

การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย



ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2566

การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย



ปรียา กฤตธิรพุทธิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาระบบสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย

ปรียา กฤตธีรพุทธิ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติกร สาสุจิตต์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.ภคมน ปินตานา)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.ชยานนท์ สวัสดิ์นันท)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รองอธิการบดี

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย
ชื่อผู้เขียน	นางสาวปรียา กฤตถิรพุทธิ
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรธม นริญศิลป์

บทคัดย่อ

การแปรรูปนอนแมลงวันลายเพื่อเป็นโปรตีนอาหารสัตว์คุณภาพสูงในประเทศไทย กำลังขยายสู่ระดับอุตสาหกรรม และจำเป็นต้องมีการจัดการน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตอย่างเหมาะสมเพื่อไม่ให้ส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นไปตามกฎหมายของกรมควบคุมมลพิษ ซึ่งเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการจัดการน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน (BMP) ของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย โดยการทดลองแบบกะปรับใช้วิธีการศึกษาจากมาตรฐาน VDI 4630 ที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อแตกต่างกัน ได้แก่ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยกรัมของแข็งระเหยง่าย ซึ่งวัตถุดิบแบ่งเป็น 2 ชนิด ได้แก่ น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา (WWI) และเลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง (WWS) และใช้สารชั้นเคลือบจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรเป็นหัวเชื้อ ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงมีโซฟิลิกส์ 35 ± 2 °C หลังจากนั้นจึงเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดไปขยายผลต่อในการศึกษาแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซมีเทนเบื้องต้น ได้แก่ COD TS VS VFA/ALK และ pH เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในการทดลอง ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดและวัตถุดิบที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด คือ อัตราส่วน 1:1 ของน้ำเสีย WWI (WWI-11) และอัตราส่วน 3:1 ของน้ำเสีย WWS (WWS-31) ตามลำดับ โดยมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ $415.39 \text{ NmL}_{\text{CH}_4}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ และ $215.34 \text{ mL}_{\text{CH}_4}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์มากที่สุดใกล้เคียงกัน โดยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายของอัตราส่วน WWI-11 เท่ากับ 60.24%, 14.49% และ 23.76% ตามลำดับ สำหรับ WWS-31 เท่ากับ 66.58%, 16.51% และ 22.63% ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความเหมาะสมในระดับอุตสาหกรรมพบว่า ความนิยมในการใช้ถั่วดาวอินคาเป็นอาหารเลี้ยงนอนแมลงวันลายลดลงเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของกากถั่วดาวอินคามีความแข็ง ย่อยยากกว่ากากถั่วเหลือง นอกจากนี้แหล่งจัดซื้อกากถั่วเหลืองปริมาณมากเพื่อรองรับการเลี้ยงระดับอุตสาหกรรมสามารถทำได้ง่ายกว่าแหล่งผลิตกากถั่วดาวอิน

คา ดังนั้นการศึกษาแบบกึ่งต่อเนื่องจึงเลือก WWS-31 เพื่อขยายผลต่อให้ผู้ประกอบการสามารถนำไปปรับใช้ต่อไปได้ในปัจจุบัน ซึ่งผลการศึกษาลักษณะการเติมน้ำเสียแบบกึ่งต่อเนื่องที่ OLR $1 \pm 0.57 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ ระยะเวลาพักเก็บ 20 days ปริมาตรการหมัก 4 L พบว่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่อวันเฉลี่ย $29.79 \text{ NmL}/\text{gCOD}_{\text{substrate}}$ ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ $566.01 \text{ NmL}/\text{gCOD}_{\text{substrate}}$ สามารถผลิตก๊าซมีเทนสัดส่วนคงที่สูงสุด $71.39 \pm 1.01\%$ และมีปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ $16,674.63 \pm 19.30 \text{ NmL}$ มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีต่อวันเฉลี่ย $81.10 \pm 12.30\%$ และประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายตลอดระยะเวลาพักเก็บเท่ากับ 33.56% และ 32.88% ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายร่วมกับหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนและสามารถนำไปขยายผลต่อในระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดใหญ่สำหรับอุตสาหกรรมเพื่อบำบัดน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพและนำก๊าซชีวภาพกลับไปใช้เป็นพลังงานทดแทนก๊าซหุงต้มในกระบวนการแปรรูปนอนแมลงวันลายต่อไป

คำสำคัญ : ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน, น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย, การบำบัดน้ำเสีย, การหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง

Title	BIOGAS PRODUCTION OF WASTEWATER FROM BLACK SOLDIER FLY LARVAE WASHING PROCESS
Author	Miss Preeya Kritthiraput
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Rotjapun Nirunsin

ABSTRACT

The Black Soldier Fly Larvae (BSFL) processing for producing high-quality animal feed is expanding on an industrial scale in Thailand. Suitable management of wastewater in the production process is essential to avoid environmental harm and comply with the regulations of the Department of Pollution Control. Biogas production technology is efficient for industrial wastewater treatment. This research aims to study the Biochemical Methane Potential (BMP) of the BSFL washing process wastewater. The research methodology of the batch study applied from the VDI 4630 standard at various substrate-to-inoculum ratios, specifically 3:1, 1:1, and 1:3 by $gVS_{\text{substrate}}$. The two types of substrates were wastewater from the BSFL washing process fed by Inca peanut meal (WWI) and fed by soybean meal (WWS), and the inoculum was used along with sludge from a swine farm biogas production system. The mesophilic temperature was controlled at 35 ± 2 °C. And then, the most suitable ratio for the batch study was selected for the semi-continuous study. This research analyzed parameters related to biogas and methane production, including COD, TS, VS, VFA/ALK, and pH, to investigate factors of methane production potential in the experimental study. The results showed the optimal substrate and inoculum ratio for high methane production were a 1:1 ratio of WWI (WWI-11) and a 3:1 ratio of WWS (WWS-31). The cumulative methane yields of WWI-11 and WWS-31 were $415.39 \text{ NmL}_{\text{CH}_4}/gVS_{\text{substrate}}$ and $215.34 \text{ NmL}_{\text{CH}_4}/gVS_{\text{substrate}}$, respectively. Both setups showed similar organic matter removal efficiencies, with WWI-11 had removal efficiencies of 60.24%, 14.49%, and 23.76% for COD, TS, and VS, respectively, and WWS-31 had

removal efficiencies of 66.58%, 16.51%, and 22.63%, respectively. Considering industrial suitability, the preference for Inca peanut meal as a larval feedstock had decreased due to its physical characteristics, making it less digestible than soybean meal. Additionally, soybean meal was more readily available in larger quantities to support industrial-scale larval rearing. Therefore, the study selected WWS-31 for further investigation, demonstrating that the semi-continuous study. The result of the semi-continuous study at an OLR of $1 \pm 0.57 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ with a retention time of 20 days. The working volume was 4 L. The result showed that the average biomethane production rate per day was $29.79 \text{ NmL}/\text{gCOD}_{\text{substrate}}$ and a cumulative biomethane volume was $566.01 \text{ NmL}/\text{gCOD}_{\text{substrate}}$ at the highest stable biomethane content was $71.39 \pm 1.01\%$. And, the cumulative biogas production was $16,674.63 \pm 19.30 \text{ NmL}$. The system showed a daily average COD removal efficiency was $81.10 \pm 12.30\%$ and an overall solid removal efficiency of 33.56% and 32.88% for total solid and volatile solids, respectively. In conclusion, the biomethane production of wastewater from the BSFL washing process and sludge inoculum from a swine farm biogas production system had the potential to produce high-quality methane. This research can be expanded for application in large-scale biogas systems in the industry for efficient wastewater treatment and utilization of biogas as an alternative energy source to BSFL processing.

Keywords : Biochemical Methane Potential, BSFL washing process wastewater, Wastewater treatment, Semi-continuous operation

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง “การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย” ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีจากความกรุณาอย่างยิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤกษ์ อักกะรังสี ประธานกรรมการสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรธณ นิรัฐศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักที่คอยชี้แนะแนวทางการศึกษางานวิจัยตั้งแต่กระบวนการคิดในการออกแบบงานวิจัย การวางแผนงานวิจัย การแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการทำงานวิจัย รวมถึงระหว่างการศึกษาหลักสูตรปริญญาโท คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษาทักษะการทำงาน และทักษะการใช้ชีวิตเพื่อให้สามารถทำการศึกษาวิจัยให้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งถึงความกรุณาดังกล่าว และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติกร สาสุจิตต์ อาจารย์ ดร.ภคมน ปินตานา และอาจารย์ ดร.ชยานนท์ สวัสดิ์นฤนาท ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ การพัฒนางานวิจัยให้มีความถูกต้องเหมาะสม และเป็นประโยชน์ในการวางแผนงานวิจัยครั้งนี้ให้ถูกต้องตามหลักการและอยู่ในขอบเขตที่เหมาะสมต่อระยะเวลาการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.วงศ์พันธ์ พรหมวงศ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ระพีพันธ์ แดงตันกี และ บริษัท สยาม ไบโอ อินเซ็คท์ จำกัด สำหรับการสนับสนุนความรู้ด้านการเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย สนับสนุนความรู้ พื้นที่ และวัตถุดิบที่ใช้สำหรับเลี้ยงหนอนแมลงวันลายเพื่อนำไปศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณแหล่งทุน โครงการผลิตและพัฒนาศกยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนระดับบัณฑิตศึกษา จากคณะวิทยาลัยพลังงานทดแทน และทุนศิษย์ก้นกุฏิบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปีงบประมาณ 2563 ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัย

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทั้งบุคคลที่ได้กล่าวถึงและไม่ได้กล่าวถึง และขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง สำหรับครอบครัว เพื่อน ๆ ที่สนับสนุนทุกย่างก้าวโดยไม่กดดัน คอยให้กำลังใจ สนับสนุนค่าใช้จ่ายจำเป็นจนสามารถสำเร็จตามวัตถุประสงค์ หากมีสิ่งใดบกพร่อง ผู้วิจัยขอน้อมรับและขอภัยมา ณ โอกาสนี้

ปรียา กฤตกรพิสุทธิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
อักษรย่อ และสัญลักษณ์.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ที่มาและความสำคัญ.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
ขอบเขตของการวิจัย.....	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร.....	6
แนวคิด ทฤษฎี.....	6
1. การผลิตก๊าซชีวภาพ.....	6
1.1 ความหมายและกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	6
1.2 เทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพ.....	8
1.2.1 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Modified Covered Lagoon.....	8
1.2.2 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกวนสมบูรณ์.....	9
1.2.3 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตรึงฟิล์ม.....	10
1.2.4 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบผสมผสาน.....	11

1.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ	12
1.3.1 สารอาหาร.....	12
1.3.2 อุณหภูมิ	12
1.3.3 ค่าความเป็นกรดต่าง	13
1.3.4 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายและสภาพความเป็นต่าง	14
1.3.5 การกวนผสม	14
1.4 รูปแบบการหมักแบบไร้อากาศ.....	14
1.4.1 การหมักแบบกะ	15
1.4.2 การหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง.....	15
1.4.3 การหมักแบบต่อเนื่อง.....	15
1.5 การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนตามมาตรฐาน VDI 4630.....	15
1.5.1 วิธีการทดลอง.....	16
1.5.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ก่อนและหลังออกจากระบบ	16
2. แผลงวันลาย	18
2.1 ลักษณะและประโยชน์ของแผลงวันลาย.....	18
2.2 กระบวนการเลี้ยงหนอนแผลงวันลาย.....	19
3. กากถั่วเหลือง.....	20
3.1 ที่มาของกากถั่วเหลือง.....	20
3.2 ชนิดของกากถั่วเหลือง	21
4. กากถั่วดาวอินคา	22
4.1 ที่มาของกากถั่วดาวอินคา	22
4.2 การใช้ประโยชน์จากกากถั่วดาวอินคา.....	23
การตรวจสอบเอกสาร.....	24
1. การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียประเภทโปรตีนสูง	24

2. การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง	31
3. การศึกษาศักยภาพหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	33
สรุปกรอบแนวคิดในการทำงานวิจัย	37
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	38
อุปกรณ์.....	38
1. อุปกรณ์สำหรับการทดลองผลิตก๊าซมีเทนแบบควบคุมอุณหภูมิ	38
2. อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพ	39
วิธีการ.....	43
1. การศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนแบบกะ	43
1.1 ขั้นตอนสำหรับการเตรียมการทดลองแบบกะ	44
2. การศึกษาอัตราการระบวรทุกสารอินทรีย์สำหรับการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง	45
3. วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์	47
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	48
ลักษณะของวัตถุดิบและหัวเชื้อ	48
1. ลักษณะวัตถุดิบน้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง และเลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา	48
2. ลักษณะหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร	50
ผลการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนแบบกะ.....	52
1. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของการทดลองแบบกะ.....	52
2. ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายของการทดลองแบบกะ ...	54
3. อัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่าง และค่าความเป็นกรดต่างในการ ทดลองแบบกะ.....	58
4. ผลของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียจาก กระบวนการล้างนอนแมลงวันลายแบบกะ.....	61
ผลการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง	68

1. ผลการคำนวณอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จากอัตราส่วนที่เหมาะสมในการศึกษาแบบกะ	69
2. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี	70
3. ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่าย	71
4. การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างและอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่างระหว่างการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง	73
5. ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง	75
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ	80
สรุปผลการวิจัย	80
ข้อเสนอแนะ	82
บรรณานุกรม	83
ภาคผนวก	91
ภาคผนวก ก การเตรียมการทดลอง	92
1. การเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตหนองแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง	93
2. การเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตหนองแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา	94
3. การเก็บตัวอย่างหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร	96
4. ภาพประกอบการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่อง	96
ภาคผนวก ข ตารางการบันทึกผลการทดลอง	99
1. ตารางคำนวณการเตรียมวัตถุดิบและหัวเชื้อในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน	100
2. การบันทึกผลการทดลอง	101
ภาคผนวก ค การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ	107
บทความวิชาการที่ 1	108
บทความวิชาการที่ 2	130
ประวัติผู้วิจัย	144

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 องค์ประกอบของน้ำเสีย และเทคโนโลยีการจัดการน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูป ผลิตภัณฑ์นมและถั่วเหลือง	24
ตารางที่ 2 ศักยภาพในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศของ WPI เจลาติน และ อัลบูมิน	29
ตารางที่ 3 อุปกรณ์สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนแบบกะ	39
ตารางที่ 4 อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพ	41
ตารางที่ 5 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพของการทดลองแบบกะและกึ่งต่อเนื่อง	47
ตารางที่ 6 องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบและหัวเชื้อ	48



สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 สำรวจและวิเคราะห์โจทย์โครงการวิจัยในสถานประกอบการจริง	2
ภาพที่ 2 บ่อเลี้ยงหนอนแมลงวันลายขนาดใหญ่.....	3
ภาพที่ 3 ลักษณะการทิ้งน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลาย.....	3
ภาพที่ 4 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Modified Covered Lagoon.....	8
ภาพที่ 5 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกวนสมบูรณ์.....	9
ภาพที่ 6 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตรึงฟิล์ม	10
ภาพที่ 7 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบผสมผสาน	11
ภาพที่ 8 ช่วงอุณหภูมิจนในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ.....	13
ภาพที่ 9 วงจรชีวิตของแมลงวันลาย.....	18
ภาพที่ 10 ลักษณะของถั่วเหลือง (ซ้าย) และกากถั่วเหลือง (ขวา).....	21
ภาพที่ 11 ลักษณะของถั่วดาวอินคา (ซ้าย) และกากถั่วดาวอินคา (ขวา).....	23
ภาพที่ 12 ผลการผลิตก๊าซมีเทนระหว่างกากถั่วเหลืองและเซลลูโลส.....	27
ภาพที่ 13 ความเข้มข้นเข้าระบบและออกระบบของค่าซีไอดีและอัตราการเติมโดยปริมาตร (VLR). 28	
ภาพที่ 14 ภาพรวมการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของการหมักร่วมระหว่างเศษวัสดุเหลือทิ้ง จากการตัดหญ้า เศษอาหาร และสารชั้นเหลวจากมูลสุกร	34
ภาพที่ 15 กรอบแนวคิดในการทำวิจัย	37
ภาพที่ 16 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของการทดลองแบบกะ	39
ภาพที่ 17 องค์ประกอบชุดถังปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง.....	45
ภาพที่ 18 น้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง	49
ภาพที่ 19 น้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา	50
ภาพที่ 20 สารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร	51
ภาพที่ 21 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีไอดีแต่ละอัตราส่วนของการทดลองแบบกะ	53
ภาพที่ 22 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของการทดลองแบบกะ	55
ภาพที่ 23 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายในการทดลองแบบกะ	57
ภาพที่ 24 ค่าความเป็นกรดต่าง และอัตราส่วนกรดอินทรีย์ต่อสภาพความเป็นต่างของน้ำเสียจาก กระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายในการทดลองแบบกะ	59

ภาพที่ 25 การผลิตก๊าซชีวภาพรายวันของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายในการทดลองแบบกะ	61
ภาพที่ 26 การผลิตก๊าซชีวภาพสะสมของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายในการทดลองแบบกะ	63
ภาพที่ 27 องค์ประกอบก๊าซมีเทนรายวันของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายในการทดลองแบบกะ	64
ภาพที่ 28 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (BMP) สะสมของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายในการทดลองแบบกะ	66
ภาพที่ 29 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง	70
ภาพที่ 30 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง	72
ภาพที่ 31 ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียเข้าระบบและน้ำล้นออกระบบของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง	74
ภาพที่ 32 อัตราส่วน VFA/ALK ของน้ำเสียเข้าระบบและน้ำล้นออกระบบของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง	74
ภาพที่ 33 ผลการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง	76
ภาพที่ 34 สัดส่วนก๊าซมีเทนของการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง	77
ภาพที่ 35 ผลการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง	78

อักษรย่อ และสัญลักษณ์

อักษรย่อ	ความหมาย	หน่วย
ALK	ปริมาณสภาพความเป็นด่าง	mgCaCO ₃ /L
BMP	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี	NmL/gVS _{substrate}
COD	ปริมาณความสกปรกหรือปริมาณความต้องการใช้ออกซิเจนทางเคมี	mg/L
HRT	ระยะเวลาที่เก็บ	day, days
OLR	อัตราการระบวรทุกสารอินทรีย์	kgCOD/(m ³ •day)
pH	ค่าความเป็นกรดด่าง	
TS	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	g/L
V	ปริมาตร	L, mL
VFA	ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย	mgCH ₃ COOH/L
VS	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	g/L
Y	ยิลด์ หรือ ผลได้ของการผลิตก๊าซชีวภาพหรือมีเทน	NmL/gCOD _{substrate}
สัญลักษณ์	ความหมาย	
I	หัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร	
S	วัตถุดิบ	
WWI	วัตถุดิบน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา	
WWS	วัตถุดิบน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง	

ตัวห้อย	ความหมาย
substrate	วัตถุดิบตั้งต้น
biogas	ก๊าซชีวภาพ
CH ₄	ก๊าซมีเทน
in	ก่อน, การป้อนเข้าระบบ
out	หลัง, ออกจากระบบ
removal	การกำจัด
milk	น้ำเสียจากกระบวนการผลิตนมวัว
tofu	น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเต้าหู้ถั่วเหลือง



บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

การเลี้ยงหนอนแมลงวันลายกำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศไทยและทั่วโลก โดยเริ่มจากการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายเพื่อกำจัดขยะอินทรีย์ เช่น เศษอาหาร เศษผัก และเศษผลไม้ เป็นต้น โดยหนอนแมลงวันลายจะกินเศษขยะอินทรีย์ดังกล่าวและย่อยออกมาเป็นปุ๋ยชีวภาพแบบแห้ง มีลักษณะคล้ายดิน แต่ในปัจจุบันนอกจากจะนำไปใช้ในการกำจัดขยะอินทรีย์แล้ว ยังมีการนำหนอนแมลงวันลายไปแปรรูปเป็นโปรตีนอาหารสัตว์คุณภาพสูง เนื่องจากตัวหนอนแมลงวันลายมีคุณค่าทางอาหารโดยเฉพาะโปรตีน 42 – 51% ใกล้เคียงกับโปรตีนอาหารสัตว์จากถั่วเหลืองและปลาป่น และมีไขมัน 35% ให้พลังงาน 2,900 kcal/kg นอกจากนี้ หนอนแมลงวันลายสามารถเพาะเลี้ยงได้ในสภาพภูมิอากาศเขตร้อนและเขตอบอุ่น ต้นทุนต่ำ ผลิตได้ไว เลี้ยงง่ายเพราะไม่เป็นศัตรูพืช และไม่ใช้แหล่งเพาะพันธุ์เชื้อโรค (Castro – Lopez et al., 2020 และ Gahukar, 2016) โดยในประเทศไทยกลุ่มวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (Small and Medium Enterprises, SME) นิยมเลี้ยงหนอนแมลงวันลายด้วยอาหารโปรตีนสูง เช่น กากถั่วเหลือง กากถั่วดาวอินคา เป็นต้น ซึ่งการเพาะเลี้ยงเพื่อผลิตหนอนแมลงวันลายอบแห้งมีต้นทุนประมาณ 14.16 baht/kg ถูกกว่าราคาโปรตีนอาหารสัตว์ชนิดอื่น โดยทั่วไปกากถั่วเหลืองนำเข้าสำหรับเป็นอาหารสัตว์ที่มีโปรตีน 46 – 48% ราคาเฉลี่ย 16.70 baht/kg (จันทการต์ และคณะ, 2563) ปลาป่นราคา 25 – 35 baht/kg (กรมการค้าภายใน, 2564) เป็นต้น จากราคาต้นทุนที่ถูกกว่าอาหารสัตว์ชนิดอื่น ๆ จึงทำให้ตลาดทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากกลุ่ม SME เริ่มมีผู้ประกอบการต้องการขยายเป็นระดับอุตสาหกรรมเพื่อรองรับธุรกิจการแปรรูปหนอนแมลงวันลายที่มากกว่าการเป็นโปรตีนอาหารสัตว์ สามารถเป็นอาหารเสริมให้สัตว์เลี้ยง สัตว์เศรษฐกิจ หรือพัฒนาสู่เวชภัณฑ์ได้ ซึ่งการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายด้วยกากถั่วจะถูกนำมาเป็นต้นแบบสำหรับการเลี้ยงที่สามารถควบคุมคุณภาพ และปริมาณการผลิตตัวหนอนแมลงวันลายตามความต้องการของตลาดต่อไป แต่การเป็นโรงงานระดับอุตสาหกรรมจำเป็นต้องคำนึงถึงการบริหารจัดการด้านสิ่งแวดล้อมภายในกระบวนการตั้งแต่ต้นน้ำถึงปลายน้ำของการเพาะเลี้ยงและแปรรูปหนอนแมลงวันลาย โดยเฉพาะน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต ตามกฎหมายประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมและกรมควบคุมมลพิษกำหนดให้การระบายน้ำทิ้งจากโรงงานลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติต้องมีค่าความสกปรก หรือ ค่าปริมาณความต้องการออกซิเจนละลายในน้ำทางเคมี ไม่เกิน 120 mg/L ตามการพิจารณาของแต่ละอุตสาหกรรม หรือสูงสุดไม่เกิน 400 mg/L ตามกฎหมายของกรมควบคุมมลพิษ ซึ่งจากการรวบรวมข้อมูลของสถานประกอบการ

ขนาดเล็กแห่งหนึ่งในจังหวัดเชียงใหม่พบว่า มีศักยภาพในการผลิตหนอนแมลงวันลายประมาณ สัปดาห์ละ 300 kg และการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายด้วยกากถั่วเหลืองหรือกากถั่วดาวอินคา จำเป็นต้องมีกระบวนการล้างน้ำเพื่อแยกระหว่างหนอนตัวเต็มไวกับกากของเสียหลังการกินของหนอน ออกด้วยน้ำสะอาดซึ่งจะใช้น้ำล้างประมาณ 10 – 50 L ต่อหนอน 1 kg ลักษณะการล้างดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 สํารวจและวิเคราะห์โครงข่ายโครงการวิจัยในสถานประกอบการจริง

กระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายจะร่อนตัวหนอนผ่านน้ำให้อาหารผ่านตะกร้าจนกว่า สะอาดจึงนำไปแปรรูปต่อไป ดังนั้นในสถานประกอบการขนาดเล็กจะมีน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการ ล้างหนอนแมลงวันลายได้มากถึง 60,000 L หรือ 60 m³ เมื่อนำไปวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ทางเคมี ภายภาพเบื้องต้นพบว่า น้ำเสียในช่วงที่เป็นระบบการเลี้ยงขนาดเล็กซึ่งล้างน้ำผ่านตะกร้า น้ำเสียจาก กระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคามีค่าความสกปรกประมาณ 6,000 – 8,000 mg/L สำหรับน้ำเสียจากการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายด้วยกากถั่วเหลืองมีค่าความสกปรก ประมาณ 3,000 – 4,000 mg/L ต่อมาสถานประกอบการได้พัฒนาระบบการเลี้ยงให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อทดลองหาต้นแบบนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรม โดยเป็นการเลี้ยงในบ่อปูนขนาด 500 m³ ดัง ภาพที่ 2 ซึ่งการเริ่มต้นเลี้ยงจะใช้ตัวอ่อนหนอนต่ออาหารเลี้ยง (กากถั่วเหลือง หรือ กากถั่วดาวอินคา) โดยมวลที่อัตราส่วน 3:5 และผสมน้ำตามปริมาตรของบ่อ ซึ่งในการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายแบ่งช่วง การล้างเป็น 2 ระยะ ได้แก่ ระยะการเลี้ยงพ่อแม่พันธุ์แมลงวันลาย และระยะเลี้ยงตัวหนอนเพื่อแปรรู ป โดยระยะการเลี้ยงพ่อแม่พันธุ์จะเลี้ยงตัวอ่อนหนอนแมลงวันลายจนเข้าระยะดักแด้ ซึ่งใช้เวลา ประมาณ 14 days หลังจากนั้นจึงล้างน้ำแยกดักแด้กับอาหารเลี้ยงโดยการปล่อยน้ำลงบ่อจนเต็ม แล้ว จึงเปิดท่อที่มีปลายเป็นตาข่ายสำหรับดักตัวหนอนและดักแด้ดังภาพที่ 3 เพื่อคัดแยกดักแด้นำไป เพาะเลี้ยงเป็นพ่อแม่พันธุ์ในโรงเรือน สำหรับระยะการเลี้ยงตัวหนอนเพื่อนำไปแปรรูป จะเลี้ยงตัวอ่อน

หนองเป็นเวลาประมาณ 7 days แล้วล้างน้ำแยกตัวหนองเช่นเดียวกันกับการล้างดักแค้ หลังจากนั้นจึงเก็บตัวหนองไปแปรรูป สำหรับน้ำเสียจะขังไว้ในบ่อดินรอกการบำบัดที่เหมาะสมต่อไป จากการวิเคราะห์ค่าความสกปรกเบื้องต้นพบว่า น้ำเสียจากกระบวนการล้างหนองแมลงวันลายระยะการเพาะพ่อแม่พันธุ์มีค่าประมาณ 30,000 – 40,000 mg/L และน้ำเสียระยะการเพาะเลี้ยงเพื่อแปรรูปมีค่าความสกปรกประมาณ 18,000 mg/L ซึ่งเป็นน้ำเสียที่ควรได้รับการจัดการที่เหมาะสม เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียสูง รวมถึงเมื่อปล่อยน้ำเสียซึมลงสู่บ่อดินจะทำให้ดินและน้ำบริเวณใกล้เคียงเกิดการปนเปื้อน และส่งกลิ่นเหม็นรบกวนคนภายในชุมชน



ภาพที่ 2 บ่อเลี้ยงหนอนแมลงวันลายขนาดใหญ่



ภาพที่ 3 ลักษณะการทิ้งน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนองแมลงวันลาย

ซึ่งจากคุณสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายเบื้องต้น มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการนำไปผลิตก๊าซชีวภาพ (รจพรรณ, 2563) อีกทั้งกระบวนการย่อยอาหารของนอนแมลงวันลายเป็นกระบวนการเสมือนการปรับสภาพเชิงกลให้กับระบบผลิตก๊าซชีวภาพจึงช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบการหมักแบบไร้อากาศได้มากขึ้น โดยเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพมีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าความสกปรกสูงและย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นก๊าซมีเทนในรูปของก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในกระบวนการแปรรูปนอนแมลงวันลายได้ เช่น ใช้ในการประกอบอาหาร อบรม สกัด นอนแมลงวันลายด้วยก๊าซชีวภาพแทนก๊าซหุงต้ม หรือหากมีปริมาณและศักยภาพของก๊าซชีวภาพมากพอ สามารถนำไปใช้ผลิตไฟฟ้าได้ อีกทั้งยังเป็นการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายภายในสถานประกอบการได้ และเป็นต้นแบบของการบำบัดน้ำเสียในสถานประกอบการขนาดใหญ่ระดับอุตสาหกรรมที่จะได้รับความนิยมและขยายใหญ่ขึ้นในอนาคตของประเทศไทย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนจากน้ำเสียกากถั่วเหลืองและกากถั่วดาวอินคาในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายโดยศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่อง เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียกากถั่วเหลืองและกากถั่วดาวอินคาในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย และศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในระบบการหมักก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง เตรียมพร้อมการขยายธุรกิจของสถานประกอบการเพาะเลี้ยงนอนแมลงวันลายในอนาคต ทำให้ได้พลังงานก๊าซชีวภาพทดแทน สามารถลดปริมาณน้ำเสียและประหยัดต้นทุนทางด้านพลังงานในสถานประกอบการได้มากขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียกากถั่วเหลืองและกากถั่วดาวอินคาในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย
2. เพื่อศึกษาผลของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ในระบบการหมักก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่องของน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย

ขอบเขตของการวิจัย

1. วัตถุดิบแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง และน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา
2. หัวเชื้อ คือ สารชั้นเหลวในระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร
3. ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนด้วยชุดการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกะขนาดทดลองที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยปริมาณของแข็งระเหยง่าย
4. ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องขนาดไม่เกิน 50 L
5. กำหนดให้อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ไม่เกิน $5 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$
6. ควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วงมีโซฟิลิกส์
7. ศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ค่าความสกปรก ค่าความเป็นกรดต่าง ค่ากรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่าง ปริมาณของแข็งทั้งหมด และ ปริมาณของแข็งระเหยง่าย

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียกากถั่วเหลืองและกากถั่วดาวอินคาในกระบวนการแปรรูปนอนแมลงวันลาย
2. การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกากถั่วเหลืองและกากถั่วดาวอินคาในกระบวนการแปรรูปนอนแมลงวันลายแบบกึ่งต่อเนื่อง

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร

แนวคิด ทฤษฎี

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพ อาหารเลี้ยงหมอนแมลงวันลาย ได้แก่ กากถั่วเหลือง และ กากถั่วดาวอินคา เพื่อใช้ในการออกแบบการทดลองหาศักยภาพการผลิต ก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการล้างหมอนแมลงวันลาย

1. การผลิตก๊าซชีวภาพ

1.1 ความหมายและกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

ก๊าซที่ได้จากกระบวนการหมักย่อยของสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกาศและสภาพที่เหมาะสม กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ (Anaerobic Digestion) ประกอบไปด้วยกระบวนการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพทั้งหมด 3 กระบวนการหลัก (Vögelin et al., 2014) โดยมีรายละเอียดดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

กระบวนการไฮโดรไลซิสเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น การย่อยสลายให้แป้ง เส้นใย หรือ สารอินทรีย์จำพวกคาร์โบไฮเดรตให้เป็นน้ำตาล โมเลกุลเดี่ยว คือ กลูโคส ซูโครสกาแลคโตส การย่อยสลายไขมันเป็นกรดไขมันไตรกลีเซอไรด์ หรือ การย่อยสลายโปรตีน เป็นกรดอะมิโน ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในกระบวนการต่อไป (รจพรรณ, 2563)

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

กระบวนการอะซิโดเจเนซิสเป็นกระบวนการแปลงสารอินทรีย์โมเลกุลเดี่ยวเป็นกรด หรือ เรียกว่า กระบวนการสร้างกรด ให้อยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายด้วยแบคทีเรียในกลุ่มสร้างกรด Fermentative Bacteria หรือ Acidogenesis จะสามารถเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น กรดคาร์บอกซิลิก กรดไพรไพโอนิก กรดบิวทิลิก และกรดแลคติก เป็นต้น โดยที่สารอินทรีย์โมเลกุลเดี่ยวที่มีความดันไฮโดรเจนต่ำจะสามารถเปลี่ยนเป็นกรดคาร์บอกซิลิกได้เลย และในกระบวนการนี้

ควรอยู่สภาวะแวดล้อมเป็นกรดในช่วง 5.5 – 6.5 แต่ถ้าสารอินทรีย์มีความดันไฮโดรเจนสูงจะต้องผ่านกระบวนการ Acetogenesis ได้เป็นกรดกรดโพรไพโอนิก กรดบิวทริก หรือ กรดอินทรีย์ชนิดอื่นก่อน จะเกิดปฏิกิริยาจนได้กรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งสมการที่ 1 – 5 (รจพรรณ, 2563) แสดงการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลเดี่ยวให้เป็นกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ดังนี้

ตัวอย่างสภาวะความดันไฮโดรเจนต่ำ (Low Hydrogen Partial Pressure)



สภาวะความดันไฮโดรเจนสูง (High Hydrogen Partial Pressure)



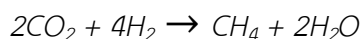
นอกจากการสร้างกรดจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดแล้ว สมการที่ 5 แสดงปฏิกิริยาของแบคทีเรียบางกลุ่มที่สามารถสร้างกรดคาร์บอกซิลิกได้จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังนี้



ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (Methanogenesis)

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ หรือ กระบวนการผลิตก๊าซมีเทน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากแบคทีเรียกลุ่ม เมทาโนเจน (Methanogen) เปลี่ยนกรดอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทน และส่วนประกอบอื่น โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ตั้งต้น แสดงปฏิกิริยาดังสมการที่ 6 และ 7 โดยกระบวนการนี้ควรอยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน และมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 6.8 – 7.2 อุณหภูมิอยู่ในช่วงมีโซฟิลิกส์จะทำให้แบคทีเรียสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ดี ซึ่งโดยทั่วไปสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด 70% จากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ทั้งหมด (Vögeli et al., 2014 และ รจพรรณ, 2563)





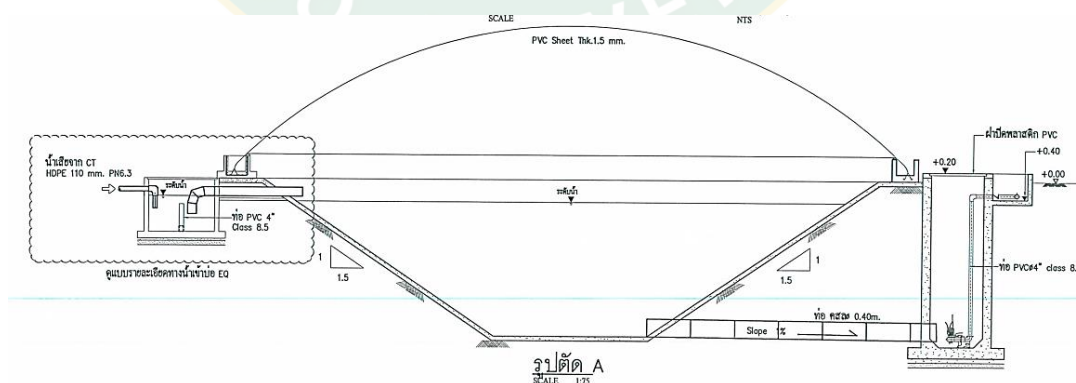
สมการที่ 7

1.2 เทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ชนิดของเทคโนโลยีระบบการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถแบ่งประเภทได้หลากหลายขึ้นอยู่กับแนวทางที่ใช้ในการจำแนก โดยในการทำระบบผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับมูลสัตว์หรือเศษอาหารระดับครัวเรือนจนถึงฟาร์มขนาดเล็ก จะใช้ระบบที่มีต้นทุนต่ำ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องเพิ่มวัสดุที่เฉพาะเจาะจง เช่น พลาสติกแบคทีเรียแขวนลอย หรือวัสดุป้องกันปัญหาเรื่องสารพิษที่จะส่งผลต่อการเดินระบบ เป็นต้น สำหรับเทคโนโลยีที่นิยมใช้งานอย่างแพร่หลายในระดับอุตสาหกรรม (กรมพัฒนาพลังงานทดแทน, 2563) มีตัวอย่างเทคโนโลยีและข้อดี ข้อเสีย ดังนี้

1.2.1 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Modified Covered Lagoon

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Modified Covered Lagoon หรือ MCL เป็นระบบผลิตก๊าซชีวภาพรูปแบบพื้นฐาน มีลักษณะเป็นสระหรือบ่อรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้า และปิดคลุมด้วยแผ่นพลาสติกความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) หรือ PVC เพื่อเป็นพื้นที่สำหรับกักเก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น แสดงตัวอย่างระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ MCL ดังภาพที่ 4 โดยน้ำเสียหรือวัตถุดิบที่เข้าระบบจะถูกดันตามแนวยาวจนถึงอีกด้านหนึ่งของบ่อที่จะมีการติดตั้งอุปกรณ์แยกกากตะกอนและหมุนเวียนน้ำเสียที่อยู่ในระบบแยกออกจากกัน สามารถนำกากตะกอนไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบของปุ๋ยชีวภาพได้ต่อไป ข้อดีของระบบ MCL คือ เป็นระบบที่สามารถก่อสร้างได้ง่าย ต้นทุนต่ำ การบำรุงรักษาง่าย แต่ข้อเสีย คือ ต้องใช้พื้นที่ในการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดใหญ่ตามปริมาณน้ำเสียที่ต้องการบำบัด (กรมควบคุมมลพิษ, 2546 และ กรมพัฒนาพลังงานทดแทน, 2563)

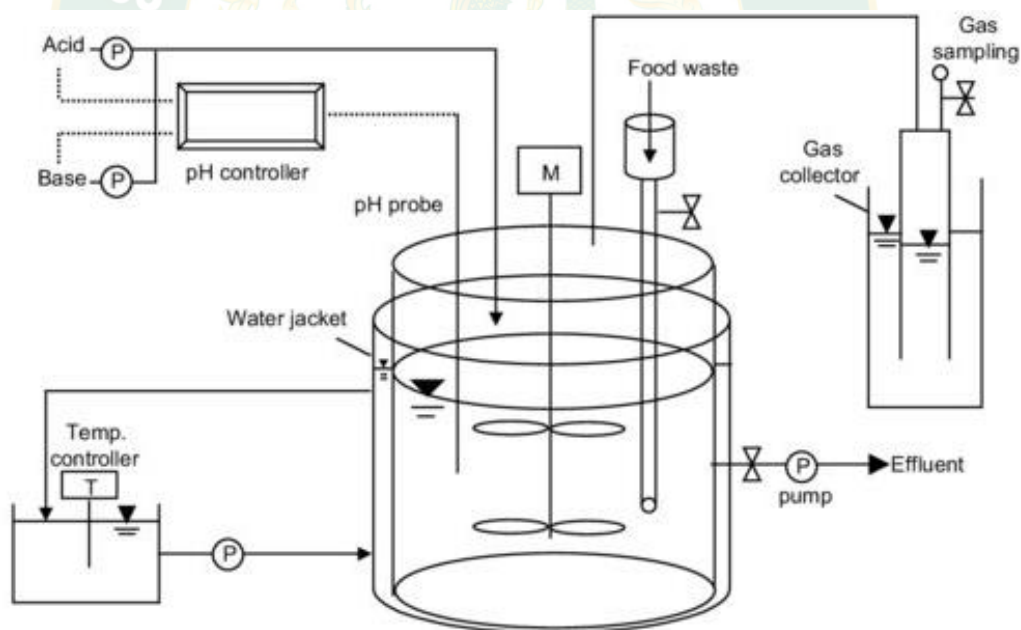


ภาพที่ 4 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Modified Covered Lagoon

ที่มา : โยธาไทย. (2563)

1.2.2 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกวนสมบูรณ์

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกวนสมบูรณ์ หรือ Completely Stirred Tank Reactor (CSTR) เป็นเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีระบบการกวนน้ำเสียและแบคทีเรียให้ผสมกันอย่างทั่วถึง หรือ การเลี้ยงตะกอนแบบเชื้อแขวนลอย แสดงดังภาพที่ 5 ซึ่งการกวนสามารถลดความรุนแรงของสารพิษที่อาจหลุดเข้ามาในระบบได้ เนื่องจากระบบการกวนจะช่วยเจือจางสารพิษไม่ให้เข้มข้นอยู่จุดใดจุดหนึ่งของถังหมัก และระบบ CSTR เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง แต่ปริมาณสารอินทรีย์ต่ำ เนื่องจากมีระบบการกักเก็บตะกอนเท่ากับระยะเวลาที่กักเก็บน้ำ หากต้องการเพิ่มอัตราการผลิตสารอินทรีย์ จำเป็นต้องเพิ่มขนาดของถังหมักให้ใหญ่ขึ้นเช่นเดียวกับเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ MCL หรือมีการเพิ่มศักยภาพการกักเก็บตะกอนของระบบ CSTR โดยดัดแปลงเป็น ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Anaerobic Contact หรือ AC โดยเพิ่มถังตกตะกอนสำหรับกักเก็บตะกอนเร่งปฏิกิริยาให้กับระบบการกวนสมบูรณ์ สามารถหมุนเวียนตะกอนและกักเก็บตะกอนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้นานขึ้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2546 และ กรมพัฒนาพลังงานทดแทน, 2563)

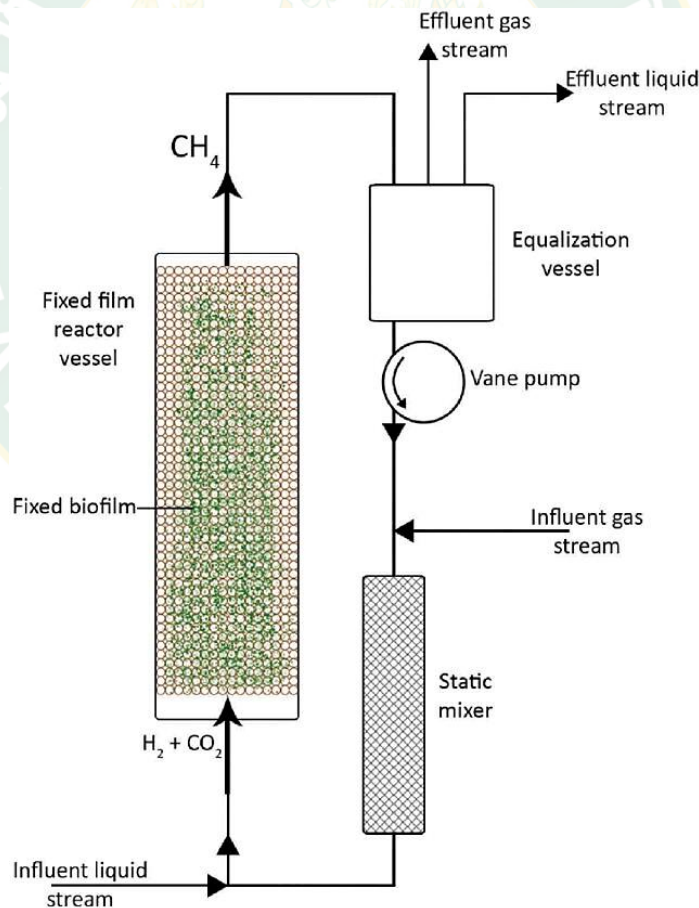


ภาพที่ 5 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกวนสมบูรณ์

ที่มา : Shin and Youn. (2015)

1.2.3 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตรึงฟิล์ม

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ หรือ Anaerobic Fixed Film (AFF) เป็นระบบก๊าซชีวภาพที่เพิ่มวัสดุตัวกลางภายในถังปฏิกรณ์ในลักษณะของฟิล์มชีวภาพ แสดงตัวอย่างระบบดังกล่าวที่ 6 ซึ่งฟิล์มชีวภาพสามารถเพิ่มพื้นที่ในการยึดเกาะของจุลินทรีย์ ลดการสูญเสียจากการถ่ายเทน้ำล้นหรือกากตะกอนระหว่างการเดินระบบ นอกจากนี้ยังช่วยให้ระบบสามารถฟื้นฟูได้อย่างรวดเร็วมากยิ่งขึ้นเมื่อต้องการเริ่มต้นระบบใหม่ หรือการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบที่สูงเกินไป โดยตัวอย่างวัสดุตัวกลางที่ใช้ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบอุตสาหกรรม เช่น เชือก ไนลอน ตาข่าย หรือ ยาง เป็นต้น การจัดเรียงลักษณะตัวกลางในรูปแบบต่าง ๆ จะส่งผลต่อการทำงานและเสถียรภาพของระบบในระยะยาว จำเป็นต้องออกแบบโดยผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งระบบที่นิยมในปัจจุบันจะเป็นการป้อนน้ำเสียเข้าจากทางด้านล่างของถัง เนื่องจากช่วยลดการอุดตันของตะกอนในระบบได้ (กรมควบคุมมลพิษ, 2546 และ กรมพัฒนาพลังงานทดแทน, 2563)

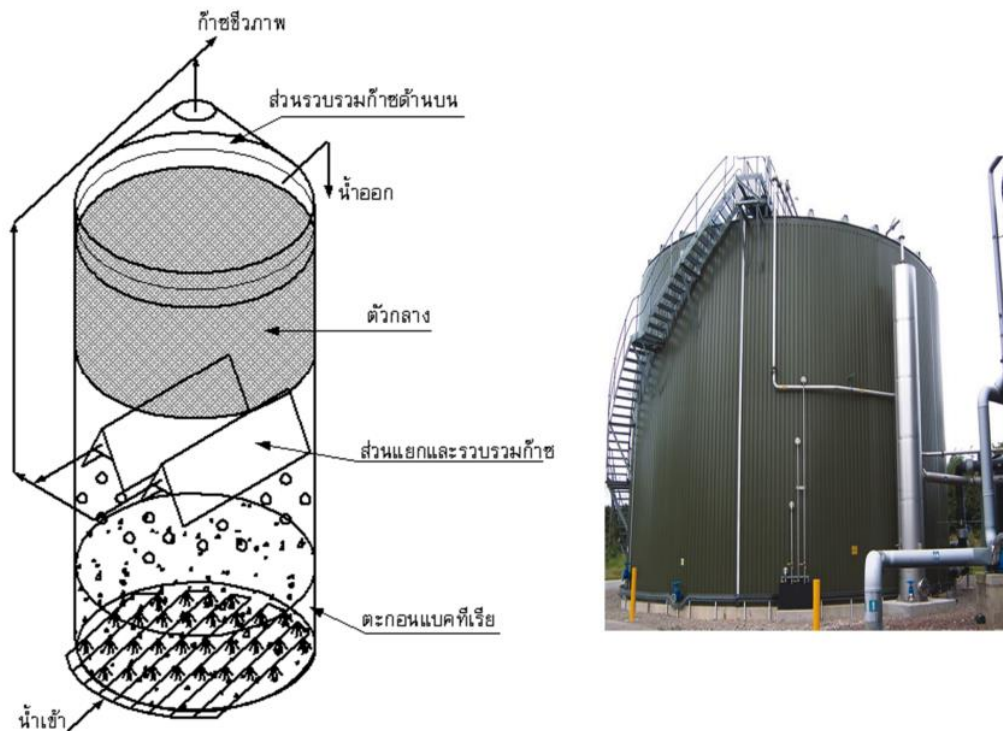


ภาพที่ 6 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตรึงฟิล์ม

ที่มา : Rusmanis et. al. (2019)

1.2.4 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบผสมผสาน

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบผสมผสาน หรือ Hybrid Anaerobic Reactor คือระบบที่นำข้อดีของแต่ละรูปแบบมารวมกันเพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้งานสำหรับน้ำเสียแต่ละชนิด อาทิ การนำระบบ MCL ร่วมกับการกวนสมบูรณ์ของระบบ CSTR เพื่อให้สามารถกระจายจุลินทรีย์และกวนให้ทั่วถึง ลดระยะเวลาการบำบัดน้ำเสีย แสดงตัวอย่างระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบผสมผสาน ดังภาพที่ 7 ซึ่งเป็นระบบที่ผสมผสานระหว่างการเพิ่มฟิล์มสำหรับดักตะกอน อุปกรณ์แยกและรวบรวมน้ำชีวภาพที่เกิดขึ้น และเพิ่มตัวกลางด้านบนเพื่อกักเก็บตะกอนส่วนเกินที่อาจติดไปกับน้ำล้นจากการออกแบบดังกล่าวทำให้ระบบนี้สามารถรองรับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความผันผวนของสารอินทรีย์สูงได้และช่วยเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 7 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบผสมผสาน

ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทน. (2563)

1.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

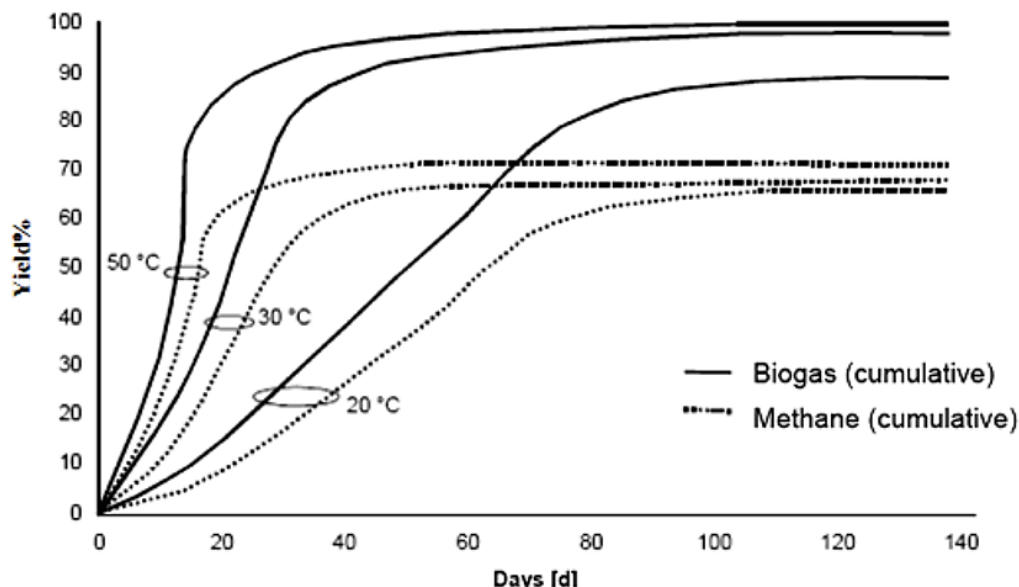
สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมภายในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นสิ่งสำคัญ สามารถส่งผลกระทบต่อกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรียได้ การควบคุมให้มีสภาวะที่เหมาะสมจะทำให้การเกิดก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพประกอบด้วยหลายปัจจัย ได้แก่

1.3.1 สารอาหาร

แบคทีเรียภายในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพต้องการสารอาหาร (Nutrient) ที่เหมาะสมและเพียงพอต่อจำนวนความหนาแน่นของแบคทีเรีย เพื่อศักยภาพสูงสุดในการเปลี่ยนสารอาหารเป็นก๊าซชีวภาพในลำดับต่อไป ซึ่งในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจะเรียกสารอาหารในหลายรูปแบบ โดยทั่วไปปริมาณสารอินทรีย์จะสัมพันธ์กับค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand, COD) หรือค่าปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solid, VS) เป็นต้น ซึ่งจะนำไปคำนวณเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างอาหารและหัวเชื้อแบคทีเรีย หรือเรียกว่า อัตราส่วนอาหารต่อหัวเชื้อ (Substrate to Inoculum Ratio, SIR) และ Feed to Microorganism Ratio (F/M)

1.3.2 อุณหภูมิ

อุณหภูมิ (Temperature) เป็นสภาวะที่มีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนภายในระบบ โดยในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ แบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ อุณหภูมิช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) 5 – 15 °C อุณหภูมิช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) 20 – 45 °C อุณหภูมิช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) 50 – 65 °C (รจพรรณ, 2563) ซึ่งโดยทั่วไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการทำงานของแบคทีเรียในระบบจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แต่ถ้ามีอุณหภูมิที่สูงเกินไปอาจส่งผลให้ส่วนประกอบของเซลล์แบคทีเรียบางส่วน เช่น โปรตีน กรดนิวคลีอิก ถูกทำลาย ส่งผลให้การเจริญเติบโตของเซลล์แบคทีเรียลดลงอย่างรวดเร็ว (สุเมธ และ ปิยะรัตน์, 2560) รวมถึงสิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้สำหรับรักษาอุณหภูมิในระบบให้คงที่ แสดงตัวอย่างผลการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนดังภาพที่ 8 โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพียง 2-3 °C สามารถลดศักยภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในกระบวนการไฮโดรไลซิสได้



ภาพที่ 8 ช่วงอุณหภูมิในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

ที่มา : Al Seadi et. al. (2008)

สำหรับประเทศไทยอุณหภูมิช่วงที่เหมาะสมในการนำไปใช้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพคือ ช่วงมีโซฟิลิกส์ เนื่องจากอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศไทยอยู่ในช่วงดังกล่าว สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย และลดการสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมระบบให้ความร้อน ทำให้การผลิตก๊าซมีเทนในระบบมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น

1.3.3 ค่าความเป็นกรดต่าง

ค่าความเป็นกรดต่าง (Potential of Hydrogen ion, pH) ภายในระบบการผลิต การผลิตก๊าซชีวภาพประกอบไปด้วย 2 ช่วง ช่วงแรกใช้แบคทีเรียในการเปลี่ยนแปลงสารอาหาร โมเลกุลขนาดใหญ่เป็นโมเลกุลขนาดเล็กและเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ต้องการสภาวะความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วงเป็นกรดอยู่ในช่วง 5.5 – 6.5 ต่อมาจะเป็นช่วงการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหย ง่ายเป็นก๊าซมีเทนด้วยแบคทีเรียเมทาโนเจน ซึ่งต้องการสภาวะแวดล้อมอยู่ในช่วงพีเอช 6.8 – 7.2 เพื่อ การผลิตก๊าซมีเทนอย่างมีศักยภาพ (Vögeli et al., 2014 และ รจพรรณ, 2563) โดยค่า pH ของ วัตถุประสงค์เข้าระบบมีผลต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างมาก เนื่องจากวัตถุประสงค์ที่มีลักษณะ เป็นกรดแก่ จะส่งผลให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบง่ายขึ้น ถ้าหัวเชื้อไม่มีศักยภาพในการ บัพเฟอร์กรดอินทรีย์มากพอ อาจทำให้ยับยั้งเกิดผลิตก๊าซมีเทนจากสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อแบคทีเรีย เมทาโนเจน ในกระบวนการเมทาโนเจเนซิส

1.3.4 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายและสภาพความเป็นด่าง

ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA) และสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity, ALK) ต้องมีปริมาณที่เหมาะสมเพื่อความเสถียรของระบบตลอดการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยกรดไขมันระเหยง่ายในรูปของกรดอะซิติกควรมีปริมาณไม่เกิน 2,000 mgCH₃COOH/L เนื่องจากทำให้เป็นพิษต่อระบบ หรือดีที่สุดควรอยู่ในช่วง 50 – 500 mgCH₃COOH/L สำหรับค่าสภาพความเป็นด่างแสดงถึงความสามารถในการต้านทานกรดในระบบ โดยทำหน้าที่รับอนุภาคโปรตอนอยู่ในรูปของด่างคาร์บอเนต (CaCO₃) หรือ ไบคาร์บอเนต (HCO₃⁻) ซึ่งค่าความเข้มข้นของสภาพด่างควรอยู่ระหว่าง 1,000 – 5,000 mgCaCO₃/L ทำให้รักษาเสถียรภาพของ pH ในระบบที่เหมาะสมได้ (สุเมธ และ ปิยะรัตน์, 2560) โดยการตรวจสอบระบบควรมีอัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง (VFA/ALK) น้อยกว่า 0.4 ถ้าหากมีอัตราส่วนเกิน 0.8 ภายในระบบอาจจะทำให้เกิดสภาวะเป็นกรดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ (รจพรรณ, 2563) โดยระบบที่มีอัตราส่วน VFA/ALK น้อยกว่า 0.4 แสดงให้เห็นว่าระบบมีความจุบัฟเฟอร์สูง หรือมีความสามารถในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไฮโดรไลซิสได้ดี

1.3.5 การกวนผสม

การกวนผสม (Mixing) จะช่วยให้แบคทีเรียและสารอาหารสามารถเข้ากันได้ดีมากขึ้น ช่วยเพิ่มระยะเวลาในการย่อยสลายหรือเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนได้รวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังลดการเกิดสารแขวนลอยหรือการแยกชั้นของของเสียหรือสารผสมที่อยู่ภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งสารแขวนลอยที่เป็นตะกอนด้านบนจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนลดลง รวมถึงกระบวนการย่อยสลายโมเลกุลของสารอาหารจะลดลง (รจพรรณ, 2563)

1.4 รูปแบบการหมักแบบไร้อากาศ

รูปแบบการหมักแบบไร้อากาศของการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถแบ่งตามลักษณะการเติมวัตถุดิบเข้าระบบเป็น 3 รูปแบบ ดังนี้

1.4.1 การหมักแบบกะ

การหมักแบบกะ (Batch Fermentation) เป็นรูปแบบการหมักแบบเติมวัตถุดิบ และหัวเชื้อเพียงครั้งเดียว หลังจากนั้นจึงปล่อยให้ระยะเวลาหนึ่งให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น ซึ่งรูปแบบการหมักแบบกะเป็นรูปแบบที่นำไปออกแบบถึงปฏิกรณ์สำหรับการหมักที่มีต้นทุนต่ำและง่ายต่อการดูแลมากที่สุด จึงเหมาะสำหรับผู้ใช้งานที่มีวัตถุดิบไม่ต่อเนื่อง ไม่สามารถเติมตลอดเวลาได้ รวมถึงมีต้นทุนในการทำระบบต่อ แต่การหมักแบบกะนั้นมีข้อจำกัดเรื่องกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพที่จะต้องใช้เวลาในการกระบวนการผลิตจะมีความผันผวนสูงไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะเกิดความเสถียรในช่วงเวลาหนึ่ง เหมาะกับการสังเกตความแปรผันของการผลิตก๊าซชีวภาพได้ (Vögeli et al., 2014)

1.4.2 การหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง

การหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi – continuous Fermentation) เป็นการหมักที่มีลักษณะการเติมวัตถุดิบเป็นระยะ ๆ อย่างสม่ำเสมอและมีการปล่อยสารชั้นเหลวออกในปริมาณที่เท่ากัน เหมาะสำหรับผู้ใช้งานที่มีวัตถุดิบเป็นประจำ โดยส่วนใหญ่จะเติมวัตถุดิบเข้าระบบทุกวันวันละ 1 ครั้ง จะช่วยให้การทำงานของจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนมีความคงที่มากขึ้น เกิดความเสถียรของระบบ ลดปัญหาการเติมสารอาหารแก่แบคทีเรียอย่างกะทันหันเกิดภาวะช็อกของระบบ (Shock Load) และเกิดก๊าซชีวภาพอย่างสม่ำเสมอ (จุฑาภรณ์, 2560)

1.4.3 การหมักแบบต่อเนื่อง

การหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous Fermentation) เป็นการเติมวัตถุดิบและการนำสารชั้นเหลวในระบบออกตลอดเวลา ซึ่งรูปแบบนี้จะมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบสูงที่สุด แต่ต้องมีปริมาณวัตถุดิบเพียงพอที่จะเติมได้ต่อเนื่องตลอดเวลา ซึ่งอาจต้องเพิ่มเครื่องมือสำหรับสูบน้ำวัตถุดิบเพื่อควบคุมการเติม ดังนั้นในทางปฏิบัติอาจจะมีความยุ่งยากสำหรับผู้ใช้งานที่ใช้ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็ก หรือมีค่าใช้จ่ายสำหรับอุปกรณ์ในระบบเพิ่มสูงชันกว่าการหมักรูปแบบอื่น (จุฑาภรณ์, 2560)

1.5 การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนตามมาตรฐาน VDI 4630

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential, BMP) ของวัตถุดิบตามมาตรฐาน VDI 4630 เป็นวิธีการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย (Jingura and Kamusoko, 2017 และ Holliger et. al., 2016) เพื่อศึกษาการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศในการผลิตก๊าซมีเทน ขั้นตอนการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสามารถแบ่งหัวข้อหลัก ดังนี้

1.5.1 วิธีการทดลอง

วิธีการศึกษาตามมาตรฐาน VDI 4630 จะเริ่มต้นจากการประเมินสัดส่วนของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายในวัตถุดิบ ถ้าวัตถุดิบมีปริมาณของแข็งทั้งหมดมากกว่า 10% จะเป็นการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนในการหมักแบบแห้ง (Dry Fermentation) ถ้าวัตถุดิบมีปริมาณของแข็งต่ำกว่า 10% จะเป็นการศึกษาการหมักแบบเปียก (Wet Fermentation) เมื่อทราบลักษณะการหมักจึงเริ่มเตรียมการทดลอง ซึ่งการทดลองระหว่างการหมักแบบแห้งและเปียกจะเป็นวิธีการที่คล้ายคลึงกันแต่แตกต่างกันเมื่อวิเคราะห์ผลการศึกษา สำหรับวัตถุดิบและหัวเชื้อที่จะใช้ในการศึกษาจะต้องมีขนาดไม่เกิน 10 mm หมักเดี่ยวหรือหมักร่วมโดยใช้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 2:1 โดยปริมาณของแข็งระเหยง่าย คำนวณมวลวัตถุดิบตามอัตราส่วนกับปริมาตรการหมัก และเตรียมบรรจุลงขวดแก้วสำหรับทดลอง ซึ่งการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนแบบกะจะใช้ขวดแก้วปริมาตรไม่เกิน 1 L เมื่อผสมวัตถุดิบและหัวเชื้อแล้วจะทำการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 7.0 ± 0.1 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือกรดซัลฟิวริก หลังจากนั้นจึงปิดผนึกฝาขวดสองชั้นด้วยจุกยางและฝาครอบอะลูมิเนียมเพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าซชีวภาพขณะทดลอง และอัดด้วยก๊าซไนโตรเจนเพื่อทำให้ภายในขวดไร้ออกซิเจน หลังจากนั้นจึงบรรจุขวดทดลองลงในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิในช่วงมีโซฟิลิกส์หรือเทอร์โมฟิลิกส์ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการวิจัย หลังจากนั้นจึงบันทึกปริมาตรและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพอย่างน้อยวันละ 1 ครั้ง เพื่อสังเกตแนวโน้มและลักษณะการผลิตก๊าซมีเทน โดยอุปกรณ์และวิธีการเก็บตัวอย่างและวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพมีหลายวิธีการ เช่น การใช้เครื่องวัดแรงดันก๊าซ หรือ เครื่องวัดอัตราการไหล กระบอกฉีดยาแบบแก้ว หลักการแทนที่ด้วยน้ำ หรือใช้คอมพิวเตอร์ (Pham et. al., 2013 และ Himanshu et. al., 2017) ในการบันทึกปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น สำหรับองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพวิธีการมาตรฐานที่แม่นยำและมีมาตรฐาน คือ การใช้เทคนิค Gas Chromatography ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมออกจากกันในสถานะแก๊ส โดยอาศัยคุณสมบัติในการละลายและความสามารถในการดูดซับที่แตกต่างกันของสารแต่ละชนิด

1.5.2 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ก่อนและหลังออกจากระบบ

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องจะเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัตถุดิบที่ต้องการศึกษา โดยพารามิเตอร์หลักที่จำเป็นต่อการศึกษาวัตถุดิบ หัวเชื้อ และสารชั้นเหลวหรือของเหลวที่ออกจากระบบ ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่าย ค่าซีไอดี และสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน โดยพารามิเตอร์เหล่านี้จะบ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ ลักษณะของสารอินทรีย์ ที่จะมีผลต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน เมื่อทำการทดลองตามเงื่อนไขของมาตรฐาน หลักการในการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนมีหลากหลายรูปแบบโดยการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกะ หรือ การผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อศึกษา

ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) (Jingura and Kamusoko 2017) ตามคำแนะนำวิธีการศึกษาของมาตรฐาน VDI 4630 โดยการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย NmL/gVS_{substrate} ณ อุณหภูมิมาตรฐาน 0 °C ที่ความดันบรรยากาศ 1 atm สามารถหาได้จากสมการที่ 8 โดยคำนวณจากร้อยละของก๊าซมีเทนกับปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นส่วนด้วยปริมาณสารอินทรีย์เข้าระบบ และการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Removal Efficiency, Eff_{removal}) ซึ่งจะคำนวณจากผลต่างปริมาณสารอินทรีย์เข้าและออกระบบสามารถหาได้จากสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของ TS, VS หรือ COD ดังสมการที่ 9 นอกจากนี้การวิเคราะห์กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดก๊าซชีวภาพสามารถสังเกตเบื้องต้นได้จากค่า pH และ VFA/ALK ก่อนและหลังการหมัก และองค์ประกอบก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักของหัวเชื้อกับวัตถุดิบ (VDI 4630, 2006)

$$BMP = \%CH_4 \times V_{biogas} / S_{substrate}$$

สมการที่ 8

$$Eff_{removal} = (S_{in} - S_{out}) \times 100 / S_{in}$$

สมการที่ 9

เมื่อ	$\%CH_4$	ร้อยละก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (%)
	V_{biogas}	ปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (NmL)
	$S_{substrate}$	ปริมาณวัตถุดิบเข้าระบบ (gVS _{substrate})
	$Eff_{removal}$	ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (%)
	S_{in}	ปริมาณวัตถุดิบเข้าระบบ (mg/L)
	S_{out}	ปริมาณวัตถุดิบออกระบบ (mg/L)

สำหรับการศึกษาแบบกึ่งต่อเนื่องหรือแบบต่อเนื่อง ซึ่งมีการเติมสารอาหารเข้าระบบสามารถวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตได้จากผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Yield, Y) สามารถหาได้ดังสมการที่ 10

$$Y_{biogas} = \frac{V_{biogas}}{OLR \times (COD_{in} \text{ or } VS_{in})}$$

สมการที่ 10

เมื่อ	Y	ผลได้ของก๊าซชีวภาพ
	V_{biogas}	ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ได้ (m ³ /day)
	OLR	อัตราการเติมสารอินทรีย์ตั้งต้น (kgCOD/(m ³ ·day))
	COD_{in}	ปริมาณความต้องการออกซิเจนทางเคมีที่เข้าระบบ (g/L)
	VS_{in}	ปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่เข้าระบบ (g/L)

2. แผลงวันลาย

2.1 ลักษณะและประโยชน์ของแผลงวันลาย

แผลงวันลาย (Black Soldier Fly, BSF) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Hermetia illucens* พบได้ทั่วไปในสภาพภูมิอากาศเขตร้อนและเขตอบอุ่น เป็นแมลงที่ไม่เป็นพาหะนำโรค ไม่เป็นศัตรูพืชและไม่ก่อให้เกิดความรำคาญต่อชุมชน ตัวเต็มวัยมีสีดำขนาดความยาวมากถึง 20 mm วงจรชีวิตของแผลงวันลายแสดงดังภาพที่ 9 จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าหนอนแมลงวันลายมีโปรตีน 42 – 51% ไขมัน 35% พลังงาน 2,900 kcal/kg หนอนแมลงวันลายมีประสิทธิภาพในการกำจัดขยะอินทรีย์ 65.5 – 78.9% และแมลงวันลายจะพบน้อยมากในเดือนเมษายนและไม่พบในเดือนพฤศจิกายน (ศูนย์จัดการขยะอินทรีย์ชุมชน)



ภาพที่ 9 วงจรชีวิตของแมลงวันลาย

ที่มา: ศูนย์จัดการขยะอินทรีย์ชุมชน

จากการศึกษาวิจัยของ Gahukar (2016) ระบุว่าแมลงวันลาย หรือ *Hermetia illucens* เป็นแมลงวันในวงศ์ *Stratiomyidae* ที่พบบ่อยในเขตร้อน เมื่ออยู่ในช่วงตัวเต็มวัยจะไม่เป็นพาหะนำเชื้อโรคเหมือนแมลงวันหัวเขียว เนื่องจากไม่สามารถกัดกินอาหารได้ ส่วนในระยะตัวอ่อนสามารถทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือสามารถกินสารอินทรีย์ต่าง ๆ เป็นอาหารได้ โดยตัวมันเองเป็นแหล่งโปรตีนที่ดีสามารถนำไปบริโภคได้ โดยทั่วไปที่กำลังเป็นที่นิยมทั่วโลกจะใช้แมลงวันลายในการบำบัดขยะอินทรีย์ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเปรียบเทียบ

ประสิทธิภาพการลดของเสียด้วยหนอนแมลงวันลายและผลผลิตจากหนอนแมลงวันลายกับเทคโนโลยีอื่น ๆ เช่น การทำปุ๋ยหมักแบบดั้งเดิมและการปลูกพืชแบบเวอร์มิลต์ สามารถช่วยในการตัดสินใจในการนำหนอนแมลงวันลายไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ต่อไป ซึ่งในอนาคตอันใกล้โปรตีนอาหารสัตว์เลี้ยงเศรษฐกิจจากวัตถุดิบปัจจุบัน เช่น โปรตีนจากถั่วเหลือง จะมีราคาแพงขึ้น ดังนั้นการนำโปรตีนจากแมลงที่มีต้นทุนต่ำ ปริมาณมาก ราคาถูก จะมาแทนที่ต่อไป ซึ่งหนอนแมลงวันลายสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับอาหารสัตว์ ลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะอินทรีย์ ลดการเกิดภาวะโลกร้อน ลดผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการกำจัดขยะอินทรีย์ไม่ถูกหลักสุขาภิบาล พัฒนาอาชีพเสริมสำหรับเกษตรกรหรือผู้ด้อยโอกาส โดยสอดคล้องกับนโยบายของรัฐบาลในประเด็นโมเดลเศรษฐกิจสู่การพัฒนาที่ยั่งยืน (BCG in Action/Zero Waste) มุ่งเน้นไปที่แหล่งโปรตีนทางเลือกใหม่จากแมลง และการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ (สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2563)

2.2 กระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย

กระบวนการเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลายประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 5 ส่วน ได้แก่ บริเวณสำหรับเพาะเลี้ยงแมลงวันลาย บริเวณสำหรับเตรียมอาหารเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย บริเวณสำหรับเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย หรือ การบำบัดขยะอินทรีย์ บริเวณสำหรับเก็บเกี่ยวและแปรรูปหนอนแมลงวันลาย และบริเวณสำหรับการจัดการของเสียหลังการเพาะเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย ซึ่งอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายจะปรับเปลี่ยนตามเป้าหมายของการเพาะเลี้ยงและงบประมาณ ซึ่งโดยทั่วไปการเพาะเลี้ยงฟอพันธ์ แม่พันธ์ หรือ ระยะตัวบิน สามารถเลี้ยงไว้ในโรงเรือนตาข่ายภายใต้สภาพแวดล้อมเขตร้อนหรือกึ่งเขตร้อน เมื่อแมลงวันลายไข่ตัวหนอนในบริเวณที่มีมืดและแห้ง จึงทำการเก็บไข่เพื่อนำมาเข้าสู่กระบวนการบำบัดเศษขยะอินทรีย์ ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญ เนื่องจากระยะตัวอ่อนหนอนเป็นระยะเดียวที่แมลงวันลายจะกินอาหารและบำบัดของเสียได้ โดยปัจจัยสำคัญที่ควรควบคุมในระหว่างการเลี้ยงแมลงวันลายมีดังนี้

1) สภาพอากาศควรเป็นแบบอบอุ่น โดยมีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 24 – 30 °C ถ้ามีสภาพอากาศเย็นเกินไปจะทำให้ตัวหนอนมีกระบวนการเมตาบอลิซึม การกินอาหาร และการเติบโตช้าลง แต่ถ้าร้อนเกินไปตัวหนอนจะหนีไปยังบริเวณที่เย็นเหมาะสม

2) ควรมีสภาพแวดล้อมแบบมีร่มเงา ร่มรื่น ไม่โดนแสงแดดโดยตรง

3) แหล่งอาหารที่ใช้เลี้ยงหนอนควรมีลักษณะค่อนข้างชื้น โดยมีสัดส่วนน้ำในอาหารประมาณ 60 – 80% มีขนาดเล็กหรือเป็นลักษณะของเหลวข้นเพื่อให้ตัวหนอนสามารถซูดอาหารได้

4) ลักษณะอาหารที่ใช้เลี้ยงตัวอ่อนหนอนแมลงวันลายควรอุดมไปด้วยโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต และหากเป็นอาหารที่เน่า หรือผ่านการย่อยสลายของเชื้อรา แบคทีเรีย จะเป็นอาหารที่ตัวหนอนย่อยสลายได้ง่ายกว่า

โดยทั่วไปอาหารที่ใช้สำหรับเลี้ยงตัวอ่อนหนอนแมลงวันลายสามารถแบ่งออกเป็น 3 แหล่ง ได้แก่ ขยะในชุมชน เช่น ขยะเศษอาหาร ขยะจากร้านอาหาร หรือ ตลาด เป็นต้น ขยะจากอุตสาหกรรมเกษตร เช่น ของเสียหลังกระบวนการแปรรูปอาหาร เศษขี้หมูหรือขี้ไก่ หรือ ของเสียจากโรงฆ่าสัตว์ เป็นต้น และประเภทสุดท้าย คือ มูลสัตว์หรืออุจจาระ ซึ่งอัตราส่วนระหว่างตัวอ่อนหนอนแมลงวันลายกับอาหารสามารถปรับได้ตามความเหมาะสมของแต่ละชนิดอาหารและพื้นที่ โดยทั่วไปสำหรับพื้นที่ 1 m² สามารถผสมอาหารที่มีสัดส่วนน้ำประมาณ 75% จำนวน 60 kg ต่อตัวหนอน (ระยะ 5 days) 80 kg หรืออัตราส่วนอาหารต่อตัวอ่อนหนอน 0.75 wt เมื่อถึงระยะเวลาเก็บเกี่ยวตัวอ่อนโตเต็มวัยอายุประมาณ 12 days จำเป็นต้องมีกระบวนการแยกตัวอ่อนหนอนกับของเสียที่เกิดขึ้นหลังการย่อยของตัวอ่อน โดยจะมีลักษณะแตกต่างกัน 2 แบบ ได้แก่ แบบที่ 1 การเลี้ยงตัวอ่อนด้วยอาหารที่มีสัดส่วนน้ำต่ำกว่า 80% จะเกิดเป็นกากของเสีย มีลักษณะคล้ายดินแห้ง จะใช้วิธีการแยกตัวอ่อนหนอนโดยการร่อน และแบบที่ 2 การเลี้ยงตัวอ่อนด้วยอาหารที่มีสัดส่วนน้ำมากกว่า 80% จะเกิดของเสียลักษณะเป็นสารขุ่นเหลวรวมอยู่กับตัวหนอนจึงจำเป็นต้องแยกตัวหนอนโตเต็มวัยด้วยการล้างผ่านน้ำสะอาด ก่อนนำไปแปรรูปต่อไป สำหรับกากของเสียหรือน้ำเสียที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการแยกหนอนแมลงวันลายสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยเนื่องจากยังมีองค์ประกอบของไนโตรเจนสูง หรือ นำไปเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ซึ่งมีศักยภาพใกล้เคียงกับมูลวัว

3. กากถั่วเหลือง

3.1 ที่มาของกากถั่วเหลือง

กากถั่วเหลือง (Soybean Residue) เป็นผลพลอยได้หรือของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมแปรรูปถั่วเหลืองต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมน้ำมันพืช ซอสปรุงรส (ซีอิ๊วขาว) นมถั่วเหลือง เป็นต้น ซึ่งได้จากการผ่านกรรมวิธีในการบีบ สกัด นำผลิตภัณฑ์หลักไปใช้งาน ถั่วเหลืองและกากถั่วเหลืองมีลักษณะดังภาพที่ 9 จากกรรมวิธีดังกล่าวทำให้กากถั่วเหลืองจะมีคุณค่าทางอาหารด้านโปรตีนสูง เนื่องจากโดยทั่วไปเมื่อผ่านการบีบสกัด ส่วนของไขมันจะหายไป ซึ่งจะมีโปรตีนเฉลี่ย 44% รวมถึงมีกรดอะมิโนจำเป็นในอาหารสูงเมื่อเทียบกับพืชโปรตีนชนิดอื่น ๆ ซึ่งสัตว์สามารถย่อยได้ดี จึงนิยมนำไปทำเป็นส่วนผสมของโปรตีนอาหารสัตว์ ผสมในสูตรอาหารของสัตว์เศรษฐกิจเกือบทุกชนิดทั่วโลก (ชูศักดิ์ และคณะ, 2562) สำหรับในประเทศไทยพบว่าในปี 2561 มีพื้นที่ปลูกและเก็บเกี่ยวถั่วเหลือง 150,196 ไร่ ปลูกและเก็บเกี่ยวจำนวน 2 รอบ ได้แก่ ปลูกในช่วงเดือน พฤษภาคม – ตุลาคม แล้ว

เก็บเกี่ยวช่วงเดือน กรกฎาคม – ธันวาคม และรอบที่ 2 ปลูกช่วงเดือน พฤศจิกายน – กุมภาพันธ์ และเก็บเกี่ยวเดือนมกราคม – พฤษภาคมของทุกปี โดยส่วนใหญ่ปลูกในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เช่น แม่ฮ่องสอน เชียงราย ขอนแก่น และชัยภูมิ จากการสำรวจพบว่าจะมีของเสียจากกระบวนการแปรรูปถั่วเหลืองในรูปของกากถั่วเหลืองต่อปีมากถึง 1,923,000 tons ซึ่งสามารถจำหน่ายได้ในราคาประมาณ 11 baht/kg (จันทการต์ และคณะ, 2563) นอกจากการผลิตถั่วเหลืองภายในประเทศ ยังมีการนำเข้ากากถั่วเหลืองเพื่อให้เพียงพอต่ออุตสาหกรรมอาหารแปรรูปและอุตสาหกรรมการผลิตอาหารสัตว์ โดยประเทศไทยมีความต้องการเฉลี่ยปีละประมาณ 4,360,000 tons (กรมการค้าภายใน, 2565 และ USDA, 2564)



ภาพที่ 10 ลักษณะของถั่วเหลือง (ซ้าย) และกากถั่วเหลือง (ขวา)
ที่มา : เมตไทย, 2560 และ กรีนเสปซ มาร์เก็ต. (2559)

3.2 ชนิดของกากถั่วเหลือง

โดยทั่วไปกากถั่วเหลืองแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ กากถั่วเหลืองรวมเปลือก (Non Dehulled Soybean Meal) ในทางการค้าเรียกว่า กากถั่วเหลือง 44% และกากถั่วเหลืองไม่รวมเปลือก (Dehulled Soybean Meal) จะมีเฉพาะเนื้อถั่วเหลืองล้วน ในทางการค้าเรียกว่า กากถั่วเหลือง 49% ซึ่งกากถั่วเหลืองที่ได้จากการแปรรูปโดยเฉพาะการผลิตน้ำมันจะเหลือปริมาณกากถั่วเหลืองประมาณ 71.6% และเปลือก 7% ปริมาณแร่ธาตุหรือคุณค่าทางอาหารของกากถั่วเหลืองสำหรับอาหารสัตว์แบ่งตามลักษณะของการแปรรูปถั่วเหลืองได้ ดังนี้ (จันทการต์ และคณะ, 2563)

1) กากซีอิ๊ว (Dried Soy Sauce) มีปริมาณสารอาหารเฉลี่ยดังนี้ แคลเซียม 0.21% ฟอสฟอรัส 0.19% แมกนีเซียม 0.08% ฟอสฟอรัส 0.52% ซัลเฟอร์ 0.31% และโซเดียม 3.03%

2) กากเต้าหู้ (Fresh Soya Milk Residue) มีปริมาณสารอาหารเฉลี่ยดังนี้ แคลเซียม 0.47% ฟอสฟอรัส 0.43% แมกนีเซียม 0.20% ฟอสฟอรัส 1.13% ซัลเฟอร์ 0.31% และโซเดียม 0.06%

3) กากถั่วเหลือง (Soybean Meal) มีปริมาณสารอาหารเฉลี่ยดังนี้ แคลเซียม 0.35% ฟอสฟอรัส 0.68% แมกนีเซียม 1.06% ฟอสฟอรัส 1.84% ซัลเฟอร์ 0.38% และโซเดียม 0.01%

4) ถั่วเหลืองไขมันเต็ม (Full Fat Soybean) มีปริมาณสารอาหารเฉลี่ยดังนี้ แคลเซียม 0.26% ฟอสฟอรัส 0.53% แมกนีเซียม 0.23% ฟอสฟอรัส 1.74% ซัลเฟอร์ 0.31% และโซเดียม 0.01%

5) เปลือกถั่วเหลือง (Soybean Hulls) มีปริมาณสารอาหารเฉลี่ยดังนี้ แคลเซียม 1.00% ฟอสฟอรัส 0.42% แมกนีเซียม 0.32% ฟอสฟอรัส 1.87% ซัลเฟอร์ 0.37% และโซเดียม 0.01%

จากธาตุอาหารที่ต่างกันของแต่ละกระบวนการแปรรูปทำให้การนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในอาหารสัตว์ต้องทำการปรับปรุงธาตุอาหารต่าง ๆ เพิ่มเติมให้เหมาะสมกับสัตว์แต่ละชนิดต่อไป ซึ่งการนำกากถั่วเหลืองที่เคยเป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปถั่วเหลืองไปเป็นอาหารสัตว์หรือเป็นวัตถุดิบของผลิตภัณฑ์อื่น ถือเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับของเหลือทิ้ง ซึ่งปัจจุบันถือว่าเป็นวัตถุดิบที่มีมูลค่าสูงและไม่ถูกเรียกว่าเป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูป

4. กากถั่วดาวอินคา

4.1 ที่มาของกากถั่วดาวอินคา

ถั่วดาวอินคา (Sacha Inchi หรือ Inca Peanuts) เป็นถั่วที่มีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้ ตระกูลเดียวกับ ยางพารา สบู่ดำ หรือมันสำปะหลัง มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Plukenetia volubilis* L. ปัจจุบันถูกนำเข้ามาในทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมถึงประเทศไทย เนื่องจากเป็นพืชถั่วที่มีประโยชน์ด้านสุขภาพ เพราะมีปริมาณของกรดไขมันจำเป็นชนิดไม่อิ่มตัว (Unsaturated Fatty Acids) โดยเฉพาะโอเมก้า 3 (α – linolenic acid, ALA) และโอเมก้า 6 (Linoleic acid, LA) ช่วยป้องกันการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือด โรคมะเร็ง โรคอัลไซเมอร์ โรคข้ออักเสบ และการอักเสบต่าง ๆ ของร่างกาย โดยเมล็ดถั่วดาวอินคามีโปรตีน 27% ไขมัน 35 – 60% โดยการบริโภคถั่วดาวอินคาจะมีลักษณะการนำไปแปรรูปคล้ายกับถั่วเหลือง แต่มีมูลค่าสูงกว่า (สิริมา, 2560) ลักษณะของถั่วดาวอินคาและกากถั่วดาวอินคาแสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 11 ลักษณะของถั่วดาวอินคา (ซ้าย) และกากถั่วดาวอินคา (ขวา)
ที่มา: พีชเกษตร. (2559)

4.2 การใช้ประโยชน์จากกากถั่วดาวอินคา

การใช้ประโยชน์จากส่วนเมล็ดของถั่วดาวอินส่วนใหญ่จะนำไปสกัดเป็นน้ำมันดาวอินคา สกัดเย็นที่มีกรดไขมันจำเป็นปริมาณสูงโดยรับประทานเป็นอาหารเสริม หรือ สามารถนำไปคั่วบรีโกล ทั้งเมล็ดคล้ายอัลมอนต์ จากกระบวนการแปรรูปส่วนใหญ่ที่นำไปสกัดเป็นน้ำมันดาวอินคาจึงเกิดเป็น ผลพลอยได้หลังการหีบสกัด คือ กากถั่วดาวอินคา ซึ่งสามารถนำไปใช้ต่อได้ (สิริมา ชินสาร, 2560) เช่น นำไปช่วยเป็นโปรตีนอาหารสัตว์เศรษฐกิจ ปลา ไก่ หมู เป็นต้น โดยจะช่วยเสริมการเจริญเติบโต ของสัตว์ต่าง ๆ จากการสำรวจปี 2562 พบว่ามีกากถั่วดาวอินคาเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมัน สกัดเย็นต่อโรงงานประมาณ 60 tons/year ซึ่งกากถั่วดาวอินคาที่เหลือทิ้งนั้นคิดเป็น 70 – 80% ของเมล็ดถั่วดาวอินคาที่ใช้ในการแปรรูป (นาริรัตน์ และคณะ, 2564) จึงมีการศึกษาวิจัยการนำกาก ถั่วดาวอินคาไปใช้ประโยชน์ ตัวอย่างการเพิ่มคุณค่ากากถั่วดาวอินคาโดยการนำมาเป็นแหล่งโปรตีน ให้กับสัตว์ เช่น ปลาไน พบว่า ปลาไนสามารถใช้ประโยชน์จากโปรตีนของกากถั่วดาวอินคาทดแทน การใช้แหล่งโปรตีนจากกากถั่วเหลืองเพื่อการเจริญเติบโตได้เป็นอย่างดี โดยไม่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อวิทยา และยังสามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตสัตว์น้ำให้ต่ำลง นอกจากนี้ยัง เป็นการใช้วัสดุเศษเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมให้เกิดประโยชน์สูงสุด และให้สามารถเพิ่มมูลค่าได้ อีกด้วย ดังนั้นกากถั่วดาวอินคาที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบ extrusion จึงเป็นวัตถุดิบที่มีความเหมาะสมและสามารถพัฒนาศักยภาพการใช้ประโยชน์ในอาหารสำหรับปลาได้ นอกจากนี้ยังมีการนำกากถั่วดาวอินคาไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์และเชื้อเพลิงอัดแท่งได้อีกด้วย

การตรวจสอบเอกสาร

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกากถั่วเหลืองและกากถั่วดาวอินคาในกระบวนการแปรรูปหนอนแมลงวันลายประกอบไปด้วย การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของหนอนแมลงวันลาย หรือน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปหนอนแมลงวันลาย รวมถึงศึกษาคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับอาหารเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย คือ กากถั่วเหลือง และ กากถั่วดาวอินคา หรือน้ำเสียที่มีส่วนประกอบของโปรตีนสูง โดยงานวิจัยที่ศึกษามีรายละเอียดดังนี้

1. การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียประเภทโปรตีนสูง

หนอนแมลงวันลายจากงานวิจัยนี้ถูกเลี้ยงในอาหารประเภทถั่วซึ่งมีโปรตีนสูง จึงศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของโปรตีนเป็นหลักที่ถูกบำบัดด้วยเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยบทความการรวบรวมงานวิจัยของ Wang and Serventi (2019) ศึกษาเกี่ยวกับความยั่งยืนของการแปรรูปผลิตภัณฑ์นมและถั่วเหลืองในเรื่องของการจัดการน้ำเสียและของเสียกลับมาใช้ใหม่ จากการศึกษาพบว่าอุตสาหกรรมการแปรรูปนมโค (Dairy Processing) และการแปรรูปถั่วเหลือง (Soy Processing) ซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนทั่วไปที่ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารของคนสร้างน้ำเสียมากถึง 11 L ต่อวัตถุดิบที่ใช้ปริมาณ 1 L โดยน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการแปรรูปถั่วเหลืองแสดงดังตารางที่ 1 สรุปองค์ประกอบของน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์นมและถั่วเหลือง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของน้ำเสีย และเทคโนโลยีการจัดการน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์นมและถั่วเหลือง

	Dairy Processing	Soy Processing
ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ	0.2 – 10 L/L _{milk}	1.5 – 10 L/kg _{tofu}
ต้นทุนการเดินระบบ (US\$/m ³ _{treated Effluent})	64 – 3374	130
องค์ประกอบของน้ำเสีย		
– pH	6.0 – 7.4	5.4 – 6.6
– BOD (g/L)	1.6 – 48	4.1 – 6.8
– COD (g/L)	0.43 – 95	7.5 – 12
– Nitrogen (mg/L)	17 – 1,120	370 – 440
– Phosphorous (mg/L)	10 – 500	81 – 92

	Dairy Processing	Soy Processing
การบำบัดทางเคมีกายภาพ	<ul style="list-style-type: none"> ● Dissolved Air ● Flotation ● Coagulation-Flocculation 	<ul style="list-style-type: none"> ● Ultrafiltration ● Coagulation-Flocculation ● Foam Fractionation
การบำบัดทางชีวภาพ	<ul style="list-style-type: none"> ● Anaerobic ● Biological Treatment ● Activated Sludge ● Membrane Bioreactor 	<ul style="list-style-type: none"> ● Aerobic Granular Sludge ● Anaerobic Filters ● Up-flow Anaerobic Sludge Blanket
การใช้งาน (Application)	<ul style="list-style-type: none"> ● Irrigation ● Algae Growth 	<ul style="list-style-type: none"> ● Protein Isolation ● Oligosaccharide Isolation ● Phytochemical ● Isolation ● Minerals Isolation ● Texturizer ● Food Ingredient

ที่มา : Wang and Serventi. (2019)

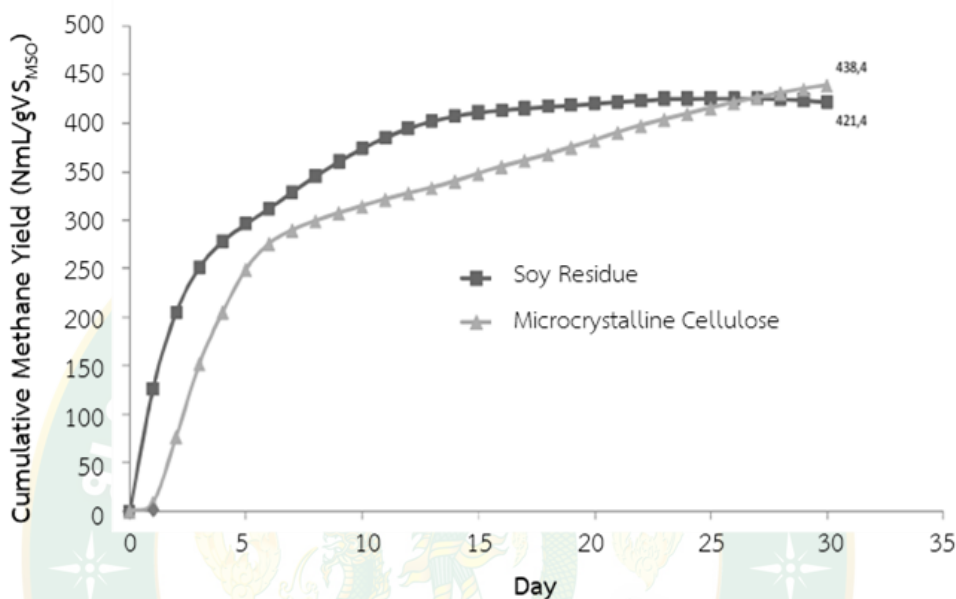
โดยน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปถั่วเหลืองมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 5.4 – 6.6 ปริมาณความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (Biochemical Oxygen Demand, BOD) ประมาณ 4.10 – 6.80 g/L ค่าซีโอดี 7.50 – 12.00 g/L ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเท่ากับ 370 – 440 mg/L และ 81 – 92 mg/L ตามลำดับ นอกจากนี้ น้ำเสียที่เกิดจากการแปรรูปถั่วเหลืองจะมีปริมาณสารอินทรีย์และชีวมวลสูง จึงมีการนำเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียแบบต่าง ๆ มาใช้ ทั้งการบำบัดทางกายภาพ การบำบัดทางเคมี หรือการบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งเทคโนโลยีดังกล่าวมีอุปกรณ์ที่ช่วยให้การย่อยสลายสารอินทรีย์จำนวนมากได้ เช่น ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพแบบตรึงฟิล์ม แบคทีเรีย (Anaerobic Filters, AFF) มีวัสดุตัวกลาง เช่น เชือกไนลอน ตาข่าย ช่วยเป็นพื้นผิวให้แบคทีเรียยึดเกาะมีลักษณะคล้ายตาข่ายกรองสารอินทรีย์ แบคทีเรียจึงสัมผัสน้ำเสียได้อย่างทั่วถึงและบำบัดน้ำเสียได้ หรือระบบ Up-flow Anaerobic Sludge Blanket หรือเรียกว่า UASB เป็นการพัฒนาระบบการบำบัดขนาดใหญ่ให้ประหยัดพื้นที่ในการใช้ตัวกรองหรือวัสดุตัวกลางในถังปฏิกรณ์ โดยออกแบบให้น้ำไหลจากล่างขึ้นบนทำให้สามารถรักษาตะกอนแบคทีเรีย ช่วยบำบัดน้ำเสียได้โดยไม่ต้องใช้วัสดุตัวกลาง แต่มีข้อจำกัด คือ เหมาะกับแบคทีเรียขนาดใหญ่ ความหนาแน่นสูง และมีน้ำหนักรวม

รวมถึงต้องติดตั้งอุปกรณ์เพื่อป้องกันไม่ให้ตะกอนหลุดออกจากระบบ ดังนั้น ในการนำปรับมาใช้กับอุตสาหกรรมการผลิตนมหรือถั่วเหลืองต้องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของน้ำเสียแต่ละพื้นที่ และคัดเลือกเทคโนโลยีหรือพัฒนาระบบที่เหมาะสม

Wagiman et al. (2020) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียในกระบวนการผลิตเต้าหู้ร่วมกับเศษผักโปรตีนสูง ได้แก่ เศษผักกาดขาว เศษกวาดตุง และเศษกะหล่ำปลี และออกแบบการทดลองปริมาตรการหมัก 2 L ทั้งหมด 3 การทดลอง ได้แก่ การทดลองที่ 1 ชุดควบคุม ผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย การทดลองที่ 2 การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษผัก และการทดลองที่ 3 การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียร่วมกับเศษผัก ระยะเวลาในการทดลอง 30 days และศึกษาค่าความเป็นกรดต่าง ค่าความสกปรก ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด รวมถึงองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบในการทดลอง จากการทดลองพบว่า คุณสมบัติทางเคมีของน้ำเสียจากการผลิตเต้าหู้มีไขมัน 0.11% โปรตีน 0.25% คาร์โบไฮเดรต 0.20% diff มีปริมาณความสกปรก 6,818.95 mg/L ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด 3,708.67 mg/L ปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ทั้งหมด 10.42 mg/L และค่าความเป็นกรดต่าง 3.91 สำหรับเศษผักกะหล่ำปลี กวาดตุง และผักกาดขาวที่นำมาเป็นสารอาหารเพิ่มมีองค์ประกอบของโปรตีน 2.67%, 1.58% และ 1.91% ตามลำดับ ผลการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่าน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเต้าหู้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสม 65 mL ในระยะเวลา 35 days เมื่อนำไปหมักร่วมกับเศษผักทั้ง 3 ชนิด พบว่าการหมักร่วมกับเศษผักกาดขาวได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพดีที่สุดที่ 246 mL หลังจากนั้นจึงนำไปทดลองร่วมกับการใช้มูลวัวเป็นหัวเชื้อพบว่า สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้นเป็น 715 mL เนื่องจากมูลโคมีแบคทีเรียที่ช่วยในการผลิตก๊าซมีเทนปริมาณมาก

Araujo et al. (2017) ศึกษาการหมักแบบไร้อากาศโดยใช้กากเหลือทิ้งจากกระบวนการแปรรูปถั่วเหลืองเพื่อหาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและการผลิตพลังงานจากกากเหลือทิ้งดังกล่าว ทำการศึกษาโดยออกแบบขนาดทดลองตามมาตรฐานวิธีการทดลองแบบ Automatic Methane Potential Test System II (AMTPS II) อุปกรณ์การทดลองประกอบไปด้วยขวดหมักขนาด 500 mL เครื่องกวนไฟฟ้า ชุดกรองก๊าซด้วยหลักการแทนที่ด้วยน้ำร่วมกับเครื่องวัดปริมาตรก๊าซแบบดิจิทัล เชื่อมต่อระบบเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล ออกแบบการทดลองโดยมีชุดการทดลองอ้างอิง เป็นตัวแปรควบคุมด้วยเซลลูโลสไมโครคริสตอลไลน์ (Microcrystalline Cellulose) ที่สามารถย่อยสลายได้ 100% สำหรับหัวเชื้อ เก็บจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB สำหรับอุตสาหกรรมอาหาร การวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายตามมาตรฐาน AMTPS II การหาปริมาณของแข็งระเหยง่ายใช้ในการคำนวณหาปริมาณหัวเชื้อต่อปริมาณวัตถุดิบที่อัตราส่วน 2:1 โดยทดลองในขวด

