รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

นวัตกรรมการบูรณาการการใช้ประโยชน์จากเศษอาหารแบบครบวงจร

Innovative integration approach for utilization of food waste

ชัชวินทร์ นวลศรี

คงเดช พะสีนาม

ปุณณดา ทะรังศรี

ธันวมาส กาศสนุก

จักรกฤช ศรีละออ

คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร

รายงานนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

พ.ศ. 2562

กิตติกรรมประกาศ

ชุดโครงการวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนพัฒนาการวิจัยและบริหารจัดการงานวิจัย สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ประจำปีงบประมาณ 2561 ประเภททุนวิจัยเพื่อพัฒนานักวิจัย (สัญญารับทุนเลขที่ RDI-4-61-14) คณะผู้วิจัยขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการดำเนินงานวิจัย และขอขอบคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ ที่ให้การสนับสนุนการวิจัย จนชุดโครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ชัชวินทร์ นวลศรี

พฤศจิกายน 2562

หัวข้องานวิจัยเรื่อง นวัตกรรมการบูรณาการการใช้ประโยชน์จากเศษอาหารแบบครบวงจร
ชื่อผู้วิจัย ชัชวินทร์ นวลศรี และคณะ
คณะ เทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร
มหาวิทยาลัย ราชภัฏพิบูลสงคราม
ปี 2562
คำสำคัญ เศษอาหาร มีเทน ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ

บทคัดย่อ

กระบวนการหมักแบบไร้อากาศเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าเป็นวิธีการกำจัดเศษอาหารที่มีประสิทธิภาพและยังได้พลังงานงานทดแทนกลับมาใช้ประโยชน์ แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาสำคัญที่สุดประการหนึ่งคือการลดต่ำลงของค่า pH ในกระบวนการหมัก อันเนื่องมาจากความไม่สมดุลของการผลิตกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids; VFAs) ที่สร้างขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่การนำ VFAs ไปใช้ในการสร้างแก๊สมีเทนเกิดขึ้นได้ช้า ส่งผลให้เกิดการสะสมของ VFAs ในระบบ ซึ่งแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาคือ การนำพีเอชบัฟเฟอร์มาใช้ในการควบคุมค่า pH ของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ชุดโครงการวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาชนิดและความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหาร โดยมีการศึกษาทั้งถังหมักแก๊สมีเทนในระดับห้องปฏิบัติการและถังหมักระดับครัวเรือน นอกจากนี้ ยังได้ศึกษาการนำกากตะกอนและน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนมาผลิตเป็นปุ๋ยอินทรีย์น้ำ เพื่อประยุกต์ใช้ทางการเกษตร ผลการวิจัยพบว่า ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นบัฟเฟอร์ของกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหารมากที่สุด เนื่องจากถ่านกัมมันต์ช่วยรักษาระดับ pH ของน้ำหมัก ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตมีเทนสูงขึ้น และยังช่วยในการดูดซับสีและกลิ่นของน้ำหมักได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารที่เหมาะสมเท่ากับ 3:1 ทำให้ได้ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสม ค่าผลได้ของมีเทน และค่าพลังงานของมีเทนสูงที่สุด เท่ากับ 959 mL, 107 mL/g-VS และ 3.83 kJ/g-VS ตามลำดับ นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ยังส่งผลกระทบทางลบต่อกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนน้อยที่สุด เมื่อใช้ในความเข้มข้นระดับสูง ซึ่งจากผลการขยายขนาดถังหมักสู่ระดับครัวเรือน พบว่า ระบบสามารถรองรับปริมาณเศษอาหารได้ประมาณ 3-5 กิโลกรัมต่อวัน ถ่านกัมมันต์และปูนขาวสามารถใช้เป็นบัฟเฟอร์ได้ โดยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน จากการนำกากตะกอนและน้ำทิ้งจากกระบวนการหมักมาผลิตเป็นปุ๋ยอินทรีย์น้ำ และทดสอบการเจริญเติบโตกับผักคะน้า พบว่า สภาวะของปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเพิ่มปริมาณน้ำหนักสดของคะน้า คือ ความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ 26.29 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณในการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ 74.13 มิลลิลิตรต่อต้น และความถี่ในการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ 6.00 วัน ส่งผลให้ได้น้ำหนักสดของคะน้าเท่ากับ 96.58 กรัม

Research Title Innovative integration approach for utilization of food waste

Author Chatchawin Nualsri, et al.

