



ระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่องจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหาร

ตราบุญ คงค์ศรีศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานวัตกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม

บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี

พ.ศ. 2566



1703872899

VRU :Thesis 61G54800104 thesis / recv : 04082566 22:23:58 / seq : 32



61G54800104_1703872899



PILOT SCALE BIOGAS PRODUCTION SYSTEM FROM CO-DIGESTION WITH RICE
STRAW AND FOOD WASTE

TRABUN KHONGKHARATSAMEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCES
IN INNOVATION OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT
GRADUATE SCHOOL
VALAYA ALONGKORN RAJABHAT UNIVERSITY

UNDER THE ROYAL PATRONAGE
PATHUM THANI PROVINCE

2023



1703872899

VRU iThesis 61G54800104 thesis / recv : 04082566 22:23:58 / seq : 32

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ ระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่องจากการหมักร่วมของฟางข้าว
และขยะเศษอาหาร
ชื่อนักศึกษา ตราบุญ คงกระตี่มี
รหัสประจำตัว 61G54800104
ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา นวัตกรรมจัดการสิ่งแวดล้อม

คณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธาน ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชนา สวัสดิ์) (อาจารย์ ดร.ศศิธร ทาสิน)

..... กรรมการ กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล) (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิสา พักตร์วิไล)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล)

..... กรรมการและเลขานุการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชนา สวัสดิ์)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิ
(ดร.สมชาย ดารารัตน์)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.กันต์ฤทัย คลังพหล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 12 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2566

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี

ตราบุญ คงกระครัม. (2566). ระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่องจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหาร. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (นวัตกรรมกรรมการจัดการสิ่งแวดล้อม). อาจารย์ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.อภิษฎา สวัสดิ์ ศ. ดร.นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ 2) ออกแบบและสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่อง และ 3) ทดสอบระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่อง วิธีดำเนินการวิจัยแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ 1) การดำเนินการวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร เติมวัตถุดิบร้อยละ 2.5 ของของแข็งทั้งหมด โดยใช้อัตราส่วนของฟางข้าวต่อขยะเศษอาหารต่อมูลวัว คือ 1:1:1 เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในถังปฏิกรณ์เพื่อรักษาสภาพต่างในระบบ จากนั้นเก็บข้อมูลค่าพีเอช ค่าของแข็งทั้งหมด และองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ 2) ออกแบบ สร้าง เดินระบบ และทดสอบการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่องขนาด 3 ลบ.ม. และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่อง

ผลการวิจัยพบว่า 1) ค่าพีเอชตลอดระยะเวลาการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ มีค่า 6.06-7.50 ค่าของแข็งทั้งหมดก่อนการผลิตก๊าซชีวภาพ มีค่า 60,783 มก./ล. และค่าของแข็งทั้งหมดคงเหลือ 14,025 มก./ล. ก๊าซมีเทนสูงสุดร้อยละ 70.17 ปริมาตรมีเทนสูงสุดมีค่า 1,667 มล. ปริมาตรก๊าซชีวภาพสูงสุดมีค่า 2,435 มล. ในส่วนของอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด มีค่า 590.83 มล./ชม. และผลผลิตของการผลิตก๊าซมีเทน มีค่า 0.71 L CH₄/gTVS_{remove} 2) การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่อง ขนาดถังปฏิกรณ์ 3 ลบ.ม. เป็นถังไฟเบอร์กลาส มีใบกวน มีถุงเก็บก๊าซชีวภาพ และมีเซนเซอร์ติดตั้งเพื่อตรวจสอบก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ซึ่งการออกแบบคำนึงถึงความเหมาะสมสำหรับเกษตรกร หรือการใช้งานในชุมชนขนาดเล็ก และในการเดินระบบนั้น จะนำข้อมูลผลการทดลองในห้องปฏิบัติการมาใช้ในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และ 3) จากการทดสอบระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับนำร่อง พบว่า ค่าพีเอชมีค่า 6.79-7.13 ก๊าซมีเทนมีค่าร้อยละ 54-56 ปริมาตรก๊าซมีเทน มีค่า 0.88 – 1.21 ลบ.ม. และปริมาตรก๊าซชีวภาพมีค่า 1.60 – 2.16 ลบ.ม. ในการประเมินค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่อง พบว่า อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน มีค่า 2.62 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ มีค่า 48,918.50 อัตราผลตอบแทนภายใน มีค่าร้อยละ 16.58 และระยะเวลาคืนทุน 8 ปี 1 เดือน ตามลำดับ

องค์ความรู้ที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้ คือ การได้ข้อมูลการนำฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ขยะเศษอาหาร และมูลวัว มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นทางเลือกสำหรับเป็นพลังงานทดแทน ทั้งยังเป็นทางเลือกในการลดปัญหาการเผาฟางข้าวในพื้นที่โล่งและขยะเศษอาหาร อีกทั้งสามารถเชื่อมโยงไปสู่เป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน (SDGs) ในเป้าหมายที่ 7.2 เพิ่มสัดส่วนของพลังงานทดแทน และเป้าหมายที่ 12.3 การลดของเสียที่เป็นอาหาร

คำสำคัญ: ระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่อง, การหมักร่วม, ฟางข้าว, ขยะเศษอาหาร



1703872899

VRU -Thesis 61G54800104 thesis / recv: 04082566 22:23:58 / seq: 32

Trabun Khongkharatsamee. (2023). Pilot Scale Biogas Production System from Co-digestion with Rice Straw and Food Waste. Master of Sciences (Innovation of Environmental Management). Advisors: Apichaya Sawasdee, Prof. Dr.Nipon Pisutpaisal

ABSTRACT

The objectives of this experimental research were to 1) examine the biogas production from co-digestion between rice straw and food waste in a laboratory scale, 2) design and build a pilot scale biogas production system, and 3) examine the pilot scale biogas production system, respectively. The research methodology was divided into two parts: 1) laboratory scale research was conducted using 10 liters reactor, filled with 2.5% of total solid material. The ratio of rice straw to food waste to cow dung was 1:1:1. Calcium carbonate was added to the reactor to maintain the alkalinity in the system. Then, pH, total solids, and biogas component data were collected. 2) Design, construction, system operation, and testing of the pilot scale biogas production system with a capacity of 3 m³ were conducted. Furthermore, an economic of pilot scale biogas production was analyzed.

The results showed that 1) pH during biogas production period in laboratory scale was 6.06-7.50. The total solids prior to biogas production were 60,783 mg/L and the residual total solids were 14,025 mg/L. The highest percentage methane production was 70.17% , with maximum volume of methane production of 1,667 ml. The highest biogas volume was 2,435 ml. The maximum methane production rate was 590.83 ml/hr. Yield of methane production was 0.71 L CH₄/gTVS_{remove}. 2) The pilot scale biogas production system was built with a 3 m³ reactor made of fiberglass, equipped with a stirrer, a biogas bag and biogas sensors installed to monitor the biogas generation. The design considered appropriateness for farmers or use in small communities. The system operation used data from laboratory experiments for the biogas production process. And 3) from testing the pilot scale biogas production system, it was found that pH values ranged from 6.79 to 7.13. The percentage methane production was 54-56%, methane volume was 0.88-1.21 m³, biogas volume was 1.60-2.16 m³. In term of economic evaluation of pilot scale biogas production system was benefit/cost ratio 2.62, net present value 48,918.50, internal rate returns 16.58, and payback period 8 years 1 month, respectively.

The knowledge gain from this research includes the information on using rice straw, which is agricultural waste, food waste, and cow dung as raw materials for biogas production, which is an alternative energy. It is also a solution to reduce the problem of rice straw open burning and food waste. Moreover, it can be linked to Sustainable Development Goals (SDGs), specifically goal 7.2, which is to increase the proportion of renewable energy and goal 12.3, which is to reduce food waste.

Keyword: Pilot Scale Biogas Production, Co-digestion, Rice Straw, Food Waste

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงในความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชนา สวัสดิ์ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาอันมีค่ามาเป็นทั้งที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้คำปรึกษาตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์และเอื้อเพื่อห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือต่าง ๆ รวมไปถึงกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์และทรงคุณค่า และขอขอบคุณทุนสนับสนุนการดำเนินการวิจัยบางส่วนจาก Global Challenge Research Fund (GCRF) Awards 2022 และจากมหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ โดยผ่านสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ปีงบประมาณ 2565 ภายใต้โครงการ การพัฒนาระบบนิเวศการเรียนรู้ภายในสถานศึกษารองรับการเรียนรู้เชิงรุก

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้สอนวิชาความรู้ ทั้งด้านวิชาการและประสบการณ์ต่าง ๆ เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ให้อำนาจและให้การสนับสนุนในทุก ๆ ด้านอย่างดีที่สุดเสมอมา คุณค่าและคุณประโยชน์อันพึงจะมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบและอุทิศแด่ผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจบ้างไม่มากก็น้อย

ตราบุญ คงคะรัศมี

GRAD VRU

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในวิจัย.....	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 วัสดุลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose).....	5
2.2 ขยะเศษอาหาร (Food Waste).....	9
2.3 มูลวัว (Cow Dung).....	11
2.4 ก๊าซชีวภาพ (Biogas).....	12
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	24
3.1 วัตถุดิบสำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการและระดับต้นแบบ.....	24



1703872899

VRU :Thesis 61654800104 thesis / recv : 04082566 22:23:58 / seq : 32

3.2	วัสดุอุปกรณ์และการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	25
3.3	การคำนวณค่าทางจุลศาสตร์.....	35
3.4	การคำนวณค่าก๊าซชีวภาพเทียบกับพลังงานที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ระดับต้นแบบ (Pilot Scale).....	36
3.5	การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	36
3.6	แผนการดำเนินงานวิจัย	38
บทที่ 4	ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	39
4.1	ผลการวิจัยการทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ.....	39
4.2	การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot Scale.....	44
4.3	การทดสอบประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่องจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหาร	47
4.4	การคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการดำเนินโครงการ	50
บทที่ 5	สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	52
5.1	สรุปและอภิปรายผลการวิจัย	52
5.2	ข้อเสนอแนะ	56
บรรณานุกรม.....		57
ภาคผนวก.....		61
ภาคผนวก ก	ข้อมูลดิบก๊าซชีวภาพในห้องปฏิบัติการ.....	62
ภาคผนวก ข	ข้อมูลจากโปรแกรม Sigma Plot.....	68
ภาคผนวก ค	ข้อมูลดิบก๊าซชีวภาพในระดับนำร่อง (Pilot Scale)	70
ประวัติผู้วิจัย.....		72



1703872899

VRU :Thesis 61654800104 thesis / recv : 04082566 22:23:58 / seq: 32

GRAD VRU

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ผลผลิตของนาปีย้อนหลังปี 2557 – 2561	6
ตารางที่ 2 ผลผลิตของนาปรังย้อนหลังปี 2557 – 2561	7
ตารางที่ 3 ตัวอย่างชนิดและคุณสมบัติของแบคทีเรียที่มีบทบาทในกระบวนการย่อยสลายแบบ ไร้อากาศ	16
ตารางที่ 4 ข้อมูลสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	23
ตารางที่ 5 ส่วนประกอบของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับต้นแบบ.....	31
ตารางที่ 6 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	38
ตารางที่ 7 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	51
ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากวัตถุดิบแต่ละชนิด	53
ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบอัตราผลผลิตจากวัตถุดิบแต่ละชนิด.....	54
ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากวัตถุดิบแต่ละชนิดในระดับ Pilot scale	55
ตารางที่ 11 การเทียบเท่าค่าการผลิตก๊าซชีวภาพกับค่าพลังงาน	56

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย	3
ภาพที่ 2 องค์ประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลส.....	5
ภาพที่ 3 แสดงตัวอย่างฟางข้าว.....	7
ภาพที่ 4 ตัวอย่างการจัดการฟางข้าว.....	8
ภาพที่ 5 พีรามิดลำดับขั้นของการบริหารจัดการห่วงโซ่อาหารเพื่อลดปริมาณขยะอาหาร	11
ภาพที่ 6 การใช้ประโยชน์จากมูลวัว	12
ภาพที่ 7 กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ.....	15
ภาพที่ 8 แสดงตัวอย่างฟางข้าวสำหรับเป็นวัตถุดิบในงานวิจัย.....	24
ภาพที่ 9 แสดงตัวอย่างมูลสัตว์สำหรับใช้เป็นเชื้อเริ่มต้นในงานวิจัย	25
ภาพที่ 10 ขยะเศษอาหาร.....	25
ภาพที่ 11 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกวนสมบูรณ์ในระดับห้องปฏิบัติการ ขนาด 10 ลิตร.....	26
ภาพที่ 12 pH meter (Mettler Toledo รุ่น LE 409, Ohio, USA).....	27
ภาพที่ 13 ตู้อบ (Oven) และตัวอย่างหลังอบ.....	28
ภาพที่ 14 เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีสำหรับวิเคราะห์กรดอินทรีย์ระเหยง่าย	28
ภาพที่ 15 เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีและหน้าจอแสดงผล.....	29
ภาพที่ 16 Gas Counter	30
ภาพที่ 17 แบบร่างของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 3 ลบ.ม.....	30
ภาพที่ 18 pH meter portable ที่ใช้ในงานวิจัย.....	33
ภาพที่ 19 หน้าจอแสดงค่าอุณหภูมิที่วัดโดยเซนเซอร์จากในถังหมัก.....	33
ภาพที่ 20 หน้าจอแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่วัดโดยเซนเซอร์วัดค่าก๊าซมีเทนจากถังหมัก.....	34
ภาพที่ 21 หน้าจอแสดงค่าปริมาตรก๊าซชีวภาพ (Total Biogas) ที่ได้จากถังหมัก	34



1703872899

VRU :Thesis 61654800104 thesis / recv : 04082566 22:23:58 / seq: 32

ภาพที่ 22	ค่าพีเอชระหว่างเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ.....	40
ภาพที่ 23	ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระหว่างการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพในห้องปฏิบัติการ	40
ภาพที่ 24	(A) ค่าของแข็งทั้งหมด (Total Solid) (B) ค่าของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (Total volatile solid)	41
ภาพที่ 25	ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นระหว่างการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ	42
ภาพที่ 26	ปริมาตรมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นระหว่างการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ	43
ภาพที่ 27	ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นระหว่างการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับ ห้องปฏิบัติการ.....	43
ภาพที่ 28	แสดงวัสดุและโรงเรือนขณะการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพต้นแบบ	44
ภาพที่ 29	วัสดุอุปกรณ์ (A) และ ถังเก็บก๊าซ (B).....	45
ภาพที่ 30	ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพระดับต้นแบบหลังจากดำเนินการสร้างเสร็จสิ้น.....	46
ภาพที่ 31	อุณหภูมิ (กราฟแท่ง) และค่าพีเอช (กราฟเส้น) ในระหว่างการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ระดับนำร่อง.....	48
ภาพที่ 32	(A) เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน (B) ปริมาตรก๊าซมีเทน (C) ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (กราฟแสดงข้อมูลหลังจากระยะเวลา Startup ระบบ).....	49

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย เนื่องจากเป็นอาหารหลักและสินค้าส่งออก จากข้อมูลในปี 2562 มีพื้นที่ปลูกข้าวนาปีประมาณ 59,980,731 ไร่ และนาปรังประมาณ 12,066,980 ไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) โดยจากการเก็บเกี่ยวข้าวที่ 1 กิโลกรัม จะได้ ฟางข้าว 0.7 - 1.4 กิโลกรัม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ความสูงของการตัดยอด และความชื้น ดังนั้น เมื่อคำนวณจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตต้นต่อปีของข้าวนาปีทั้งประเทศ พบว่ามีปริมาณฟางข้าวมากถึง 17 ล้านตันต่อปี และในสวนนาปรัง พบว่ามีฟางข้าวมากถึง 5 ล้านตันต่อปี ซึ่งหลังจากการเก็บเกี่ยว จะเหลือฟางข้าวที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการทำนา เกษตรกรนิยมนำฟางข้าวมากำจัดโดยการเผา ทำลาย ส่งผลให้เกิดมลพิษทางอากาศ (เทวรัตน์ ตรีอำรรรค วีรชัย อัจหาญ ธนากร แนวกลาง และ เบญจวรรณ วานมนตรี, 2558) และยังทำลายความสมบูรณ์ของหน้าดินอีกด้วย ฟางข้าวเป็นวัสดุ เหลือทิ้งทางการเกษตรที่เป็นพืชเส้นใย (Fiber) ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ (เทวรัตน์ ตรีอำรรรค วีรชัย อัจหาญ ธนากร แนวกลาง และเบญจวรรณ วานมนตรี, 2558) โดยฟางข้าวจะมีเซลลูโลส 36.5% เฮมิเซลลูโลส 33.8% และลิกนิน 12.3% เป็นองค์ประกอบหลัก (Nie, Liu, She, Sun and Xu, 2013) ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้วัตถุดิบ ที่น่าสนใจอีกประเภทหนึ่ง คือ ขยะเศษอาหาร โดยข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษ ระบุว่าในปี 2560 มีขยะเศษอาหารคิดเป็นร้อยละ 64 ของปริมาณทั้งหมด หรือ 254 กิโลกรัมต่อคนต่อปี แต่ประเทศไทยมีการนำขยะเศษอาหารไปใช้ประโยชน์น้อยมาก เนื่องจากเทศบาลส่วนมากไม่มีการแยกขยะ และ ในส่วนของ กทม. สามารถรีไซเคิลขยะอาหารได้เพียง ร้อยละ 2 เท่านั้น ขยะเศษอาหารจึงเป็นอีกหนึ่ง วัตถุดิบที่น่าสนใจ ซึ่งสามารถย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศ และเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้ ซึ่งก๊าซ ชีวภาพถือได้ว่าเป็นพลังงานทดแทนที่มีความเหมาะสมสำหรับชุมชนในประเทศไทย เนื่องจากการ ผลิตก๊าซชีวภาพสามารถกำจัดของเสีย หรือการนำของเสียมาใช้ประโยชน์ และผลิตพลังงานทดแทน ได้ในเวลาเดียวกัน ก๊าซชีวภาพเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศที่ ประกอบด้วยกระบวนการทางชีวเคมีของกลุ่มจุลินทรีย์ที่ทำงานร่วมกันในระบบ โดยเริ่มจาก กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้ กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเล็กลง และเป็นสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการสร้างกรดต่อไป จากนั้น เมื่อเข้าสู่กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) แบคทีเรียในกลุ่มนี้จะเปลี่ยนน้ำตาล กรดอะมิโน กลีเซอรอล และกรดไขมันให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก กรดบิวทีริก กรดโพรไพโอนิก



1703872899

VRU_1Thesis 61654800104 thesis / rev: 04082566 22:23:58 / seq: 32

และกรดบิวทีริก เป็นต้น จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการอะซิโตจีเนซิส (Acetogenesis) แบคทีเรียในกระบวนการนี้จะรีดิวซ์คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนให้กลายเป็นกรดอะซิติก ออกไซด์กรดอินทรีย์ (กรดไพรูโวนิก และกรดบิวทีริก) ให้กลายเป็นกรดอะซิติก จากนั้นในขั้นสุดท้ายคือกระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) ในขั้นตอนนี้จุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนจะทำงานโดยจะเปลี่ยนสารตั้งต้นคือกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทน และสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนต่อไป (อลิศรา เรื่องแสง, 2562)

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการนำฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและขยะเศษอาหาร มาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตก๊าซชีวภาพร่วมกับการใช้มูลสัตว์เป็นแหล่งจุลินทรีย์ เพื่อเป็นทางเลือกในการใช้พลังงานทดแทน อีกทั้งยังเป็นการลดปัญหาการเผาฟางข้าว และขยะเศษอาหารที่เกิดขึ้นจำนวนมากในปัจจุบันอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

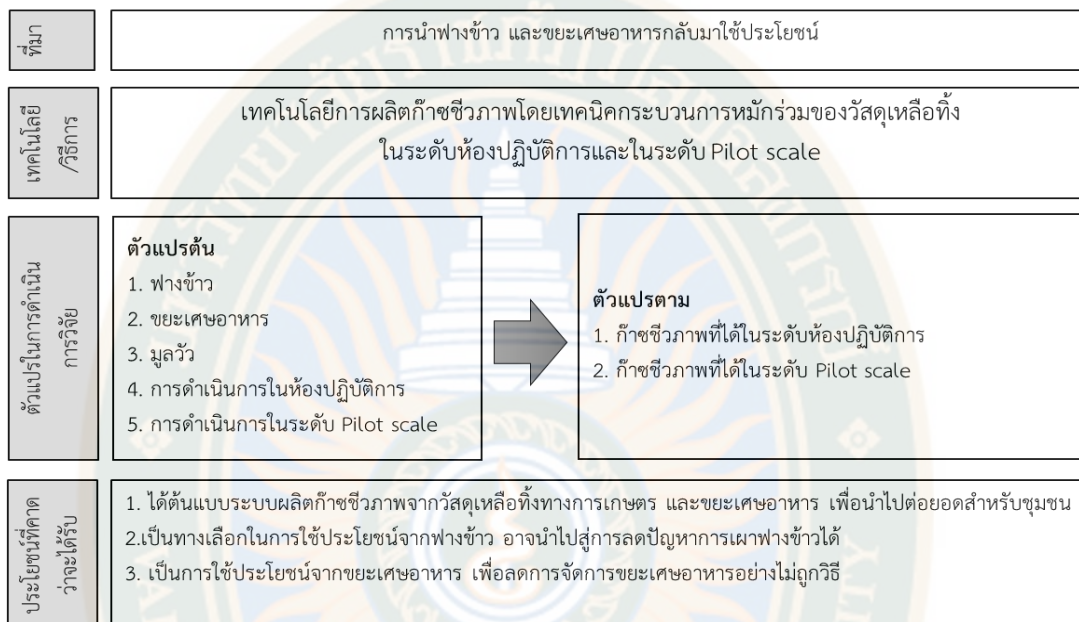
- 1.2.1 เพื่อทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ
- 1.2.2 เพื่อออกแบบและสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่อง
- 1.2.3 เพื่อทดสอบระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่องจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหาร

GRAD VRU



1703872899

1.3 กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

1.4 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการดำเนินการระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่อง (Pilot Scale) จากการหมักร่วมแบบไร้อากาศของฟางข้าวและขยะเศษอาหาร และใช้มูลวัวเป็นแหล่งของเชื้อจุลินทรีย์ กำหนดปริมาณของแข็ง (Total Solid) ที่เข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ และในระดับ Pilot scale คือ ร้อยละ 2.5 โดยฟางข้าวจะถูกปรับสภาพทางกายภาพให้มีขนาดเล็กกลก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ดำเนินการหมักกระทั่งเกิดก๊าซชีวภาพติดตามการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น และพารามิเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้องจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะ Steady Stage จากนั้นดำเนินการออกแบบและสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับต้นแบบ และในขั้นสุดท้ายทดสอบระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับต้นแบบ ดำเนินการหมักกระทั่งเกิดก๊าซชีวภาพ ติดตามการเปลี่ยนแปลงของเปอร์เซ็นต์ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น และพารามิเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้อง