ขนาด 400 mL ปริมาตรการหมัก 300 mL และทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ ควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง ทำให้เป็นสภาวะกรดด้วยก๊าซไนโตรเจน ควบคุมอุณหภูมิที่ 40 °C และเชื่อมขวดทดลองเข้ากับขวดที่บรรจุสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 3 mol/L ที่มีการหยดไทโมลทาลีนอินดิเคเตอร์ 0.4% เพื่อสังเกตจุดยุติของการสกัดก๊าซมีเทนที่ผ่านสารละลายดังกล่าว

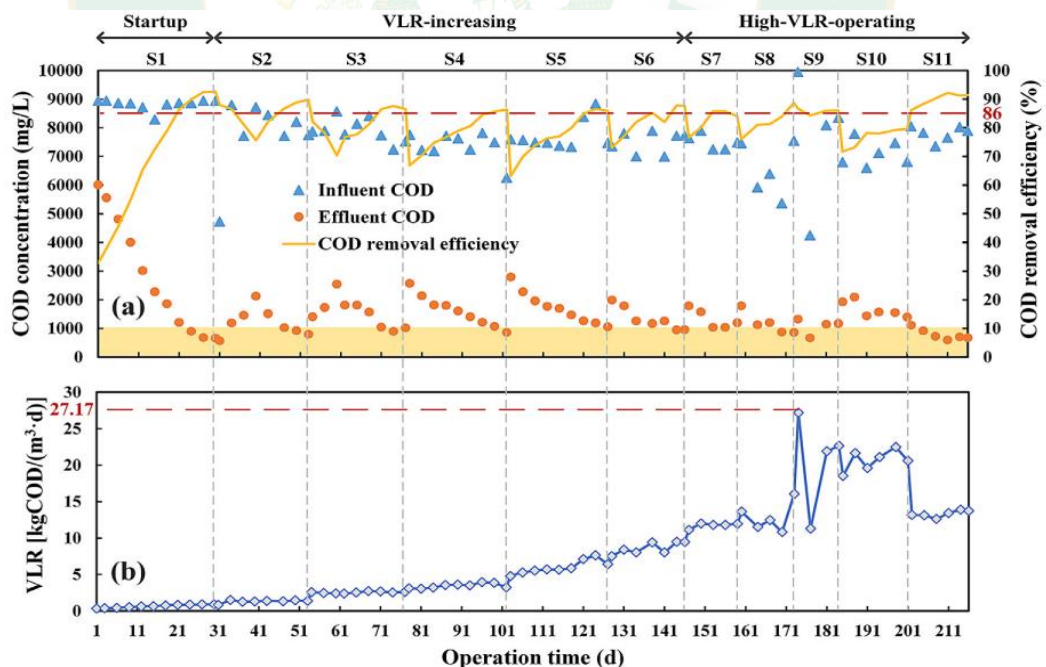


ภาพที่ 12 ผลการผลิตก๊าซมีเทนระหว่างกากถั่วเหลืองและเซลลูโลส
ที่มา : Araujo et al. (2017)

ผลการทดลองพบว่าปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นระหว่างของเสียจากถั่วเหลืองและเซลลูโลสไมโครคริสตัลไลน์ตลอดระยะเวลาการทดลองเป็นเวลา 30 days แสดงดังภาพที่ 12 เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 days พบว่าอัตราการผลิตก๊าซของของเสียจากถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและเริ่มคงที่ในช่วง 25 days สามารถคิดเป็นก๊าซมีเทนชีวภาพต่อเดือนได้ประมาณ 5.77 m³ เมื่อคำนวณพลังงานที่ได้ตามทฤษฎีจากค่าประมาณการสร้างก๊าซชีวภาพในกรณีศึกษานี้เท่ากับ 19 KJ/s ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานความร้อนในหม้อไอน้ำในอุตสาหกรรม เครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน หรือเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้

Chen et al. (2021) ศึกษากระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศของน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปถั่วเหลืองกับหัวเชื้อสารชั้นเหลวในระบบผลิตก๊าซชีวภาพตะกอนเม็ด (Anaerobic Granular Sludge, AGS) โดยมุ่งเน้นที่การศึกษากลุ่ทรูการเดินระบบและคุณลักษณะของตะกอน

จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพประสิทธิภาพสูงแบบ Spiral Symmetric Stream (SSSAB) ขนาดนำร่อง ก่อนนำไปใช้จริง โดยมีปริมาตรการหมัก 100 L ซึ่งวัตถุดิบน้ำเสียจากระบวนการแปรรูปถั่วเหลืองที่มี pH อยู่ในช่วง 6.9 – 9.2 และมีอัตราส่วน VFA/ALK อยู่ในช่วง 0.03 – 0.17 นำไปทดลองที่อัตราการเติมโดยปริมาตร (Volumetric Load Rate, VLR) ตั้งแต่ 0.32 – 27.17 kgCOD/(m³·day) ในระยะเวลามากกว่า 216 days และมีระยะเวลากักเก็บแบ่งเป็น 11 ช่วง ตั้งแต่ 218.18, 120.00, 60.00, 40.00, 24.00, 17.14, 12.63, 10.00, 7.62, 6.32 และ 12.63 hr ผลการศึกษาความเข้มข้นเข้าระบบและออกระบบของค่าซีโอดีและอัตราการเติมโดยปริมาตรที่สอดคล้องกันแสดงดังภาพที่ 11 ผลการศึกษาพบว่า VLR ที่สูงที่สุดและเหมาะสมที่สุดของระบบ SSSAB คือ ประมาณ 22 kgCOD/(m³·day) สามารถผลิตมีเทนได้เท่ากับ 0.47 m³/kgCOD ที่สัดส่วนมีเทนสูงสุด 72.22% สำหรับการวิเคราะห์ลักษณะของกากตะกอนในระบบพบว่ากากตะกอนที่อยู่บริเวณก้นถังเป็นบริเวณที่กำจัด COD ได้มากที่สุด สามารถสังเกตได้จากอัตราส่วนตะกอนแขวนลอยต่อตะกอนแขวนลอยระเหย (MLSS/MLVSS) ซึ่งบริเวณก้นถังเท่ากับ 6.830 บริเวณกลางถังเท่ากับ 4.257 และบริเวณด้านบนมีอัตราส่วนเท่ากับ 3.747 และสำหรับตำแหน่งของกากตะกอนส่วนบนของถังยังเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้แอมโมเนีย (NH⁴⁺-N) เพิ่มขึ้น โดยมีค่ากิจกรรมของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน (SMA) สูงสุดเท่ากับ 666.35 mLCH₄/(gVSS·day)



ภาพที่ 13 ความเข้มข้นเข้าระบบและออกระบบของค่าซีโอดีและอัตราการเติมโดยปริมาตร (VLR)

ที่มา : Chen et al. (2021)

และมีความเข้มข้นของโคเอนไซม์ F₄₂₀ เท่ากับ 0.690 mol/gVSS นอกจากนี้ มีการวิเคราะห์ชุมชนแบคทีเรียในกากตะกอน โดยวิเคราะห์การจัดลำดับความเร็วสูง 16S rRNA ของชุมชนแบคทีเรียใน AGS พบว่ามีความเฉพาะเจาะจงกับน้ำเสียในกระบวนการผลิตถั่วเหลืองมากขึ้น เนื่องจากมีแบคทีเรีย Firmicutes เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างสายพันธุ์ได้โดยตรง สำหรับการย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายชนิดต่าง ๆ แบบสังเคราะห์และทำให้เกิดการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

Kim and Kim. (2020) ศึกษาการลดความล่าช้า (Lag phase) ในการเริ่มกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโปรตีนสูงในระบบการย่อยแบบไร้อากาศ ซึ่งโปรตีนที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ไอโซเลตเวย์โปรตีน (WPI) เป็นโปรตีนที่ได้จากนมวัว เจลาติน (G) เป็นโปรตีนที่สกัดจากไข่กระดุกสัตว์ และอัลบูมิน (A) เป็นโปรตีนที่ได้จากไข่ขาว โดยการทดลองแบบกะภายใต้อุณหภูมิเมโซฟิลิกส์ 36.5 °C แบ่งการทดลองเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ การทดลองที่ 1 ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของโปรตีนทั้ง 3 ชนิดกับหัวเชื้อในอัตราส่วนอาหารต่อแบคทีเรีย (F/M ratio) 1.0 และการทดลองที่ 2 ศึกษาผลของอัตราส่วนอาหารเจลาตินต่อแบคทีเรียที่อัตราส่วน 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 รวมถึงสังเกตช่วง Lag phase ของแต่ละอัตราส่วน โดยแต่ละกลุ่มการทดลองจะใช้มูลหมูเป็นหัวเชื้อ ซึ่งผลการทดลองพบว่า ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนของโปรตีนที่อัตราส่วน F/M 1.0 แสดงศักยภาพในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศของ WPI เจลาติน และ อัลบูมินดังตารางที่ 2 พบว่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าใกล้เคียงกัน สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 795.83±24.74, 801.11±12.02 และ 750.68±2.81 mL_{CH4}/gVS_{substrate} ตามลำดับ โดยมีระยะความล่าช้าในการผลิตก๊าซชีวภาพ 12-16 days จากระยะเวลาการหมักแบบกะทั้งหมดประมาณ 40 days ซึ่งโปรตีนในรูปของเจลาตินซึ่งผลิตจากไข่กระดุกสัตว์มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนและสัดส่วนก๊าซมีเทนสูงที่สุดเท่ากับ 77.70% และประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์มากที่สุด โดยสามารถย่อยสลายของแข็งทั้งหมด 40.71% ย่อยสลายของแข็งระเหยง่าย 65.54% และย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำในรูปของค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี หรือ COD เท่ากับ 48.09%

ตารางที่ 2 ศักยภาพในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศของ WPI เจลาติน และ อัลบูมิน

วัตถุดิบ	ก๊าซชีวภาพสะสม (mL/gVS _{substrate})	สัดส่วนก๊าซ มีเทน (%)	ก๊าซชีวภาพสะสม (mL _{CH4} /gVS _{substrate})	T90** (days)	ระยะเวลา ความล่าช้า (days)
WPI*	1,037.36±1.73	76.73±2.28	795.83±24.74	44±0.57	16.44±0.69
เจลาติน	1,031.01±5.19	77.70±1.01	801.11±12.02	39±1.73	12.78±0.47

วัตถุดิบ	ก๊าซชีวภาพสะสม (mL/gVS _{substrate})	สัดส่วนก๊าซ มีเทน (%)	ก๊าซชีวภาพสะสม (mL _{CH₄} /gVS _{substrate})	T90** (days)	ระยะเวลา ความล่าช้า (days)
อัลบูมิน	996.93±11	75.30±0.61	750.68±2.81	42±2.65	15.30±0.60

ที่มา : Kim and Kim. (2020)

*WPI; ไอโซเลตเวย์โปรตีน

**T90; เวลาที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด 90%

นอกจากนี้ยังพบว่าค่า pH ที่ออกจากระบบมีค่าลดต่ำลงแต่ยังอยู่ในช่วงต่างอ่อนประมาณ 8.21 – 8.28 และเมื่อพบว่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของเจลาตินดีที่สุดในอัตราส่วน F/M ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 พบว่าการเพิ่มสัดส่วนหัวเชื้อสามารถระยะเวลาความล่าช้าของการเกิดก๊าซชีวภาพได้ โดยอัตราส่วนที่มีหัวเชื้อมากที่สุดคืออัตราส่วน F/M เท่ากับ 0.2 มีระยะเวลาความล่าช้าเพียง 7.10±0.59 days ในขณะที่อัตราส่วน F/M ของ 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 เท่ากับ 8.07±0.80, 8.13±0.34, 9.31±0.00 และ 12.90±1.97 days ตามลำดับ แต่ไม่ส่งผลโดยตรงต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดคืออัตราส่วน F/M เท่ากับ 1.0 ซึ่งมีปริมาณหัวเชื้อและวัตถุดิบเท่ากัน โดยสามารถผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 75.90% ที่ก๊าซมีเทนสะสม 782.66 mL/gVS_{substrate} ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นโปรตีนสูงจะมีระยะเวลาการย่อยสลายนาน จึงควรเพิ่มหัวเชื้อที่มีศักยภาพเพื่อลดระยะเวลาการหมักและเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนและการกำจัดสารอินทรีย์สูงสุดด้วยการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของแต่ละหัวเชื้อ ซึ่งในอัตราส่วน F/M เท่ากับ 1.0 คือ อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของทุกเงื่อนไขในการศึกษานี้สำหรับกรณีของการหมักกับหัวเชื้อมูลสุกร

สำหรับการศึกษาของ Moguel-Castañeda et al. (2020) ศึกษาโปรตีนเวย์ที่เป็นของเสียที่มีความเข้มข้นสูงจากระบวนการผลิตชีส การกำจัดของเสียชีสด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและผลิตพลังงานได้พร้อมกัน อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เป็นตัวแปรปฏิบัติการที่สำคัญสำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่เกี่ยวข้องกับความเสถียรของระบบ ความสามารถในการบำบัดของเสีย และการผลิตก๊าซชีวภาพ อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่แท้จริงขึ้นอยู่กับประเภทของเสีย เช่น ปริมาณความต้องการออกซิเจนทางเคมีที่ป้อนลงในบ่อหมัก ในบทความนี้ ศึกษาผลของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่อกระบวนการหมักแบบไร้อากาศของโปรตีนเวย์ชีสดิบในระบบอัพโฟลว์แบบกึ่งต่อเนื่องด้วยการทดลองและการจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้แบบจำลองไดนามิกอย่างง่ายที่ปรับเทียบด้วยข้อมูลการทดลอง ดำเนินการบ่อหมักเป็น

เวลา 90 days โดยเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็นสองเท่าทุก 30 days จากอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.5 – 10 gCOD/(L•day) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เอื้อต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ อย่างไรก็ตามสัดส่วนของก๊าซมีเทนอาจลดลง ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดและการเสื่อมสภาพของวัตถุดิบที่สำคัญที่สุดได้มาจาก OLR ที่ 5 gCOD/(L•day) และ 10 gCOD/(L•day) ตามลำดับ แสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เสนอนี้ใช้เพื่ออธิบายพฤติกรรมไดนามิกของตัวแปรหลัก เช่น ค่าความสกปรก กรดไขมันระเหยง่าย และการผลิตก๊าซมีเทน โดยได้ค่าสัมประสิทธิ์มากกว่า 0.8 ดังนั้นสามารถทำนายอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดและอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุดที่สามารถใช้ได้โดยไม่เสี่ยงต่อความเสถียรของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

2. การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง

Khoufi et. al. (2015) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการหมักร่วมแบบไร้อากาศของน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปมะกอกร่วมกับมูลสัตว์ปีกในการทดลองแบบกะและการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์เจ็ตลูป (Jet – loop Reactor, JLR) โดยในการทดลองแบบกะเพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตมีเทนทางเคมีชีวภาพจากผลได้ของมีเทนโดยเปรียบเทียบผลการทดลองกับการประยุกต์ใช้เครื่องมือ ANOVA ซึ่งจะศึกษาอัตราส่วนระหว่างน้ำเสียกับหัวเชื้อที่อัตราส่วนโดยปริมาตรทั้งหมด 7 อัตราส่วน ได้แก่ 100:0, 90:10, 70:30, 50:50, 30:70, 10:90 และ 0:100 และกำหนดให้อัตราส่วนของแข็งระเหยง่ายระหว่างน้ำเสียและหัวเชื้อเท่ากับ 1:1 ซึ่งจะบรรจุในขวดแก้วขนาด 120 mL ปริมาตรการหมัก 60 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน ปรับ pH ให้เท่ากับ 7.2 อัดก๊าซที่ผสมระหว่างก๊าซไนโตรเจน 75% และ คาร์บอนไดออกไซด์ 25% เป็นเวลา 3 – 4 min เพื่อให้อยู่ในสภาพไร้อากาศ หลังจากนั้นจึงเริ่มการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิระหว่างการทดลองให้อยู่ในช่วงมีโซฟิลิกซ์ (37 ± 1 °C) เป็นระยะเวลา 65 days ทั้งหมด 3 ซ้ำ สำหรับการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องใน JLR ที่มีลักษณะเป็นเครื่องปฏิกรณ์เสตนเลสทรงกระบอกขนาดปริมาตรการหมัก 70 L ควบคุมอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ 37 ± 1 °C ช่วงเริ่มต้นการทดลองจะป้อนวัตถุดิบที่ถูกรีดในอัตราส่วนโดยปริมาตรของน้ำเสีย 10% และหัวเชื้อ 30% ทุกวัน ณ เวลาเดียวกัน หลังจากนั้นจึงทดลองแบ่งเป็น 2 ช่วง ช่วงแรก คือ ตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงวันที่ 145 โดยมีการเติมวัตถุดิบทั้งหมด 3.5 L ซึ่งประกอบด้วยน้ำเสีย 90% และหัวเชื้อ 10% ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสีย 20 days และค่อย ๆ เพิ่มความเข้มข้นของค่าซีโอดีตั้งแต่ 5 – 15 g/L โดยมีความเข้มข้นซีโอดีเฉลี่ย 160 g/L สำหรับช่วงที่ 2 เริ่มตั้งแต่วันที่ 146 จนถึงวันสุดท้ายของการทดลอง ซึ่งจะเติมน้ำเสียในอัตราส่วน 70% หัวเชื้อ 30% ควบคุมค่าซีโอดีให้อยู่ในช่วง 80 – 100 g/L ที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำเสีย 20 days จากการทดลองแบบกะแสดงให้เห็นว่าการเติมหัวเชื้อในอัตราส่วน 10%v/v และ 30%v/v ช่วยเพิ่มผลผลิตของก๊าซมีเทน

สำหรับการย่อยน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปมะกอก เมื่อทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ JLR จึงยืนยันผลได้ว่าสัดส่วนหัวเชื้อที่ 30%v/v เป็นสถานะที่เหมาะสมที่สุด และมีเสถียรภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพดีที่สุด โดยการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มสูงขึ้นต่อเนื่องอย่างมีนัยสำคัญจนกระทั่งอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 9.5 gCOD/(L•day) ดังนั้นการศึกษานี้จึงบ่งชี้ความเป็นไปได้ทางเทคนิคของการขยายผลการทดลองจากแบบกะไปยังแบบกึ่งต่อเนื่อง และในขนาดโรงงานอุตสาหกรรมต่อไปได้จากเครื่องปฏิกรณ์ดังกล่าว

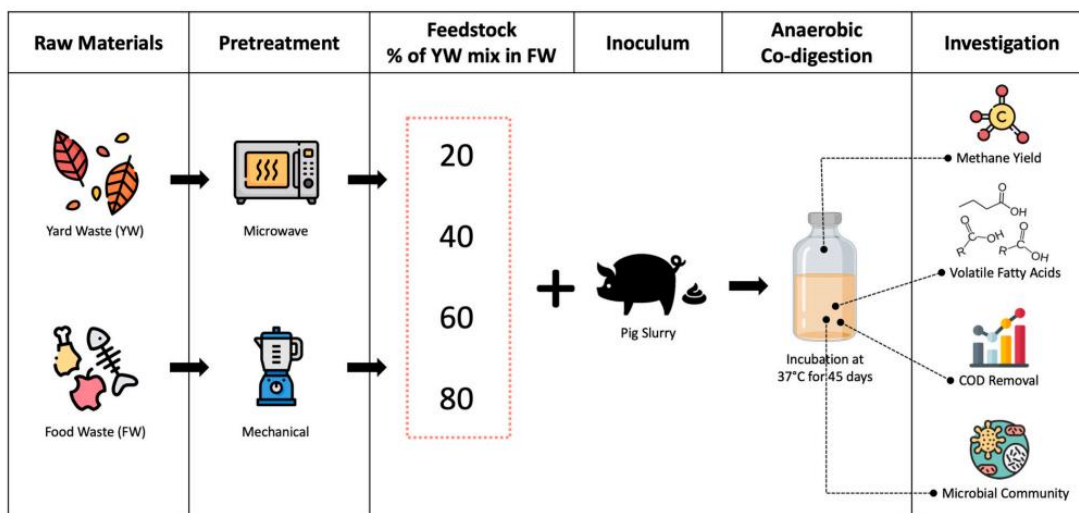
Duan et al. (2019) ศึกษาผลกระทบของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) และปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid, TS) ต่อประสิทธิภาพการหมักแบบไร้อากาศจากมูลสุกรในถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมขนาด 20 L จำนวน 6 ถัง ภายใต้อุณหภูมิมีโซฟิลิก โดยการหมุนวนน้ำร้อนจากเครื่องทำน้ำร้อนไปรอบๆตัวถังปฏิกรณ์ กำหนดอัตราการเติมวัตถุดิบตั้งแต่ 1.13 – 3.03 gVS/(L•day) และของแข็งรวมเข้มข้น 3 – 8% เป็นเวลา 22 days ประเมินปริมาณก๊าซมีเทนอัตราการไหลเชิงมวล ขนาดของบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา และความร้อนที่ถูกถ่ายเทที่เกิดขึ้นจากการหมัก ซึ่งผลปรากฏว่าอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมที่สุดเท่ากับ 1.89 gVS/(L•day) ที่ของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 5% ได้ก๊าซชีวภาพสูงถึง 438.38 mL/gVS เมื่ออัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณของแข็งระเหยง่ายจะเพิ่มขึ้นตามกัน

Febriyanto et. al. (2021) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากของน้ำเสียจากการผลิตเต้าหู้และซอสถั่วเหลืองที่มีความต้องการออกซิเจนทางเคมีสูงประมาณ 55.328 g/L โดยศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่องในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบท่อไหล (Plug Flow Reactors) สำหรับอัตราส่วนน้ำเสียการผลิตเต้าหู้ต่อน้ำเสียจากการผลิตซอสถั่วเหลืองเท่ากับ 1:0, 1:1 และ 0:1 โดยวัตถุดิบทั้งหมดจะถูกหมักกับหัวเชื้อมูลวัวในอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 2:1 ณ ระยะเวลาที่เก็บ 30 days ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วน 0:1 หรือ การหมักน้ำเสียจากการผลิตซอสถั่วเหลืองสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงที่สุดเท่ากับ 27,811.3 mL ที่สัดส่วนก๊าซมีเทน 59.71% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 38.72% ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 1.28% และก๊าซแอมโมเนีย 0.298% น้ำเสียจากการผลิตเต้าหู้ต่อน้ำเสียจากการผลิตซอสถั่วเหลืองอัตราส่วน 1:1 และ 1:0 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 18,015.8 mL และ 7,348 mL ตามลำดับ เมื่อคำนวณผลผลิตของก๊าซชีวภาพต่อมวลของวัตถุดิบพบว่าอัตราส่วน 1:0, 1:1 และ 0:1 มีผลได้สะสมเท่ากับ 0.5899, 0.2596 และ 0.2185 m³/kg ตามลำดับ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเต้าหู้และซอสถั่วเหลืองมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

3. การศึกษาศักยภาพหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

Yan et al. (2021) ศึกษาเกี่ยวกับพารามิเตอร์อัตราส่วนคาร์บอนไนโตรเจนเพื่อการเลือกวัตถุดิบในการหมักก๊าซชีวภาพ โดยการหมักก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบต่าง ๆ ได้แก่ ปุ๋ยคอก มูลห่าน มูลไก่ ฟางข้าวโพด ฟางถั่วเหลือง เศษอาหาร กากมันสำปะหลัง สมุนไพรจีน และแป้งข้าวโพด หมักร่วมกับหัวเชื้อจากสารชั้นเหลวก๊าซชีวภาพในฟาร์มปศุสัตว์ โดยใช้ขวดรูปชมพู่เป็นภาชนะหมักไร้อากาศแบบกึ่งต่อเนื่อง ปริมาตรการหมักรวม 1.5 L ก่อนการหมัก วัตถุดิบแต่ละชนิดจะถูกเจือจางความเข้มข้นลง เพื่อป้องกันระบบผลิตก๊าซชีวภาพไม่ทำงานจากปริมาณสารประกอบแอมโมเนียและซัลเฟอร์ที่มากเกินไป โดยเฉพาะมูลไก่ จะถูกเจือจางให้ต่ำกว่า 3% หลังจากนั้นทำการหมักมากกว่า 30 days ตรวจวัดและวิเคราะห์ค่าต่าง ๆ เช่น อัตราการเปลี่ยนวัตถุดิบ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีอยู่ (Available Carbon and Nitrogen Ratio: AC/N) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon and Nitrogen Ratio: C/N) ปริมาณก๊าซมีเทน ก๊าซชีวภาพ เป็นต้น ผลการวิจัยพบว่า วัตถุดิบที่มีโปรตีน ไขมัน น้ำตาล เฮมิเซลลูโลส ช่วยเพิ่มก๊าซมีเทนอีลด์ เนื่องจากสามารถย่อยสลายได้ด้วยแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศ โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีอยู่ที่เหมาะสม คือ 11 – 15 ซึ่งงานวิจัยนี้เชื่อว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีอยู่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน เนื่องจากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีอยู่มีค่าต่ำกว่าเล็กน้อยโดยมูลไก่มีอัตราส่วนอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีอยู่น้อยที่สุด

Pongsopon et. al. (2023) ศึกษาการหมักร่วมในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศของเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการตัดหญ้า เศษอาหาร และสารชั้นเหลวจากมูลสุกร โดยหมักแบบกะเพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนและลักษณะชุมชนแบคทีเรียในระบบ แสดงภาพรวมการศึกษาดังภาพที่ 12 โดยจะเตรียมมูลสุกรโดยการหมักแบบไร้อากาศที่อุณหภูมิ 37 ± 1 °C ก่อนนำมาใช้เป็นหัวเชื้อหมักร่วมกับเศษการตัดหญ้าและเศษอาหารที่จะถูกปรับสภาพก่อนเข้าระบบ โดยเศษอาหารจะถูกจัดเก็บจากโรงอาหารสถาบันวิทยสิริเมธี จังหวัดระยอง ประเทศไทย นำมาประเมินส่วนประกอบของเศษอาหาร โดยพบว่ามีองค์ประกอบของเศษข้าวประมาณ 40%w/w เศษผัก เช่น ผักกาด กะหล่ำ มะเขือเทศ เป็นต้น ประมาณ 20%w/w เศษเส้นก๋วยเตี๋ยวประมาณ 10%w/w เศษกระดูกประมาณ 10%w/w เศษเนื้อสัตว์ประมาณ 5%w/w และเปลือกกล้วยประมาณ 5%w/w



ภาพที่ 14 ภาพรวมการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของการหมักร่วมระหว่างเศษวัสดุเหลือทิ้งจากการตัดหญ้า เศษอาหาร และสารขี้เลื่อยจากมูลสุกร
ที่มา : Pongsopon et. al. (2023)

ก่อนนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการทดลองจะถูกคัดแยกส่วนประกอบที่ย่อยสลายได้ยากออก โดยเฉพาะกระดูก หลังจากนั้นจึงนำไปปั่นและกรองให้มีขนาดเล็กกว่า 0.2 mm แขน้ำแข็งตัวอย่างเศษอาหารในอุณหภูมิ -20 °C สำหรับเศษวัสดุเหลือทิ้งจากสนามหญ้า เช่น ใบไม้แห้ง หญ้าแห้ง เศษไม้ และขนนก จะถูกนำไปปอบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 65 °C เป็นระยะเวลา 48 hr หลังจากนั้นจึงนำไปปั่นเช่นเดียวกันกับเศษอาหารก่อนนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ โดยจะผสมระหว่างเศษวัสดุจากสนามหญ้างับเศษอาหารในอัตราส่วน 20%, 40%, 60% และ 80% ควบคุมปริมาณของแข็งทั้งหมดเข้าระบบที่ 14.4 gTS/L ที่ปริมาตรการหมัก 10% ของขวดแก้วขนาด 100 mL โดยระหว่างการหมักจะควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 37±1 °C วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นด้วยกระบอกฉีดขนาด 1-60 mL และนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟีร่วมกับเครื่องตรวจจับการนำความร้อน ผลการศึกษาพบว่าหัวเชื้อสารขี้เลื่อยมูลสุกรมีค่า pH เท่ากับ 8.1±0.1 อัตราส่วน VS/TS เท่ากับ 0.59 ปริมาณความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 14.9±0.4 g/L และมีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 3.7±0.0 หลังผสมกับวัตถุดิบในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าการมีวัสดุของแข็งในระบบผลิตก๊าซชีวภาพมากทำให้ผลการผลิตก๊าซมีเทนลดลง โดยหลังจากการทดลอง 45 days ระบบที่มีวัสดุเหลือทิ้งจากสนามหญ้า 20% มีผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงสุดที่ 368.6±21.6 mL/gVS นอกจากนี้ยังพบว่าในการศึกษาชุมชนแบคทีเรียในระบบมีการเกิดขึ้นของแบคทีเรียที่ย่อยสลายเซลลูโลสที่สำคัญ เช่น *Ruminofilibacter*, *Pantoea*, and *Blvii28 wastewater-sludge group* และแบคทีเรียสำหรับ

ผลิตมีเทนอะซิโตนคลาस्टิคและไฮโดรจิโนโทรฟิค เช่น *Methanoseta* และ *Metahnoculleus* ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการการใช้หัวเชื้อในการหมักย่อยวัตถุดิบเศษอาหาร วัสดุเหลือทิ้งจากสนามหญ้าช่วยพัฒนาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของหัวเชื้อและสามารถผลิตหัวเชื้อที่สามารถนำไปย่อยสลายวัตถุดิบลักษณะใกล้เคียงกันต่อไปได้ในอนาคต

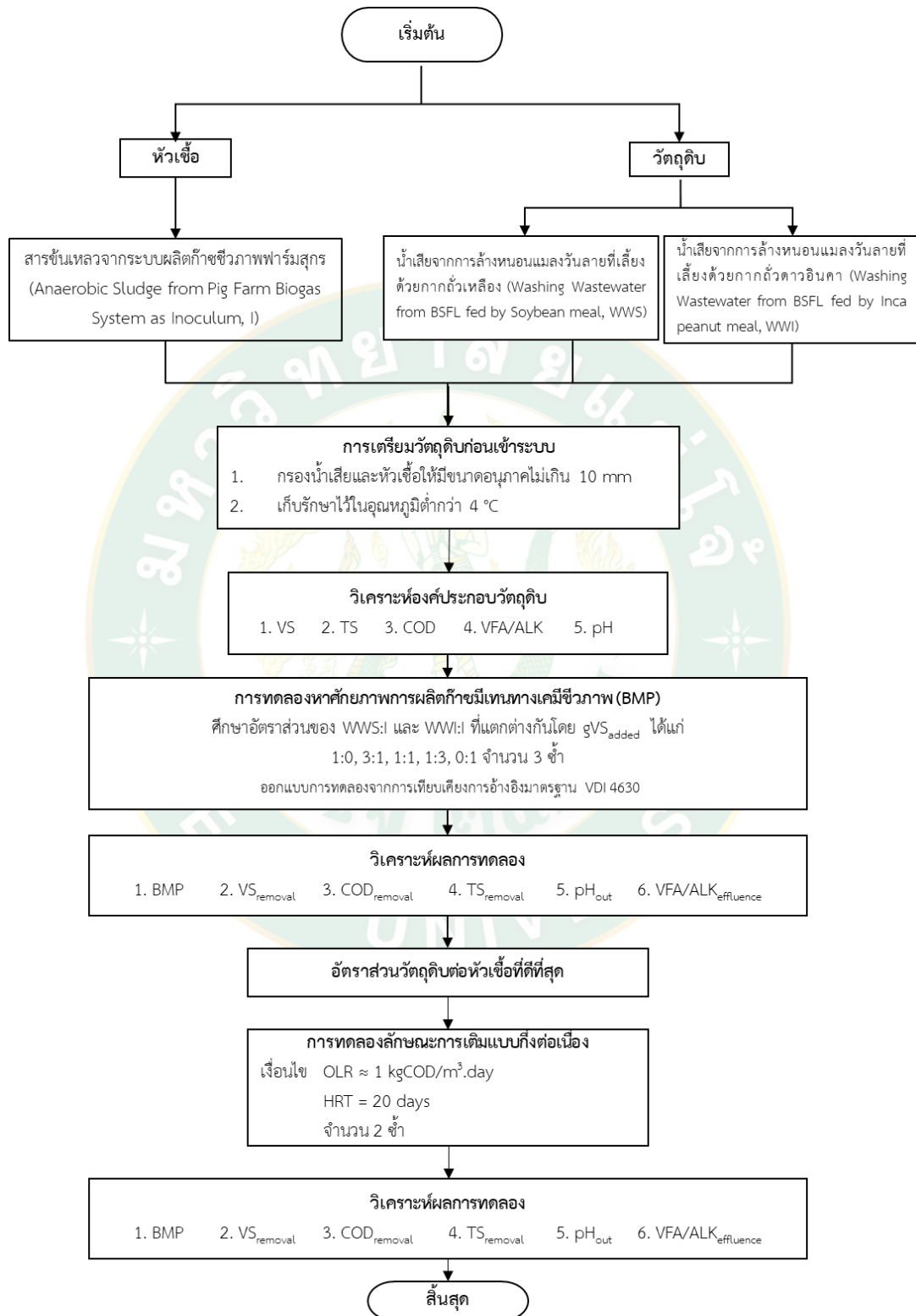
Sicchieri et. al., (2022) ศึกษาการคัดเลือกองค์ประกอบและความถูกต้องของหัวเชื้อที่เหมาะสมกับระบบย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ โดยศึกษาหัวเชื้อที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เช่น มูลโคที่ผ่านการย่อย (Digested Cattle Manure, DCM) กากตะกอนน้ำเสียที่ผ่านการย่อย (Digested Sewage Sludge, DSS) ขยะเศษอาหารที่ผ่านการย่อย (Digested Food Waste, DFW) มูลสุกรที่ผ่านการย่อย (Digested Swine Manure, DSM) และหัวเชื้อสดจาก มูลวัว (Fresh Cattle Manure, FCM) และกระเพาะวัว (Cattle Rumen, CR) ซึ่งหัวเชื้อจากแหล่งที่มาต่าง ๆ จะถูกทดสอบตามมาตรฐานการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนทางเคมี โดยมีวัตถุดิบตั้งต้นเป็นเศษผักผลไม้ และเซลล์ลูโลสไมโครคริสตอลไลน์เป็นสำหรับอ้างอิงศักยภาพของหัวเชื้อ ทดลองในชุดแก้วไบโอซิเลียเตขนาด 310 mL ที่ปริมาตรการหมัก 120 mL อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 0.5 โดยกรัมของแข็งระเหยง่าย ติดตั้งชุดทดลองไว้บนเครื่องเขย่า 120 rpm ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่ 36 ± 1 °C วัดปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยใช้มานอมิเตอร์ทุกวัน นอกจากนี้ยังวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีกายภาพ เช่น pH, VFA, ALK, TS, VS และ COD เป็นต้น รวมถึงวิเคราะห์ความอุดมสมบูรณ์ของสกุสสัมพันธ์ของแบคทีเรียและอาเคียรีในแต่ละการทดลอง ซึ่งจากการทดลองพบว่าหัวเชื้อที่ผ่านการย่อยสลายแบบไร้อากาศมาแล้วมีประสิทธิภาพมากกว่าหัวเชื้อที่ยังไม่ผ่านการย่อยสลาย โดยหัวเชื้อที่ดีที่สุดคือ ขยะเศษอาหารที่ผ่านการย่อยโดยมีผลผลิตก๊าซชีวภาพสะสมประมาณ 600 NmL/gVS_{substrate} สำหรับมูลโคและมูลสุกรที่ผ่านการย่อยมีศักยภาพใกล้เคียงกันเท่ากับประมาณ 450 และ 400 NmL/gVS_{substrate} ตามลำดับ และเมื่อทำการทดลองผสมหัวเชื้อในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าเมื่อผสมหัวเชื้อระหว่าง DFW, DSM และ DCM แสดงให้เห็นถึงความอุดมสมบูรณ์ของแบคทีเรียสกุล DMER64 และอาเคียรีชนิด *Methanosaeta* มากที่สุด ดังนั้นจึงแสดงให้เห็นการนำสารชั้นเหลวที่ผ่านการย่อยสลายจากระบบไร้ออกซิเจนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของหัวเชื้อได้

Ripoll et al. (2020) ศึกษาการปรับปรุงศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของการหมักร่วมระหว่างสารชั้นเหลวน้ำเสีย (SS) และน้ำเสียจากโรงกลั่นไวน์เชอร์รี่ (SW-DW) โดยงานวิจัยนี้เก็บตัวอย่างวัตถุดิบจากสถานประกอบการจริง ซึ่งสารชั้นเหลวน้ำเสียได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองในโรงงานในเมืองเจอร์ซ สำหรับน้ำเสียได้รับจากโรงงานผลิตเอทานอลสำหรับกลั่นไวน์ วัตถุดิบทั้ง 2 ชนิด จะถูกเก็บเพื่อคงความใหม่ไว้ในอุณหภูมิ 4 °C ไม่เกิน 4 months รวมถึงหัวเชื้อจากระบบ

การผลิตก๊าซชีวภาพแบบกวนสมบูรณ์ หลังจากนั้นจึงวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นก่อนเข้าระบบพบว่า SS มีค่าความเป็นกรดต่าง ค่าความสกปรก สัดส่วนปริมาณของแข็งระเหยง่ายต่อของแข็งและสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ดังนี้ 7.6, $53.9 \pm 1.2 \text{ kg/m}^3$, $73.8 \pm 0.5\%$ และ 5.2 ตามลำดับ สำหรับ SW – DW มีค่าพารามิเตอร์ ดังนี้ 6.4, $24.6 \pm 2.2 \text{ kg/m}^3$, $72.6 \pm 2.9\%$ และ 17.5 ตามลำดับ เมื่อผสมวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิดเข้าด้วยกันในอัตราส่วนระหว่าง SS:SW – DW (% v/v) เท่ากับ 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100 ซึ่งค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 6.0 – 7.0 ดังนั้นจึงปรับ ให้เหมาะสม (pH 7.0 – 8.0) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 M ก่อนเข้าระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในชุดหาคักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน ผลการวิจัยพบว่าอัตราส่วนวัตถุดิบระหว่างสารขึ้นเหลวน้ำเสียและน้ำเสียจากโรงกลั่น 50:50 มีการผลิตก๊าซชีวภาพเหมาะสมที่สุด เนื่องจากมีการย่อยสลายของแข็งระเหยง่าย 54.5% ก๊าซมีเทนยี่ลต์ $225.1 \text{ L CH}_4/\text{kgsv}$ หรือ $154 \text{ L CH}_4/\text{kgCODt}$



สรุปกรอบแนวคิดในการทำงานวิจัย



ภาพที่ 15 กรอบแนวคิดในการทำงานวิจัย

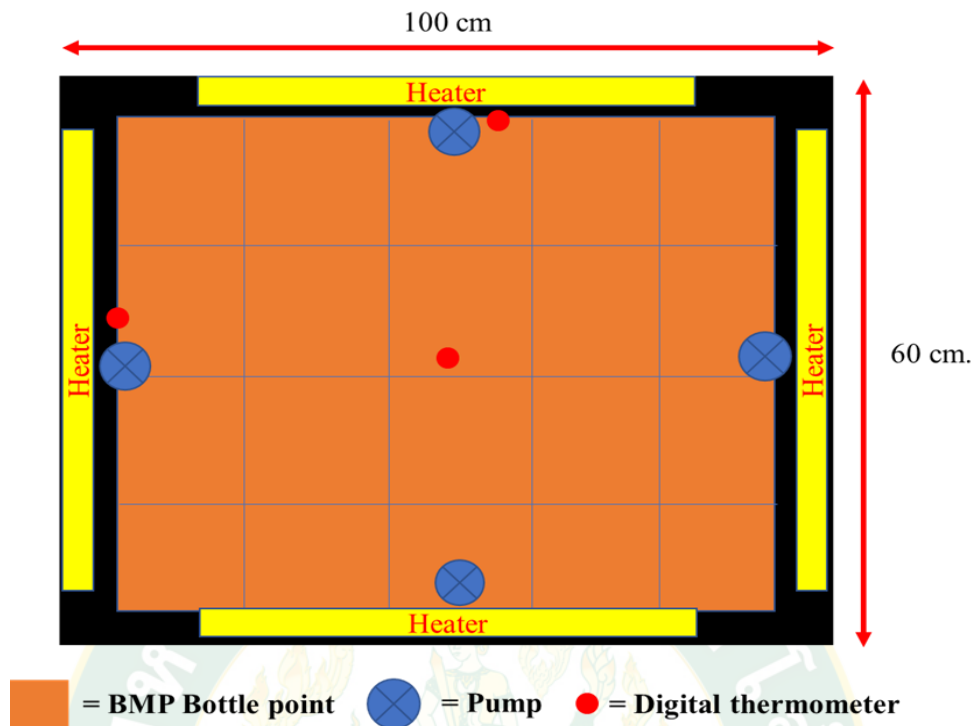
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่องสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ อุปกรณ์สำหรับชุดทดลองการผลิตก๊าซมีเทนแบบควบคุมอุณหภูมิ และอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพ ซึ่งแต่ละส่วนมีรายละเอียด ดังนี้

1. อุปกรณ์สำหรับการทดลองผลิตก๊าซมีเทนแบบควบคุมอุณหภูมิ

อุปกรณ์สำหรับชุดทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งประกอบด้วยการทดลองแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่องจะมีความแตกต่างกันที่ลักษณะการเติมและลักษณะของถังปฏิกรณ์ โดยการทดลองแบบกะเพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากระบบการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยอาหารที่แตกต่างกัน 2 ชนิด กับหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรจะศึกษาโดยปรับใช้ลักษณะการเตรียมวัตถุดิบกับหัวเชื้อและการวิเคราะห์พารามิเตอร์จากมาตรฐาน VDI4630 (VDI 4630, 2006) ซึ่งใช้ขวดแก้วขนาด 1,000 mL พร้อมจุกยาง และฝาครอบอะลูมิเนียมสำหรับการบรรจุวัตถุดิบและหัวเชื้อ และมีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ภายใต้สภาวะมีไซฟิกลิสส์ โดยสำหรับการทดลองแบบกะมีรูปแบบดังภาพที่ 16 โดยใช้อ่างไนลอนปริมาตร 220 L บรรจุน้ำ เครื่องให้ความร้อนขนาด 500 W จำนวน 4 เครื่อง และปั้มน้ำขนาด 600 W จำนวน 4 ตัว เพื่อรักษาและกระจายอุณหภูมิให้ทั่วถึงทั่วทุกขวดการทดลอง ซึ่งจะควบคุมที่อุณหภูมิ 35 ± 2 °C สังเกตอุณหภูมิจากเครื่องวัดอุณหภูมิแบบดิจิตอลร่วมกับแท่งวัดอุณหภูมิแบบอะนาล็อกจำนวนอย่างน้อย 3 จุด เพื่อความเที่ยงตรงของอุณหภูมิขณะทดลอง สำหรับการทดลองการผลิตก๊าซมีเทนแบบกึ่งต่อเนื่อง จะใช้อุปกรณ์ลักษณะเดียวกัน แต่ลดขนาดอ่างน้ำลงให้เหมาะสมกับขนาดของถังปฏิกรณ์จำนวน 2 ถังขนาดถังละ 5 L ใช้เครื่องทำความร้อนจำนวน 2 เครื่อง และปั้มน้ำจำนวน 2 ตัว



ภาพที่ 16 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิของการทดลองแบบกะ

2. อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพ




ตารางที่ 3 อุปกรณ์สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนแบบกะ

ชื่ออุปกรณ์	รูปอุปกรณ์
ขวดแก้วขนาด 1 L	
จุกยางสำหรับกระบอกฉีดยา ขนาด 23 mm และฝาครอบ อะลูมิเนียม	 www.labvalley.com

ชื่ออุปกรณ์	รูปอุปกรณ์
แครมปีลือกฝาอะลูมิเนียม	
อ่างขนาด 220 L	
ปั้มน้ำขนาด 20 W	
เครื่องมือวัดอุณหภูมิแบบดิจิทัลและอะนาล็อก	
เครื่องให้ความร้อนขนาด 500 W	

ตารางที่ 4 อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์	รูปอุปกรณ์	เครื่องมือ/ วิธีการ	มาตรฐาน
<p>องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ (CH₄, CO₂, H₂S)</p>	 <p>A handheld gas analyzer device with a yellow keypad and a small screen. The keypad has buttons for 'OK', a power button, and several function buttons. The screen displays some text and numbers. The device is labeled 'GFM series' and 'Crown Gas Analyzers'.</p>	<p>เครื่องตรวจวัดก๊าซ ยี่ห้อ Gas data รุ่น GFM406</p>	
<p>COD (mg/L)</p>	 <p>A diagram of a titration setup. It shows a burette mounted on a burette stand, which is holding a titration flask. The flask contains a sample to be titrated. Labels include 'Burette', 'Burette stand', 'Titration flask', and 'Sample to be titrated'.</p>	<p>การไตเตรต</p>	<p>APHA 2015</p>
<p>- TS (mg/L) - VS (mg/L)</p>	 <p>A white oven with a red top section. It has a handle on the front and a control panel on the top left.</p>	<p>ตู้อบลมร้อน</p>	<p>APHA 2015</p>
	 <p>A blue incubator with a control panel at the bottom. The control panel has a digital display showing '55.0' and '55.0', and several buttons and indicators.</p>	<p>เตาเผา</p>	

พารามิเตอร์	รูปอุปกรณ์	เครื่องมือ/ วิธีการ	มาตรฐาน
		<p>เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง</p>	
<p>pH VFA (mgCH₃COOH/L) ALK (mgCaCO₃/L)</p>		<p>เครื่องวัด ความเป็น กรดต่าง และ การไทเทรต</p>	<p>Consort 5010 APHA 2015</p>
<p>ปริมาตรก๊าซ ชีวภาพ (mL)</p>			<p>(Pham et al., 2013) Hussain and Dubey, 2015 Filer et al., 2019</p>

วิธีการ

วิธีการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย โดยใช้สารชั้นเหลวในระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรเป็นหัวเชื้อสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธีการ ได้แก่ การศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนแบบกะ และการศึกษาอัตราการสลายสารอินทรีย์สำหรับการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง และวิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

1. การศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนแบบกะ

การศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนขนาดทดลองระหว่างน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายกับหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร (Inoculum, I) ปรับใช้วิธีการหาคักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากมาตรฐาน VDI4630 โดยการทดลองแบบกะในขวดแก้วขนาด 1,000 mL ปิดด้วยจุกยางสำหรับขวดเช็บทัมและฝาครอบอะลูมิเนียม และหมักที่ปริมาตรการหมัก 400 mL โดยภายในระบบมีปริมาณของแข็งไม่เกิน 10% มีปริมาณหัวเชื้อ 1.5% ของปริมาตรการหมักเท่ากันทุกขวด และทดลองภายใต้สภาวะมีไซฟิกลิสที่อุณหภูมิ 35 ± 2 °C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งในการเริ่มต้นการทดลองจะหมักหัวเชื้อเป็นระยะเวลา 7 – 14 days (Yoon et al., 2014) เพื่อลดผลกระทบจากผลิตก๊าซชีวภาพของหัวเชื้อเมื่อทำการหมักกับวัตถุดิบ โดยจะสังเกตจากปริมาตรการผลิตก๊าซชีวภาพของหัวเชื้อให้ผลิตต่ำกว่า 10% ของปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมจึงนำไปใช้เป็นหัวเชื้อและเริ่มการทดลองแบบกะได้ นอกจากนี้ยังมีการเร่งระยะเวลาการหมักโดยการอัดก๊าซไนโตรเจนประมาณ 600 mL ต่อขวด เพื่อทำให้เกิดเป็นระบบสูญญากาศ สำหรับอัตราส่วนในการหมักระหว่างวัตถุดิบและหัวเชื้อ (SIR) ได้แก่ 3:1, 1:1, และ 1:3 โดยปริมาณของแข็งระเหยง่าย สำหรับทั้ง 2 วัตถุดิบ คือ น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง (Washing Wastewater from BSFL fed by Soybean meal, WWS) และเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา (Washing Wastewater from BSFL fed by Inca peanut meal, WWI) ซึ่งการทดลองการหมักในอัตราส่วนที่แตกต่างกันจะถูกวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพ ลักษณะการผลิตก๊าซชีวภาพ และการผลิตก๊าซมีเทน เพื่อเปรียบเทียบหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละวัตถุดิบ และหาวัตถุดิบที่ดีที่สุดของน้ำเสียทั้ง 2 ชนิด ที่มาจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายเมื่อใช้สารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรเป็นหัวเชื้อในการหมักสำหรับงานวิจัยนี้ เพื่อนำไปศึกษาการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องต่อไป