Faculty Food and Agricultural Technology

Institute Pibulsongkram Rajabhat University

Year 2019

Keywords Food waste, Methane, Organic liquid fertilizer

ABSTRACT

Anaerobic digestion has been proved as a promising process for food waste removal along with renewable energy generation. However, the rapid drop of pH during anaerobic digestion of food waste is one of the serious problems due to imbalance between fast acidification and slow methanogenesis, resulting in accumulation of volatile fatty acids (VFAs). The uses of buffering agents to stabilize VFAs are often recommended to maintain a neutral pH of fermentation broth. This research program aimed to study the effect of buffering agents and theirs concentrations on the stability of methane production from food waste. The both of laboratory and household scale of methane production reactor were studied. After that, the study of organic liquid fertilizer production from sludge and wastewater of methane production for applying in agriculture was conducted. Results revealed that activated carbon was the most suitable material to use as buffering agent in anaerobic digestion of food waste. This is because activated carbon could efficiently control pH in the fermentation broth, resulting in improvement of methane production. In addition, activated carbon could effectively absorb the color and odors in wastewater from anaerobic digestion of food waste. The results of upscaling lab-scale reactor into household scale showed that the reactor could handle the loads of food waste at 3-5 kilograms per day. Activated carbon and calcium carbonate could be used as buffering agents with the same efficiency. Moreover, sludge and wastewater from methane production was used to produce organic liquid fertilizer and applying to Chinese kale. Results revealed that the optimum concentration, volume and frequency of organic liquid fertilizer application were 26.29%, 74.13 mL/day and every 6 days, respectively. The maximum of Chinese kale's fresh weight of 96.58 g was obtained.

สารบัญ

บทที่		หน้า
	กิตติกรรมประกาศ	ก
	บทคัดย่อภาษาไทย	ข
	บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
	สารบัญ	ง
	สารบัญตาราง	ช
	สารบัญภาพ	ซ
1	**บทนำแผนงานวิจัย**	1
	ความสำคัญและที่มาของแผนงานวิจัย.....	1
	วัตถุประสงค์ของแผนงานวิจัย.....	2
	ขอบเขตของงานและความเชื่อมโยงของโครงการวิจัย.....	2
	ทบทวนวรรณกรรม.....	4
	วิธีการดำเนินการแผนงานวิจัย.....	16
2	**การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารโดยใช้พีเอชบัฟเฟอร์**	17
	บทนำ.....	17
	วัตถุประสงค์.....	18
	ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	18
	ทบทวนวรรณกรรม.....	18
	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	27
	ผลการวิจัย.....	33
	อภิปรายผลการวิจัย.....	40
	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	44
	บรรณานุกรม.....	45

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	**การออกแบบชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารสำหรับชุมชน 4.0**	49
	บทนำ.....	49
	วัตถุประสงค์.....	49
	ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	50
	ทบทวนวรรณกรรม.....	50
	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	57
	ผลการวิจัย.....	61
	อภิปรายผลการวิจัย.....	66
	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	67
	บรรณานุกรม.....	67
4	**การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่มีต่อผลผลิตคะน้า**	69
	บทนำ.....	69
	วัตถุประสงค์.....	69
	ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	69
	ทบทวนวรรณกรรม.....	70
	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	71
	ผลการวิจัย.....	74
	อภิปรายผลการวิจัย.....	77
	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	78
	บรรณานุกรม.....	78

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
5	อภิปรายผล สรุป และข้อเสนอแนะ	80
	อภิปรายผลการวิจัยของแผนงานวิจัย.....	80
	สรุปผลการวิจัย.....	83
	ข้อเสนอแนะ.....	83
บรรณานุกรมรวม.....		84
ประวัติผู้วิจัย.....		89

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	แสดงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	19
2.2	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเศษอาหาร และเม็ดตะกอนจุลินทรีย์	33
3.1	แสดงองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ	52
3.2	ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักในถังหมักแก๊สชีวภาพสัปดาห์ที่ 1	61
3.3	ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักแก๊สชีวภาพสัปดาห์ที่ 2	63
3.4	ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักแก๊สชีวภาพสัปดาห์ที่ 3	64
3.5	ตารางแสดงปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้จากชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร	65
4.1	ระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลองทางสถิติแบบส่วนผสมกลาง	73
4.2	การให้ปุ๋ยอินทรีย์น้ำตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง ตามระดับของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (X_1), ปริมาณการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (X_2) ความถี่ในการใส่ (X_3)	73
4.3	แสดงการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมการแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษาและค่าการตอบสนองต่อการใช้ปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่มีต่อน้ำหนักสดของคะน้า	75
4.4	การพิสูจน์แบบจำลอง	77

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
1.1	ขั้นตอนในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ	4
2.1	การผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหารโดยใช้ชนิดและความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ที่แตกต่างกัน	31
2.2	การวัดปริมาตรแก๊สมีเทนด้วยวิธีการแทนที่ของเหลว	31
2.3	ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมเมื่อใช้ชนิดและความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ที่แตกต่างกัน	34
2.4	ค่า pH ของกระบวนการหมักเมื่อใช้ชนิดและความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ที่แตกต่างกัน	35
2.5	ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมเมื่อใช้อัตราส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อเศษอาหารที่แตกต่างกัน	36
2.6	ค่า pH ของกระบวนการหมักเมื่อใช้อัตราส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อเศษอาหารที่แตกต่างกัน	37
2.7	ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมเมื่อใช้อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารที่แตกต่างกัน	38
2.8	ค่า pH ของกระบวนการหมักเมื่อใช้อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารที่แตกต่างกัน	39
2.9	ลักษณะทางกายภาพของน้ำหมักจากกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหาร	39
3.1	แสดงขั้นตอนในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ	51
3.2	ขั้นตอนการทำงานของชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารต้นแบบสำหรับชุมชน	54
3.3	แบบจำลองและขนาดของชุดหมักเศษอาหารและเก็บแก๊สชีวภาพ	58
3.4	เครื่องบดเศษอาหาร	58
3.5	แบบจำลองชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารสำหรับชุมชน	59
3.6	ชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารสำหรับชุมชน	59
3.7	เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง	60
3.8	เครื่องวัดปริมาณแก๊สชีวภาพ	60
3.9	กราฟแสดงผลค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมัก สัปดาห์ที่ 1	62
3.10	กราฟแสดงผลค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมัก สัปดาห์ที่ 2	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพ		หน้า
3.11	กราฟแสดงผลค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมัก สัปดาห์ที่ 3	64
3.12	กราฟแสดงปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้จากชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร	66
4.1	แสดงผลการตอบสนองต่อพื้นที่ผิวที่มีต่อน้ำหนักสดคะน้าจากปัจจัยแต่ละระดับของความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (X_1), ปริมาณการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (X_2) ความถี่ในการใส่ (X_3)	76