1.5 คำจำกัดความที่ใช้ในวิจัย

ก๊าซชีวภาพ	คือ	ก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักร่วมแบบไม่ใช้ออกาศโดยใช้วัตถุดิบ คือ ฟางข้าว ขยะเศษอาหาร และมีมูลวัวเป็นแหล่งเชื้อจุลินทรีย์
ระยะเวลาการ Start up ระบบ	คือ	ช่วงที่ให้จุลินทรีย์ในระบบได้ปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมภายในถังปฏิกรณ์
ระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่อง (Pilot Scale)	คือ	ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของฟางข้าวและมูลสัตว์ในถังปฏิกรณ์ขนาด 3 ลบ.ม. ลักษณะการเติมสารอินทรีย์เป็นแบบ Semi-Batch Reactor ภายใต้สภาวะไร้อากาศ รวมถึงระบบการปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ
วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	คือ	ฟางข้าวที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวหลังจากการทำนา

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้ต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และขยะเศษอาหาร เพื่อนำไปต่อยอดสำหรับชุมชน
- 1.6.2 เป็นทางเลือกในการใช้ประโยชน์จากฟางข้าว อาจนำไปสู่การลดปัญหาการเผาฟางข้าวได้
- 1.6.3 เป็นการนำประโยชน์จากขยะเศษอาหาร เพื่อลดการจัดการขยะเศษอาหารอย่างไม่ถูกวิธี

GRAD VRU



1703872899

VRU :Thesis 61654800104 thesis / recv : 04082566 22:23:58 / seq: 32

บทที่ 2

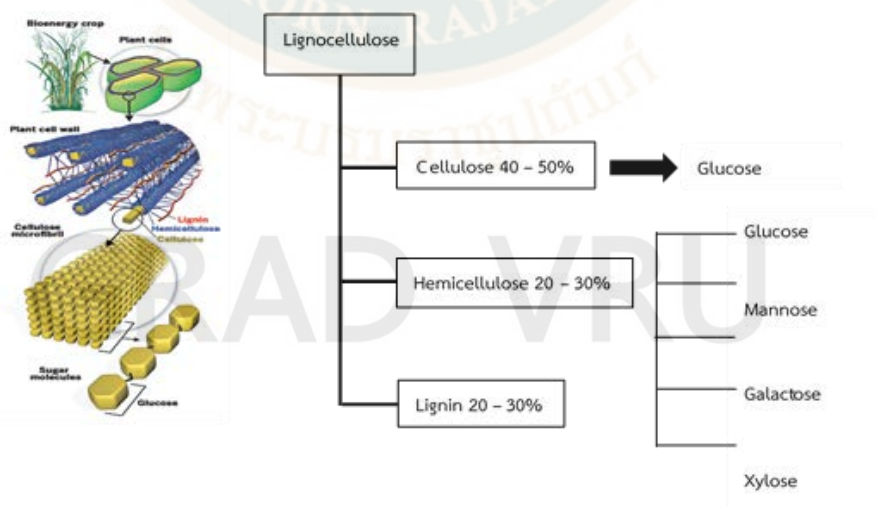
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผู้วิจัยได้ศึกษา “ระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนําร่องจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหาร” โดยศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัย ดังนี้

- 2.1 วัสดุลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose)
- 2.2 ขยะเศษอาหาร (Food Waste)
- 2.3 มูลวัว (Cow Dung)
- 2.4 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)
- 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วัสดุลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose)

วัสดุลิกโนเซลลูโลสซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานทางชีวภาพที่มีปริมาณมากที่สุดในธรรมชาติ มีองค์ประกอบที่เป็นพอลิเมอร์หลักอยู่ 3 ส่วน คือ ลิกนิน (Lignin) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และเซลลูโลส (Cellulose) "ลิกโนเซลลูโลส" เป็นชื่อที่สื่อถึงเซลลูโลสซึ่งเชื่อมอยู่กับลิกนินในส่วนผนังเซลล์ของพืช องค์ประกอบส่วนที่เป็นเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลมีชื่อเรียก 2 ส่วน ที่รวมกันนี้ว่าโฮโลเซลลูโลส (Holocellulose)



ภาพที่ 2 องค์ประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลส

ที่มา: ปิติพร มโนคุ่น (2562)

สัดส่วนของลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส จะแตกต่างกันไปตามชนิดของพืช (ภาพที่ 2) เช่น เนื้อไม้พบเซลลูโลสประมาณร้อยละ 40 – 50 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 25 – 40 ลิกนินร้อยละ 15 - 25 ฟางข้าวพบเซลลูโลสประมาณร้อยละ 30 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 50 ลิกนินร้อยละ 15 วัสดุในกลุ่มหญ้าจะมีเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเล็กน้อย โดยมีเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 25-50 ในขณะที่มีเซลลูโลสร้อยละ 25 – 40 และลิกนินร้อยละ 10 – 30 สำหรับวัสดุที่เป็นไม้ยืนต้น เช่น ยูคาลิปตัสหรือต้นสนจะมีเซลลูโลสสูงคือร้อยละ 40-55 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 11-40 และลิกนินร้อยละ 10-30 เป็นต้น

2.1.1 ผลผลิตข้าวภายในประเทศไทยทั้งนาปีและนาปรัง

ประเทศไทยมีเนื้อที่เพาะปลูกข้าวนาปีในปี 2562 ประมาณ 59,980,731 ไร่ และนาปรังประมาณ 12,066,980 ไร่ (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) ปริมาณผลผลิตข้าวย้อนหลัง 5 ปีดังแสดงในตารางที่ 1 และ 2 (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) โดยเก็บเกี่ยวข้าวที่ 1 กิโลกรัม จะได้ฟางข้าว 0.7 - 1.4 กิโลกรัม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าว ความสูงของการตัดยอด และความชื้น ดังนั้นเมื่อคำนวณจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตต้นต่อปีของข้าวนาปีทั้งประเทศ พบว่ามีปริมาณฟางข้าวมากถึง 17 ล้านตันต่อปี และในส่วนนาปรัง พบว่ามีฟางข้าวมากถึง 5 ล้านตันต่อปี (Gummert et al., 2020)

ตารางที่ 1 ผลผลิตของนาปีย้อนหลังปี 2557 – 2561

ผลผลิต (ตันต่อปี)	2561	2560	2559	2558	2557
ภาคเหนือ	7,847,727	7,209,510	7,137,534	6,801,718	7,816,734
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	11,706,257	12,189,325	12,800,343	12,230,973	12,467,579
ภาคกลาง	5,250,274	5,216,733	4,994,559	4,904,410	5,599,613
ภาคใต้	373,598	318,781	303,909	374,438	386,038
รวม	25,177,856	24,934,349	25,236,345	24,311,539	26,269,964
ฟางข้าว*	17,624,499	17,454,044	17,665,442	17,018,077	18,388,975

ตารางที่ 2 ผลผลิตของนาปรังย้อนหลังปี 2557 – 2561

ผลผลิต (ตันต่อปี)	2561	2560	2559	2558	2557
ภาคเหนือ	3,139,976	2,805,927	1,144,352	2,339,551	3,978,783
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ	1,016,166	767,245	399,933	606,677	1,215,358
ภาคกลาง	3,717,454	2,911,444	1,454,551	2,244,669	4,348,192
ภาคใต้	90,958	136,229	110,632	156,018	129,760
รวม	7,964,554	6,620,845	3,109,468	5,346,915	9,672,093
ฟางข้าว*	5,575,188	4,634,592	2,176,628	3,742,841	6,770,465

2.1.2 ฟางข้าว (Rice Straw)

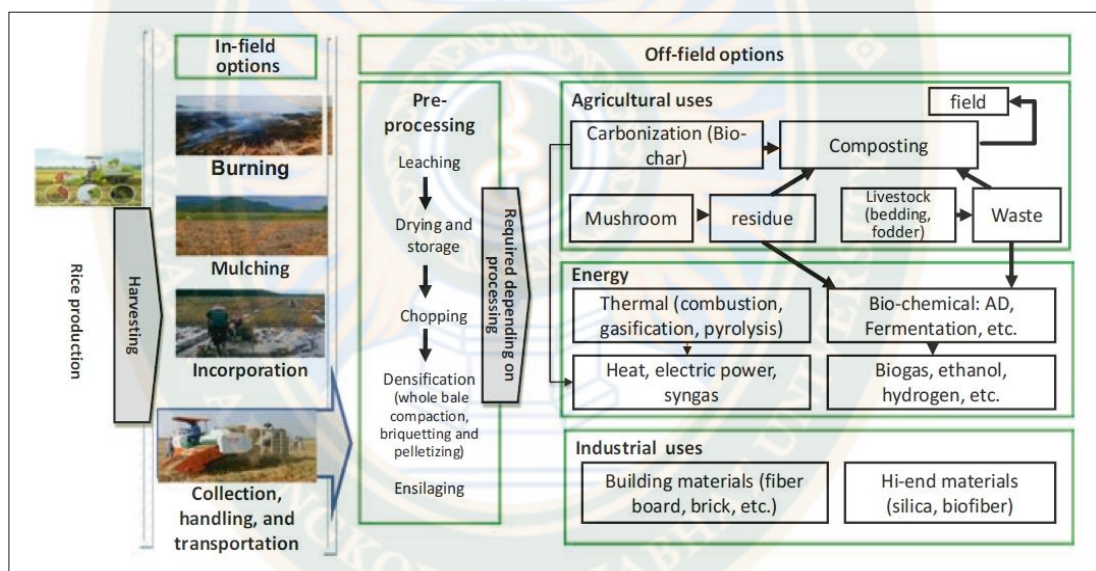
ฟางข้าวเป็นผลพลอยได้จากการทำนาซึ่งมีจำนวนมาก (ภาพที่ 3) โดยองค์ประกอบของฟางข้าวจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพความอุดมสมบูรณ์ของดิน น้ำ ปริมาณปุ๋ยที่ใส่ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีไนโตรเจน 0.75% ฟอสฟอรัส 0.15% โพแทสเซียม 0.25% ซิลิกา 11.0% แมกนีเซียม 0.25% กำมะถัน 0.80% เมื่อเผาฟางข้าวแล้ว จะทำให้เกิดสารระเหยมากถึง 74.4% ซึ่งการเผาฟางข้าวถือเป็นปัญหาสำคัญที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน ดังนั้นการนำฟางข้าวมาใช้ประโยชน์เพื่อเป็นพลังงานทดแทนถือได้ว่าเป็นอีกแนวทางหนึ่งของการจัดการฟางข้าว นำไปสู่การลดปัญหาการเผาและส่งผลกระทบต่อภาวะโลกร้อน (เทวรัตน์ ตรีอำนาจ วีรชัย อัจหาญ ธนากร แนวกลาง และเบญจวรรณ วานมนตรี, 2558)



ภาพที่ 3 แสดงตัวอย่างฟางข้าว

ที่มา: เทวรัตน์ ตรีอำนาจ วีรชัย อัจหาญ ธนากร แนวกลาง และเบญจวรรณ วานมนตรี (2558)

ผลกระทบที่เกิดจากการเผาฟางข้าวนั้นทำให้พื้นที่เพาะปลูกเสื่อมโทรม เฝ้าผาญ อินทรีย์วัตถุ และธาตุอาหารในดิน การทำลายโครงสร้างของดินที่เหมาะสมกับการเพาะปลูก ทั้งยังส่งผลต่อการเกิดฝุ่นละออง ก๊าซพิษ ส่งผลเสียต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างการจัดการฟางข้าว แสดงดังภาพที่ 4 (Gummert et al., 2020) ซึ่งจากรูปพบว่าฟางข้าวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายรูปแบบ เช่น การนำไปทำปุ๋ย การนำไปเพาะเห็ด การเผาทำเชื้อเพลิง รวมถึงการนำไปเข้ากระบวนการหมักแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ อย่างไรก็ตามนอกจากการใช้ประโยชน์แล้วเกษตรกรยังเผาทำลายฟางข้าว เพื่อง่ายต่อการจัดการอีกด้วย ซึ่งการเผาทำลายฟางข้าวถือเป็นการเผาในที่โล่ง ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศเป็นอย่างมาก



ภาพที่ 4 ตัวอย่างการจัดการฟางข้าว

ที่มา: Gummert et al. (2020)

2.1.3 การปรับสภาพก่อนการย่อยวัสดุกลีโนเซลลูโลส (Pretreatment)

การปรับสภาพขั้นต้น คือ เพื่อแยกคาร์โบไฮเดรตออกจากการยึดจับของลิกนิน และขณะเดียวกันจะต้องมีการทำลายโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลให้น้อยที่สุด นอกจากนี้การปรับสภาพนั้นยังเพิ่มความสามารถในการเข้าย่อยสลายด้วยเอนไซม์ เพิ่มพื้นที่ผิวและรูพรุนของสับสเตรท

2.1.3.1 การปรับสภาพทางกายภาพ (Physical Pretreatment)

การปรับสภาพทางกายภาพเป็นการทำให้สารตั้งต้นมีขนาดเล็กลงโดยการ การตัด การบด การฉีก การใช้รังสี การใช้ไอน้ำ การใช้น้ำร้อน เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวต่อหน่วยปริมาตรและเพิ่มรูพรุนเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการเข้าทำปฏิกิริยาเป็นการช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการย่อยสลายต่าง ๆ ได้ (Amin et al., 2017)

2.1.3.2 การปรับสภาพทางเคมี (Chemical Pretreatment)

การปรับสภาพทางเคมีเป็นการใช้สารเคมี เช่น สารละลายกรดเจือจาง สารละลายด่างเจือจาง การใช้ตัวทำละลาย เช่น เมทานอล เอทานอล หรืออะซิโตน การใช้แอมโมเนีย ซัลเฟอร์ไดออกไซด์คาร์บอนไดออกไซด์ และสารเคมีอื่น ๆ เช่น EDTA (ethylene diamine tetra – acetic acid) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โปแตสเซียมเปอร์แมงกานेट โอโซน และยูเรีย เป็นต้นวิธีนี้จะละลายส่วนที่เป็นเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เพื่อแยกส่วนที่เป็นเซลลูโลสเพื่อเตรียมสู่ขั้นตอน acid hydrolysis หรือ enzyme hydrolysis (Amin et al., 2017)

2.1.3.3 การปรับสภาพทางชีวภาพ (Biological Pretreatment)

การปรับสภาพทางชีววิทยาเป็นการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส เช่น การใช้ *Trichoderma reesei* และ *Aspergillus niger* สามารถผลิตเอนไซม์ Extracellular cellulolytic ได้เป็นจำนวนมาก ข้อดีของกระบวนการนี้คือ ใช้พลังงานน้อย ไม่ใช้สารเคมี ทำให้เป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตามวิธีการปรับสภาพทางชีวภาพนั้น ใช้เวลานานในการย่อยสลาย และยังคงใช้พื้นที่เป็นจำนวนมาก

2.2 ขยะเศษอาหาร (Food Waste)

ขยะเศษอาหารเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในประเทศไทย การลดขยะอาหารเป็นหนึ่งในเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDG) ซึ่ง UN ได้ตั้งเป้าไว้ในปี ค.ศ. 2030 ขยะอาหารที่เกิดจากการจำหน่ายและการบริโภคทั่วโลกต้องลดลง 50% จากข้อมูลจากกรมควบคุมมลพิษ ระบุว่าในปี 2560 มีขยะอาหารคิดเป็นร้อยละ 64 ของปริมาณทั้งหมด หรือ 254 กิโลกรัมต่อคนต่อปี แต่ไทยมีการนำขยะอาหารไปใช้ประโยชน์น้อยมาก เนื่องจากเทศบาลส่วนมากไม่มีการแยกขยะ และในส่วนของ กทม. สามารถรีไซเคิลขยะอาหารได้เพียงร้อยละ 2 เท่านั้น จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า มีการบริหารจัดการขยะเศษอาหารโดยมีวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ เผาในเตาเผา (Incinerate) หรือนำไปผลิตเป็นปุ๋ยร้อยละ 43 ของขยะมูลฝอยทั้งหมดและอีกร้อยละ 57 ถูกนำไปฝังกลบหรือถมกลางแจ้ง ซึ่งประเทศไทยมีสถานที่ถมขยะกลางแจ้งกระจายอยู่ทั่วประเทศจนทำให้เกิดปัญหามลพิษต่าง ๆ ตามมา เช่น การกระจายของเชื้อโรคต่าง ๆ ลงสู่แม่น้ำ ลำคลอง เนื่องจากขยะอาหารเป็นพาหะนำโรค อีกทั้งยังส่งกลิ่นเหม็นและ



1703872899

VRU -Thesis 61654800104 thesis / recv: 04082566 22:23:58 / seq: 32

ส่งผลต่อสุขภาพและการดำรงชีวิตของประชาชน นอกจากนี้ ชาวไทยส่วนใหญ่มักทิ้งขยะอาหารรวมกับขยะทั่วไป ทำให้การคัดแยกขยะก่อนการนำไปรีไซเคิลและกำจัดเป็นไปได้อย่างยากลำบาก เช่น การกำจัดขยะโดยการเผาขยะมูลฝอยที่มีขยะอาหารปนอยู่ทำให้เกิดความชื้นสูงต้องใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงสูง ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษจากการเผามากกว่าขยะที่มีความชื้นต่ำ (สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย, 2562)

องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (UNFAO) ร่วมกับโครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (UNEP) ได้เผยแพร่ข้อเสนอแนะในการแก้ปัญหาขยะอาหารและอาหารส่วนเกิน โดยแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน ตามที่แสดงดังภาพที่ 5 เรียงจากวิธีการที่ควรดำเนินการมากที่สุด (Most preferable option) ไปยังวิธีที่ควรดำเนินการน้อยที่สุดดังต่อไปนี้

1. การป้องกัน (prevention) คือ การป้องกันการก่อให้เกิดขยะอาหารหรืออาหารส่วนเกิน สำหรับภาคเอกชนอาจหมายถึงการมีระบบการส่งสินค้าที่สอดคล้องกับความต้องการเพื่อลดปริมาณสินค้าเหลือ หรือ สำหรับหน่วยงานรัฐอาจหมายถึงการเก็บค่าธรรมเนียมในการจัดเก็บขยะอาหารตามปริมาณขยะ เป็นต้น

2. การจัดสรรอาหารที่ยังสามารถบริโภคได้เพื่อประโยชน์สูงสุด (optimization) เช่น (1) การบริจาคให้แก่ผู้ยากไร้หรือพนักงาน (2) การจำหน่ายในร้านค้าพิเศษในราคาถูก และ (3) การจำหน่ายให้เป็นอาหารสัตว์ ทั้งนี้ รัฐอาจให้การส่งเสริมโดยการให้แรงจูงใจด้านภาษี หรือการสนับสนุนองค์กรที่เป็นคนกลางในการกระจายอาหาร

3. การนำมาผลิตเพื่อใช้ใหม่ (recycle) คือ การนำขยะอาหารไปเข้ากระบวนการผลิตเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ประกอบด้วย การผลิตก๊าซชีวภาพ (biogas) โดยผ่านกระบวนการหมักย่อยแบบไร้อากาศ และการผลิตปุ๋ยเพื่อการเกษตร

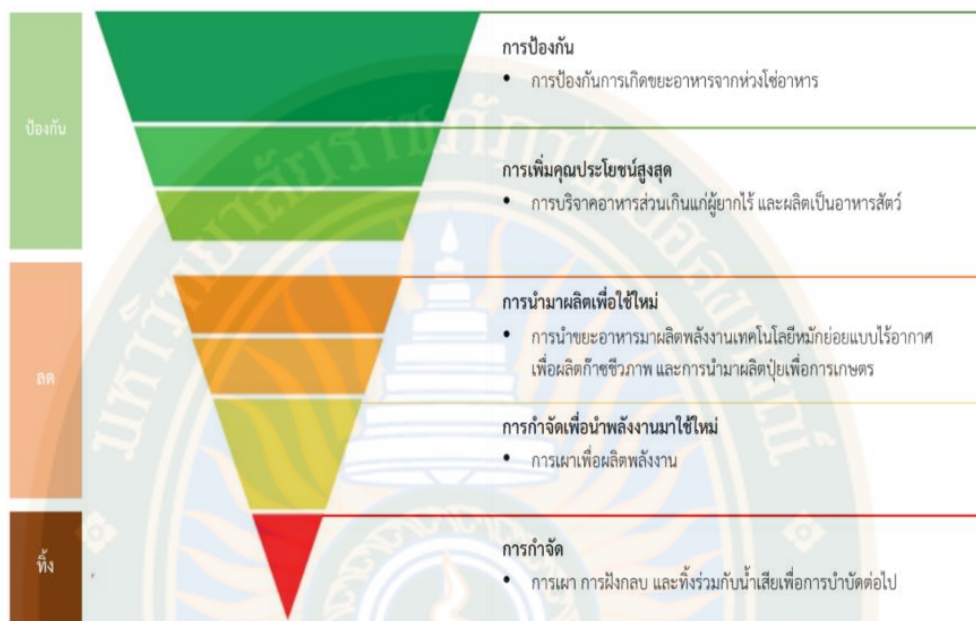
4. การกำจัดเพื่อนำพลังงานมาใช้ใหม่ (recovery) คือ การนำขยะอาหารที่มีความชื้นต่ำมาเผาเพื่อผลิตเป็นพลังงานความร้อน ทั้งนี้ ขยะอาหารที่มีความชื้นสูงต้องใช้พลังงานในการเผาสูงและทำให้เกิดมลพิษมากกว่าขยะอาหารที่มีความชื้นต่ำ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการทำให้ขยะแห้ง (dehydrate) ก่อนเผาด้วยพลังงานความร้อน

5. การกำจัด (disposal) คือ การนำขยะอาหารที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้แล้วไปกำจัดโดยการเผา หรือ ฝังกลบ



1703872899

VRU -Thesis 61654800104 thesis / recv: 04082566 22:23:58 / seq: 32



ภาพที่ 5 พีระมิดลำดับขั้นของการบริหารจัดการห่วงโซ่อาหารเพื่อลดปริมาณขยะอาหาร
ที่มา: สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย (2562)

2.3 มูลวัว (Cow Dung)

มูลวัวถือเป็นซากที่เกิดจากการกินอาหารของวัว ซึ่งวัวเป็นสัตว์กินพืช ดังนั้นในมูลวัวนอกจากจะมีกลุ่มจุลินทรีย์หลายประเภทแล้ว ยังมีองค์ประกอบของเซลล์ลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินอีกด้วย นอกจากนี้ยังมีแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น ซัลเฟอร์ เหล็ก แมกนีเซียม โพแทสเซียม และทองแดงเป็นส่วนประกอบอีกด้วย ซึ่งมูลวัวสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย ดังแสดงในภาพที่ 6 เช่น การทำปุ๋ยอินทรีย์ การนำไปเลี้ยงไส้เดือน อย่างไรก็ตาม หนึ่งในประโยชน์ของมูลวัวคือสามารถเป็นแหล่งจุลินทรีย์สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีวัตถุดิบเป็นวัสดุลิกโนเซลลูโลส และเมื่อการผลิตก๊าซชีวภาพเสร็จสิ้น ยังสามารถนำกากเหลือทิ้งจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยอินทรีย์ได้อีกด้วย

กลุ่มจุลินทรีย์ที่อยู่ในมูลวัวมีหลายชนิด ซึ่งมีการศึกษาในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์กลุ่มจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นกลุ่มที่สามารถผลิตก๊าซมีเทนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพได้ เช่น *Methanobacteriaceae*, *Methanomicrobiaceae*, *Methanocellaceae* และ *Methanosarcinaceae* (Kim et al., 2014) *Escherichia coli*, *Pseudomonas sp*, *Bacillus sp*, *Staphylococcus sp* (Yakubu and Abdullahi, 2020) จากรายชื่อตัวอย่างจุลินทรีย์ที่พบในมูลวัว แสดงให้เห็นว่าการนำมูลวัวมาใช้เป็นแหล่งจุลินทรีย์สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพจึงมีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 6 การใช้ประโยชน์จากมูลวัว
ที่มา: Anan et al. (2021)