1.1 ขั้นตอนสำหรับการเตรียมการทดลองแบบกะ

ขั้นตอนที่ 1 เก็บตัวอย่างวัตถุดิบน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองและกากถั่วดาวอินคาจากฟาร์มเพาะเลี้ยงนอนแมลงวันลาย ณ บริษัท สยาม ไบโอ อินเซค จำกัด อำเภอกะฉะ จังหวัดลำปาง และเก็บตัวอย่างหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร คณะสัตวศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

ขั้นตอนที่ 2 ปรับขนาดวัตถุดิบและหัวเชื้อด้วยตะกร้าที่มีขนาดรูไม่เกิน 10 mm

ขั้นตอนที่ 3 วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเสียและหัวเชื้อ ได้แก่ VS, TS, VFA, ALK, pH และ COD เพื่อเตรียมการหมักก๊าซชีวภาพ

ขั้นตอนที่ 4 หมักหัวเชื้อจนไม่เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพในบ่อควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 35 ± 2 °C เป็นเวลาอย่างน้อย 7 – 14 days

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อหัวเชื้อพร้อมจึงนำไปวัดองค์ประกอบอีกครั้ง และทำการคำนวณปริมาตรหัวเชื้อและวัตถุดิบที่ต้องใช้ในการหมักที่อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยปริมาณของแข็งระเหยง่าย ที่ปริมาตรการหมัก 400 mL

ขั้นตอนที่ 6 ผสมหัวเชื้อกับวัตถุดิบลงในขวดตามปริมาณที่คำนวณในขั้นตอนที่ 5 ทั้งหมด 3 ขวด หลังจากนั้นผสมให้เข้ากัน วัด pH และปรับค่า pH ให้เท่ากับ 7.0 ± 0.1

ขั้นตอนที่ 7 ปิดขวดด้วยจุกยาง หลังจากนั้นจึงพันด้วยพาราฟิล์มเพื่อให้เกิดความแน่นหนา ก่อนจะปิดทับด้วยฝาอะลูมิเนียม

ขั้นตอนที่ 8 อัดก๊าซไนโตรเจนปริมาตร 600 mL ลงในขวดด้วยกระบอกฉีดยาและหัวเข็มเหล็กเบอร์ 26 ทุกขวดการทดลอง

ขั้นตอนที่ 9 บรรจุลงในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 35 ± 2 °C โดยรักษาระดับน้ำให้เท่ากับระดับของผสมที่อยู่ภายในขวดทดลอง

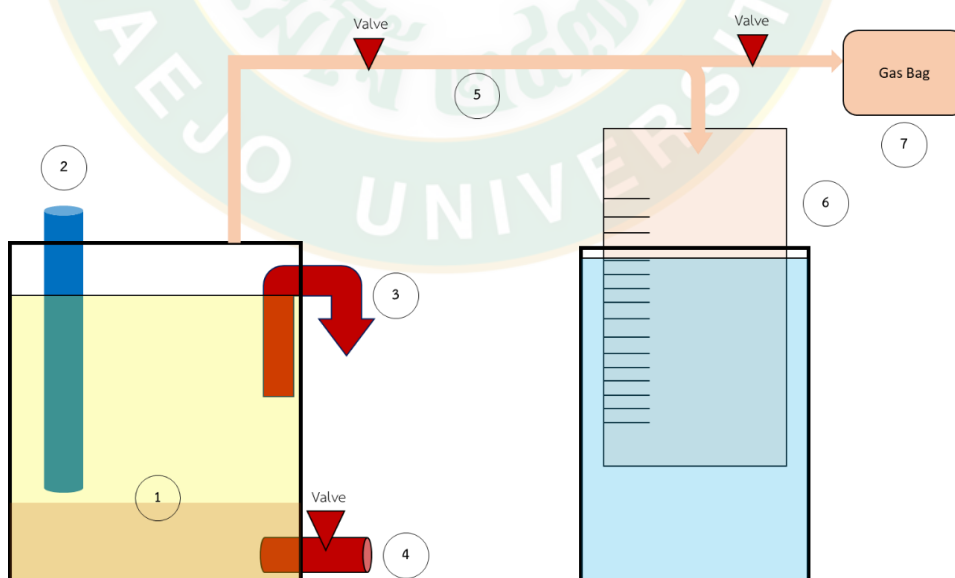
ขั้นตอนที่ 10 วัดปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นด้วยกระบอกฉีดยาแก้วและเข็มเหล็กเบอร์ 23 ทุกวัน และเก็บก๊าซชีวภาพใส่ถุงเก็บก๊าซเพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ได้แก่ CH₄,

CO₂, H₂S และ O₂ ทุก ๆ 3 – 5 days เพื่อนำไปคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนและเชื้อเพลิงชีวภาพของระบบจากปริมาณ O₂ ที่อาจวิเคราะห์พบภายในตัวอย่างก๊าซชีวภาพ

ขั้นตอนที่ 11 วัดปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันจนกว่าปริมาตรก๊าซชีวภาพรายวันน้อยกว่าก๊าซชีวภาพสะสม 1% จึงจบการทดลอง นำของผสมแต่ละอัตราส่วนไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ได้แก่ VS, TS, VFA, ALK, pH และ COD เพื่อประเมินศักยภาพและประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ภายในระบบตลอดระยะเวลาการทดลอง

2. การศึกษาอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สำหรับการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง

การศึกษาอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ส่งผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนและก๊าซชีวภาพ ศึกษาโดยนำผลของอัตราส่วนและวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองแบบกะเพื่อทดลองการเติมแบบกึ่งต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ขนาด 5 L ที่ปริมาตรการหมัก 4 L ทั้งหมด 2 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง ได้แก่ R1 และ R2 ได้ใช้อัตราส่วนโดยปริมาตร ออกแบบถังปฏิกรณ์และตั้งภาพที่ 17 ประกอบไปด้วย หมายเลข 1 ถังปฏิกรณ์ทรงกลมขนาด 5 L หมายเลข 2 ท่อเติมวัตถุดิบ หมายเลข 3 ท่อน้ำล้น หมายเลข 4 ท่อกากตะกอน หมายเลข 5 ท่อส่งก๊าซชีวภาพ โดยท่อส่งก๊าซชีวภาพจะต่อกับ หมายเลข 6 ถังเก็บก๊าซชีวภาพแบบแทนที่ด้วยน้ำ และหมายเลข 7 ท่อส่งก๊าซเพื่อการเก็บตัวอย่างก๊าซไปวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 17 องค์ประกอบชุดถังปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง

โดยขั้นตอนการทดลองแบ่งเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 การเริ่มต้นระบบ และช่วงที่ 2 การเดินระบบที่อัตราการเติมประมาณ $1 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ โดยมีขั้นตอนดังนี้

ช่วงที่ 1 การเริ่มต้นระบบ

ขั้นตอนที่ 1 เติมหัวเชื้อลงในถังหมักตามปริมาณที่ต้องการจากการคำนวณตามอัตราส่วนที่เลือกจากการทดลองแบบกะ

ขั้นตอนที่ 2 หมักหัวเชื้อแบบเดี่ยวไว้เป็นระยะเวลา 7 days หลังจากนั้นจึงเติมน้ำเสียเข้าระบบตามอัตราส่วนให้เต็มปริมาตรการหมัก 4 L สังเกตลักษณะการเกิดก๊าซชีวภาพและมีเทน เมื่อระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนเกิดขึ้นในระบบอย่างน้อย 7 days ให้เริ่มมีการผลิตก๊าซมีเทนในระบบ แสดงถึงความพร้อมของแบคทีเรีย

ช่วงที่ 2 การเดินระบบตามเงื่อนไขการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1 คำนวณการเติมตามอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ประมาณ $1 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ โดยจะประมาณปริมาตรการเติมน้ำเสียจากสมการที่ 11 ซึ่งจะเติมปริมาตรคงที่เป็นระยะเวลา 20 days ตลอดระยะเวลาการทดลองควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงมีโซฟิลิกส์ $35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

$$OLR = COD_{substrate} \times Q_{substrate} / V_{working} \quad \text{สมการที่ 11}$$

เมื่อ	OLR	คือ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ($1 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$)
	$COD_{substrate}$	คือ ความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบ (g/L)
	$Q_{substrate}$	คือ ปริมาตรน้ำเสียที่ต้องการเติมเข้าระบบ (mL)
	$V_{working}$	คือ ปริมาตรการหมัก (4 L)

ขั้นตอนที่ 2 บันทึกปริมาตรก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพทุกวัน

ขั้นตอนที่ 3 เก็บตัวอย่างน้ำล้นเพื่อวิเคราะห์ค่า COD, pH และ VFA/ALK ทุก ๆ 2 days

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อครบระยะเวลากักเก็บ 20 days เก็บตัวอย่างกากตะกอนออกจากระบบนำไปวิเคราะห์ COD, TS, VS, VFA, ALK และ pH เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี การกำจัดของแข็งทั้งหมด และการกำจัดของแข็งระเหยง่ายของระบบ

3. วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์

การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพเป็นส่วนสำคัญสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองแบบกะและกึ่งต่อเนื่อง โดยจะใช้วิธีการวิเคราะห์ ความถี่ในการวิเคราะห์ อุปกรณ์ และมาตรฐานดังตารางที่ 4 โดยการเก็บตัวอย่างเพื่อนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ของการทดลองแบบกะ

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพของการทดลองแบบกะและกึ่งต่อเนื่อง

พารามิเตอร์	ระยะเวลาเก็บข้อมูล	
	แบบกะ	แบบกึ่งต่อเนื่อง
V_{biogas} (mL)	ทุกวัน	ทุกวัน
Biogas contents	ทุก ๆ 5 days	ทุกวัน
COD (mg/L)	เข้าและออกระบบ	ทุก ๆ 2 days
VFA/ALK	เข้าและออกระบบ	ทุก ๆ 2 days
pH	เข้าและออกระบบ	ทุก ๆ 2 days
TS และ VS (mg/L)	เข้าและออกระบบ	หัวเชื้อ-วัตถุดิบขาเข้า และกากตะกอนออกระบบ

โดยจะมีการวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพทุกวันจนกว่าปริมาตรของก๊าซชีวภาพจะน้อยกว่า 10% ของก๊าซชีวภาพสะสม และเก็บก๊าซชีวภาพใส่ถุงเก็บก๊าซขนาด 250 mL เพื่อนำไปวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพทุก ๆ 7 วัน สำหรับการวิเคราะห์ค่า COD VFA ALK TS และ VS จะวิเคราะห์หัวเชื้อและน้ำเสียก่อนผสมตามอัตราส่วน หลังผสมตามอัตราส่วน และหลังจากออกระบบเมื่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำกว่า 1% ของปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม (Ruffino et. al., 2015) สำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของการศึกษาแบบกึ่งต่อเนื่องตลอดระยะเวลาเก็บ 20 days จะวัดปริมาตรและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพทุกวัน และการวิเคราะห์พารามิเตอร์ COD, VFA/ALK, pH, TS และ VS แบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 วิเคราะห์ทุกพารามิเตอร์ของวัตถุดิบและหัวเชื้อก่อนเข้าระบบ ซึ่งประกอบไปด้วยตัวอย่างหัวเชื้อที่เตรียมครั้งแรกสำหรับเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และน้ำเสียที่ใช้ในช่วงการเริ่มต้นระบบ ช่วงที่ 2 วิเคราะห์ COD, VFA/ALK และ pH ทุก ๆ 2 days ของน้ำล้นและวัดทุกพารามิเตอร์ของน้ำเสียเข้าระบบแต่ละวัน และช่วงที่ 3 เมื่อครบระยะเวลากักเก็บจะเก็บตัวอย่างน้ำล้นและกากตะกอนในระบบมาวิเคราะห์ทุกพารามิเตอร์ วิเคราะห์ตามมาตรฐาน APHA AWWA และ WEF (2005)

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

ลักษณะของวัตุดิบและหัวเชื้อ

การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายในการทดลองแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่อง ซึ่งลักษณะของวัตุดิบและหัวเชื้อถูกวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้น เพื่อการประเมินความเป็นไปได้ของลักษณะน้ำเสียที่ได้รับจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองและกากถั่วดาวอินคาและหัวเชื้อไปผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้หัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร ซึ่งลักษณะของวัตุดิบและหัวเชื้อแสดงดังตารางที่ 6 และมีรายละเอียดดังนี้

ตารางที่ 6 องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตุดิบและหัวเชื้อ

พารามิเตอร์	หัวเชื้อ	วัตุดิบ	
		WWI ¹	WWS ²
COD (g/L)	47.24±17.44	58.43±6.69	19.35±4.83
TS (g/L)	66.09±16.57	39.37±1.31	23.17±1.83
VS (g/L)	45.40±8.99	30.82±1.31	12.64±0.56
VS/TS	0.69	0.78	0.55
pH	7.17±0.01	6.05±0.21	7.58±0.50
VFA/Alk	0.31±0.01	1.75±0.03	3.39±1.39

¹ WWI; น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา

² WWS; น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง

1. ลักษณะวัตุดิบน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองและเลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนแสดงผลการศึกษาลักษณะเบื้องต้นของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองและกากถั่วดาวอินคาแสดงดังภาพที่ 18 และภาพที่ 19 ซึ่งน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายทั้ง 2 ชนิด มีลักษณะเป็นสีเหลืองขุ่น มีตะกอนแขวนลอย โดยน้ำเสียจากการเลี้ยงนอนแมลงวันลายด้วยกากถั่วเหลือง หรือ WWS จะไม่มีการแยกชั้นที่ชัดเจน แต่น้ำเสียการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา หรือ WWI จะ

มีการแยกชั้นตะกอนชัดเจนเนื่องจากมีองค์ประกอบเป็นของแข็งมากกว่า โดยน้ำเสีย WWI มีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 39.37 ± 1.31 g/L และมีปริมาณของแข็งระเหยง่าย 30.82 ± 1.31 g/ ในขณะที่ WWWS มีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 19.35 ± 4.83 g/L และของแข็งระเหยง่าย 12.64 ± 0.56 g/L ซึ่งการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายต้องการให้มีปริมาณความชื้นมากกว่า 60% โดยมวล หรือโดยพฤติกรรมทั่วไปของหนอนแมลงวันลายจะสามารถย่อยอาหารที่มีความอ่อนนุ่มได้ดีกว่า (Dortmans et. al., 2017) ดังนั้นการเตรียมอาหารจากกากถั่วดาวอินคาสำหรับการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย จำเป็นต้องใช้อัตราส่วนน้ำมากกว่าการเตรียมอาหารเลี้ยงจากกากถั่วเหลือง นอกจากนี้เมื่อสังเกตอัตราส่วน VS/TS ของน้ำเสียทั้ง 2 ชนิด พบว่า น้ำเสีย WWWS และ WWI มีค่าเท่ากับ 0.55 และ 0.78 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียจากระบบการล้างหนอนแมลงวันลายยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมของปริมาณของแข็งในระบบที่อัตราส่วน VS/TS ไม่ควรเกิน 0.8 แต่สำหรับน้ำเสีย WWI ค่อนข้างสูงกว่า จำเป็นต้องระวังผลจากปริมาณของแข็งที่เข้าสู่ระบบอาจทำให้เกิดความล่าช้าของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนได้ (Liotta et. al., 2014) และสำหรับค่าซีไอดีที่บ่งบอกความต้องการออกซิเจนทางเคมีเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปของเหลว สามารถบ่งบอกค่าความสกปรกของน้ำเสียและประมาณศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเบื้องต้นได้ โดยการย่อยสลายซีไอดีทุก ๆ 1 gCOD สามารถผลิตมีเทนได้ 0.35 L (รจพรรณ, 2565)



ภาพที่ 18 น้ำเสียจากระบบการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง



ภาพที่ 19 น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา

จากปริมาณค่าซีโอดีของวัตถุดิบน้ำเสียทั้ง 2 ประเภท ดังตารางที่ 5 แสดงให้เห็นว่า WWI มีแนวโน้มที่จะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่า WWS เนื่องจากมีค่าซีโอดีมากกว่า 3 เท่า โดย WWI มีค่าซีโอดีประมาณ 58.43 ± 6.69 g/L ในขณะที่ WWS มีค่าซีโอดีประมาณ 19.35 ± 4.83 g/L แต่กระบวนการผลิตก๊าซมีเทนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องที่อาจส่งผลกระทบต่ออายุการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ โดยสามารถวิเคราะห์สภาพของวัตถุดิบสำหรับก๊าซชีวภาพเบื้องต้นได้จากอัตราส่วน VFA/ALK และค่า pH ซึ่งโดยทั่วไปค่าอัตราส่วน VFA/ALK ไม่ควรเกิน 0.8 และค่า pH ตามทฤษฎีควรอยู่ในช่วง 6.8-7.9 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียเมทาโนเจน (Pilarska et al., 2019 และ Kim and Kim, 2020) โดยจากการวิเคราะห์ค่าดังกล่าวพบว่าทั้งน้ำเสีย WWI และ WWS มีค่าเท่ากับ 6.05 ± 0.21 และ 7.58 ± 0.50 ตามลำดับ เมื่อต้องการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซมีเทนอาจจำเป็นต้องปรับสภาพให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมก่อนนำเข้าสู่ระบบ ซึ่งในการทดลองแบบกะจะมีการปรับค่า pH ให้เท่ากับ 7.00 ± 0.02 เพื่อการเริ่มต้นระบบผลิตก๊าซมีเทนอย่างมีศักยภาพ นอกจากนี้ การใช้วัตถุดิบร่วมกับหัวเชื้อที่มีประสิทธิภาพจะช่วยให้การย่อยสลายสารอินทรีย์และกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนมีศักยภาพสูงขึ้น (Latifi et. al., 2019) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้สารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรเป็นหัวเชื้อในการตั้งต้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคาและกากถั่วเหลือง

2. ลักษณะหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร

การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายใช้สารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรเป็นหัวเชื้อ เนื่องจากมีศักยภาพในการเป็นหัวเชื้อมูลสุกรเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยตัวเอง โดยงานวิจัยของ Zhou et. al. (2019) ระบุว่าในสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซมีเทนชนิด

acetotrophic methanogens Methanosaeta เป็นองค์ประกอบมากถึง 77% (Sicchieri et. al., 2022) นอกจากนี้การนำสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรไปใช้งานเป็นหัวเชื้อสำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม โดยหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากฟาร์มสุกร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ แสดงดังภาพที่ 20 มีลักษณะเป็นสารชั้นเหลวสีดำขุ่น และมีตะกอนแขวนลอย สามารถตกตะกอนได้เร็ว



ภาพที่ 20 สารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร

โดยองค์ประกอบทางเคมีกายภาพเบื้องต้นของหัวเชื้อประกอบไปด้วย มีค่าซีโอดีเท่ากับ 47.24 ± 17.44 g/L และปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 45.40 ± 8.99 g/L และปริมาณของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 66.09 ± 16.57 g/L สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ในค่ามาตรฐาน สามารถสังเกตได้จากอัตราส่วน VFA/ALK และ pH โดยมีค่าเท่ากับ 0.31 ± 0.01 และ 7.17 ± 0.01 ตามลำดับ ซึ่งการมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.0 – 7.0 และมีอัตราส่วน VFA/ALK ต่ำกว่า 0.8 แสดงซึ่งศักยภาพในการบัพเฟอร์สารอินทรีย์ในระบบของหัวเชื้อ (Jiang et. al., 2013) เมื่อผสมกับวัตถุดิบในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนได้ (Zhou et al., 2011) ดังนั้นสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรมีศักยภาพเพียงพอในการเป็นหัวเชื้อกระตุ้นศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากการเลี้ยงหมอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองและกากถั่วดาวอินคานั้นจึงมีการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อรองรับของเสียจากระบวนการเลี้ยงโคและสุกรเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานทดแทนได้ นอกจากนี้งานวิจัยของ Sicchieri et. al. (2022)

เปรียบเทียบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของมูลสดกับสารชั้นเหลวที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลหรือวัตถุดิบนั้น ๆ พบว่า สารชั้นเหลวที่ผ่านระบบผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงอุณหภูมิมีโซฟิลิกส์มีศักยภาพมากกว่ามูลสดหรือวัตถุดิบก่อนเข้าระบบ สามารถปรับสภาพเข้ากับระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีกว่า จึงทำให้ความนิยมในการนำสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรมาใช้เป็นหัวเชื้ออย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

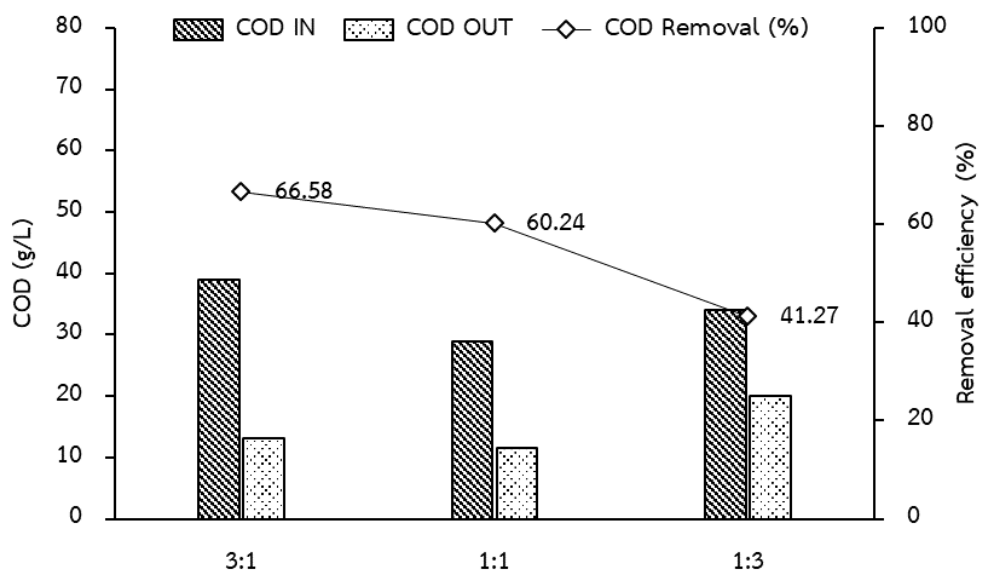
ผลการศึกษาระบบผลิตก๊าซมีเทนแบบกะ

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเป็นวิธีการศึกษาศักยภาพสูงสุดของการผลิตก๊าซชีวภาพของวัตถุดิบ โดยงานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสีย 2 ชนิด ได้แก่ น้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองและเลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา ปรับใช้วิธีการศึกษาตามมาตรฐาน VDI 4630 ในขวดแก้วขนาด 1,000 mL ปริมาตรการหมัก 400 mL ทดลองการหมักแบบกะในอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนโดยกรัมของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด 3 อัตราส่วน ได้แก่ 3:1, 1:1 และ 1:3 ซึ่งจะศึกษาผลการกำจัดสารอินทรีย์จากประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี ($COD_{removal}$) ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด ($TS_{removal}$) ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย ($VS_{removal}$) การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจากอัตราส่วน VFA/ALK, pH ของทุกเงื่อนไขการทดลองเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดนำไปศึกษาต่อในการศึกษาแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยผลการศึกษาระบบผลิตก๊าซมีเทนแบบกะแสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

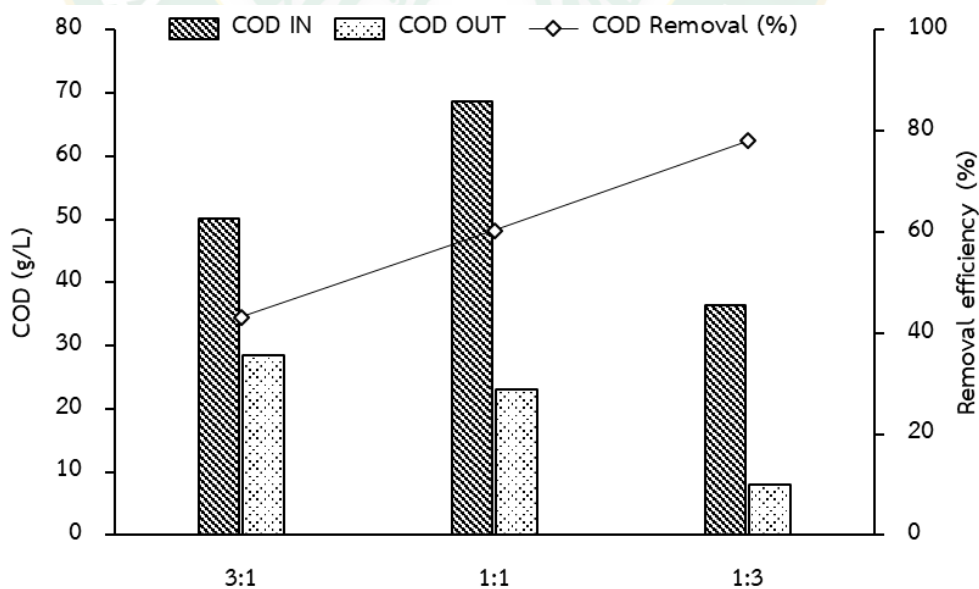
1. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของการทดลองแบบกะ

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลาย ได้แก่ WWS และ WWI กับหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร ทั้งหมด 3 อัตราส่วน โดยกรัมของแข็งระเหยง่าย ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี หรือ $COD_{removal}$ แสดงประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปของสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำหรือของเหลว โดยน้ำเสียออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพควรมีค่าความเข้มข้นของ COD หรือ ความต้องการออกซิเจนทางเคมีเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์น้อยกว่าความเข้มข้นของน้ำเสียค่าเข้า จากการวิเคราะห์ความเข้มข้น COD ตามมาตรฐานวิธีการวิเคราะห์น้ำเสีย APHA 2005 ด้วยวิธีการรีฟลักซ์แบบปิดอย่างน้อย 2 ชั่วโมง พบว่า น้ำเสีย WWS และ WWI ขาเข้าระบบมีความเข้มข้น COD เท่ากับ 19.35 ± 4.83 g/L และ 58.43 ± 6.69 g/L ตามลำดับ ในขณะที่หัวเชื้อมีความเข้มข้น COD ประมาณ 47.24 ± 17.44 g/L เมื่อผสมวัตถุดิบและหัวเชื้อที่อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยกรัมของแข็งระเหยง่าย และหมักใน

ระบบไร้อากาศจนการผลิตก๊าซชีวภาพของแต่ละเงื่อนไขน้อยกว่า 1% ของปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมหรือประมาณ 45 days แสดงประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีตั้งภาพที่ 21 ซึ่งคำนวณจากร้อยละผลต่างความเข้มข้นของ COD เข้าระบบ (COD_{in}) และความเข้มข้นของ COD ออกระบบ (COD_{out}) ของแต่ละเงื่อนไขตั้งสมการที่ 9 จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพ $COD_{removal}$ ที่ดีที่สุดของน้ำเสีย WWS คือ อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 ตามลำดับ โดยสามารถกำจัดค่าซีโอดีตลอดระยะเวลาการหมักเท่ากับ 66.58%, 60.24% และ 41.27% ตามลำดับ



(ก) น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง (WWS)



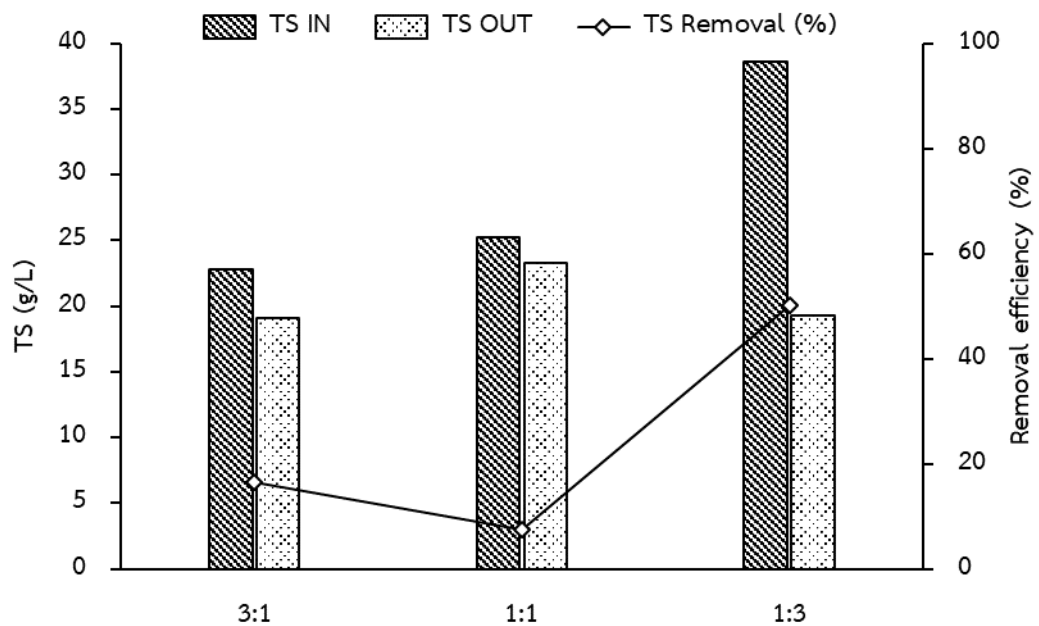
(ข) น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วอินคา (WWI)

ภาพที่ 21 ประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีแต่ละอัตราส่วนของการทดลองแบบกะ

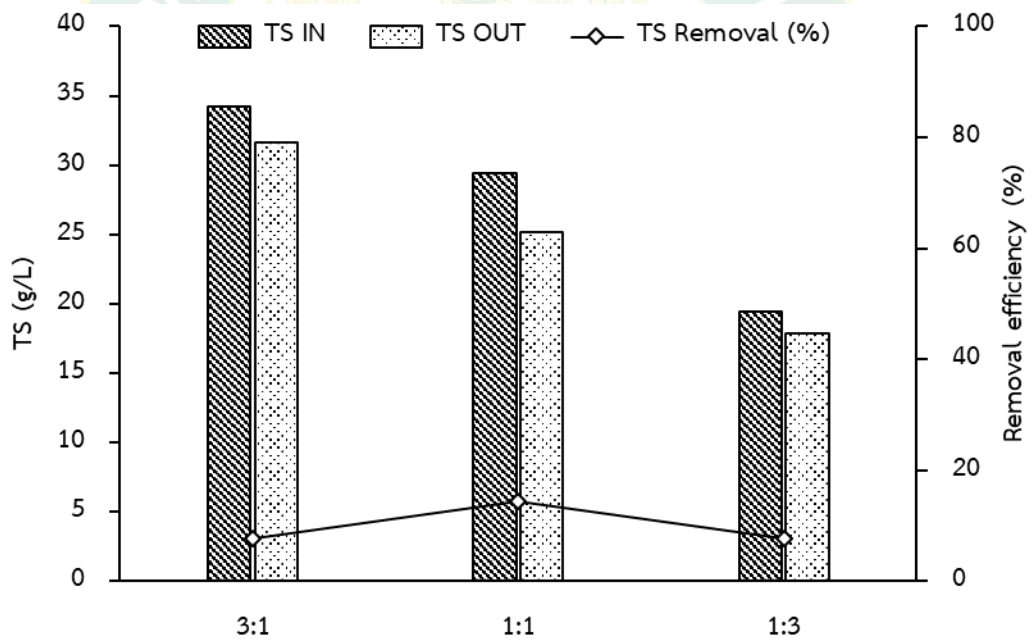
สำหรับน้ำเสีย WWI พบว่าอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพ $COD_{removal}$ ดีที่สุด คือ อัตราส่วน 1:3, 1:1 และ 3:1 ซึ่งสามารถกำจัดค่าซีโอดีเท่ากับ 77.98%, 60.24% และ 43.15% ตามลำดับ และการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกะของน้ำเสีย WWI ที่อัตราส่วน 1:3 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุดเมื่อเทียบกับทุกเงื่อนไขของการทดลองน้ำเสีย WWI และ WWS ซึ่งจากผลการเปรียบเทียบ $COD_{removal}$ ต่อศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของแต่ละอัตราส่วนแสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำมีความสอดคล้องกับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนอย่างมีนัยสำคัญ (Syaichurrozi et. al., 2013) เนื่องด้วยแบคทีเรียเมทาโนเจนเป็นแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของเหลวให้เป็นก๊าซมีเทนเมื่อเข้าสู่ระบบการหมักแบบไร้อากาศและอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมของการทำงานของแบคทีเรียโดยมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.8 – 7.2 และมีอัตราส่วน VFA/ALK ไม่เกิน 0.4 จะทำให้เกิดกระบวนการเมทาโนเจเนซิสย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและทำให้ค่าความเข้มข้นของความต้องการการย่อยสลายออกซิเจนทางเคมีหลังจากจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพลดลง (Menzel et. al., 2020, Syaichurrozi et. al., 2013 และ Song et. al., 2021) ดังนั้นการหมักก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคาควรหมักกับหัวเชื้อสารขึ้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรที่อัตราส่วน 1:3 สำหรับน้ำเสียจากการเลี้ยงนอนแมลงวันลายด้วยกากถั่วเหลืองควรมีอัตราส่วน 3:1 เพื่อการบำบัดน้ำเสียให้มีศักยภาพการสูงสุด

2. ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายของการทดลองแบบกะ

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลายสามารถสังเกตได้จากปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกย่อยสลายภายในระบบ โดยผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายของการทดลองแบบกะ แสดงดังภาพที่ 22 (ก) และภาพที่ 23 (ก) และน้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคาแสดงดังภาพที่ 22 (ข) และภาพที่ 23 (ข) สังเกตปริมาณของแข็งทั้งหมดที่เข้าระบบของแต่ละอัตราส่วน โดย WWS ที่อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 มีปริมาณของแข็งทั้งหมดเข้าระบบเท่ากับ 22.85, 25.22 และ 38.62 g/L ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด หรือ $TS_{removal}$ ได้แก่ อัตราส่วน 1:3 เท่ากับ 50.11% อัตราส่วน 3:1 เท่ากับ 16.51% และอัตราส่วน 1:1 เท่ากับ 7.48% ตามลำดับ



(ก) น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง (WWS)



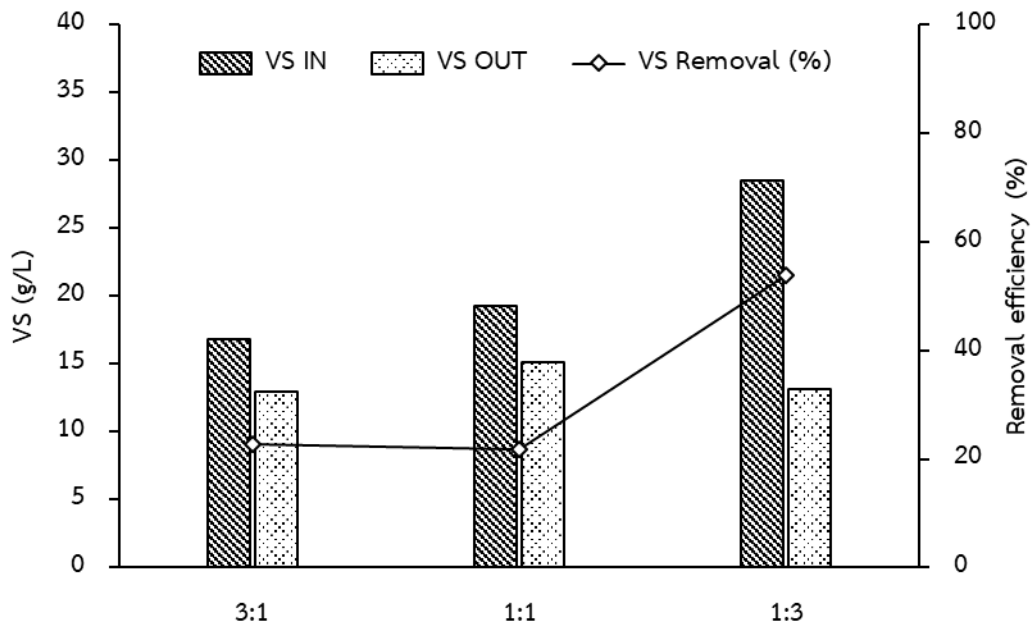
(ข) น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา (WWI)

ภาพที่ 22 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดของการทดลองแบบกะ

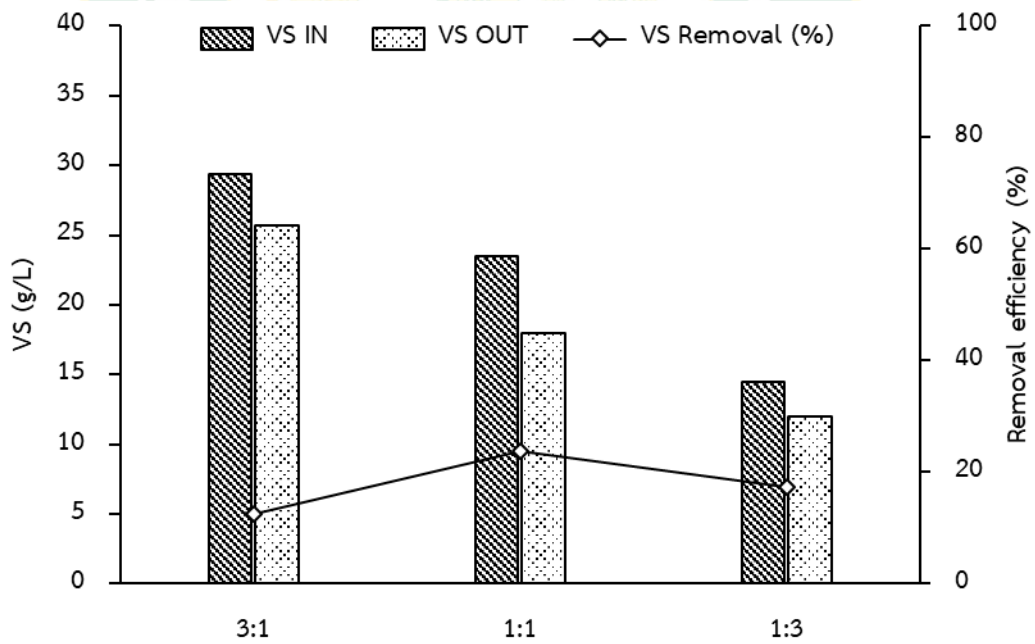
สำหรับน้ำเสีย WWI ที่อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 มีปริมาณของแข็งทั้งหมดเข้าระบบ เท่ากับ 34.26, 29.44 และ 19.42 g/L ตามลำดับ อัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพ TS_{removal} มากที่สุด คือ อัตราส่วน 1:1 สามารถกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดได้เท่ากับ 14.49% แต่อัตราส่วน 3:1 และ 1:3 พบว่ามีประสิทธิภาพ TS_{removal} ต่ำกว่า 8% เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่มี

ปริมาณหัวเชื้อมากกว่าหรือเท่ากันจะสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าสอดคล้องกับลักษณะการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยอัตราส่วน 3:1 ของน้ำเสียทั้ง 2 ประเภทมีสัดส่วนของหัวเชื้อต่ำทำให้ระยะเวลาความล่าช้าของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพล่าช้ากว่าอัตราส่วนอื่น ๆ (Latifi et. al, 2019, Liotta et. al., 2014 และ Pilarska et. al., 2018) แต่ถ้ามีอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่เหมาะสมจะช่วยให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งได้ (Zhou et al., 2011) โดยอัตราส่วน 3:1 ของ WWS มีความล่าช้าประมาณ 24 days และอัตราส่วน 3:1 ของ WWI ซึ่งมีปริมาณของแข็งมากที่สุดมีอัตราความล่าช้ามากกว่า 45 days เมื่อสิ้นสุดการทดลองปริมาณของแข็งทั้งหมดหลังจากจากระบบเท่ากับ 31.66 ± 2.62 g/L ซึ่งมีประสิทธิภาพ TS_{removal} เท่ากับ 7.79% สำหรับอัตราส่วนอื่น ๆ พบว่าน้ำเสียจากการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคาของอัตราส่วน 1:1 เป็นอัตราส่วน WWI ต่อหัวเชื้อที่เหมาะสมทำให้มีประสิทธิภาพ TS_{removal} มากที่สุดเท่ากับ 14.49% อัตราส่วน 1:3 มีประสิทธิภาพ TS_{removal} เท่ากับ 7.58% และอัตราส่วน 3:1 ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดเริ่มต้นมากที่สุด เช่นเดียวกับลักษณะการเกิดก๊าซชีวภาพของการทดลองน้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองมีประสิทธิภาพ TS_{removal} ของอัตราส่วน 1:3 เป็นอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพ ดีที่สุด ดังนั้นการจัดการของแข็งที่ดีควรคำนึงถึงอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ (Zhou et al., 2011) เพื่อให้เกิดการย่อยสลายของแข็งได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

สำหรับสารอินทรีย์ที่อยู่ในลักษณะของแข็งที่เป็นปัจจัยสำคัญที่บ่งบอกถึงปริมาณสารอาหารของแบคทีเรียสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ของแข็งระเหยง่าย หรือ VS ปริมาณ VS เข้าและออกจากระบบ และประสิทธิภาพ VS_{removal} แสดงดังภาพที่ 23 ซึ่งองค์ประกอบของของแข็งระเหยง่ายเป็นสารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของเส้นใย ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน จะถูกย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยแบคทีเรียเมทาโนเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทน (Liotta et. al., 2014) เมื่อมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายเริ่มต้นในวัตถุดิบมากทำให้มีโอกาสในการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนสูง (Jeppu et. al., 2022) แสดงให้เห็นว่าการผสมน้ำเสีรร่วมกับหัวเชื้อสามารถช่วยปรับสภาพของแข็งก่อนเข้าระบบให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มศักยภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบได้ดีมากยิ่งขึ้น



(ก) น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง (WWS)



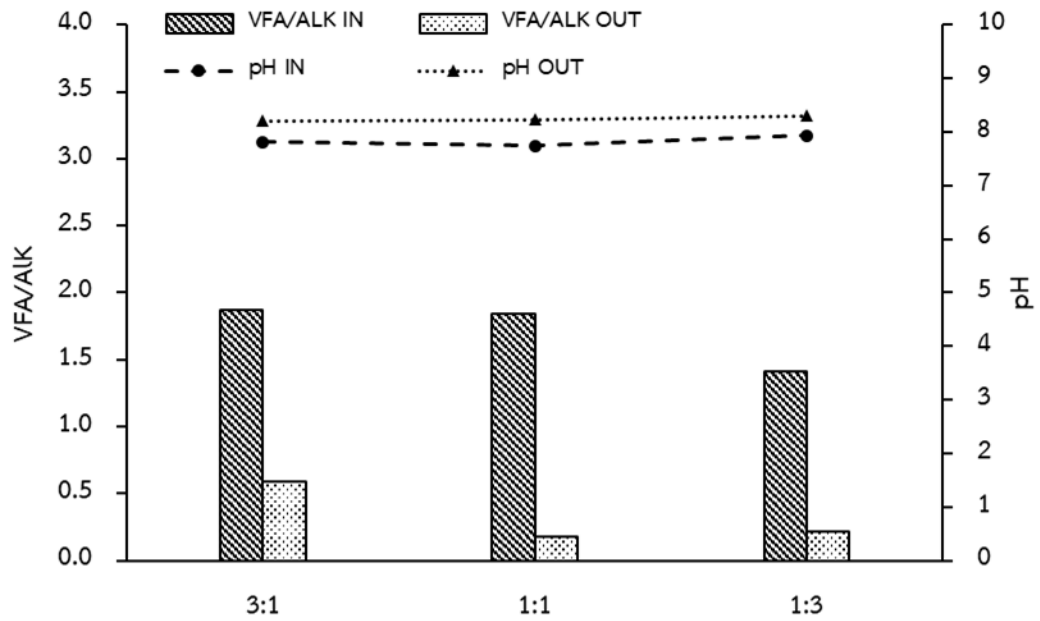
(ข) น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วอินคา (WWI)

ภาพที่ 23 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่ายในการทดลองแบบกะ

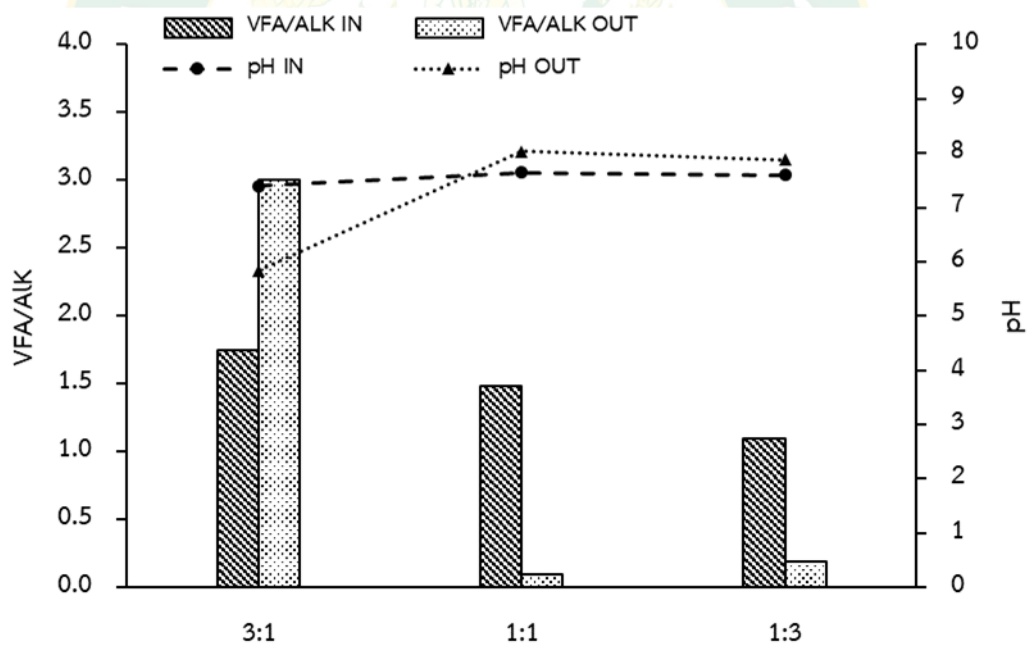
โดยน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคามีประสิทธิภาพ VS_{removal} ของอัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 เท่ากับ 12.57%, 23.76% และ 17.41% ตามลำดับ สำหรับน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองมีประสิทธิภาพ VS_{removal} เท่ากับ 22.63%, 21.67% และ 53.74% ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มประสิทธิภาพ VS_{removal} แปรผันตรงกับปริมาณหัวเชื้อและอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่เหมาะสม เช่นเดียวกับประสิทธิภาพ TS_{removal} ที่กล่าวมาข้างต้น กล่าวคือมีปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของของแข็งมากกว่า จึงลดความล่าช้าจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดมากเกินไป ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าอัตราส่วน 3:1 จากน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองร่วมกับหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรเป็นอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์สูงที่สุด และหากต้องการเพิ่มศักยภาพการกำจัดสารอินทรีย์สามารถเพิ่มกระบวนการปรับสภาพก่อนการหมัก เช่น ปรับสภาพด้วยความร้อน ปรับสภาพเชิงกล หรือ การปรับอัตราส่วน VFA/ALK ให้ต่ำกว่า 0.8 เป็นต้น ซึ่งจะทำให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์และเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้มากขึ้น

3. อัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่าง และค่าความเป็นกรดต่างในการทดลองแบบกะ

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยสำคัญอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยเฉพาะความเหมาะสมของปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อปริมาณสภาพความเป็นต่าง และค่าความเป็นกรดต่างของระบบ ซึ่งจะช่วยบ่งบอกลักษณะเกิดย่อยสลายของระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้ได้ก๊าซมีเทนอย่างมีประสิทธิภาพ (Ali et. al., 2019) โดยผลการศึกษากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่าง หรือ VFA/ALK และค่าความเป็นกรดต่าง หรือ pH ของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย WWI และ WWS ก่อนเข้าระบบและหลังออกระบบ ระยะเวลา 45 days ของการหมักแบบกะแสดงดังภาพที่ 24 จากการศึกษาทดลองพบว่าเมื่อผสมวัตถุดิบน้ำเสียกับหัวเชื้อที่อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 ของน้ำเสียเข้าระบบของ WWI มีค่า pH เริ่มต้น 6.05 ± 0.21 และ น้ำเสียเข้าระบบของ WWS มีค่า pH เริ่มต้น 7.58 ± 0.50 เมื่อผสมกับหัวเชื้อที่มีค่า pH 7.17 ± 0.01 ทำให้มีค่า pH เพิ่มขึ้นเล็กน้อยอยู่ในช่วง 7.60 – 7.94 แต่สามารถเปลี่ยนอัตราส่วน VFA/ALK ที่ค่อนข้างสูงของวัตถุดิบทั้ง 2 ชนิดให้ต่ำลงมา



(ก) น้ำเสียจากการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง (WWS)



