็นกรดต่างเป็นค่าสูงกว่าปกติเพียงเล็กน้อยสำหรับค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียในการดำรงชีวิตภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพควรมีค่าอยู่ในช่วง 6.5-7.5 (Sicchieri et. al., 2022) ในส่วนของอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่างมีค่าต่ำกว่า 0.8 แสดงถึงกำลังในการบัฟเฟอร์ของหัวเชื้อแบคทีเรียที่มีเสถียรภาพในการทำงาน สามารถนำมาใช้ในการเริ่มต้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (กิตติยา และคณะ, 2560)

ตารางที่ 9 คุณสมบัติของหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร

| Parameter | COD (mg/L) | VFA (mg/L) | ALK (mg/L) | TS (mg/L) | VS (mg/L) | pH |
|-----------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|------|
| Inoculum | 63,139.35 | 1,042.17 | 4,685.76 | 72,682.54 | 63,425.68 | 7.75 |

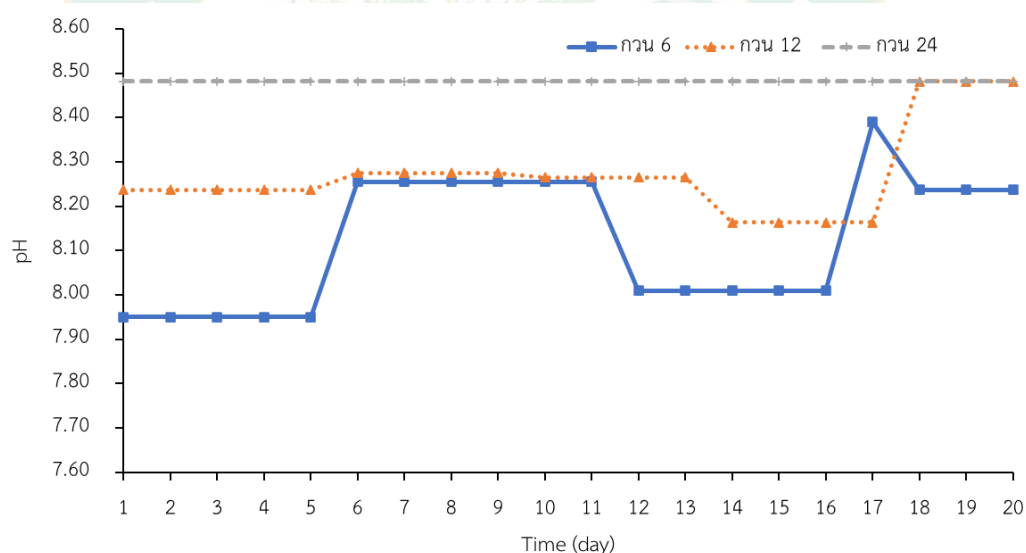
เมื่อพิจารณาถึงปริมาณค่าซีโอดีมีค่าเท่ากับ 63,139.35 mg/L ในส่วนค่าของแข็งทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 72,682 mg/L และปริมาณค่าของแข็งระเหยง่ายมีค่าเท่ากับ 63,425 mg/L ซึ่งบ่งบอกถึงสารอินทรีย์ที่สูงมากสำหรับการกระตุ้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียของกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย และแบคทีเรียที่อยู่ภายในระบบสามารถรักษาเสถียรภาพของระบบให้คงที่อย่างต่อเนื่องทำให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีกำลังเพิ่มสูงขึ้น (Sicchieri et. al., 2022) ซึ่งที่กล่าวมาการนำหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรที่นำมาใช้ในการเริ่มต้นระบบจะช่วยให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพ และสามารถส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย อีกทั้งยังสามารถนำไปปรับใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม (ปรียา และคณะ, 2566) นอกจากการศึกษาของค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ แล้วยังได้เปรียบเทียบศักยภาพของหัวเชื้อที่ผ่านระบบผลิตก๊าซชีวภาพกับมูลสุกรสดก่อนเข้าระบบจากงานวิจัยของ Sicchieri et. al. (2022) ที่ได้ศึกษาเปรียบเทียบมูลสุกรสดและกากตะกอนที่ผ่านระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในสำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพพบว่า มูลสุกรที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพหรือหัวเชื้อกากตะกอนมีประสิทธิภาพมากกว่ามูลสุกรสดก่อนเข้าระบบ เนื่องจากหัวเชื้อกากตะกอนที่ผ่านระบบผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงอุณหภูมิมีโซฟิลิกส์ของแบคทีเรียเมทาโนเจนสามารถปรับสภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงมีความเหมาะสมที่จะนำหัวเชื้อกากตะกอนที่ผ่านระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มสุกรนำมาใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ในการเริ่มต้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (Ali et al., 2019)

ผลของการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับการศึกษาผลของอัตราการกวนผสมที่เหมาะสมต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบล้อมร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ สำหรับการกวนผสมได้ถูกกำหนดอัตราการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพทุก ๆ 6, 12 และ 24 hr ตามลำดับ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการกำจัดสารอินทรีย์ของน้ำเสียกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย ด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบล้อมร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ แสดงผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

1. ค่าความเป็นกรดต่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr

สำหรับการศึกษาค่าความเป็นกรดต่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักที่มีการกวนผสมที่ต่างกัน แสดงให้เห็นถึงกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรียที่แตกต่างตามสภาพความเป็นกรดต่าง เนื่องจากค่าความเป็นกรดต่างภายในจะส่งผลต่อกระบวนการไฮโดรไลซิสจนกระทั่งเมทาโนเจเนซิส ซึ่งค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในระบบผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ระหว่าง 6.5-7.8 (Eryildiz et. al., 2020)



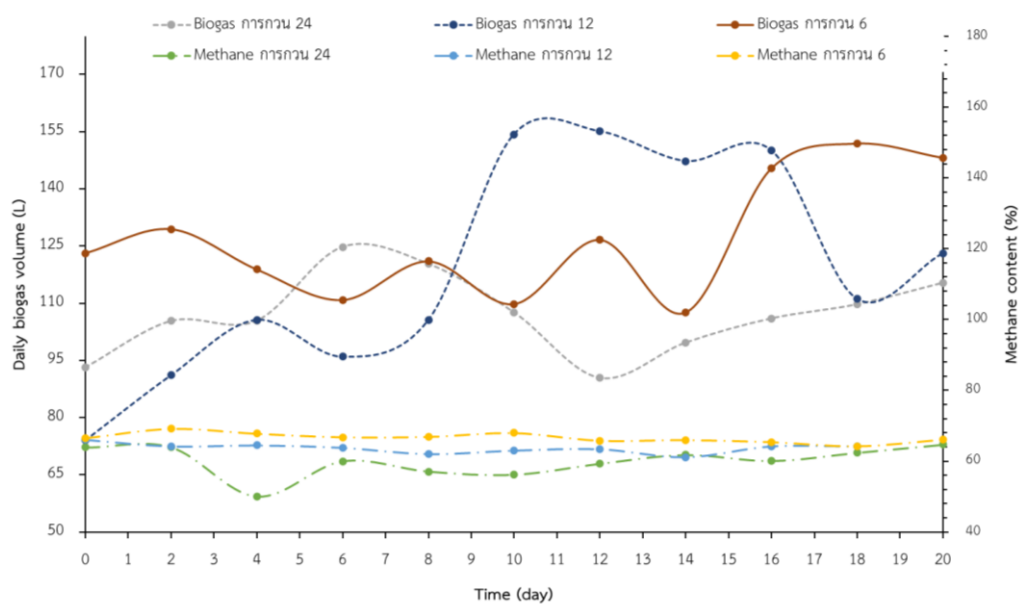
ภาพที่ 22 ค่าความเป็นกรดต่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr

โดยผลของการทดลองค่าความเป็นกรดต่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ตามเงื่อนไขที่ภายในระบบที่มีการกวนผสมตามกำหนดอัตราการกวนผสมทุก ๆ 6, 12 และ 24 hr ในแต่ละรอบจะทำการกวนผสมครั้งละ 10 min โดยมีผลดังต่อไปนี้

จากภาพที่ 22 ผลการทดลองค่าความเป็นกรดต่างของอัตราการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพทุก ๆ 6, 12 และ 24 hr พบว่ามีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 20 days มีค่าเท่ากับ 8.12, 8.27 และ 8.48 ตามลำดับ โดยน้ำเสียที่ออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าความเป็นด่างอ่อน ๆ เมื่อเทียบกับน้ำเสียที่ไหลเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งทุกอัตราการกวนผสมค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในสถานะที่แบคทีเรียสามารถทำงานได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et. al. (2019) ในการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียที่หมักร่วมกับหัวเชื้อในแต่ละชนิดอัตราส่วนอย่างเหมาะสมเมื่อผ่านกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้เกิดแอมโมเนียในน้ำเสียเพิ่มขึ้นตามธรรมชาติตามกระบวนการย่อยสลายไนโตรเจน จะส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้น 8.0 ซึ่งค่าความเป็นกรดต่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพควรมีค่าควรอยู่ในช่วง 6.5-7.8 จะเป็นช่วงที่แบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และจากอัตราการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพทั้งหมดสามารถรักษาเสถียรภาพของค่าความเป็นกรดต่างให้มีความคงที่ตลอดการทดลอง (Michel et al., 2017)

2. ค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใช้อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr

สำหรับการศึกษาสภาพความเป็นต่าง ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพต่อค่าความเป็นกรดต่าง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2562) และค่ากรดไขมันระเหยง่ายของระบบจะเป็นตัวบ่งบอกถึงค่ากรดไขมันโมเลกุลสั้นจากการย่อยสลายภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ค่ากรดไขมันระเหยง่าย และสภาพความเป็นต่าง ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบลดร่วมการกวนผสมหมุนเวียนตะกอนด้วยก๊าซชีวภาพ ตามเงื่อนไขอัตราการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพภายในระบบ ด้วยการกำหนดอัตราการกวนผสมทุก ๆ 6, 12 และ 24 hr ครั้งละ 10 min ในอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จากน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองเท่ากับ $1.00 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ มีอัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ร่วมกับน้ำเสียที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 3:1 โดยศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อความเป็นต่างของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายก่อนเข้าระบบและหลังออกจากระบบ



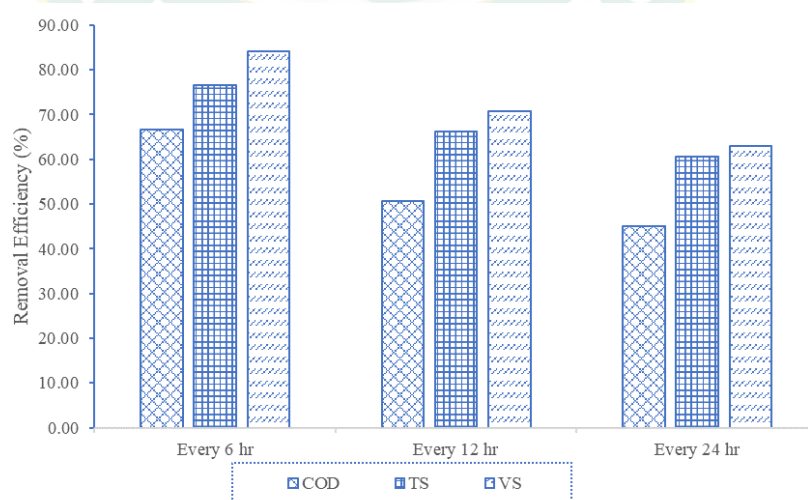
ภาพที่ 23 ค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr

จากภาพที่ 23 ผลการทดลองอัตราส่วนค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่าง ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการศึกษาพบว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพทุก ๆ 6, 12 และ 24 hr ตามลำดับ เมื่อเริ่มการทดลองตลอดระยะเวลาที่เก็บ 20 days มีอัตราส่วนของค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่างมีค่าอยู่ในช่วง 0.05-0.05, 0.05-0.16 และ 0.07-0.17 ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อทำการศึกษาค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่างภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.05, 0.08 และ 0.11 ตามลำดับ โดยทั้ง 3 สภาวะสามารถรักษาเสถียรภาพความสมดุลภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้ค่อนข้างสูง เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพที่ดีที่สุดสำหรับนำไปศึกษาหาอัตรากระบวนการทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม พบว่าในอัตราการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพส่งผลดีที่สุดที่อัตราการกวนผสมทุก ๆ 6 hr สามารถรักษาเสถียรภาพการทำงานของเชื้อแบคทีเรีย โดยเชื้อแบคทีเรียเมทาโนเจนสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์เปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพได้ดี (Eryildiz et. al., 2020) ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดต่างกับอัตราส่วนของค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่างที่เหมาะสมต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ควรมีค่าต่ำกว่า 0.4 จะแสดงให้เห็นว่าระบบมีกำลังในการบำบัดเฟออร์ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่สูง แต่หากอัตราส่วนดังกล่าวมีมากกว่า 0.8 แสดงให้เห็นว่าระบบมี

กำลังการบำบัดเพอร์มีค่าต่ำ และค่าความเป็นกรดต่างสามารถที่จะลดลงได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย ซึ่งส่งผลกระทบต่อการทำงานของแบบที่เรียที่สร้างก๊าซมีเทน (สุदारัตน์, 2551)

3. ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหยง่าย ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr

สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอย ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่าย และค่าซีไอดี ตามลำดับ ทุก ๆ 5 days ระยะเวลาที่เก็บ 20 days สำหรับการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพทุก ๆ 6, 12 และ 24 hr ครั้งละ 10 min โดยมีผลดังต่อไปนี้ ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่าย และ ค่าซีไอดี จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดค่าของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่าย และค่าซีไอดี ที่ประสิทธิภาพสูงที่สุดของการกวนผสมทุก ๆ 6, 12 และ 24 hr ตลอดระยะเวลาที่เก็บ 20 days มีผลการกำจัดค่าของแข็งทั้งหมดภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 72.43%, 65.97% และ 62.01% ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณของแข็งระเหยง่ายมีค่าเท่ากับ 82.61%, 60.42% และ 60.97% ตามลำดับ และเมื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีเท่ากับ 65.89%, 55.56% และ 45.97% ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 24



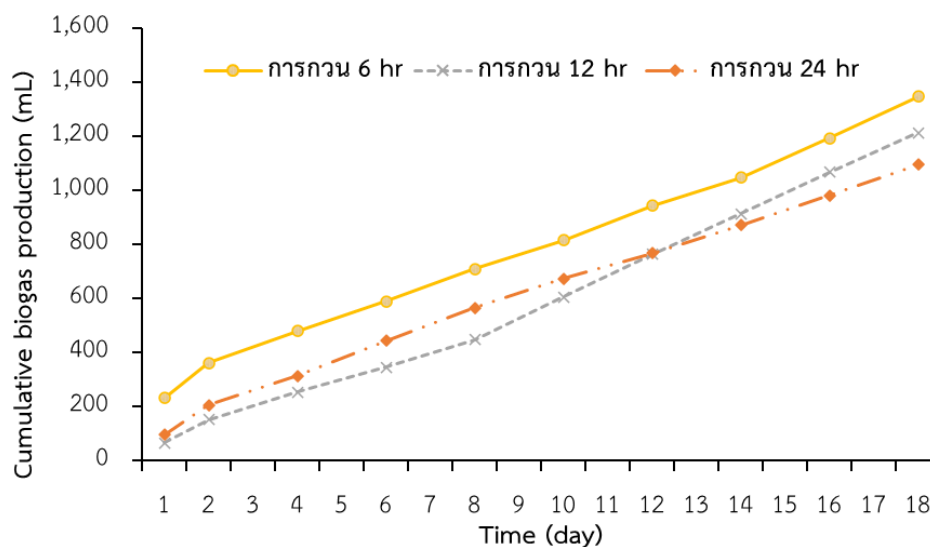
ภาพที่ 24 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหยง่าย ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยที่มีการกวนผสมหมุนเวียนด้วย ก๊าซชีวภาพ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและเมื่อมีความถี่ในการกวนผสมที่เพิ่มขึ้นจะยิ่งทำให้แบคทีเรีย สามารถกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของค่าของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่าย และค่าซีโอดีได้เพิ่ม มากขึ้นตามอัตราการกวน อีกทั้งยังพบว่าอัตราการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพสามารถช่วยลด ปัญหาการเกิดชั้นตะกอนลอยภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอย และยังทำให้ กระบวนการไฮโดรไลซิสที่เปลี่ยนโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็กมีระยะเวลาสั้นลงสามารถสะสม สารอาหารได้เร็วขึ้น (สุพจน์ และคณะ, 2555) ทำให้สารอาหารของแบคทีเรียเมทาโนเจนถูกนำไปใช้ อย่างรวดเร็วมากเกินไปจนแบคทีเรียไม่สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ทัน จึงควรมีการศึกษา เพิ่มเติมในส่วนอัตราการกวนผสมทุกสารอินทรีย์ เพื่อหาอัตราการกวนผสมที่เหมาะสมกับ แบคทีเรียในการก่อสร้างก๊าซชีวภาพต่อไป (Sopee and Natthanicha, 2011 และ Kritthiraput et. al., 2022)

4. ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อวันและก๊าซชีวภาพสะสมของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr

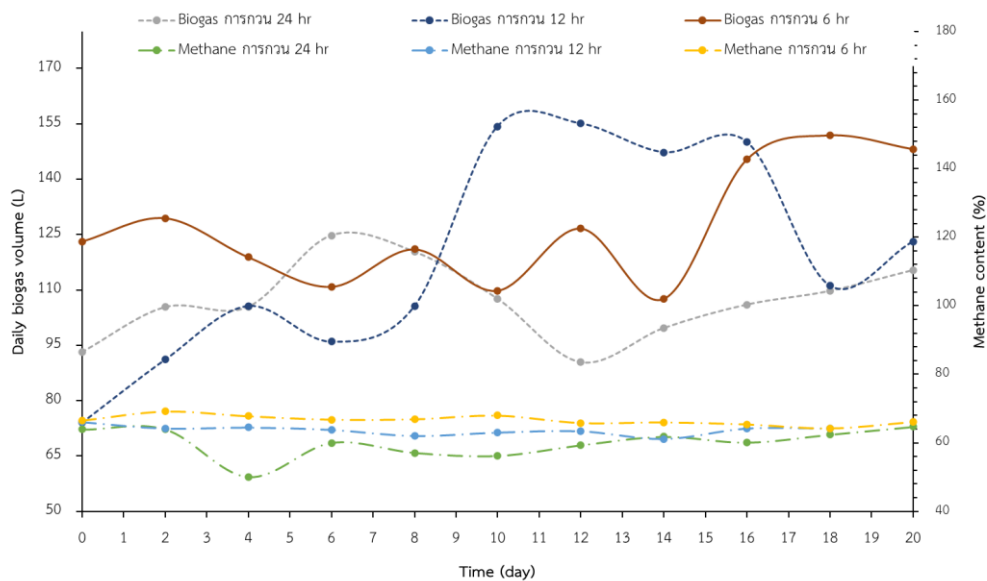
สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันและปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม จากน้ำเสีย กระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยร่วมกวนผสม หมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะส่วนประกอบหลัก คือ ก๊าซมีเทน และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับประเภทของวัตถุดิบในการนำมาเป็นสารตั้ง ต้นของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมถึงทำให้เกิดความสมดุลและมีเสถียรภาพภายในระบบ และ ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จะแสดงถึงประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบดังกล่าวอีก ทางการ สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้กำหนดให้มีการกวนผสมทุก ๆ 6, 12 และ 24 hr ตามลำดับ โดยระยะเวลาในการกวนผสมครั้งละ 10 min มีแสดงผลดังต่อไปนี้

จากภาพที่ 25 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจากอัตราการกวนผสมทุก ๆ 6, 12 และ 24 hr ตามลำดับ มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 20 days มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ เท่ากับ 1,346.34, 1,199.20 และ 981.93 L ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตามผลของ ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในข้างต้น อาทิเช่น pH, VFA, ALK, COD, TS และ VS ตามลำดับ



ภาพที่ 25 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสมระหว่าง 6, 12 และ 24 hr

โดยปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่มากที่สุดจากระบบ คือ อัตราการกวนผสมทุก ๆ 6 hr รองลงมาเป็น 12 hr และ 24 hr เนื่องด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยร่วมการกวนผสมหมุนเวียนตะกอนด้วยก๊าซชีวภาพการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพมีอัตราการกวนผสมที่เพิ่มมากขึ้น จะช่วยให้แบคทีเรียเข้าถึงได้มากขึ้นทำให้การย่อยสลายมีประสิทธิภาพมากขึ้น ถึงแม้ว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เพิ่มยังคงขึ้นอยู่กับอัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ภายในระบบ (Sopee et. al., 2017) แสดงออกมาให้เห็นถึงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการเกิดก๊าซชีวภาพของ ปิยะวิชัย และ ชูมาพร (2563) โดยการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อสารอินทรีย์ถูกแบคทีเรียเข้าย่อยสลายสารอินทรีย์ ตั้งแต่ขั้นตอนการเกิดไฮโดรไลซ์จนถึงช่วงเมทาโนเจเนซิส (Vögeli et al., 2014) อีกทั้งเมื่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพถูกป้อนอินทรีย์วัตถุประเภทของเหลวเข้าสู่ระบบจะทำให้การย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เพิ่มอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพให้มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (Bulak et. al., 2020)



ภาพที่ 26 ปริมาณก๊าซชีวภาพและสัดส่วนก๊าซมีเทนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการกวนผสม 6, 12 และ 24 hr

จากภาพที่ 26 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันของระบบผลิตแบบฝาค่อยร่วมการกวนผสมหมุนเวียนตะกอนด้วยก๊าซชีวภาพในอัตราการกวนผสมทุก ๆ 6, 12 และ 24 hr ของการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลา 20 days พบว่ามีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ต่อวันที่เฉลี่ยเท่ากับ 122.52, 114.35 และ 107.10 L/day ตามลำดับ โดยปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพทั้งหมดมีปริมาณเกิดขึ้นต่อวันใกล้เคียงกัน เนื่องจากภายในระบบมีการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพทำให้แบคทีเรียสังเคราะห์แสงอินทรีย์ได้มาก (Bulak et. al., 2020) และอัตราการกวนผสมยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเท่ากับ 66.93%, 63.48%, และ 58.55% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอัตราการกวนทั้งหมด 3 สภาวะ มีสัดส่วนความเข้มข้นของก๊าซมีเทนมากกว่า 50% ซึ่งอยู่ในช่วงมาตรฐานการเกิดก๊าซมีเทน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561) และเมื่อพิจารณาการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ออกมาในรูปของก๊าซมีเทน โดยที่อัตราการกวนผสมทุก 6 hr สามารถรักษาเสถียรภาพสัดส่วนของก๊าซมีเทนได้มากที่สุด รองลงมา คือ อัตราการกวนผสมทุก ๆ 12 hr และ 24 hr ตามลำดับ เนื่องจากมีการเพิ่มอัตราการกวนผสมที่มากยิ่งขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากยิ่งขึ้น และทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้นถึงแม้ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับอัตราการกวนผสมที่ป้อนเข้าสู่ระบบก็ตาม (Lukitawesa, 2020)

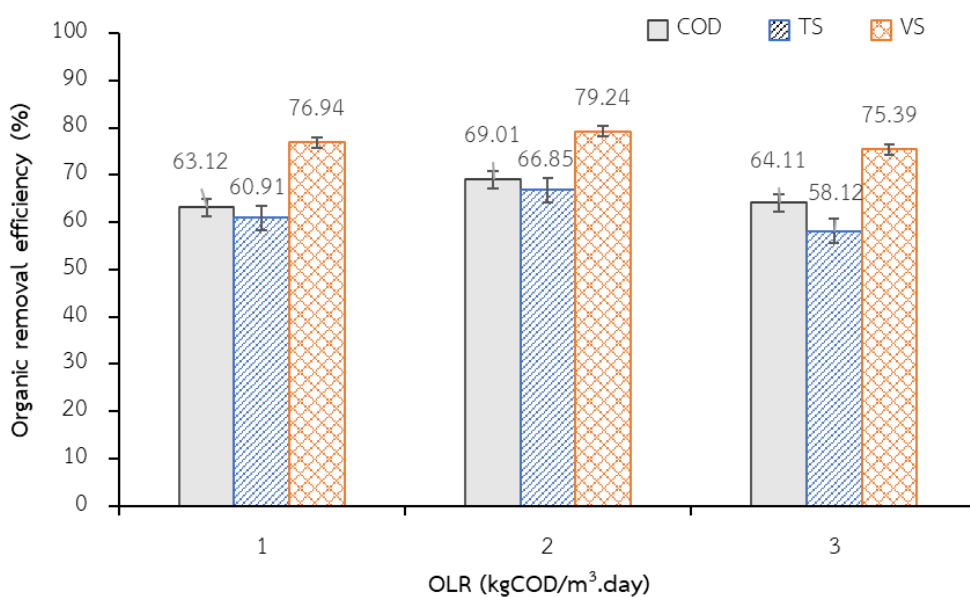
ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับการศึกษาหาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบลอยร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ โดยใช้ น้ำเสียกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง เพื่อให้การย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดความสมบูรณ์ต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้นในการทดลองจึงได้กำหนดอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1.00, 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³•day) ร่วมกับการใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นหัวเชื้อเริ่มต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้มีประสิทธิภาพ โดยจะประเมินจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้แก่ ค่าความเป็นกรดต่าง ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย สภาพความเป็นต่าง ทำการวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวัน และวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ เป็นต้น ซึ่งในระยะเวลาการกักเก็บในการทดลองและเก็บบันทึกผลทั้งหมด 20 days เนื่องจากการวัดค่าคุณลักษณะทางเคมีของน้ำเสียเป็นความสัมพันธ์ต่อระบบผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย ในแต่ละช่วงของการเดินระบบ

1. ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี ของแข็งทั้งหมด และค่าของแข็งระเหยง่าย

สำหรับการประเมินประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์หาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ ในการบำบัดน้ำเสียที่ได้ทำการศึกษาค้นคุณลักษณะทางเคมีของน้ำเสียที่ผ่านระบบ ซึ่งได้สังเกตประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์จากการเปลี่ยนแปลงค่าความต้องการออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen, DO) หรือ สังเกตจากค่าซีโอดีที่ได้มีการออกซิไดส์สารอินทรีย์ของน้ำเสียที่เข้าและออกระบบ ที่ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารแขวนลอย (Paulinetti et al., 2022) โดยความเข้มข้นของค่าซีโอดีเริ่มต้นในการศึกษามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 20,000-25,000 mg/L พบว่าจากการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้กำหนดอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1.00, 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³•day) โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีที่แสดงดังภาพที่ 27 มีสัดส่วนการกำจัดค่าซีโอดีเฉลี่ยเท่ากับ 63.12%, 69.01%, และ 64.11% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าระบบบำบัดน้ำเสียสามารถเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์จากอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ละลายน้ำในรูปกรดอินทรีย์ระเหยง่ายของทั้ง 3 อัตราส่วน มีศักยภาพในการกำจัดค่าซีโอดีใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของค่าซีโอดีมากที่สุดสำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.00 kgCOD/(m³•day) มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของค่าซีโอดีมากที่สุดจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบลอยร่วมกับการกวน

ผสมด้วยก๊าซชีวภาพ ที่สอดคล้องกับผลอัตราบรรทุกสารอินทรีย์ของ ศักรินทร์ และคณะ (2563) ได้ทำการศึกษาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดจากน้ำเสียมูลโคนม เมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพพบว่าสัดส่วนของค่าซีโอดีลดลงในการผลิตก๊าซชีวภาพ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.00 kgCOD/(m³·day) อีกทั้งยังเมื่อมีการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์มากขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่ายังคงสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีจากการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ ที่ช่วยปรับสมดุลกระบวนการไฮโดรไลซิสนกกระทังทำโนเจนซิลของน้ำเสีย ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์คงที่และใช้ระยะเวลาลดลง ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Pilli et. al. (2020) ได้ทำการศึกษาเทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศเป็นตัวเร่งกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เริ่มมีค่าคงที่ในวันที่ 10 หลังการทดลองปริมาณค่าซีโอดีจะค่อยลดลงตามกระบวนการหมัก ทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพสมบูรณ์



ภาพที่ 27 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด และปริมาณของแข็งระเหยง่ายของแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

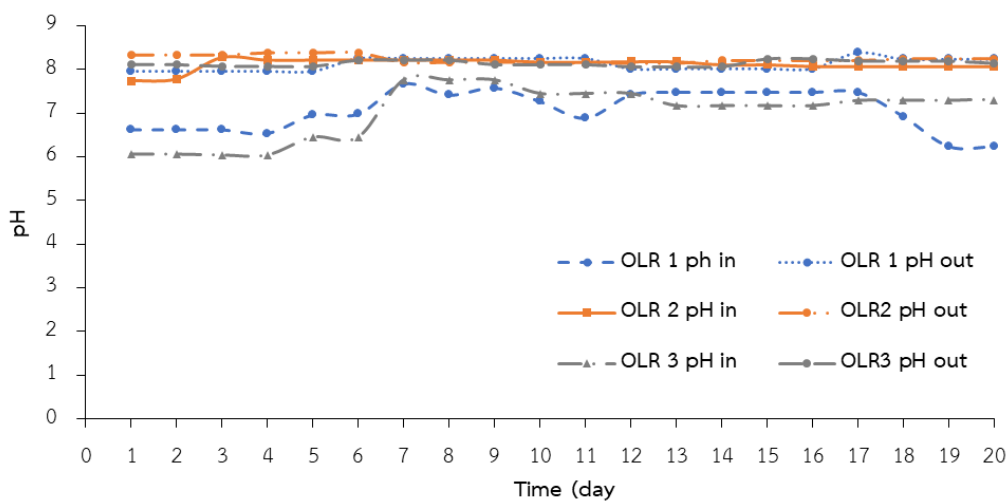
ในขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายที่ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของสารแขวนลอยดังภาพที่ 27 ที่ได้ทำการศึกษาระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 1.00, 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³·day) เมื่อนำน้ำเสียเข้าสู่ระบบพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 60.91%, 66.85% และ 58.12% ตามลำดับ และในส่วนของการกำจัดของแข็งระเหยง่ายมีค่าเท่ากับ 76.94%, 79.24% และ 75.39%

ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าค่าของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายสามารถเปลี่ยนเป็นสารอินทรีย์ ในรูปสารอินทรีย์ละลายน้ำได้สูง เมื่อมีอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพในปริมาณเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปปริมาณของแข็งระเหยง่าย และของแข็งทั้งหมดที่มี ส่วนประกอบของเส้นใยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส หรือ ลิกนิน (Kim and Kim, 2020) จึงทำให้อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 2.00 kgCOD/(m³•day) มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดสารอินทรีย์ เนื่องจากภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ แบคทีเรียสามารถปรับสมดุลกับการย่อยสลายสารอาหารที่ อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ดังกล่าวได้ดีที่สุด และยังแสดงให้เห็นว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีการ กวนผสมสามารถรองรับสารอินทรีย์ได้สูงเช่นเดียวกัน (ศศิธร และคณะ, 2563)

2. ผลของอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ต่อค่าความเป็นกรดต่างในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับค่าความเป็นกรดต่างเป็นค่าพารามิเตอร์ของการเริ่มต้นที่บ่งบอกถึงสภาวะสมดุล ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการไฮโดรไลซิสนกกระทาทั้งเมทาโนเจนซิส โดยการทำงานของแบคทีเรียขึ้นอยู่กับสภาพความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศ ซึ่งควรอยู่ในช่วง 6.80-7.50 (Ali et. al., 2019) โดยการศึกษาควบคุมค่าความเป็นกรดต่างให้มีความเหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรียภายในระบบ จึงทำให้การเริ่มต้นระบบได้นำหัวเชื้อจุลินทรีย์ กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพภายในฟาร์มสุกรมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากในหัว เชื้อกากตะกอนมีแบคทีเรียเมทาโนเจนอยู่มาก จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เพื่อกระตุ้นระบบและปรับสภาพ ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพและช่วยการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย สำหรับการกำหนดเงื่อนไข ภายในระบบอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ที่ 1.00, 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³•day) มีอัตราการ กวนผสมทุก ๆ 6 hr ครั้งละ 10 min มีผลดังต่อไปนี้

จากภาพที่ 28 ค่าความเป็นกรดต่างภายในระบบของอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ที่ 1.00 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³•day) พบว่ามีค่าความเป็นกรดต่างเฉลี่ยตลอดระยะเวลาทดลอง 20 days มีค่าเท่ากับ 8.12, 8.20 และ 8.13 ตามลำดับ



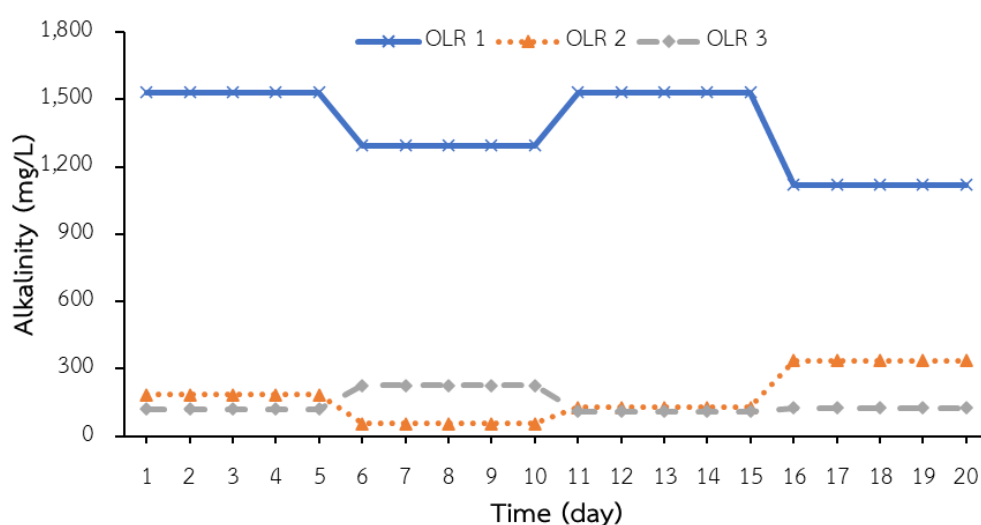
ภาพที่ 28 ค่าความเป็นกรดต่างของแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