2.4 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบหลัก ร้อยละ 55 – 75 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 25 – 45 ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) นอกจากนี้จะเป็นไอน้ำ และก๊าซชนิดอื่น ๆ เช่น ไนโตรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ แอมโมเนีย ไฮโดรเจน การผลิตก๊าซชีวภาพเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติโดยการย่อยแบบไร้อากาศของสารอินทรีย์ เมื่อมีจุลินทรีย์ สารอินทรีย์ และอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดก๊าซชีวภาพซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วยก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในธรรมชาตินั้นก๊าซชีวภาพมักจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการหมักและมีสภาวะไร้อากาศ เช่น ก้นบ่อ ก้นแม่น้ำ ก้นทะเลสาบ หนองน้ำ นาข้าวที่มีน้ำท่วมขัง ระบบย่อยอาหารของสัตว์เคี้ยวเอื้อง และบ่อฝังกลบขยะ ในกระบวนการย่อยแบบไร้อากาศผลิตก๊าซชีวภาพ มีจุลินทรีย์เกี่ยวข้อง ได้แก่ แบคทีเรียในกระบวนการหมัก (ย่อยสลายสารโมเลกุลใหญ่และผลิตภัณฑ์) แบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจนทำการออกซิไดซ์กรดอินทรีย์ และจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนผลิตมีเทน แบคทีเรียในกระบวนการหมักสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น ไขมัน โปรตีน คาร์โบไฮเดรต กรดนิวคลีอิก ให้มีขนาดเล็กลงและละลายน้ำ เช่น กรดไขมันสายโซ่ยาว กลีเซอรอล

กรดอะมิโน น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายต่อไปเป็นกรดไขมันสายโซ่สั้น (กรดอะซิติก กรดบิวทิริก กรดโพรพิโอนิก) แอลกอฮอล์ ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ กรดไขมันสายโซ่สั้นถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไฮโดรเจนคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก โดยจุลินทรีย์กลุ่มอะซิโตเจน ไฮโดรเจนคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก ถูกเปลี่ยนไปเป็นมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์โดยจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนผลิตมีเทน

กระบวนการย่อยแบบไร้อากาศถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ และนำก๊าซชีวภาพมาใช้เป็นแหล่งพลังงานอย่างยาวนาน ก๊าซชีวภาพจากระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ เป็นแหล่งพลังงานในปัจจุบันที่มีการนำมาใช้ประโยชน์ทดแทนแหล่งพลังงานจากฟอสซิล (Fossil) เช่น ถ่านหิน น้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติได้อย่างดี (Kamada, Nakamura, Tezuka, Hasegawa and Maruta, 2014) ก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ จึงเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่สำคัญทั้งในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าแหล่งพลังงานจากฟอสซิล อีกทั้งเป็นพลังงานสะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Gu, Chen, Liu, Zhou and Zhang, 2014) มีเทนในก๊าซชีวภาพจะถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้เพื่อให้ได้ความร้อนนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ซึ่งมีเทนจะมีค่าพลังงานประมาณ 55,525 กิโลจูลต่อกิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในอุตสาหกรรมเกษตร และอุตสาหกรรมอาหารมีของเสียอินทรีย์ปริมาณมาก ส่งผลให้อุตสาหกรรมดังกล่าวมีการนำเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพมาใช้ในการจัดการของเสีย และสามารถเก็บเกี่ยวพลังงานมาใช้ภายในโรงงานได้อย่างเพียงพอ เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพสามารถลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกออกสู่สิ่งแวดล้อม ลดกลิ่น และลดการปลดปล่อยน้ำเสีย นอกจากนี้ น้ำทิ้งและกากตะกอนที่ผ่านการย่อยจากระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ ซึ่งมีไฮโดรเจนและฟอสฟอรัสสูงสามารถกลับมาใช้เป็นสารปรับปรุงดินหรือปุ๋ยสำหรับพืชได้ (Zuo, Wu, Zhang and Dong, 2013) โดยกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. กระบวนการย่อยสลาย (Hydrolysis) เป็นการทำงานของกลุ่มจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการย่อยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเดี่ยวหรือสารละลายโมเลกุลเดี่ยว ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดต่อไป ดังภาพที่ 7 ในขั้นตอนนี้จุลินทรีย์หลังเอนไซม์ออกมาเพื่อย่อยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น จุลินทรีย์กลุ่มย่อยโปรตีนจะมีการหลั่งเอนไซม์โปรติเอส (Proteases) เพื่อเปลี่ยนโปรตีนเป็นกรดอะมิโน จุลินทรีย์กลุ่มย่อยเซลลูโลสและไซแลน จะมีการหลั่งเอนไซม์เซลลูเลส (Cellulases) และไซแลนเนส (Yanases) เพื่อเปลี่ยนเซลลูโลสและไซแลนเป็นไซโลสและกลูโคส จุลินทรีย์กลุ่มย่อยไขมันจะมีการหลั่งเอนไซม์ไลเปส (Lipases) เพื่อเปลี่ยนไขมันเป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล ในกรณีที่สารตั้งต้นมีองค์ประกอบเป็นชีวมวลลิกโนเซลลูโลส



1703872899

VRU -Thesisis 61G54800104 thesisis / recv: 04082566 22:23:58 / seq: 32

(Lignocellulosic Biomass) กระบวนการไฮโดรไลซิสจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ไฮโดรไลซิสจึงเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีของแข็งทั้งหมดสูง หรือชีวมวลลิกโนเซลลูโลสสูง ดังนั้นการตรวจวัดอัตราการย่อยสลายและศักยภาพในการผลิตมีเทนของวัตถุดิบแต่ละชนิดจึงเป็นข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และระยะเวลาในการกักเก็บสารอินทรีย์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0.1 – 0.3 ต่อวัน ซึ่งพบว่าจุลินทรีย์ในสกุล *Clostridium*, *Bacillus*, *Peptococcus*, *Micococcus*, *Stapylococcus* และ *Vibrio* เป็นจุลินทรีย์ที่มีบทบาทในกระบวนการไฮโดรไลซิสในสภาวะไร้อากาศ อัตราการย่อยสลายโปรตีนจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของโปรตีน โปรตีนที่ละลายน้ำจะย่อยสลายได้ง่ายและโปรตีนที่เป็นเส้นใยจะย่อยสลายได้ยาก แต่อัตราการย่อยสลายไขมันขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค ค่าพีเอช แรงตึงผิว และจุลินทรีย์ในระบบ (Kangle, Kore, Kore and Kulkarni, 2012)

2. กระบวนการอะซิโดจีเนซิส (Acidogenesis) ในกระบวนการนี้แบคทีเรียเปลี่ยนน้ำตาล กรดอะมิโน กลีเซอรอล และกรดไขมัน ที่ได้จากการบวนการไฮโดรไลซิสเป็นกรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดฟอร์มิก และกรดบิวทริก ดังภาพที่ 7 นอกจากนี้ยังเปลี่ยนไปเป็น แอลกอฮอล์ คาร์บอนไดออกไซด์ คีโตน และไฮโดรเจน ส่วนใหญ่น้ำตาลและกรดอะมิโนจะเป็นสารตั้งต้นหลักในกระบวนการหมักกรด จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องเป็นกลุ่มที่พบในกระบวนการไฮโดรไลซิสและส่วนใหญ่อยู่ในสกุล *Clostridium* สามารถใช้น้ำตาลและกรดอะมิโนได้ดี และเปลี่ยนไปเป็นกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 3 อะตอม (กรดแลคติกและกรดโพรพิโอนิก) หรือกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอน 2 และ 4 อะตอม (กรดอะซิติกและกรดบิวทริก) กรดแลคติกและกรดโพรพิโอนิกจะเกิดในสภาวะไม่ปกติเช่น ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate) มากเกินไป ในสภาวะปกติจะเกิดกรดอะซิติก กรดบิวทริก เอทานอล คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน (Kangle, Kore, Kore and Kulkarni, 2012)

3. กระบวนการอะซิโตจีเนซิส (Acetogenesis) กระบวนการนี้แบคทีเรียรีดิวซ์ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนไปเป็นกรดอะซิติก ออกซิไดซ์กรดอินทรีย์ (กรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทริก) ไปเป็นกรดอะซิติก การรีดิวซ์คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนไปเป็นกรดอะซิติกเกิดโดยแบคทีเรียกลุ่มไฮโมอะซิโตเจน เช่น *Butyribacterium methylophicum* เป็นต้น การออกซิไดซ์กรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทริกไปเป็นกรดอะซิติกเกิดโดยแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจน เช่น *Desulfovibrio sp.* เป็นต้น ดังภาพที่ 7

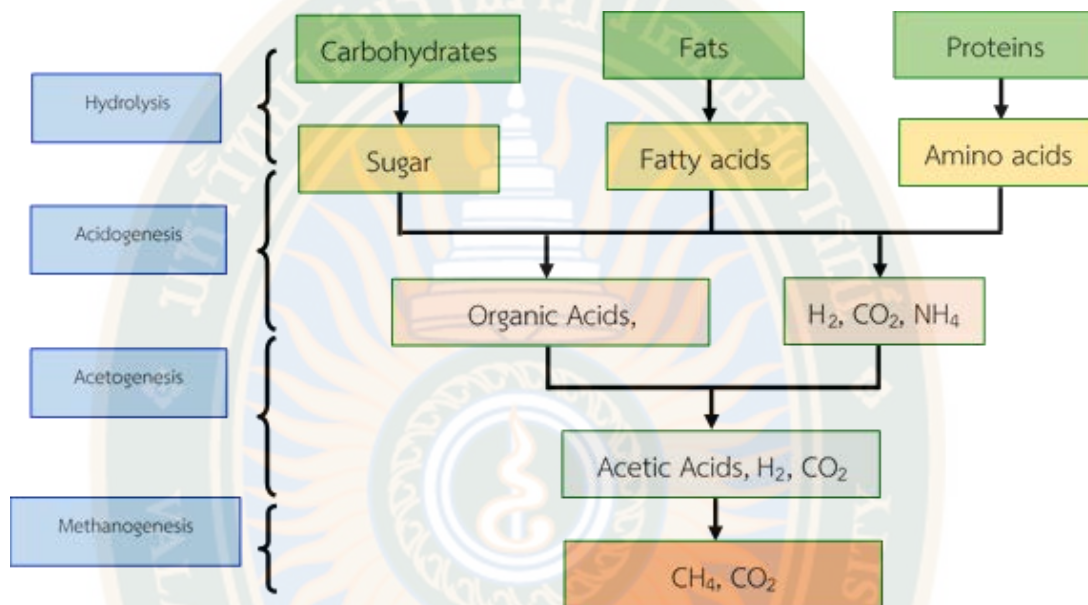
4. กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจน เช่น *Methanosar-cinales*, *Methanobacteriales*, *Methanomicrobiales* ในการ



1703872899

VRU 1Thesis 61G54800104 thesis / recv: 04082566 22:23:58 / seq: 32

เปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นที่เป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ให้เป็นก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

2.4.1 แบบที่เรียที่มีบทบาทในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

กระบวนการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างซับซ้อนไปเป็นมีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และสารอินทรีย์ เกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะไร้อากาศ หรือมีปริมาณออกซิเจนเพียงเล็กน้อย สามารถแบ่งกลุ่มออกเป็น 4 กลุ่ม ดังนี้ 1) กลุ่มแบคทีเรียย่อยสลาย 2) กลุ่มแบคทีเรียที่ช่วยในการหมัก หรือกลุ่มแบคทีเรียที่ช่วยในการผลิตกรด 3) กลุ่มแบคทีเรียผลิตกรดอะซิติก และ 4) กลุ่มแบคทีเรียผลิตมีเทน ในแต่ละกลุ่มของแบคทีเรียมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน และมีสภาวะการเจริญเติบโตที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3 แต่อย่างไรก็ตาม แบคทีเรียแต่ละกลุ่มจะมีความทำงานร่วมกัน หรือเอื้อประโยชน์ต่อกัน ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียกลุ่มแรกจะย่อยสลายอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง ซึ่งจะถูกนำไปใช้เป็นซับสเตรตสำหรับแบคทีเรียกลุ่มถัดไปจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย การทำงานร่วมกันในลักษณะนี้นอกจากจะเป็นการสนับสนุนกันในด้านซับสเตรตแล้วยังเป็นการลดการยับยั้งโดยสารผลิตภัณฑ์ในกระบวนการอีกด้วย นอกจากนี้ แบคทีเรียแต่ละกลุ่มยังมีการเจริญแบบสัมพันธ์กันในรูปแบบอื่น ๆ เช่น แบคทีเรียกลุ่มหนึ่งมีการผลิตสารที่แบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งสามารถนำไปใช้ในกระบวนการออกซิเดชันรีดักชัน (Oxidation – Reduction) ได้ เป็นต้น (Amani, Nosrati, and Sreekrishnan, 2010)

ตารางที่ 3 ตัวอย่างชนิดและคุณสมบัติของแบคทีเรียที่มีบทบาทในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

ขั้นตอน	การย่อยสลาย	การผลิตกรด	การผลิตอะซิติก	การผลิตมีเทน
ตัวอย่าง แบคทีเรีย	<i>Streptococcus</i> <i>Peptococcus</i> <i>Micrococcus</i> <i>Clostridium</i>	<i>Bacterioides</i> <i>Butyribacterium</i> <i>Propionobacterium</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Ruminococcus</i> <i>Clostridium</i>	<i>Syntrophomonas</i> <i>Syntrophobacter</i> <i>Acetobacterium</i> <i>Clostridium</i>	<i>Metanosaeta</i> <i>Methanosarcina</i> <i>Methanobacterium</i> <i>Methanospitillum</i> <i>Methanobrevibacter</i> <i>Methanothermo</i> <i>bacter</i>
ระยะเวลา	0.5 – 1.8 วัน	0.5 – 1.8 วัน	2.5 – 10 วัน	0.5 – 9 วัน

2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศอาศัยการทำงานของแบคทีเรียและจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนหลายชนิดที่เจริญเติบโตร่วมกัน ดังนั้น ในการเริ่มต้นดำเนินระบบจึงต้องควบคุมปัจจัยทางเคมีและปัจจัยทางกายภาพในระบบให้เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนและแบคทีเรีย หากไม่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ก็จะทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพส่งผลให้ค่าพีเอชของระบบลดลงและระบบล้มเหลวในที่สุด ดังนั้น สภาวะปัจจัยทางเคมีกายภาพและชีวภาพจึงมีผลต่อการทำงานและการเจริญของแบคทีเรียและจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ปัจจัยทางเคมี ปัจจัยทางกายภาพ และปัจจัยทางชีวภาพที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ มีดังนี้

2.4.2.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาชีวเคมีจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ยังเป็นอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของเซลล์และกิจกรรมของเอนไซม์ภายในเซลล์ส่วนใหญ่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะดำเนินระบบอยู่ในช่วงอุณหภูมิปานกลางเป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 30 – 45 องศาเซลเซียส และช่วงอุณหภูมิสูง เป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50 – 60 องศาเซลเซียส

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อุณหภูมิสูงมีข้อเสียคือจุลินทรีย์ในระบบมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากกว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อุณหภูมิปานกลาง ส่งผลให้ระบบมี

ความเสถียรน้อยกว่าใช้พลังงานในการดำเนินระบบสูงกว่าและความเสี่ยงสูงกว่าในการเกิดปัญหาการยับยั้งด้วยแอมโมเนียจากวัตถุดิบที่มีไนโตรเจนสูง แต่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อุณหภูมิสูงข้อดีคือใช้ระยะเวลาเก็บเก็บของเสียในระบบต่ำ ส่งผลให้มีขนาดถังปฏิกรณ์ชีวภาพเล็กกว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างระบบต่ำด้วย มีเชื้อก่อโรคในน้ำทิ้งหลังกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพน้อย เนื่องจากเชื้อก่อโรคจะเจริญได้น้อยที่อุณหภูมิสูง ย่อยสลายไขมันได้ดี เกิดมวลเซลล์จุลินทรีย์ในระบบน้อย จุลินทรีย์ในระบบมีอัตราการเจริญเติบโตสูง และมีการละลายของวัตถุดิบสูง ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงกว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อุณหภูมิต่ำ ความหนืดของวัตถุดิบลดลงที่อุณหภูมิสูงทำให้การกวนทำได้ง่ายและลดพลังงานในการกวน และการละลายของก๊าซแอมโมเนีย มีเทน ไฮโดรเจน และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ลดลงที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้ความเป็นพิษที่เกิดจากก๊าซแอมโมเนีย มีเทน ไฮโดรเจน และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ในระบบลดลงด้วย

2.4.2.2 ค่าพีเอช (pH)

การผลิตก๊าซชีวภาพเกิดในช่วงค่าพีเอช 6.0 - 8.5 จุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนผลิตมีเทนจะเจริญได้ดีที่ค่าพีเอช 7.0 - 8.5 แต่จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดเจริญได้ดีที่ค่าพีเอช 6.0 - 7.0 ค่าพีเอชจะส่งผลต่ออัตราการเจริญของจุลินทรีย์และส่งผลต่อการละลายของแอมโมเนีย ซัลไฟด์ และกรดอินทรีย์ ซึ่งส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เป็นดัชนีวัดค่าความเป็นกรดหรือด่างในระบบ ค่าพีเอชที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 6.5 - 8.0 ซึ่งเป็นค่าพีเอชของระบบที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่ม ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะถูกยับยั้งเมื่อค่าพีเอชในระบบต่ำกว่า 6.0 หรือสูงกว่า 8.53 จาก แสดงให้เห็นว่าคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในน้ำได้น้อยลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ดังนั้นค่าพีเอชในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อุณหภูมิสูงจะสูงกว่าค่าพีเอชในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่อุณหภูมิต่ำ ซึ่งการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำส่งผลให้เกิดกรดคาร์บอนิกและมีผลให้ค่าพีเอชลดลง ซึ่งพบว่าในระบบผลิตก๊าซชีวภาพนั้นมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชเกิดขึ้นอยู่เป็นประจำ โดยสาเหตุหลักของการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพคือปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ โดยถ้ามีการป้อนสารอินทรีย์เข้าในปริมาณมากเกินไปจะทำให้แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดผลิตกรดไขมันระเหยง่ายในปริมาณมากจนจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนกลุ่มผลิตก๊าซมีเทนไม่สามารถใช้ได้ทัน จึงเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในระบบ ส่งผลให้ค่าพีเอชของระบบลดลง ดังนั้นระบบจะต้องมีความสามารถในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชที่ดี เพื่อรับมือกับกรดไขมันระเหยง่ายและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระบบ โดยระบบผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชด้วยไบคาร์บอเนตบัฟเฟอร์ ดังนั้น ค่าพีเอชในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะขึ้นกับค่าความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ สภาพต่าง (Alkalinity) ในระบบ



1703872899

และองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ในของเหลว แอมโมเนียในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการย่อยสลายโปรตีนที่อยู่ในวัตถุดิบ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

2.4.2.3 สภาพด่าง (Alkalinity)

สภาพด่างเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity) ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอช และยังเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของระบบ กล่าวคือ ถ้าระบบมีค่าความเป็นด่างสูง แสดงว่าระบบมีปริมาณบัฟเฟอร์สูงสามารถรักษาค่าพีเอชของระบบให้คงตัวอยู่ได้นาน โดยไม่เกิดการแปรปรวนของค่าพีเอชได้ง่าย เมื่อมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มขึ้นในระบบ โดยพบว่าค่าความเป็นด่างภายในระบบควรอยู่ในช่วง 1,000 - 3,000 มิลลิกรัมของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร ค่าความเป็นด่างในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศไม่ควรจะต่ำกว่า 2,000 มิลลิกรัมของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร จะช่วยต้านทานกับการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชของระบบได้ดี ดังนั้น ในการควบคุมระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้ทำงานเป็นปกติ จำเป็นต้องรักษาสภาพด่างให้มีค่ามากกว่า 2,000 มิลลิกรัมของแคลเซียมคาร์บอเนตต่อลิตร เพื่อควบคุมค่าพีเอชในระบบให้เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์

2.4.2.4 กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acids, VFAs)

ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายมีความสำคัญในการตรวจสอบสถานะสมดุลของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ กรดไขมันระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทิริก และกรดโพรพิโอนิก เป็นต้น กรดไขมันระเหยง่ายเหล่านี้เป็นสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด หากพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายมากขึ้นในระบบ เป็นสัญญาณเตือนถึงความไม่เสถียรของระบบ ถ้าปล่อยให้มีการสะสมกรดไขมันระเหยง่ายในระบบเป็นเวลานานมีโอกาสจะทำให้ระบบล้มเหลวได้ ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในปริมาณมาก (>2,000 มิลลิกรัมของกรดอะซิติกต่อลิตร) จะส่งผลให้ค่าพีเอชของระบบลดลง และถ้าค่าพีเอชของระบบมีค่าต่ำกว่า 6.5 จะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน หากยังไม่ได้ทำการแก้ไขปล่อยให้ค่าพีเอชลดลงถึง 4.5 - 5.0 ก็จะทำให้ระบบเสียสมดุล เป็นผลให้ระบบล้มเหลวได้ ในสภาวะปกติปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายภายในถังปฏิกรณ์ชีวภาพไม่ควรเกิน 2,000 มิลลิกรัมของกรดอะซิติกต่อลิตร และวิธีการควบคุมระบบที่ดีที่สุดควรให้มีค่าอัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายต่อค่าความเป็นด่างไม่ควรเกิน 0.3 - 0.4 วิธีการแก้ไขให้ระบบกลับสู่สภาพสมดุลอาจทำได้โดยตรวจสอบที่มาของการป้อนสารอินทรีย์ที่มากเกินไป แก้ไขโดยลดการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบ ควรมีบ่อเก็บน้ำเสียสำรองกรณีฉุกเฉิน ถ้าต้องการควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมกับระบบอาจจะใช้วิธีการเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นต้น ไปช่วยปรับค่า



1703872899

VRU -Thesis 61654800104 thesis / recv: 04082566 22:23:58 / seq: 32

ที่เอชให้เหมาะสมต่อการเจริญและการทำงานของจุลินทรีย์ ไม่ควรใช้ปูนขาว (Ca(OH)) เนื่องจากอาจจะทำให้เกิดการอุดตันในระบบได้

2.4.2.5 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์มีหน่วยเป็นน้ำหนักของซีโอดีที่อยู่ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบต่อปริมาตรของถังปฏิกรณ์ชีวภาพต่อวัน (kg-COD/m³.d) อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์มีความสัมพันธ์กับอัตราการไหลของวัตถุดิบเข้าสู่ระบบ (Feeding Rate) ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการรักษาเสถียรภาพของระบบให้คงที่ การเปลี่ยนอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สามารถทำได้โดยเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบ และเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของวัตถุดิบ การเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของวัตถุดิบเข้าสู่ระบบทำได้ง่ายกว่า โดยการควบคุมอัตราการไหลของวัตถุดิบเข้าสู่ระบบให้สัมพันธ์กับระยะเวลาที่เหมาะสมในการสัมผัสกันระหว่างแบคทีเรียกับสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ เพื่อให้ระบบสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ระบบที่ออกแบบให้อัตราการย่อยสลายสูงสามารถรองรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้ 10 – 40 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกรณ์ชีวภาพต่อวัน สำหรับวัตถุดิบที่มีปริมาณของแข็งสูงมีอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมช่วง 1 – 5 กิโลกรัมของแข็งระเหยได้ต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกรณ์ชีวภาพต่อวัน ระบบที่มีบรรทุกสารอินทรีย์สูง หมายถึง วัตถุดิบสามารถย่อยสลายได้สูงต่อหน่วยปริมาตรของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพและระบุขนาดของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ

2.4.3 การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ

การดำเนินการระบบผลิตก๊าซชีวภาพนั้นก่อให้เกิดประโยชน์ด้านการอนุรักษ์พลังงาน อนุรักษ์สิ่งแวดล้อม และการเกษตร ดังนี้

2.4.3.1 การอนุรักษ์พลังงาน ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถนำไปทดแทนพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้

- 1) ก๊าซหุงต้ม (LPG) 0.46 กิโลกรัม
- 2) น้ำมันเบนซิน 0.67 กิโลกรัม
- 3) น้ำมันเตา 0.55 ลิตร
- 4) พลังงานไฟฟ้า 1.40 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง

2.4.3.2 การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม การใช้เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพสามารถลดมลพิษทางน้ำในด้านการจัดการน้ำเสีย ลดการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้



1703872899

VRU -Thesis 61654800104 thesis / recv: 04082566 22:23:58 / seq: 32

2.4.3.3 การเกษตร การใช้เทคโนโลยีสำหรับการใช้ประโยชน์ด้านการเกษตรนั้น สามารถลดปัญหาการเผาไหม้ของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ทั้งยังสามารถเพิ่มแหล่งพลังงาน และ ยังได้มาซึ่งสารปรับปรุงดินสำหรับนำไปใช้งานในพื้นที่เกษตรได้อีกด้วย

2.4.3.4 เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร ถือเป็นการจัดการของเหลือทิ้ง และ มีการใช้ผลพลอยได้อย่างคุ้มค่า รวมถึงการลดการปลดปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมได้เป็นอย่างดี

2.4.3.5 การใช้ก๊าซชีวภาพเพื่อทดแทนแหล่งเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน เช่น นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหุงต้มในครัวเรือน เชื้อเพลิงสำหรับหม้อน้ำในโรงผลิตอาหารสัตว์ เชื้อเพลิงในการอบแห้ง เป็นต้น

2.4.3.6 การใช้ก๊าซชีวภาพเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า โดยนำไปใช้ร่วมกับชุดเครื่องยนต์ ต่อร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทั้งภาคการเกษตร ชุมชน และภาคอุตสาหกรรม ต่อไป

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิจิตรพร เจริญรัตน์ ปรีชา จันทวงษ์ จงจิตร หิรัญลาภ และโจเซฟ เคตารี (2016) ดำเนินการ ผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวร่วมกับมูลสัตว์โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบ สองขั้นตอน โดยมีการแบ่งเป็นถังหมักกรดและถังหมักก๊าซที่มีปริมาตรต่างกัน ซึ่งถังหมักกรดมีขนาด 27.74 ลิตร ถังหมักก๊าซมีปริมาตรหมัก 52.83 ลิตร ป้อนสารอินทรีย์ 9.66 9.83 10.00 และ 9.90 ซีโอดี/ลิตร.วัน ในส่วนประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีอยู่ระหว่าง 89.49-92.84 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมดสูงสุด 57.17 ลิตรต่อวัน และมีองค์ประกอบก๊าซมีเทน 84.87 เปอร์เซ็นต์

วันสพรรัตน์ สวัสดิ์ และนิพนธ์ พิสุทธิไพศาล (2562) ดำเนินการวิจัยการทดสอบ ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่ปลูกในดินเสื่อมโทรม คือ ดินเค็ม โดยอัตราส่วนสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ต่อมูลสุกร ผู้วิจัยกำหนดเป็น 1:2 โดยปริมาตร มีการปรับสภาพทางกายภาพของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 โดยการทำให้มีขนาดเล็ก ลงจากผลการวิจัยพบว่าสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 13 ลิตร ในระยะเวลา 8 วัน ดังนั้นจากงานวิจัยนี้ สามารถสรุปได้ว่าการใช้วัสดุลิกโนเซลลูโลสสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างวัสดุ ลิกโนเซลลูโลสต่อเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความเหมาะสม เพื่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป

Sawasdee and Pisutpaisal (2014) ทำการวิจัยการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซ ชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ โดยแปรผันค่าของแข็งทั้งหมดที่ 5%, 10% และ 15% ตามลำดับ มีการปรับ สภาพทางกายภาพเพื่อให้หญ้าเนเปียร์มีขนาดเล็กลงประมาณ 0.5 ถึง 1 มิลลิเมตร โดยจากการวิจัย พบว่าที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 5% ให้ผลผลิตดีที่สุด โดยเปอร์เซ็นต์มีเทนมีค่า 53% และเมื่อ



1703872899

VRU -Thesis 61654800104 thesis / recv: 04082566 22:23:58 / seq: 32

พิจารณาถึงการวิเคราะห์ค่าความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์พบว่ามีความคุ้มค่าสำหรับการลงทุนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและนำไปใช้ทดแทนก๊าซหุงต้มต่อไป

Okeh, Chukwudi and Frederick (2014) ดำเนินการวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากแกลบ ที่มาจากโรงสีข้าวในประเทศไนจีเรีย โดยทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ และใช้เชื้อจุลินทรีย์ในการเริ่มต้นระบบ ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการวิจัยมีดังนี้ การเจือจางน้ำ ค่าพีเอชตั้งต้น โลหะหนัก และแหล่งไนโตรเจน ที่จะมีผลต่อการหมักที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งอัตราส่วนการเจือจางของวัตถุดิบ ต่อ น้ำ 1: 6 w / v และ ค่าพีเอชตั้งต้นที่ 7 ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดที่ 382 และ 357 มล.ต่อวัน นอกจากนี้การเพิ่มโลหะหนักใกล้ของ (Ni^{2+} , Zn^{2+} , and Cu^{2+}) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของบ่อหมัก โดยการเพิ่ม Ni^{2+} (100 ppm) ที่จะทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุด ดังนั้นจากงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่า แกลบจึงเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกให้กับเกษตรกรได้เป็นอย่างดี

Ghatak and Mahanata (2018) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบผลกระทบของ อุณหภูมิต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศวัสดุลิกโนเซลลูโลสสองชนิดที่พบบ่อย เช่น แกลบและฟางข้าว โดยแกลบและฟางข้าวมีมากในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ แต่ยังไม่ถูกใช้ให้เกิดประสิทธิภาพใด ๆ ในทางกลับกันแกลบและฟางข้าวจะถูกเผาทิ้งในสภาพแวดล้อมที่เปิด ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษต่อ บรรยากาศ และก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพที่รุนแรง ดังนั้นจึงดำเนินการวิจัยเพื่อนำแกลบและฟางข้าวมา ผลิตก๊าซชีวภาพโดยสภาวะที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจะมีช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังนี้ 45 °C 50 °C และ 55 °C ตามลำดับ โดยจากผลการวิจัยพบว่าฟางข้าวสามารถใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซ ชีวภาพโดยที่อุณหภูมิแตกต่างกันดังนี้ 45 °C ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ มีค่า 18.24 มล.ต่อกรัมสารอินทรีย์ ระเหย 50 °C ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ มีค่า 30.73 มล.ต่อกรัมสารอินทรีย์ระเหย 55 °C ก๊าซชีวภาพที่ ผลิตได้ มีค่า 32.93 มล.ต่อกรัมสารอินทรีย์ระเหย ตามลำดับ และในส่วนของ การนำแกลบมาใช้เป็น วัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพที่อุณหภูมิแตกต่างกัน พบว่า 45 °C ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ มีค่า 13.41 มล.ต่อกรัมสารอินทรีย์ระเหย 50 °C ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ มีค่า 19.41 มล.ต่อกรัมสารอินทรีย์ ระเหย 55 °C ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ มีค่า 22.74 มล.ต่อกรัมสารอินทรีย์ระเหย ตามลำดับ

Amith et al. (2020) ดำเนินการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มประสิทธิภาพการ ผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุลิกโนเซลลูโลส โดยการเพิ่มขั้นตอนการปรับสภาพในกระบวนการหมักแบบ ไร้อากาศ ซึ่งวิธีการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสนั้น เพื่อทำลายโครงสร้างของลิกนินเพื่อให้จุลินทรีย์ ในระบบย่อยสลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถทำได้หลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับลักษณะ และ ชนิดของวัสดุลิกโนเซลลูโลส แต่ละวิธีประกอบไปด้วย วิธีการปรับสภาพทางกายภาพ วิธีการปรับ สภาพทางเคมี วิธีการปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี และวิธีการปรับสภาพทางชีวภาพ ทั้งนี้ในแต่ละ วิธีการปรับสภาพนั้นจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป เช่น การปรับสภาพทางกายภาพมีข้อดี

คือสามารถเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับวัสดุลิกโนเซลลูโลส แต่มีข้อเสียคือต้องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ดังนั้นการเลือกวิธีการปรับสภาพเพื่อให้เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจึงเป็นหนึ่งในส่วนสำคัญสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุลิกโนเซลลูโลส

Mina, Forough and Keikhosro (2021) ดำเนินงานวิจัยเกี่ยวกับการนำฟางข้าวมาใช้ประโยชน์เพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพและการผลิตเอทานอลที่สภาวะที่แตกต่างกัน ในการผลิตก๊าซชีวภาพนั้นผู้วิจัยดำเนินการวิจัยใน 2 ชุดการวิจัย โดยใช้ลักษณะสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน ดังนี้ ในชุดการวิจัยที่ 1 มีการใช้น้ำที่สกัดจากฟางข้าวรวมกับการใช้ฟางข้าวที่เป็นของแข็ง และในชุดการวิจัยที่ 2 มีการใช้น้ำที่ผ่านการผลิตเอทานอล 40 วันรวมกับการใช้ฟางข้าวที่เป็นของแข็ง ดังนั้นจากผลการวิจัยพบว่า การนำน้ำที่ผ่านการผลิตเอทานอล 40 วัน ใช้เป็นสารตั้งต้นร่วมกับฟางข้าวที่เป็นของแข็ง สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สภาวะการใช้น้ำจากฟางข้าวที่ผ่านการผลิตเอทานอลที่ 40 กรัมต่อลิตรร่วมกับฟางข้าวที่เป็นของแข็งนั้นมีปริมาณมีเทนมากที่สุด จากงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าการใช้น้ำจากฟางข้าวที่ผ่านการผลิตเอทานอล 40 วัน ถือเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพจากการใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพได้เป็นอย่างดี

จากข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่าลักษณะของสารตั้งต้นมีความแตกต่างกัน โดยการหมักร่วมระหว่างฟางข้าว และมูลสุกร ได้ค่าร้อยละของมีเทนมากที่สุด คือ ร้อยละ 90 แสดงให้เห็นว่าการนำฟางข้าวมาใช้ประโยชน์โดยการผลิตก๊าซชีวภาพ ถือได้ว่าเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ อีกทั้งยังช่วยลดการเผาในพื้นที่โล่งได้อีกด้วย แสดงดังตารางที่ 4



1703872899

VRU :Thesisis 61G54800104 thesisis / recv: 04082566 22:23:58 / seq: 32

GRAD VRU

ตารางที่ 4 ข้อมูลสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ

ถึงปฏิกรณ์/ขนาดของถังปฏิกรณ์	หมักร่วม / หมักเดี่ยว	ร้อยละของมีเทน	ผลผลิต	การปรับสภาพ	ขั้นตอนเดียว / 2 ขั้นตอน	เชื้อจุลินทรีย์	วัตถุดิบ	อ้างอิง
CSTR, Semi-CSTR, 8 L	หมักร่วม	54.6	1.276 kg/m ³ CH ₄	ชีวภาพ (การหมัก)	ขั้นตอนเดียว	มูลวัว	ข้าวโพด (Maize)	Mähnert (2009)
CSTR, Semi-CSTR, 8 L	หมักร่วม	55.5	1.265 kg/m ³ CH ₄	ชีวภาพ (การหมัก)	ขั้นตอนเดียว	มูลวัว	หัวบีท (Beet)	Mähnert (2009)
CSTR, Semi-CSTR, 8 L	หมักร่วม	57.2	1.244 kg/m ³ CH ₄	ชีวภาพ (การหมัก)	ขั้นตอนเดียว	มูลวัว	ข้าวไรย์ (Rye)	Mähnert (2009)
CSTR, 1.6 m ³	หมักร่วม	63.4	2.94 m ³ /d	กายภาพ (บดขนาด 3มม.)	ขั้นตอนเดียว	น้ำเสียจากระบบ AS	เศษอาหาร ผัก ผลไม้	Liu et al. (2012)
CSTR, 40 L	หมักร่วม	90.0	478.83 l/kgVS	กายภาพ (เล็กกว่า 1มม.)	ขั้นตอนเดียว	มูลสุกร	ฟางข้าว	Li et al. (2015) N; Liu et al. (2012)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยครั้งนี้เป็นการดำเนินการระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot Scale จากการหมักร่วมแบบไร้อากาศของฟางข้าวและขยะเศษอาหาร โดยใช้มูลวัวเป็นแหล่งของเชื้อจุลินทรีย์ แบ่งการดำเนินการเป็น 3 ส่วน ดังนี้ 1) การทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ 2) การออกแบบและสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับต้นแบบ และ 3) การทดสอบระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot Scale โดยนำสถานะที่ได้จากการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการมาทดสอบในระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot Scale และติดตามการเปลี่ยนแปลงของก๊าซชีวภาพ พารามิเตอร์อื่นที่เกี่ยวข้อง สุดท้ายดำเนินการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการดำเนินการ เพื่อเป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจต่อไป

3.1 วัตถุดิบสำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการและระดับต้นแบบ

3.1.1 ฟางข้าว (Rice Straw) เป็นวัสดุที่ได้หลังจากการทำนา (ภาพที่ 8) จากอำเภอบางไทร จังหวัดพระนครศรีอยุธยา นำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับงานวิจัยนี้



ภาพที่ 8 แสดงตัวอย่างฟางข้าวสำหรับเป็นวัตถุดิบในงานวิจัย

3.1.2 มูลสัตว์ (Manure)

สำหรับระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในงานวิจัยนี้ จะใช้มูลวัว (ภาพที่ 9) ที่ได้มาจากโรงฆ่าสัตว์เทศบาลเมืองปทุมธานี อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี นำมาใช้เป็นเชื้อเริ่มต้นในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ



1703872899

VRU_1Thesis 61G54800104 thesis / recv: 04082566 22:23:58 / seq: 32



ภาพที่ 9 แสดงตัวอย่างมูลสัตว์สำหรับใช้เป็นเชื้อเริ่มต้นในงานวิจัย

3.1.3 ขยะเศษอาหาร (Food Waste) สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพในงานวิจัยนี้ ได้มาจากโรงอาหารของมหาวิทยาลัย (ภาพที่ 9)



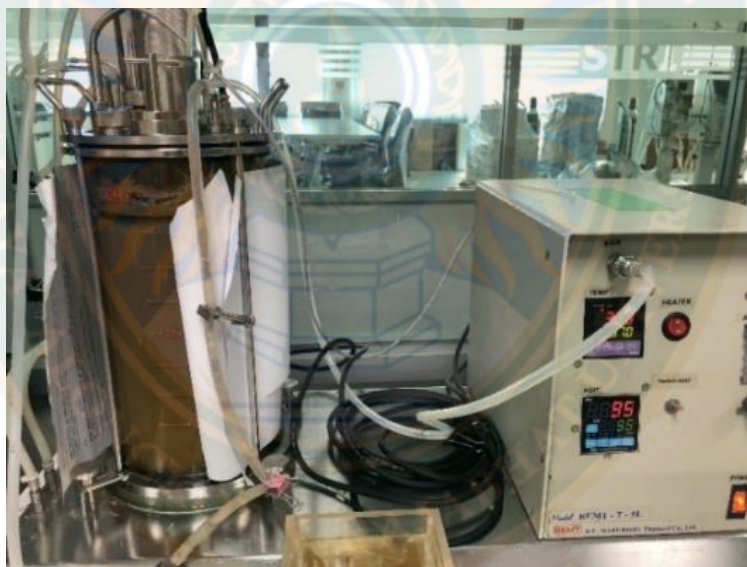
ภาพที่ 10 ขยะเศษอาหาร

3.2 วัสดุอุปกรณ์และการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

3.2.1 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในห้องปฏิบัติการ

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในห้องปฏิบัติการ เป็นถังปฏิกรณ์ (Reactor) ขนาด 10 ลิตร (ภาพที่ 11) ซึ่งเป็นระบบกวนสมบูรณ์ มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 35-37 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบใบกวน 95 รอบต่อนาที ค่าพีเอชเริ่มต้น 7.50 เติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) 16 กรัมต่อลิตร เพื่อรักษาสภาพต่างในระบบ ปริมาณของแข็งที่เติมเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพนั้น มีค่าร้อยละ 2.5 ของของแข็งทั้งหมด โดยใช้อัตราส่วนของฟางข้าวต่อขยะเศษอาหารต่อมูลสัตว์ คือ 1:1:1 (107.74 g : 207.00 g : 2,666.67 mL) ซึ่งสภาวะในการเดินระบบในห้องปฏิบัติการเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจาก

ฟางข้าว ขยะเศษอาหาร และมูลวัว ซึ่งตัดแปลงสัดส่วนมาจากการวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากงานวิจัยของพาริดา พรหมมา และคณะ (2557) โดยติดตามพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทุก ๆ 24 ชั่วโมง ในช่วงที่ 1 และทุก ๆ 48 ชั่วโมง ในช่วงที่ 2 ดังนี้ ค่าพีเอช (pH) ค่าของแข็งทั้งหมด (Total Solids: TS) ค่าของแข็งระเหยได้ (Total Volatile Solid: TVS) กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid: VFA) องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (Biogas Component) และปริมาตรก๊าซรวม (Total Gas) และอัตราผลผลิตที่ได้ (Yield) โดยทำการทดลอง 3 ซ้ำ และนำค่าที่ได้จากการทดลอง คือค่ามีเทนสะสม (Cumulative Methane) และเวลา (Time) ไปคำนวณค่าทางจุลศาสตร์คือ ระยะเวลาแลกเฟส (λ) อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (R_{max}) และ ปริมาตรก๊าซมีเทนที่ผลิตสูงสุด (H_{max}) ด้วยสมการ Modified Gompertz Equation โดยใช้โปรแกรม Sigma Plot Version 14.5



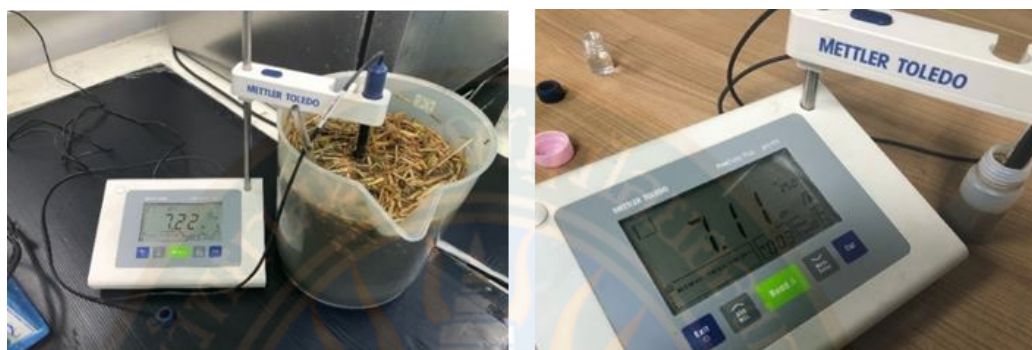
ภาพที่ 11 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบกวนสมบูรณ์ในระดับห้องปฏิบัติการ ขนาด 10 ลิตร

3.2.1.1 วิธีการตรวจวัดพารามิเตอร์

วิธีการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23rd ed. (American Public Health Association-American Water Works Association-Water Pollution Control Federation, 2017) ดังนี้

1) ค่าพีเอช (pH)

วิเคราะห์ตัวอย่างของเหลวโดยใช้ pH meter (Mettler Toledo รุ่น LE 409, Ohio, USA) ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 pH meter (Mettler Toledo รุ่น LE 409, Ohio, USA)

2) ของแข็ง (Solids)

ของแข็งทั้งหมด (Total solid: TS) ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (Total volatile solid: TVS) ของตัวอย่างของเหลว ตามวิธีมาตรฐาน นำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 13) ซึ่งน้ำหนักถ้วยก่อนและหลังอบ จากนั้นนำไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จดบันทึกน้ำหนักถ้วยหลังเผา นำไปคำนวณหาปริมาณค่าของแข็งทั้งหมด (TS) ดังสมการที่ (1) และของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (TVS) ดังสมการที่ (2)

$$TS \left(\frac{mg}{l} \right) = \left(\frac{A-B}{C} \right) \times 10^6 \quad (1)$$

$$TVS \left(\frac{mg}{l} \right) = \left(\frac{D-E}{C} \right) \times 10^6 \quad (2)$$

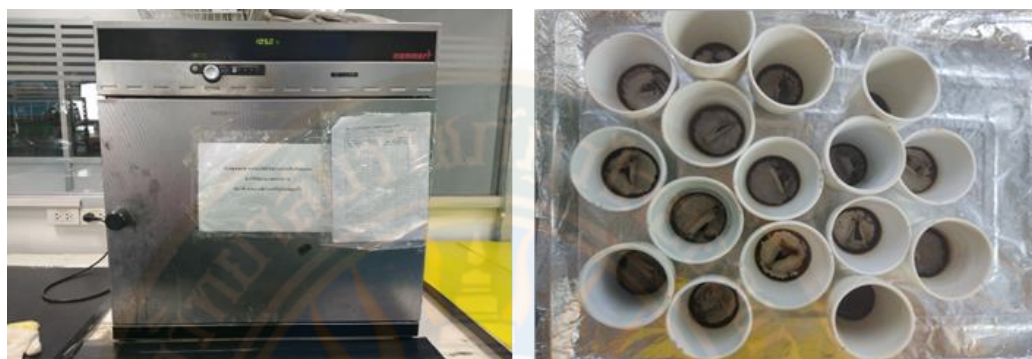
โดยที่ A = น้ำหนักถ้วยก่อนอบ (กรัม)

B = น้ำหนักถ้วยหลังอบ (กรัม)

C = ปริมาตรตัวอย่าง (มล.)