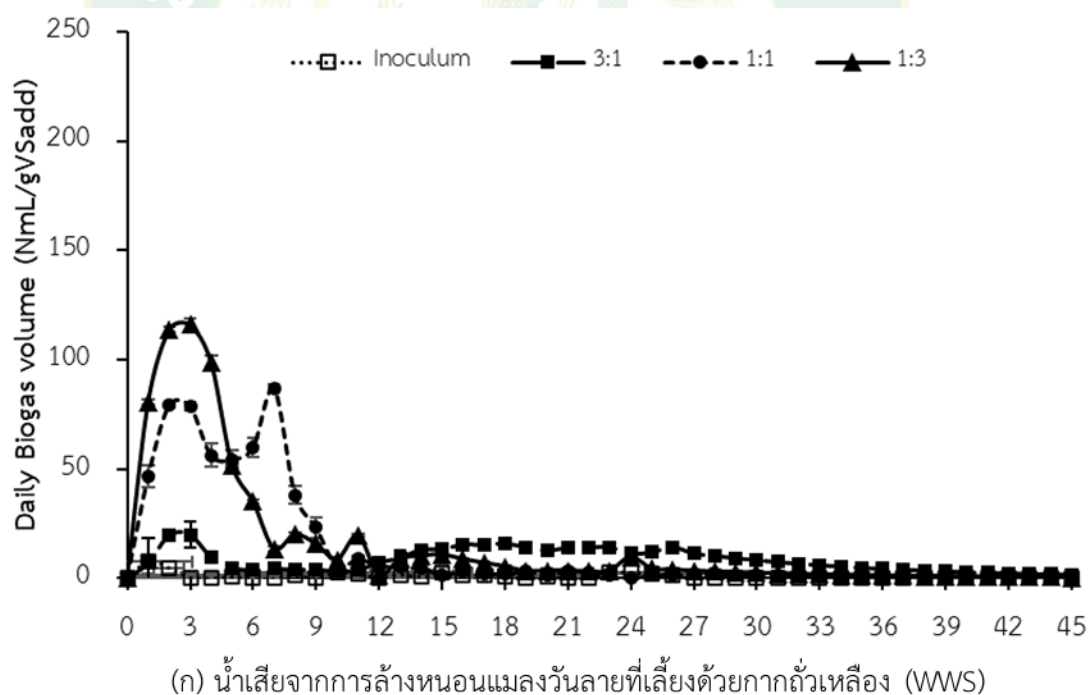
(ข) น้ำเสียจากการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา (WWI)

ภาพที่ 24 ค่าความเป็นกรดต่าง และอัตราส่วนกรดอินทรีย์ต่อสภาพความเป็นต่างของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายในการทดลองแบบกะ

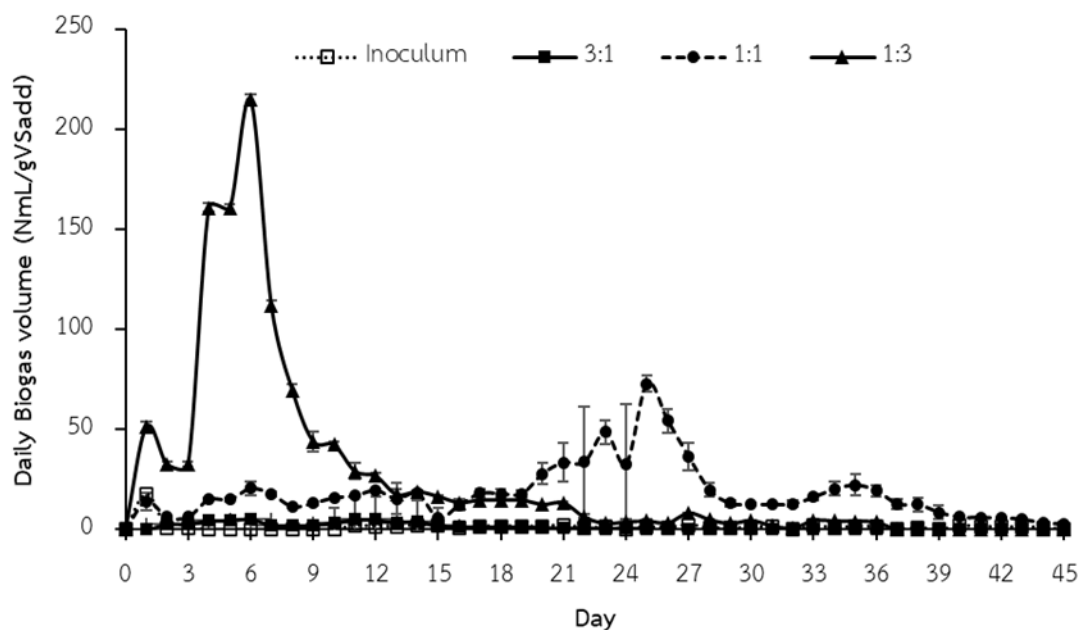
โดยน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย WWS และ WWI มีค่า VFA/ALK เริ่มต้นเท่ากับ 3.39 ± 1.39 และ 1.75 ± 0.03 ตามลำดับ เมื่อผสมกับหัวเชื้อในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าทำให้ค่า VFA/ALK ของสารผสมตั้งต้นลดลง โดยของ WWS ที่อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 ลดลงเท่ากับ 1.87, 1.84 และ 1.41 ตามลำดับ และ WWI ที่อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 ลดลงเท่ากับ 1.75, 1.49 และ 1.10 ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Eryildiz et. al. (2020) หัวเชื้อช่วยลดปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายให้ต่ำลงและเพิ่มปริมาณสภาพความเป็นด่าง ทำให้แต่ละอัตราส่วนมีอัตราส่วน VFA/ALK เข้าใกล้สภาวะที่แบคทีเรียเมทาโนเจนจะสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซมีเทนได้ดี โดยน้ำเสีย WWS กับหัวเชื้อที่อัตราส่วน 3:1, 1:1, 1:3 มีอัตราส่วนอยู่ในมาตรฐาน ได้แก่ 0.59, 0.18 และ 0.22 ตามลำดับ และน้ำเสีย WWI กับหัวเชื้อที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:3 มีอัตราส่วน VFA/ALK ออกระบบเท่ากับ 0.09 และ 0.19 ตามลำดับ แต่อัตราส่วน 3:1 ที่มีปริมาณ VFA เท่ากับ 11,989.88 mg/L และอัตราส่วน VFA/ALK มากถึง 3.01 ± 0.24 แสดงให้เห็นถึงการสะสมกรดอินทรีย์ในระบบทำให้เกิดการยับยั้งหรือลดประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน สำหรับค่า pH พบว่าหลังจากออกระบบอัตราส่วนของน้ำเสีย WWS จะอยู่ในช่วง 8.25 ± 0.05 น้ำเสีย WWI อยู่ในช่วง 7.96 ± 0.11 (Kim and Kim, 2020 และ Zhou et. al., 2011) จากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่มีโปรตีนสูง (DIT, 2018 และ สิริมา และคณะ, 2560) พบว่าเมื่อผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิสย่อยสลายโปรตีนโมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดอะมิโน และเกิดการสร้างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในรูปของกรดอะซิติก (Kushkevych et al., 2017) เมื่อสารตั้งต้นมีความเป็นกรดและมีปริมาณกรดอินทรีย์มากจะทำให้กระบวนการผลิตก๊าซมีเทนในช่วงของเมทาโนเจนซิสช้าลง (Kim and Kim, 2020) และเมื่อผ่านกระบวนการเมทาโนเจนเนซิสเปลี่ยนกรดอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพที่มี CH_4 และ CO_2 เป็นองค์ประกอบหลัก แบคทีเรียจะช่วยปรับสภาพให้ของผสมระหว่างน้ำเสียและหัวเชื้อมีอัตราส่วนที่เหมาะสมและควรมีอัตราส่วน VFA/ALK ต่ำกว่า 0.8 ดังนั้น การขยายระบบผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ระดับอุตสาหกรรมในลักษณะการเติมแบบกึ่งต่อเนื่องหรือต่อเนื่องควรเลือกน้ำเสีย WWS และ WWI ที่อัตราส่วน 1:1, 1:3 และ 3:1 ตามลำดับ ซึ่งช่วยเพิ่มศักยภาพการบำบัดเฟอร์สารอินทรีย์ในระบบ ทำให้ระบบเกิดเสถียรภาพตลอดการเดินระบบโดยไม่ต้องเติมสารเคมีเพื่อปรับความสมดุลของกรดอินทรีย์ระหว่างการหมัก

4. ผลของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายแบบกะ

ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของวัตถุดิบน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลาย 2 ชนิด ได้แก่ WWS และ WWI โดยมีอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อหัวเชื้อทั้งหมด 3 อัตราส่วน ได้แก่ 3:1, 1:1 และ 1:3 แสดงดังภาพที่ 25 – 28 โดยภาพที่ 25 แสดงลักษณะการเกิดก๊าซชีวภาพของน้ำเสียรายวันรวมระยะเวลาการทดลอง 45 days พบว่าอัตราส่วนที่มีหัวเชื้อมาก คือ อัตราส่วน 1:3 เริ่มต้นการผลิตก๊าซชีวภาพได้เร็วที่สุด (Khadka et. el., 2022) เนื่องจากปริมาณหัวเชื้อที่มากกว่าวัตถุดิบทำให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว โดยอัตราส่วน 1:3 ของน้ำเสีย WWS สามารถย่อยสลายได้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด 116.04 ± 2.88 NmL/gVS_{substrate} ภายใน 3 days ของการหมัก สำหรับอัตราส่วนดังกล่าวของน้ำเสีย WWI สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงที่สุดภายใน 6 days ของการหมักที่ปริมาณก๊าซชีวภาพ 214 ± 2.71 NmL/gVS_{substrate} แต่หลังจากนั้นการผลิตก๊าซชีวภาพของอัตราส่วน 3:1 ก็ลดลงอย่างรวดเร็วและมีก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนสะสมคงที่ตั้งแต่วันที่ 9 ของการทดลอง



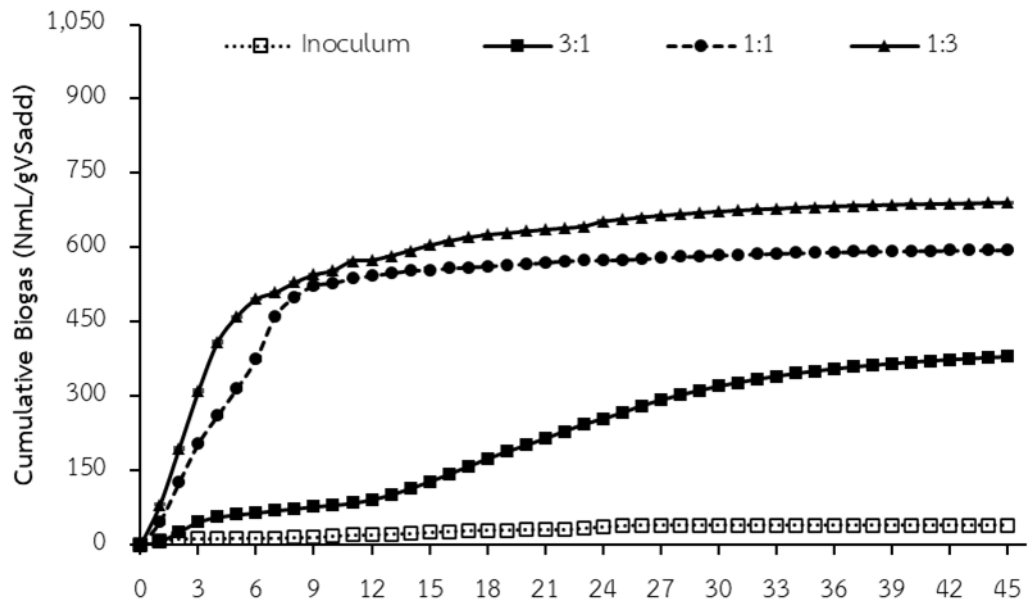
ภาพที่ 25 การผลิตก๊าซชีวภาพรายวันของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายในการทดลองแบบกะ



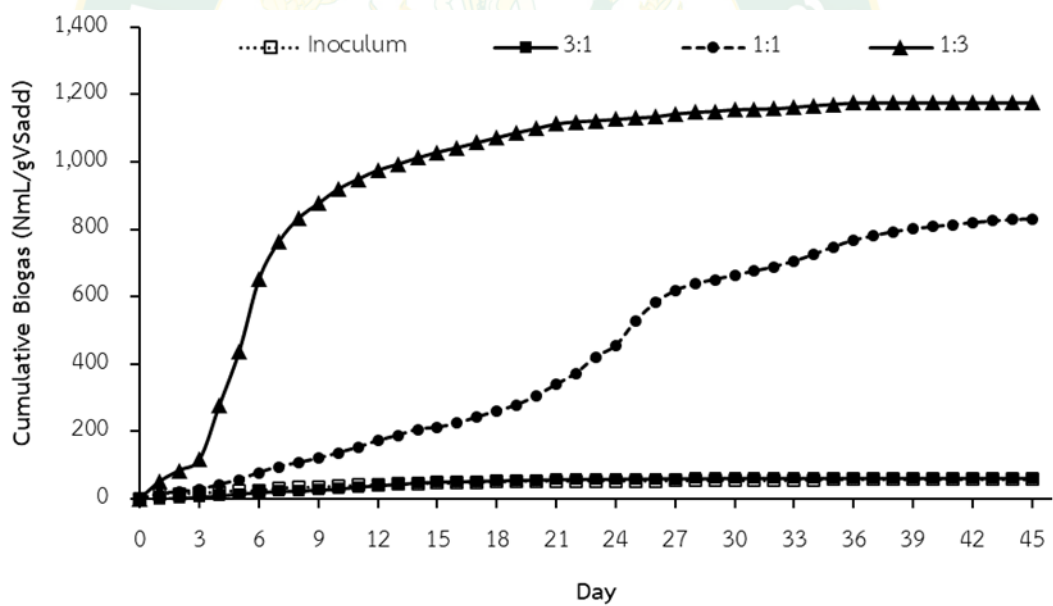
(ข) น้ำเสียจากการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา (WWI)

ภาพที่ 25 การผลิตก๊าซชีวภาพรายวันของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายในการทดลองแบบกะ (ต่อ)

โดยลักษณะการเกิดก๊าซชีวภาพสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yoon et. al. (2014) ที่ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบต่อหัวเชื้อต่อศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ร่วมกับสารชั้นเหลวจากรบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรที่อัตราส่วน 0.1, 0.5, 1.0 และ 1.5 โดยอัตราส่วนที่มีหัวเชื้อมากจะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนได้ไวกว่าอัตราส่วนที่มีหัวเชื้อต่ำกว่าตามลำดับ (Zhou et. al., 2011) เนื่องจากวัตถุดิบมีลักษณะโปรตีนสูงเช่นเดียวกับกากถั่วเหลืองและกากถั่วดาวอินคา ซึ่งโปรตีนเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความล่าช้าของการผลิตก๊าซชีวภาพจากองค์ประกอบทางเคมีที่มีไนโตรเจนสูง อาจทำให้เกิดการสะสมของก๊าซแอมโมเนียในระบบ สามารถชะลอจนถึงสามารถยับยั้งกระบวนการเมทาโนเจเนซิสได้ สามารถสังเกตได้จากอัตราส่วน 3:1 ซึ่งมีสัดส่วนน้ำเสียมากกว่าหัวเชื้อ มีระยะเวลาความล่าช้าในการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่า 20 days แต่ในขณะเดียวกันเมื่อหมักวัตถุดิบกับหัวเชื้อในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะช่วยลดระยะเวลาในการเกิดความล่าช้าของการผลิตก๊าซมีเทนอย่างมีประสิทธิภาพเช่นเดียวกับอัตราส่วน 1:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดของน้ำเสีย WWI และอัตราส่วน 3:1 ของน้ำเสีย WWS (Kim and Kim, 2020)



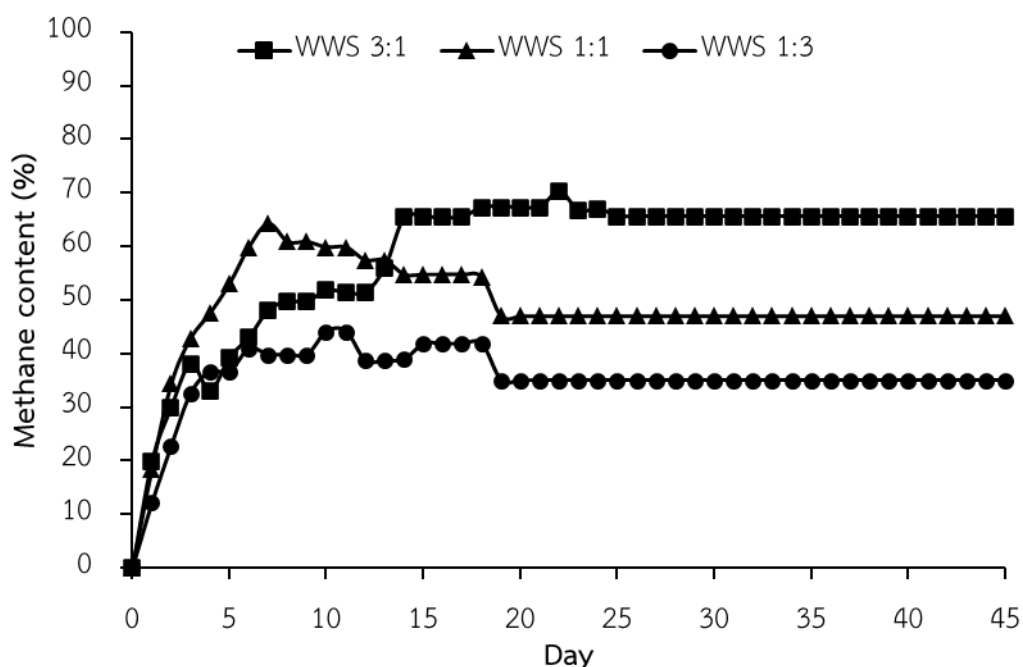
(ก) น้ำเสียจากการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง (WWS)



(ข) น้ำเสียจากการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา (WWI)

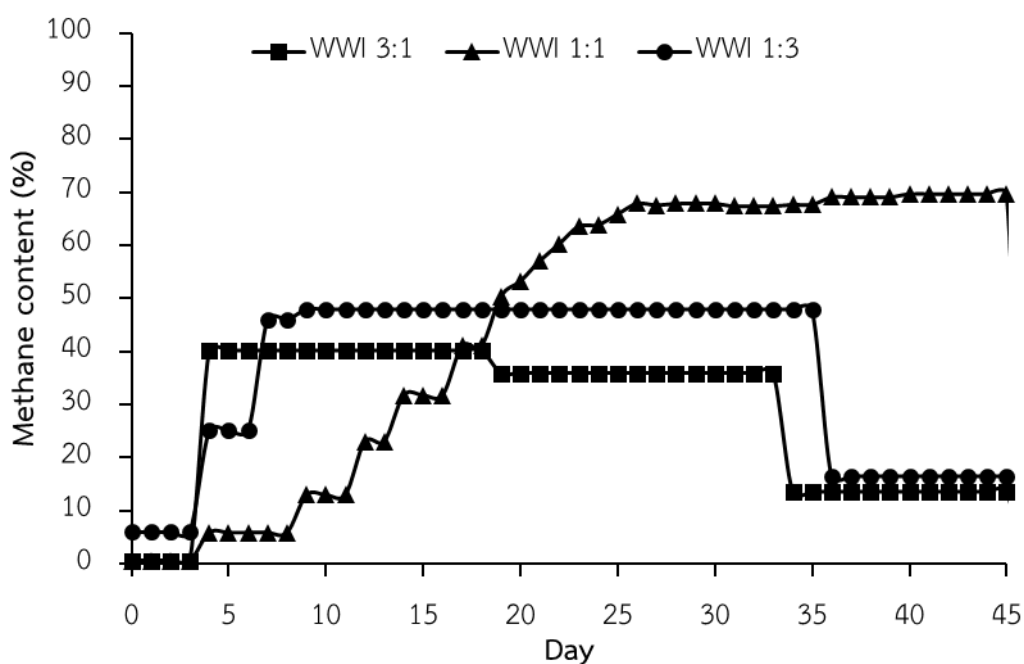
ภาพที่ 26 การผลิตก๊าซชีวภาพสะสมของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายในการทดลองแบบกะ

ภาพที่ 27 และภาพที่ 28 แสดงการเกิดก๊าซมีเทนของแต่ละอัตราส่วนของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการผลิตก๊าซชีวภาพ (ปิยะวิชัย และ ชูมาพร, 2563) ในช่วงแรกของการหมักจะเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยเกิดการไฮโดรไลซ์และเกิดกระบวนการสร้างกรดอะซิติกมากกว่ากระบวนการเมทาโนเจเนซิส ทำให้ในช่วงแรกจะมีการผลิต ก๊าซมีเทนต่ำและมีผลพลอยได้จากกระบวนการอะซิโตเจเนซิส คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าหรือใกล้เคียงกันรวมถึงก๊าซอื่น ๆ เช่น ก๊าซแอมโมเนียและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น (Fransiscus and Simangunsong, 2021 และ Kushkevych et. al., 2017) เมื่อเปรียบเทียบแต่ละอัตราส่วนพบว่า อัตราส่วน 1:3 สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ไวที่สุดแต่จะสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากที่สุดเพียง 47.90% สำหรับน้ำเสีย WWI และ 44.10% สำหรับน้ำเสีย WWS เนื่องจากหัวเชื้อสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่อัตราส่วน 1:1 และ 3:1 ที่แบคทีเรียจำเป็นต้องใช้เวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ อัตราการเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนจึงมีเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ และเมื่อมีการหมักในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายได้ดี และสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ รวมถึงสามารถกำจัดกาเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีเช่นกัน (Kushkevych et. al., 2017)



(ก) น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง (WWS)

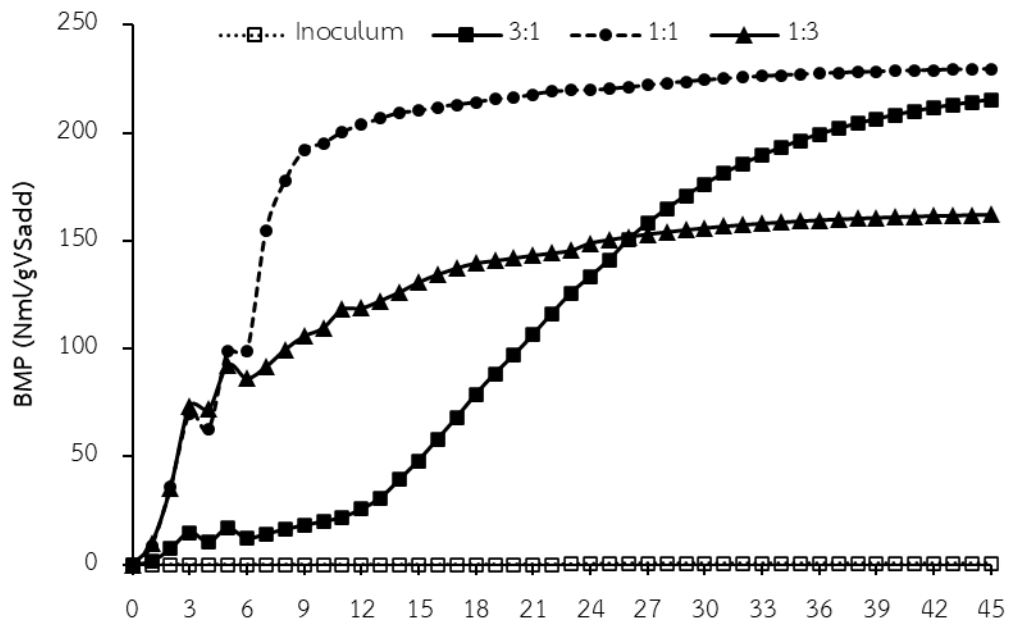
ภาพที่ 27 องค์ประกอบก๊าซมีเทนรายวันของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายในการทดลองแบบกะ



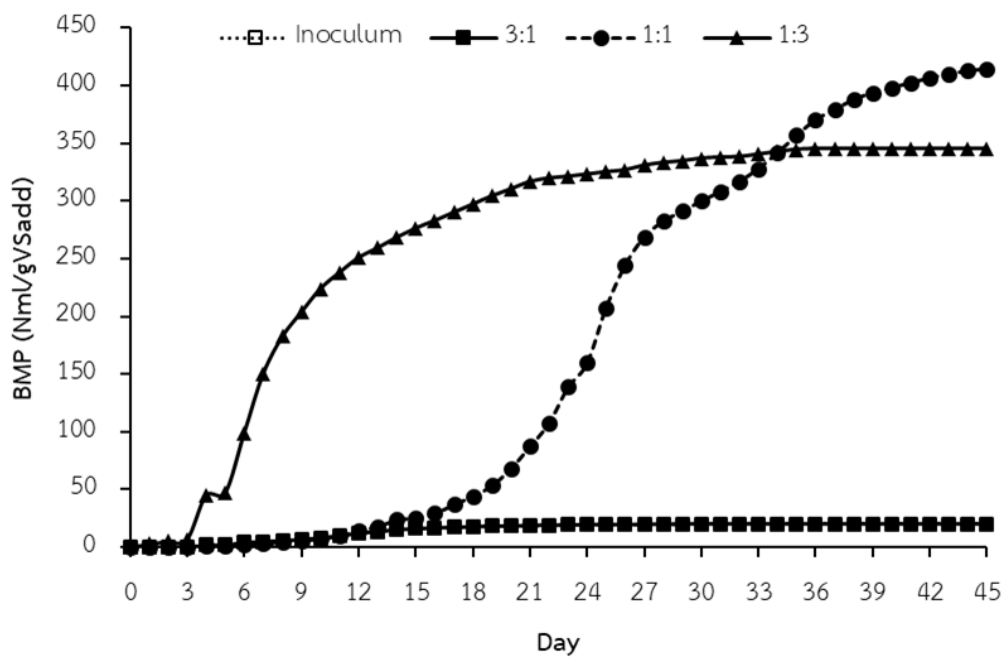
(ข) น้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา (WWI)

ภาพที่ 27 องค์ประกอบก๊าซมีเทนรายวันของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายในการทดลองแบบกะ (ต่อ)

ตลอดระยะเวลาการทดลองการผลิตก๊าซมีเทนแบบกะพบว่า อัตราส่วนที่ดีที่สุดของน้ำเสีย WWI คือ อัตราส่วน 1:1 สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุดเท่ากับ 69.70% และอัตราส่วนที่ดีที่สุดของน้ำเสีย WWS คือ อัตราส่วน 3:1 สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงที่สุดเท่ากับ 70.20% (Khoufi et. al., 2015 และ Bella and Rao, 2022) และเมื่อนำมาวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนดังสมการที่ 8 แสดงการผลิตก๊าซมีเทนสะสมดังภาพที่ 28 น้ำเสีย WWS พบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ อัตราส่วน 1:1 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสะสม $229.67 \text{ NmL}_{\text{CH}_4}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ ที่ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม $595.56 \text{ NmL}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ ซึ่งมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสะสมใกล้เคียงกับอัตราส่วน 3:1 ที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ $215.34 \text{ NmL}_{\text{CH}_4}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสม $379.59 \text{ NmL}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ สำหรับอัตราส่วน 1:3 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน $162.25 \text{ NmL}_{\text{CH}_4}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ $690.84 \text{ NmL}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ ตามลำดับ



(ก) น้ำเสียจากการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง (WWS)



(ข) น้ำเสียจากการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา (WWI)

ภาพที่ 28 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (BMP) สะสมของน้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลายในการทดลองแบบกะ

สำหรับอัตราส่วนที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนดีที่สุดของน้ำเสีย WWI คือ อัตราส่วน 1:1 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ $415.39 \text{ NmL}_{\text{CH}_4}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม $843.04 \text{ NmL}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ ลำดับต่อมา คือ อัตราส่วน 1:3 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสะสม $345.35 \text{ NmL}_{\text{CH}_4}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ ที่ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสม $1,175.64 \text{ NmL}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ แต่เนื่องจากอัตราส่วน 3:1 มีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมากเกินไปดังแสดงในผลของอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง และค่าความเป็นกรดต่างในการทดลองแบบกะ จึงทำให้เกิดการยับยั้งและลดศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทน (Kim and Kim, 2020) ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมตลอดการทดลอง 45 days ได้เพียง $61.80 \text{ NmL}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ โดยมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ $20.35 \text{ NmL}_{\text{CH}_4}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนที่ดีที่สุดของน้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคาและเลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง จึงสรุปได้ว่า อัตราส่วน 1:1 ของน้ำเสียที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคาเป็นอัตราส่วนที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมากที่สุด และเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างการหมักน้ำเสียดังกล่าวกับหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร

ผลการศึกษากาการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง

การศึกษามผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์แบบกึ่งต่อเนื่องดำเนินการศึกษาที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ หรือ OLR ประมาณ $1 \pm 0.57 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ (Siciliano et. al., 2019) ซึ่งเป็นอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เริ่มต้นสำหรับการศึกษาลักษณะการเติมแบบกึ่งต่อเนื่อง (Caillet and Adelard, 2021) เพื่อประเมินศักยภาพของหัวเชื้อกับน้ำเสียในกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายในถังปฏิกรณ์ปริมาตรการหมัก 4 L ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงมีโซฟิลิกส์ ($35 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) เช่นเดียวกับการศึกษาแบบกะ ที่ระยะเวลาพักเก็บ 20 days จำนวน 2 ซ้ำ โดยจะคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดจากการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนแบบกะ หรือ BMP ของน้ำเสีย WWWS และ WWI ที่อัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่าอัตราส่วน 3:1 ของน้ำเสีย WWWS และอัตราส่วน 1:1 ของน้ำเสีย WWI เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด โดยมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 215.34 และ 415.39 $\text{NmL}_{\text{CH}_4}/\text{gVS}_{\text{substrate}}$ ตามลำดับ หรือคำนวณเทียบเท่าความเข้มข้นซีไอดีของน้ำเสียที่เติมเข้าระบบเท่ากับ 153.81 และ 219.10 $\text{NmL}_{\text{CH}_4}/\text{gCOD}_{\text{substrate}}$ ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่บ่งบอกศักยภาพการกำจัดสารอินทรีย์และการเดินระบบ ได้แก่ pH, VFA/ALK, $\text{COD}_{\text{removal}}$, $\text{TS}_{\text{removal}}$ และ $\text{VS}_{\text{removal}}$ พบว่ามีศักยภาพสูงที่สุดใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาสถานการณ์ปัจจุบันร่วมด้วยพบว่า ความนิยมในการนำกากถั่วดาวอินคากำลังลดลงในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากตลาดขายกากถั่วดาวอินคาในประเทศไทยมีน้อยกว่าตลาดของกากถั่วเหลืองเป็นอย่างมาก (จินทการต์ และคณะ, 2563 และ นาริรัตน์ และคณะ, 2564) รวมถึงลักษณะทางกายภาพของถั่วดาวอินคาที่มีปริมาณของแข็งสูงจำเป็นต้องมีการดูแลเรื่องความชื้นในช่วงระยะเวลาการเลี้ยง กากถั่วดาวอินคาจึงเป็นเพียงตัวเลือกหนึ่งสำหรับการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายในระดับวิสาหกิจชุมชนหรือครัวเรือน ดังนั้นการขยายผลการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายที่อัตราส่วน 3:1 ของน้ำเสีย WWWS จึงเหมาะสมต่อการศึกษาต่อในระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ตามเงื่อนไขที่ระบุข้างต้น เพื่อสอดคล้องกับความต้องการเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปหนอนแมลงวันลายระดับอุตสาหกรรมของประเทศไทยในปัจจุบันและสามารถประยุกต์ใช้ต่อไปได้อย่างยั่งยืน โดยผลการศึกษาระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่องได้แก่ การศึกษามผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ $\text{COD}_{\text{removal}}$, $\text{TS}_{\text{removal}}$ และ $\text{VS}_{\text{removal}}$ และการเปลี่ยนแปลงของระบบจากการวิเคราะห์ค่า VFA/ALK และ pH แสดงรายละเอียดผลการศึกษา ดังนี้

1. ผลการคำนวณอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จากอัตราส่วนที่เหมาะสมในการศึกษาแบบกะ

จากการศึกษาแบบกะเพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมในการนำมาขยายผลต่อในการศึกษาแบบกึ่งต่อเนื่องคือ น้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองกับหัวเชื้อสารชั้นเหลวระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มที่อัตราส่วน 3:1 โดยปริมาณของแข็งระเหยง่าย เมื่อนำมาคำนวณเบื้องต้นโดยปรับเป็นอัตราส่วนโดยปริมาตรของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกะเป็นแบบกึ่งต่อเนื่องที่ปริมาตรการหมัก 4 L ซึ่งเริ่มต้นระบบโดยการเติมหัวเชื้อปริมาตร 1 L โดยมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 75.83 ± 0.31 g/L ปริมาณของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 51.03 ± 0.68 g/L และปริมาณความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 25.49 g/L และสำหรับวัตถุประสงค์เริ่มต้นเติมน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลาย WWS ปริมาตร 3 L ซึ่งน้ำเสีย WWS มีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 9.18 ± 0.07 g/L ของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 6.10 ± 0.18 g/L และมีปริมาณความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 14.74 ± 3.08 g/L นำค่าความเข้มข้นซีโอดีไปคำนวณเพื่อประเมินปริมาตรการเติมตามสมการที่ 11 ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{กำหนดให้} \quad \text{OLR} &= 1 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day}) \\ \text{COD}_{\text{substrate}} &= 14.74 \text{ kgCOD}/\text{m}^3 = 14,740.909 \text{ mgCOD}/\text{L} \\ V_{\text{working}} &= 4 \text{ L} = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

หาปริมาตรน้ำเสียที่เติม ($Q_{\text{substrate}}$) ตลอดระยะเวลา 20 days โดยแทนค่าในสมการที่ 11

$$\text{OLR} = \text{COD}_{\text{substrate}} \times Q_{\text{substrate}} / V_{\text{working}}$$

$$Q_{\text{substrate}} = V_{\text{working}} \times \text{OLR} / \text{COD}_{\text{substrate}}$$

$$= [(4 \times 10^{-3}) \times 1] / [14.74]$$

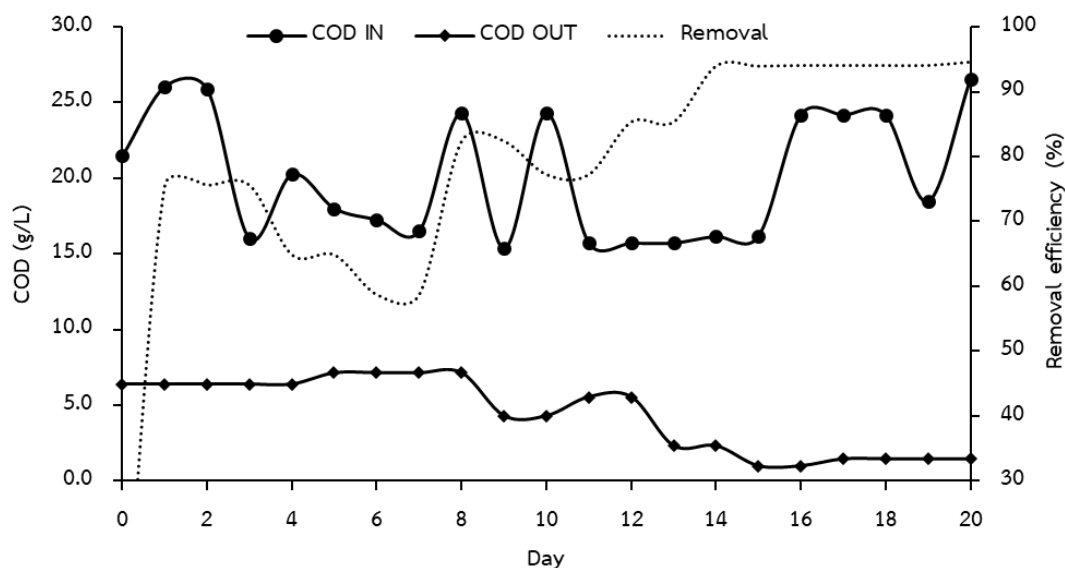
$$Q_{\text{substrate}} = 1.81 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{day} = 181 \text{ mL}/\text{day}$$

ดังนั้นการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องจะมีการเติมน้ำเสียที่อัตราการเติม 181 mL/day ตลอดระยะเวลาที่เก็บ 20 days ซึ่งในแต่ละวันจะวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของน้ำเสียเข้าระบบ ได้แก่ COD, pH, VFA/ALK, VS, TS อย่างน้อยทุก ๆ 2 days วัดพารามิเตอร์ COD, pH, VFA/ALK ของน้ำล้นออกจากระบบทุก ๆ 3 days เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่

ในน้ำและเสถียรภาพของระบบ ณ ช่วงเวลาการเดินระบบ และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของของแข็ง ณ ช่วงสิ้นสุดระยะเวลาพักเก็บของกากตะกอนออกจากระบบร่วมกับผลรวมปริมาณของแข็งของน้ำเสียที่เติมเข้าระบบทุกวัน

2. ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนในระบบการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องของน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองร่วมกับหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรที่อัตราส่วน 3:1 โดยสามารถสังเกตลักษณะการออกซิไดซ์ทางเคมีของสารอินทรีย์ในวัตถุดิบได้จากประสิทธิภาพ COD_{removal} ซึ่งเป็นผลจากการทำงานของแบคทีเรียเมทาโนเจนซิสที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทน (Rakić et. al., 2023) โดยตลอดช่วงเวลาการเติมน้ำเสียทุกวัน ณ OLR เท่ากับ $1 \pm 0.57 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ เป็นเวลา 20 days โดยมีการเติมน้ำเสียที่มีค่า COD เข้าระบบต่อวันเฉลี่ย 24.47 g/L โดยภาพที่ 29 แสดงปริมาณความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบ ปริมาณความเข้มข้นของซีโอดีของน้ำล้นออกระบบ และประสิทธิภาพ COD_{removal} รายวัน



ภาพที่ 29 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง

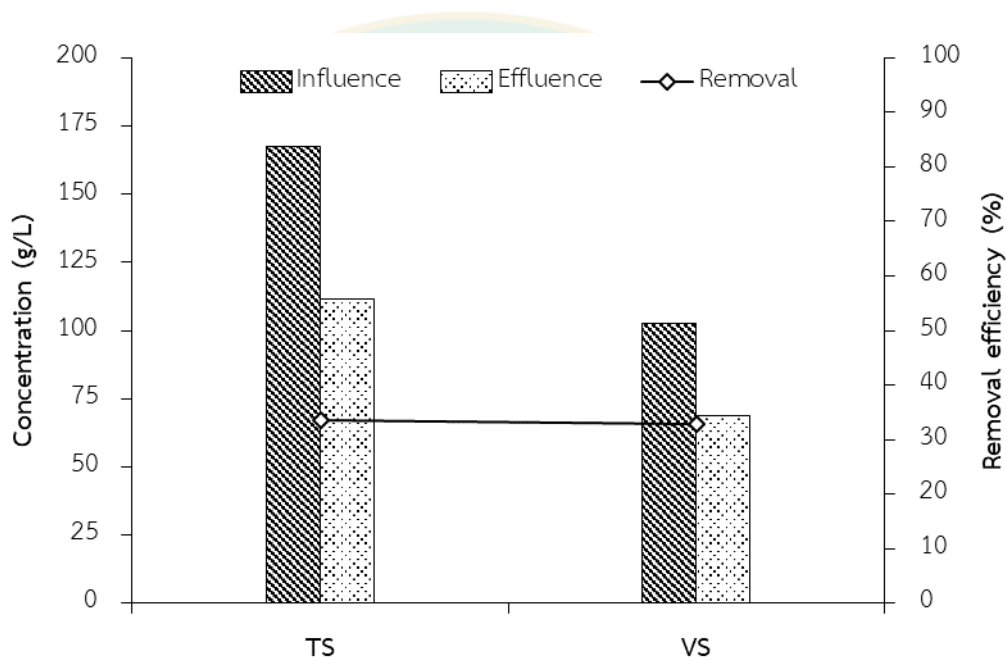
เมื่อเปรียบเทียบศักยภาพของน้ำเสียเข้าระบบกับน้ำล้นออกระบบทุก ๆ 2 days ผลการทดลองพบว่าช่วงแรกของการทดลองพบว่ามีความเข้มข้นของซีโอดีน้ำล้น 4 วันแรกเฉลี่ยเท่ากับ $6.38 \pm 1.06 \text{ g/L}$ ที่ประสิทธิภาพ COD_{removal} เฉลี่ย $72.86 \pm 6.98\%$ หลังจากนั้นพบว่าประสิทธิภาพ COD_{removal} ลดลงเหลือ $58.70 \pm 3.07\%$ จนถึงวันที่ 8 ของการทดลอง สามารถกำจัดซีโอดีเหลือ

7.13±1.06 g/L หลังจากนั้นตั้งแต่วันที่ 9 ของการทดลอง ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจาก 58.70±3.07% เป็น 85.31±0.00% ในวันที่ 13 ของการทดลอง หลังจากนั้นช่วงวันที่ 14 – 20 ของการทดลอง ประสิทธิภาพ COD_{removal} คงที่เป็นระยะเวลา 7 days ที่ประสิทธิภาพเฉลี่ย 94.08±1.86% โดยมีความเข้มข้นของซีโอดีในน้ำล้นออกจากระบบเท่ากับ 1.54±0.41 g/L ซึ่งสาเหตุที่ช่วงแรกมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีต่ำ เนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดการสะสมของสารอาหารและแบคทีเรียต้องใช้เวลาในการปรับสภาพต่อปริมาณอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากช่วงเวลาก่อนเลี้ยงหัวเชื้อ (สริตา และคณะ, 2561 และ Liu et. al., 2014) เมื่อแบคทีเรียสามารถปรับสภาพกับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 1±0.57 kgCOD/(m³•day) ทำให้ประสิทธิภาพ COD_{removal} ค่อย ๆ เพิ่มขึ้น รวมถึงระยะเวลากักเก็บมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่นานขึ้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ได้เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน (Caillet and Adeldard, 2021) ซึ่งจากผลการกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองพบว่ามีความลดลงเข้าใกล้มาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมที่กำหนดค่าซีโอดีของน้ำเสียที่ออกจากโรงงานอุตสาหกรรมไม่ควรเกิน 400 mg/L (กรมควบคุมมลพิษ, 2558) ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพหรือการหมักแบบไร้อากาศสามารถเพิ่มศักยภาพการกำจัดสารอินทรีย์ได้ แต่หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ที่ละลายในน้ำเพิ่มมากขึ้นควรเพิ่มเทคนิคอื่น ๆ เพิ่มเติม เช่น การกวนผสมให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง การหมุนวนน้ำเสียนำไปบำบัดในระบบไร้อากาศซ้ำ หรือ การนำไปบำบัดแบบใช้อากาศต่อไป (กรมควบคุมมลพิษ, 2558 และ Mousazadeh, et. al., 2021) และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีรายวันสอดคล้องกับลักษณะการเกิดก๊าซชีวภาพ (Rakić et. al., 2023) โดยช่วงวันที่ 11 – 20 ของการทดลองมีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดต่อวันเฉลี่ย 979.37±48.85 NmL จากภาพรวมทั้งหมดตลอดระยะเวลาการหมัก 20 days พบว่าระยะเวลาการหมักมีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยตรง โดยเมื่อใช้ระยะเวลานานขึ้น การกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD_{removal} จะมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากแบคทีเรียสามารถปรับสภาพกับการย่อยสลายสารอาหารที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 1±0.57 kgCOD/(m³•day) ได้ดีขึ้น

3. ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่าย

ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งในระบบผลิตก๊าซชีวภาพเป็นค่าที่บ่งบอกลักษณะการย่อยสลายของแข็งของแบคทีเรียในการย่อยสลายของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายให้เป็นก๊าซมีเทน โดยการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องของน้ำเสียจากระบบการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองร่วมกับหัวเชื้อที่อัตราส่วน 3:1 แสดงประสิทธิภาพการ

กำจัดของแข็งดังภาพที่ 30 ซึ่งการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องจะคำนวณจากผลรวมของปริมาณของแข็งของน้ำเสียที่เข้าระบบกับปริมาณของแข็งจากกากตะกอนที่ออกจากระบบเมื่อครบระยะเวลาพักเก็บ 20 days เมื่อพิจารณาการเติมน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง พบว่าระหว่างการเดินระบบน้ำเสียที่เติมเข้ามีปริมาณของแข็งทั้งหมดเฉลี่ย 7.98 ± 1.36 g/(L·day) และมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายเข้าระบบเฉลี่ย 4.88 ± 0.98 g/(L·day) ที่อัตราส่วน VS/TS เฉลี่ยต่อวัน 0.61 ± 0.81



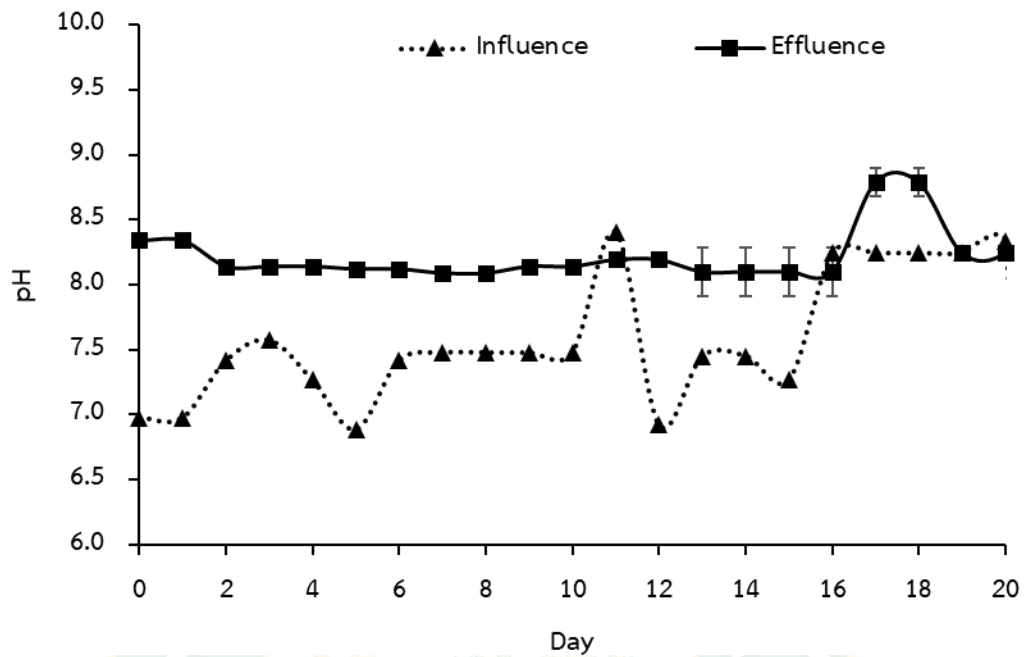
ภาพที่ 30 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง 20 days และนำกากตะกอนจากระบบออกมาวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดพบว่า กากตะกอนมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 111.35 g/L และปริมาณของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 68.76 g/L วิเคราะห์ประสิทธิภาพ TS_{removal} และประสิทธิภาพ VS_{removal} พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์เท่ากับ 33.56% และ 32.88% ซึ่งเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของแข็งที่ต่ำ โดยจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่างานวิจัยของ Lui et. al. (2020) และงานวิจัยของ Mahato et. al (2020) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่องจากน้ำเสียที่มีโปรตีนและปริมาณของแข็งระเหยง่ายสูง พบว่าระบบที่มีวัฏศุนีประเภทโปรตีนและปริมาณของแข็งระเหยง่ายสูงจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และของแข็งต่ำเนื่องมาจากการสะสม