บทที่ 1
บทนำแผนงานวิจัย

ความสำคัญและที่มาของแผนงานวิจัย

ระบบการจัดการขยะมูลฝอยของประเทศไทย ส่วนมากใช้วิธีการกองทิ้งและเผากลางแจ้ง รองลงมาคือการใช้วิธีฝังกลบ และมีเพียงส่วนน้อยที่ใช้วิธีการเผาอย่างถูกต้อง (กรมควบคุมมลพิษ, 2562) ซึ่งจากข้อมูลการจัดเก็บขยะในภาพรวมของประเทศไทย พบว่ามีขยะมูลฝอยเกิดขึ้นมากกว่า 40,000 ตันต่อวัน ทำให้เกิดปัญหาเรื่องการจัดการและปัญหาหลุมฝังกลบเริ่มไม่เพียงพอต่อปริมาณขยะที่เพิ่มมากขึ้นทุกปี โดยเฉพาะขยะสดที่เน่าเสียง่ายอย่างเศษอาหารจากครัวเรือน ซึ่งเป็นขยะที่มีปริมาณมากโดยเฉลี่ยถึงร้อยละ 60 (โดยน้ำหนัก) ของปริมาณขยะทั้งหมด จากการที่ผู้วิจัยได้เคยมีโอกาสลงพื้นที่เพื่อรับฟังปัญหาของประชาชนในเขตเทศบาลพลายชุมพล จังหวัดพิษณุโลก พบว่าเคยมีหน่วยงานภาครัฐและภาคการศึกษาได้ลงพื้นที่ให้ความรู้แก่ประชาชนในเรื่องการนำเศษอาหารครัวเรือนมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เช่น การทำปุ๋ยหมักจากเศษอาหาร การผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร เป็นต้น ซึ่งประชาชนส่วนใหญ่ได้ให้ความสนใจในเรื่องการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารในครัวเรือนโดยใช้ชุดถังหมักขนาด 200 ลิตร เนื่องจากสามารถนำแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้มาใช้ทดแทนแก๊สหุงต้มในครัวเรือน เป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายลงได้ แต่อย่างไรก็ตาม การควบคุมระบบผลิตแก๊สชีวภาพดังกล่าวในระยะยาว ยังคงต้องอาศัยผู้ที่มีความรู้ความเชี่ยวชาญในระดับหนึ่ง เพื่อให้สามารถควบคุมปริมาณการเติมเศษอาหาร รวมถึงการแก้ปัญหาที่มักเกิดขึ้นกับระบบบ่อยที่สุด คือ การสะสมของกรดอินทรีย์จนเป็นสาเหตุให้แก๊สชีวภาพหยุดผลิต ส่งผลให้ในระยะหลังนี้ ชุมชนจึงให้ความสนใจในระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารลดน้อยลง เนื่องจากความยุ่งยากในการดูแลรักษาและซ่อมบำรุงระบบดังที่กล่าวมา ดังนั้น ชุดโครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อปรับปรุงระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารแบบดั้งเดิม โดยการสร้างนวัตกรรมต้นแบบการใช้ประโยชน์จากเศษอาหารที่ใช้หลักการบูรณาการแบบครบวงจร ประกอบไปด้วยการปรับปรุงกระบวนการเติมเศษอาหารร่วมกับการใช้บัฟเฟอร์ เพื่อเป็นการรักษาค่า pH ของระบบไม่ให้ลดต่ำลงเนื่องจากการสะสมของกรดอินทรีย์ การสร้างเครื่องต้นแบบผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารแบบครบวงจร โดยมีการนำแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้มาใช้ในการหุงต้มและผลิตกระแสไฟฟ้า และการนำกากตะกอนและน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพมาผลิตเป็นปุ๋ยอินทรีย์น้ำเพื่อใช้ประโยชน์ด้านการเกษตร ดังนั้น เทคโนโลยีต้นแบบที่ได้จากชุดโครงการวิจัยนี้ จึงสามารถนำไปต่อยอดขยายผลสู่การถ่ายทอดความรู้และรณรงค์ให้ชุมชนมีการแยกเศษอาหารออกจากขยะทั่วไป แล้วนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งจะเป็นการช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้อย่างยั่งยืน ส่งผลให้ชุมชนมีความเข้มแข็งและสามารถพึ่งพาตนเองได้

วัตถุประสงค์ของแผนงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร
2. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบการใช้ประโยชน์จากเศษอาหารแบบครบวงจร
3. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ

ขอบเขตของงานและความเชื่อมโยงของโครงการวิจัย

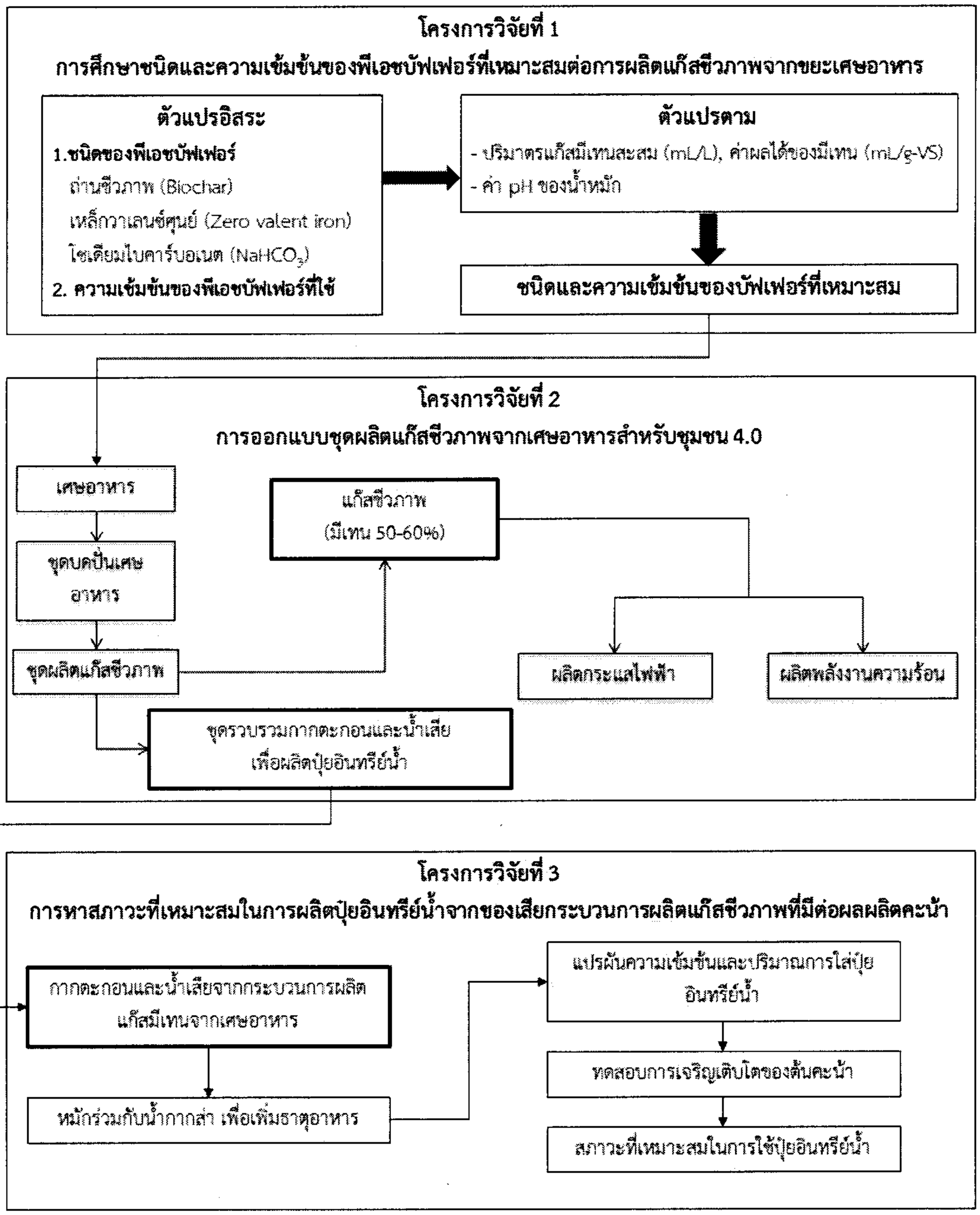
ชุดโครงการวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 3 โครงการย่อย โดยมีขอบเขตของโครงการวิจัยดังนี้

1) การศึกษาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร โดยใช้พีเอชบัฟเฟอร์เป็นตัวช่วยในการรักษาสมดุลค่าพีเอชของกระบวนการหมัก และศึกษาชนิดและความเข้มข้นที่เหมาะสมของพีเอชบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการหมักแบบกะ (Batch)

2) การออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบการใช้ประโยชน์จากเศษอาหารแบบครบวงจร ชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารต้นแบบสำหรับชุมชนนี้จะถูกออกแบบตามหลักการทางด้านวิศวกรรม โดยชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารจะประกอบด้วยชุดบดปั่นเศษอาหาร ชุดหมักเศษอาหารและเก็บแก๊สชีวภาพ และชุดสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น พลังงานความร้อนหรือพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งถูกออกแบบให้อยู่ภายในเครื่องเดียวกัน ทำให้เคลื่อนย้ายได้ง่าย สะดวก และเหมาะสำหรับชุมชนในยุค 4.0 โดยกระบวนการทำงาน และชุดรวบรวมของเสียจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อใช้ในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำ

3) การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำ โดยใช้กากตะกอนและน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ และนำไปทดสอบการเจริญเติบโตและผลผลิตของคะน้า