ซึ่งผลของการทดลองทั้ง 3 อัตราส่วน มีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นความกรดต่างเพิ่มขึ้น ทำให้น้ำเสียที่ออกจากระบบมีความเป็นด่างอ่อน ซึ่งยังอยู่ในช่วงที่แบคทีเรียสามารถดำรงชีวิตต่อการสร้างก๊าซมีเทน โดยค่าความเป็นกรดต่างควรอยู่ในช่วง 6.5-7.8 ซึ่งหากมีค่าความเป็นกรดต่างสูงหรือต่ำกว่านี้จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพต่ำลง ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสามารถผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน (Chile et al., 2019) อันเนื่องจากการทดลองอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยมีระบบการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ ที่มีอัตราการกวนผสมทุก ๆ 6 hr ส่งผลให้ระบบสามารถบำบัดฟเฟออร์สารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพจากการกวนผสม และในขณะเดียวกันสามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบโปรตีนไปเป็นกรดไขมันระเหยง่ายได้ปริมาณมาก จากการเข้าถึงสารอินทรีย์ของแบคทีเรีย (Tian et. al., 2020) จึงส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียที่ออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีสภาพความเป็นด่างอ่อนจากการสะสมของกรดอินทรีย์ สามารถรักษาสภาพของค่าความเป็นกรดต่างให้คงที่ได้ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (Ruffino et. al., 2015)

3. ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อค่ากรดไขมันระเหยง่ายและสภาพความเป็นด่างในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับสภาพความเป็นด่างมีความสำคัญต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากลักษณะของน้ำเสียภายในระบบ โดยการทำหน้าที่ควบคุมการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรดต่างจะอยู่ในรูปไบคาร์บอเนต ซึ่งมีสภาพความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียจะอยู่ในช่วง 2,000-3,000 mg/L (สุพจน์, 2555) และในส่วนของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดอินทรีย์

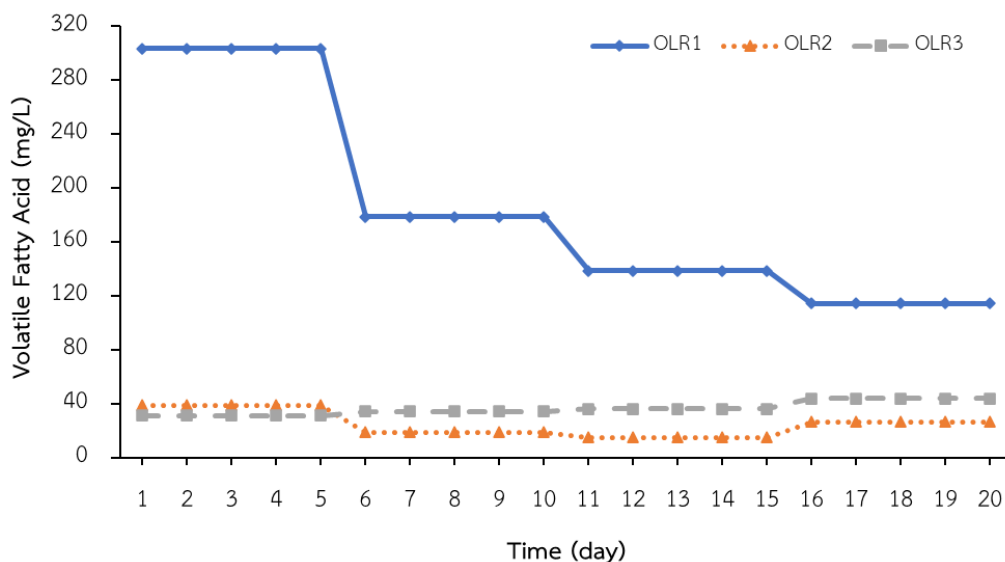
จากการแตกตัวของสารละลายในน้ำเป็นกรดอินทรีย์ เช่น กรดโพธิโอนิก กรดบิวทีริก กรดแลคติก กรดวาเลอิก และ กรดอะซิติก กับแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลของ ปริมาณกรดอินทรีย์จะมีค่าต่ำและคงที่ (Zhang et. al., 2019) จากสภาพความเป็นต่างและค่ากรดไขมันระเหยง่ายตามเงื่อนไข ได้ผลการทดลองระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝากรอบลอยร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ โดยมีอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1.00, 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³•day) แสดงผลดังต่อไปนี้



ภาพที่ 29 ค่าสภาพความเป็นต่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่แต่ละอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์

จากภาพที่ 29 แสดงให้เห็นสภาพความเป็นต่างภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากการป้อนสารอินทรีย์ เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่าสภาพความเป็นต่างจะมีค่าเฉลี่ยของระบบเท่ากับ 1,301.69, 127.99 และ 134.12 mg/L แสดงให้เห็นลักษณะว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝากรอบลอยร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ สามารถรองรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบได้สูง และช่วยให้แบคทีเรียสามารถปรับสภาพเข้ากับสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบได้อย่างคงที่ สามารถรักษาเสถียรภาพค่าสภาพความเป็นต่างให้มีค่าต่ำและคงที่ โดยสภาพความเป็นต่างที่เหมาะสมต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพไม่ควรเกิด 1,000-5,000 mg/L (สุพจน์, 2555) ซึ่งจะช่วยป้องกันแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนให้ทนทานต่อสภาพความเป็นกรดไขมันระเหยง่ายของวัตถุดิบตั้งต้น อีกทั้งเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าสภาพความเป็นต่างจากอัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่ำไปสูง ซึ่งผลจากการศึกษาใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Lui et. al. (2020) ซึ่งพบว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝากรอบลอยจะมีประสิทธิภาพการจากกรป้อนน้ำเสียที่มีโปรตีนสูง เนื่องจากภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีอัตราการกวนผสมที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายค่าของแข็งทั้งหมด และช่วยปรับค่าความเป็นกรด

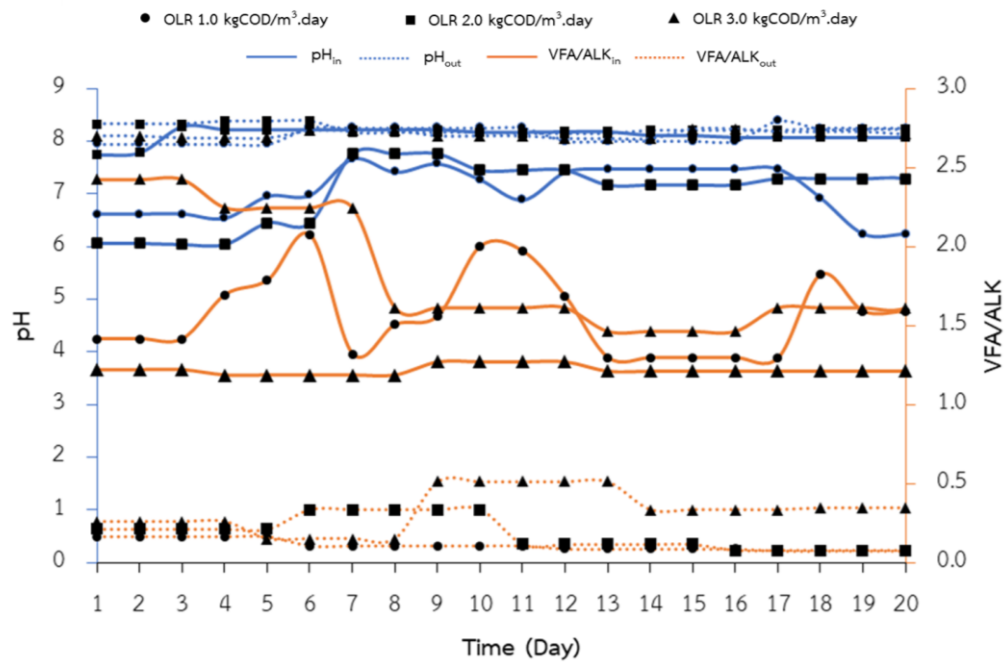
ต่างในช่วงไฮโดรไลซิสนจนกระทั่งช่วงเมทาโนเจนให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อแบคทีเรีย เพื่อให้แบคทีเรียสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของกรดอินทรีย์ภายในระบบทำให้เป็นก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด (Chen et. al., 2021)



ภาพที่ 30 ค่ากรดไขมันระเหยง่ายของแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

จากภาพที่ 30 ค่ากรดไขมันระเหยง่ายภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ พบว่าการปรับสภาพจากปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นภายในระบบ เมื่อมีการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในอัตรา 1.00, 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³•day) ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง 20 days มีค่ากรดไขมันระเหยง่ายเฉลี่ยเท่ากับ 182.16, 24.90 และ 36.50 mg/L โดยจากการทดลองอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ทั้ง 3 อัตราส่วน พบว่าแบคทีเรียสามารถรองรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบที่สูง เนื่องจากแบคทีเรียสามารถปรับตัวให้เข้ากับสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างเหมาะสม จากการปรับตัวแบคทีเรียภายในกระบวนการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายสะสมภายในระบบควรอยู่ในช่วง 50-500 mg/L (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561) และประสิทธิภาพหลังออกจากระบบมีการสะสมค่ากรดไขมันระเหยที่ต่ำ และเมื่อวิเคราะห์ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบล้อมร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ พบว่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้ไม่มีการสะสมของกรดอินทรีย์ภายในระบบ และเกิดความสมดุลของการทำงานของแบคทีเรียในการนำไปใช้สร้างก๊าซชีวภาพได้สมบูรณ์ ซึ่งผลการศึกษาสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mahato et. al (2020) พบว่าประสิทธิภาพของการกำจัดสารอินทรีย์จะเกิดขึ้นได้ในอัตราส่วนที่เหมาะสมกับระบบ และมีการเพิ่ม

ประสิทธิภาพกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยการกวนผสมภายในระบบที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาพร้อมกับปรับค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่ออัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคอบลอย สามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของกรดอินทรีย์ภายในระบบทำให้สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด (Chen et. al., 2021)



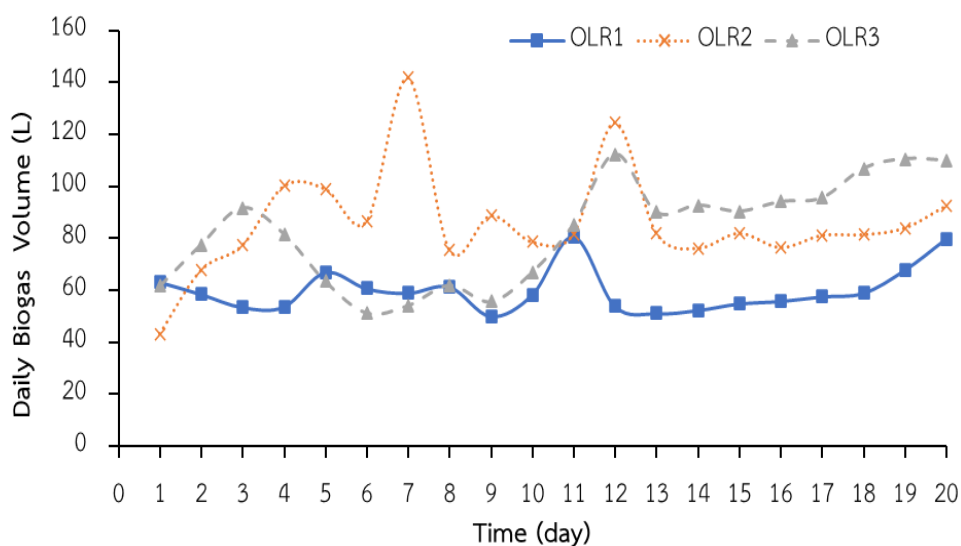
ภาพที่ 31 อัตราส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นกรดที่แต่ละอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์

จากภาพที่ 31 อัตราส่วนค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นกรดภายในระบบจากการทดลองอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 1.00, 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³·day) จากการศึกษาพบว่า น้ำที่ล้นออกจากระบบมีค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นกรดเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 0.11, 0.25 และ 0.33 ตามลำดับ โดยอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นกรดจากการแปรเปลี่ยนโดยตรงกับค่ากรดไขมันระเหยง่ายของน้ำเสียที่เข้าออก ซึ่งในขณะอัตราการอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นกรดของแต่ละอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์มีค่าต่ำกว่า 4.0 แสดงให้เห็นถึงความสมดุลกำลังในการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่าอัตราส่วนค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นกรดที่มีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่าง ที่จะรักษาเสถียรภาพให้คงที่ในช่วง 6.2-7.5 (Meixia et al., 2014) และหากค่าอัตราส่วนค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นกรดภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าสูงกว่า 0.8 (Eryildiz et. al., 2020)

แสดงว่ากำลังในการปรับสภาพของระบบมีค่าต่ำมาก จะทำให้ค่าความเป็นกรดต่างลดลงอย่างรวดเร็ว อีกด้วย (Zhang et. al., 2019)

4. ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

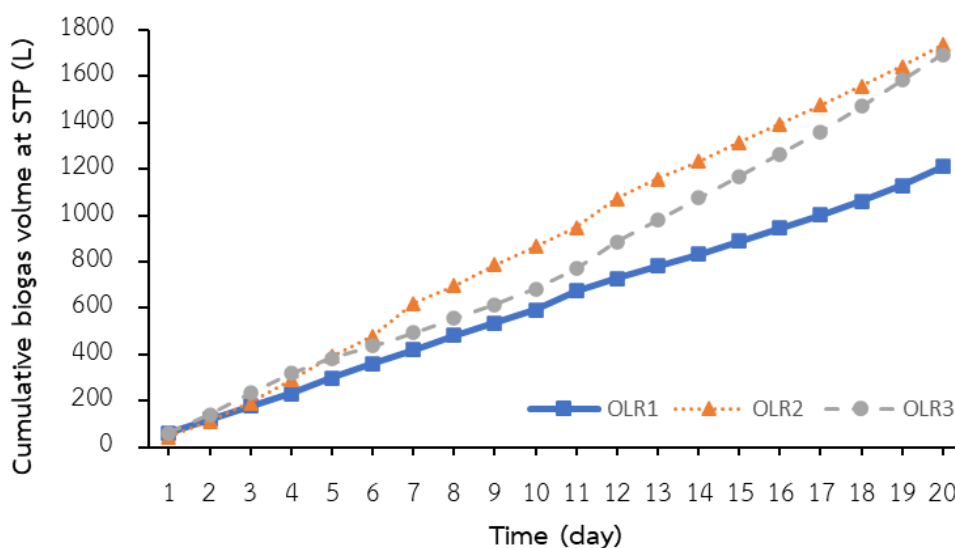
สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ จากปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันและสัดส่วนของก๊าซชีวภาพ จากการป้อนน้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อหาอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่จำเพาะเช่น ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นตามประเภทของวัตถุดิบ และปริมาณสารอินทรีย์ที่นำไปใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมถึงความสมดุล และเสถียรภาพของระบบ โดยปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นเป็นส่วนสำคัญต่อระบบเมื่อมีการเพิ่มขึ้นอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ สำหรับการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบได้กำหนดอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.00, 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³•day) โดยมีอัตราการกวนผสมทุก ๆ 6 hr ครั้งละ 10 min มีผลดังต่อไปนี้



ภาพที่ 32 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อวันของแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

จากภาพที่ 32 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ จากการศึกษาจากอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 1.00, 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³•day) ร่วมกับการใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์กากตะกอนที่นำมาใช้เป็นเชื้อเริ่มต้นในการผลิตก๊าซ

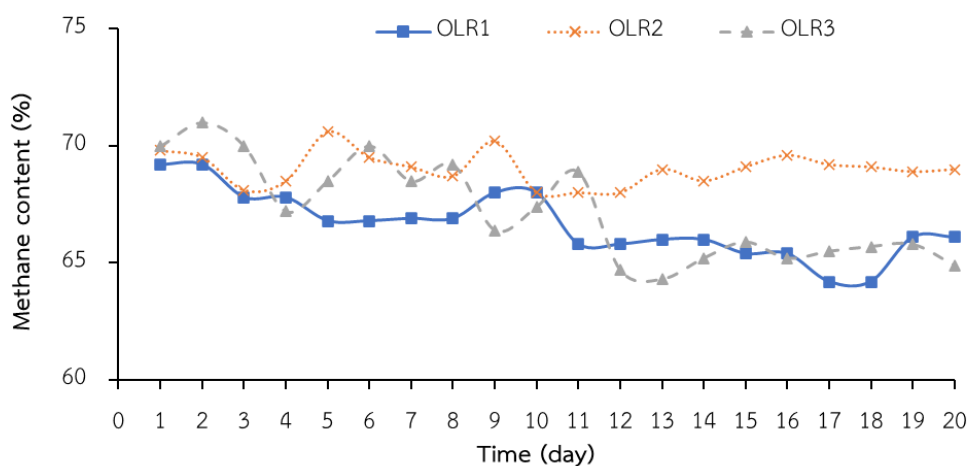
ชีวภาพ ตลอดระยะเวลาทดลองกักเก็บ 20 days พบว่ามีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน เฉลี่ยเท่ากับ 60.71, 85.80 และ 85.72 L/day ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน มีความแปรผันตรงตามค่าพารามิเตอร์ในข้างต้น อาทิเช่น pH, VFA, ALK, COD, TS และ VS ตามลำดับ (Rico et. al., 2011) โดยปริมาณก๊าซชีวภาพของทั้ง 3 อัตราส่วน มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นไม่คงที่ในช่วง 10 days แรกของการทดลอง หลังจากสามารถปรับสภาพให้มีความสมดุลต่อ อัตราการป้อนสารอินทรีย์การผลิตก๊าซชีวภาพเริ่มคงที่ต่อเนื่อง (ผจญสุข และคณะ 2560) และจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีการป้อนสารอินทรีย์แบบกึ่งต่อเนื่อง ผลของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ สอดคล้องใกล้เคียงสถานประกอบการ อีกทั้งเมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นพบว่าที่อัตรา ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³·day) มีปริมาณใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่า แบบที่เรี่ยสามารถนำกรดอินทรีย์ไปใช้ผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างสมดุล อีกทั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถรองรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการกวนผสมหมუნเวียนด้วยก๊าซชีวภาพทำให้สามารถรักษาเสถียรภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพให้อยู่ในระดับที่สูงใกล้เคียงกัน และแบบที่เรี่ยสามารถนำสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นไปใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างเห็นได้ชัด (ศักรินทร์ และคณะ 2563)