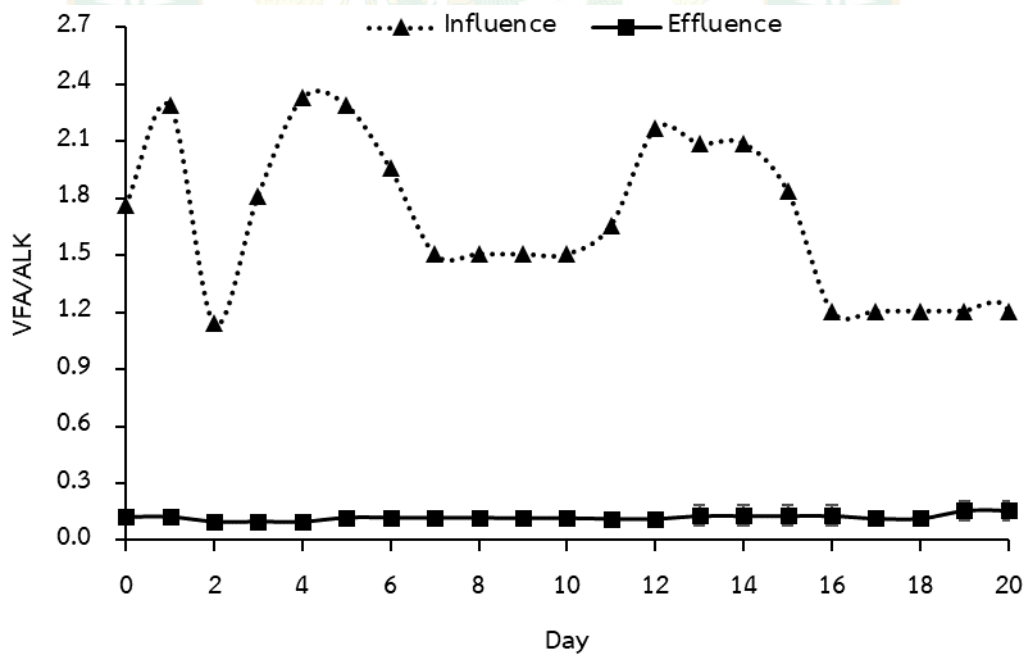
ของปริมาณของแข็งที่มีการเติมทุก ๆ วัน และใช้ระยะเวลาการกักเก็บน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพ COD_{removal} พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งต่ำกว่าการกำจัดซีโอดีประมาณ 50% เพราะแบคทีเรียจะเลือกย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายก่อนเป็นอันดับแรก ๆ สารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำหรือสามารถบ่งบอกได้จากค่า COD หลังจากนั้นจึงเริ่มย่อยสลายองค์ประกอบสารอินทรีย์ที่เป็นเส้นใยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน เป็นต้น โดยของแข็งที่ย่อยสลายง่ายที่สุดจะอยู่ในลักษณะของสารแขวนลอยที่ระเหยง่ายและของแข็งที่ละลายน้ำง่าย เมื่อรวมของแข็งที่สองประเภทก็คือ ของแข็งระเหยง่าย หรือ VS ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ชนิดของแข็งที่แบคทีเรียสามารถย่อยสลายให้เป็นก๊าซมีเทนได้ และเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์จำเป็นต้องเพิ่มระยะเวลาการกักเก็บ หรือ เพิ่มปัจจัยอื่น ๆ ที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาการย่อยสลายของแข็งโดยเฉพาะขั้นตอนไฮโดรไลซิส อาทิ เพิ่มการกวนผสมภายในระบบ ปรับค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมเป็นประจำ เพื่อรักษาสถานะที่แบคทีเรียเมทาโนเจนจะทำงานได้มากที่สุด

4. การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างและอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่างระหว่างการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง

ค่าความเป็นกรดต่าง หรือ pH และอัตราส่วนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่าง หรือ VFA/ALK ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่บ่งบอกถึงเสถียรภาพของกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (Wainaina et. al., 2019) โดยภาพที่ 31 และภาพที่ 32 แสดงการเปลี่ยนของ pH และ VFA/ALK ระหว่างการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องที่ระยะเวลาพัก 20 days อัตราการเติมน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองเท่ากับ 1 ± 0.57 kgCOD/(m³•day) จากภาพแสดงให้เห็นศักยภาพการปรับตัวของแบคทีเรียที่ได้จากการเลี้ยงหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรด้วยน้ำเสียที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 3:1 เมื่อเริ่มการเติมวัตถุดิบน้ำเสีย WWS ที่มีค่า pH เฉลี่ย 7.58 ± 0.5 พบว่า 2 วันแรกของการเติมมีค่า pH ของการวิเคราะห์น้ำล้นออกจากระบบเท่ากับ 8.34 ± 0.01 หลังจากนั้นระบบเริ่มมีค่า pH ลดลงเล็กน้อยเป็น 8.13 และคงที่ที่ pH เฉลี่ย 8.21 ± 0.06 จนถึงวันที่ 16 ของการทดลอง แสดงให้เห็นว่าช่วง pH ที่เหมาะสมของหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรกับน้ำเสียจากกระบวนการเลี้ยงนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองสอดคล้องกับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสีย WWS ต่อหัวเชื้อที่อัตราส่วน 3:1 มี pH ออกจากระบบเท่ากับ 8.21 ± 0.01 เช่นเดียวกัน และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ali et. al. (2019) ที่ระบุว่าหัวเชื้อและน้ำเสียแต่ละชนิดมีสถานะที่เหมาะสมแตกต่างกัน เมื่ออยู่ในสถานะที่เหมาะสมจะทำให้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมีเสถียรภาพหรือสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างคงที่และต่อเนื่อง (Zhang et. al., 2019)



ภาพที่ 31 ค่าความเป็นกรดต่างของน้ำเสียเข้าระบบและน้ำล้นออกระบบของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง



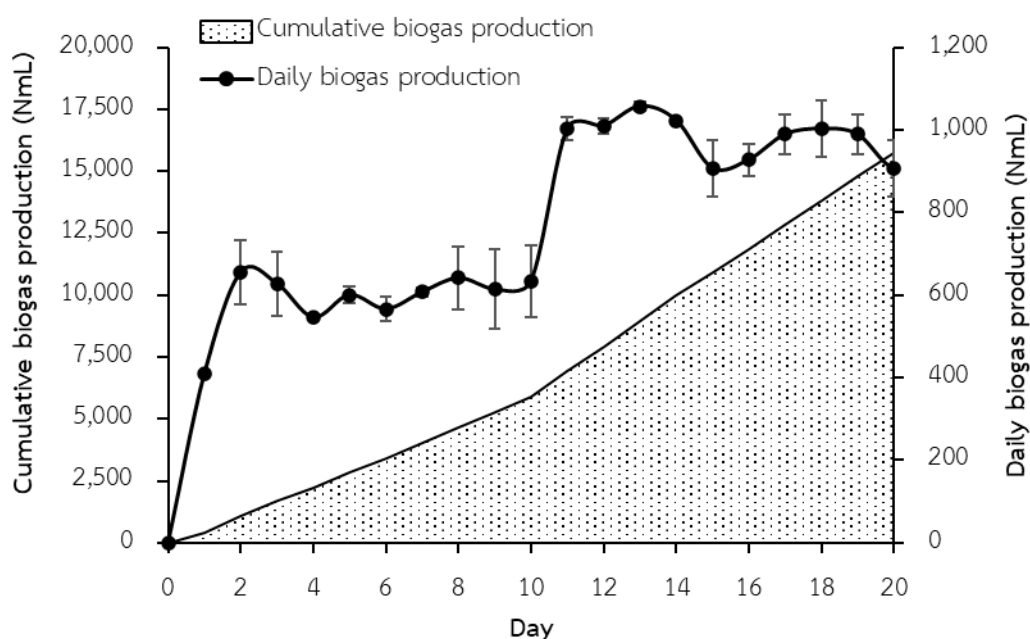
ภาพที่ 32 อัตราส่วน VFA/ALK ของน้ำเสียเข้าระบบและน้ำล้นออกระบบของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง

สำหรับค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ปริมาณความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ หรือสามารถสังเกตได้จากอัตราส่วน VFA/ALK ซึ่งเป็นผลมาจากค่า pH ของน้ำเสีย (Wainaina et. al., 2019) ซึ่งจะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่บ่งชี้ถึงศักยภาพการทำงานของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ตั้งแต่กระบวนการไฮโดรไลซิสนจนกระทั่งเมทาโนเจนซิส โดยค่า pH ที่อยู่ในช่วง 6.0 – 7.0 สามารถเพิ่มศักยภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบการบำบัดเศษอาหารเพิ่มขึ้นมากถึง 20% (Jiang et. al., 2013) ซึ่งเมื่อ pH อยู่ในช่วงที่เหมาะสมทำให้แบคทีเรียเมทาโนเจนสามารถบัพเฟอร์กรดอินทรีย์ในระบบและสภาพความเป็นด่างได้ โดยในงานวิจัยนี้พบว่าการเติมน้ำเสีย WWS เข้าระบบที่ OLR เท่ากับ $1 \pm 0.57 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ โดยมีอัตราส่วน VFA/ALK เข้าระบบเฉลี่ยวันละ 1.69 ± 0.41 แบคทีเรียในระบบสามารถรับอัตราการเติมสารอินทรีย์ดังกล่าวได้ โดยสามารถปรับสมดุลสภาวะทำภายในระบบมีอัตราส่วน VFA/ALK ที่เหมาะสม ซึ่งอัตราส่วน VFA/ALK ของน้ำล้นออกจากระบบเฉลี่ยเท่ากับ 0.12 ± 0.02 ตลอดช่วงระยะเวลาที่เก็บ 20 days จากผลการศึกษาค่า pH และอัตราส่วน VFA/ALK แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนวัดดูกับน้ำเสียถูกหมักในอัตราส่วนที่เหมาะสมทำให้ไม่เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบ (He et. al., 2022) สอดคล้องกับผลการศึกษาแบบกะที่อัตราส่วน 3:1 ของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายคืออัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองแบบกะ (Zhou et. al., 2011 และ Yoon et. al. 2014) และอัตราส่วน VFA/ALK มีค่าที่ต่ำ จึงสรุปได้ว่า การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง หรือ WWS มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างคงที่ จากประสิทธิภาพของแบคทีเรียเมทาโนเจนในหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรที่สามารถบัพเฟอร์สารอินทรีย์จากน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพและต่อเนื่อง สามารถนำไปขยายผลการศึกษาในระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดใหญ่ขึ้นได้

5. ผลของอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง

การศึกษากการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองหมักกับหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร แสดงผลการศึกษาชีวภาพรายวันและก๊าซชีวภาพสะสมดังภาพที่ 33 จากภาพเป็นลักษณะการเกิดก๊าซชีวภาพเมื่อเริ่มเติมน้ำเสียที่ OLR เท่ากับ $1 \pm 0.57 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ (Lu et. al., 2019) โดยวันแรกของการเติมแสดงเป็นวันที่ 0 (day 0) ของการทดลอง หลังจากนั้นจึงเริ่มเก็บผลการศึกษาชีวภาพและสัดส่วนก๊าซชีวภาพในวันที่ 1 จนถึงวันที่ 21 ของการทดลอง ซึ่งเท่ากับระยะเวลาที่เก็บ 20 days เพื่อทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนและความสามารถของแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์แต่ละวันที่การบรรทุกสารอินทรีย์ตามระยะเวลาที่เก็บดังกล่าว เมื่อเริ่มการเติมน้ำเสียลงในระบบผลิตก๊าซชีวภาพปริมาตรการหมัก 4 L ที่เลี้ยงหัวเชื้อและน้ำเสีย WWS ในอัตราส่วน 3:1 เป็นเวลา 7

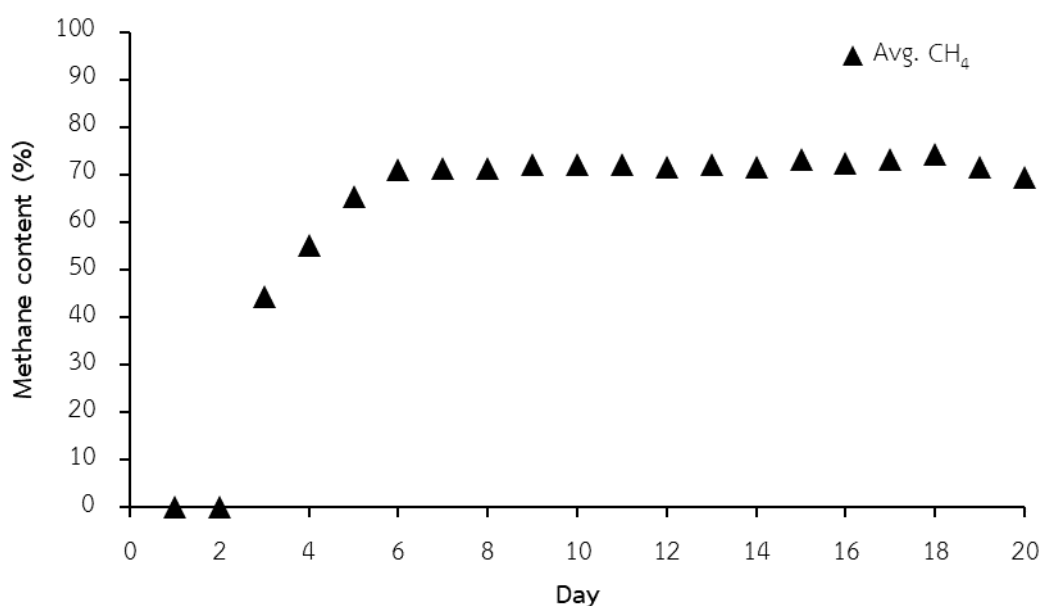
days จนเริ่มมีการผลิตก๊าซมีเทนพบว่าเมื่อเริ่มเติมน้ำเสียที่มีค่าความเข้มข้นซีโอดีเฉลี่ย 20.11 ± 4.21 gCOD/L ระบบเริ่มผลิตก๊าซชีวภาพ 409.36 ± 0 NmL ในวันที่ 1 ของการทดลอง หลังจากนั้นช่วงวันที่ 2 – 10 ของการทดลองสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเฉลี่ยวันละ 610.26 ± 52.53 NmL และเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดหลังจากวันที่ 11 ของการทดลอง



ภาพที่ 33 ผลการผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง

ซึ่งหลังจากวันที่ 11 ของการทดลองเป็นช่วงที่การผลิตก๊าซชีวภาพมีเสถียรภาพสูงสุด โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยวันละ 979.37 ± 35.96 NmL สอดคล้องกับประสิทธิภาพการย่อยสลายอินทรีย์ในรูปของ $COD_{removal}$ ที่ค่อยเพิ่มขึ้นและมีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คงที่ประมาณ $94.08 \pm 1.86\%$ ตั้งแต่วันที่ 10 ของการทดลอง โดยผลการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสีย WWS ที่ OLR ประมาณ 1 ± 0.57 kgCOD/($m^3 \cdot day$) โดยมีการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบวันละประมาณ 20.11 ± 4.21 gCOD/L มีปริมาตรต่ำในช่วงแรก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tan et. al., (2020) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการผลิตปิโตรเคมีซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง โดยช่วงแรกของการทดลองพบว่าแบคทีเรียเมทาโนเจนจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์และปรับสภาพแวดล้อมให้มีความสมดุลต่อการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นก๊าซชีวภาพซึ่งมีก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบหลัก ทำให้ช่วงแรกของการทดลองจะมีการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำและหลังจากนั้นจึงมีศักยภาพการผลิตมากขึ้นจนคงที่เมื่อแบคทีเรียสามารถปรับสภาพกับการเติมสารอินทรีย์ในอัตราเดิมเท่ากันทุกวัน และสังเกตได้ชัดเจนมากขึ้นจาก

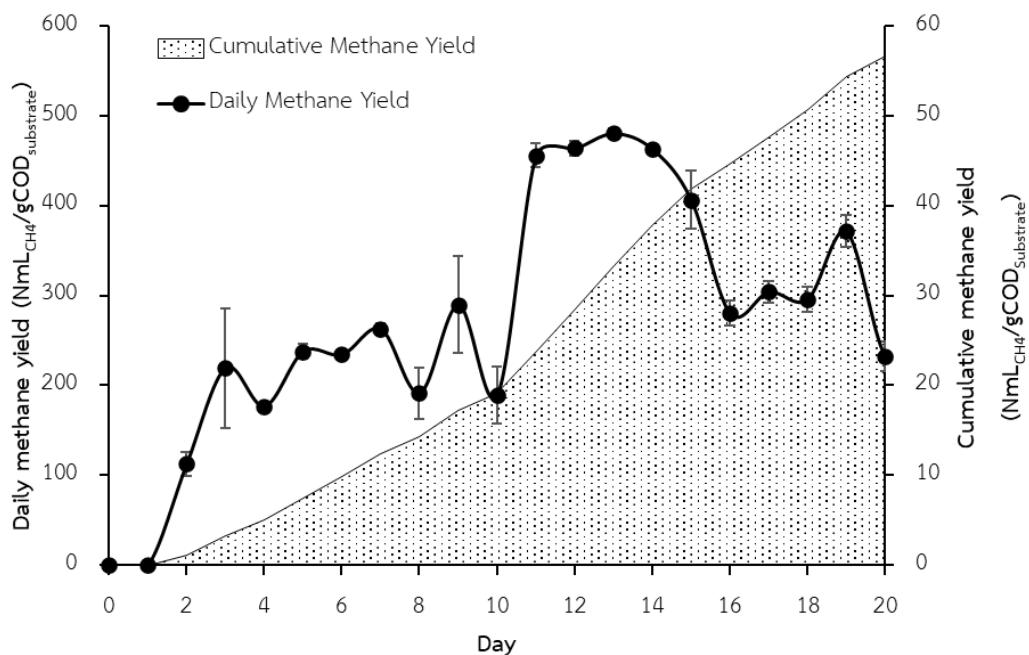
ผลการผลิตก๊าซมีเทนรายวัน แสดงดังภาพที่ 34 จะสังเกตได้ว่าการผลิตก๊าซมีเทนค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนคงที่ประมาณวันที่ 5 ของการทดลอง โดยสามารถผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย $71.39 \pm 1.01\%$ จนจบการทดลองที่ระยะเวลาเก็บ 20 days โดยตลอดช่วงเวลากการทดลองระบบผลิตก๊าซชีวภาพสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างต่อเนื่อง



ภาพที่ 34 สัดส่วนก๊าซมีเทนของการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง

เนื่องจากการผลิตก๊าซชีวภาพมีสภาวะที่เหมาะสมต่อศักยภาพสูงสุดในการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการวิเคราะห์ค่า VFA/ALK ของน้ำล้นที่ออกจากระบบ โดยน้ำล้นที่ออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพหลังการเติมน้ำเสีย WWS ทุก ๆ 3 days มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.12 ± 0.02 ซึ่งเป็นค่าที่ดีและเหมาะสมในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่โดยปกติไม่ควรเกิน 0.8 และค่าอัตราส่วน VFA/ALK ที่ต่ำแสดงว่าแบคทีเรียเมทาโนเจนในระบบมีศักยภาพในการบำบัดเพอร์กรอดอะซิดิกสูง (Mudzanani et. al., 2021) สามารถรักษาสภาวะสมดุลให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพได้ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยศักยภาพการเปลี่ยนสารอินทรีย์ของแบคทีเรียเมทาโนเจนแสดงดังภาพที่ 35 สามารถคำนวณได้จากปริมาตรก๊าซมีเทนที่ได้ต่อความเข้มข้นของซีโอดี ที่เติมเข้าระบบดังสมการที่ 10 (Tan et. al., 2019 และ He et. al., 2022) เมื่อคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่อปริมาณความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบแสดงศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนแบบกึ่งต่อเนื่องของการเติมน้ำเสีย WWS พบว่ามีแนวโน้มการผลิตก๊าซเช่นเดียวกับลักษณะการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยช่วง 5 วันแรกของการทดลองที่มีปริมาตรการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำ มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย 10.14 ± 1.66

$\text{NmL}_{\text{CH}_4}/\text{gCOD}_{\text{substrate}}$ หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ เพิ่มขึ้น โดยมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดในวันที่ 13 ของการทดลอง ที่ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ $48.04 \pm 0.51 \text{ NmL}_{\text{CH}_4}/\text{gCOD}_{\text{substrate}}$ ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Tan et. al., (2019) และ He et. al., (2022)



ภาพที่ 35 ผลการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง

และเมื่อสังเกตในช่วงวันที่ 17 – 20 ของการทดลองพบว่าศักยภาพการเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซมีเทนลดลง จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่าในช่วงแรกของปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ แบบคทีเรียเมทาโนเจนจะเลือกย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ง่ายก่อนจนได้ศักยภาพสูงสุดและคงที่ แต่เมื่อมีระยะเวลาการเดินระบบนานขึ้น พบว่าแบคทีเรียจะมีศักยภาพลดลงเนื่องจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายที่สะสมมานั้นเริ่มหมดไป และจำเป็นต้องย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายยากกว่า (Tan et. al., 2019) ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองสำหรับการเติมแบบกึ่งต่อเนื่องที่ OLR เท่ากับ $1 \pm 0.57 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ ในช่วงระยะเวลาการกักเก็บ 20 days มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีเสถียรภาพและศักยภาพสูงที่สุดอยู่ในช่วงวันที่ 11 – 17 ของการทดลอง โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ $16,674.63 \text{ NmL}$ ที่ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ $566.01 \text{ NmL}_{\text{CH}_4}/\text{gCOD}_{\text{substrate}}$ จากศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพดังกล่าวสามารถศึกษาเพิ่มเติม โดยการเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพื่อศึกษาอัตราการเติมที่สูงที่สุดที่แบคทีเรียเมทาโนเจนจากหัวเชื้อสารชั้นเหลวระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรในน้ำเสีย WWS ที่อัตราส่วน 3:1 จะรับภาระได้ เพื่อนำไปขยาย

ผลต่อให้สามารถนำไปปรับใช้สำหรับน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปหนอนแมลงวันลายในระดับอุตสาหกรรมต่อไป โดยสามารถคำนวณปริมาณตัวอ่อนหนอนที่ใช้ต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ เมื่อทำการหมักในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราการเติม 1 kgCOD/(m³day) จะพบว่า จากน้ำเสียที่ใช้ทั้งหมด 36.20 L จะใช้หนอนในการเลี้ยงประมาณ 0.00579 kg ที่อุณหภูมิระหว่างเดินระบบเท่ากับ 35 °C ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้ 18.81 L ดังนั้นเมื่อเลี้ยงหนอน 1 kg จะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายเท่ากับ 3,247.76 L ที่สัดส่วนก๊าซชีวภาพสูงสุด 71.39% หรือปริมาตรก๊าซมีเทน 2,318.57 L หรือ 2.32 m³ ซึ่งก๊าซชีวภาพบริสุทธิ์ (CH₄ 100%) 1.05 m³ สามารถทดแทน ก๊าซหุงต้มเท่ากับ 1 (Samea, 2016) ดังนั้นก๊าซมีเทน 2.32 m³ สามารถทดแทนก๊าซหุงต้มได้ 2.21 L ต่อการเลี้ยงหนอน 1 kg ซึ่งก๊าซชีวภาพที่ได้สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงกลับไปใช้ในกระบวนการแปรรูปหนอนแมลงวันลายได้



บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้คือการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนขนาดทดลองระหว่างน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายกับหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร (Inoculum, I) ปรับใช้วิธีการหาค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากมาตรฐาน VDI4630 โดยการทดลองแบบกะในขวดแก้วขนาด 1,000 mL ปริมาตรการหมัก 400 mL ภายใต้สภาวะมีโซฟิลิกส์ที่อุณหภูมิ 35 ± 2 °C ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ อัตราส่วนในการหมักระหว่างวัตถุดิบและหัวเชื้อ ได้แก่ 3:1, 1:1, และ 1:3 สำหรับทั้ง 2 วัตถุดิบ คือ น้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง หรือ WWS และเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา หรือ WWI หลังจากนั้นจึงคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองแบบกะเพื่อทดลองการเติมแบบกึ่งต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์ขนาด 5 L ที่ปริมาตรการหมัก 4 L ทั้งหมด 2 ซ้ำ อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ประมาณ $1 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ เป็นระยะเวลา 20 days โดยสามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 ลักษณะของวัตถุดิบและหัวเชื้อ โดยน้ำเสียจากการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย WWS และ WWI มีลักษณะเป็นสีเหลืองขุ่น มีตะกอนของแข็งแขวนลอย โดยมี WWI มีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ $39.37 \pm 1.31 \text{ g/L}$ และมีปริมาณของแข็งระเหยง่าย $30.82 \pm 1.31 \text{ g/L}$ มีค่าซีโอดีประมาณ $58.43 \pm 6.69 \text{ g/L}$ ค่า pH เท่ากับ 6.05 ± 0.21 และอัตราส่วน VFA/ALK เท่ากับ 1.75 ± 0.03 ผลการวิเคราะห์น้ำเสีย WWS พบว่ามีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ $19.35 \pm 4.83 \text{ g/L}$ และของแข็งระเหยง่าย $12.64 \pm 0.56 \text{ g/L}$ มีค่าซีโอดีประมาณ $19.35 \pm 4.83 \text{ g/L}$ ค่า pH และอัตราส่วน VFA/ALK เท่ากับ 7.58 ± 0.50 และ 1.89 ± 0.39 ตามลำดับ สำหรับสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรที่มีศักยภาพในการเป็นหัวเชื้อมีองค์ประกอบเบื้องต้น คือ มีลักษณะเป็นสารชั้นเหลวสีดาขุ่น โดยองค์ประกอบทางเคมีกายภาพเบื้องต้นของหัวเชื้อประกอบไปด้วย มีค่าซีโอดีเท่ากับ $47.24 \pm 17.44 \text{ g/L}$ และปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ $45.40 \pm 8.99 \text{ g/L}$ และปริมาณของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ $66.09 \pm 16.57 \text{ g/L}$ อัตราส่วน VFA/ALK และ pH โดยมีค่าเท่ากับ 0.31 ± 0.01 และ 7.17 ± 0.01 ตามลำดับ

ส่วนที่ 2 ผลการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกะระยะเวลา 45 days พบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดของน้ำเสีย WWS พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด คือ อัตราส่วน 3:1 เนื่องจากสามารถกำจัดค่า

ซีโอดีตลอดระยะเวลาการหมักเท่ากับ 66.58% TS_{removal} เท่ากับ 16.51% VS_{removal} เท่ากับ 22.63% ผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด 70.20% ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 215.34 $NmL_{CH_4}/gVS_{\text{substrate}}$ หรือ 153.81 $NmL_{CH_4}/gCOD_{\text{substrate}}$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำเสียทั้งสองประเภทพบว่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนและประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของน้ำเสีย WWI ที่อัตราส่วน 1:1 ของวัตถุดิบน้ำเสียต่อหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด สำหรับน้ำเสีย WWI คือ อัตราส่วน 1:1 COD_{removal} เท่ากับ 60.24% TS_{removal} มากที่สุดเท่ากับ 14.49% VS_{removal} เท่ากับ 23.76% สัดส่วนก๊าซมีเทนได้สูงสุด 69.70% ที่ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 415.39 $NmL_{CH_4}/gVS_{\text{substrate}}$ หรือ 219.10 $NmL_{CH_4}/gCOD_{\text{substrate}}$

ส่วนที่ 3 ผลการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่องจากการคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่โดยพิจารณาจากศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ และความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจ จึงเลือกขยายการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่องของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวัยลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองในอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 3:1 โดยดำเนินการเต็มระบบที่ OLR เท่ากับ $1 \pm 0.57 \text{ kgCOD}/(\text{m}^3 \cdot \text{day})$ ผลการศึกษพบว่า ตลอดระยะเวลา 20 days ที่อัตราการเติมซีโอดีเฉลี่ย 24.47 g/L มีประสิทธิภาพ COD_{removal} ต่อเนื่องกันสูงสุด $94.57 \pm 1.54\%$ และประสิทธิภาพ TS_{removal} และ ประสิทธิภาพ VS_{removal} โดยรวมของการทดลอง เท่ากับ 33.56% และ 32.88% ตามลำดับ สภาวะที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียอยู่ในช่วง pH เท่ากับ 8.21 ± 0.06 ที่อัตราส่วน VFA/ALK เฉลี่ยเท่ากับ 0.12 ± 0.02 ผลของก๊าซชีวภาพผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ $16,674.63 \pm 19.30 \text{ NmL}$ ผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 794.03 NmL/day ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย $29.79 \text{ mL}_{CH_4}/gCOD_{\text{substrate}}$ และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 566.01 $NmL_{CH_4}/gCOD_{\text{substrate}}$ ที่สัดส่วนก๊าซมีเทนเฉลี่ย $71.39 \pm 1.01\%$ โดยเมื่อคำนวณอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมตลอด 20 days ต่อการเลี้ยงหนอน 1 kg สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 3.25 m^3 ที่ปริมาตรก๊าซมีเทน 2.32 m^3 สามารถทดแทนก๊าซหุงต้มได้ 2.21 L ซึ่งก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการแปรรูปหนอนแมลงวันลายได้ ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลืองในอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 3:1 มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและสามารถนำไปขยายผลต่อในระดับที่ใหญ่ขึ้นและนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาวัตถุบับน้ำเสียที่มีลักษณะโปรตีนสูงควรศึกษองค์ประกอบของธาตุอาหารในวัตถุบับ เช่น C, H, O, N, S รวมถึงอัตราส่วน C/N ที่เหมาะสมด้วย เนื่องจากช่วยวิเคราะห์ศักยภาพการเกิดก๊าซชีวภาพจากสัดส่วนคาร์บอนที่มีอยู่ในวัตถุบับได้อย่างแม่นยำมากยิ่งขึ้น
2. ควรศึกษาลักษณะการเกิด NH_3 ที่เกิดขึ้นในระบบเพิ่มเติม เนื่องจากความเข้มข้นของ NH_3 ในระบบอาจเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทนได้
3. การศึกษาแบบกึ่งต่อเนื่องควรศึกษาในอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น เพื่อศึกษาภาระโหลดสารอินทรีย์ที่สูงที่สุดที่แบคทีเรียในระบบสามารถรับได้
4. งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายในระดับห้องปฏิบัติการ ควรมีการศึกษาร่วมกับการระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใหญ่ขึ้น เพื่อให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

บรรณานุกรม



บรรณานุกรม

- กรมการค้าภายใน. (2565). พืชน้ำมันและวัตถุดิบอาหารสัตว์. กรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์.
<https://agri.dit.go.th/index.php/home>.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2564). คู่มือการจัดทำรูปแบบการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ในเชิงพาณิชย์. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2020/05/pcdnew-2020-05-20_02-42-38_108096.pdf.
- กรมควบคุมมลพิษ. (2558). คู่มือความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นและการตรวจสอบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยตนเอง. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. http://cac.pcd.go.th/images/ptechResource/PublishDoc/2558-CAC_treatment/CAC_manual-58.pdf.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2563). “พลังงานก๊าซชีวภาพ”, คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 5. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. <https://webkc.dede.go.th/testmax/node/190>.
- จันทกานต์ อรณนันทน์ วรรรณา อ่างทอง ปฎิมา บุตรชา สดุดี พงษ์เพ็ญจันทร์ แพรวพรรณ ชูช่วย เยาวลักษณ์ แหม่งปิง รัตติกาล ปวงแก้ว ศศิพร ซ่อลำไย เฉลา พิทักษ์สินสุข สุวรรณิ เกศกมลสาสน์ จริยา บุญจรัสชะ และ ศิริรัตน์ บัวผัน. (2563). การจัดทำฐานข้อมูลคุณค่าทางโภชนะของวัตถุดิบอาหารโคนมในประเทศไทย (ปีที่ 2). รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร. กรุงเทพฯ, ประเทศไทย.
- จุฑาภรณ์ ชนะถาวร. (2560). การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของวัสดุเหลือทิ้งคาร์บอนสูงและน้ำเสียจากการเตรียมเบตดิงส์ไส้เดือน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ธีรพงษ์ ใจชาญสุขกิจ ประไพพรรณ สิทธิกุล สนทยา มูลศรีแก้ว เอกภพ สมใจเพ็ง และ ภาณุพงศ์ บุตรสี. (2563). การเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย (Black Soldier Fly: *Hermitia illucens*) ด้วยขยะอินทรีย์เพื่อใช้เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกในอาหารสัตว์. คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา หันตรา, อยุธยา, ประเทศไทย.
- นาริรัตน์ สิงห์โต อนุรักษ์ เขียวขจรเขต ภัทรภร ทศพงษ์ และ วรณพร คลังเพชร. (2564). กากถั่วดาวอินคาเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนจากพืชชนิดใหม่ในอาหารปลาไน (*Cyprinus carpio*). วารสารแก่นเกษตร, 49(2), 9. <https://doi.org/10.14456/kaj.2021.38>.

- ปิยะวดี ศรีวิชัย และ ชูมาพร รอดสีดา. (2563). ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการหมักย่อยแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ. *RMUTI JOURNAL Science and Technology* 13(3).
- รจพรรณ นิรัฐศิลป์. (2563). เอกสารประกอบการสอน รายวิชา พง317 ระบบก๊าซชีวภาพ. คณะวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, พิมพ์ครั้งที่ 4.
- สำนักงานที่ปรึกษาการเกษตรต่างประเทศ ประจำกรุงวอชิงตัน ดี.ซี. (USDA). (2564). อาหารสัตว์จากหนอนแมลงวันลาย (BLACK SOLDIER FLY LARVAE) กำลังขยายตัวในตลาดสหรัฐอเมริกา. USDA. <https://www.moac.go.th/foreignagri-news-files-431391791286>.
- สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, สื่อความรู้ เทคโนโลยีพร้อมใช้ เพื่อเกษตรและชุมชน. 2562.
- สิริมา ชินสาร วิษณีย์ ยืนยงพุทธกาล และ นิสานารถ กระแสร์ชล. (2560). การเพิ่มมูลค่าให้กับต้นถั่วดาวอินคาโดยการนำส่วนกากเมล็ดที่เหลือจากการสกัดน้ำมัน และส่วนใบมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์มหาวิทยาลัยบูรพา, ชลบุรี, ประเทศไทย.
- 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>.
- Araujo, V. K. A., De Almeida, S., De Oliveira, S. B., Calixto, W. P., Furriel, G. P., & Barbosa, D. P. (2017). Anaerobic digestion using residue of soybean processing: Biogas production and its potential to generate energy. In *Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2017*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/EPE.2017.7967345>.
- B. M. A. Dortmans, S. Diener, B. M. Verstappen, and C. Zurbrugg, "Title of chapter in the book," in *Black Soldier Fly Biowaste Processing - A Step-by-Step Guide*,. Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2017.
- Barret, M., Gagnon, N., Topp, E., Masse, L., Massé, D. I., & Talbot, G. (2013). Physico-chemical characteristics and methanogen communities in swine and dairy manure storage tanks: Spatio-temporal variations and impact on

- methanogenic activity. *Water Research*, 47(2), 737–746. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.10.047>.
- Bella, K., & Venkateswara Rao, P. (2022). Anaerobic co-digestion of cheese whey and septage: Effect of substrate and inoculum on biogas production. *Journal of Environmental Management*, 308. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114581>.
- Bulak, P., Proc, K., Pawłowska, M., Kasprzycka, A., Berus, W., & Bieganski, A. (2020). Biogas generation from insects breeding post production wastes. *Journal of Cleaner Production*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118777>.
- Caillet, H., & Adelard, L. (2021). Start-up strategy and process performance of semi-continuous anaerobic digestion of raw sugarcane vinasse. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 185-198.
- Castro-López, C., Santiago-López, L., Vallejo-Cordoba, B., González-Córdova, A. F., Liceaga, A. M., García, H. S., & Hernández-Mendoza, A. (2020). An insight to fermented edible insects: A global perspective and prospective. *Food Research International*, 137, 109750.
- Chen, X., Zhou, W., Li, G., Song, Q., Ismail, M., Wang, Y., ... Cheng, C. (2021). Anaerobic biodegradation of soybean-process wastewater: Operation strategy and sludge bed characteristics of a high-performance Spiral Symmetric Stream Anaerobic Bioreactor. *Water Research*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117095>.
- Duan, N., Zhang, D., Lin, C., Zhang, Y., Zhao, L., Liu, H., & Liu, Z. (2019). Effect of organic loading rate on anaerobic digestion of pig manure: Methane production, mass flow, reactor scale and heating scenarios. *Journal of Environmental Management*, 231, 646–652. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.062>.
- Duong, T. H., Grolle, K., Nga, T. T. V., Zeeman, G., Temmink, H., & Van Eekert, M. (2019). Protein hydrolysis and fermentation under methanogenic and acidifying conditions. *Biotechnology for biofuels*, 12(1), 1-10.
- 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>
- Febriyanto, H. E., Afzarurrohman, A., & Rohmah, E. R. (2021). Sustainable Biogas Production from Liquid Waste: Tofu and Soy Sauce. *Proc. Tokyo Tech Indonesian Commitment Award*, 2, 15.
- Fermentation of organic materials-characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests, V. G. 4630, 2006.
- Filer, J., Ding, H. H., & Chang, S. (2019, May 1). Biochemical methane potential (BMP) assay method for anaerobic digestion research. *Water (Switzerland)*. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w11050921>.
- Fransiscus, Y., & Simangunsong, T. L. (2021). Anaerobic Digestion of Industrial Tempeh Wastewater with Sludge from Cow Manure Biogas Digester as Inoculum: Effect of F/M Ratio on the Methane Production. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 11(3), 1007–1013. <https://doi.org/10.18517/IJASEIT.11.3.11846>
- Gahukar, R. T. (2016). Edible Insects Farming: Efficiency and Impact on Family Livelihood, Food Security, and Environment Compared With Livestock and Crops. In *Insects as Sustainable Food Ingredients: Production, Processing and Food Applications* (pp. 85–111). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802856-8.00004-1>
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., ... & Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515-2522.
- Hussain, A., & Dubey, S. K. (2017). Specific methanogenic activity test for anaerobic degradation of influents. *Applied water science*, 7, 535-542.
- Jeppu, G.P., Janardhan, J., Kaup, S. et al. Effect of feed slurry dilution and total solids on specific biogas production by anaerobic digestion in batch and semi-batch reactors. *J Mater Cycles Waste Manag* 24, 97–110 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01298-1>.
- Jiang, J., Zhang, Y., Li, K., Wang, Q., Gong, C., & Li, M. (2013). Volatile fatty acids production from food waste: Effects of pH, temperature, and organic loading

- rate. *Bioresource Technology*, 143, 525–530. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.025>.
- Jingura, R. M., & Kamusoko, R. (2017). Methods for determination of biomethane potential of feedstocks: A review. *Biofuel Research Journal*. Green Wave Publishing of Canada. <https://doi.org/10.18331/BRJ2017.4.2.3>.
- Karki, R., Chuenchart, W., Surendra, K. C., Shrestha, S., Raskin, L., Sung, S., ... Kumar Khanal, S. (2021, June 1). Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives. *Bioresource Technology*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125001>.
- Khadka, A., Parajuli, A., Dangol, S., Thapa, B., Sapkota, L., Carmona-Martínez, A. A., & Ghimire, A. (2022). Effect of the substrate to inoculum ratios on the kinetics of biogas production during the mesophilic anaerobic digestion of food waste. *Energies*, 15(3), 834.
- Khoufi, S., Louhichi, A., & Sayadi, S. (2015). Optimization of anaerobic co-digestion of olive mill wastewater and liquid poultry manure in batch condition and semi-continuous jet-loop reactor. *Bioresource Technology*, 182, 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.01.092>.
- Kim, M. J., & Kim, S. H. (2020). Conditions of lag-phase reduction during anaerobic digestion of protein for high-efficiency biogas production. *Biomass and Bioenergy*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105813>.
- Kushkevych, I., Vítězová, M., Vítěz, T., & Bartoš, M. (2017). Production of biogas: Relationship between methanogenic and sulfate-reducing microorganisms. *Open Life Sciences*, 12(1), 82–91. <https://doi.org/10.1515/biol-2017-0009>.
- Lalander, C., Nordberg, Å., & Vinnerås, B. (2018). A comparison in product-value potential in four treatment strategies for food waste and faeces – assessing composting, fly larvae composting and anaerobic digestion. *GCB Bioenergy*, 10(2), 84–91. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12470>.
- 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). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.03.015>.

- Liotta, F., D'Antonio, G., Esposito, G., Fabbricino, M., Van Hullebusch, E. D., Lens, P. N. L., ... Pontoni, L. (2014). Effect of total solids content on methane and volatile fatty acid production in anaerobic digestion of food waste. *Waste Management and Research*, 32(10), 947–953. <https://doi.org/10.1177/0734242X14550740>.
- Menzel, T., Neubauer, P., & Junne, S. (2020). Role of microbial hydrolysis in anaerobic digestion. *Energies*, 13(21), 5555.
- Moguel-Castañeda, J. G., González-Salomón, M., Hernández-García, 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), 20200022.
- Mousazadeh, M., Niaragh, E. K., Usman, M., Khan, S. U., Sandoval, M. A., Al-Qodah, Z., ... & Emamjomeh, M. M. (2021). A critical review of state-of-the-art electrocoagulation technique applied to COD-rich industrial wastewaters. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(32), 43143-43172.
- Mudzanani, K. E. (2022). Evaluation of the feasibility of beneficiating sewage sludge from municipal wastewater treatment works (Doctoral dissertation, Faculty of Engineering and the Built Environment, University of the Witwatersrand, Johannesburg).
- Pham, C. H., Triolo, J. M., Cu, T. T. T., Pedersen, L., & Sommer, S. G. (2013). Validation and recommendation of methods to measure biogas production potential of animal manure. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 26(6), 864.
- Pilarska, A. A., Pilarski, K., Wolna-Maruwka, A., Boniecki, P., & Zaborowicz, M. (2018). Use of confectionery waste in biogas production by the anaerobic digestion process. *Molecules*, 24(1), 37.
- Pilli, S., Kumar Pandey, A., Katiyar, A., Pandey, K., & Dayal Tyagi, R. (2020). Pre-treatment Technologies to Enhance Anaerobic Digestion. In *Sustainable Sewage Sludge Management and Resource Efficiency*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intech.open.93236>.

- Pongsopon, M., Woraruthai, T., Anuwat, P., Amawatjana, T., Tirapanampai, C., Prombun, P., ... & Wongnate, T. (2023). Anaerobic co-digestion of yard waste, food waste, and pig slurry in a batch experiment: an investigation on methane potential, performance, and microbial community. *Bioresource Technology Reports*, 21, 101364.
- Rakić, N., Šušteršič, V., Gordić, D., Jovičić, N., Bošković, G., & Bogdanović, I. (2023). Characteristics of biogas production and synergistic effect of primary sludge and food waste co-digestion. *BioEnergy Research*, 1-14.
- Ripoll, V., Agabo-García, C., Perez, M., & Solera, R. (2020). Improvement of biomethane potential of sewage sludge anaerobic co-digestion by addition of “sherry-wine” distillery wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119667>.
- Samah, E. (2016). Measuring small-scale biogas capacity and production. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi.
- Shin, H. S., & Youn, J. H. (2005). Conversion of food waste into hydrogen by thermophilic acidogenesis. *Biodegradation*, 16(1), 33–44. <https://doi.org/10.1007/s10531-004-0377-9>.
- 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 anaerobic digestion assays. *Biomass and Bioenergy*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106558>.
- Siciliano, A., Limonti, C., Curcio, G. M., & Calabrò, V. (2019). Biogas generation through anaerobic digestion of compost leachate in semi-continuous completely stirred tank reactors. *Processes*, 7(9), 635.
- Song, Y., Meng, S., Chen, G., Yan, B., Zhang, Y., Tao, J., ... Li, J. (2021). Co-digestion of garden waste, food waste, and tofu residue: Effects of mixing ratio on methane production and microbial community structure. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105901>.
- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, 2005.