กรอบแนวคิดของแผนการวิจัย แสดงในแผนภาพ



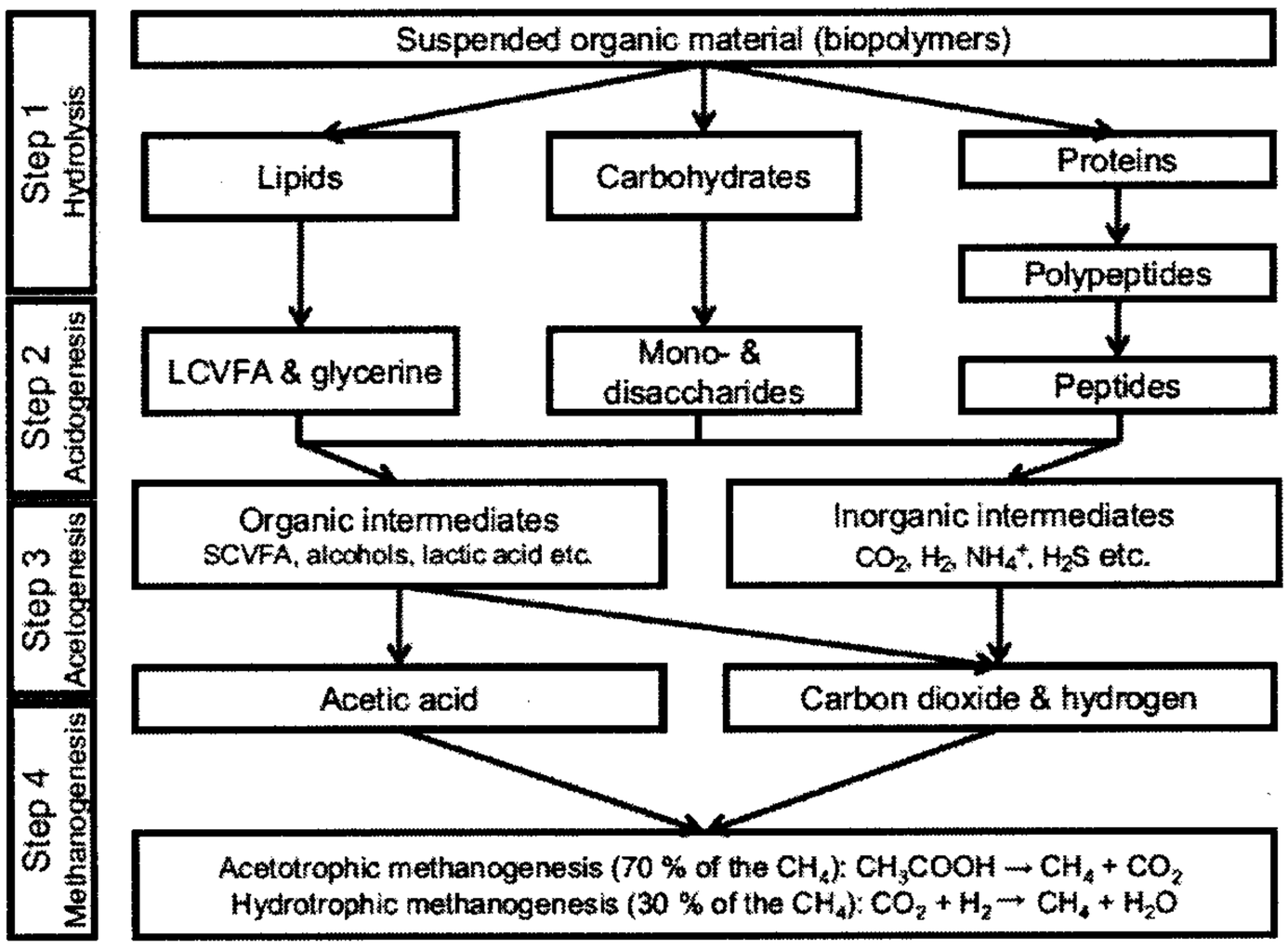
แผนภาพแสดงความเชื่อมโยงของชุดโครงการวิจัย

ทบทวนวรรณกรรม

1. ก๊าซชีวภาพและการใช้ประโยชน์

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) หมายถึง ก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methane producing bacteria) โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กลง จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กเป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยมีก๊าซอื่นๆ เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือก๊าซไข่เน่า และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพต้องระวังไม่ให้อากาศเข้าไปสัมผัสกับแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนลดลง

ก๊าซชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เมื่อมีแบคทีเรีย สารอินทรีย์ และอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมในสภาวะที่ไม่มีอากาศ ในธรรมชาตินั้นก๊าซชีวภาพมักจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการหมักเช่น ก้นบ่อ ก้นแม่น้ำ ก้นทะเลสาบ หนองน้ำ บึงและนาข้าวที่มีน้ำ นอกจากนี้วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพยังเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากวัชพืชบก วัชพืชน้ำ ตลอดจนวัสดุเหลือทางการเกษตรและมูลสัตว์ โดยมีแบคทีเรียที่เรียกว่ามีเทนแบคทีเรีย เป็นตัวการสำคัญในการผลิต ซึ่งกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพจะเกิดผ่านกระบวนการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Digestion) 4 ขั้นตอน (ภาพที่ 1.1) ดังนี้