D = น้ำหนักถ้วยก่อนเผา (กรัม)

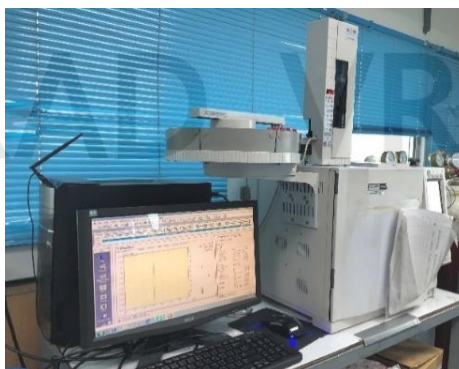
E = น้ำหนักถ้วยหลังเผา (กรัม)



ภาพที่ 13 ตู้อบ (Oven) และตัวอย่างหลังอบ

3) กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid: VFA)

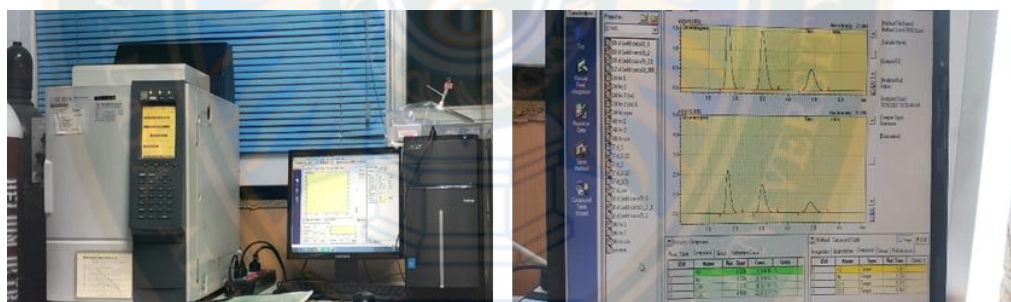
กรดอินทรีย์ระเหยง่ายวิเคราะห์โดยใช้เครื่องโครมาโทกราฟี (Shimadzu GC-2010 Gas Chromatograph, Japan) (ภาพที่ 13) โดยทำการเตรียมตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ใส่ขวดไวอัล (Vial) และนำขวดใส่ในช่องใส่ขวดไวอัลของเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี จากนั้นตั้งโปรแกรมให้เครื่องทำการฉีดตัวอย่างอัตโนมัติ โดยเครื่องจะดูดสารตัวอย่าง และฉีดเข้าสู่คอลัมน์ Stabiwax capillary (Restek, USA) โดยอาศัยก๊าซตัวพา 4 ชนิด คือ ไฮโดรเจน (อัตราการไหล 40 มิลลิลิตรต่อนาที) อากาศ (อัตราการไหล 400 มิลลิลิตรต่อนาที) ไนโตรเจน (อัตราการไหล N_2/Air 30 มิลลิลิตรต่อนาที) และฮีเลียม พาสารตัวอย่างเข้าสู่คอลัมน์ ที่มีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการแยกชนิดของสารตัวอย่างตาม Retention time ภายในคอลัมน์แล้วถูกพามายังตัวตรวจวัดชนิด FID (Flame Ionization Detector) ที่มีอุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำหน้าที่วัดปริมาณของสารตัวอย่างตามปริมาณของกระแสของไอออนที่เกิดขึ้น จำแนกตามสารมาตรฐานที่เตรียมแบ่งออกเป็น 5 ชนิด ดังนี้ เอทานอล อะซิติก โพรไพโอนิก บิวทริก และ วาลริก



ภาพที่ 14 เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีสำหรับวิเคราะห์กรดอินทรีย์ระเหยง่าย

4) องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (Biogas Component)

องค์ประกอบก๊าซวิเคราะห์โดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Shimadzu GC-2014 Gas Chromatography, Japan) ดังภาพที่ 15 โดยทำการเก็บตัวอย่างก๊าซจากถังปฏิกรณ์ ด้วยไซริงค์แก้วขนาด 500 ไมโครลิตร แล้วนำมาฉีดก๊าซตัวอย่างเข้าเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีผ่านส่วนฉีดสาร (Injector) อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส โดยมีก๊าซฮีเลียม (Total flow 50 มิลลิลิตรต่อนาที) เป็นตัวพาสารเข้าสู่แพคคอลัมน์ (Shincarbon ST 50/80 mesh 2.0 m × 3.0 mm I.D., stainless steel) ที่มีอุณหภูมิคอลัมน์ 150 องศาเซลเซียส ทำให้เกิดการแยก ชนิดของสารตัวอย่างตาม retention time ภายในคอลัมน์ แล้วถูกพามายัง Detector ชนิด TCD (Thermal Conductivity Detector) ที่มีอุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส แล้วแปลงค่าความร้อนเป็นของก๊าซทั้ง 4 ชนิด คือ ไฮโดรเจน อากาศ (ไนโตรเจนและออกซิเจน) มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยในการวิเคราะห์ ปริมาณก๊าซตัวอย่างแต่ละชนิดจะใช้วิธีฉีดเทียบกับก๊าซมาตรฐาน

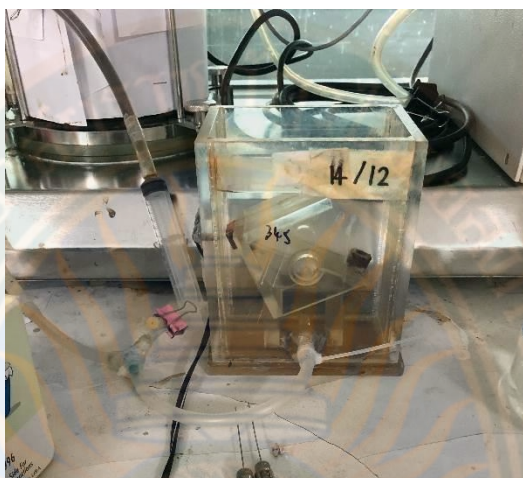


ภาพที่ 15 เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีและหน้าจอแสดงผล

5) ปริมาตรก๊าซชีวภาพ

ปริมาตรก๊าซชีวภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพในห้องปฏิบัติการ ตรวจวัดโดยใช้ Gas Counter (ภาพที่ 15)

GRAD VRU



ภาพที่ 16 Gas Counter

3.2.2 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับต้นแบบ

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นระบบที่มีถังหมักแบบไร้อากาศขนาด 3 ลบ.ม. มีการออกแบบก่อนการก่อสร้าง เพื่อให้ได้รูปแบบและขนาดที่ถูกต้อง ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 แบบร่างของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 3 ลบ.ม.



เมื่อได้แบบและขนาดจึงนำไปสู่การก่อสร้างต่อไป ซึ่งในการดำเนินการออกแบบและสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับต้นแบบ ขนาด 3 ลบ.ม. ประกอบด้วย อุปกรณ์ลดขนาดวัตุดิบ ถึงกวนผสม มอเตอร์และใบกวน ชุดปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ และถังเก็บก๊าซชีวภาพ ส่วนประกอบของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับต้นแบบ แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ส่วนประกอบของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับต้นแบบ

รายละเอียดอุปกรณ์	ภาพประกอบ
ถังปฏิกรณ์ไฟเบอร์กลาสขนาดความจุ 3 ลบ.ม. เส้นผ่าศูนย์กลาง 2.00 เมตร สูง 1.00 เมตร	
ชุดใบกวนพร้อมมอเตอร์ อัตราการหมุน 95 รอบต่อนาที	
ชุดใบมีดสับฟางพร้อมมอเตอร์	



1703872899

VRU :Thesis 61654800104 thesis / rev: 04082566 22:23:58 / seq: 32

GRAD VRU

ตารางที่ 5 (ต่อ)

รายละเอียดอุปกรณ์	ภาพประกอบ
<p>ระบบพลังงานจากโซลาร์เซลล์และแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนพร้อมชุดแปลงกระแสไฟฟ้า DC เป็น AC220V</p>	
<p>ชุดปรับสภาพก๊าซชีวภาพด้วย Activated Carbon ID1000 (Coconut shell) ขนาดความจุ 50 ลิตร</p>	
<p>Methane volume meter Biogas volume meter Methane gas percentage meter</p>	
<p>Methane gas storage bag ขนาด 5 ลบ.ม.</p>	
<p>ถังรับตะกอนจากการหมัก</p>	



1703872899

VRU_1Thesis_61G54800104_Thesis / recv: 04082566 22:23:58 / seq: 32

3.2.3 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับต้นแบบ (Pilot Scale)

ที่มีการกวน 95 รอบต่อนาที โดยตั้งเวลาการกวนทุก 15 นาที 3 รอบต่อวัน ค่าพีเอช เริ่มต้น 7.50 เติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) 16 กรัมต่อลิตร เพื่อรักษาสภาพต่างในระบบ ปริมาณของแข็งที่เติมเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพนั้น มีค่าร้อยละ 2.5 ของของแข็งทั้งหมด ที่ปริมาตรจริง 2 ลบ.ม. โดยใช้อัตราส่วนของฟางข้าวต่อขยะเศษอาหารต่อมูลสัตว์ คือ 1:1:1 (ฟางข้าว 17 กิโลกรัม ขยะเศษอาหาร 51 กิโลกรัม มูลวัว 666 ลิตร) ซึ่งสภาวะในการเดินระบบในห้องปฏิบัติการ เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว ขยะเศษอาหาร และมูลวัว ซึ่งดัดแปลงสัดส่วนมาจากการวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากงานวิจัยของ ฟาริดา พรหมมา และคณะ (2557) และเป็นสภาวะที่ได้จากการเดินระบบในระดับห้องปฏิบัติการ ติดตามพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทุก ๆ 4 วัน ดังนี้

3.2.3.1 ค่าพีเอช (pH) วัดโดยใช้ pH meter portable ดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 pH meter portable ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.3.2 อุณหภูมิ (Temperature) ภายในถังหมัก วัดโดยเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 หน้าจอแสดงค่าอุณหภูมิที่วัดโดยเซนเซอร์จากในถังหมัก

3.2.3.3 เปอร์เซนต์ก๊าซมีเทน (%CH₄) วัดโดยเซนเซอร์วัดค่าก๊าซมีเทน ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 หน้าจอแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่วัดโดยเซนเซอร์วัดค่าก๊าซมีเทนจากถังหมัก

3.2.3.4 ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (Total Biogas: m³) วัดโดยเซนเซอร์วัดค่าปริมาตรก๊าซชีวภาพ ดังภาพที่ 20



ภาพที่ 21 หน้าจอแสดงค่าปริมาตรก๊าซชีวภาพ (Total Biogas) ที่ได้จากถังหมัก



1703872899

VRU-I.Thesis 61G54800104 thesis / recv: 04082566 22:23:58 / seq: 32

3.3 การคำนวณค่าทางจลศาสตร์

การคำนวณค่าทางจลศาสตร์ของการผลิตมีเทน คือ การคำนวณค่าระยะเวลาแลกเฟส (λ) อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (R_{max}) และ ปริมาตรก๊าซมีเทนที่ผลิตสูงสุด (H_{max}) โดยนำข้อมูลดิบจากการทดลองก๊าซมีเทนสะสม และเวลาที่ได้จากการหมัก เข้าสู่สมการ Modify Gompertz แสดงดังสมการที่ 3 ของโปรแกรม Sigma Plot Version 14.5 คำนวณพารามิเตอร์ทางจลศาสตร์โดยการลากเส้นสมการแบบถดถอย (Regression) การคำนวณแต่ละครั้งจะได้ค่า R^2 (Kathleen and Even, 2017)

$$H = H_{max} \times \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_{max} e}{H_{max}} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (3)$$

โดยที่ H คือ ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม (ml)

T คือ ระยะเวลาในการหมัก (hr)

R_{max} คือ อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (ml hr⁻¹)

H_{max} คือ ปริมาตรก๊าซมีเทนที่ผลิตสูงสุด (ml)

λ คือ ระยะเวลาแลกเฟส (hr)

E คือ ค่าคงที่ 2.7182818

จากสมการที่ 3 สามารถนำ H_{max} มาคำนวณหาค่าอัตราผลผลิต (Yield) ที่ได้จากการทดลองดังสมการที่ 4

$$Yield (mL / gTVS remove) = \frac{H_{max}}{g TVS remove} \quad (4)$$

โดยที่ H_{max} เป็นค่าที่คำนวณจากกราฟปริมาตรมีเทนสะสมที่ระยะเวลาการหมักเข้าสู่ภาวะคงที่ และ $gTVS_{remove}$ ที่ใช้ในการคำนวณจะเป็นเวลาเดียวกับปริมาณมีเทนที่เข้าสู่ระยะคงที่ (Steady State) ดังนี้

$$Yield = \frac{14,550.48}{20.55}$$

$$Yield = 708.05 \text{ ml } CH_4 \text{ gTVSremove}^{-1}$$

3.4 การคำนวณค่าก๊าซชีวภาพเทียบกับพลังงานที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ระดับต้นแบบ (Pilot Scale)

ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถนำไปทดแทนพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ได้แก่ ก๊าซหุงต้ม (LPG) 0.46 กิโลกรัม และพลังงานความร้อน 39.4 เมกกะจูล ดังนั้น จึงสามารถนำมาคำนวณค่าก๊าซชีวภาพเทียบเท่าพลังงานรูปแบบต่าง ๆ ดังนี้

3.4.1 พลังงานความร้อน

ก๊าซชีวภาพ 1.0 ลบ.ม. เทียบเท่าพลังงานความร้อน 39.4 เมกกะจูล

ก๊าซชีวภาพ 2.157 ลบ.ม. เทียบเท่าพลังงานความร้อน 39.4 เมกกะจูล \times 2.157 ลบ.ม.

ดังนั้น ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ 84.99 เมกกะจูล

3.4.2 ก๊าซ LPG

ก๊าซชีวภาพ 1.0 ลบ.ม. เทียบเท่าก๊าซ LPG 0.46 กิโลกรัม

ก๊าซชีวภาพ 2.157 ลบ.ม. เทียบเท่าก๊าซ LPG 0.46 กิโลกรัม \times 2.157 ลบ.ม.

ดังนั้น ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ 0.99 กิโลกรัม

3.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

3.5.1 ต้นทุน (Cost) คือ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ รวมถึงกิจกรรมการผลิต โดยแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ต้นทุนคงที่ (Fix costs) และ ต้นทุนแปรผัน (Variable Cost)

3.5.2 อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (Benefit Cost ratio: BCR)

การคำนวณอัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน เป็นการคำนวณก่อนการประเมินความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ของโครงการ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างมูลค่าปัจจุบันของผลตอบแทน กับมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุนและค่าใช้จ่ายในโครงการ ถ้า BCR มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าโครงการให้ผลตอบแทนคุ้มค่างบที่ลงทุนไป แต่ถ้าค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่า ผลตอบแทนที่ได้รับจากโครงการไม่คุ้มกับเงินลงทุนที่เสียไป ดังสมการที่ 5 (PIMAC, 2008)

$$BCR = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (5)$$

โดยที่	B_t	คือ ผลตอบแทน ณ เวลานั้น
	C_t	คือ ต้นทุน ณ เวลานั้น
	r	คือ อัตราคิดลด
	n	คือ ช่วงเวลาที่พิจารณาโครงการ

3.5.3 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value: NPV)

เป็นผลรวมของผลตอบแทนสุทธิที่ได้ปรับค่าของเวลาในโครงการนั้นแล้ว โดยพิจารณาถึงโครงการที่กำลังดำเนินการ หรือเริ่มดำเนินการอยู่นั้นจะให้ผลตอบแทนคุ้มค่าหรือไม่ นั่นคือ ถ้าค่า NPV ที่ได้มีค่ามากกว่าศูนย์หรือเป็นบวก แสดงว่าคุ้มค่าต่อการลงทุน และในกรณีค่า NPV ที่ได้มีค่าลบหรือต่ำกว่าศูนย์ แสดงว่า การลงทุนตามโครงการนั้นไม่คุ้มค่า สามารถเขียนเป็นสูตรคำนวณได้ดังสมการที่ 6 (PIMAC, 2008)

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} \quad (6)$$

โดยที่	NPV	คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิของโครงการ
	B_t	คือ ผลตอบแทน ณ ปีที่คำนวณ
	C_t	คือ ต้นทุน ณ ปีที่คำนวณ
	i	คือ อัตราคิดลด
	t	คือ อายุของโครงการ

3.5.4 อัตราผลตอบแทนจากโครงการ (Internal Rate of Return: IRR)

อัตราผลตอบแทนที่ทำให้มูลค่าปัจจุบันของเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการมีค่าเท่ากับเงินสดจ่ายสุทธิลงทุนเริ่มแรก ถ้าอัตราผลตอบแทนจากโครงการ (IRR) มีค่ามากกว่าอัตราผลตอบแทนที่ต้องการ (r) นั่นคือ ตอรับโครงการลงทุนเมื่อ $IRR > r$ วิธี IRR ใช้หลักเกณฑ์การเปรียบเทียบมูลค่าของเงิน 2 ประเภท คือ มูลค่าปัจจุบันของเงินสดรับสุทธิตลอดอายุโครงการกับเงินสดจ่ายสุทธิลงทุนเริ่มแรก ณ จุดเวลาเดียวกัน (PIMAC, 2008) สูตรการคำนวณค่าอัตราผลตอบแทนจากโครงการ ดังสมการที่ 7

$$IRR = i_L + (i_U - i_L) \times \frac{NPV_L}{(NPV_L - NPV_U)} \quad (7)$$

โดยที่	IRR	คือ อัตราผลตอบแทนจากโครงการ
	NPV	คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ
	i_L	คือ ร้อยละที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวกสุดท้าย
	i_U	คือ ร้อยละที่มูลค่าปัจจุบันสุทธิเปลี่ยนเป็นลบ
	NPV_L	คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิที่มีค่าบวก
	NPV_U	คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิที่มีค่าลบ

3.5.5 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period: PBP)

ระยะเวลาของการลงทุนที่กระแสเงินสดรับสุทธิจากโครงการเท่ากับกระแสเงินสดจ่ายสุทธิพอดี โดยคิดจากค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิสะสมที่เปลี่ยนจากค่าลบเป็นค่าบวก เกณฑ์ตัดสินใจว่าจะลงทุนหรือไม่นั้นจะพิจารณาจากระยะเวลาคืนทุนที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับระยะเวลาที่ยอมรับได้ ซึ่งอาจแตกต่างกันไปในแต่ละโครงการขึ้นอยู่กับว่าโครงการนั้นมีความต้องการเงินต้นคืนกลับมาในช่วงเวลา

3.6 แผนการดำเนินงานวิจัย

แผนการดำเนินงานวิจัยของระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับต้นแบบจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหาร แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา (เดือน)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. วางแผนงานวิจัยและศึกษาข้อมูล													
2. การทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว ขยะเศษอาหาร และมูลสัตว์ในระดับห้องปฏิบัติการ													
3. การออกแบบและสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพ													
4. การทดสอบและเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับ pilot scale และคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์													
5. เก็บข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูล													
6. จัดทำบทความทางวิชาการ													
7. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์													

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

การดำเนินการวิจัยเรื่อง “ระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่องจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหาร” เป็นการดำเนินการวิจัยเชิงทดลอง โดยผลการวิจัยแบ่งเป็น 4 ส่วน ดังนี้

1. การทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ
2. การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot Scale
3. การทดสอบประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับต้นแบบจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหาร
4. การคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการดำเนินโครงการ

4.1 ผลการวิจัยการทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ

จากการดำเนินการวิจัยสภาวะที่เหมาะสมในระดับห้องปฏิบัติการนั้น กำหนดสภาวะดังนี้ ปริมาณของแข็งทั้งหมด คือ ฟางข้าว ขยะเศษอาหาร และมูลวัว 2.5%TS อุณหภูมิ 35-37 องศาเซลเซียส ค่าพีเอช 7.50 และเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) 16 กรัมต่อลิตร เพื่อควบคุมสภาพต่างและค่าพีเอช ให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบ เติมน้ำเป็นเวลารวมทั้งสิ้น 40 วัน

4.1.1 ค่าพีเอชและกรดอินทรีย์ระเหยง่าย

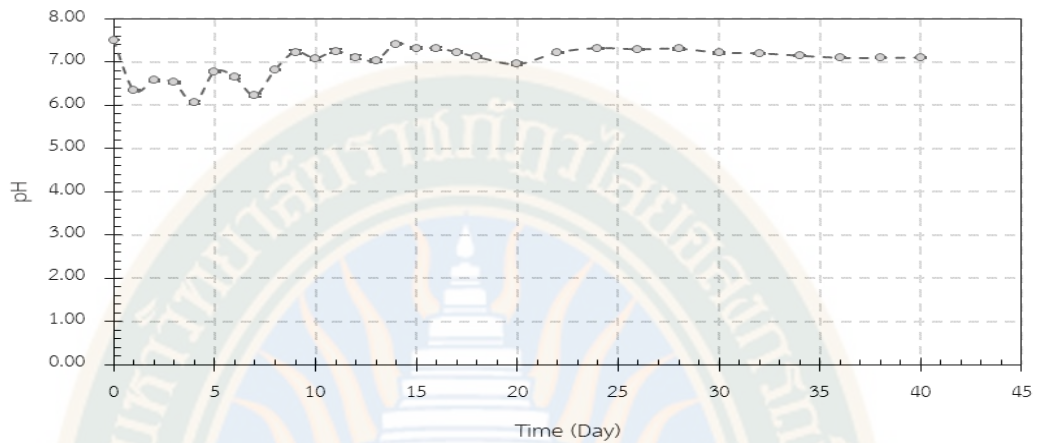
ค่าพีเอชในวันเริ่มต้น มีค่า 7.50 และเมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน ค่าพีเอชลดลงเหลือ 6.34 ในวันที่ 2 และ 3 ค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเล็กน้อย 6.57 และ 6.52 ตามลำดับ (ภาพที่ 22) ซึ่งการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถเกิดได้ในช่วงค่าพีเอช 6.0 - 8.5

GRAD VRU



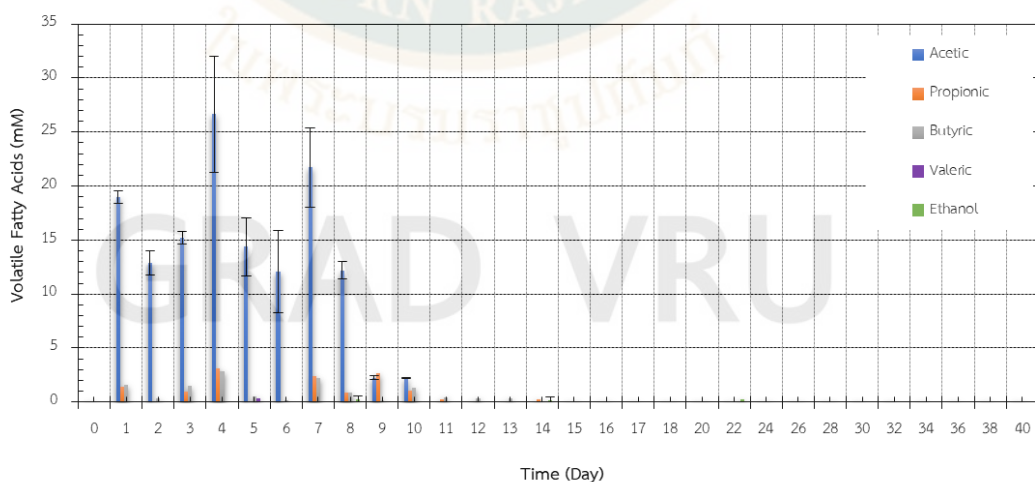
1703872899

VRU :Thesis 61654800104 thesis / rev: 04082566 22:23:58 / seq: 32



ภาพที่ 22 ค่าพีเอชระหว่างเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ

ในช่วงระยะแรกนั้นจะเป็นการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรด และผลิตมีเทนตามลำดับ จากกราฟเมื่อถึงวันที่ 9 ในการเดินระบบมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นระหว่าง 7.11 ถึง 7.40 จากนั้นมีการเติมวัตถุดิบในวันที่ 19 เพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ให้สามารถเดินระบบการผลิตก๊าซชีวภาพต่อไป เมื่อวิเคราะห์ค่าพีเอชในระหว่างวันที่ 20 ถึงวันที่ 40 พบว่าอยู่ในช่วง 6.95 ถึง 7.30 แสดงให้เห็นว่าในวันที่ 19 ซึ่งเป็นวันที่เติมวัตถุดิบ (ฟางข้าวและขยะเศษอาหาร) โดยเติมในสัดส่วน 12.5% ของปริมาตรจริงในถังหมัก ระบบมีการปรับตัวเข้าสู่กระบวนการผลิตกรดอีกครั้ง และเริ่มเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซมีเทนต่อไป