ภาพที่ 33 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของแต่ละอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

จากภาพที่ 33 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่สะสมได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝากรอบลอย ร่วมกับการกวนผสมหมუნเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ ในการศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 1.00, 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³·day) ของการผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้จากน้ำเสีย พบว่ามีอัตราการ

เกิดก๊าซชีวภาพสะสมมีค่าเท่ากับ 1,214.18, 1,723.04 และ 1,714.48 L ตามลำดับ โดยปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุด คือ อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 2.00 kgCOD/(m³•day) เนื่องจากภายในระบบสามารถสร้างสมดุลระหว่างแบคทีเรียได้อย่างเหมาะสม การกำจัดสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพก็จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น รองลงมาเป็นอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 3.00 kgCOD/(m³•day) จากการเติมสารอินทรีย์ที่มากเกินไปทำให้ระบบเกิดสถานะที่เรียกว่า Over Load เพราะมีปริมาณสารอาหารที่มากเกินไปปริมาณที่ระบบจะรองรับต่อจำนวนแบคทีเรีย แต่เนื่องด้วยระบบที่มีการกวนผสมทุก 6 hr ทำให้แบคทีเรียเข้าถึงสารอินทรีย์ได้มากเกิดการย่อยสลายนำไปใช้ในกระบวนการสร้างก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสุดท้ายเป็นอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 1.00 kgCOD/(m³•day) ที่มีการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบน้อยทำให้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สมบูรณ์ เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ที่น้อยต่อความต้องการของระบบสำหรับแบคทีเรียใช้ในการเจริญเติบโตถูกเปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วเกินไปนั้น (ศศิธร และคณะ 2563) เมื่อวิเคราะห์ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม พบว่าอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงใกล้เคียงกัน คือ 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³•day) ซึ่งเป็นปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่ใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าระบบยังคงสามารถรองรับปริมาณสารอินทรีย์และกำจัดเพิ่มขึ้นได้ในอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นได้ (Chen et. al., 2021)



ภาพที่ 34 สัดส่วนก๊าซมีเทนของแต่ละอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์

จากภาพที่ 34 เมื่อพิจารณาสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลา 20 days ของการศึกษาระบบผลิตก๊าซชีวภาพในอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 1.00, 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³•day) โดยพบว่าสัดส่วนของก๊าซมีเทนภายในระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 66.62%, 69.02% และ 67.37% ตามลำดับ โดยมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจากอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ทั้ง 3

สภาวะ สูงใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ใน กลายเป็นก๊าซมีเทนที่สูง โดยผลการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนมีก๊าซมีเทนมากกว่า 60% อยู่ในระดับ มาตรฐานการสร้างก๊าซมีเทน (Paulinetti, 2022) อีกทั้งยังพบว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบ ลอยร่วมกับการกวนผสมมีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ (Luo et al., 2017) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบลอยทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิช่วงเทอร์ โมฟิลิกส์ที่มีประสิทธิภาพสูง และงานวิจัยของ (Jürgensen et al., 2018) ซึ่งพบว่าระบบผลิตก๊าซ ชีวภาพที่เพิ่มการกวนผสมภายในระบบจะช่วยเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากขึ้น และ สามารถรองรับอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน เมื่อพิจารณาอัตราการระบรทุก สารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบลอยร่วมกับการกวนผสม พบว่าที่อัตรา บรทุกสารอินทรีย์ $2.00 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ สามารถรักษาเสถียรภาพของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นได้มาก ที่สุด เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีการกวนผสมหมุนเวียน ด้วยก๊าซชีวภาพ ทำให้แบคทีเรียเข้าถึงสารอินทรีย์ที่เป็นสารตั้งต้นจำพวกกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่าง ๆ เหล่านี้นำไปใช้สร้างก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงทำให้มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมีค่าที่สูง อย่งเห็นได้ชัด (Yu et. al., 2015)

ผลการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบลอย ร่วมกับการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพ

สำหรับการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นเป็นการประเมินต้นทุนพลังงานต่อ หน่วยของการพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบลอยร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซ ชีวภาพสำหรับน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง ซึ่งได้ทำการ ประเมินตั้งแต่ต้นทุนการสร้างระบบ ต้นทุนวัตถุดิบด้านพลังงาน ผลตอบแทนที่จะได้รับจากระบบผลิต ก๊าซชีวภาพที่พัฒนาขึ้น หลังจากนั้นจึงนำมาประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นต่อไป ซึ่งจะดำเนินการวิเคราะห์เฉพาะเงื่อนไขการทดลองที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุด โดยการ ทดลองศึกษาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ให้ผลผลิตของก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุด คือ อัตราการ เติมสารอินทรีย์ที่ $2.00 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ และสำหรับการทดลองศึกษาอัตราการกวนผสมหมุนเวียน ด้วยก๊าซชีวภาพ คือ การกวนผสมทุก ๆ 6 hr โดยแต่ละรอบจะทำการกวนผสมหมุนเวียนครั้งละ 10 min ตลอดระยะเวลาการทดลอง 20 days ซึ่งในเงื่อนไขดังกล่าวมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสะสม สูงสุดเท่ากับ $1,723.04 \text{ L/day}$ หรือ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่สถานประกอบการสามารถนำไปปรับใช้ ต่อไปได้ หรือ นำไปศึกษาต่อในกรณีอื่น ๆ โดยระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้สามารถนำพลังงานไปใช้ใน สถานประกอบการเพื่อทดแทนการใช้ก๊าซหุงต้มในสถานประกอบการ หรือ เมื่อมีปริมาณมากพอ

สามารถนำไปทดแทนเชื้อเพลิงอื่น ๆ ได้ เช่น น้ำมันดีเซล หรือ น้ำมันเตา เป็นต้น โดยรายละเอียดของการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น โดยการประเมินต้นทุนพลังงานต่อหน่วยของการพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบล้อมร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพสำหรับน้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองมีรายละเอียดดังนี้

1. การวิเคราะห์ต้นทุนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

การวิเคราะห์ต้นทุนสำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพต้นแบบ ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบล้อมร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ 10 ซึ่งประกอบด้วย ต้นทุนการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เช่น ถังปฏิกรณ์ขนาด 200 L ถังเก็บก๊าซชีวภาพขนาด 200 L ระบบท่อส่งก๊าซชีวภาพและระบบกวนผสม คิดเป็นต้นทุนรวม 30,000 Baht และต้นทุนทางพลังงาน หรือค่าไฟฟ้าสำหรับการเดินระบบการกวนผสมที่อัตราการกวนทุก ๆ 6 hr รอบละ 10 min คิดเป็นค่าไฟฟ้า 206.38 Baht/year ดังนั้นรวมต้นทุนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 30,206.38 Baht/year ตารางที่ 10 ต้นทุนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบล้อมร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ

| รายการ | จำนวน | หน่วย |
|--|------------------|------------------|
| ต้นทุนการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพ | | |
| - ราคาชุดถังปฏิกรณ์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ | 30,000.00 | Baht |
| ต้นทุนวัตถุดิบพลังงานที่ใช้ | | |
| - ค่าไฟฟ้าที่ใช้ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ | 206.38 | Baht/year |
| รวมค่าใช้จ่าย | 30,206.38 | Baht/year |

2. การประเมินผลตอบแทนจากศักยภาพทางด้านพลังงานของก๊าซชีวภาพ

การประเมินศักยภาพทางด้านพลังงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบล้อมร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพสำหรับน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง โดยที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่ 2.00 kgCOD/(m³·day) มีปริมาณน้ำเสียเข้าสู่ระบบ 13.5 L/day หรือ 0.0135 m³/day เมื่อกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพทุก ๆ 6 hr รอบละ 10 min สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 86.06 m³/day หรือ คิดเป็นศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ 31,411.9 m³/year โดยเมื่อนำศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้มาเปรียบเทียบการทดแทนเชื้อเพลิง

อื่น ๆ ได้แก่ ก๊าซหุงต้ม น้ำมันดีเซล และ น้ำมันเตา (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2561) แสดงดังตารางที่ 11 พบว่าเมื่อนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สามารถทดแทนก๊าซหุงต้มได้ 39.59 kg/day หรือ 14,727.48 kg/year สามารถทดแทนน้ำมันดีเซลได้ 51.64 L/day หรือ 19,210.08 L/year สามารถทดแทนน้ำมันเตาได้ 47.33 L/day หรือ 17,606.76 L/year โดยก๊าซชีวภาพคิดเป็นมูลค่าเทียบเท่าเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้ม 230,636.20 Baht/year น้ำมันดีเซล 564,282.70 Baht/year และ น้ำมันเตา 362,806.35 Baht/year ซึ่งมูลค่าดังกล่าวเป็นเสมือนผลประโยชน์ที่ผู้ประกอบการจะได้รับเมื่อนำก๊าซชีวภาพไปทดแทนเชื้อเพลิงแต่ละชนิด

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้กับการทดแทนเชื้อเพลิงอื่น ๆ

| เชื้อเพลิง | รายการ | ปริมาณเทียบเท่า | หน่วย |
|-------------|------------------------|-----------------|----------------------|
| ก๊าซชีวภาพ | ปริมาณที่ผลิตได้ | 31,411.90 | m ³ /year |
| | คิดเป็นปริมาณเทียบเท่า | 14,727.48 | kg/year |
| ก๊าซหุงต้ม | มูลค่าผลประโยชน์ | 230,636.20 | Baht/year |
| | คิดเป็นปริมาณเทียบเท่า | 19,210.08 | L/year |
| น้ำมันดีเซล | มูลค่าผลประโยชน์ | 564,282.70 | Baht/year |
| | คิดเป็นปริมาณเทียบเท่า | 17,606.76 | L/year |
| น้ำมันเตา | มูลค่าผลประโยชน์ | 362,806.35 | Baht/year |

3. การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการวิเคราะห์ต้นทุนทั้งหมดและผลตอบแทนที่ได้รับจากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนตะกอนด้วยก๊าซชีวภาพที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2.00 kgCOD/(m³•day) โดยมีการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพทุก ๆ 6 hr รอบละ 10 min จะแสดงผลการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ดังตารางที่ 12 ซึ่งประกอบด้วยการประเมินระยะเวลาคืนทุนโดยไม่คิดอัตราการกู้ยืมหรืออัตราเงินเฟ้อต่าง ๆ ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีต้นทุนระบบรวม 30,206.38 Baht/year เมื่อนำก๊าซชีวภาพไปทดแทนเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ได้แก่ ก๊าซหุงต้ม น้ำมันดีเซล และ น้ำมันเตา พบว่าการทดแทนเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีระยะเวลาคืนทุนน้อยกว่า 1 year โดยเมื่อนำก๊าซชีวภาพไปทดแทนก๊าซหุงต้มสามารถคืนทุนภายใน 0.13 year ทดแทนการใช้น้ำมันดีเซลสามารถคืนทุนภายใน 0.05 year และทดแทนการใช้น้ำมันเตาสามารถคืนทุนภายใน 0.08 year

ตารางที่ 12 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น

| รายการ | จำนวน | หน่วย |
|---------------------------------------|------------|-----------|
| รวมค่าใช้จ่ายระบบผลิตก๊าซชีวภาพ | 30,206.38 | Baht/year |
| <u>มูลค่าเชื้อเพลิงเทียบเท่าต่อปี</u> | | |
| - ก๊าซหุงต้ม | 230,636.20 | Baht/year |
| - น้ำมันดีเซล | 564,282.70 | Baht/year |
| - น้ำมันเตา | 362,806.35 | Baht/year |
| <u>ระยะเวลาคืนทุน</u> | | |
| - ทดแทนการใช้ก๊าซหุงต้ม | 0.13 | Year |
| - ทดแทนการใช้น้ำมันดีเซล | 0.05 | Year |
| - ทดแทนการใช้น้ำมันเตา | 0.08 | year |

จากการประเมินเปรียบเทียบแบบไม่คุ้มกัน เมื่อนำค่าใช้จ่ายจากการใช้งานระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝากรอบล่อยร่วมกับการกวนผสมหมუნเวียนตะกอนด้วยก๊าซชีวภาพมาคิดสัดส่วนกับผลตอบแทน โดยระยะเวลาคืนทุนของการนำก๊าซชีวภาพไปทดแทนเชื้อเพลิงอื่น ๆ ในตารางที่ 12 แสดงให้เห็นถึงภาพรวมการลงทุนที่มีความเหมาะสม เนื่องจากมีระยะเวลาในการคืนทุนที่สั้น มีความเสี่ยงในการลงทุนต่ำ เมื่อพิจารณาระบบผลิตก๊าซชีวภาพตามเงื่อนไข คือ อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ $2.00 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ และการกวนผสมหมუნเวียนตะกอนทุก ๆ 6 hr หากนำมาเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วยจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเท่ากับ 15.96 Baht/kg และมีต้นทุนของก๊าซหุงต้มที่ถูกกว่าราคาของก๊าซหุงต้มตามท้องตลาดมากถึง 5.21 Baht/kg แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝากรอบล่อยร่วมกับการกวนผสมหมუნเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ สามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับได้เป็นอย่างดีทำให้เกิดประโยชน์เพิ่มมากขึ้นจากระบบที่มีใช้ทั่วไป

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาค่อยๆรวมกับการกวนผสมหมუნเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ โดยใช้น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง ในถังปฏิกรณ์ขนาด 200 L ทำการศึกษาในระดับ Pilot Scale ภายใต้สภาวะแวดล้อมทั่วไป ระบบมีลักษณะการป้อนวัสดุแบบกึ่งต่อเนื่อง วัสดุที่ใช้ คือ น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง ร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ คือ กากตะกอนมูลสุกรจากฟาร์มสุกร โดยใช้อัตราส่วนของวัสดุต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์ (F/I Ratio) เท่ากับ 3:1 ระยะเวลาในการทดลองจำนวน 20 day โดยการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสีย มีผลของการกวนผสมหมუნเวียนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย ผลของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่ระบบสามารถรองรับได้อย่างเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ และการวิเคราะห์หาต้นทุนทางด้านพลังงานของต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนสร้างต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายขนาด 200 L ที่เหมาะสมต่อการบำบัดน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีผลสรุปการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากการพัฒนาสร้างเครื่องผลิตก๊าซชีวภาพต้นแบบสำหรับการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาค่อยๆรวมที่เป็นระบบผลิตก๊าซแบบช้าที่ใช้พื้นที่น้อย เมื่อเพิ่มการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพร่วมกับระบบจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพที่ดี โดยตามเงื่อนไขในการทดลองที่อัตราการกวนผสมทุก ๆ 6 hr 12 hr และ 24 hr แต่จะรอบจะกวนผสมและหมუნเวียนรอบละ 10 min พบว่าที่อัตราการกวนผสมทุก ๆ 6 hr มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการกำจัดค่าซีโอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด และ ปริมาณของแข็งระเหยง่าย มีค่าเท่ากับ 65.89%, 72.43% และ 82.61% ตามลำดับ อีกทั้งยังมีปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 1346.34 L มีสัดส่วนก๊าซมีเทนเท่ากับ 65.89% มีแนวโน้มที่ดีมีประสิทธิภาพต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาค่อยๆรวมกับการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพ ทำให้สามารถนำไปศึกษาต่อเพื่อหาอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อระบบ

2. ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับการศึกษาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบลอยร่วมกับการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพในการผลิตก๊าซมีเทน โดยกำหนดอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เท่ากับ 1.00 2.00 และ 3.00 kgCOD/(m³•day)พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 2.00 kgCOD/(m³•day) สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดกำจัดค่าซีไอดี ปริมาณของแข็งทั้งหมด และ ปริมาณของแข็งระเหยง่าย เท่ากับ 69.01%, 66.85% และ 79.24% ตามลำดับ และยังมีปริมาตรก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดเท่ากับ 1,723.04 L เป็นสัดส่วนก๊าซมีเทน 69.02%

3. ผลการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้นของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับการประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพต่อหน่วยพลังงานของต้นแบบจากน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง โดยเทียบความคุ้มค่าทางด้านพลังงานต่อหน่วยของก๊าซหุงต้ม เนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ในกระบวนการแปรรูปนอนแมลงวันลายของสถานประกอบการ โดยระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบลอยร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพมีความคุ้มค่าต่อการทดแทนการใช้ก๊าซหุงต้มค่าเท่ากับ 15.71 Baht/kg ซึ่งระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำ ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์สูงและมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนมากกว่า 60% ทำให้สามารถคืนทุนได้ภายใน 2 months เหมาะนำไปใช้ในสถานประกอบการตั้งแต่ขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ได้ ดังนั้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบลอยร่วมกับการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพจึงสามารถนำไปใช้ทดแทนก๊าซหุงต้มในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมได้ โดยมีความคุ้มค่าสามารถคืนทุนได้อย่างรวดเร็ว และเพื่อสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพิ่มมูลค่าและสามารถลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคอบลอยร่วมกับกวนผสมหมุนเวียนตะกอนด้วยก๊าซชีวภาพ โดยใช้จากน้ำเสียกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองควรมี

1. การศึกษาระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีความเป็นไปได้ในการช่วยลดปริมาณคาร์บอนเหลือทิ้ง ดังนั้นควรมีการสร้างพื้นที่นำร่องในการพิจารณาในการผลิตพลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และทำการวิเคราะห์พัฒนาเป็นชุมชนคาร์บอนต่ำต่อไป

2. การศึกษาระบบการกวนผสมในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้มีความเหมาะสมมากขึ้นสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพในรูปแบบต่าง ๆ

3. การศึกษาสารอินทรีย์วัตถุประเภทต่าง ๆ เพิ่มเติมเพื่อให้ระบบสามารถนำไปใช้ได้ในระดับชุมชนที่ต้องการใช้พลังงานทดแทนจากก๊าซชีวภาพ



บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2561. คู่มือไบโอแก๊สเซฟตี้. (พิมพ์ครั้งที่ 1). ศูนย์บริการวิชาการด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 17 เซิงสะพานกษัตริย์ศึก แขวงรองเมือง เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 13030
- กิตติยา ป้อมเงิน, ประภา โഴ๊ะสลาม, รัชพล พะวงศรีรัตน์, “การผลิตแก๊สชีวภาพจากต้นธูปฤๅษีที่ผ่านการปรับสภาพ (*Typha angustifolia* L.) ร่วมกับมูลวัวโดยกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ,” *Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University*, ปีที่ 4, ฉบับที่ 5, เดือนกันยายน – ตุลาคม, หน้า 28-41, 2560.
- จุฑาภรณ์ ชนะถาวร. 2560. การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของวัสดุเหลือทิ้งคาร์บอนสูงและน้ำเสียจากการเตรียมเบตดั่งไส้เดือน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2563)
- ธัชกร ผลพันธ์, วลัยรัตน์ อุตตมะปรากรม, และ ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ. 2557. การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียภาคอุตสาหกรรม, *วารสารวิจัยพลังงาน* (มกราคม – มิถุนายน), 11(1), 50-62.
- ปรียา กฤตติรพุทธิ กิตติกร สาสุจิตต์ ภาคมณ ปินตานา ชยานน สวัสดิ์สินธุนาท และ รจพรรณ นิรัฐศิลป์. การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลาย [ปริญญา นิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้; 2566.
- ปิยะวดี ศรีวิชัย และ ชูมาพร รดสีดา. (2563). ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการหมักย่อยแบบไร้. *อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 13(3), 162-175.
- ผจงสุข สุธารัตน์ เสาวนิตย์ ชอบบุญ นิศากร วิจิตสมบูรณ์ อนุมิตี เดชชนะ. การพัฒนาถังผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์ : รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2554. สงขลา: มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา, 2560
- ฝ่ายคุณภาพสิ่งแวดล้อมและห้องปฏิบัติการ, 2546 และ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, 2565
- รจพรรณ นิรัฐศิลป์. 2563. เอกสารประกอบการสอน รายวิชา พง317 ระบบก๊าซชีวภาพ. คณะวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, พิมพ์ครั้งที่ 4.
- วันสพรศรี สวัสดิ์ (2021). การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักร่วมระหว่างหญ้าเนเปียร์ที่ปลูกในดินเสื่อมโทรมและมูลสุกร. *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี*, 20(1), 1-8.

- วัฒน์ ณรงค์ มาก พันธุ์ และ สมพงษ์ โอ ทอง. (2020). การผลิตก๊าซไบโอไฮเทนจากขานอ้อยโดยกระบวนการหมัก 2 ขั้นตอนที่สภาวะเทอร์โมฟิลิก. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 241-255.
- ศศิธร ไสปลา ฐปน ชื่นบาล นิกราน หอมดวง จุฑาภรณ์ ชนะถาวร และ รจพรรณ นิรัฐศิลป์. การศึกษาระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้างโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแห้ง. วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า. 2563; 18: p. 87-105
- ศักรินทร์ พงษ์ศักดิ์ ธีชัยชนก พรตอน ฉัตรลดา เพ็ญชัย นิตยา บุญเทียน โมฮัมเหม็ด เพตรี. อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่ผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียมูลโคนมสูงสุดภายในฟาร์มมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา). 2563; 20(3): p. 74-85.
- ศูนย์ศึกษาการพัฒนาอย่างคั่งกระเบน อันเนื่องมาจากพระราชดำริ. องค์ความรู้การเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันเพื่อทดแทนโปรตีนจากอาหารสัตว์ [อินเทอร์เน็ต]. 2565. เข้าถึงได้จาก: <https://www4.fisheries.go.th /doffile/fkey/ref556>
- สำนักงานนโยบายและพลังงาน กระทรวงพลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2564) แผนยุทธศาสตร์ของสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน พ.ศ 2560-2564. กรุงเทพฯ: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.
- สุดารัตน์ ภัคดี. 2551. การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานเส้นใยโดยใช้กระบวนการย่อยสลายภายใต้ สภาวะไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- สุพจน์ เกิดมี. 2555. พัฒนาการใช้พลังงานก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์และเศษวัสดุทางการเกษตร. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์.
- เอนก สวาอินทร์ ฌานิกา แซ่แง ชุกกลีน และ กัตตินาฏ สกุสสวัสดิพันธ์. (2564). การพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าวโดยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ แบบแผ่นกั้นประยุกต์ (MABR). วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช, 40(1), 121-134
- Ali, S., Hua, B., Huang, J. J., Droste, R. L., Zhou, Q., Zhao, W., & Chen, L. (2019). Effect of different initial low pH conditions on biogas production, composition, and shift in the aceticlastic methanogenic population. *Bioresource Technology*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121579>

- Bulak P, Proc K, Pawłowska M, Kasprzycka A, Berus W, Bieganowski A. Biogas generation from insects breeding post production wastes. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 244: 118777.
- Cecilia C. L., Lourdes S. L., Belinda V. C., Aaron F. G. C., Andrea M. L., Adrian H.M. (2020). An insight to fermented edible insects: A global perspective and prospective. *Food Research International*, 137, 109750.
- Chen X, Weizhu Z, Gongsong L, Qi S, Muhammad I, Yiqi W, Luotong R, Chen C. Anaerobic biodegradation of soybean-process wastewater: Operation strategy and sludge bed characteristics of a high-performance Spiral Symmetric Stream Anaerobic Bioreactor. *Water Research*. 2021; 197: 117095
- Diamantis, V., Eftaxias, A., Stamatelatou, K., Noutsopoulos, C., Vlachokostas, C., & Aivasidis, A. (2021). Bioenergy in the era of circular economy: Anaerobic digestion technological solutions to produce biogas from lipid-rich wastes. *Renewable Energy*, 168, 438–447.
- Duan, N., Khoshnevisan, B., Lin, C., Liu, Z., & Liu, H. (2020). Life cycle assessment of anaerobic digestion of pig manure coupled with different digestate treatment technologies. *Environment International*, 137.
- Eryildiz, B., Lukitawesa, & Taherzadeh, M. J. (2020). Effect of pH, substrate loading, oxygen, and methanogens inhibitors on volatile fatty acid (VFA) production from citrus waste by anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122800>
- Gahukar R. T. (2016). *Edible Insects Farming: Efficiency and Impact on Family Livelihood, Food Security, and Environment Compared with Livestock and Crops*. *Insects as Sustainable Food Ingredients Production, Processing and Food Applications*, Academic Press, 4, 85-111.
- Effect of pH on Hydrogen Production from Glucose by Mixed Culture. *Bioresource Technology*. 82(1), 87-93. DOI: 10.1016/s0960-8524 (01)00110-9
- Herbert, H. P. F. & Hong, L. (2002). Effect of pH on Hydrogen Production from Glucose by Mixed Culture. *Bioresource Technology*. 82(1), 87-93. DOI: 10.1016/s0960-8524 (01)00110-9

- Jürgensen, L., Ehimen, E. A., Born, J., & Holm-Nielsen, J. B. (2018). A combination anaerobic digestion scheme for biogas production from dairy effluent—CSTR and ABR, and biogas upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 241–247. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.04.007>
- Kim M J, Kim S H. Conditions of lag-phase reduction during anaerobic digestion of protein for high-efficiency biogas production. *Biomass and Bioenergy*. 2020; 143: 105813
- Krishania, M., Vijay, V. K., & Chandra, R. (2016). Performance evaluation of various bioreactors for methane fermentation of pretreated wheat straw with cattle manure. *Green Processing and Synthesis*, 5(2), 113–121. <https://doi.org/10.1515/gps-2015-0067>
- Latha K, Velraj R, Shanmugam P, Sivanesan, S. Mixing strategies of high solids anaerobic co-digestion using food waste with sewage sludge for enhanced biogas production. *Journal of Cleaner Production*. 2019; 210: p.388-400.
- Lukitawesa, Bahriye Eryildiz, Amir Mahboubi, Ria Millati, Mohammad J. Taherzadeh. Semi-continuous production of volatile fatty acids from citrus waste using membrane bioreactors. *Innovative Food Science & Emerging Technologies 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved. Volume 67*, January 2021, 102545
- Luo, T., Pan, J., Fu, L., Mei, Z., Kong, C., & Huang, H. (2017). Reducing biogas emissions from village-scale plant with optimal floating-drum biogas storage tank and operation parameters. *Applied Energy*, 208, 312–318.
- Mahmoodi-Eshkaftaki, M., & Ebrahimi, R. (2019). The effect of blade angle of turbine impellers on anaerobic digestion efficiency in stirred digesters. *Energy*, 178, 772–780. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.183>
- Meixia, Z., Guangming, Z., Panyue, Z., Shiyang, F., Shuguang, J., Dan, W., & Wei, F. 2014. Anaerobic digestion of corn stovers for methane production in a novel bionic reactor. *Bioresource Technology*. 166, 606-609.
- Moguel-Castañeda, J. G., González-Salomón, M., Hernández-Garciá, H., Morales-Zarate, E., Puebla, H., & Hernandez-Martinez, E. (2020). Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of raw cheese whey: Experimental

- evaluation and mathematical modeling. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 18(7). <https://doi.org/10.1515/ijcre-2020-0022>
- Onthong, U., & Juntarachat, N. (2017). Evaluation of Biogas Production Potential from Raw and Processed Agricultural Wastes. In *Energy Procedia* (Vol. 138, pp. 205–210). Elsevier Ltd.
- P. Sopee, P., S. Natthanicha, “Methane production potential from anaerobic co-digestions of different animal dungs and sweet corn residuals,” *Energy Procedia*. vol. 138, pp. 943–948, 2017.
- Paulinetti A P, Augusto I M G, Batista L P P, Tavares A G B, Albanez R, Ratusznei S M, Lavato G, Rodrigues J A D. Anaerobic digestion as a core process for sustainable energy production in soybean biorefinery: A techno-economic assessment. *Sustainable Horizons*. 2022; 3: 100024.
- Paulinetti, A. P., Augusto, I. M. G., Batista, L. P. P., Tavares, A. G. B., Albanez, R., Ratusznei, S. M., ... & Rodrigues, J. A. D. (2022). Anaerobic digestion as a core process for sustainable energy production in the soybean biorefinery: a techno-economic assessment. *Sustainable Horizons*, 3, 100024.
- Pilli S, Pandey A K, Katiyar A, Pandey K, Tyagi R D. Pre-treatment technologies to enhance anaerobic digestion. *sustainable sewage sludge management and resource efficiency*. 2020; 23.
- Rameshprabu, R. and Yuwalee, U. (2016). Effect of Temperature on the Performance of Biogas Production from Duckweed. *Chemistry Research Journal*. Vol. 1, No. 1, 58-66.
- Ruffino B, Fiore S, Roati C, Campo G, Novarino D, Zanetti M. Scale effect of anaerobic digestion tests in fed-batch and semi-continuous mode for the technical and economic feasibility of a full scale digester. *Bioresource Technology*. 2015; 182: 302-313.
- S. Michel, W. H. Stijn, H. Van, H. Sander, V. Han, R. Katleen, “Laccase enzyme detoxifies hydrolysates and improves biogas production from hemp straw and miscanthus,” *Bioresource Technology*, vol. 244, no. 1, pp. 597-604, 2017.

- Sicchieri, I. M., de Quadros, T. C. F., Bortoloti, M. A., Fernandes, F., & Kuroda, E. K. (2022). Selection, composition, and validation of standard inoculum for 71 anaerobic digestion assays. *Biomass and Bioenergy*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106558>
- Tian G, Xi J, Yeung M, Ren G. Characteristics and mechanisms of H₂S production in anaerobic digestion of food waste. *Science of the Total Environment*. 2020, 724: 137977.
- Vögeli, Y., Riu, C., Gallardo, A., Diener, S., & Zurbrügg, C. (2014). *Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries: Practical Information and Case Studies*. Sandec: Department of Water and Sanitation in Developing Countries (p. 137).
- Wang, Y., & Serventi, L. (2019, November 10). Sustainability of dairy and soy processing: A review on wastewater recycling. *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117821>
- Zhang L, Loh K C, Sarvanantharajah S, Tong Y W, Wang C H, Dai Y. Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion of soybean curd residue for methane production: Characterizing bacterial and methanogen communities and their correlations with organic loading rate and operating temperature. *Bioresource Technology*. 2019; 288.
- Zhou, Y., Zhang, Z., Nakamoto, T., Li, Y., Yang, Y., Utsumi, M., & Sugiura, N. (2011). Influence of substrate-to-inoculum ratio on the batch anaerobic digestion of bean curd refuse-okara under mesophilic conditions. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 3251–3256. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.002>



ภาคผนวก ก

การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาคบรอบล้อมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพ
จากน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันสายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองขนาด 200 L



1. การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาดรอบลอยร่วมกับการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองขนาด 200 L เป็นกระบวนการหมัก

สำหรับการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศ โดยแบ่งระบบออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ 1 ฐานรองถังปฏิกรณ์ ส่วนที่ 2 ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ และส่วนที่ 3 ระบบการกวนผสมหมุนเวียนก๊าซชีวภาพ โดยมีขั้นตอนการสร้างระบบดังต่อไปนี้

การคำนวณหาปริมาณถังผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาดรอบลอยดังนี้

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ แบบฝาดรอบลอย (Fixed Drum Digesting)

ให้กรอกข้อมูลที่ต้องการในช่อง

อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำและปริมาณมูลสัตว์สด (3:1) เท่ากับ

| | | | | | |
|--|--------|-----------------------|---------|----------|--|
| 1) ปริมาณน้ำเสีย # (Q) = อัตราการไหลของน้ำเสีย (ลบ.ม./วัน) | 20.28 | กิโลกรัม/วัน | 26 | ลิตร/วัน | BGG = Q * COD / 1000 * Eff. COD removed * Gas Yield. BGG |
| 3) ค่าความสกปรก # (COD) = ค่าความสกปรกของน้ำเสีย | 25000 | mg/L | | | BGG = Biogas generate อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ลบ.ม.ต่อวัน |
| 3) ค่าประสิทธิภาพการเกิดก๊าซ (80%) | 0.8 | | | | Q = อัตราการไหลของน้ำเสีย ลบ.ม.ต่อวัน |
| 4) ระยะเวลาการหมักในถัง (HRT) | 30 | วัน (กำหนด 30-60 วัน) | | | COD = ค่าความสกปรกของน้ำ เสียในรูป COD (%) |
| 5) อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (BGG) | 141.96 | ลิตร/กิโลกรัม/วัน | 123.505 | ลบ.ม | Efficiency COD removed ประสิทธิภาพในการกำจัดของน้ำ เสียในรูป COD (%) |
| 7) อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำและปริมาณมูลสัตว์สด (3:1) เท่ากับ | 0.3 | | | | 1,000 = 1,000 มก.ค่าการแปลงหน่วยจาก มก. เป็น กก. |
| | | | | | Gas yield = อัตราการเปลี่ยนแปลงของเสียในรูป COD เป็นก๊าซมีเทน (0.35 ลบ.ม./กก. COD ที่ถูกกำจัดโดยระบบ) ก๊าซชีวภาพต่อวัน |

1. ขนาดถังหมัก

| | | | | | |
|-------------------------------|---------|-------|------|--------|------|
| ขนาดถังหมักที่ต้องการ เท่ากับ | 0.18252 | ลบ.ม. | หรือ | 182.52 | ลิตร |
|-------------------------------|---------|-------|------|--------|------|

2. ปริมาณน้ำเสียเข้า

| | | |
|------------------------------|--------|--------------|
| ปริมาณวัสดุหมัก เท่ากับ | 20.28 | กิโลกรัม/วัน |
| ปริมาณน้ำสำหรับผสม เท่ากับ | 3.042 | กิโลกรัม/วัน |
| ดังนั้น ปริมาณน้ำเสียเท่ากับ | 23.322 | กิโลกรัม/วัน |

3. ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

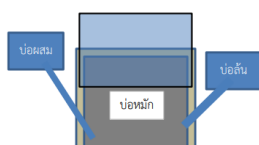
| | | |
|--------------------------------|-------|--|
| ปริมาณก๊าซชีวภาพ เท่ากับ | 2.88 | ลบ.ม./วัน |
| หรือคิดเทียบเท่ากับแทนก๊าซ LPG | 1.32 | กิโลกรัมต่อวัน |
| หรือใช้กับเตาหุงต้ม วันละ | 172.8 | นาที (อัตราสิ้นเปลืองก๊าซชีวภาพ 1 ลบ.ม./ชม.) |

4. ความจุของถังเก็บก๊าซชีวภาพ

| | | | |
|------------------------------|-------|-----------|-----------------------------------|
| % ความจุของถังเก็บก๊าซชีวภาพ | 60 | % | 50 - 60 % ระบบก๊าซชีวภาพอย่างง่าย |
| ปริมาตรที่เก็บก๊าซ | 1.728 | ลบ.ม./วัน | 70 % ระบบที่มีการใช้ก๊าซชีวภาพสูง |

5. ปุ๋ยจากตะกอนออกบ่อหมัก

| | | |
|----------------------------|------|--------------|
| ปริมาณปุ๋ยจากตะกอน เท่ากับ | 0.01 | กิโลกรัม/วัน |
|----------------------------|------|--------------|



ภาพผนวกที่ 1 การคำนวณปริมาตรถังชีวภาพต่อขนาดถังผลิตก๊าซชีวภาพ

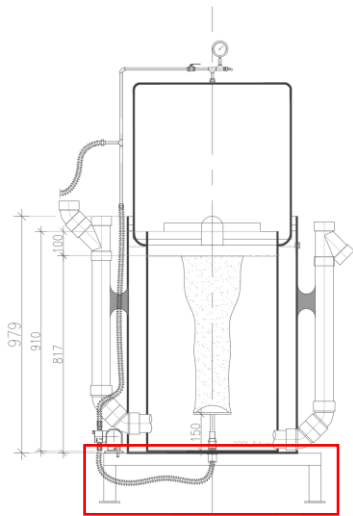
ส่วนที่ 1 ฐานรองถังปฏิกรณ์ด้วยกระบวนการหมักขนาด 200 L

ขั้นตอนที่ 1 การทำฐานเหล็กรองรับถังผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศขนาด 200 L จะทำการตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะใช้เหล็กฉากขนาด 25 x 25 mm ดังแสดงในภาพผนวกที่ 2



ภาพผนวกที่ 2 ลักษณะของเหล็กฉากที่จะใช้ทำเป็นฐานรองรับถังปฏิกรณ์

ขั้นตอนที่ 2 ทำการตัดประกอบเหล็กฉากขนาด 25 x 25 mm. ตามขนาดที่ได้ออกแบบไว้ ด้วยเครื่องเจียรตัดเหล็กขนาด 100 mm ซึ่งสามารถตัดเหล็กหรือโลหะตามขนาดที่ต้องการมีความสะดวกต่อการใช้งานง่ายรูปทรงออกแบบใหม่ ด้ามจับถนัดมือ จากนั้นทำการเชื่อมเหล็กฉากเข้าด้วยกัน โดยใช้เครื่องเชื่อมไฟฟ้าให้ได้ขนาดฐานตามที่ได้ออกแบบไว้ให้ตัวเหล็กมีความแข็งแรง ดังแสดงในภาพผนวกที่ 3 (ก) แบบโครงเหล็ก (ข) การเชื่อมเหล็ก



(ก) แบบโครงเหล็ก



(ข) การโครงเหล็กเชื่อมเหล็ก

ภาพผนวกที่ 3 การโครงสร้างฐานรองรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อทำการเชื่อมตัวฐานรับน้ำหนักเสร็จแล้วก็จะทำการทาสีเคลือบตัวเหล็กให้ทั่วทุกส่วนของฐานเหล็กเพื่อป้องกันการเกิดสนิม จากนั้นจะปล่อยทิ้งไว้ให้แห้งจนกว่าชิ้นงานจะแห้งแสดงดังในภาพผนวกที่ 4 (ก) การทาสีเคลือบเหล็ก (ข) การตากฐานรองรับให้แห้ง



(ก) การทาสีเคลือบเหล็ก



(ข) การตากฐานรองรับให้แห้ง

ภาพผนวกที่ 4 การเตรียมฐานรองรับถังปฏิกรณ์

ส่วนที่ 2 ถึงปฏิกรณ์ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งขนาด 200 L

ขั้นตอนที่ 1 นำถังพลาสติกโพลีเอทิลีนขนาด 200 L มาเจาะเปิดปากถังแล้วนำมาซ้อนกับพลาสติกโพลีเอทิลีนขนาด 330 L และทำการเจาะถังพลาสติกโพลีเอทิลีนด้านข้างของถังด้วยตัวเจาะเพื่อทำทางการเติมเข้าและน้ำล้นออกของวัสดุหมักขนาด 75.6 mm และทางระบายกากตะกอนของวัสดุหมักที่จะใช้ในการวิเคราะห์ค่าพารามอเตอร์ขนาด 25 mm รวมถึงทางออกของกากตะกอนจุลินทรีย์ที่จะใช้ สำหรับการหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพขนาด 12.5 mm จากนั้นจะทำการนำท่อพีวีซีมาใส่ยังรูที่ทำการเจาะไว้แล้วดังแสดงในภาพผนวกที่ 5



(ก) การเจาะเปิดปากถัง (ข) การนำท่อมาเชื่อมกับถังด้านนอก (ค) การนำท่อมาเชื่อมกับถัง

ภาพผนวกที่ 5 การเจาะรูของถังปฏิกรณ์ (ตัวถังปฏิกรณ์)

ขั้นตอนที่ 2 ส่วนระบบเก็บก๊าซชีวภาพสำหรับการเก็บรวบรวมก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพอาศัยหลักการแทนที่ด้วยน้ำหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Water Replacement Method ซึ่งมีวิธีการสร้างดังต่อไปนี้ขั้นตอนที่ 1 ทำการเจาะรูด้วยสว่านบริเวณก้นของถัง 200 L จำนวน 1 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 mm โดยมีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางถังเท่ากับ 10 cm จากนั้นจะนำเกลียวในและเกลียวนอกขนาด 12.5 mm มาใส่ยังรูที่ได้ทำการเจาะแล้วเพื่อทำเป็นช่องทางเข้าและออกของระบบเก็บก๊าซชีวภาพ จากนั้นจะนำไปสวมกับถังขนาด 330 L มาเป็นฐานแล้วนำถัง 150 L หันคว่ำเข้าไปยังถังขนาด 200 L เพื่อใช้เป็นมีจุดต่อท่อส่งก๊าซชีวภาพขนาด 12.5 mm ต่อเข้ากับวาล์วปิดเปิดเพื่อนำมาวิเคราะห์หาสัดส่วนก๊าซชีวภาพ และเชื่อมต่อส่งก๊าซระบบกวนภายในของถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในภาพผนวกที่ 5



ภาพผนวกที่ 6 การเจาะรูของถังปฏิกรณ์ (ฝาถังปฏิกรณ์)

ขั้นตอนที่ 3 ทำการประกอบหัวจ่ายก๊าซชีวภาพชิ้นส่วนต่าง ๆ บริเวณภายในถังถังปฏิกรณ์ เข้าด้วยกัน ตามรูที่ได้ทำการเจาะไว้ และทำการทดสอบการจ่ายก๊าซตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น ดังแสดงในภาพผนวกที่ 6



(ก) บริเวณด้านบนนอก



(ข) หัวจ่ายก๊าซ



(ค) ทดสอบหัวจ่ายก๊าซ

ภาพผนวกที่ 7 การประกอบหัวจ่ายก๊าซชีวภาพของระบบการกวนภายในถังปฏิกรณ์

ขั้นตอนที่ 4 ทำการประกอบตู้คอนโทรลไฟฟ้าสำหรับการควบคุมหมวนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพอัตโนมัติ ดังแสดงในภาพผนวกที่ 7



(ก) การวางตำแหน่งอุปกรณ์ (ข) การประกอบตู้คอนโทรลไฟฟ้า (ค) ติดตั้งตู้คอนโทรลไฟฟ้า

ภาพผนวกที่ 8 การประกอบตู้คอนโทรลไฟฟ้า

ขั้นตอนที่ 5 การประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์เข้าด้วยกันตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ ข้าวต้นดังแสดงในภาพผนวกที่ 8



ภาพผนวกที่ 9 การประกอบถังปฏิกรณ์

ขั้นตอนที่ 5 ทำการทดสอบตัวถังปฏิกรณ์และฝาถังเข้าด้วยกันโดยใช้กาวเชื่อมชนิดแบบติดแน่นเพื่อป้องกันการรั่วไหลของอากาศเข้าไปยังถังปฏิกรณ์ และการหมวนเวียนก๊าซชีวภาพในระบบดังแสดงในภาพผนวกที่ 9



ภาพผนวกที่ 10 การประกอบตัวถังปฏิกรณ์และฝาถังเข้าด้วยกัน

ส่วนที่ 3 ระบบการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนภายในระบบ

ระบบกวนผสมจะใช้ปั๊มแบบสูญญากาศด้วยความเร็วการไหลของก๊าซชีวภาพที่ 70 L/min กำลังไฟฟ้าที่ใช้เท่ากับ 0.25 kW ความเร็วรอบเท่ากับ 1,420 rpm แรงม้าเท่ากับ 1/4 Hp แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 230 V ชนิดมอเตอร์เหนี่ยวนำ 1 Phase ค่าความถี่ไฟฟ้าเท่ากับ 50 Hz ต่อกับท่อดูดก๊าซขนาด เท่ากับ 6.35 mm และด้านท่อส่งขนาด เท่ากับ 6.35 mm ชั้นตอนที่ 1 .ในทำการเชื่อมต่อท่อเข้าเครื่องดูดอัดเข้าไปบริเวณใต้ถังปฏิกรณ์ที่มีการติดตั้งหัวจ่ายก๊าซชีวภาพขนาด 203.20 mm ที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ จากนั้นทำการเชื่อมต่อท่อที่มีขนาด 12.5 mm ไปยังด้านบนถังเก็บก๊าซ แสดงในภาพผนวกที่ 10



ภาพผนวกที่ 11 จุดทางออกของก๊าซชีวภาพการเชื่อมต่อท่อส่งก๊าซชีวภาพ

ขั้นตอนที่ 2 ท่อส่งก๊าซชีวภาพที่ออกจากถังเก็บจะมีวาล์วปิด-เปิดกัน เพื่อใช้ในการป้องกันการรั่วไหลเมื่อต้องซ่อมบำรุงระบบการกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพภายในระบบ จากท่อส่งก๊าซจะเชื่อมต่อสายยางขนาด 9.5 mm โดยจะมีวาล์วกันย่อยเพื่อใช้ต่อไปยังท่อจ่ายก๊าซ เพื่อใช้สำหรับตรวจวัดปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น และท่อต่อแยกสำหรับต่อไปยังระบบกวนผสมหมุนเวียนด้วยก๊าซชีวภาพจะมีวาล์วกันย่อยก่อนและหลังเข้าระบบ เพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าซชีวภาพย่อยออกจากระบบเก็บก๊าซภาพดังแสดงในภาพผนวกที่ 11



ภาพผนวกที่ 12 ทางออกของตะกอนที่ใช้ในการหมუნเวียนตะกอน

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อทำการปิดระบบด้วยถังครอบลอยเรียบร้อยแล้ว จะตรวจเช็คท่อสายยางแล้วทำการรัดเข็มขัดกับสายทุกจุดที่ต่อไปยังท่อพีวีซีขนาด 12.5 mm เพื่อระบบปิดสนิทป้องกันการรั่วไหลจากท่อหมุนเวียนด้วยก๊าซภายในถังปฏิกรณ์ ตามแบบที่ได้ออกแบบไว้จากนั้นจะต้องมีวาล์วปิดกั้น เพื่อใช้สำหรับการวัดปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ซึ่งทุกครั้งที่ทำกรวัดปริมาตรของก๊าซชีวภาพจะต้องทำการปิดวาล์วทุกครั้ง โดยก่อนกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะต้องนำน้ำสะอาดมาใส่ยังบริเวณถังขนาด 200 L เพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าซชีวภาพออกจากระบบเก็บก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในภาพผนวกที่ 16 ดังนั้นเมื่อนำส่วนต่าง ๆ ประกอบด้วยฐานรองรับถังปฏิกรณ์ จำนวน 1 ชั้น ถังปฏิกรณ์พร้อมระบบการกวนผสมหมუნเวียนด้วยก๊าซชีวภาพขนาด 200 L จำนวน 1 ถัง และถังเก็บก๊าซชีวภาพขนาด 200 L จำนวน 1 ถัง นำมาประกอบเข้าด้วยกันจะทำให้เกิดเป็นระบบการผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝาครอบลอยที่มีระบบการกวนผสมหมუნเวียนด้วยก๊าซชีวภาพภายในระบบแสดงในภาพผนวกที่ 12



ภาพผนวกที่ 13 การประกอบอุปกรณ์ของถังเก็บก๊าซชีวภาพ



ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ



รายการค่าวัสดุอุปกรณ์

ต้นทุนในการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝักรอบลอยร่วมกับการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพ

| รายการ | จำนวนเงิน (Baht) |
|--|-------------------|
| 1. ค่าอุปกรณ์ตัวระบบผลิตก๊าซชีวภาพ | 15,000 |
| 2. ค่าดำเนินการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพ | 1,500 |
| 3. ค่าตรวจสอบวิเคราะห์น้ำเสียทางเคมี | 10,000 |
| 4. ค่าใช้จ่ายเครื่องมืออุปกรณ์การสร้างระบบ | 3,500 |
| รวมเป็นเงิน | 30,000 |

การคำนวณศักยภาพด้านพลังงาน

โดยค่าปริมาตรเทียบเท่าของพลังงานก๊าซชีวภาพที่ให้นำข้อมูลมาจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. ปี 2561

- ก๊าซชีวภาพเทียบเท่ากับก๊าซหุงต้ม

| รายการ | เทียบเท่ากับก๊าซหุงต้ม |
|---------------------------------------|--|
| ก๊าซชีวภาพ 1 m ³ . | เท่ากับก๊าซหุงต้ม 0.46 kg. |
| ก๊าซชีวภาพ 86.06 m ³ /day | เท่ากับก๊าซหุงต้ม 0.46 X 86.06 = 39.59 kg. |
| คิดเป็นเงินที่ประหยัด = 39.59 X 15.96 | เท่ากับ 631.88 Baht/day |

หมายเหตุ ราคาแก๊สหุงต้ม ณ. วันที่ 24 เมษายน 2567 ราคา 15.96 Baht /kg.

- ก๊าซชีวภาพเทียบเท่ากับน้ำมันดีเซล

| รายการ | เทียบเท่ากับน้ำมันดีเซล |
|---------------------------------------|--|
| ก๊าซชีวภาพ 1 m ³ . | เท่ากับน้ำมันดีเซล 0.6 L |
| ก๊าซชีวภาพ 86.06 m ³ /day | เท่ากับน้ำมันดีเซล 0.6 X 86.06 = 51.64 L |
| คิดเป็นเงินที่ประหยัด = 39.59 X 15.96 | เท่ากับ 1,545.98 Baht/day |

หมายเหตุราคาน้ำมันดีเซล ณ วันที่ 24 เมษายน 2567 ราคา 29.94 Baht /L

- ก๊าซชีวภาพเทียบเท่าน้ำมันเตา

| รายการ | เทียบเท่าน้ำมันเตา |
|---------------------------------------|---|
| ก๊าซชีวภาพ 1 m ³ . | เท่ากับน้ำมันเตา 0.55 L |
| ก๊าซชีวภาพ 86.06 m ³ /day | เท่ากับน้ำมันเตา 0.55 X 86.06 = 47.33 L |
| คิดเป็นเงินที่ประหยัด = 39.59 X 15.96 | เท่ากับ 993.99 . Baht /day |

หมายเหตุราคาน้ำมันเตา ณ วันที่ 24 เมษายน 2567 ราคา 21 Baht /L

- ข้อมูลเบื้องต้นระบบของผลิตก๊าซชีวภาพแบบฝากรอบลอยร่วมกับการกวนผสมด้วยก๊าซชีวภาพ

| รายการ | จำนวน | หน่วย |
|-------------------------------------|--------|---------------------|
| กำลังการผลิต | 180 | L |
| ปริมาตรน้ำเสียที่ใช้ในระบบ | 13.50 | L |
| น้ำเข้า (ค่าเฉลี่ย) COD | 20,000 | mg/L |
| ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ (ค่าเฉลี่ย) | 0.086 | m ³ /day |
| ประสิทธิภาพการกำจัด (ค่าเฉลี่ย) COD | 69.01 | % |
| สัดส่วนก๊าซมีเทน (ค่าเฉลี่ย) | 69.91 | % |
| ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสีย : HRT | 20 | days |

- ข้อมูลประเมินผลประโยชน์ในรูปของเงิน

| รายการ | จำนวน | หน่วย |
|--|------------|------------|
| กำหนดเงินทุนรวม | 20,000.00 | Baht |
| ปริมาณทดแทนก๊าซหุงต้ม | 39.59 | kgLPG/day |
| พลังงานจากก๊าซชีวภาพ (CH ₄ = 60%) มีค่าความร้อน 20.93 MJ/m ³ | 301,015.26 | MJ/year |
| ค่าใช้จ่ายไฟฟ้า (หน่วยละ 3.9 Baht) ใช้เดือนละ 4.41หน่วย | 206.38 | Baht /year |