ภาพที่ 1.1 ขั้นตอนในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (Madsen และคณะ, 2011)

1.1 ขั้นตอน Hydrolysis

ขั้นตอน Hydrolysis หรือเรียกอีกอย่างว่ากระบวนการแตกสลายโพลิเมอร์ ในขั้นตอนนี้ สารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบซับซ้อนต่างๆ เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต จะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายให้อยู่ในรูปสารประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโน กรดไขมัน น้ำตาล โดยเอนไซม์ที่ถูกขับออกมาจากเซลล์จุลินทรีย์ กระบวนการย่อยสลายในขั้นตอนนี้จัดว่าเป็นขั้นตอนสำคัญและถือเป็นข้อจำกัดของกระบวนการย่อยสลายที่จะเกิดในขั้นต่อไป (Henze และ Harremoes, 1983; van Haandel และ Lettinga, 1994; Appels และคณะ, 2008)

1.2 Acidogenesis

ในขั้นตอนนี้จะเข้าสู่กระบวนการหมัก (Fermentation) สารประกอบละลายน้ำได้จากการย่อยสลายในขั้นตอน hydrolysis จะถูกแบคทีเรียกลุ่มที่เรียกว่า fermentative หรือ acidogenic bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มเดียวกับขั้นตอนที่หนึ่งใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ซึ่งโมเลกุลจะมีอะตอมของคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH), กรดโพรพิออนิก (C_2H_5COOH), กรดบิวทีริก (C_3H_7COOH) เป็นต้น และสารอื่นๆ เช่น เอทานอล (C_2H_5OH) ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria)

1.3 Acetogenesis

กรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นในขั้นตอน acidogenesis จะถูกแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตจีนิค (Acetogenic bacteria) เปลี่ยนให้เป็นกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญในการผลิตมีเทน ปฏิกิริยานี้ถือเป็นปฏิกิริยาสำคัญในการหลีกเลี่ยงไม่ให้มีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงพอที่จะยับยั้งกระบวนการผลิตมีเทน ขั้นตอน acetogenesis ประกอบไปด้วยแบคทีเรียสองกลุ่มหลัก คือ Hydrogen-producing acetogenic bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้กรดไขมันระเหยง่ายจากขั้นตอน Acidogenesis ในการสร้างกรดอะซิติก ทำให้ได้ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเป็นผลพลอยได้ (By-product) ส่วนแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งที่ใช้ไฮโดรเจนและคาร์บอนได้ออกไซด์ในการสร้างกรดอะซิติก จะเรียกว่า Homoacetogens หรือเรียกอีกอย่างได้ว่า Hydrogen-consuming bacteria แบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดอาจรวมเรียกว่าเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ผลิตแก๊สมีเทน (Non-methanogenic bacteria)

1.4 Methanogenesis

กรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสับสเตรทที่สำคัญในขั้นตอนการผลิตมีเทน (methanogenesis) ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สารตั้งต้นที่มีความสำคัญมากที่สุดสำหรับขั้นตอนนี้ คือกรดอะซิติก โดยที่

แก๊สมีเทนที่ผลิตได้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของทั้งหมดจะมาจากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มที่เรียกว่า Acetotrophic methanogens ซึ่งจะใช้กรดอะซิติกเป็นสับสเตรทในการสร้างมีเทน ส่วนแก๊สมีเทนอีก 30 เปอร์เซ็นต์ที่เหลือจะมาจากการทำงานของแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งเรียกว่า Hydrogenotrophic methanogens ซึ่งจะใช้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสับสเตรทสำหรับการผลิตแก๊สมีเทน ในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศนี้ แบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมมาก และมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆดังนั้นการเจริญเติบโตและปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ (Madsen และคณะ, 2011)

เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ด้วย จึงเป็นข้อจำกัดหนึ่งในการใช้งาน เนื่องจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟ ดังนั้นก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะต้องมีปริมาณของก๊าซมีเทนสูงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ จากการค้นพบว่าก๊าซมีเทนจำนวน 1 ลูกบาศก์ฟุต จะให้ค่าความร้อนประมาณ 500-1,000 Btu (1 Btu= 1055.1 J) การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพก็มีข้อจำกัดอยู่บ้าง เช่น บ่อหมักต้องอยู่ไม่ไกลจากสถานที่ที่ใช้งาน น้ำไม่ท่วมพื้นที่บ่อหมักและไม่สามารถอัดก๊าซมีเทนให้มีปริมาตรเล็กลงเพื่อการขนย้ายไปยังแหล่งต่างได้ๆ เนื่องจากก๊าซมีเทนมีค่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature) ต่ำมาก และมีค่าความดันวิกฤต (Critical Pressure) ต่ำมากเช่นกัน ดังนั้นการใช้ก๊าซชีวภาพจึงจำกัดอยู่เฉพาะครัวเรือนเป็นส่วนใหญ่ เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้ม นอกจากจากนี้ยังได้มีการนำก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า และใช้ในการสูบน้ำ (ใช้กับเครื่องยนต์เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า) ผลิตเป็นก๊าซชีวภาพอัด (Compressed Bio Gas, CBG) หรือนำไปใช้แทนก๊าซแอลพีจี เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2556) ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าเชื้อเพลิง และค่ากระแสไฟฟ้า ของเสียหรือกากที่เหลือจากการย่อยสลายสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยให้กับดินได้ เป็นการลดมลภาวะที่เกิดขึ้นเนื่องจากของเสียทางการเกษตร รักษาสภาพแวดล้อม เช่น ลดปัญหาน้ำเสีย เป็นการนำเอาพลังงานที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและสูญเสียไปมาใช้ให้เกิดประโยชน์