- Syaichurrozi, I., Budiyo, & Sumardiono, S. (2013). Predicting kinetic model of biogas production and biodegradability organic materials: Biogas production from vinasse at variation of COD/N ratio. *Bioresource Technology*, 149, 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.088>.
- Vögeli, Y., Riu, C., Gallardo, A., Diener, S., & Zurbrügg, C. (2014). *Anaerobic Digestion of Biowaste in Developing Countries*. Sandec: Department of Water and Sanitation in Developing Countries (p. 137). Retrieved from <http://www.eawag.ch/forschung/sandec/publikationen/swm/dl/biowaste.pdf>.
- Wagiman, W., Ardaniswari, I. R., & Nugravianto, W. P. (2020). Biogas Production from Tofu Waste to Improve the Environmental Performance of Tofu Industry. *Agroindustrial Journal*, 7(1), 459. <https://doi.org/10.22146/aj.v7i1.60393>.
- Wainaina, S., Lukitawesa, Kumar Awasthi, M., & Taherzadeh, M. J. (2019, January 1). Bioengineering of anaerobic digestion for volatile fatty acids, hydrogen or methane production: A critical review. *Bioengineered*. Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1673937>.
- 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>.
- Yan, L., Liu, C., Zhang, Y., Liu, S., & Zhang, Y. (2021). Effects of C/N ratio variation in swine biogas slurry on soil dissolved organic matter: Content and fluorescence characteristics. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111804>.
- Yoon, Y. M., Kim, S. H., Shin, K. S., & Kim, C. H. (2014). Effects of substrate to inoculum ratio on the biochemical methane potential of piggery slaughterhouse wastes. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 27(4), 600–607. <https://doi.org/10.5713/ajas.2013.13537>.
- 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
การเตรียมการทดลอง

1. การเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง

ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้สำหรับการศึกษาแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่องจะเก็บตัวอย่างน้ำล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วเหลือง ณ โรงงานของบริษัท สยาม ไบโอ อินเซ็ค จำกัด ภายในอำเภอเกาะคา จังหวัดลำปาง แสดงภาพลักษณะการเก็บน้ำเสียดังภาพผนวกที่ 1 และ 2



ภาพผนวกที่ 1 การเติมน้ำเพื่อล้างหนอนแมลงวันลาย



ภาพผนวกที่ 2 การเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงาน

2. การเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา

น้ำเสียจากการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคาจะจำลองการเลี้ยงตามวิธีการเดียวกับการเลี้ยงของของบริษัท สยาม ไบโอดี อินเซ็ก จำกัดที่ทำวิจัยร่วม อ.ดร.วงศ์พันธ์ พรหมวงศ์ อาจารย์ประจำสาขาวิชาชีววิทยากวีวิทยา คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยมีขั้นตอนและภาพแสดงวิธีการเพาะเลี้ยงดังภาพผนวกที่ ดังนี้

1) เตรียมกากถั่วดาวอินคาโดยการปั่นเปลือกเมล็ดแห้งด้วยเครื่องปั่นหลังจากนั้นจึงนำไปแช่น้ำเพื่อให้เกิดความอ่อนนุ่ม



ภาพผนวกที่ 3 การเตรียมกากถั่วดาวอินคา

2) ชั่งน้ำหนักกากถั่วดาวอินคาและไข่หนอนแมลงวันลายและใส่ในภาชนะสำหรับเพาะเลี้ยงตัวอ่อนหนอนแมลงวันลาย



ภาพผนวกที่ 4 การชั่งกากถั่วดาวอินคาและการชั่งไข่หนอนแมลงวันลาย



ภาพผนวกที่ 5 ไข่หนอนแมลงวันลายบนกากถั่วดาวอินคาสำหรับเพาะเลี้ยงตัวอ่อน

3) เก็บกระบะที่บรรจุอาหารและไข่หนอนแมลงวันลายไว้ในโรงเรือนเพาะเลี้ยง และคอยสังเกตการเจริญเติบโตและความชื้นของกากอาหาร



ภาพผนวกที่ 6 หนอนแมลงวันลายในโรงเรือนเพาะเลี้ยง

4) ล้างหนอนแมลงวันลายด้วยอัตราส่วนน้ำต่อของผสมในกระบะเท่ากับ 10:1 โดยมวล



ภาพผนวกที่ 7 กระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วตาอินคา

3. การเก็บตัวอย่างหัวเชื้อสารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร

สารชั้นเหลวจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรจะถูกเก็บจากบ่อกักตะกอนหลังออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร ณ ฟาร์มสุกร คณะสัตวศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้

4. ภาพประกอบการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่อง



ภาพผนวกที่ 8 การตรวจสอบอุณหภูมิภายในกระบะ



ภาพผนวกที่ 9 ลักษณะการวางตำแหน่งปั้มน้ำ อุปกรณ์ให้ความร้อน และอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ



ภาพผนวกที่ 10 การบรรจุวัสดุดิบและหัวเชื้อ



ภาพผนวกที่ 11 การอัดก๊าซไนโตรเจน



ภาพผนวกที่ 12 ลักษณะถังหมักและถังเก็บก๊าซชีวภาพของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง



ภาคผนวก ข
ตารางการบันทึกผลการทดลอง

1. ตารางคำนวณการเตรียมวัตถุดิบและหัวเชื้อในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

การศึกษาศักยภาพการหมักแบบการเป็นการศึกษาโดยการปรับใช้จากมาตรฐานการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน VDI4630 โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ช่วยในการคำนวณแสดงดังตารางผนวกที่ 1 ดังนี้

ตารางผนวกที่ 1 ตารางการคำนวณปริมาณวัตถุดิบและหัวเชื้อตามเงื่อนไขการทดลอง

No	Properties	Volume			Unit
1	F/I Ratio	3.00	1.00	0.33	-
2	ปริมาณทั้งหมด	1,000.00	1,000.00	1,000.00	mL
3	ปริมาณใช้งาน	400.00	400.00	400.00	mL
4	ปริมาณของ Inoculum ที่จะใช้ในขวด	1.50	1.50	1.50	%
	จะต้องใช้ Inoculum	6.00	6.00	6.00	g VS
		6,000.00	6,000.00	6,000.00	mg VS
	จะต้องใช้ Feed	18.00	6.00	2.00	g VS
		18,000.00	6,000.00	2,000.00	mg VS
Volatile solid (VS)					
1	QC (Micro Crystalline)			962,633.00	mg/kg
2	Fermented pig manure (Inoculum)			35,034.60	mg/L
3	WWS			30,000.00	mg/L
4	Fermented pig manure (Inoculum)			50,147.44	mg/L
5	WWI			30,819.73	mg/L

	Inoculum	Sample			Inoculum	Sample		
	Fermented pig manure	WWI3	WWI1	WWI0.33	Fermented pig manure	WWS3	WWS1	WWS0.33
VS ของตัวอย่าง (mg)	50,147.44	30,819.73	30,819.73	30,819.73	35,034.60	30,000.00	30,000.00	30,000.00
โมปริมาณ (g)	1,000.00	1,000.00	1,000.00	1,000.00	6,000.00	18,000.00	6,000.00	2,000.00
VS ที่ต้องการ (mg)	6,000.00	18,000.00	6,000.00	2,000.00	6,000.00	18,000.00	6,000.00	2,000.00
จะใช้ปริมาณ (g)	119.65	584.04	194.68	64.89	171.26	600.00	200.00	66.67
รวมน้ำหนักทั้งหมด								
ของตัวอย่าง (g)	119.65	703.69	314.33	184.54	171.26	771.26	371.26	237.93
ต้องเติมสารอาหาร (g)	-	-	85.67	215.46	-	-	28.74	162.07

2. การบันทึกผลการทดลอง

ตารางผนวกที่ 2 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันของน้ำเสีย WWS

BMP Test				Daily Biogas Production				
Date	Day	Time	Temp (°C)	B1	B2	Avg. Blank	Inoculum	S.D.
31/10/2022	0.00		35.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1/11/2022	1.00		35.00	121.50	117.00	119.25	17.62	3.18
2/11/2022	2.00		35.00	5.00	6.00	5.50	0.81	0.71
3/11/2022	3.00		36.00	5.00	6.00	5.50	0.81	0.71
4/11/2022	4.00		34.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5/11/2022	5.00		35.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6/11/2022	6.00		34.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7/11/2022	7.00		34.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8/11/2022	8.00		33.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9/11/2022	9.00		34.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10/11/2022	10.00		35.90	2.50	0.00	1.25	0.18	1.77
11/11/2022	11.00		35.90	16.00	10.50	13.25	1.95	3.89
12/11/2022	12.00		35.90	12.00	11.50	11.75	1.73	0.35
13/11/2022	13.00		36.00	10.00	14.50	12.25	1.80	3.18
14/11/2022	14.00		35.30	15.50	14.00	14.75	2.18	1.06
15/11/2022	15.00		35.80	12.00	15.00	13.50	1.99	2.12
16/11/2022	16.00		35.80	8.00	4.00	6.00	0.88	2.83
17/11/2022	17.00		35.60	11.00	13.00	12.00	1.77	1.41
18/11/2022	18.00		36.60	11.00	13.00	12.00	1.76	1.41
19/11/2022	19.00		37.60	11.00	13.00	12.00	1.76	1.41
20/11/2022	20.00		35.60	16.00	6.50	11.25	1.66	6.72
21/11/2022	21.00		35.30	16.00	16.50	16.25	2.40	0.35
22/11/2022	22.00		35.60	3.50	9.00	6.25	0.92	3.89
23/11/2022	23.00		35.70	9.50	7.50	8.50	1.25	1.41
24/11/2022	24.00		35.70	6.00	0.50	3.25	0.48	3.89
25/11/2022	25.00		35.70	11.00	8.50	9.75	1.44	1.77
26/11/2022	26.00		35.70	9.00	7.00	8.00	1.18	1.41
27/11/2022	27.00		35.70	15.50	17.00	16.25	2.40	1.06
28/11/2022	28.00		35.70	6.00	8.00	7.00	1.03	1.41
29/11/2022	29.00		35.70	7.00	4.00	5.50	0.81	2.12
30/11/2022	30.00		35.00	10.50	5.50	8.00	1.18	3.54
1/12/2022	31.00		35.40	8.00	15.00	11.50	1.70	4.95
2/12/2022	32.00		35.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/12/2022	33.00		35.00	13.00	12.00	12.50	1.85	0.71
4/12/2022	34.00		35.00	9.00	7.00	8.00	1.18	1.41
5/12/2022	35.00		35.20	11.50	11.50	11.50	1.70	0.00
6/12/2022	36.00		35.00	12.00	10.00	11.00	1.63	1.41
7/12/2022	37.00		30.00	0.00	2.00	1.00	0.15	1.41
8/12/2022	38.00		35.20	10.00	3.50	6.75	1.00	4.60
9/12/2022	39.00		35.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10/12/2022	40.00		35.10	11.50	14.00	12.75	1.88	1.77
11/12/2022	41.00		34.90	10.00	12.00	11.00	1.63	1.41
12/12/2022	42.00		34.90	9.00	10.00	9.50	1.40	0.71
13/12/2022	43.00		35.30	7.00	11.00	9.00	1.33	2.83
14/12/2022	44.00		35.20	7.50	8.00	7.75	1.14	0.35
15/12/2022	45.00		35.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

BMP Test				Daily Biogas Production				
Date	Day	Time	Temp (°C)	WW100 #1	WW100 #2	vg WW100 (m)	WMI	S.D.
31/10/2022	0.00		35.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1/11/2022	1.00		35.00	99.00	99.00	99.00	14.63	0.00
2/11/2022	2.00		35.00	5.00	5.00	5.00	0.74	0.00
3/11/2022	3.00		36.00	6.00	6.00	6.00	0.88	0.00
4/11/2022	4.00		34.60	25.00	25.00	25.00	3.70	0.00
5/11/2022	5.00		35.60	26.00	26.00	26.00	3.83	0.00
6/11/2022	6.00		34.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7/11/2022	7.00		34.70	53.00	53.00	53.00	7.84	0.00
8/11/2022	8.00		33.80	17.00	17.00	17.00	2.52	0.00
9/11/2022	9.00		34.30	8.00	8.00	8.00	1.18	0.00
10/11/2022	10.00		35.90	18.00	18.00	18.00	2.65	0.00
11/11/2022	11.00		35.90	14.50	14.50	14.50	2.14	0.00
12/11/2022	12.00		35.90	12.00	12.00	12.00	1.77	0.00
13/11/2022	13.00		36.00	10.50	10.50	10.50	1.55	0.00
14/11/2022	14.00		35.30	16.50	16.50	16.50	2.44	0.00
15/11/2022	15.00		35.80	9.00	9.00	9.00	1.33	0.00
16/11/2022	16.00		35.80	7.50	7.50	7.50	1.11	0.00
17/11/2022	17.00		35.60	10.00	10.00	10.00	1.47	0.00
18/11/2022	18.00		36.60	11.00	11.00	11.00	1.62	0.00
19/11/2022	19.00		37.60	12.00	12.00	12.00	1.76	0.00
20/11/2022	20.00		35.60	2.50	2.50	2.50	0.37	0.00
21/11/2022	21.00		35.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22/11/2022	22.00		35.60	0.50	0.50	0.50	0.07	0.00
23/11/2022	23.00		35.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24/11/2022	24.00		35.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
25/11/2022	25.00		35.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
26/11/2022	26.00		35.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
27/11/2022	27.00		35.70	9.00	9.00	9.00	1.33	0.00
28/11/2022	28.00		35.70	3.00	3.00	3.00	0.44	0.00
29/11/2022	29.00		35.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30/11/2022	30.00		35.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1/12/2022	31.00		35.40	1.00	1.00	1.00	0.15	0.00
2/12/2022	32.00		35.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3/12/2022	33.00		35.00	3.00	3.00	3.00	0.44	0.00
4/12/2022	34.00		35.00	5.00	5.00	5.00	0.74	0.00
5/12/2022	35.00		35.20	5.50	5.50	5.50	0.81	0.00
6/12/2022	36.00		35.00	5.00	5.00	5.00	0.74	0.00
7/12/2022	37.00		30.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8/12/2022	38.00		35.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9/12/2022	39.00		35.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10/12/2022	40.00		35.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11/12/2022	41.00		34.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12/12/2022	42.00		34.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
13/12/2022	43.00		35.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14/12/2022	44.00		35.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15/12/2022	45.00		35.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

BMP Test	Date	Day	Time	Temp (°C)	Daily Biogas Production					
					1:1 (1)	1:1 (2)	1:1 (3)	Avg 1:1 (mL)	1:1	S.D.
	31/10/2022	0.00		35.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	1/11/2022	1.00		35.00	130.00	125.00	76.00	95.71	14.14	4.41
	2/11/2022	2.00		35.00	45.00	40.00	45.50	42.76	6.32	0.45
	3/11/2022	3.00		36.00	45.00	40.00	45.50	42.62	6.28	0.45
	4/11/2022	4.00		34.60	100.00	107.00	109.00	101.64	15.03	0.70
	5/11/2022	5.00		35.60	100.00	107.00	109.00	101.50	14.97	0.70
	6/11/2022	6.00		34.60	164.00	130.00	122.50	138.83	20.54	3.27
	7/11/2022	7.00		34.70	119.00	129.00	137.00	120.50	17.82	1.33
	8/11/2022	8.00		33.80	74.50	83.00	82.00	77.31	11.47	0.69
	9/11/2022	9.00		34.30	91.00	83.50	97.00	89.32	13.22	1.00
	10/11/2022	10.00		35.90	109.50	114.50	109.00	108.35	15.96	0.45
	11/11/2022	11.00		35.90	117.00	119.00	114.00	114.53	16.87	0.37
	12/11/2022	12.00		35.90	139.50	134.00	132.00	133.40	19.65	0.57
	13/11/2022	13.00		36.00	45.00	136.00	138.00	104.79	15.43	7.82
	14/11/2022	14.00		35.30	119.00	121.00	135.50	122.73	18.11	1.33
	15/11/2022	15.00		35.80	30.00	13.50	80.00	39.84	5.87	5.10
	16/11/2022	16.00		35.80	63.00	94.00	97.00	83.56	12.31	2.77
	17/11/2022	17.00		35.60	110.00	126.00	136.00	122.53	18.07	1.93
	18/11/2022	18.00		36.60	110.00	126.00	136.00	122.38	17.99	1.93
	19/11/2022	19.00		37.60	110.00	126.00	136.00	122.24	17.91	1.92
	20/11/2022	20.00		35.60	214.00	150.00	206.50	189.80	27.98	5.16
	21/11/2022	21.00		35.30	153.00	250.00	277.50	226.83	33.48	9.65
	22/11/2022	22.00		35.60	343.00	12.50	329.50	228.26	33.65	27.58
	23/11/2022	23.00		35.70	302.00	314.00	375.50	330.50	48.71	5.81
	24/11/2022	24.00		35.70	6.00	253.50	409.00	222.83	32.84	29.96
	25/11/2022	25.00		35.70	466.50	493.50	523.50	494.50	72.89	4.20
	26/11/2022	26.00		35.70	324.00	406.00	373.50	367.83	54.22	6.09
	27/11/2022	27.00		35.70	193.00	279.50	271.00	246.51	36.33	7.03
	28/11/2022	28.00		35.70	110.00	152.50	141.50	134.22	19.78	3.25
	29/11/2022	29.00		35.70	77.50	100.50	90.00	89.33	13.17	1.70
	30/11/2022	30.00		35.00	87.00	89.00	80.00	85.33	12.61	0.70
	1/12/2022	31.00		35.40	82.50	86.00	87.50	85.19	12.57	0.38
	2/12/2022	32.00		35.20	79.00	83.00	99.50	87.17	12.87	1.60
	3/12/2022	33.00		35.00	108.00	103.00	121.50	110.39	16.31	1.41
	4/12/2022	34.00		35.00	119.00	131.00	165.00	137.59	20.33	3.52
	5/12/2022	35.00		35.20	110.00	168.00	177.00	150.85	22.27	5.37
	6/12/2022	36.00		35.00	111.50	149.00	138.50	132.26	19.54	2.86
	7/12/2022	37.00		30.00	84.50	103.00	68.50	85.33	12.81	2.59
	8/12/2022	38.00		35.20	110.00	78.50	65.50	84.67	12.50	3.38
	9/12/2022	39.00		35.90	88.00	44.00	44.50	58.83	8.67	3.72
	10/12/2022	40.00		35.10	43.50	40.50	42.50	42.17	6.23	0.23
	11/12/2022	41.00		34.90	41.00	43.00	41.00	41.67	6.16	0.17
	12/12/2022	42.00		34.90	40.50	41.00	38.00	39.83	5.89	0.24
	13/12/2022	43.00		35.30	33.00	40.00	34.00	35.67	5.26	0.56
	14/12/2022	44.00		35.20	18.00	25.50	24.00	22.50	3.32	0.59
	15/12/2022	45.00		35.00	15.00	24.00	23.00	20.67	3.05	0.73

ตารางผนวกที่ 3 ตัวอย่างตารางบันทึกผลการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่อง

วันที่	วัน	เวลา	อุณหภูมิ	Biogas Volume											
				เข้า		ออก		ความสูง (cm)		ปริมาตร (mL)			rb	ry	avg
				ml	ml	rb	ry	rb	ry	Avg	Avg/gCOD				
0	10/5/2023	17:00	33.9	181	181	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	11/5/2023	18:00	34	181	181	3	3	461.81	461.81	461.81	17713.42	461.81	461.81	461.81	
2	12/5/2023	19:00	33.3	181	181	4.4	5.2	677.33	800.48	738.90	28556.62	1139.14	1262.29	1200.72	
3	13/5/2023	18:38	34	181	181	4.2	5	646.54	769.69	708.11	44257.19	1785.68	2031.98	1908.83	
4	14/5/2023	19:00	34	181	181	4	4	615.75	615.75	615.75	30407.51	2401.43	2647.73	2524.58	
5	15/5/2023	19:00	34	181	181	4.3	4.5	661.93	692.72	677.33	37629.30	3063.37	3340.46	3201.91	
6	16/5/2023	19:00	34	181	181	4	4.3	615.75	661.93	638.84	37034.37	3679.12	4002.39	3840.75	
7	17/5/2023	19:00	34	181	181	4.4	4.5	677.33	692.72	685.02	41516.62	4356.45	4695.11	4525.78	
8	18/5/2023	17:30	34	181	181	5.1	4.3	785.08	661.93	723.51	29791.54	5141.53	5357.04	5249.29	
9	19/5/2023	17:30	34	181	181	5	4	769.69	615.75	692.72	45107.43	5911.22	5972.80	5942.01	
10	20/5/2023	17:30	34	181	181	5.1	4.2	785.08	646.54	715.81	29474.61	6696.30	6619.34	6657.82	
11	21/5/2023	17:30	35	181	181	7.2	7.5	1108.35	1154.54	1131.44	72001.02	7804.66	7773.87	7789.26	
12	22/5/2023	18:00	35	181	181	7.3	7.5	1123.75	1154.54	1139.14	72490.82	8928.41	8928.41	8928.41	
13	23/5/2023	19:00	35	181	181	7.8	7.7	1200.72	1185.32	1193.02	75919.44	10129.12	10113.73	10121.43	
14	24/5/2023	19:00	35	181	181	7.5	7.5	1154.54	1154.54	1154.54	71471.23	11283.66	11268.26	11275.96	
15	25/5/2023	19:00	35	181	181	7	6.3	1077.57	969.81	1023.69	63371.16	12361.22	12238.07	12299.65	
16	26/5/2023	19:00	35	181	181	7	6.6	1077.57	1015.99	1046.78	43266.85	13438.79	13254.07	13346.43	
17	27/5/2023	19:00	35	181	181	7	7.5	1077.57	1154.54	1116.05	46130.10	14516.36	14408.60	14462.48	
18	28/5/2023	19:00	35	181	181	7	7.7	1077.57	1185.32	1131.44	46766.38	15593.92	15593.92	15593.92	
19	29/5/2023	19:00	35	181	181	7	7.5	1077.57	1154.54	1116.05	60452.75	16671.49	16748.46	16709.97	
20	30/5/2023	19:00	35	181	181	7	6.3	1077.57	969.81	1023.69	38573.75	17749.06	17718.27	17733.66	
21	31/5/2023	19:00	35	181	181	7	7	1077.57	1077.57	1077.57	#DIV/0!	18826.62	18795.83	18,811.23	



ภาคผนวก ค
การเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ

บทความวิชาการที่ 1

ชื่อผู้แต่ง: Preeya Kritthiraput
Kittikorn Sasujit
Pakamon Pintana
Chayanon Sawatdeenarunat
Wongphan Promwong
Rotjapun Nirunsin

ชื่อบทความ: Biogas Production Potential from Black Soldier Fly Larvae Washing Process Wastewater

ชื่อการประชุมวิชาการ: The 34th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology and International Conference “Sustainable Bioeconomy : Challenge and Opportunities” (TSB2022)

ชื่อหน่วยงานที่จัดประชุม: Thai Society for Biotechnology

สถานที่จัดประชุม: Ambassador Hotel Bangkok, Thailand

วันที่จัดประชุม: November 24-25, 2022

หน้าที่ตีพิมพ์: 193 – 204



CERTIFICATE OF PARTICIPATION



for

PREEYA KRITTHIRAPUT

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

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

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

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



**Thai Society for Biotechnology
International Conference**

“Sustainable Bioeconomy : Challenge and Opportunities”

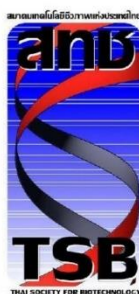
November 24–25, 2022, Ambassador Hotel Bangkok, Thailand

i



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

Organized by



Thai Society for Biotechnology



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

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



AOAC International Thailand Section



EXECUTIVE COMMITTEE:

Chairperson:

Prof. Dr. Penjit Srinophakun Department of Chemical Engineering,
Kasetsart University, Thailand

Conference Chair:

Asst. Prof. Dr. Niyom Kamlangdee Head, Department of Microbiology,
Faculty of Science, King Mongkut’s
University of Technology Thonburi,
Thailand

International Organizing Committee:

Prof. Dr. Kohsuke Honda International Center for Biotechnology
(ICBiotech), Osaka University, Japan

Prof. Ts. Dr. Suraini Abd-Aziz Faculty of Biotechnology &
Biomolecular Sciences, Universiti
Putra Malaysia, Malaysia

Prof. Dr. Yu-Kaung Chang Department of Chemical Engineering,
Graduate School of Biochemical
Engineering,
Ming Chi University of Technology,
Taiwan

Local Organizing Committee:

Asst. Prof. Dr. Niyom Kamlangdee Department of Microbiology, Faculty
of Science, King Mongkut’s University
of Technology Thonburi, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Worapot Suntornsuk Department of Microbiology, Faculty
of Science, King Mongkut’s University
of Technology Thonburi, Thailand

Assoc. Prof. Dr. Pawinee Chaiprasert School of Bioresources and
Technology, King Mongkut’s
University of Technology Thonburi,
Thailand

Asst. Prof. Dr. Triwit Rattanarojpong Department of Microbiology, Faculty
of Science, King Mongkut’s University
of Technology Thonburi, Thailand

Asst. Prof. Dr. Sivawan Phoolphundh Department of Microbiology, Faculty
of Science, King Mongkut’s University
of Technology Thonburi, Thailand



Dr. Sukanya Phuengjayaem	Department of Microbiology, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand
Advisory Committee:	
Asst. Prof. Dr. Mayuree Hansupanusorn	Acting Dean, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand
Assoc. Prof. Dr. Varit Srilaong	Dean, School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand
Prof. Dr. Penjit Srinophakun	Department of Chemical Engineering, Kasetsart University, Thailand
Prof. Dr. Morakot Tanticharoen	King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand
Prof. Dr. Watanalai Panbangred	Research, Innovation and Partnerships Office, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand
Assoc. Prof. Boosya Bunnag	School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand

SCIENTIFIC COMMITTEE:

Chairperson:

Asst. Prof. Dr. Pongsak Khunrare King Mongkut’s University of Technology Thonburi

Secretariat:

Dr. Jirayut Euanorasetr King Mongkut’s University of Technology Thonburi

International Scientific Committee

Dr. Dian Siswanto Brawijaya University, Indonesia
 Dr. Mylene Anwar Central Mindanao University, Philippines

Local Scientific Committee

Asst. Prof. Dr. Kanyarat Lueangprasert Burapha University
 Asst. Prof. Dr. Kraiyot Sae-lim Burapha University
 Dr. Engkarat Kingkaew Chulalongkorn University
 Asst. Prof. Dr. Noraphat Hwanhlem Naresuan University
 Asst. Prof. Dr. Anongpat Suttangkakul Kasetsart university
 Asst. Prof. Dr. Sompid Samipak Kasetsart university
 Dr. Orachorn Mekkerdchoo King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Dr. Patrrarat Teamkao King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 Assoc. Prof. Dr. Chairat Treesubsuntorn King Mongkut’s University of Technology Thonburi
 Assoc. Prof. Dr. Nitnipa Soontorngun King Mongkut’s University of Technology Thonburi
 Asst. Prof. Dr. Kanthida Kusunmano King Mongkut’s University of Technology Thonburi
 Assoc. Prof. Dr. Punchira Vongsawasdi King Mongkut’s University of Technology Thonburi
 Assoc. Prof. Dr. Songsin King Mongkut’s University of Technology Thonburi
 Photchanachai King Mongkut’s University of Technology Thonburi
 Assoc. Prof. Dr. Worapot Suntornsuk King Mongkut’s University of Technology Thonburi
 Asst. Prof. Dr. Kanokwan Poomputsa King Mongkut’s University of Technology Thonburi
 Asst. Prof. Dr. Marasri King Mongkut’s University of Technology Thonburi
 Ruengjitchatchawalya King Mongkut’s University of Technology Thonburi
 Asst. Prof. Dr. Paripok Phitsuwan King Mongkut’s University of Technology Thonburi
 Asst. Prof. Dr. Rarisara Impaprasert King Mongkut’s University of Technology Thonburi



Asst. Prof. Dr. Rujira Dolphen	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Sivawan Phoolphundh	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Sukon Tantipaibulvut	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Teeraphan Laomettachit	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Weerayuth Kittichotirat	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Wittaya Kaonongbua	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Dr. Arnon Setsungnern	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Dr. Jiraporn Jirakkul	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Dr. Jirayut Euanorasetr	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Dr. Lakha Kingkaew	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Dr. Lakha Salaipeth	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Dr. Prit Khrisanapant	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Dr. Piyatida Kittpornkul	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Dr. Sarawut Cheunkar	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Dr. Saengchai Akeprathumchai	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Dr. Songsirin Ruengvisesh	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Dr. Sukanya Phuengjayaem	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Dr. Yaowaluck Maprang Roshom	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Dr. Yordkhuan Tachapermpon	King Mongkut’s University of Technology Thonburi
Asst. Prof. Dr. Siam Popluechai	Mae Fah Luang University
Assoc. Prof. Dr. Woranan Nakbanpote	Maharakham University
Asst. Prof. Dr. Bungonsiri Intra	Mahidol University
Prof. Dr. Leena Suntornsuk	Mahidol University



Asst. Prof. Dr. Parinda Thayanukul	Mahidol University
Asst. Prof. Dr. Phurt Harnvoravongchai	Mahidol University
Asst. Prof. Dr. Puey Ounjai	Mahidol University
Asst. Prof. Dr. Pagakrong Wanapaisan	Mahidol University
Dr. Pasara Vijitvarasarn	Mahidol University
Dr. Panida Paopradit	Princess of Naradhiwas University
Dr. Santat Sinjaroonsak	Princess of Naradhiwas University
Asst. Prof. Dr. Pochanart Kanjan	Prince of Songkla University
Prof. Jarungwit Boonnorat	Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Dr. Jirawan Torit	Srinakharinwirot University
Dr. Thunyaboon Arunyanart	KCG Corporation Co., Ltd
Dr. Kittisak Lakaew	National Science and Technology Development Agency
Dr. Sukunya Oaew	National Science and Technology Development Agency
Dr. Sakchai Laksee	Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization)

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

IBO19

Biogas Production Potential from Black Soldier Fly Larvae Washing Process Wastewater

Preeva Kritthiraput¹, Kittikorn Sasujit¹, Pakamon Pintana¹, Chayanon Sawatdeenarunat², Wongphan Promwong³, Rotjapun Nirunsin^{1*}

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

²Asian Development College for Community Economy and Technology, Chiang Mai Rajabhat University Chiang Mai 50300, Thailand ³Department of Plant Protection, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand

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

ABSTRACT

The Black Soldier Fly Larvae (BSFL) processing could produce large amounts of wastewater in the washing process. This wastewater contains high amounts of organic matter and is a type of nutrient source for anaerobic digestion. This research aims to study biogas production potential of wastewater from the BSFL washing process fed by soybean meal. This was digested with the sludge inoculum of a pig farm's biogas system. The three feedstock and inoculum ratios (based on VS) were 3:1, 1:1, 1:3, and blank of inoculum. The result shown, the optimum ratio was 3:1. The COD removal was 50.80%. The cumulative biogas volume was 1,122.57 mL with 47.10% of the maximum methane content for 15 days. The result of 1:1 and 1:3 ratios was related to the amount of substrate. The soybean meal wastewater from the BSFL washing process has a biogas production potential because it has a nutrient for methanogen bacteria but needs to be studied on a larger scale.

Keywords: Biogas production, Black soldier fly larvae, Fermented pig manure, Washing process, Wastewater.

INTRODUCTION

The Black Soldier Fly Larvae (BSFL) is the embryonic stage of the Black Soldier Fly (BSF) (*Hermetia illucens*) that can be processed into a



protein source for animal feed or food. This BSFL processing is expanding at an exponential rate because it can easily breed a large number of species in a short period of time (Castro-Lopez et al., 2020). Diets for BSFL 's breeding are separated by water content in 2 types. The diets have water content below 80% such as vegetable waste, food waste, and fruit waste. And, the diets have more than 80% water content such as soybean meal (Dortmans et al., 2017). The BSFL production cost is lower than other than animal feed proteins. Dried BSFL production cost was around 14.16 THB/kg. Other proteins in animal feed cost 16-35 THB/kg. Average cost of imported soybean meal with protein 46-48% are 16.70 THB/kg. This data was reported by The Bureau of Animal Nutrition Development, fish meal 25-35 THB/kg (DIT, 2018).

The processing of adult BSFL larvae from the different diets has different processes. Adult larvae harvesting need to separate a mix of diet and larvae. The diets with less water content separated by sifting, but the diets with more water content separated by soaking or washing (Dortmans et al., 2017). The washing process in the local farm makes a large amount of wastewater around 10-50 L/kg larvae. Therefore, this industry needs wastewater treatment. Typically, the anaerobic digestion or biogas production is used for wastewater treatments (Wang et al., 2021). The biogas is produced by microorganisms that it transforms organic matter to biogas and digested byproduct. The biogas production processes are consisted of hydrolysis, acidogenesis or acetogenesis and methanogenesis that will be efficient for treating industrial wastewater and will get higher biogas production. Because, wastewater from the soybean processing has a high chemical oxygen demand in generally 7.5-20 g/L and pH value is 5.4-6.6 (Wang and Serventi, 2019).

In related studies, many researchers studied biogas production from wastewater or waste from insect breeding Piotr et al. (2020) studied the CH₄ production potential of insects breeding post production waste from *H. illucens*, *Tenebrio molitor*, and *Gryllus spp.* The experiment was to control the temperature under 37 °C and pH was 7.0. The substrate and the digestate from the biogas plant inoculum ratio was 1:2. The physiochemical of waste from *H. illucens* has 85.21% VS, 84% TS and 16.19% crude proteins. The biomethane potential of waste from *H. illucens* was 177 mL/g TS. Latifi et al. (2019) were interested in the co-digestion of poultry slaughterhouse wastes and sewage sludge in the different inoculum-substrate ratios (ISR); 1, 2 and 4, different total solids (TS); 5% and 7%, and different hydraulic retention time (HRT). The result showed that the biogas volume and CH₄ content were directly proportional to the inoculum ratio. The biogas volume produces more than 5.8-34 times of effective volume, and CH₄ content was around 22-79%.

Wagiman et al. (2020) studied biogas production from tofu waste in the tofu industry by a 2 L laboratory scale. The co-feeding can produce biogas up to 97.95 mL/day. Araujo et al. (2017) were interested in biogas production and potential to generate energy from residue of soybean processing and sludge from UASB reactors in the food industry. The digestion ratio of 2:1 was based on volatile solid (VS). The biogas production of soybean residue substrate was stationary for around 25 days, and biogas produced 421.40 NmL/gVS.

So, this research is interested in the study biogas production of wastewater from the washing process of BSFL fed with soybean meal (SW) and digestion in different ratios with sludge inoculum from biogas system in pig farm (PM).

MATERIAL AND METHODS

Feedstock and inoculum

A feedstock was collected from the BSF farm in Thailand. The feedstock was wastewater from the larvae washing process namely SW shown in Figure 1A. The water used for washing was around 10 L/kg of BSFL. The BSFL was fed by soybean meal. The feedstock was collected and stored at a temperature below 4 °C. An inoculum was sludge from a biogas system in a pig farm. Figure 1B showed the inoculum was digested in anaerobic digestion 7 days ago before digestion with the feedstock (Yoon et al., 2014).



A. Wastewater from washing process B. Sludge from pig farm's biogas system

Figure 1. A. Wastewater from washing process and, B. Sludge from a pig farm's biogas system



Experimental set-up

The experiment studied the feedstock's biomethane potential in batch condition following VDI 4630 standard (VDI 4630, 2006). The working volume was 400 mL. The experiment studies were prepared by mixing feedstock, inoculum and nutrients in 3 ratios with triplicate. And then, adjusted the pH value to be 6.8-7.0 before closing the bottles and flushing nitrogen gas (Yoon et al., 2014). The bottles were stored in the water bath shown in figure 2. The temperature control system used aquarium heaters 500 W with water pumps to control the mesophilic temperature between 35 ± 2 °C. There were installed three digital thermometers. The 3 points were one on each side, top, and middle of the water bath and were used to measure the temperature. The feedstock and the inoculum were digested in different ratios based on VS. The ratios between SW and PM inoculum were 3:1, 1:1, and 1:3. Blanks of feedstock and inoculum were prepared 100% of BSFL washing process wastewater and sludge from the biogas system in a pig farm.

Analytical methods

The analytical parameters of COD, TS, VS, Volatile Fatty Acid (VFA), Alkalinity (ALK), Potential of Hydrogen ion (pH) were determined according to Standard Methods (APHA, 2005). The parameters were analyzed inlet of the feedstock with inoculum and outlet from batch bottles (Min-Jee and Sang-Hun, 2020). The biogas volume was collected every day until the cumulative biogas production was stable. Biogas contents such as CH₄, CO₂, and H₂S were detected by biogas analyzer GFM 406 series (Gas Data, United Kingdom).

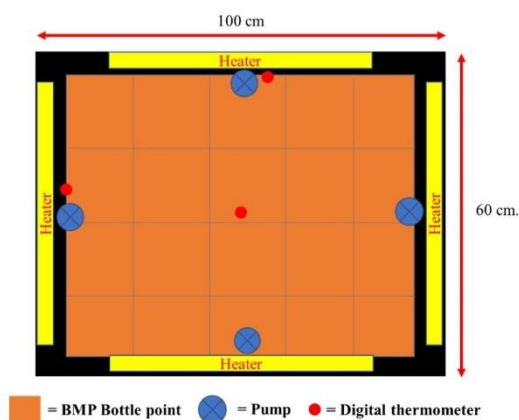


Figure 2. Temperature control system setting

RESULTS

Characteristic of feedstock and inoculum

The characteristic of the feedstock and the inoculum shown in Table 1. The SW was mixing of washing water and digested soybean meal from BSFL activity. It was brown color and it had sedimentary. The COD and VS of SW were 18,461.54 mg/L and 176,640.93 mgVS/L respectively. The pH value was 5.71 and the ratio of VFA and ALK was around 1.98-2.88. The physical characteristic of PM was black mud. The physiochemical characteristics of PM contained good properties, namely the pH at 7.23, COD at 17,692.31 mg/L, VS at 116,449.51 mg VS/L, and VFA/ALK at 0.42.


Table 1. Characteristics of wastewater, the feedstocks, and the inoculum

Parameters	PM	SW	S/I ratio		
			3:1	1:1	1:3
COD (mg/L)	89,142.86	68,571.43	25,789.47	29,793.10	27,894.74
TS (mg/L)	119,706.84	155,405.41	72,781.66	23,923.44	6,982.16
VS (mg/L)	116,449.51	176,640.93	71,784.65	12,303.49	6,756.08
VFA/ALK	0.42	1.98	1.75	0.33	1.40
COD removal (%)			50.80	40.12	34.07
TS removal (%)			75.83	63.99	57.59
VS removal (%)			70.19	52.13	50.21
VFA/ALK			0.54	0.69	0.71
pH	7.87	6.40	6.99*/6.95**	7.02*/7.14**	6.97*/7.10**

PM: sludge from biogas system in pig farm.

SW: wastewater from washing process of BSFL fed with soybean meal.

*: influent

** : effluent

Daily biogas production

The hydraulic retention time (HRT) of this study was around 30 days. The daily biogas production was shown in figure 3. The SW and fermented pig manure were mixed together in 1:3, 1:1, and 3:1 ratios. The 1:1 ratio produced more biogas than other ratios on the first and second days. The 1:1 ratio produced around 84 mL. While the 3:1 and 1:3 ratios produced about 32.50 mL and 19.33 mL, respectively. The highest biogas production of 1:1 and 1:3 ratios were on the 2nd day. But, the 3:1 ratio was on the 3rd day. The biogas volume of 3:1, 1:1, and 1:3 ratios were 163.00, 83.00, and 19.33 mL, respectively. The biogas volume contained CO₂ was more than 5-10 times of CH₄. Then, the biogas volume of all were gradually decrease. But, The biogas volume of 3:1 ratio was increase once again on the 6th day. It produced the maximum biogas volume 148.50 mL before decreasing on the 9th day.

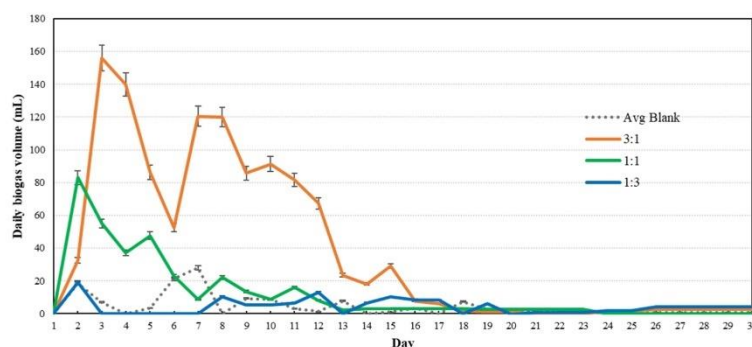


Figure 3. The daily biogas production

Cumulative biogas production and biogas contents

Results of this study showed in figure 4. The cumulative biogas productions of various ratios were related to the inoculum ratio. The average maximum biogas production of the inoculum blank was 127.83 mL. The ratios of 1:3, 1:1, and 3:1 produced 101.33 mL, 353.17 mL and 1,122.57 mL, respectively. The biogas components consisted of CH₄, CO₂, and H₂S. The maximum of CH₄, CO₂, and H₂S were shown in figure 5. In 7 days, the 3:1 ratio obtained 39.20% CH₄, 21.50% CO₂ and 910 ppm H₂S. In 15 days, the CH₄ content increased to 47.10% CH₄, 21.50% CO₂ and 620 ppm H₂S. The maximum CH₄ content of the 1:1 was 20.50% CH₄ with 10.20% CO₂ and 320 ppm H₂S for 15 days. The maximum CH₄, CO₂, and H₂S content were 7.90% CH₄, 5.40% CO₂, and 240 ppm H₂S, respectively, in 1:3 ratio.

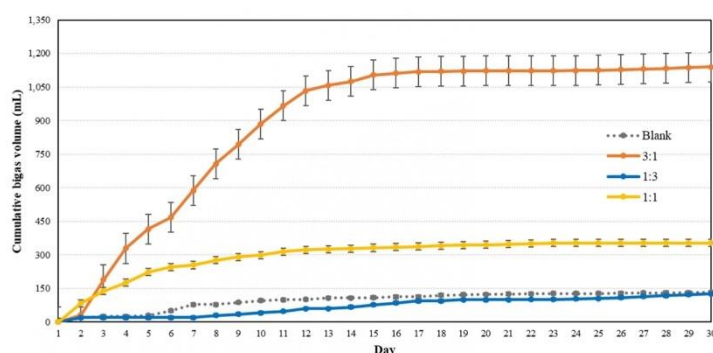


Figure 4. The cumulative biogas production

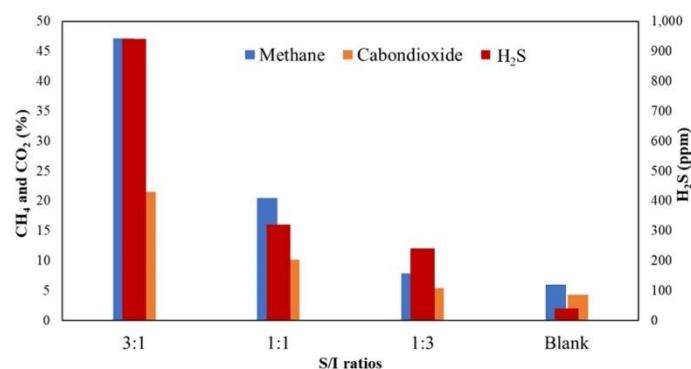


Figure 5. Maximum CH₄, CO₂, and H₂S contents

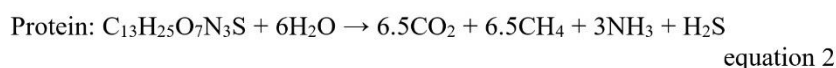
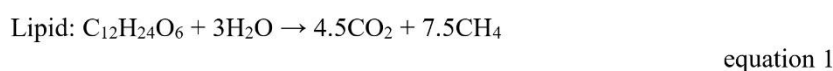
The efficiency of biogas production

All of the parameters were related to the biogas production. The 3:1 ratio was the most efficient biogas production. The result of the parameter analysis was shown in table 1. The COD removal of blank, 3:1, 1:1 and 1:3 ratios were 31.26%, 50.80%, 40.12%, and 34.07%. The VFA/ALK outlet ratios were 0.71, 0.54, 0.69 and 0.71. The parameter was related to balance pH value effluent of 6.97-7.14. The TS removal of 3:1, 1:1, and 1:3 ratios were 75.83%, 63.99%, and 57.59%, respectively. And, the VS removal of 3:1, 1:1, and 1:3 ratios were 70.19%, 52.13%, and 50.21%.

DISCUSSION

The SW was the high potential substrate of biogas production because it had much of organic matter to be a nutrient for methanogenesis. The COD and VS were 68,571.43 mg/L and 176,640.93 mg/L, respectively, which indicated that this wastewater was suitable for biogas production. In addition, BSFL activity produced and discharged digestive enzymes to transform the soybean meal feed into soluble and liquefied form that seem to be chemical, mechanical or thermal pretreatment of anaerobic process (Shwe et al., 2018). In the initial, the pH value of wastewater was too acidic and the ratio of VFA to ALK was over the standard for the biogas system (Pilarska et al., 2019). Then, wastewater was fermented with the efficient inoculum, enhanced the possibility of producing biogas. The result show, proper ratio between SW and PM was 3:1 and this result was the major reason to support, SW was the high

substrate potential to produce methane in biogas production. Because, this ratio used in at least inoculum amount. In addition, the characteristics of the SW wastewater in BSFL washing process were related to the BSFL diet. In this study, The BSFL fed by soybean meal. Most soybean meal contains 44-49% protein and 30% fat (DIT, 2018). From equation 1 and 2, One molecule of fatty acids and amino acids can be converted to CH₄ up to 7.5 times and 6.5 times, respectively (Pilarska et al., 2019). There is a high ratio of SMW with high protein composition. Proteins are made up of many amino acids; there are four major elements in each amino acid molecule (hydrogen, oxygen, carbon and nitrogen). Fats was degraded to long chain fatty acid (LCFA) (Menzel et al., 2020), and protein was degraded to many types of amino acid by breaking the peptide bond, ionic bond, hydrogen bond, and sulfide bond.



The first stage of the biogas production is hydrolysis process of all ratios. The organic matters in the substrate digested by the inoculum to small molecules. Then, the biogas production was increased exponentially in the acidogenesis or acetogenesis process because amino acid and LCFA were transformed into acetic acid and CO₂ as by-products. The acetic acid was transformed by methanogen bacteria for CH₄ production (Kushkevych et al., 2017). The 1st to the 7th day, all of ratios contained CO₂ more than CH₄ with other gases. The 3:1 ratio of SW and inoculum was different from another ratio (Zhou et al., 2011). The CH₄ content of 3:1 ratio increased from 22% (the 11th day) to 47.10% (the 15th day) in 3 days. The biogas volume and CH₄ content in 1:1 and 1:3 ratio produced less than the 3:1 ratio. So, the high biogas production as a result of substrate potential. It was the appropriate condition. It was verified that too much inoculum was unsuitable for biogas production. When the ratio of inoculum and the substrate was used in the proper ratio, it led to efficiency of biogas production (Zhou et al., 2011). However, the large-scale biogas system for BSFL washing process was required to concern H₂S concentrations. High H₂S concentrations in the system may be more than 620 ppm and can lead to death while inhaling for a short time. If this biogas is used in the engines such as boilers or gasifiers, this gas could damage the engines



(Tian et al., 2020). The sulfate reducing bacteria (SRB) could be the solution of decreasing H₂S during the biogas production (Gopi Kiran et al., 2017).

CONCLUSION

The soybean meal wastewater from BSFL washing process has a biogas production potential COD around 18,461.57 mg/L. It is suitable for an anaerobic process to produce CH₄, and the appropriate ratio. When mixed with the sludge of the biogas system in the pig farm, it is 3:1. The potential biogas of this ratio shown as the COD removal was 50.80%. Significantly, biogas production can produce the maximum biogas volume of 1,122.57 mL and increase the CH₄ to 47.10% in only 15 days out of HRT 30 days. Therefore, in the future, researchers who want to develop the experiment should study it on a pilot scale with semi-continuous or continuous feeding to simulate real situations of biogas production on factory scale.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research is supported by scholarship for manufacture and develop graduate potential in renewable energy in ASEAN at graduate level of School of Renewable Energy and scholarship from Maejo University alumni at Maejo University. Thank you to advisor and co-advisers for their comments to improve the paper. And thank you to everyone in the Bio-Fuel Lab, as well as friends and family for all support.

REFERENCES

- American Public Health Association (APHA). 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington DC: American Public Health Association.
- Araujo, V. K., de Almeida, S., de Oliveira, S. B., Calixto, W. P., Furriel, G. P., and Barbosa, D. P. 2017. Anaerobic digestion using residue of soybean processing: Biogas production and it is potential to generate energy 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). 1-4.

- Castro-Lopez, C., Santiago-Lopez, L., Vallejo-Cordoba, B., Gonzalez-Cordova, A. F., Liceaga, A. M., Garcia, H. S., and Hernandez-Mendoza, A. 2020. An insight to fermented edible insects: A global perspective and prospective. *Food Research International*. 137: 109750.
- Department of Internal Trade (DIT). 2018. Oil crops and animal feed materials. <https://agri.dit.go.th/index.php/home>
- Dortmans, B., Diener, S., Verstappen, B., and Zurbrügg, C. 2017. Black Soldier Fly Biowaste Processing. Black soldier fly biowaste processing. A step-by step guide. Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC) and the Swiss State Secretariat for Economic Affairs (SECO). Eawag – Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology Department.
- Gopi Kiran, M., Pakshirajan, K., and Das, G. 2017. An overview of sulfidogenic biological reactors for the simultaneous treatment of sulfate and heavy metal rich wastewater. *Chemical Engineering Science* 158. 606-620.
- Goswami, R., Chattopadhyay, P., Shome, A., Banerjee, S.N., Chakraborty, A.K., Mathew, A.K., and Chaudhury, S. 2016. An overview of physico-chemical mechanisms of biogas production by microbial communities: A step towards sustainable waste management. *Biotechnology* 6.
- Kushkevych, I., Vítězová, M., Vítěz, T., and Bartoš, M. 2017. Production of biogas: Relationship between methanogenic and sulfate-reducing microorganisms. *Open Life Sciences*. 12: 82–91.
- 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). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 107. 288–296.
- Menzel, T., Neubauer, P., and Junne, S. 2020. Role of microbial hydrolysis in anaerobic digestion. *Energies* 13.
- Min-Jee, K., Sang-Hun, K. 2020. Conditions of lag-phase reduction during anaerobic digestion of protein for high-efficiency biogas production, *Biomass and Bioenergy* 143. 105813.



- Pilarska, A.A., Pilarski, K., Wolna-Maruwka, A., Boniecki, P., and Zaborowicz, M. 2019. Use of confectionery waste in biogas production by the anaerobic digestion process. *Molecules* 24.
- Piotr, B., Kinga, P., Małgorzata, P., Agnieszka, K., Wojciech, B., and Andrzej, B. 2020. Biogas generation from insects breeding post production wastes, *Journal of Cleaner Production*. 244: 118777.
- Shwe, S.W., Jacqueline, H.E., Sarah, A.B., Susan, S.P., Pedro, Cruz-D., and Thomas, A.T., 2018. Anaerobic digestion of black soldier fly larvae (BSFL) biomass as part of an integrated biorefinery, *Renewable Energy*. 127: 705-712.
- Somsila, P., Teeboonma U., and Khabuanchalad S. 2021. A Two-Stage Anaerobic Digester of Pig Manure and Food Waste for Biogas Production with Heat Exchanger. *ENGINEERING JOURNAL*. 25(10): 123-132.
- Tian, G., Xi, J., Yeung, M., and Ren, G. 2020. Characteristics and mechanisms of H₂S production in anaerobic digestion of food waste. *Science of the Total Environment* 724.
- VDI 4630. 2006. Fermentation of organic materials-characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests, VDI Guideline 4630. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.
- Wagiman, W., Ardaniswari, I.R., and Nugravianto, W.P. 2020. Biogas Production from Tofu Waste to Improve the Environmental Performance of Tofu Industry. *Agroindustrial Journal*. 7(1): 459-462.
- Wang, S., Liu, Q., Li, J., and Wang, Z. 2021. Methane in wastewater treatment plants: status, characteristics, and bioconversion feasibility by methane oxidizing bacteria for high value-added chemicals production and wastewater treatment. *Water Research* 198.
- Wang, Y., and Serventi, L. 2019. Sustainability of dairy and soy processing: A review on wastewater recycling. *Journal of Cleaner Production* 237.
- Yoon, Y.M., Kim, S.H., Shin, K.S., and Kim, C.H. 2014. Effects of substrate to inoculum ratio on the biochemical methane potential of piggery slaughterhouse wastes. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 27: 600-607.
- Zhou, Y., Zhang, Z., Nakamoto, T., Li, Y., Yang, Y., Utsumi, M., and 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. 3251-3256.