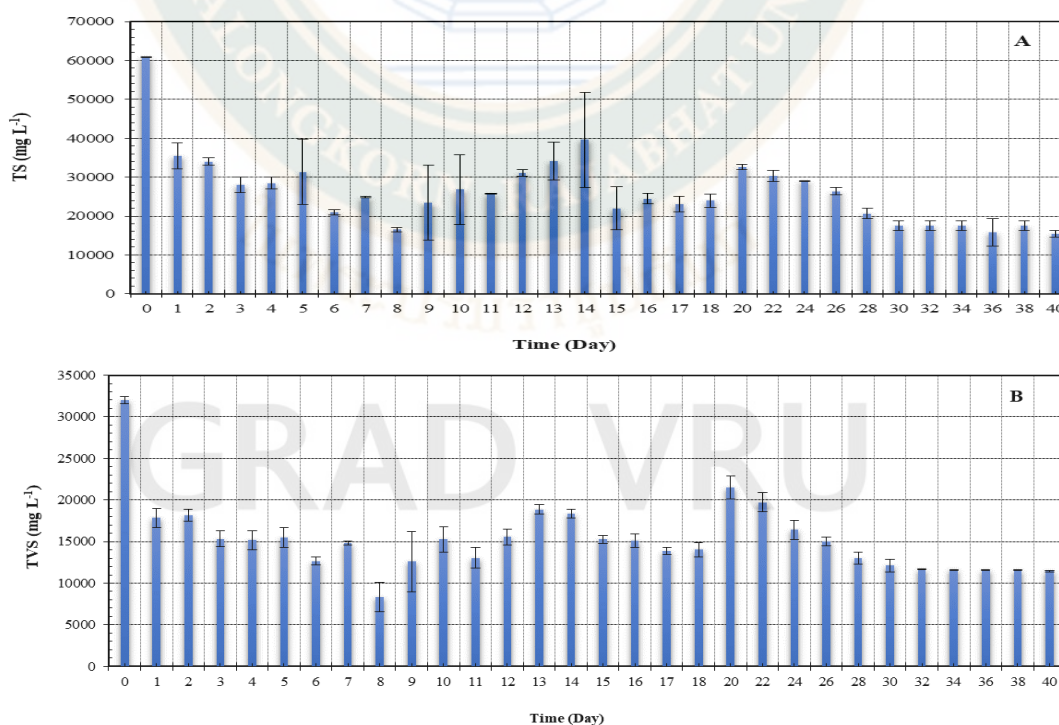


ภาพที่ 23 ค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพในห้องปฏิบัติการ

อย่างไรก็ตามค่าพีเอชนั้นไม่ได้ลดลงต่ำกว่าค่าที่กำหนดในการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากในการเริ่มต้นเดินระบบนั้น ผู้วิจัยได้เติมแคลเซียมคาร์บอเนตในการรักษาสภาพต่างของระบบ จึงเป็นผลให้ค่าพีเอชอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการติดตามการยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (Mosquera et al., 2021) พบว่าสอดคล้องกับค่าพีเอช เนื่องจากในวันที่ 1 ถึง วันที่ 8 นั้นค่าพีเอช ลดลง เพราะมีการกรดอินทรีย์ระเหยเกิดขึ้นและสะสมอยู่ในระบบ อย่างไรก็ตามจากภาพที่ 23 ในวันที่ 2 นั้นมีค่ากรดอะซิติกลดลงเนื่องจากเกิดการใช้กรดอะซิติกโดยกลุ่มจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งสอดคล้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ ที่มีปริมาณมีเทน และก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นในวันที่ 2 เป็นต้นไป ในวันที่ 4 ของการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพนั้น มีการผลิตกรดอะซิติกสูงที่สุด มีค่า 26.657 มิลลิโมล สอดคล้องกับค่าพีเอชเนื่องจากค่าพีเอชที่ตรวจวัดได้มีค่าต่ำสุด คือ 6.06

4.1.2 ของแข็ง (Solids)

ของแข็งในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ของแข็งทั้งหมด (Total solid: TS) เพื่อเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (Total volatile solid: TVS) เพื่อเป็นตัวแทนของสารอินทรีย์ที่อยู่ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยวิเคราะห์ในช่วงเริ่มต้นกระทั่งช่วงสุดท้ายของการเดินระบบ

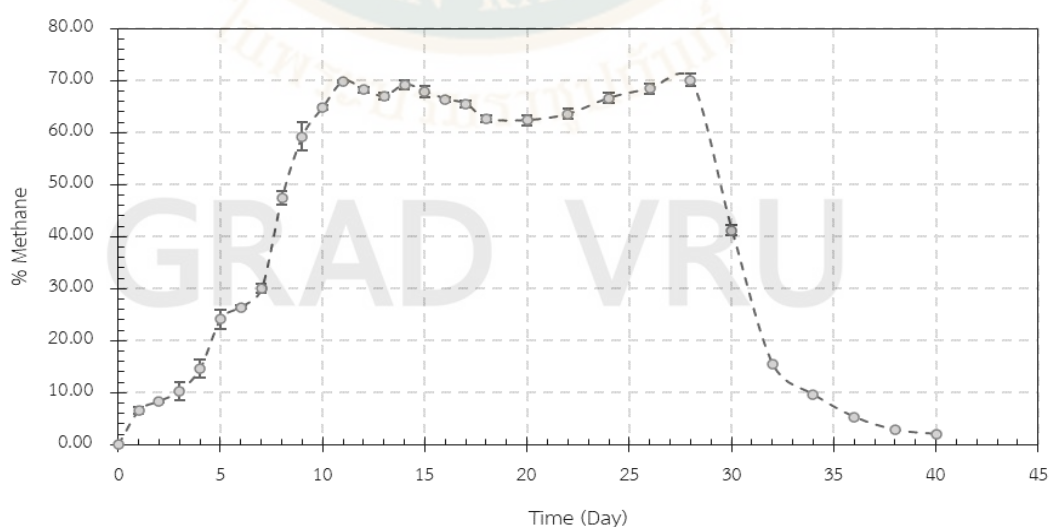


ภาพที่ 24 (A) ค่าของแข็งทั้งหมด (Total Solid) (B) ค่าของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (Total volatile solid)

ซึ่งจากการวิเคราะห์ค่าของแข็งในวันเริ่มต้นพบว่า ค่าของแข็งทั้งหมด มีค่า $60,783 \pm 71$ มก.ต่อลิตร และค่าของแข็งระเหยได้ทั้งหมด มีค่า $32,000 \pm 471$ มก.ต่อลิตร และเมื่อในวันสุดท้ายของการเดินระบบในช่วงที่ 1 พบว่า ค่าของแข็งทั้งหมด คงเหลือ $23,950 \pm 1,697$ มก.ต่อลิตร และค่าของแข็งระเหยได้ทั้งหมด คงเหลือ $14,025 \pm 884$ มก.ต่อลิตร ดังภาพที่ 24 (A) และ 24 (B) ตามลำดับ หลังจากนั้นมีการเติมขยะเศษอาหารและฟางข้าวเข้าระบบอีกครั้งในวันที่ 19 ในสัดส่วน 12.5% ของปริมาตรจริงในถังหมัก และเมื่อเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าของแข็ง พบว่า มีค่าของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้นเป็น $32,567 \pm 613$ มก.ต่อลิตร และในวันสุดท้ายของการเดินระบบ มีค่าของแข็งทั้งหมดคงเหลือ $15,412 \pm 832$ มก.ต่อลิตร ในส่วนค่าของแข็งระเหยได้ทั้งหมด เพิ่มขึ้นเป็น $21,500 \pm 1,414$ มก.ต่อลิตร และในวันสุดท้ายของการเดินระบบ มีค่าของแข็งระเหยได้ทั้งหมด คงเหลือ $11,450 \pm 71$ มก.ต่อลิตร ตามลำดับ

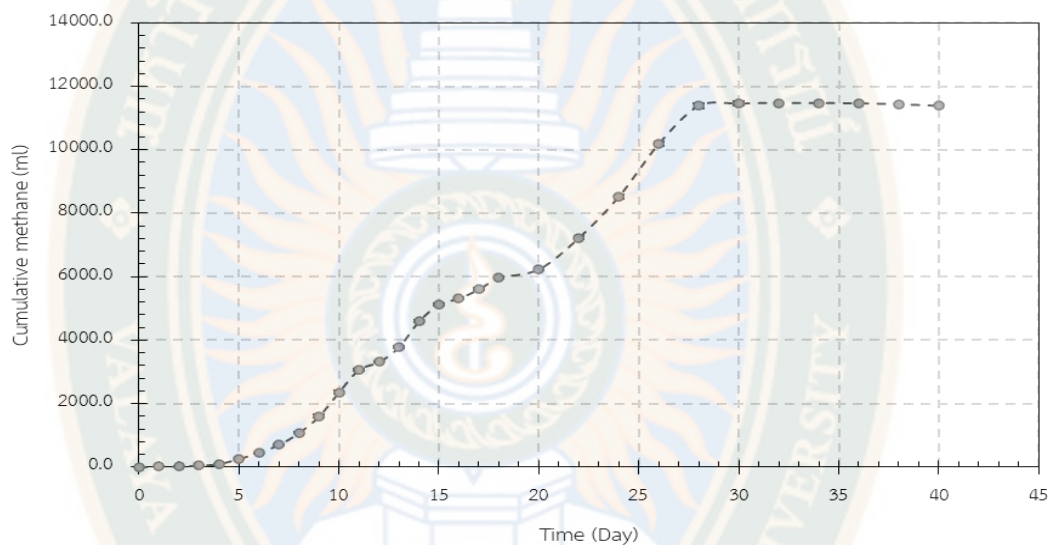
4.1.3 ก๊าซชีวภาพ

การผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้วัตถุดิบคือฟางข้าว และขยะเศษอาหาร โดยใช้มูลวัวเป็นแหล่งเชื้อจุลินทรีย์สำหรับระบบนั้น พบว่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนเริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่วันที่ 1 มีค่า 6.53% ซึ่งเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนจะเพิ่มขึ้นกระทั่งในวันที่ 8 ของการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพพบว่าเพิ่มขึ้นถึง 47.49% และเริ่มเข้าสู่สภาวะ Steady state ในวันที่ 11 ซึ่งในวันที่ 11 นั้นยังเป็นวันที่ก๊าซมีเทนผลิตได้สูงสุด ในช่วงแรกของการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีค่า 69.87% (ภาพที่ 20) ซึ่งจากการพิจารณาร่วมกับข้อมูลกรดอินทรีย์ระเหยพบว่า ในวันที่ 11 นั้นมีการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบและไม่มีการสะสมอยู่ในระบบ สอดคล้องกับค่าพีเอชในวันที่ 11 นั้นที่มีค่าเพิ่มขึ้น

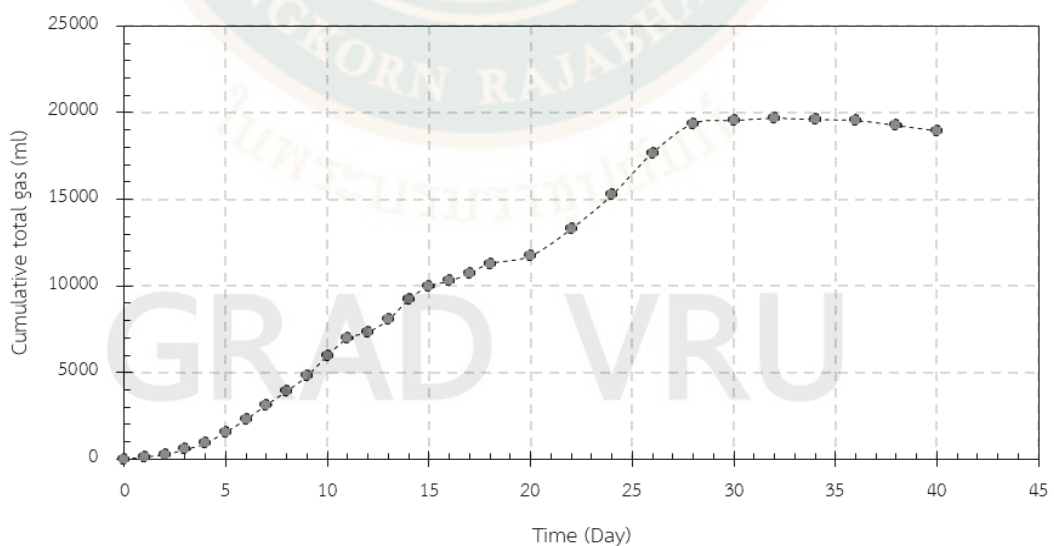


ภาพที่ 25 ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นระหว่างการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ

จากภาพที่ 25 ยังแสดงให้เห็นถึงค่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนสูงสุดในช่วงที่มีการเติม วัสดุดิบ โดยมีค่าก๊าซมีเทนสูงสุด 70.17% ในวันที่ 28 นอกจากนี้เมื่อนำค่าก๊าซมีเทนและปริมาตรก๊าซ ชีวภาพที่เกิดขึ้นมาคำนวณหาปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับ ห้องปฏิบัติการ พบว่าปริมาณมีเทนสะสม มีปริมาตร 11,387.50 มิลลิลิตร (ภาพที่ 26) สอดคล้องกับ ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่สะสมมีปริมาตร 18,963.00 มิลลิลิตร (ภาพที่ 27)



ภาพที่ 26 ปริมาณมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นระหว่างการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ 27 ปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นระหว่างการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับ ห้องปฏิบัติการ

จากการนำข้อมูลการผลิตก๊าซมีเทนมาวิเคราะห์จนศาสตร์การผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นค่าที่สามารถแสดงถึงการทำงานในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยกลุ่มจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน และมีประโยชน์ในการทำนายประสิทธิภาพและออกแบบถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพได้ พบว่า ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตสูงสุด (H_{max}) มีค่า 14,550.48 มล. อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด (R_{max}) มีค่า 590.83 มล./ชม. และมีระยะเวลาในการปรับตัวของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ 6.99 ชั่วโมง และเมื่อนำปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตสูงสุด (H_{max}) มาคำนวณผลผลิต (Yield) มีค่า 0.71 L CH_4 /gTVS_{remove}

4.2 การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot Scale

4.2.1 การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot Scale

ในการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับต้นแบบนั้น กำหนดขนาดถังปฏิกรณ์ 3 ลบ.ม. จะถูกออกแบบให้มีความเหมาะสมสำหรับเกษตรกร หรือการใช้งานในชุมชนขนาดเล็ก และในการเดินระบบนั้น จะอ้างอิงจากข้อมูลผลการทดลองในห้องปฏิบัติการที่ใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร โดยการสร้างระบบแบ่งเป็นขั้นตอน ดังนี้

4.2.1.1 การสร้างโรงเรือน

โรงเรือนมีหน้าที่ปกป้องตัวถังปฏิกรณ์และใส่อุปกรณ์ที่จำเป็นในการผลิตก๊าซชีวภาพ เช่น ตัวถังปฏิกรณ์ เครื่องย่อยชีวมวล เครื่องกวนผสม ระบบการปรับสภาพก๊าซชีวภาพ ระบบพลังงานไฟฟ้า อุปกรณ์วัดค่าก๊าซมีเทน อุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซมีเทน และถุงเก็บก๊าซมีเทนจากกระบวนการผลิต

1) ขนาดของโรงเรือน ปริมาตรทั้งหมด กว้าง 2.50 x ยาว 3.50 x สูง 2.50 เมตร (ภาพที่ 28) แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

- ส่วนพื้นที่ผลิตก๊าซชีวภาพ กว้าง 2.50 x ยาว 2.00 x สูง 2.50 เมตร
- ส่วนพื้นที่กักเก็บก๊าซชีวภาพ กว้าง 2.50 x ยาว 1.50 x สูง 2.50 เมตร



ภาพที่ 28 แสดงวัสดุและโรงเรือนขณะการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพต้นแบบ

2) ถังปฏิกรณ์ และถังเก็บก๊าซชีวภาพ

- ถังปฏิกรณ์ผลิตจากเลซีนไฟเบอร์กลาสเกรด Isophthalic (ทนกรด-ด่าง มีความแข็งแรงและยืดหยุ่นสูง) ดังภาพที่ 29 (A)

- ขนาดความจุถึง 3 ลบ.ม.

- มีท่อน้ำเข้าด้านหน้าขนาด 4 นิ้ว และท่อทิ้งตะกอนด้านหลังขนาด 2 นิ้ว

- ด้านบนถังมีจุดฝาถังขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 60 ซม. สำหรับติดตั้งชุดใบ

กวนและมอเตอร์

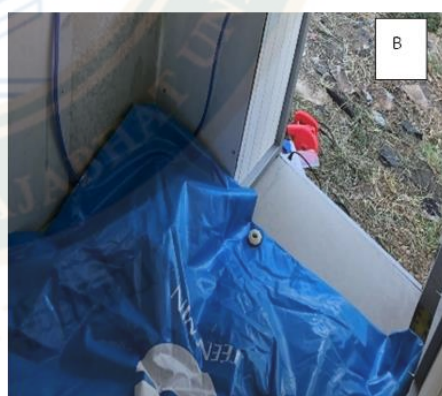
- มีเจาะรูด้านหน้ารูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้านบนข้างหน้าถัง เพื่อเป็นจุดติดตั้ง เครื่องย่อยฟางข้าว

- บริเวณใกล้จุดติดตั้งชุดใบกวนมีช่องขนาด 2 นิ้ว ต่อกับท่อขนาด 2 นิ้ว เพื่อเป็นจุดรวมก๊าซชีวภาพ

- มีจุดระบายกากตะกอนมีวาล์วเปิด/ปิด และถังพลาสติกเพื่อรองรับกาก ตะกอนนำไปใช้ปรับปรุงดินต่อไป

- วัสดุของถังเก็บก๊าซชีวภาพ เป็นถัง PVC หนา 3 มม. ขนาดความจุ 5 ลบ.ม.

ดังภาพที่ 29 (B)



ภาพที่ 29 วัสดุถังปฏิกรณ์ (A) และ ถังเก็บก๊าซ (B)

หลังจากได้วัสดุครบถ้วน จึงนำมาประกอบเป็นระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ระดับต้นแบบ (Pilot Scale) ดังภาพที่ 30 จากนั้นดำเนินการทดสอบระบบต่อไป



1703872899



ภาพที่ 30 ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพระดับต้นแบบหลังจากดำเนินการสร้างเสร็จสิ้น

4.2.2 วิธีการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot Scale

วิธีการเดินระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับ Pilot scale อ้างอิงจากข้อมูลของการเดินระบบในระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีวิธีการเดินระบบตามขั้นตอน ดังนี้

4.2.2.1 เตรียมวัตถุดิบและแหล่งเชื้อจุลินทรีย์ คือ ขยะเศษอาหาร ฟางข้าว และมูลวัว ตามลำดับ โดยใช้ค่าอัตราส่วน คือ 1:1:1 และร้อยละของของแข็ง คือ 2.5%TS ที่ได้จากการเดินระบบในระดับห้องปฏิบัติการ มาใช้ในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

4.2.2.2 นำวัตถุดิบเข้าถังปฏิกรณ์ขนาด 3 ลบ.ม. โดยเว้นพื้นที่ด้านบนของถังปฏิกรณ์สำหรับให้ก๊าซชีวภาพลอยขึ้นด้านบน ดังนั้น Working volume จะมีปริมาตร 2 ลบ.ม. และ Head space จะมีปริมาตร 1 ลบ.ม. ตามลำดับ และปิดฝาถังปฏิกรณ์ให้มิดชิด

4.2.2.3 ตั้งระบบการกวนภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งระบบการกวนสามารถตั้งเวลา และความเร็รรอบได้ โดยมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนใบกวนภายในถังปฏิกรณ์นั้น ได้แหล่งพลังงานไฟฟ้ามาจากโซล่าเซลล์ โดยการตั้งเวลาของระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot Scale จะอ้างอิงจากค่าที่ดำเนินการในห้องปฏิบัติการ โดยตั้งเวลาการกวนครั้งละ 15 นาที จำนวน 4 ครั้งต่อวัน ความเร็รรอบ 95 รอบต่อนาที เพื่อให้เกิดการกวนผสมกันของวัตถุดิบและมูลวัว

4.2.2.4 ติดตามข้อมูลก๊าซที่เกิดขึ้น ทั้งปริมาตรและเปอร์เซ็นต์ที่เกิดขึ้น เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบ โดยในส่วนข้อมูลก๊าซภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot Scale จะมีเซนเซอร์ตรวจวัดก๊าซมีเทนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ และเซนเซอร์ตรวจวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะลอยเข้าสู่ชุดทำความสะอาดก๊าซชีวภาพที่บรรจุถ่านกัมมันต์ไว้ภายในท่อพีวีซี เมื่อก๊าซชีวภาพผ่านชุดทำความสะอาดก๊าซจะทำให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ถูกกำจัด ทำให้ก๊าซชีวภาพสะอาดขึ้น จากนั้นก๊าซชีวภาพจะเข้าสู่ถังเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อรอการนำไปใช้งานต่อไป

4.2.2.5 ติดตามค่าพีเอชโดยตรวจวัดของเหลวจากระบบ โดยระบบจะมีจุดเก็บตัวอย่างของเหลว โดยในการเก็บตัวอย่างของเหลวเพื่อติดตามค่าพีเอชจะดำเนินการทุก ๆ 4 วัน เนื่องจากในระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot Scale นั้น อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจะช้ากว่าในห้องปฏิบัติการ

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่องจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหาร

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่องนั้น ดำเนินการหลังจากการทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ และนำสภาวะที่ได้จากห้องปฏิบัติการมาทดสอบในระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่อง โดยในการเดินระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับต้นแบบนั้น แบ่งเป็น 2 ช่วงระยะเวลา คือช่วงที่ 1 ระยะเวลาการ Start up ระบบ โดยเป็นช่วงที่ให้จุลินทรีย์ในระบบปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมภายในถัง รวมทั้งสิ้น 90 วัน และช่วงที่ 2 ระยะเวลาการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมทั้งสิ้น 36 วัน ซึ่งจากการทดสอบประสิทธิภาพนั้น ดำเนินการเก็บข้อมูลค่า พีเอช อุณหภูมิ เปอร์เซนต์ก๊าซมีเทน ปริมาณก๊าซมีเทน และปริมาณก๊าซชีวภาพ ตามลำดับ