2. มีเทน

มีเทน (Methane) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนพวกอัลเคน (alkane) มีสูตรเคมี คือ CH_4 เป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ติดไฟได้ ให้เปลวไฟสีชัด สว่างเรือง มีค่าพลังงาน 55.7 กิโลจูลต่อกรัม ไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้มีเทนคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สธรรมชาติ มีอยู่ประมาณร้อยละ 75 นอกจากนี้ยังมีปรากฏอยู่ตามแหล่งต่างๆ ในธรรมชาติ เช่น ตามหนองน้ำ บึง คลอง หรือตามพื้นดินที่มีซากพืชซากสัตว์ทับถมเน่าเปื่อยอยู่ แบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศ จะทำให้ซากพืชซากสัตว์ดังกล่าวย่อยสลายเกิดเป็นแก๊สมีเทน แก๊สมีเทนอาจได้มาจากการหมักมูลสัตว์หรือสารอินทรีย์ต่างๆ และนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงราคาถูก และอาจพบได้ในชั้นถ่านหิน (Coal bed methane) โดยจากกระบวนการเกิดถ่านหินทำให้แก๊สมีเทนสะสมตัวและ

กักเก็บอยู่ในช่องว่างในเนื้อถ่านหิน แก๊สมีเทนเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสำคัญที่ใช้ในระบบอุตสาหกรรมและการขนส่ง ซึ่งจัดว่าเป็นเชื้อเพลิงที่ก่อมลพิษน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงถ่านหินและน้ำมัน

3. เศษอาหาร

เศษอาหารเป็นขยะหรือของเสียจากครัวเรือนและสถานประกอบการต่างๆ เช่น โรงอาหาร โรงแรม และแหล่งท่องเที่ยวต่างๆ เศษอาหารเหลือทิ้งจากการประกอบอาหารและจากการรับประทานถูกแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ (1) Procurement waste คือ ของเสียเศษอาหารที่ยังไม่ผ่านการทำอาหาร เกิดขึ้นระหว่างโซ่อุปทาน (2) Preparation waste คือ ของเสียเศษอาหารที่เกิดขึ้นระหว่างการเตรียมอาหาร (3) Plate waste คือ เศษอาหารที่เหลือจากการรับประทานซึ่งเศษอาหารโดยส่วนใหญ่มาจากส่วนที่เหลือทิ้งจากการประกอบอาหารและรับประทานอาหาร ซึ่งจะประกอบไปด้วย เนื้อสัตว์ ข้าว ผลไม้ และผัก ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นอินทรียวัตถุที่สามารถย่อยสลายเน่าเปื่อยได้ง่าย มีความชื้นสูง หากทิ้งไว้นานจะส่งกลิ่นเหม็นได้รวดเร็ว โดยที่องค์ประกอบของเศษอาการตามโรงอาหารหรือศูนย์อาหารจะประกอบไปด้วย ข้าวและเส้นก๋วยเตี๋ยว 54.3% ผัก 23.1% เนื้อสัตว์ 13.1% และส่วนที่กินไม่ได้ 9.1% (ศูนย์การเรียนรู้มหิดล, 2557) เศษอาหารที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่นิยมแสดงในรูปของน้ำหนักทั้งหมดต่อปี (kg/year, tonne/year, kg/day) ซึ่งภาพรวมของการเกิดเศษอาหารในทั่วโลกมีเป็นจำนวนมาก และมีแนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะในประเทศที่พัฒนาแล้วจะมีปริมาณเศษอาหารสูงถึง 50-55% (Troschinetz and Mihelcic, 2009) และมีการคาดการณ์ปริมาณเศษอาหารที่จะเกิดขึ้นทั่วโลกจะเพิ่มขึ้น 44% ระหว่าง ปี 2005-2025 (Antonis 2013, Thiet al., 2015) เนื่องจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจ การเพิ่มขึ้นของประชากร และจากการที่มนุษย์มีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น ทำให้มีการอุปโภคและบริโภคที่สูงขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้เกิดเศษอาหารในกลุ่มประเทศเอเชียในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจาก 278 ล้านตันเป็น 416 ล้านตัน