ภาคผนวก ค
การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

บทความวิชาการที่ 1

ชื่อผู้แต่ง: Suradech Rungthong
Kittikorn Sasujit
Pakamon Pintana
Rotjapun Nirunsin

ชื่อบทความ: Effect of mixing to biogas production from wastewater of black soldier fly larvae (BSFL) processing in floating drum digester

ชื่อการประชุมวิชาการ: ASEAN Bioenergy and Bioeconomy Conference 2023 (ABB2023)

ชื่อหน่วยงานที่จัดประชุม: Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute (KAPI)

สถานที่จัดประชุม: Queen Sirikit National Convention Centre (QSNCC), Thailand

วันที่จัดประชุม: August 31, 2023

หน้าที่ตีพิมพ์: 72 – 82

No.1 Vol.6 September 2023 - August 2024

AIBIB 2023

The Proceeding of ASEAN Bioenergy
and Bioeconomy Conference

August 31st, 2023



ASEAN Bioenergy and Bioeconomy Conference 2023:

Sustainable Bioresources for Green Energy and Economy

August 31st, 2023

Queen Sirikit National Convention Centre (QSNCC)

Bangkok, THAILAND

ISSN: 2586-9280

Organized by

**Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement
Institute (KAPI),**

Kasetsart University, Bangkok, THAILAND

E-mail: conference.abb@gmail.com

Website: www.abbconf.kapi.ku.ac.th



**The Proceeding of
ASEAN Bioenergy and Bioeconomy Conference**

August 31st, 2023

Queen Sirikit National Convention Centre (QSNCC)

Bangkok, THAILAND

EDITED BY

SIRILUCK LIENGPAYOON
SUMAPORN KASEMSUMRAN
PATHAMA CHATAKANONDA
PILANEE VAITHANOMSAT



ORGANIZING COMMITTEE

| | | |
|--|---|-----------------------------------|
| President of Kasetsart University | Kasetsart University | Advisor |
| Vice President for Research and Creation | Kasetsart University | Advisor |
| Director of International Affairs Division | Kasetsart University | Advisor |
| Director of Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute | Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute (KAPI) | Advisor |
| Representative of Informa markets (Thailand) | Informa markets (Thailand) | Advisor |
| Mrs. Sumaporn Kasemsumran | KAPI | Chair |
| Mr. Chakrit Tachaapaikoon | King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) | Vice Chair |
| Mr. Chayanon Sawatdeenarunat | Chiang Mai Rajabhat University (CMRU) | Vice Chair |
| Mr. Thotsaphon Umamanit | KAPI | Committee and Secretary |
| Ms. Nattaporn Khanookon | KAPI | Committee and Assistant Secretary |
| Ms. Phornphimon Janchai | KAPI | Committee and Assistant Secretary |

Scientific Committee

| | |
|---------------------------|-------|
| Mrs. Sumaporn Kasemsumran | KAPI |
| Ms. Siriluck Liengprayoon | KAPI |
| Ms. Pathama Chatakanonda | KAPI |
| Ms. Rungsima Chollakup | KAPI |
| Ms. Patthra Pason | KMUTT |
| Ms. Jaruporn Rakmai | KAPI |
| Ms. Pattama Tongkok | KAPI |
| Ms. Chanaporn Trakuljae | KAPI |
| Ms. Antika Boondaeng | KAPI |
| Ms. Nattaporn Khanookon | KAPI |
| Ms. Prapassorn Rugthaworn | KAPI |
| Mr. Napat Kaewtrakulchai | KAPI |



Reception Committee

| | |
|-----------------------------|-------|
| Ms. Waraporn Apiwatanapawat | KAPI |
| Ms. Suneer Jungtheeranich | KAPI |
| Ms. Natedao Musigamart | KAPI |
| Ms. Araya Puechphol | KU |
| Ms. Rattiya Weanukul | KMUTT |
| Ms. Siriluck Parami | KMUTT |
| Ms. Prattana Ketbot | KMUTT |
| Ms. Jatuporn Chaiyut | KAPI |
| Mr. Tucksin Lerksamran | KAPI |
| Ms. Phornphimon Janchai | KAPI |

Registration Committee

| | |
|-------------------------|------|
| Ms. Udomlak Sukatta | KAPI |
| Ms. Lalita Khacharat | KAPI |
| Ms. Ketsaree Klinsukhon | KAPI |

Exhibition Committee

| | |
|----------------------------|-------|
| Mr. Kasem Haruthaithanasan | KAPI |
| Mr. Eakpong Tanavat | KAPI |
| Mr. Yutthana Banchong | KAPI |
| Mr. Keowpetch Lobyam | KAPI |
| Mr. Jakkapong Vongtayan | KAPI |
| Mr. Pornthep Yenpirun | KAPI |
| Ms. Apinya SingKhala | KMUTT |
| Ms. Pavina Badan | KAPI |

Information and Communication Committee

| | |
|-------------------------------|------|
| Mr. Warawut Suphamitmongkol | KAPI |
| Ms. Supansa Pakdeesrisontikul | KAPI |
| Mr. Thotsaphon Umamanit | KAPI |



Coordination Committee

| | |
|-------------------------|------|
| Mr. Thotsaphon Umamanit | KAPI |
| Ms. Pavina Badan | KAPI |
| Ms. Jirachaya Boonyarit | KAPI |
| Ms. Pussadee Sukpiboon | KAPI |

Editorial Board: ABB Conference 2023

| Name | Affiliation |
|---|---|
| Mr. Khongsak Pinyophusarerk | The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Australia |
| Assist.Prof.Dr. Udomsak Lertsuchatavanich | Faculty of Agriculture, Kasetsart University |
| Prof.Dr. Penjit Srinophakun | Faculty of Engineering, Kasetsart University |
| Asst.Prof.Dr. Gasidit Panomsuwan | Faculty of Engineering, Kasetsart University |
| Prof.Dr. Anupun Terdwongworakul | Faculty of Engineering, Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus |
| Dr. Pilanee Vaithanomsat | Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute (KAPI) |
| Dr. Rungsima Chollakup | Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute (KAPI) |
| Dr. Pathama Chatakanonda | Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute (KAPI) |
| Dr. Sumaporn Kasemsumran | Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute (KAPI) |
| Dr. Preeyanuch Srichola | Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute (KAPI) |
| Dr. Napat Kaewtrakulchai | Kasetsart Agricultural and Agro-Industrial Product Improvement Institute (KAPI) |
| Dr. Parncheewa Udomsap | National Energy Technology Center (ENTEC, NSTDA) |
| Dr. Chaiyanut Jirayupat | School of Engineering, Department of Applied Chemistry, The University of Tokyo |
| Dr. Chayanon Sawatdeenarunat | Chiang Mai Rajabhat University |
| Dr. Surachai Narrat Jansri | Chiang Mai Rajabhat University |



| Name | Affiliation |
|---|--|
| Assoc.Prof.Dr. Chakrit Tachaapaikoon | King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) |
| Assist.Prof.Dr. Patthra Pason | King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) |
| Assist.Prof.Dr. Rattiya Weanukul | King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) |
| Assoc.Prof.Dr. Kornkanok Aryusook | King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT) |
| Dr. Suteera Witayakran | Independent scholar |
| Asst.Prof.Dr. Weerawut Chaiwat | Faculty of Engineering, Mahidol University |
| Asst.Prof.Dr. Amnat Jarerat | Mahidol University Kanchanaburi Campus |
| Assoc.Prof.Dr. Apiluck Eiad-Ua | College of Material Innovation and Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang |
| Assoc.Prof.Dr. Sontisuk Teerachaichayut | Faculty of Food Industry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang |
| Prof.Dr. Sumate Chaiprapat | Faculty of Engineering, Prince of Songkla University |
| Assist.Prof.Dr. Rotjapun Nirunsin | School of Renewable Energy, Maejo University |
| Assoc.Prof.Dr. Wantida Chaiyana | Faculty of Pharmacy, Chiang Mai University |
| Assist.Prof.Dr. Nipaporn Ngernyuang | Chulabhorn International College of Medicine, Thammasat University |



The 7th ASEAN Bioenergy and Bioeconomy Conference (ABB2023): Sustainable Bioresources for Green Energy and Economy

August 31st, 2023

Queen Sirikit National Convention Centre (QSNCC), Bangkok, Thailand
With ASEAN Sustainable Energy Week 2023: August 30th - September 1st, 2023

The first ABB conference was organized in 2017 with focus on sustainable management and partnership. Since then, ABB conference promoted the exchange of knowledge of bioenergy and bioeconomy, providing opportunities to update database, status and situation in ASEAN countries. The conference has a strong participation of researchers, private sectors, business developers and policy makers and has been an important platform for a dialogue between academic and industrial scientists and technologists.

Objectives

- 1) To exchange and transfer useful information on biomass and bioenergy database, status and situation, new knowledge and technologies and innovation among ASEAN countries
- 2) To enhance sustainable biomass for energy production and utilization in ASEAN region to relieve environmental crisis and increase competitiveness of biomass for energy from ASEAN countries to the world market
- 3) To strengthen the biomass and bioenergy network within ASEAN countries

Conference Topics

Bioenergy

- Biomass, Biofuel, Biorefinery and other products, Carbon materials and applications, Feedstock production technology, Photovoltaic materials and Solar energy, Reactivity and catalysis, Sustainable solid biofuels, and The Related Topics

Bioeconomy

- Biocomposite, Biopharmaceutical, Bioprocess, Bioproduct, Plant factory, Precision agriculture, and The Related Topics

Organizing Committee

- Kasetsart Agricultural and Agro-industrial Product Improvement Institute (KAPI), Kasetsart University, Thailand
- Asian Development College for Community Economy and Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Mae Rim Campus, Thailand
- King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT), Thailand
- Informa Markets (Thailand) Company Limited



| Bioenergy Session (MR 109 CD) | | |
|-------------------------------|--|------|
| Chairman: | Dr. Chayanon Sawatdeenarunat | Page |
| 13.30 – 13.50 | EN-R001: Model study of small char furnace for biomass carbonization process Lalita Petchaihan School of Renewable Energy, Maejo University, Thailand | 16 |
| 13.50 – 14.10 | EN-R002: Prediction of atmospheric water generation with using vapor compression refrigeration Tirawat Wongsatiam School of Renewable Energy, Maejo University, Thailand | 23 |
| 14.10 – 14.30 | EN-R003: Biofuel and energy transition Robert Edyvean Department of Chemical and Biological Engineering, The University of Sheffield, United Kingdom | 34 |
| 14.30 – 14.50 | EN-R004: Performance of agricultural diesel engine with using pyrolysis oil blended biodiesel Phontakorn Liam Kloub School of Renewable Energy, Maejo University, Thailand | 45 |
| 14.50 – 15.10 | Coffee break and Poster session | |
| 15.10 – 15.30 | EN-R005: Hydrochar production from elephant dung via hydrothermal carbonization process Sasithorn Saipa Asian Development College for Community Economy and Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Thailand | 56 |
| 15.30 – 15.50 | EN-R006: Conversion of coffee husk charcoal into biomass fuel briquettes Suphanat Kaewtae Department of Renewable Energy, School of Renewable Energy, Maejo University, Thailand | 63 |
| 15.50 – 16.10 | EN-R007: Effect of mixing to biogas production from wastewater of black soldier fly larvae (BSFL) processing in floating drum digester Suradech Rungthong School of Renewable Energy, Maejo University, Thailand | 72 |
| 16.10 – 16.30 | EN-R008: Quantification of the bioethanol produced from coconut sap, young coconut husk juice, matured and young coconut water using simple fermentation-distillation process Dharell B. Siano Bataan Peninsula State University, Abucay, Bataan, Philippines | 83 |
| 16.30 – 17.00 | Announcement of Presentation Awards and Closing Bioenergy Session | |

EN-R007**Effect of mixing to biogas production from wastewater of black soldier fly larvae (BSFL) processing in floating drum digester**

Suradech Rungthong, Kittikorn Sasujit, Pakamon Pintana, Rotjapan Nirunsin*
School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand
*Corresponding author. E-mail: rotjapun@gmail.com

Abstract

The Black Soldier Fly Larvae (BSFL) processing is improved into an industrial scale. (Castro-Lopez, C. 2020) The BSFL processing also has a lot of wastewaters in the washing process which need to be treated by appropriate technology. Biogas technology is one of the efficient alternatives of wastewater treatments. This research aimed to study the effects of mixing in biogas production which operated by using biogas injection under the floating drum digester which was carried out in pilot scale. The working volume of biogas floating drum digester was 180 L. The substrate was BSFL washing process wastewater. The sludge from anaerobically digested pig manure was used as inoculum and the ratio of substrate to inoculum was 3:1. The Organic Loading Rate (OLR) was around 1 kgCOD/m³·day. The mixing system was operated by biogas injection 10 min/round every 6, 12, and 24 hrs. The results showed stirring conditions every 6 hours, which is the best condition with a high yield and an average methane content of 66.93%. Therefore, the biogas production system by the floating drum digester which cooperate mixed stirring with biogas injection for the BSFL efficiency increased the rate of biogas production by 13.76%. The results of this research can be taken into consideration when building a wastewater treatment system in biological production for industries with agricultural wastewater and as an alternative, renewable source of energy.

Keywords: Biogas Production, Black Soldier Fly Larvae Processing, Fermentation Pond of a Pig Farm, Floating Drum Digester



Introduction

Recently, Thailand is likely to develop the industry of Black Soldier Fly Larvae (BSFL) for increasing protein in feedstuff. The BSFL was brought to be an ingredient of feedstuff approximately 23%-45% to replace the protein in other feedstuffs. (Onthong, U. 2017) Bringing the BSFL could also increase the animal growth, the price of the feedstuff and has lower the cost of transformation than the others. A small business likes to raise the BSFL by feeding them soybean meal which was a by-product from the transformation industry of soybean meal (National Research Council of Thailand, NRCT). The process of feeding the soybean meal to the BSFL could also be done in a cement pond or a tray by mixing Black Soldier Fly eggs with feedstuff at an appropriate rate, which depends on each entrepreneur. The BSFL were allowed to digest the soybean meal until they were fully grown, around 7–14 days (Castrol-Lopez, 2020). After that, The BSFL were washed with a large amount of pure water to separate them from food and then take them into the transformation process to become feedstuff. The BSFL washing as mentioned above, caused wastewater that had a high organic content and a chemical oxygen demand (COD) of 25,000 mg/L (Kritthiraput et al., 2022). Therefore, to guarantee the growth of the BSFL transformation business at the industry level, the entrepreneur had to have wastewater management that had no effect on the environment. The treatment of the wastewater from industry was anaerobic biogas production, which was appropriate and popular for the industry that has high organic matters from the transformation. (Dortmans et al., 2017)

According to the related study, the result showed that the wastewater from the washing process of the BSFL, which was fed soybean meal, had the potential to produce methane gas. The research of Kritthiraput et al. (2020) studied the potential of methane gas from the washing process of the BSFL, which were fed soybean meal and intensely liquid inoculum from a pig farm biogas production system. The ratios of the soybean meal and the inoculum were 3:1, 1:1, and 1:3. The volatile solid mass of the fermentation volume of 400 mL was found to be 3:1, which was the best ratio. The ratio of 3:1 could also produce methane gas at approximately 57.14±1.05% and have a cumulative biogas production volume of 44.2.16±0.23 mL. This research also studied the semi-continuous-operation pilot-scale biogas production system for expanding the biogas system of a small business. The result of this study was that floating drum digesters had a high volume of catchment and were durable for the change of organic matters in wastewater (Ramatsa, 2014), which were appropriate to the wastewater that has different COD in each round of filling. The Completely Stirred Tank Digester (CSTR) was the system



that mixed stirring microorganisms with food thoroughly inside the tank. The study also found that mixed stirring by gas (Bergamo et al., 2020) could increase the potential of biogas production, but the process still needed to study the appropriate ratio of stirring. Hence, the development of biogas production from wastewater from the washing process of the BSFL, which were fed soybean meal, had to develop the floating cap biogas production together with the mixed stirring biogas. This step led to wastewater treatment, which has a positive effect on business and the environment and could become a source of renewable energy in the form of heat or electricity. In the future, this positive effect will decrease the cost of protein production in high-quality feedstuffs from the BSFL.

Materials and Methods

Materials and feedstock

The materials that were used in this study were the wastewater from the BSFL, which was fed soybean meal. The wastewater was from the agricultural industry area in Hang Chat district, Lampang, Thailand. The wastewater from the washing process of the BSFL would be collected in a plastic tank and used for research and analysis of the parameters of the wastewater and the inoculum as shown in Table 1. The inoculum that was used in this experiment was an intensely sludge from the anaerobic treatment system of a pig farm. The experiment set the ratio between materials and inoculum at 3:1 (Kritthiraput et al. 2020).

Table 1 The Wastewater and the Inoculum parameters.

| Parameter | COD (mg/l) | VFA (mL) | Alk (mL) | TS (mg/L) | VS (mg/L) | pH |
|------------|------------|----------|----------|-----------|-----------|------|
| wastewater | 25,000 | 2,116.50 | 1,119.10 | 11,257.97 | 7,017.16 | 6.56 |
| inoculum | 63,139.35 | 1,042.17 | 4,685.76 | 72,682.54 | 63,425.68 | 7.75 |

The feedstock was prepared and then loaded into the digester, as can be seen in the Fig. 1. The inoculum from the anaerobic fermentation pond of a pig farm (volume 45 L) was given pretreatment inside the digester tank experiment for 7 days. After that, the wastewater was added to the digester tank which had a total volume of 180 L and then the system was processed to add the wastewater inside at a rate of 5.70 L per day.