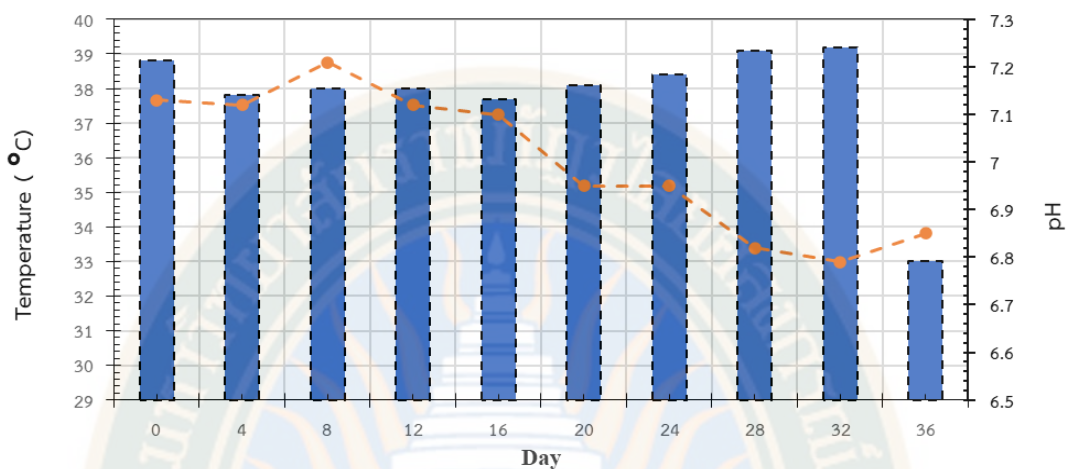
4.3.1 ค่าพีเอชและอุณหภูมิ

หลังจากการก่อสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่องเสร็จสิ้น จึงดำเนินการเดินระบบเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ ซึ่งสภาวะที่ใช้ในการเดินระบบนั้นเป็นสภาวะที่สอดคล้องกับการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ ภาพที่ 31 แสดงค่าอุณหภูมิและค่าพีเอชในระหว่างการเดินระบบ จำนวน 36 วัน ซึ่งจากการเก็บข้อมูลพบว่าอุณหภูมิอยู่ในช่วง 33 ถึง 38 °C เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลทางทฤษฎีพบว่าในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยสลายของจุลินทรีย์กลุ่มมีโซฟิลิก (อลิศรา เรื่องแสง, 2562)



1703872899

VRU - IThesis 61654800104 thesis / recv: 04082566 22:23:58 / seq: 32



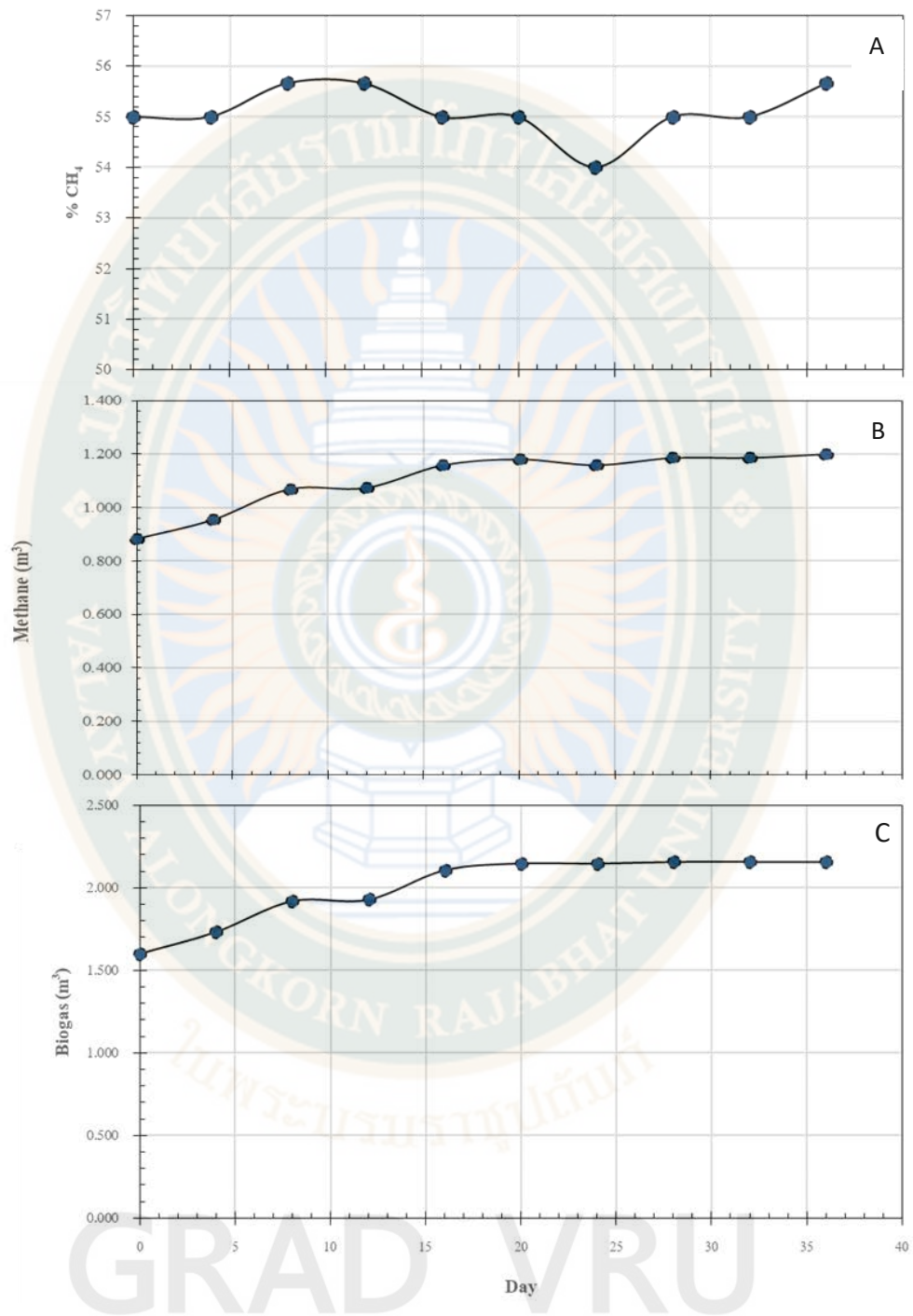
ภาพที่ 31 อุณหภูมิ (กราฟแท่ง) และค่าพีเอช (กราฟเส้น) ในระหว่างการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนําร่อง

การเก็บข้อมูลค่าพีเอชพบว่าค่าพีเอชหลังจากการ Start up ระบบ มีค่า 7.13 และมีค่าต่ำสุด คือ 6.79 ในวันที่ 32 ซึ่งเป็นช่วงท้ายของการเดินระบบ แม้ว่าค่าพีเอชจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดการผลิตกรด เพื่อนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทน

4.3.2 ก๊าซชีวภาพ

ในการเก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับก๊าซชีวภาพในระดับต้นแบบนั้น แบ่งเป็นก๊าซมีเทน ปริมาตรมีเทน (ลูกบาศก์เมตร) และปริมาตรก๊าซชีวภาพ (ลูกบาศก์เมตร) โดยในการเดินระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับต้นแบบนั้น แบ่งเป็น 2 ช่วงระยะเวลา คือช่วงที่ 1 ระยะเวลาการ Start up ระบบ โดยเป็นช่วงที่ให้จุลินทรีย์ในระบบปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมภายในถัง รวมทั้งสิ้น 90 วัน และช่วงที่ 2 ระยะเวลาการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมทั้งสิ้น 36 วัน (ภาพที่ 32)

GRAD VRU



ภาพที่ 32 (A) เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน (B) ปริมาตรก๊าซมีเทน (C) ปริมาตรก๊าซชีวภาพ
(กราฟแสดงข้อมูลหลังจากระยะเวลา Startup ระบบ)

จากผลการทดลองพบว่า เปอร์เซนต์ก๊าซมีเทนมีค่าอยู่ในช่วง 54-56% ปริมาตรก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.88 – 1.21 ลบ.ม. และ ปริมาตรก๊าซชีวภาพอยู่ในช่วง 1.60 – 2.16 ลบ.ม. ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่เกิดขึ้นหลังจากระยะเวลาการเติมเชื้อจุลินทรีย์ในระบบเป็นระยะเวลา 90 วัน

4.4 การคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการดำเนินโครงการ

หลังจากการเดินระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับ Pilot Scale จะนำข้อมูลที่ได้ คำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการดำเนินโครงการ เพื่อให้เป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจในการลงทุน ทั้งภาคเอกชน รวมถึงเกษตรกรที่สนใจอีกด้วย โดยในการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการจะคำนวณจากระบบ Pilot Scale ขนาด 3 ลบ.ม. 1 ชุด ราคา 85,000 บาท และค่าบำรุงรักษาระบบทุก ๆ 2 ปี 1,000 บาท ซึ่งระบบจะสามารถทดแทนก๊าซหุงต้ม และการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะเศษอาหาร ฟางข้าว และมูลวัว ในระดับ Pilot Scale นั้น สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 2.16 ลบ.ม. ทุก ๆ 4 วัน และเมื่อนำมาคำนวณการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปี พบว่า สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 197.1 ลบ.ม.ต่อปี โดยอายุโครงการ คือ 15 ปี โดยคิดจากอายุของวัสดุอุปกรณ์

4.4.1 การคำนวณก๊าซ LPG สามารถคำนวณได้จากสูตร = ลบ.ม. ของก๊าซมีเทน × 0.46 ดังนั้น จึงสามารถแทนค่าสูตรได้ ดังนี้

$$= 197.1 \text{ ลบ.ม.} \times 0.46$$

$$= 90.80 \text{ กิโลกรัม LPG ต่อปี}$$

$$= \text{ราคา} \text{ ก๊าซ LPG ปัจจุบัน } 45.25 \text{ บาท ต่อกิโลกรัม ณ วันที่ 23 ธันวาคม 2565}$$

$$\text{ดังนั้น สามารถนำมาคำนวณเป็นเงิน } 45.25 \times 90.80 \text{ กิโลกรัม LPG} = 4,108.70 \text{ บาท}$$

4.4.2 ปุ๋ยน้ำที่มีสารอาหารได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถนำออกจากระบบได้วันละ 1 ลิตร และนำไปใช้ทดแทนปุ๋ยได้ ทำให้เกษตรกรลดค่าใช้จ่ายในการซื้อปุ๋ย ได้เดือนละ 1,000 บาท (ราคา ณ วันที่ 27 ธันวาคม 2565)

ดังนั้น เมื่อนำมาคำนวณเป็นจำนวนเงินที่สามารถลดค่าใช้จ่ายได้ต่อปี คือ $4,108.70 + 12,000 \text{ บาท} = 16,108.70 \text{ บาท}$

โดยนำจำนวนเงินที่ทดแทนก๊าซ LPG และการใช้ประโยชน์จากปุ๋ยน้ำที่ได้ เข้าสู่การคำนวณการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการลงทุนของโครงการนั้นสามารถวิเคราะห์ได้โดยมีพารามิเตอร์ ดังนี้ อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C Ratio) มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) และระยะเวลาคืนทุน (PBP) ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงข้อมูลการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์ทางเศรษฐศาสตร์	ระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot scale
NPV สะสม	48,918.50
ระยะเวลาคืนทุน (PBP)	8 ปี 1 เดือน
อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR)	ร้อยละ 16.58
อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C Ratio)	2.62

จากการวิเคราะห์ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถสรุปได้ว่า ระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot scale สามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 8 ปี 1 เดือน และเมื่อพิจารณาทุกองค์ประกอบร่วมกัน ทั้งด้านประสิทธิภาพการผลิต และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าการใช้ขยะเศษอาหาร ฟางข้าว และมูลวัว เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot scale นั้นมีความคุ้มค่า และมีความเหมาะสมสำหรับการนำมาปรับใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพในชุมชนต่อไป

บทที่ 5

สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การดำเนินการวิจัยเรื่อง “ระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่องจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหาร” เป็นการดำเนินการวิจัยเชิงทดลอง โดยสามารถสรุปและอภิปรายผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

5.1.1 การทดสอบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหารในระดับห้องปฏิบัติการ

การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในห้องปฏิบัติการ มีการติดตามค่าพีเอชในระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งอยู่ในช่วง 6.06 – 7.50 ซึ่งเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ในระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยภายในถังหมักจะแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการผลิตกรด ที่อยู่ในกระบวนการ Hydrolysis และ Acidogenesis ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดเจริญได้ดีที่ค่าพีเอช 6.0 -7.0 จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่าในช่วงระยะแรกนั้นยังเป็นกระบวนการผลิตกรด และกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน (Acetogenesis และ Methanogenesis) เนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนผลิตมีเทนจะเจริญได้ดีที่ค่าพีเอช 7.0 - 8.5 (อลิสรา เรื่องแสง, 2562) และเมื่อพิจารณาถึงค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายพบว่าไม่ได้ถูกสะสมอยู่ในระบบเป็นระยะเวลานาน เนื่องจากกลุ่มจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนสามารถกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไปได้อย่างต่อเนื่อง จึงส่งผลให้ค่าพีเอชในระบบอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมกับการดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์ และเมื่อพิจารณาถึงค่าของแข็งซึ่งประกอบด้วยของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยได้ทั้งหมด ในระหว่างการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในระบบให้เป็นก๊าซชีวภาพ เนื่องจากของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยได้ทั้งหมดมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ซึ่งระบบผลิตก๊าซชีวภาพเริ่มเข้าสู่สภาวะ Steady state ในวันที่ 11 ซึ่งในวันที่ 11 นั้นยังเป็นวันที่ก๊าซมีเทนผลิตได้สูงสุดในช่วงแรกของการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีค่า 69.87% นอกจากนี้ในช่วงที่ 2 ซึ่งมีการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบเพิ่มขึ้น สามารถผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 70.17% ในวันที่ 28 โดยเมื่อนำค่าเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้วัสดุกลูโคสหรือเซลลูโลสอื่น ๆ พบว่ามีค่าสูงกว่าการใช้วัตถุดิบ ข้าวโพด หัวพืช ข้าวไรย์ และเศษผักผลไม้ แต่ยังมีค่าน้อยกว่าวัตถุดิบที่เป็นฟางข้าว เนื่องจาก Li et al, (2015) ได้มีการปรับสภาพทางกายภาพให้วัตถุดิบมีขนาดเล็กกว่า 1 มิลลิเมตร ทำให้จุลินทรีย์ในระบบสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่าวัตถุดิบขนาดใหญ่ การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่น แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากวัตถุดิบแต่ละชนิด

ถังปฏิกรณ์	หมักร่วม / หมักเดี่ยว	เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทน	การปรับสภาพ	เชื้อจุลินทรีย์	วัตถุดิบ	อ้างอิง
Semi-CSTR	หมักร่วม	54.6	ชีวภาพ (การหมัก)	มูลวัว	ข้าวโพด (Maize)	Mähnert (2009)
Semi-CSTR	หมักร่วม	55.5	ชีวภาพ (การหมัก)	มูลวัว	หัวบีท (Beet)	Mähnert (2009)
Semi-CSTR	หมักร่วม	57.2	ชีวภาพ (การหมัก)	มูลวัว	ข้าวไรย์ (Rye)	Mähnert (2009)
CSTR	หมักร่วม	63.4	กายภาพ (บดขนาด 3 มม.)	น้ำเสียจากระบบ AS	เศษอาหาร ผัก ผลไม้	Liu et al. (2012)
CSTR	หมักร่วม	90.0	กายภาพ (เล็กกว่า 1 มม.)	มูลสุกร	ฟางข้าว	Li et al. (2015); Liu et al. (2012)
CSTR	หมักร่วม	70.17	กายภาพ (ขนาดระหว่าง 5-8 ซม.)	มูลวัว	ขยะเศษอาหาร+ฟางข้าว	งานวิจัยนี้

นอกจากนี้ในการดำเนินงานวิจัยนี้มีผู้วิจัยมีการเติม CaCO_3 ในถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ เพื่อให้ระบบสามารถรักษาสมดุลของสภาพต่างและค่าพีเอชได้ ไม่ทำให้ระบบมีกรดอินทรีย์สะสมมากเกินไป และมีสภาวะภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมสำหรับกลุ่มจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ผลิตกรด และกลุ่มจุลินทรีย์เมทาโนเจน ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนมีค่าสูงอีกด้วย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงอัตราผลผลิต (Yield) มีค่า $0.71 \text{ L CH}_4/\text{gTVS}_{\text{remove}}$ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่ใช้วัตถุดิบประเภทลิกโนเซลลูโลสและขยะเศษอาหาร พบว่าอัตราผลผลิตที่ได้มีค่าสูงเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบอัตราผลผลิตจากวัตถุดิบแต่ละชนิด

วัตถุดิบ	อัตราผลผลิต (Yield)	อ้างอิง
ไขมันจากอาหาร (Food Grease)	0.81 L CH ₄ /gVS	Moody et al. (2011)
เปลือกมันฝรั่ง (Potato Peel)	0.27 L CH ₄ /gVS	Moody et al. (2011)
ขี้เลื่อย (Wood Shavings)	0.067 L CH ₄ /gVS	Moody et al. (2011)
ฟางข้าวสาเลีและมูลวัว	0.32 L CH ₄ /gVS	Song and Zhang (2015)
ขยะเศษอาหาร+ฟางข้าว	0.71 L CH ₄ / gTVS _{remove}	งานวิจัยนี้

5.1.2 การสร้างและการทดสอบประสิทธิภาพระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่อง (Pilot Scale) จากการหมักร่วมของฟางข้าวและขยะเศษอาหาร

การออกแบบและสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับนำร่องมีการนำระบบการกวนโดยการจ่ายไฟฟ้าจากแผงโซลาร์เซลล์ เพื่อให้ระบบสามารถขับเคลื่อนไปได้โดยไม่ต้องพึ่งพาการขับเคลื่อนมอเตอร์จากไฟฟ้า ซึ่งแตกต่างจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพในชุมชนแบบอื่น ซึ่งไม่มีการกวนผสมให้วัตถุดิบได้สัมผัสกับจุลินทรีย์อย่างทั่วถึง หลังจากการออกแบบและก่อสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับต้นแบบเสร็จสิ้น จึงดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพระดับต้นแบบ โดยนำสถานะที่ได้ในห้องปฏิบัติการมาปรับใช้ในระดับนำร่อง จากการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ พบว่า เปอร์เซนต์ก๊าซมีเทนมีค่าอยู่ในช่วง 54-56% ปริมาตรก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.88 – 1.21 ลบ.ม. และ ปริมาตรก๊าซชีวภาพอยู่ในช่วง 1.60 – 2.16 ลบ.ม. เมื่อนำค่าเปอร์เซนต์ก๊าซมีเทน มาเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นที่มีการเดินระบบในระดับ Pilot scale และใช้ขยะเศษอาหารและวัสดุกลไกโนเซลลูโลสอื่น ๆ พบว่า เปอร์เซนต์มีเทนอยู่ในช่วงเดียวกัน ในขนาดของถังปฏิกรณ์ที่ใกล้เคียงกัน การเปรียบเทียบงานวิจัยนี้และงานวิจัยอื่น แสดงดังตารางที่ 10

GRAD VRU

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากวัตถุดิบแต่ละชนิดในระดับ Pilot scale

ถังปฏิกรณ์/ขนาดถังปฏิกรณ์	เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทน	วัตถุดิบ	เชื้อจุลินทรีย์	อ้างอิง
Fixed Dome 2 m ³	44.9	ขยะเศษอาหาร	มูลสุกร	Miller et al. (2020)
One state pilot 2 m ³	63.0	ขยะเศษอาหาร	มูลสัตว์	Stan et al. (2018)
Pilot plant 4 m ³	55.0	PHA biomass	mixed microbial culture accumulates poly-hydroxy-alkanoates (PHA)	Righetti et al. (2020)

โดยที่ค่าพีเอชหลังจากการ Start up ระบบ มีค่า 7.13 และมีค่าต่ำสุด คือ 6.79 ในวันที่ 32 ซึ่งเป็นช่วงท้ายของการเดินระบบ ภายในถังหมักจะแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการผลิตกรด โดยจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดเจริญได้ดีที่ค่าพีเอช 6.0 – 7.0 จากทฤษฎีที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่าในช่วงระยะแรกนั้นยังเป็นกระบวนการผลิตกรด และกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน (Acetogenesis และ Methanogenesis) เนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนผลิตมีเทนจะเจริญได้ดีที่ค่าพีเอช 7.0 – 8.5 ตามลำดับ (อลิสรา เรื่องแสง, 2562) ซึ่งเมื่อนำระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับ Pilot scale มาเปรียบเทียบความพร้อมของระดับเทคโนโลยีพบว่า อยู่ในระดับ TRL 6 ซึ่งเป็นการทดสอบในสภาวะเลียนแบบใกล้เคียงสภาวะจริง ภายใต้การควบคุมปัจจัยสำเร็จและล้มเหลว สร้างต้นแบบแล้วนำไปทดสอบในสภาวะเลียนแบบใกล้เคียงสภาวะจริง แล้วได้ผลตามที่คาดหวัง เนื่องจากก่อนการดำเนินการระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับ Pilot scale มีการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการก่อน และนำสภาวะที่ได้ในระดับห้องปฏิบัติการมาทดสอบในระดับ Pilot scale เพื่อให้ได้ข้อมูลการทดสอบระบบเพื่อนำไปใช้งานต่อไป หลังจากการเดินระบบ Pilot scale มีการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จากการดำเนินโครงการ พบว่า อัตราส่วนผลตอบแทนต่อต้นทุน (B/C Ratio) มีค่า 2.62 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) มีค่า 48,918.50 อัตราผลตอบแทนภายใน (IRR) มีค่าร้อยละ 16.58 และระยะเวลาคืนทุน (PBP) 8 ปี 1 เดือน

นอกจากนี้ก๊าซชีวภาพยังสามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานความร้อนได้ โดยก๊าซชีวภาพ 1.0 ลบ.ม. เทียบเท่าพลังงานความร้อน 39.4 เมกกะจูล (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2555) เทียบเท่าพลังงานไฟฟ้า 1.20 กิโลวัตต์-ชั่วโมง และเทียบเท่าก๊าซ LPG

0.46 กิโลกรัม โดยที่ถ้าก๊าซ LPG จำนวน 1 ถัง ขนาด 15 กิโลกรัม ราคาถังละ 393 บาทต่อถัง (ราคา ณ วันที่ 1 สิงหาคม 2565) ซึ่ง 1 ถังสามารถใช้ในการประกอบอาหารต่อ 1 คริวเรือน โดยเฉลี่ย 3 เดือน (คริวเรือนละ 3-6 คน) (อัมพรรค์ วรรณโกมล, 2563) ดังนั้น เมื่อนำก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลองในระดับต้นแบบมาแทนค่าพลังงานความร้อน และกิโลกรัมก๊าซ LPG จะมีค่าดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 การเทียบเท่าค่าการผลิตก๊าซชีวภาพกับค่าพลังงาน

พารามิเตอร์	ค่าพลังงาน
ก๊าซชีวภาพจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับต้นแบบ (ลบ.ม.) ระยะเวลาการหมักรวมทั้งสิ้น 4 เดือน	2.157
พลังงานความร้อน (เมกกะจูล)	84.99
ก๊าซ LPG (กิโลกรัม)	0.99

จากข้อมูลงานวิจัยนี้สามารถใช้ในการสนับสนุนการนำฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ขยะเศษอาหาร และมูลสัตว์ มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นทางเลือกสำหรับเป็นพลังงานทดแทน ทั้งยังเป็นทางเลือกในการลดปัญหาการเผาฟางข้าว และปัญหาขยะเศษอาหาร และสามารถเชื่อมโยงไปสู่การพัฒนาอย่างยั่งยืน (SDGs) ในเป้าหมายที่ 7.2 เพิ่มสัดส่วนของพลังงานทดแทน และเป้าหมายที่ 12.3 การลดของเสียที่เป็นอาหาร