บทความวิชาการที่ 2

ชื่อผู้แต่ง: ปรียา กฤตกรพุทธิ
กิตติกร สาสุจิตต์
ภคมน ปินตانا
ชยานนท์ สวัสดิ์นฤนาท
วงศ์พันธ์ พรหมวงศ์
รจพรรณ นิรัญศิลป์

ชื่อบทความ: ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา

ชื่อวารสาร: วิศวกรรมลาดกระบัง

ปีที่พิมพ์: 40

ฉบับที่: 3

หน้าที่ตีพิมพ์:





วันที่ 10 สิงหาคม 2566

เลขที่อ้างอิง 251756

เรื่อง ตอบรับตีพิมพ์บทความ

เรียน คุณปรียา กฤตดิรพุทธิ คุณกิตติกร สาสุจิตต์ คุณภคมน ปินตานา คุณชยานนท์ สวัสดิ์สินธุนาท
 คุณวงศ์พันธ์ พรหมวงศ์ และ คุณจรจพรณ นิรัฐศิลป์

ตามที่ท่านได้ส่งบทความเรื่อง “ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวัน
 ลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วอินคา” (The Biochemical Methane Potential from Washing Process
 Wastewater in Black Soldier Fly Larvae Breeding by Inca Peanut Meal) บัดนี้ ผู้ทรงคุณวุฒิได้ทำการ
 พิจารณาแล้ว เห็นว่า ยอมรับตีพิมพ์ได้ โดยจะตีพิมพ์ในปีที่ 40 ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน 2566

จึงเรียนมาเพื่อทราบ

ขอแสดงความนับถือ

(ศาสตราจารย์ ดร.อูมา สิบบุญเรือง)
 หัวหน้ากองบรรณาธิการ

หมายเหตุ :

วิศวกรรมลาดกระบังเป็นวารสารวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ผ่านการรับรองคุณภาพของศูนย์ดัชนีการ
 อ้างอิงวารสารไทย (Thai-Journal Citation Index (TCI) Centre) และอยู่ในฐานข้อมูลของ TCI เพื่อเป็นการ
 เผยแพร่บทความวิศวกรรมลาดกระบังให้เป็นที่รู้จักและยอมรับในวงการวิชาการมากขึ้นทางวารสารจึงขอความ
 อนุเคราะห์ท่านเจ้าของบทความโปรดพิจารณาการอ้างอิงบทความมายังวิศวกรรมลาดกระบังในอนาคตต่อไป โดยท่าน
 สามารถดาวน์โหลดบทความวิศวกรรมลาดกระบังย้อนหลังได้ที่ <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/lej>

ISSN 2985-1688 (Online)



ENGINEERING and TECHNOLOGY HORIZONS

Vol. 40 No. 3
July-September 2023



SCHOOL OF ENGINEERING KMITL **GLOBAL ENGINEER**

School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียในกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วย กากถั่วดาวอินคา

The Biochemical Methane Potential from Washing Process Wastewater in Black Soldier Fly Larvae Breeding by Inca Peanut Meal

ปริษา กฤทธิรพุทธิ¹, กิตติกร สาสุจิตต์¹, ปกมณ ปินตนา¹, ชยานนท์ สวัสดิ์สินธุนาท², วงศ์พันธ์ พรหมวงศ์ และ รจพรธมน
นิรัญศีลป^{1*}

¹วิศวกรรมพลังงานทดแทน, วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้ หนองหาร สันทราย เชียงใหม่ 50290
²วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย, มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ จีฬเหล็ก แมริม เชียงใหม่ 50180
³คณะผลิตกรรมการเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้ หนองหาร สันทราย เชียงใหม่ 50290

Preeya Kritthiraput¹, Kittikorn Sasujit¹, Pakamon Pintana¹, Chayanon Sawatdeenarunat², Wongphan Promwong³ and
Rotjapun Nirunsin^{1*}

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

²Asian Development College for Community Economy and Technology, Chiang Mai Rajabhat University,
Chiang Mai, 50300, Thailand

³Department of Plant Protection, Faculty of Agricultural Production, Maejo University,
Chiang Mai, 50290, Thailand

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

Received: Mar 03, 2023; Revised: Jul 06, 2023; Accepted: Aug 10, 2023

บทคัดย่อ

การแปรรูปหนอนแมลงวันลายเพื่อเป็นโปรตีนอาหารสัตว์คุณภาพสูงกำลังได้รับการสนับสนุนให้เป็นการแปรรูปในระดับอุตสาหกรรมของประเทศไทย แต่เนื่องจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายมีน้ำเสียที่ต้องได้รับการบำบัด ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียในกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา กับหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร ในอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยกรรมของแข็งระเหย และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงมีไซฟิกลิส $35 \pm 2^{\circ}\text{C}$ โดยผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดคืออัตราส่วน 1:1 ระยะเวลาการหมัก 45 days มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมากที่สุด โดยมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ $401.51 \pm 24.42 \text{ NmL/gVS}_{\text{add}}$ ที่สัดส่วนมีเทนสูงสุด 67.90% ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปของแข็งระเหยสูงสุดเท่ากับ 23.76% และประสิทธิภาพการกำจัด COD 68.51% ซึ่งแสดงให้เห็นศักยภาพของน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่สามารถเป็นวัตถุดิบในการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของพลังงานทดแทนด้วยการผลิตก๊าซชีวภาพและสามารถนำไปขยายผลในระดับอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน, น้ำเสีย, กากถั่วดาวอินคา, หนอนแมลงวันลาย

Abstract

The processing of Black Soldier Fly Larvae (BSFL) for high-quality animal feed protein is being promoted to transformation at the industry level in Thailand. This is due to the fact that the washing process of BSFL generates wastewater with high organic matter that must be treated. This research was interested in studying the potential of methane production from wastewater in the BSFL washing process that is fed by Inca meal and mixed with inoculum sludge from a swine biogas production system at different substrate and inoculum ratio of 3:1, 1:1 and 1:3 by gVS_{add}. The system also controlled the temperature within the mesophilic condition at 35 ± 2°C. The result of this study shows that the optimum ratio which the most biochemical methane potential (BMP) was 1:1 on 45 days of fermentation period. This optimum ratio can also generate the cumulative methane gas production of 401.51 ± 24.42 Nml/gVS_{add} with the highest methane content of 67.90%. The VS removal was 23.76% and the COD removal was 68.51%, which shows the BSFL washing process wastewater can be a substrate for biogas production and further expanded to the industry level.

Keywords: Methane production potential, Wastewater, Inca peanut residue, *Hermitia illucens L.*

1. บทนำ

การส่งเสริมอุตสาหกรรมแปรรูปหนอนแมลงวันลายเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนอาหารสัตว์คุณภาพสูงกำลังเป็นที่นิยมทั่วโลก [1] รวมถึงประเทศไทย เนื่องจากหนอนแมลงวันลายเป็นแมลงที่มีสัดส่วนโปรตีนสูงถึง 20–40% วงจรชีวิตมีระยะสั้นเมื่อเทียบกับแมลงกินได้ชนิดอื่น ๆ สามารถเลี้ยงได้ในสภาพแวดล้อมทั่วไปของประเทศไทย โดยหนอนแมลงวันลายเกิดจากแมลงวันลาย (Black Soldier Fly, BSF) หรือ *Hermitia illucens L.* เมื่ออายุประมาณ 3 days จะเริ่มผสมพันธุ์และวางไข่ 400–900 ฟอง หลังจากนั้นประมาณ 3 days ไข่จะฟักตัวเป็นหนอนตัวอ่อน ซึ่งในช่วงระยะตัวหนอนของหนอนแมลงวันลายจะมีระยะเวลา 14–16 days ก่อนจะกลายเป็นดักแด้และเป็นแมลงตัวเต็มวัยต่อไป ดังนั้นระยะการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายให้ได้ผลผลิตจะใช้เวลานานประมาณ 45 days [2] ปัจจุบันนิยมใช้เศษอาหาร เศษผลไม้ รวมถึงอาหารโปรตีนสูง เช่น กากถั่วเหลือง กากถั่วอินคา เพื่อเป็นการเพิ่มสารอาหารแก่ตัวอ่อนหนอนและเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียที่เกิดขึ้น โดยอาหารที่นิยมนำมาเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย คือ กากถั่วอินคา ซึ่งกากถั่วอินคาเกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูปถั่วอินคาที่มีของเสียปริมาณมาก แต่ยังมีคุณค่าทางอาหารที่สูง โดยถั่วอินคา หรือ Sacha Inchi หรือ Inca Peanuts เป็นพืชตระกูลถั่วและเป็นตระกูลเดียวกับพืชงา พารา สนุ่นดำ และมันสำปะหลัง โดยมีชื่อทาง

วิทยาศาสตร์ คือ *Plukenetia volubilis L.* โดยทั่วไปสามารถนำมาคั่วบรีโกลกลิ้งเมล็ดอัลมอนต์ หรือนำมาแปรรูปเป็นน้ำมันสกัดเพื่อสุขภาพ [3] ซึ่งหลังจากการหีบสกัดน้ำมันถั่วอินคา จะเกิดผลพลอยได้ คือ กากถั่วอินคา ทั้งในส่วนของกากจากเปลือก และกากจากถั่วเมล็ดแห้งที่ผ่านการสกัดน้ำมัน โดยพบว่ากากถั่วอินคาเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันสกัดยื่นต่อโรงงานต่อปีประมาณ 60 tons หรือ 70–80% ของเมล็ดถั่วอินคาที่ใช้ในการแปรรูป ซึ่งยังคงมีโปรตีนมากกว่า 27% [4] โดยทั่วไปการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายเพื่อแปรรูปเป็นโปรตีนอาหารสัตว์สามารถจำแนกรูปแบบการเลี้ยงออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การเลี้ยงแบบแห้ง และการเลี้ยงแบบเปียก [2] ซึ่งการเลี้ยงแบบแห้ง คือ การเลี้ยงตัวอ่อนหนอนแมลงวันลายด้วยอาหารที่มีสัดส่วนของน้ำน้อยกว่า 80% w/w เช่น เศษอาหาร เศษผักหรือผลไม้ เป็นต้น เมื่อหนอนย่อยอาหารจนเข้าสู่ช่วงหนอนโตเต็มวัย จะได้กากปุยแห้งที่สามารถใช้ตะแกรงร่อนแยกตัวหนอนและนำไปแปรรูปในขั้นตอนต่อไป โดยในประเทศไทยนิยมเลี้ยงหนอนแมลงวันลายแบบแห้ง เนื่องจากช่วยบำบัดขยะอินทรีย์ในชุมชนได้ [5],[6] สำหรับการเลี้ยงแบบเปียก คือ การใช้อาหารเลี้ยงที่มีสัดส่วนของน้ำมากกว่า 80% w/w เช่น กากถั่วเหลือง หรือ กากถั่วอินคา เป็นต้น จะนิยมเลี้ยงในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถควบคุมโภชนาการและคุณภาพของหนอนแมลงวันลายเพื่อส่งออกได้ตามมาตรฐาน

การผลิต [7] โดยเมื่อหมอนย่อยอาหารจนเข้าสู่ช่วงหมอนโตเต็มวัย ลักษณะของอาหารยังคงมีความชื้นอยู่มาก และมีตัวหมอนแทรกอยู่ในอาหาร เมื่อต้องการนำไปแปรรูปจำเป็นต้องผ่านกระบวนการล้างเศษกากอาหาร หรือ กากลั่วควาอินคาที่ผ่านกระบวนการย่อยจากหมอนด้วยน้ำสะอาดก่อน [1],[2],[7],[8] จากการศึกษาวิจัยประกอบกรณีแห่งหนึ่งในจังหวัดเชียงใหม่พบว่า มีการเลี้ยงหมอนด้วยกากลั่วเหลืองหรือกากลั่วควาอินคาและใช้น้ำสะอาดสำหรับการล้างหมอนด้วยวิธีที่ผสมอยู่ในอาหารเพียงประมาณ 10–50 l. ซึ่งทำให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากและอาจมีปริมาณสารอินทรีย์สูงจากกากลั่วควาอินคาหรือกากลั่วเหลืองที่ผสมอยู่ในน้ำเสีย รวมถึงของเสียในกระบวนการย่อยของหมอนแผลงวันหลาย ซึ่งถ้าไม่ถูกกำจัดอย่างถูกวิธีจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ เช่น มลพิษทางสังคมและอากาศในรูปของกลิ่นเหม็น หรือ สารอินทรีย์ซิมลงสู่พื้นดินและแหล่งน้ำในบริเวณใกล้เคียง จึงควรมีวิธีการจัดการที่เหมาะสม โดยเฉพาะในระดับอุตสาหกรรม ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย ระบุว่า น้ำทิ้งที่สามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติต้องมีค่าความต้องการออกซิเจนเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ทางเคมีในน้ำ หรือ COD (Chemical Oxygen Demand) ไม่เกิน 120 mg/L

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า น้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงเหมาะสำหรับนำไปบำบัดด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งสามารถบำบัดสารอินทรีย์ให้เกิดเป็นพลังงานทดแทนในรูปของก๊าซชีวภาพได้ [9] ซึ่งน้ำเสียจากกระบวนการล้างหมอนแผลงวันหลายอาจมีสารอินทรีย์ประเภทโปรตีนสูงกว่าสารอาหารประเภทอื่น ๆ เนื่องจากกากลั่วควาอินคาที่มีโปรตีนมากกว่า 27% ดังนั้นจึงศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดย Wang et al., (2019) [10] ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดการน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปนมและถั่วเหลือง ผลการศึกษาพบว่าน้ำเสียในกลุ่มของการแปรรูปถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นประมาณ 1.5–10.0 l/kg จะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงจากกระบวนการแปรรูป เช่น การล้าง การคั้น เป็นต้น ซึ่งน้ำเสียจะมีลักษณะเป็นกรดอ่อนอยู่ในช่วง 5.4–6.6 ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand; BOD) ประมาณ 4.10–6.80 g/L ค่า COD ประมาณ 7.50–12.00

g/L [11] องค์ประกอบไนโตรเจนประมาณ 370–440 mg/L ฟอสฟอรัส 81–92 mg/L สำหรับ Alves Araujo et al., (2017) [12] ศึกษาศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากกากถั่วเหลืองที่เหลือทิ้งในกระบวนการแปรรูปถั่วเหลืองโดยหมักกับหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพโรงงานแปรรูปอาหารในอัตราส่วนหัวเชื้อต่อวัตถุดิบ 2:1 โดยกรรมของแข็งระเหยง่าย ผลการศึกษาพบว่าตลอดระยะเวลาการหมัก 25 days สามารถผลิตก๊าซมีเทนที่ได้ 421.40 NmL/gVS_{สด} และเมื่อคำนวณการผลิตพลังงานจากก๊าซชีวภาพที่ได้จะสามารถผลิตพลังงานในรูปของก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 19.0 KJ/s จากปัจจัยต่าง ๆ ข้างต้น สามารถบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปถั่วเหลืองได้ด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพ แต่ในขณะเดียวกันพบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพของวัตถุดิบที่มีโปรตีนสูงจะส่งผลให้การเริ่มต้นการผลิตก๊าซชีวภาพใช้เวลานานขึ้น โดย Kim et al., (2020) [13] ได้ศึกษาอัตราความล่าช้า (Lag-phase) ของการผลิตก๊าซชีวภาพจาก 2 การทดลอง ได้แก่ การศึกษาจากวัตถุดิบโปรตีน 3 ชนิด ได้แก่ เวย์ไอโซเลท เจลาติน และอัลบูมิน ร่วมกับหัวเชื้อมูลไก่ และการศึกษาอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ (Substrate and Inoculum Ratio; SIR) ตั้งแต่ 0.2–1.0 โดยปริมาณของแข็งระเหยง่าย ซึ่งผลการศึกษาพบว่าโปรตีนทั้ง 3 ชนิด มีระยะเวลาความล่าช้าประมาณ 12.78–16.44 days สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากที่สุด (เจลาติน) 801.11 mL/gVS_{สด} ที่ก๊าซชีวภาพสะสม 1,031.01 mL/gVS_{สด} และเมื่อนำไปศึกษาต่อใน SIR ที่ต่างกันพบว่า อัตราส่วน 0.8 และ 1.0 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากปริมาณกรดอินทรีย์เหมาะสมต่อปริมาณหัวเชื้อ [14] นอกจากนี้เมื่ออัตราการสร้างและอัตราการบริโภครวมกัน โดยแนวโน้มว่าจะทำให้อัตราความล่าช้าในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง นอกจากนี้ยังสามารถลดการสะสมของ NH₃-N ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโปรตีนสูงที่อาจส่งผลกระทบต่อยับยั้งกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์หมักทางชีวภาพในระยะเวลาผลิตก๊าซชีวภาพได้

โดยตัวอย่างการศึกษาเกี่ยวกับของเสียจากกระบวนการล้างหมอนแผลงวันหลายมีการศึกษาของ Bulak et al., (2020) [15] ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียที่เกิดขึ้นหลังการเพาะเลี้ยงแผลงทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่

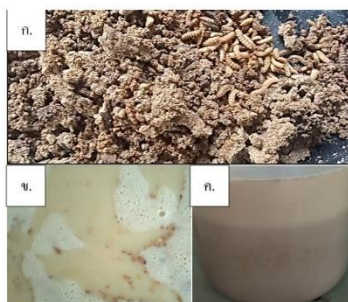
แมลงวันลาย หนอนนก (*Tenebrio Molitor*) และจิ้งหรีด (*Gryllus spp.*) โดยลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นเป็นของเสียที่เกิดจากการผสมกันระหว่างมูลของแมลงร่วมกับอาหารที่ใช้ในการเลี้ยง ซึ่งจะนำของเสียของแมลงทั้ง 3 ชนิด มาเปรียบเทียบผลการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อต่อวัตถุดิบเท่ากับ 2:1 [12],[16] โดยเติมวัตถุดิบที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 3.50 g เติมปริมาณเท่ากับทุกวัตถุดิบ ตลอดระยะเวลาการหมัก 21 days พบว่า ของเสียจากการเลี้ยงแมลงวันลายมีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ $412.50 \pm 5.10 \text{ mL/gVS}_{\text{สด}}$ มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ $207.90 \pm 21.50 \text{ mL/gVS}_{\text{สด}}$ โดยมีปริมาณมีเทนสูงสุด 53.23% v/v โดยจากการศึกษาทางวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีโปรตีนสูงสามารถนำไปบำบัดด้วยเทคโนโลยีการบำบัดแบบไร้อากาศและผลิตก๊าซชีวภาพได้ ดังนั้น น้ำเสียจากกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคาจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพ โดยงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนจากน้ำเสียในกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา ร่วมกับหัวเชื้อกากตะกอนระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรในระบบการหมักแบบกะเพื่อนำไปพัฒนาการใช้พลังงานทดแทนในการบำบัดน้ำเสียระดับวิสาหกิจชุมชนและระดับอุตสาหกรรมต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย (Materials and Methods)

2.1 การเตรียมวัตถุดิบน้ำเสียและหัวเชื้อ

ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบน้ำเสียจากกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากการจำลองการเลี้ยงตัวอ่อนหนอนแมลงวันลายจำนวน 1 kg ต่ออาหารเลี้ยง (กากถั่วดาวอินคา) 25 kg เมื่อหนอน โตเต็มวัยแสดงดังรูปที่ 1(ก) ซึ่งใช้ระยะเวลาประมาณ 20 days จะนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดในอัตราส่วนหนอนผสมกากถั่วดาวอินคา 1 kg ต่อน้ำล้าง 10 L. ซึ่งจะได้ น้ำเสียเป็นวัตถุดิบในการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกะลักษณะดังรูปที่ 1(ข) น้ำเสียมีลักษณะเป็นสีครีมขุ่นมีสาร

แขวนลอยผสมอยู่ในของเหลว และรูปที่ 1(ค)แสดงการแยกชั้นของน้ำเสียเมื่อตั้งทิ้งไว้ พบว่ามีตะกอนหนักมากกว่า 70% ของสัดส่วนทั้งหมด



รูปที่ 1 ลักษณะหนอนโตเต็มวัยและน้ำเสียจากกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย (ก) ลักษณะหนอนโตเต็มวัยในอาหาร (ข) ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย และ (ค) การแยกชั้นของน้ำเสีย

สำหรับขั้นตอนการเตรียมหัวเชื้อจะนำกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกึ่งปิด (Covered lagoon) ของฟาร์มสุกรในจังหวัดเชียงใหม่ แสดงลักษณะหัวเชื้อดังรูปที่ 2 ซึ่งก่อนการทดลองจะเก็บรักษาวัตถุดิบและหัวเชื้อภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 4.0°C นำหัวเชื้อไปหมักในสภาวะไร้อากาศระยะเวลา 7 days หลังจากนั้นจึงกรองวัตถุดิบผ่านตะแกรงขนาดกว้างและยาวไม่เกิน 10 mm นำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์เริ่มต้น เพื่อเริ่มการทดลองตามเงื่อนไขการศึกษาก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน



รูปที่ 2 ลักษณะหัวเชื้อกากตะกอนระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร

2.2 วิธีการทดลอง

การทดลองเพื่อหาศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วอินคา จะศึกษาโดยปรับใช้จากมาตรฐาน VDI 4630 [9],[17] โดยการศึกษาผลการผลิตก๊าซชีวภาพของอัตราส่วนที่แตกต่างกันระหว่างวัตถุดิบ น้ำเสียและหัวเชื้อจากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ฟาร์มสุกร (Substrate and Inoculum Ratio; SIR) ทั้งหมด 3 อัตราส่วน ได้แก่ 3:1, 1:1 และ 1:3 gVS_{add} ทำการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ บรรจุในขวดแก้วขนาด 1,000 mL โดยบรรจุหัวเชื้อทุกขวดเท่ากับ 1.5% ของปริมาตรการหมัก 400 mL หรือเท่ากับ 119.65 gVS หลังจากนั้นจึงปรับค่าความเป็นกรดค่าให้อยู่ในช่วง 7.0 ± 0.1 ปิดผนึกด้วยจุกยางครอบฝาอะลูมิเนียมและอัดก๊าซไนโตรเจนเพื่อทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศ ซึ่งระหว่างการหมักจะมีชุดควบคุม (B) ที่ใส่หัวเชื้อเพียงอย่างเดียวจำนวน 2 ซ้ำ เพื่อนำไปไล่ออกจากปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของทั้งสามอัตราส่วน ทำให้ผลของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นศึกษาที่เกิดจากวัตถุดิบเท่านั้น และการศึกษาศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจะควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงมีไซคลิกส์ ($35.0 \pm 2^{\circ}C$) โดยติดตั้งในอ่างน้ำที่มีเครื่องให้ความร้อนและใช้น้ำเพื่อช่วยในการกระจายความร้อนภายในอ่าง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชุดการทดลองศึกษาศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากการล้างนอนแมลงวันลาย

2.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพ

การวิเคราะห์ศึกษาและลักษณะเบื้องต้นของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะวิเคราะห์พารามิเตอร์ตาม

วิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์น้ำเสีย APHA 2005 [18] อย่างน้อย 2 ซ้ำ โดยวิเคราะห์ COD ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid; TS) ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solid; VS) ค่าความเป็นกรดค่า (Potential of Hydrogen ion; pH) และอัตราส่วนปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid; VFA) ต่อสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity; Alk) หรือ VFA/Alk ซึ่งการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์จะทำการวัดทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 วิเคราะห์วัตถุดิบและหัวเชื้อ ช่วงที่ 2 และ 3 วิเคราะห์ก่อนเข้าระบบและหลังออกจากระบบของทุกอัตราส่วน วัดปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวัน โดยใช้กระบอกวัดแบบแก้ว [19] โดยวัดเวลาเดียวกันทุกวันเพื่อความแม่นยำของข้อมูลจนอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมวันที่โดยคำนวณผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas yield) และศึกษาการผลิตก๊าซมีเทน (Bio-chemical Methane Potential; BMP) [20],[21] ในหน่วยของ NmL/gVS_{add} ที่อุณหภูมิมาตรฐาน $0^{\circ}C$ ณ ความดันบรรยากาศ 1 atm ดังสมการที่ (1)

$$BMP = \%CH_4 \times V_{biogas,STP} / m_{substrate,VS_{add}}(1)$$

โดย $\%CH_4$ คือ ร้อยละของสัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ $V_{biogas,STP}$ คือ ปริมาตรก๊าซชีวภาพ ณ อุณหภูมิมาตรฐาน $0^{\circ}C$ ที่ความดันบรรยากาศ 1 atm (NmL) $m_{substrate,VS_{add}}$ คือ มวลวัตถุดิบที่เติมเข้าระบบ (gVS_{add}) หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างของแต่ละอัตราส่วนไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพหลังจากจากระบบต่อไปสำหรับการวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพจะวัดทุก ๆ 7 days โดยเครื่องวิเคราะห์ที่องค์ประกอบก๊าซ GFM 406 series (Gas Data, United Kingdom)

3. ผลและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ลักษณะของวัตถุดิบและหัวเชื้อ

ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายมีลักษณะเป็นของเหลวขุ่น แสดงดังรูปที่ 1 มีการแยกชั้นระหว่างกากหนักนอนกัน สารละลายสีเหลืองขุ่น และสารแขวนลอยบนผิวน้ำเสีย โดยลักษณะ

ทางเคมีกายภาพเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นศักยภาพการเป็นวัตถุดิบตั้งต้นของน้ำเสียต่อการผลิตก๊าซมีเทน โดยน้ำเสียจากระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่ล้างด้วยกากถั่วอินคาอินคา COD เท่ากับ 58.43 ± 6.69 g/L มีปริมาณของแข็งระเหยง่าย 30.82 ± 1.31 g/L และลักษณะเป็นกรดอ่อนเท่ากับ 6.05 ± 0.02 แต่มีปริมาณอัตราส่วน VFA/Alk เท่ากับ 0.83 ± 0.13 ซึ่งสูงเกินมาตรฐาน [13],[22] การผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียดังกล่าวโดยปราศจากหัวเชื้ออาจส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบระยะยาว จากปริมาณกรดอินทรีย์ที่มากเกินไปจนยังปฏิบัติวิธีการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมถึงใช้เวลานานในการผลิตก๊าซชีวภาพการนำกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเป็นหัวเชื้อจึงนิยมนำมาใช้เพื่อกระตุ้นศักยภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม [23] ซึ่งกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพภายในฟาร์มสัตว์โดยเฉพาะฟาร์มสุกร เป็นระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน เนื่องจากมีแบคทีเรียเมทาโนเจนอยู่ในมูลสุกรจำนวนมาก ซึ่งกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพภายในฟาร์มสัตว์โดยเฉพาะฟาร์มสุกร เป็นระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน เนื่องจากมีแบคทีเรียเมทาโนเจนอยู่ในมูลสุกรจำนวนมาก [24] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำกากตะกอนระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกรเป็นหัวเชื้อเพื่อการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียในกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วอินคา โดยกากตะกอนมูลสุกรที่นำมาใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นสารชั้นเหลวสีดำข้น ดังรูปที่ 2 ค่า COD เท่ากับ 63.14 ± 15.62 g/L และ VS เท่ากับ 50.15 ± 3.02 g/L รวมถึงมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ในค่ามาตรฐาน ได้แก่ ค่าความเป็นกรดค่า 7.17 ± 0.09 อยู่ในช่วงมาตรฐานและมีอัตราส่วน VFA/Alk เท่ากับ 0.41 ± 0.24 ซึ่งมาตรฐานอยู่ในช่วงไม่เกิน 0.40 [22] จึงเหมาะแก่การนำมาเป็นหัวเชื้อเพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วอินคา

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของหัวเชื้อและวัตถุดิบ

Parameter	Inoculum	Wastewater
COD (g/L)	63.14 ± 15.62	58.43 ± 6.69
TS (g/L)	75.47 ± 4.99	39.37 ± 1.52
VS (g/L)	50.15 ± 3.02	30.82 ± 1.31
VS/TS	0.66 ± 0.01	0.78 ± 0.00
pH	7.17 ± 0.09	6.05 ± 0.02
VFA/Alk	0.41 ± 0.24	0.83 ± 0.13

3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียของแต่ละอัตราส่วน

ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของน้ำเสียที่ผ่านระบบการบำบัดแบบไร้อากาศสามารถบ่งบอกในรูปของร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด COD ($COD_{removal}$) ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด ($TS_{removal}$) และร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย ($VS_{removal}$) แสดงดังตารางที่ 2 โดยจากการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่มีหัวเชื้อมากจะมีศักยภาพการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้มากที่สุด เนื่องจากในหัวเชื้อมีองค์ประกอบของแบคทีเรียเมทาโนเจนที่ช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์อยู่ [25] โดยอัตราส่วน 1:3, 1:1 และ 3:1 ดังกล่าวมีศักยภาพ $COD_{removal}$ เท่ากับ 77.78%, 68.51% และ 43.15% ตามลำดับ สำหรับศักยภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปของของแข็ง ซึ่ง $TS_{removal}$ และ $VS_{removal}$ อัตราส่วนที่มีศักยภาพมากที่สุด คือ 1:1, 1:3 และ 3:1 ตามลำดับโดย $TS_{removal}$ เท่ากับ 14.49%, 7.79% และ 7.15% และ $VS_{removal}$ เท่ากับ 23.76%, 17.41% และ 12.57% ตามลำดับ เนื่องจากจุลินทรีย์เมทาโนเจนสามารถย่อยสลายเซลลูโลสซึ่งเป็นเส้นใยของแข็งช้ากว่าสารอาหารประเภทอื่น ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการหมักนานขึ้นเพื่อการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดอย่างมีประสิทธิภาพ [26] นอกจากนี้ยังเป็นผลจากการสะสมของกรดอินทรีย์ทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์ ทำให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่ำ โดยการบ่งชี้การทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนเบื้องต้นสามารถสังเกตได้จากค่า pH และอัตราส่วน VFA/Alk ดังตารางที่ 2 แสดงการ

เปลี่ยนแปลงไปของแต่ละอัตราส่วนในช่วงเข้าระบบและออกระบบ โดยเมื่อทำการหมักทั้งหมด 3 อัตราส่วน พบว่าค่าเริ่มต้นเกินมาตรฐาน แต่เมื่อผ่านกระบวนการหมักแบบไร้อากาศครบ 45 days ผลการวิเคราะห์ pH และ VFA/Alk ของอัตราส่วน 1:1 และ 1:3 มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยมีค่า pH เท่ากับ 8.04 ± 0.04 และ 7.87 ± 0.11 และมีค่า VFA/Alk เท่ากับ 0.09 ± 0.05 และ 0.19 ± 0.04 ตามลำดับ เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวมีอัตราส่วนของน้ำเสียจากกระ

บวนการล้างหมอนแมลงวันลายที่มีปริมาณของแข็งและองค์ประกอบของโปรตีนน้อยกว่าอัตราส่วน 3:1 ซึ่งการมีปริมาณของแข็งและโปรตีนในระบบมากทำให้ภายในระบบเกิดแอมโมเนียและการสะสมของกรดอินทรีย์ทำให้หัวเชื้อไม่สามารถย่อยสลายได้ทันจนกระทั่งเกิดการขั้วขึ้น การเติบโตและการทำงานของแบคทีเรียเมทาโนเจน [22],[26],[27] ในขณะที่อัตราส่วนอื่น ๆ สามารถผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนได้อย่างต่อเนื่อง

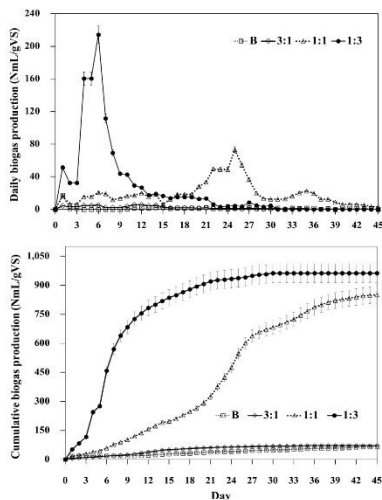
ตารางที่ 2 ทักษะการผลิดก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทน และประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์

SIR		3:01	1:01	1:03
Cumulative biogas (mL)		1,256.85 \pm 26.25	5,251.17 \pm 43.55	2,595.17 \pm 18.98
BMP (NmL _{CH₄} /gVS _{add})		22.21 \pm 9.55	401.51 \pm 24.42	372.26 \pm 6.31
CH ₄ (%)		35.9	67.9	47.9
COD (g/L)	Initial	50.20 \pm 5.92	68.63 \pm 9.51	36.47 \pm 1.18
	Final	28.53 \pm 14.07	22.97 \pm 3.04	8.10 \pm 3.44
TS (g/L)	Initial	34.26 \pm 1.41	29.44 \pm 1.41	19.42 \pm 3.07
	Final	31.66 \pm 2.62	25.17 \pm 2.24	19.91 \pm 1.51
VS (g/L)	Initial	29.40 \pm 1.08	23.53 \pm 1.76	14.49 \pm 2.20
	Final	25.70 \pm 1.00	17.94 \pm 1.37	11.97 \pm 2.30
VFA/ Alk	Initial	1.75 \pm 0.03	1.49 \pm 0	1.10 \pm 0.02
	Final	3.01 \pm 0.24	0.09 \pm 0.05	0.19 \pm 0.04
pH	Initial	7.40 \pm 0.02	7.65 \pm 0.02	7.60 \pm 0
	Final	5.84 \pm 0.02	8.04 \pm 0.04	7.87 \pm 0.11

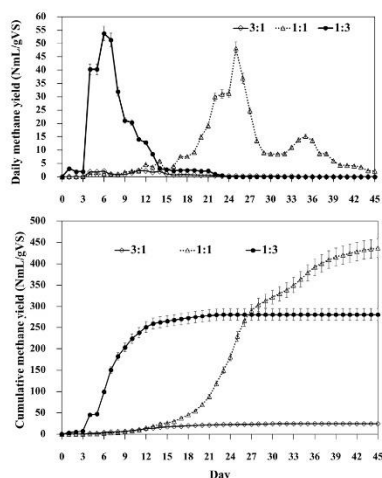
3.3 ทักษะการผลิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน

การผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนจากน้ำเสียกระบวนการล้างหมอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วคาวอินคา โดยใช้หัวเชื้อจากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร แสดงผลการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันและสะสมในอัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน 1:3 สามารถเริ่มต้นการผลิตก๊าซชีวภาพได้เร็วที่สุด ตั้งแต่วันที่ 2 ถึงวันที่ 5 ของการหมักซึ่งสามารถผลิต

ก๊าซชีวภาพ 51.41 NmL/gVS_{add} และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็น 214.28 NmL/gVS_{add} สามารถผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 47.90% โดยมีเทนรายวันช่วงที่สูงที่สุดเท่ากับ 203.43 NmL/gVS_{add} และก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 224.83 NmL/gVS_{add} แต่หลังจากวันที่ 6 การผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนลดลงอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 เนื่องจากอัตราส่วนสารอาหารที่ได้รับจากน้ำเสียไม่เพียงพอต่อหัวเชื้อที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน [14],[28]



รูปที่ 4 การผลิตก๊าซชีวภาพรายวันและการผลิตก๊าซชีวภาพสะสม



รูปที่ 5 การผลิตก๊าซมีเทนรายวันและการผลิตก๊าซมีเทนสะสม

สำหรับอัตราส่วน 3:1 มีสัดส่วนของวัตถุดิบน้ำเสียมากกว่าหัวเชื้อ โดยน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วควินคาที่มีสัดส่วน โปรตีน

มากถึง 49.79% ส่งผลให้น้ำเสียมีโปรตีนสูง [3] จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องระบุว่าน้ำเสียที่มีลักษณะโปรตีนสูง เมื่อเข้าสู่กระบวนการไฮโดรไลซิสจะเกิดย่อยสลายโปรตีนและไขมันเป็นกรดอะมิโนและกรดไขมัน หลังจากนั้นจะถูกแบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กเป็นกรดอะซิดิก ซึ่งจะเกิดกรดอินทรีย์ปริมาณมากและเกิดการสะสมกรดอินทรีย์ในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยถ้ามีปริมาณ VFA มากเกิน 2,000 mg/L [29] จะเกิดการยับยั้งการเกิดมีเทน เมื่อวิเคราะห์ VFA ของสารขึ้นเหลวที่ออกจากกระบวนการหมักแบบกะของอัตราส่วน 3:1 พบว่ามีปริมาณความเข้มข้น VFA/Alk มากถึง 3.01 ± 0.24 ซึ่งเกินมาตรฐาน ทำให้ในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพมีสัดส่วนมีเทนต่ำกว่าองค์ประกอบของก๊าซอื่น ๆ เช่น CO_2 หรือ $\text{NH}_3\text{-N}$ เป็นต้น โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันเฉลี่ย $2.17 \text{ NmL/gVS}_{\text{สด}}$ มีเทนสะสมเท่ากับ $24.74 \text{ NmL/gVS}_{\text{สด}}$ ที่สัดส่วนมีเทนสูงสุด 35.90% ในช่วง 10 วันแรก หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจำเป็นต้องใช้เวลา มากกว่า 45 days หรือมีกระบวนการปรับสภาพก่อนหรือระหว่างการหมักด้วยต่างหรือปรับอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบกับหัวเชื้อให้เหมาะสม [30] จากการทดลองพบว่าอัตราส่วน 1:1 คือ อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วน 3:1 และ 1:3 โดยการผลิตก๊าซชีวภาพของอัตราส่วน 1:3 ที่มีสัดส่วนน้ำเสียหรืออาหารเลี้ยงจุลินทรีย์น้อยทำให้เกิดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้เร็ว [13] แต่เนื่องจากมีสารอาหารน้อยกว่าความต้องการของจุลินทรีย์ทำให้กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนค่อย ๆ ต่ำลง แต่อัตราส่วนที่มีน้ำเสียมักขึ้นจำเป็นต้องใช้เวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งน้ำเสียที่มีโปรตีนสูงจะใช้เวลาในการปรับสภาพระหว่างจุลินทรีย์กับอาหารนานกว่าอัตราส่วนที่มีสารอาหารน้อย [13] โดยการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและเกิดการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีที่สุดในวันที่ 25 ของอัตราส่วน 1:1 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดในวันที่ 19 โดยการผลผลิตก๊าซชีวภาพรายวัน $73.05 \text{ NmL/gVS}_{\text{สด}}$ และมีผลผลิตของมีเทนสะสม ในช่วง 10 วันแรก เพิ่มขึ้นต่อวัน $1 \text{ NmL/gVS}_{\text{สด}}$ ที่สัดส่วนมีเทน 5.90-41.10% หลังจากนั้นเพิ่มขึ้น $10 \text{ NmL/gVS}_{\text{สด}}$ ภายใน 3 days และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีสัดส่วนมีเทนสูงสุด 67.90% โดยมีมีเทนสะสม

434.58 Nml/gVS_{cell} ดังนั้นเมื่อหมักวัตถุดิบและหัวเชื้อในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้เกิดศักยภาพสูงสุดต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ [14],[28] แต่ในอัตราส่วน 3:1 พบว่ามีสัดส่วนสารอาหารมาก เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ ซึ่งอัตราส่วน VFA/ALK และปริมาณกรดอินทรีย์มีค่าเกินมาตรฐานบ่งบอกถึงการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ในระยะเวลา 45 days ดังนั้นอัตราส่วน 1:1 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถนำไปศึกษาต่อในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใหญ่ขึ้น หรือศึกษาลักษณะการเติมแอมโมเนียเพื่อนำไปใช้จริงในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

4. สรุป

การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วคาวอินคาที่มีค่า COD และปริมาณของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 58.43 ± 6.69 g/L และ 30.82 ± 1.31 g/L ตามลำดับ พบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพโดยหมักกับหัวเชื้อจากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรในอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อโดยปริมาตรของแข็งระเหยง่ายที่ดีที่สุดเท่ากับ 1:1, 1:3 และ 3:1 ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วน 1:1 มีศักยภาพ TS_{total} และ VS_{total} สูงที่สุดเท่ากับ 14.49% และ 23.76% ตามลำดับ มีศักยภาพการย่อยสลายค่า COD 68.51% เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ โดยอัตราส่วน 3:1 มีสัดส่วนสารอาหารมากเกินไปทำให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพล้มเหลว และสำหรับอัตราส่วน 1:3 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้แต่มีสัดส่วนก๊าซมีเทน ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน และศักยภาพการกำจัดสารอินทรีย์ต่ำกว่าอัตราส่วน 1:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนตลอดระยะเวลาการหมัก 45 days โดยมีเทนสะสม 401.51 ± 24.42 Nml/gVS_{cell} ที่สัดส่วนมีเทนสูงสุด 67.90% แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียจากกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วคาวอินคาสามารถนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปศึกษาต่อในลักษณะการเติมแอมโมเนียหรือศึกษารูปแบบถังหมักที่เหมาะสมกับน้ำเสียดังกล่าวในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยภายใต้โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาลัยพลังงานทดแทน ทุนศึกษากับกฏบัตรบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยแม่โจ้ และขอขอบคุณอาจารย์และผู้ที่เกี่ยวข้องที่ให้การสนับสนุนความรู้ อุปกรณ์ และให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Castro-Lopez, L. Santiago-Lopez, B. Vallejo-Cordova, A. F. Gonzalez-Cordova, A. M. Liceaga, H. S. Garcia and A. Hernandez-Mendoza, "An insight to fermented edible insects: A global perspective and prospective," *Food Research International*, vol. 137, 2020, Art. no. 109750, doi: 10.1016/j.foodres.2020.109750.
- [2] B. M. A. Dortmans, S. Diener, B. M. Verstappen and C. Zurbrugg, "Waste Treatment by BSF," in *Black Soldier Fly Biowaste Processing - A Step-by-Step Guide*, Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2017, ch. 2, pp. 6–20.
- [3] C. Sirima, Y. Vichamance and K. Nisanarth, "Value Added of Sacha Inchi by Using Nut Meal and Leaf to Produce Valuable Products," Burapha University, ChonBuri, Thailand, Final Rep., 2017.
- [4] S. Nareerat, K. Anurak, T. Pattaraporn and K. Wannapom, "Sacha inchi meal as a novel plant protein source in common carp diet (*Cyprinus carpio*)," *Khon Kaen Agriculture Journal*, vol. 42, no. 2, pp. 442–451, 2021, doi: 10.14456/kaj.2021.38.
- [5] J. Teerapong, S. Prapaipun, M. Sonthaya, S. Ackkaphob and B. Phanupong, "A raise of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae feed by waste treatment for use as alternative protein source in animal feed," Rajamangala University of Technology

- Suvarnabhumi, Phranakhon Si Ayutthaya, Thailand, Final Rep., 2020.
- [6] National Science and Technology Development Agency, "Animal technology," in *Knowledge Media Book ready-to-use Technology for Agriculture and Community*. 2019, ch.3, pp. 77–81.
- [7] K. Preeya, S. Kittikorn, P. Pakamon, S. Chayanon, P. Wongphan and N. Rotjapun, "Biogas Production Potential from Black Soldier Fly Larvae Washing Process Wastewater," in *The 34th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology and International Conference*, Bangkok, Thailand, Nov. 24–25, 2022, pp. 12.
- [8] R. T. Gahukar, "Edible Insects Farming: Efficiency and Impact on Family Livelihood, Food Security, and Environment Compared With Livestock and Crops," in *Insects as Sustainable Food Ingredients*, A. T. Dossey, J. A. Morales-Ramos and M. G. Rojas, Eds., Cambridge, MA, USA: Academic Press, 2016, ch. 4, pp. 85–111.
- [9] R. M. Jingura and R. Kamusoko, "Methods for determination of biomethane potential of feedstocks: a review," *Biofuel Research Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 573–586, 2017, doi: 10.18331/brj2017.4.2.3.
- [10] Y. Wang and L. Serventi, "Sustainability of dairy and soy processing: A review on wastewater recycling," *Journal of Cleaner Production*, vol. 237, 2019, Art. no. 117821, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117821.
- [11] X. Chen, W. Zhou, G. Li, Q. Song, M. Ismail, Y. Wang, L. Ren and C. Cheng, "Anaerobic biodegradation of soybean-process wastewater: Operation strategy and sludge bed characteristics of a high-performance Spiral Symmetric Stream Anaerobic Bioreactor," *Water Research*, vol. 197, 2021, Art. no. 117095, doi: 10.1016/j.watres.2021.117095.
- [12] V. K. Alves Araujo, S. de Almeida, S. B. de Oliveira, W. P. Calixto, G. P. Furrriel and D. P. Barbosa, "Anaerobic digestion using residue of soybean processing: Biogas production and it is potential to generate energy," presented at the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, May 17–19, 2017, pp. 1–4.
- [13] M.-J. Kim and S.-H. Kim, "Conditions of lag-phase reduction during anaerobic digestion of protein for high-efficiency biogas production," *Biomass and Bioenergy*, vol. 143, 2020, Art. no. 105813 doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105813.
- [14] Y. Zhou, Z. Zhang, T. Nakamoto, Y. Li, Y. Yang, M. Utsumi and N. Sugiura, "Influence of substrate-to-inoculum ratio on the batch anaerobic digestion of bean curd refuse-okara under mesophilic conditions," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 7, pp. 3251–3256, 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2011.04.002.
- [15] P. Bulak, K. Proc, M. Pawłowska, A. Kasprzycka, W. Berus and A. Bieganski, "Biogas generation from insects breeding post production wastes," *Journal of Cleaner Production*, vol. 244, 2020, Art. no. 118777, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118777.
- [16] C. Lalander, Å. Nordberg, and B. Vinnerås, "A comparison in product-value potential in four treatment strategies for food waste and faeces - assessing composting, fly larvae composting and anaerobic digestion," *GCB Bioenergy*, vol. 10, no. 2, pp. 84–91, 2018, doi: 10.1111/gcbb.12470.
- [17] *Fermentation of organic materials-characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests*, VDI 4630, VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, Germany, 2006.
- [18] *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, American Public Health Association, Washington, DC, USA, 2005, pp. 2-33–5.21.

- [19] C. H. Pham, J. M. Triolo, T. T. T. Cu, L. Pedersen, and S. G. Sommer, "Validation and Recommendation of Methods to Measure Biogas Production Potential of Animal Manure," *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, vol. 26, no. 6, pp. 864–873, 2013, doi: 10.5713/ajas.2012.12623.
- [20] A. Hussain and S. K. Dubey, "Specific methanogenic activity test for anaerobic degradation of influents," *Applied Water Science*, vol. 7, pp. 535–542, 2017, doi: 10.1007/s13201-015-0305-z.
- [21] J. Filer, H. H. Ding and S. Chang, "Biochemical Methane Potential (BMP) Assay Method for Anaerobic Digestion Research," *Water*, vol. 11, no. 5, 2019, Art. no. 921, doi: 10.3390/w11050921
- [22] P. Latifi, M. Karrabi and S. Danesh, "Anaerobic co-digestion of poultry slaughterhouse wastes with sewage sludge in batch-mode bioreactors (effect of inoculum-substrate ratio and total solids)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 107, pp. 288–296, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.03.015.
- [23] R. Karki, W. Chuenchart, K. C. Surendra, S. Shrestha, L. Raskin, S. Sung, A. Hashimoto and S. Kumar Khanal, "Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives," *Bioresource Technology*, vol. 330, 2021, Art. no. 125001, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125001.
- [24] M. Barret, N. Gagnon, E. Topp, L. Masse, D. I. Masse and G. Talbot, "Physico-chemical characteristics and methanogen communities in swine and dairy manure storage tanks: spatio-temporal variations and impact on methanogenic activity," *Water Research*, vol. 47, no. 2, pp. 737–746, 2013, doi: 10.1016/j.watres.2012.10.047.
- [25] Y. Song, S. Meng, G. Chen, B. Yan, Y. Zhang, J. Tao, Y. Li and J. Li, "Co-digestion of garden waste, food waste, and tofu residue: Effects of mixing ratio on methane production and microbial community structure," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 5, 2021, Art. no. 105901, doi: 10.1016/j.jece.2021.105901.
- [26] F. Liotta, G. d'Antonio, G. Esposito, M. Fabricino, E. D. van Hullebusch, P. N. Lens, F. Pirozzi and L. Pontoni, "Effect of total solids content on methane and volatile fatty acid production in anaerobic digestion of food waste," *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, vol. 32, no. 10, pp. 947–953, 2014, doi: 10.1177/0734242X14550740.
- [27] A. A. Pilarska, K. Pilarski, A. Wolna-Maruwka, P. Boniccki and M. Zaborowicz, "Use of Confectionery Waste in Biogas Production by the Anaerobic Digestion Process," *Molecules*, vol. 24, no. 1, 2018, Art. no. 37, doi: 10.3390/molecules24010037.
- [28] Y. M. Yoon, S. H. Kim, K. S. Shin, and C. H. Kim, "Effects of substrate to inoculum ratio on the biochemical methane potential of piggery slaughterhouse wastes," *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, vol. 27, no. 4, pp. 600–607, 2014, doi: 10.5713/ajas.2013.13537.
- [29] F. Yunus and T. L. Simangunsong, "Anaerobic Digestion of Industrial Tempeh Wastewater with Sludge from Cow Manure Biogas Digester as Inoculum: Effect of F/M Ratio on the Methane Production," *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, vol. 11, no. 3, 2021, pp. 1007–1013, doi: 10.5713/ajas.2013.13537
- [30] S. Pilli, A. K. Pandey, A. Katiyar, K. Pandey, and R. D. Tyagi, "Pre-treatment technologies to enhance anaerobic digestion," in *Sustainable Sewage Sludge Management and Resource Efficiency*, London, UK: IntechOpen Ltd., 2020, ch. 2, pp. 23.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวปรียา กฤตกริพุทธิ
เกิดเมื่อ	06 มกราคม 2541
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2563-ปัจจุบัน ปริญญาโท คณะวิทยาลัยพลังงานทดแทน สาขา วิศวกรรมพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ พ.ศ. 2563 ปริญญาตรี คณะวิทยาลัยพลังงานทดแทน สาขาพลังงาน ทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ พ.ศ. 2559 มัธยมศึกษาตอนปลาย สายการเรียนวิทยาศาสตร์และ คณิตศาสตร์ โรงเรียนธัญรัตน์ ปทุมธานี
ประวัติการทำงาน	พ.ศ. 2564-2565 ผู้ช่วยนักวิจัยโครงการการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำต้มถั่ว เหลืองในกระบวนการผลิตเต้าเจี้ยวบด (มิโชะ)