(a.) The BSFL washing process wastewater (b.) Sludge from pig farm's biogas system fed by soybean meal

Fig 1. (a.) substrate and (b.) Inoculum

Digester material and design

The process of the research was the potential evaluation in biogas production of the floating drum digester and the integrated mixed stirring with biogas as in the Fig 2. This integrated digester machine was developed to be a new prototype for treating wastewater from the washing process of the BSFL, which was fed soybean meal. The main material was polyethylene plastic (PE). The components of the tank included the first part: the outside of the tank and the cover for the gas storage which was the system that floated up and down depending on the gas volume and protected the gas leakage by connecting the water and gas pipe to the vacuum pump for circulating biogas in mixed stirring materials and inoculum. the air flow rate through the diffuser was 70 l/min. The second part: the inside fermentation tank contained the working volume at 180 L. This second part also connected an overflow pipe and a sludge discharge pipe for collecting the example and analysing the outbound parameters. Further, the diffuser or sprayer was placed in the middle of the water tank with a sludge circulating flow rate of 0.003 m/s in the downstream reactor. (Anderson et al., 2014).

Experimental procedures

The experimental design for studying the result of stirring by biogas per potential biogas production of the wastewater by the washing process of the BSFL was divided into 3 conditions, which were to stir every 6, 12, and 24 hrs. Each round would spend 10 minutes per round, and every condition would add the semi-continuous wastewater one time per day at the same time at the Organic Loading Rate (OLR) of 1.0-1.5 kgCOD/m³.day. The period of collection (Hydraulic Retention Time, HRT) was 15 days and conducted in the environment



temperature. While the system was operating, the parameters were kept with the sample of wastewater for analyzing The COD of various effluents was measured by the potassium dichromate method, and total VFA and ALK were measured in the physicochemical process. All the wastes were air-dried prior to the examinations. Total solids (TS) and moisture content, as well as volatile solids (VS) and ash contents, of the investigated materials were determined gravimetrically, first by drying at 105 °C and then by igniting at 550 °C, following the standard methods (APHA). Before and after the operation system and the record of biogas volume with the collection of the gas sample, which happened every 2 days. This process was for steady analyzing the biogas content by a biogas analyzer (GFM 409 series, Gas Data, United Kingdom) and then, recording the last value to guarantee the potential of a floating drum digester with biogas injection of the wastewater treatment from the washing process of the BSFL in this research.

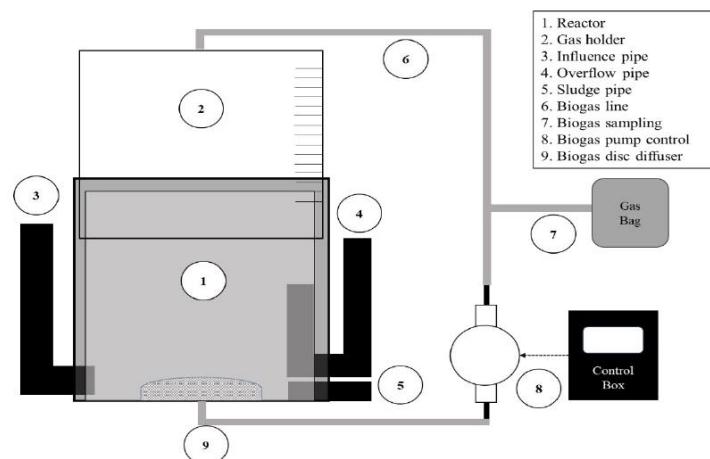


Fig. 2 The design of the floating drum digester with biogas injection.

Result and discussion

This study was about finding the ratio of organic matter stirred for biogas production by the floating drum digester with biogas mixed stirring which was integrated to be developed to the new origin system. This new system was for wastewater treatment from the washing process of the BSFL which were fed soybean meal.



Physiochemical of the wastewater and the inoculum

The results of the analysis of the appearance and chemistry of the wastewater from the washing process of the BSFL which was fed soybean meal showed that the qualities of the wastewater were muddy brown, stench, and suspended sediment. Most of the soybean meal digested by the BSFL consisted of 45% protein (DIT, 2018) which was the nutrient of the biogas production. The COD of the wastewater was approximately 25,000 mg/L. The COD value was for the semi-continuous system. The pH of 6.92 was the appropriate microorganism rate to produce methane, which was 6.8–7.2 (Pilarska et al., 2019). The VFA/ALK ratio was 2250.29 mg/L. Using the Organic Loading Rate (OLR) of 1 KgCOD/m³.day was found that the ratio mentioned was inappropriate as the raw material of biogas production. Therefore, using highly potent organisms from the biogas production would increase the efficiency of the wastewater treatment. This research used the sludge as the inoculum from the pig farm biogas, which had the quality of liquid mixed with small black sediment. Moreover, when the process passed through the anaerobic biogas decomposition, the process had the potential to be a bacteria inoculum that could continuously maintain the stability of the system.

The operation parameters analysis

The study of the efficiency of the pilot scale biogas production system was necessary to study the system stability by studying the parameter values, which included VFA/ALK and pH. The VFA/ALK and pH were also parameters that could indicate the preliminary methanogen bacteria's work. The result of adding wastewater from the washing process of the BSFL, which were fed soybean meal at an OLR of 1 kgCOD/m³.day. All 60 operation days found that the added wastewater had a pH of 6.14–7.58, which was the appropriate rate. When the organic decomposition happened, the pH of 8.0–8.4 (Latifi et al., 2019) was stable. Moreover, the volume of organic acid in the form of acetic acid should not exceed 2,000 mg/L which had the appropriate proportion to base in the form of limestone (CaCO₃). This organic acid had a VFA/ALK of not over 0.8 (Pilarska et al., 2019) which would produce less buffer in the system, so the microorganism could continuously produce methane. The sample collection of the overflow from the floating drum digester with biogas injection system found the potential of the organic acid and base pretreatment from wastewater into the system, and the VFA/ATK of 1.42-2.00 was changed to 0.17 within 3 days. The VFA/ALK of the stirring period every 6, 12, and 24 hrs had the VFA/ALK ratios of 0.13, 0.07, and 0.07 consecutively (Pilarska et al., 2019). This ratio also supports the appropriate growth state of methanogenic bacteria in both inoculum and raw material (Saipa et al., 2020) which showed that a floating



drum digester with a biogas injection system did not gather the organic matters in the system and had the stability of the wastewater treatment from the washing process of the BSFL.

Effect of mixing to removal efficiency

The removal efficiency of organic matter in the system could be analyzed using COD removal, TS removal and VS removal. The removal efficiency was the percentage difference between the initial and final values of COD, TS, and VS. This research studied the COD removal efficiency of the biogas production every 5 days. The COD removal was calculated the TS removal efficiency, and the VS removal efficiency of the sludge that was out of the system in 20th, 40th and 60th of the experiment or the end of each ratio of the biogas mixed stirring. In Fig. 3, the figure showed the efficiency of the average organic removal of each mixed stirring period. The COD, TS and VS removal efficiency showed that the biogas mixed with stirring every 6 hrs had the best efficiency of 66.70%, 76.55% and 84.06% respectively. The stirring every 12 hrs was 50.59%, 66.62% and 70.8% respectively. The stirring every 24 hrs was 45.60%, 60.62% and 63.08% respectively. Due to the research of Mahmoodi-Eshkaftaki and Ebrahimi (2019), the increment of the mixed stirring could decrease the problem of the floating sediment layer which is produced from the components of wastewater. The mixed stirring in the digester tank could mix the organic matter, especially the protein from the soybean meal with the microorganisms from the sludge inoculum of the pig farm biogas production (Kritthiraput et al., 2022; Saipa et al., 2020). After mixing thoroughly, the microorganism was digested from the large molecule to the small molecule and became acetic by the Acetogenesis bacteria. Thereafter, acetic acid was digested to produce more methane gas by methanogenic bacteria

Effect of mixing to biogas production potential

For the study of the biogas production result of the stirring ratio of every 6, 12, and 24 hrs, respectively, 60 experimental days could be divided into three periods of 20 days each. The first phase was the mixed stirring experiment, in which biogas was stirred every 6 hrs. The second phase was the mixed stirring experiment, in which biogas was stirred every 12 hrs. The third phase was the mixed stirring experiment, in which biogas was stirred every 24 hrs. Fig. 4 showed the relation between the volume of biogas production and the daily methane proportion. From the sample collection of the amount of the daily biogas production shown in Fig. 4 could be seen that the proportion of methane gas that was produced by biogas in every 6 hrs had a methane gas proportion of 66.93%. This methane proportion could produce an



average of 110.38 L/day at a cumulative biogas volume of 1,214.17 L. The mixed stirring by the biogas every 12 hrs had an average methane proportion of 109.02 L/day at a cumulative biogas volume of 1,199.20 L. The last sample collection was the mixed stirring by the biogas every 24 hrs, which had an average methane proportion of 58.55% an amount of cumulative biogas of 117.25 L/day, and a cumulative biogas volume of 1047.08 L/day. The inside of the reactor was stirred thoroughly, probably This allowed microorganisms or bacteria to come into contact with organic matter more and more thoroughly. The efficiency of the system in eliminating COD, TS, and VS was increased by up to 60%. (Saipa, 2020).

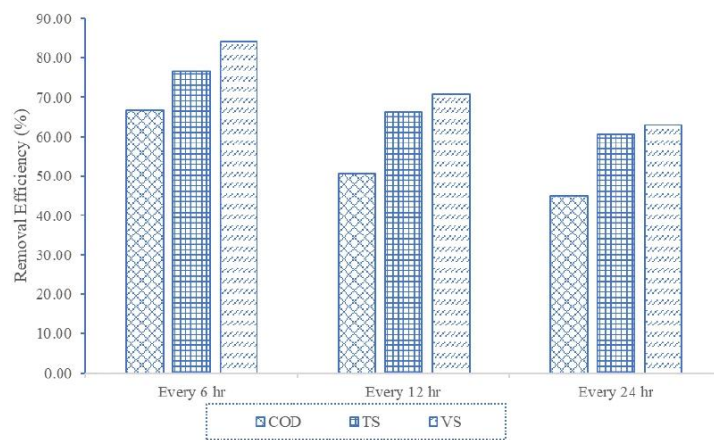


Fig. 3 The maximum removal efficiency of the mixing every 6, 12 and 24 hrs.

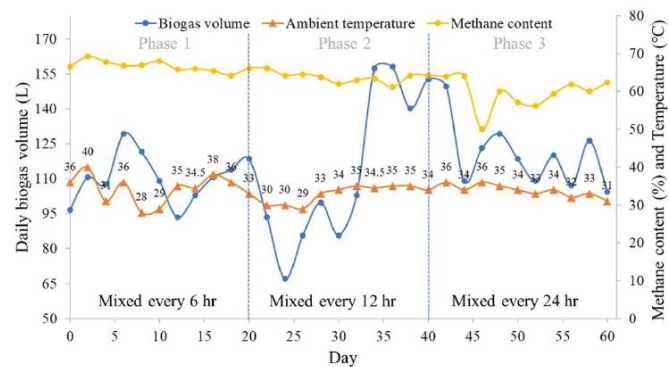


Fig. 4 Relation between the biogas production, the ambient temperature, and daily methane content.



This result indicated that in every ratio of the organic substance mixed, stirring could produce the proportion that could get a high volume of biogas and, also had the organic substance pretreatment for easily releasing methane into the system and the organic matter decomposition. When considering the methane proportion and the amount of biogas that was cumulatively produced as Fig 4, at the mixed stirring ratio of biogas in every 6 hrs could produce the highest methane proportion of 69.2% and the highest cumulative biogas of 1214.17 L. When the system's mixed stirring ratio was increased, the within ratio had a frequency of 50%, which was consistent with the research. the direct variation with the proportion of the methane gas. This showed the efficiency of the organic matter's decomposition. Therefore, within the system that had the mixed stirring, the organic matter and microorganisms were thoroughly mixed in the biogas production. The result of the stirring of biogas led to the elimination of the amount of biogas production per COD. Which was according to the research (Krishania et al. 2016) that had floating drum digester biogas production had better efficiency. Within the system, there were enough microorganisms from the beginning of the system until the stable period.

Conclusion

This research studied the period of mixed stirring circulatory sludge by biogas, which affected the pretreatment system by the floating drum digester, using the raw material of wastewater from the washing process of the BSFL, using the ratio of raw material per inoculum at 3:1 by volume. This experiment divided the condition into 3 parts and within the mixed stirring circulatory sludge every 6, 12, and 24 hours, which was 10 minutes per round. From the study, the mixed stirring circulatory ratio every 6 hrs had higher efficiency than the others because of the average methane proportion of 66.93% and the capability of the average biogas production of 110.38 L/day, which had a cumulative biogas volume of 1,214.17 L. The COD, TS, and VS removal efficiencies were 66.70%, 76.55%, and 84.06%, respectively. All of these showed the efficiency of organic matter. When the system could double the mixed stirring ratio, the system could treat the wastewater from the washing process of the BSFL, which was fed soybean meal by the biogas production. Biogas production could be the guideline for wastewater management to produce renewable energy. This guideline could be used for cost reduction in industrial plant production.



Acknowledgements

This research was supported by the School of Renewable Energy under the scholarship for manufacture and develop graduate potential in renewable energy in ASEAN at graduate level and scholarship by Maejo Alammni at Maejo University.

References

- Bergamo, U., Viccione, G., Coppola, S.A., Meda, L.A., Gualtieri, C. 2020. Analysis of anaerobic digester mixing: comparison of long shafted paddle mixing vs gas mixing. *Water Sci. Technol.* 81: 1406–1419.
- Castro-Lopez, C., Santiago-Lopez, L., Vallejo-Cordoba, B., Gonzalez-Cordova, A.F., Liceaga, A.M., Garcia, H.S., Hernandez-Mendoza, A. 2020. An insight to fermented edible insects: A global perspective and prospective. *Food Res Int.* 137: 109750.
- Dortmans, B.M.A., Diener, S., Verstappen, B.M., Zurbrugg, C. 2017. *Black Soldier Fly Biowaste Processing - A Step-by-Step Guide*, 1st ed. Switzerland: Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- Gary, A.A., Anil, K., Taylor, S., Stephen, P.G. 2014. Review of Flow Patterns in A Column Reactor for Photobioreactor Application. *Proceedings of ASME 2014 8th International Conference on Energy Sustainability & Fuel Cell Science, Engineering and Technology*. Boston, MA.
- Krishania, M., Vijay, V.K., Chandra, R. 2016. Performance evaluation of various bioreactors for methane fermentation of pretreated wheat straw with cattle manure. *Green Process. Synth.* 5: 113–121.
- Kritthiraput, P., Sasujit, K., Pintana, P., Sawatdeenarunat, C., Promwong, W., Nirunsin, R. 2022. Biogas Production Potential from Black Soldier Fly Larvae Washing Process Wastewater. In: *Proceeding of The 34th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology and International Conference “Sustainable Bioeconomy: Challenge and Opportunities” (TSB2022)*. Thailand, pp. 193–204.
- Latifi, P., Karrabi M., Danesh, S. 2019. Anaerobic co-digestion of poultry slaughterhouse wastes with sewage sludge in batch-mode bioreactors (effect of inoculum-substrate ratio and total solids). *Renew. Sust. Energ. Rev.* 107: 288–296.
- Onthong, U., Juntarachat, N. 2017. Evaluation of Biogas Production Potential from Raw and Processed Agricultural Wastes. *Energy Procedia.* 138: 205–210.



- Pilarska, A.A., Pilarski, K., Wolna-Maruwka, A., Boniecki, P., Zaborowicz, M. 2019. Use of confectionery waste in biogas production by the anaerobic digestion process. *Molecules*. 24: 1.
- Ramatsa, I.M., Akinlabi, E.T., Madyira, D.M., Huberts, R. 2014. Design of the Bio-digester for Biogas Production: A Review. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2014 Vol II WCECS 2014, 22-24 October, 2014, San Francisco, USA*.
- Saipa, S., Cheunbarn, T., Homduang, N., Chanathaworn, J., Nirunsin, R. 2021. The Study of the Mixing Duration Time and Recirculation Rate Effect to Biogas Production from Sweet Corn Waste by Dry Fermentation Process. *CRMA Journal*. 18(87): 87–105.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA. 2005.



ประวัติผู้วิจัย

| | |
|-----------------|---|
| ชื่อ-สกุล | นายสุรเดช รุ่งทอง |
| เกิดเมื่อ | 17 กันยายน 2530 |
| ประวัติการศึกษา | พ.ศ. 2564 - ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมพลังงานทดแทน) มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ พ.ศ. 2564 วิศวกรรมอนุรักษ์พลังงานบัณฑิต มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ พ.ศ. 2549 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง (ไฟฟ้ากำลัง) มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา กรุงเทพมหานคร |
| ประวัติการทำงาน | พ.ศ. 2558-2560 หัวหน้าควบคุมงานระบบไฟฟ้า บริษัท ซีเอ็ม บิลด์ จำกัด พ.ศ. 2555-2557 หัวหน้าควบคุมงานระบบไฟฟ้า บริษัท นิวอิเล็กทรอนิกส์ เทคโนโลยี |