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการวิจัยครั้งนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ และการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับ Pilot scale ซึ่งในผลการวิจัยแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า ในระดับต้นแบบใช้ระยะเวลาในการปรับตัวนานถึง 90 วัน จึงเกิดการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากการกวนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพระดับต้นแบบนั้น ไม่มีการกวนตลอดเวลา รวมถึงขนาดของฟางข้าวในระดับห้องปฏิบัติการนั้น มีขนาดเล็กกว่าในระดับต้นแบบ นอกจากนี้ควรมีการวิเคราะห์องค์ประกอบของขยะเศษอาหารเพื่อทำให้เป็นข้อมูลการประเมินการผลิตก๊าซชีวภาพได้ นำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพให้มากขึ้นได้

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2557). **คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทนชุดที่ 5 พลังงานก๊าซชีวภาพ**. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน: กระทรวงพลังงาน.
- ชัยวัช โขวเจริญสุข. (2562). อุตสาหกรรมข้าว แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม ปี 2562-64. *Krungsri Research*. 1-10.
- ปิติพร มโนคุ่น. (2562). **การปรับสภาพหญ้าเนเปียร์โดยใช้คลื่นไมโครเวฟร่วมกับสารประกอบเกลือคลอไรด์**. รายงานการวิจัย: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.
- เทวรัตน์ ตรีอำนาจ วีรัชย์ อัจหาญ ธนากร แนวกลาง และเบญจวรรณ วานมนตรี. (2558). **การใช้ประโยชน์จากฟางข้าว: กรณีศึกษาบรรจุภัณฑ์สำหรับผลผลิตทางการเกษตร**. รายงานการวิจัย: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- พาริตดา พรหมมา ดุชนิ ธนะบริพัฒน์ และปราโมทย์ ศิริโรจน์. (2557). การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ 3 สายพันธุ์. *วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง*. 23(2), 30-50.
- วิจิตรพร เจริญรัตน์ ปรีชา จันทพงษ์ จงจิตร หิรัญลาภ และโจเซฟ เคดารี. (2016). การผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวร่วมกับมูลสัตว์โดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. *Journal of Energy and Environment Technology*. 3(1), 1-10.
- วันสพรศักดิ์ สวัสดิ์ และนิพนธ์ พิสุทธิไพศาล. (2562). **การทดสอบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่ปลูกในดินเสื่อมโทรม**. การประชุมวิชาการระดับชาติ “ราชมงคลสุรินทร์ ครั้งที่ 10” 19-20 กันยายน 2562.
- สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย. (2562). **การศึกษาแนวทางการบริหารจัดการอาหารส่วนเกินเพื่อลดปัญหาขยะอาหารที่เหมาะสมกับประเทศไทย**. รายงานฉบับสมบูรณ์สถาบันวิจัยเพื่อการพัฒนาประเทศไทย. สืบค้นจาก <https://tdri.or.th/2019/09/food-waste-management/>
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2563). สืบค้นจาก <http://www.oae.go.th>
- อัมพรรค์ วรรณโกมล. 2563. ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียที่ได้จากการทำฟาร์มกุ้งและวัสดุหมักร่วม. *วารสารสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)*. 28(1), 29-30.
- อลิศรา เรืองแสง. (2562). **เชื้อเพลิงชีวภาพและชีวเคมีภัณฑ์โดยจุลินทรีย์**. ขอนแก่น: คณะเทคโนโลยี: มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- Al, Seadi, T., Drosig, B., Fuchs, W., Rutz, D. & Janssen, R. (2013). *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*. Woodhead Publishing: Cambridge, 267 – 301.

- Alvarado, A. et al. (2014) Microbial trophic interactions and mcrA gene expression in monitoring of anaerobic digesters. **Frontiers in Microbiology**, 5(597), 1-14
- Amith, A., et al. (2020). Pretreatment Strategies for Enhanced Biogas Production from Lignocellulosic Biomass. **Bioresource Technology**, 301, 122725.
- Amani, T., Nosrati, M. & Sreekrishnan, T. R. (2010). Anaerobic Digestion from the Viewpoint of Microbiological, Chemical, and Operational Aspects-A Review. **Environ Rev**, 18, 255 – 278.
- Amin F. R., et al. (2017). Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass for Anaerobic Digestion, **AMB Express**, 7, 72.
- American Public Health Association-American Water Works Association-Water Pollution Control Federation (APHA-AWWA-WPCF). (2017). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 23rd ed. APHA, Washington, DC.
- Anan, A. A., Mahadi, H. M., Peter, D., Mosarrat, M. & Sami, A. C., (2021). Survey and analysis of consumers' behaviour for electronic waste management in Bangladesh, **Journal of Environmental Management**, 282, 111943.
- Bajpai, P. (2017). **Anaerobic Technology in Pulp and Paper Industry**. Springer: Singapore.
- Cheng, J. J. (2017). Biomass to Renewable Energy Process. CRC Press: Boca Raton, Florida, 140 – 192.
- Gu, Y., Chen, X., Liu, Z., Zhou, x., & Zhang, Y. (2014). Effect of Inoculum Sources on the Anaerobic Digestion of Rice Straw. **Bioresource Technol**, 158, 149 – 155.
- Gummert, M., Hung, V. N. & Chivenge, P. D. (2020). **Sustainable Rice Straw Management**. eBook, Springer Open.
- Ghatak, M. D. & Mahanata, P. (2018). Effect of Temperature on Biogas Production from Rice Straw and Rice Husk. IOP Conf. Series: **Materials Science and Engineering**, 377, 012146.
- Kamada, T., Nakamura, H., Tezuka, T., Hasegawa, S. & Maruta, K. (2014). Study on Combustion and Ignition Characteristics of Natural Gas Components in a Micro Flow Reactor with a Controlled Temperature Profile. **Combust Flame**, 161, 37 – 48.

- Kangle, K.M., Kore, S. V., Kore, V. S. & Kulkarni, G. S. (2012). Recent Trends in Anaerobic Co-digestion: A Review. **Univers J Environ Res Technol**, 2, 210 – 219.
- Kathleen, M. C. & Even, T. (2017). The use of Gompertz Models in Growth Analyses, and New Gompertz-Model Approach: An Addition to the Unified-Richards Family. **PLOS ONE**, 12(6), 1-17.
- Li, N., et al. (2015). Effects of feedstock ratio and organic loading rate on the anaerobic mesophilic co-digestion of rice straw and pig manure. **Bioresour. Technol.** 187, 120–127.
- Liu, X.; et al. (2012) Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste and waste activated sludge in China: Effect of organic loading rate. **Waste Manag.** 32, 2056–2060.
- Mähnert, P. & Linke, B. (2009). Kinetic study of biogas production from energy crops and animal waste slurry: Effect of organic loading rate and reactor size. **Environ. Technol.** 30, 93–99.
- Martin, G., · Nguyen, V. H., Pauline, C., · Boru, D. (Editors). (2020). **Sustainable Rice Straw Management**, 2 - 9
- Mina, T., Forough, M., & Keikhosro, K. (2021). The Critical Impact of Rice Straw Extractives on Biogas and Bioethanol Production. **Bioresource Technology**, 319: 124167.
- Mosquera, J., et al. (2021). Biogas Production by Pilot-Scale Anaerobic Co-Digestion and Life Cycle Assessment Using a Real Scale Scenario: Independent Parameters and Co-Substrates Influence. **Processes**, 9, 1875.
- Moody, L. B., Burns, R. T., Bishop, G., Sell, S. T., & Spajic, R. (2011). Using biochemical methane potential assays to aid in co-substrate selection for co-digestion. **Applied Engineering in Agriculture**. 27(3), 433-439.
- Munoz, R., Meier, L., Diaz, I. & Jeison, D. (2015). A Review on the State-of-the-art of Physical/Chemical and Biological Technologies for Biogas upgrading. **Rev EnvironDci Biotechnol**, 14, 727 – 759.

- Nie, X. N., Liu, J., She, D., Sun, R. C. & Xu, F. (2013). Physicochemical and Structural Characterization of Hemicelluloses Isolated by Different Alcohols from Rice Straw. **BioResources**, 8(3), 3817-3832.
- Okeh, C. O., Chukwudi, O. O. & Frederick J. C. O. (2014). Biogas Production from Rice Husks Generated from Various Rice Mills in Ebonyi State, Nigeria. **Renewable Energy**, 62, 204-208.
- Patterson, T., Esteves, S., Dinsdale, R. & Guwy, A. (2011). An Evaluation of the Policy and Techno-Economic Factors Affecting the Potential for Biogas Upgrading for Transport Fuel use in the UK. **Energy policy**, 39, 1806 – 1816.
- Public and Private Infrastructure Investment Management Center (PIMAC). (2008). **General Guidelines for Preliminary Feasibility Studies (Fifth Edition)**. Sejong-si, Korea.
- Ryckebosch, E., Drouillon, M. & Vervaeren, H. (2011). Techniques for Transformation of Biogas to Biomethane. **Biomass Bioenergy**, 35, 1633 – 1645.
- Shah, F. A., Mahmood, Q., Shah, M. M., Pervez, A. & Asad, S. A. (2014). Microbial Ecology of Anaerobic Digesters: The key players of anaerobiosis. **Sci World J**, 1 – 21.
- Sawasdee, V. & Pisutpaisal, N. (2014). Feasibility of Biogas Production from Napier Grass. **Energy Procedia**, 61, 1229 – 1233.
- Song, Z. & Zhang, C. (2015). Anaerobic codigestion of pretreated wheat straw with cattle manure and analysis of the microbial community. **Biores. Technol.** 186, 128–135.
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J. & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. **Renew Sustain Energy Rev**, 38, 383 – 392.
- Zuo, Z., Wu, S., Zhang, W. & Dong, R. (2013). Effects of Organic Loading Rate and Effluent Recirculation on the Performance of Two-stage Anaerobic Digestion of Vegetable Waste. **Bioresource Technol**, 146, 556 – 561.



ภาคผนวก

GRAD VRU



1703872899

VRU iThesis 61G54800104 thesis / recv : 04082566 22:23:58 / seq : 32



ภาคผนวก ก
ข้อมูลดิจิทัลชีวภาพในห้องปฏิบัติการ

GRAD VRU



1703872899

VRU iThesis 61G54800104 thesis / recv : 04082566 22:23:58 / seq : 32

ข้อมูลดิบก๊าซชีวภาพในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพตลอดระยะเวลาการทดลอง

Day	Time (hr)	Total gas (mL)			Avg	Std.
		# 1	# 2	#3		
0	0	0.0	0.0	0.0	0	0
1	24	156	156	156	156	0
2	48	104	104	104	104	0
3	72	312	312	312	312	0
4	96	338	338	338	338	0
5	120	676	676	676	676	0
6	144	702	702	702	702	0
7	168	858	858	858	858	0
8	192	780	780	780	780	0
9	216	884	884	884	884	0
10	240	1170	1170	1170	1170	0
11	264	988	1014	1040	1014	26
12	288	338	364	364	355	15
13	312	702	702	702	702	0
14	336	1170	1170	1170	1170	0
15	360	780	780	780	780	0
16	384	286	286	286	286	0
17	408	442	442	442	442	0
18	432	572	572	572	572	0
20	480	442	442	442	442	0
22	528	1560	1560	1560	1560	0
24	576	1950	1950	1950	1950	0
26	624	2418	2418	2470	2435	30
28	672	1690	1690	1690	1690	0
30	720	182	182	182	182	0
32	768	130	130	130	130	0
34	816	78	78	78	78	0
36	864	52	52	52	52	0
38	912	26	26	26	26	0
40	960	26	26	26	26	0

ตารางที่ 2 แสดงปริมาตรก๊าซชีวภาพสะสมตลอดระยะเวลาการทดลอง

Day	Time (hr)	Cumulative total gas (mL)			Avg	Std.
		# 1	# 2	#3		
0	0	0	0	0	0	0
1	24	156	156	156	156	0
2	48	260	260	260	260	0
3	72	572	572	572	572	0
4	96	910	910	910	910	0
5	120	1586	1586	1586	1586	0
6	144	2288	2288	2288	2288	0
7	168	3146	3146	3146	3146	0
8	192	3926	3926	3926	3926	0
9	216	4810	4810	4810	4810	0
10	240	5980	5980	5980	5980	0
11	264	6968	6994	7020	6994	26
12	288	7306	7358	7384	7349	40
13	312	8008	8060	8086	8051	40
14	336	9178	9230	9256	9221	40
15	360	9958	10010	10036	10001	40
16	384	10244	10296	10322	10287	40
17	408	10686	10738	10764	10729	40
18	432	11258	11310	11336	11301	40
20	480	11700	11752	11778	11743	40
22	528	13260	13312	13338	13303	40
24	576	15210	15262	15288	15253	40
26	624	17628	17680	17758	17689	65
28	672	19318	19370	19448	19379	65
30	720	19500	19552	19630	19561	65
32	768	19630	19682	19760	19691	65
34	816	19552	19604	19682	19613	65
36	864	19500	19552	19630	19561	65
38	912	19214	19266	19344	19275	65
40	960	18902	18954	19032	18963	65

ตารางที่ 3 แสดงเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนตลอดระยะเวลาการทดลอง

Day	Time (hr)	% Methane			Avg	Std.
		# 1	# 2	#3		
0	0	0.00000	0.00000	0.00000	0.00	0.00
1	24	6.09969	6.17276	7.32872	6.53	0.69
2	48	8.25950	8.36392	8.33994	8.32	0.05
3	72	11.25950	11.36392	8.33994	10.32	1.72
4	96	12.94710	14.51975	16.53764	14.67	1.80
5	120	25.11899	25.15266	22.03049	24.10	1.79
6	144	26.07349	26.69953	26.53363	26.44	0.32
7	168	30.82512	29.08855	29.98560	29.97	0.87
8	192	48.98230	47.19697	46.27650	47.49	1.38
9	216	62.34658	57.40966	58.18971	59.32	2.65
10	240	65.33009	64.85336	64.53634	64.91	0.40
11	264	69.92145	69.99978	69.68642	69.87	0.16
12	288	67.77937	68.89311	68.08795	68.25	0.58
13	312	67.33324	66.18362	67.53333	67.02	0.73
14	336	69.88536	69.60982	68.29547	69.26	0.85
15	360	69.21929	67.35545	67.29043	67.96	1.10
16	384	66.59241	65.92789	66.79553	66.44	0.45
17	408	65.10813	65.26763	66.24124	65.54	0.61
18	432	62.23133	63.43628	62.31122	62.66	0.67
20	480	61.20154	63.06443	62.92109	62.40	1.04
22	528	64.75530	62.91877	63.10641	63.59	1.01
24	576	67.66791	65.92157	66.470844	66.69	0.89
26	624	69.23685	68.66430	67.47312	68.46	0.90
28	672	70.57659	71.14987	68.78281	70.17	1.23
30	720	40.17012	41.9171	41.63457	41.24	0.94
32	768	15.78551	15.16873	15.25907	15.40	0.33
34	816	9.60469	9.60469	9.60469	9.60	0.00
36	864	5.43250	5.34231	5.09567	5.29	0.17
38	912	2.50966	2.79464	3.13566	2.81	0.31
40	960	1.981	2.0112	2.0982	2.03	0.06

ตารางที่ 4 แสดงปริมาตรก๊าซมีเทนตลอดระยะเวลาการทดลอง

Day	Time (hr)	Methane (mL)			Avg	Std.
		# 1	# 2	#3		
0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	24	9.5	9.6	11.4	10.2	1.1
2	48	8.6	8.7	8.7	8.7	0.1
3	72	35.1	35.5	26.0	32.2	5.4
4	96	43.8	49.1	55.9	49.6	6.1
5	120	169.8	170.0	148.9	162.9	12.1
6	144	183.0	187.4	186.3	185.6	2.3
7	168	264.5	249.6	257.3	257.1	7.5
8	192	382.1	368.1	361.0	370.4	10.7
9	216	551.1	507.5	514.4	524.3	23.5
10	240	764.4	758.8	755.1	759.4	4.7
11	264	690.8	709.8	724.7	708.5	17.0
12	288	229.1	250.8	247.8	242.6	11.8
13	312	472.7	464.6	474.1	470.5	5.1
14	336	817.7	814.4	799.1	810.4	9.9
15	360	539.9	525.4	524.9	530.0	8.5
16	384	190.5	188.6	191.0	190.0	1.3
17	408	287.8	288.5	292.8	289.7	2.7
18	432	356.0	362.9	356.4	358.4	3.9
20	480	270.5	278.7	278.1	275.8	4.6
22	528	1010.2	981.5	984.5	992.1	15.8
24	576	1319.5	1285.5	1296.2	1300.4	17.4
26	624	1674.1	1660.3	1666.6	1667.0	6.9
28	672	1192.7	1202.4	1162.4	1185.9	20.9
30	720	73.1	76.3	75.8	75.1	1.7
32	768	20.5	19.7	19.8	20.0	0.4
34	816	7.5	7.5	7.5	7	0
36	864	2.8	2.8	2.6	3	0
38	912	0.7	0.7	0.8	1	0
40	960	0.5	0.5	0.5	1	0

ตารางที่ 5 แสดงปริมาตรก๊าซมีเทนสะสมตลอดระยะเวลาการทดลอง

Day	Time (hr)	Cumulative Methane (mL)			Avg	Std.
		# 1	# 2	#3		
0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	24	9.5	9.6	11.4	10.2	1.1
2	48	18.1	18.3	20.1	18.8	1.1
3	72	53.2	53.8	46.1	51.0	4.3
4	96	97.0	102.9	102.0	100.6	3.2
5	120	266.8	272.9	251.0	263.5	11.3
6	144	449.8	460.3	437.2	449.1	11.6
7	168	714.3	709.9	694.5	706.2	10.4
8	192	1096.4	1078.0	1055.4	1076.6	20.5
9	216	1647.5	1585.5	1569.8	1601.0	41.1
10	240	2411.9	2344.3	2324.9	2360.4	45.6
11	264	3102.7	3054.1	3049.7	3068.8	29.4
12	288	3331.8	3304.9	3297.5	3311.4	18.1
13	312	3804.5	3769.5	3771.6	3781.9	19.6
14	336	4622.1	4583.9	4570.6	4592.2	26.7
15	360	5162.1	5109.3	5095.5	5122.3	35.1
16	384	5352.5	5297.9	5286.5	5312.3	35.3
17	408	5640.3	5586.3	5579.3	5602.0	33.4
18	432	5996.2	5949.2	5935.7	5960.4	31.8
20	480	6266.8	6227.9	6213.9	6236.2	27.4
22	528	7276.9	7209.5	7198.3	7228.2	42.5
24	576	8596.5	8495.0	8494.5	8528.6	58.7
26	624	10270.6	10155.3	10161.1	10195.7	65.0
28	672	11463.4	11357.7	11323.5	11381.5	72.9
30	720	11536.5	11434.0	11399.3	11456.6	71.3
32	768	11557.0	11453.7	11419.1	11476.6	71.7
34	816	11555.0	11451.6	11415.2	11473.9	72.5
36	864	11549.2	11445.6	11409.2	11468.0	72.6
38	912	11514.7	11410.9	11384.0	11436.5	69.0
40	960	11471.5	11362.4	11328.6	11387.5	74.7



ภาคผนวก ข
ข้อมูลจากโปรแกรม Sigma Plot

GRAD VRU



1703872899

VRU iThesis 61G54800104 thesis / recv : 04082566 22:23:58 / seq : 32

Data Source: Data 1 in Notebook1

Equation: User-Defined, MG

$$f=a*\exp(-\exp((b*2.718281828)/a*(c-x)+1))$$

Dynamic Fit Options:

Total Number of Fits	200
Maximum Number of Iterations	100

Parameter Ranges for Initial Estimates:

	Minimum	Maximum
a	0.0000	44443.5000
b	0.0000	120.0000
c	0.0000	30.0000

Summary of Fit Results:

Converged	100.0%
Singular Solutions	4.0%

Results for the Overall Best-Fit Solution:

R	Rsqr	Adj Rsqr	Standard Error of Estimate		
0.9916	0.9833	0.9833	608.3883		
	Coefficient	Std. Error	t	P	
a	14550.4770	112.8782	128.9043	<0.0001	
b	590.8288	5.8898	100.3142	<0.0001	
c	6.9875	0.0945	73.9751	<0.0001	

Analysis of Variance:

	DF	SS	MS
Regression	350965484426.7043	16988494808.9014	
Residual	1015	375688429.9758	370136.3842
Total	101851341172856.6801	50433372.1578	

Corrected for the mean of the observations:

	DF	SS	MS
Regression	222133234350.5334	11066617175.2667	
Residual	1015	375688429.9758	370136.3842
Total	101722508922780.5092	22132667.4341	



1703872899

VRU :Thesis 61G54800104 thesis / recv: 04082566 22:23:58 / seq: 32

GRAD VRU



ภาคผนวก ค

ข้อมูลดิบก๊าซชีวภาพในระดับนำร่อง (Pilot Scale)

GRAD VRU



1703872899

VRU iThesis 61G54800104 thesis / recv : 04082566 22:23:58 / seq : 32

ตารางที่ 6 แสดงข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพ เปลี่ยนแปลงที่ก๊าซชีวภาพ และปริมาณธาตุไนโตรเจน

Day	biogas (m ³)		CH ₄ (%)		avg	std	methane (m ³)		avg	std				
	avg	std	55	55			0.8822	0.8822			0.8822	0.8811		
0 (91)	1.604	1.604	1.602	1.603	0.001	0.001	55	55	55	0	0.8822	0.8811	0.882	0.001
4	1.735	1.735	1.734	1.735	0.001	0.001	55	55	55	0	0.95425	0.9537	0.954	0.000
8	1.921	1.921	1.920	1.921	0.001	0.001	56	56	55.67	0.58	1.07576	1.056	1.069	0.011
12	1.930	1.930	1.928	1.929	0.001	0.001	56	56	55.67	0.58	1.0808	1.0604	1.074	0.012
16	2.108	2.108	2.106	2.107	0.001	0.001	55	55	55	0	1.1594	1.1583	1.159	0.001
20	2.148	2.148	2.148	2.148	0.000	0.000	55	55	55	0	1.1814	1.1814	1.181	0.000
24	2.148	2.148	2.146	2.147	0.001	0.001	54	54	54	0	1.15992	1.15884	1.160	0.001
28	2.158	2.158	2.156	2.157	0.001	0.001	55	55	55	0	1.1869	1.1858	1.187	0.001
32	2.158	2.158	2.158	2.158	0.000	0.000	55	55	55	0	1.1869	1.1869	1.187	0.000
36	2.157	2.157	2.157	2.157	0.000	0.000	56	56	55.67	0.58	1.20792	1.18635	1.201	0.012

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นายตราบุญ คงกระศรี
วัน เดือน ปี เกิด	24 มกราคม 2531
สถานที่เกิด	จังหวัดยโสธร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2554 ศิลปศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาภาษาอังกฤษธุรกิจ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ที่อยู่ปัจจุบัน	65/63 หมู่4 ตำบลดอนหัวฬ่อ อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20000
ผลงานตีพิมพ์	ตราบุญ คงกระศรี, นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล และวันสพรศรี สวัสดิ์. (2565). การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรและขยะเศษอาหาร. การประชุมวิชาการ “นเรศวรวิจัยและนวัตกรรม” ครั้งที่ 18: Steering towards Frontier University: Challenges and Foresight, 184 - 191.



1703872899

VRU iThesis 61G54800104 thesis / rev: 04082566 22:23:58 / seq: 32

GRAD VRU