4. การผลิตมีเทนจากเศษอาหาร

เศษอาหารโดยส่วนใหญ่มาจากส่วนที่เหลือทิ้งจากการประกอบอาหารและรับประทานอาหาร ซึ่งจะประกอบไปด้วย เนื้อสัตว์ ข้าว ผลไม้ และผัก ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นอินทรียวัตถุที่สามารถย่อยสลายเน่าเปื่อยได้ง่าย มีความชื้นสูง ในประเทศไทยมีเศษอาหารเกิดขึ้นทั้งหมดประมาณ 20,041 ตัน/วัน ในปี 2006 ซึ่งมีประมาณ 50% ของขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นทั้งหมด (Nguyan et al., 2007) องค์ประกอบของเศษอาหารส่วนใหญ่แล้วประกอบไปด้วยแป้ง โปรตีน และไขมัน และมีเซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส ในปริมาณเล็กน้อย เนื่องจากเศษอาหารมีปริมาณสารอินทรีย์อยู่ค่อนข้างสูง และง่ายต่อกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ จึงมีงานวิจัยหลายๆ งานวิจัยที่มีการนำเศษอาหารไปผลิตพลังงานทดแทนภายใต้กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (Sreela-oret al., 2011) ไม่ว่าจะเป็นการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Sreela-oret al., 2015) หรือผลิตมีก๊าซเทน (Pisutpaisalet al., 2014) ยกตัวอย่างงานวิจัยที่มีการนำเศษอาหารไปใช้เป็นสับสเตรทในการผลิตก๊าซมีเทน ได้แก่ Pisutpaisal และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนแบบสองขั้นตอน โดยศึกษาการผลิต

มีเทนจากเศษอาหารโดยตรง (food waste) เทียบกับการผลิตมีเทนจากน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้เศษอาหารเป็นสับเสตรท โดยใช้กล้าเชื้อจุลินทรีย์ จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแป้งมันสำปะหลัง (anaerobic sludge blanket; UASB) ผลิตมีเทนภายใต้อุณหภูมิ mesophilic fermentation โดยใช้ถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 5 ลิตร ปริมาตรทำงาน 4 ลิตร ควบคุมอัตราการไหลที่ 5.5 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (organic loading rate) ที่ 24 g-COD/L/d ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 24 วัน pH 7จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการผลิตมีเทนโดยใช้เศษอาหารเป็นสับเสตรทเริ่มต้นโดยตรงทำให้ได้ผลได้มีเทน และมีอัตราการผลิตมีเทนเท่ากับ 364.3 mL-CH_4/g-VSและ 143.2 mL-CH_4/h และได้ทำการผลิตมีเทนจากน้ำเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้เศษอาหารเป็นสับสเตรท โดยควบคุมอัตราการไหลที่ 2.25 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้สภาวะอื่นๆ ของกระบวนการหมักเช่นเดียวกันกับการผลิตมีเทนจากเศษอาหารโดยตรง พบว่า น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนสามารถนำมาผลิตมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งได้ผลได้ของมีเทน และอัตราการผลิตมีเทนเท่ากับ 391.6 mL-CH_4/g-VS และ 168.1 mL-CH_4/h

EL-Mashad และ Zang (2010) ทำการศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการย่อยร่วมระหว่างมูลโคนมกับเศษอาหาร โดยกระบวนการหมักแบบกะในถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 1 ลิตร ปริมาตรทำงาน 500 มิลลิลิตร โดยทำการแปรผันอัตราส่วนของเศษอาหารและมูลโคนม คือ ผสมเศษอาหารที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 32% และ 48% กับมูลโคนม 68% และ 52% (based on volatile solid) ตามลำดับ และใช้กล้าเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดขยะมูลฝอย โดยเติมกล้าเชื้อจุลินทรีย์ 100 มิลลิลิตร หลังจากที่ทำการผสมสับสเตรทกับกล้าเชื้อจุลินทรีย์แล้วปรับปริมาตรของของเหลวให้ได้ 500 มิลลิลิตร และหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิ mesophilic (35±1 °C) จากการทดลองพบว่า หลังจากกระบวนการหมัก 30 วัน มีผลได้มีเทนสูงสุดเท่ากับ 282 และ 311 L-CH_4/kg-VS ของอัตราส่วนเศษอาหารต่อมูลโคนมที่ 32:68% และ 48:52% ตามลำดับ

สมจินตนา และคณะ (2554) ทำการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารร่วมกับกลีเซอรีนดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารและการเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการเติมกลีเซอรีนดิบที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศในถังหมักขนาด 200 ลิตรแบบกึ่งกะ ปริมาตรของเหลวภายในถังหมัก 185 ลิตรระยะเวลาในการหมัก 111 วัน ในตอนเริ่มต้นเดินระบบใช้เศษอาหารอย่างเดียว ป้อนที่อัตราภาระสารอินทรีย์เฉลี่ยในช่วง 0.306-1.245g/$L_{reactor}$.day (56.6-230.2 g/day) พบว่า ให้ผลผลิตของมีเทนเฉลี่ย 0.465 m^3-CH_4/kgCOD ที่อุณหภูมิห้อง และให้ค่าผลผลิตของก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 0.789 m^3biogas/kg-COD ในการป้อนกลีเซอรีนดิบร่วมกับเศษอาหารที่อัตราป้อนเศษอาหาร 1.245 g/$L_{reactor}$-day ปริมาตรก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 36.8 L/day เป็น 72.2 L/day และ 90.4 L/day หลังจากเพิ่มกลีเซอรีน 30.8 และ 46.3 mL/day ตามลำดับ

Sreela-or และคณะ (2015) ทำการศึกษาการผลิตมีเทนจากน้ำทิ้งของกระบวนการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้เศษอาหารเป็นสับสเตรท โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR และใช้กล้าเชื้อจุลินทรีย์คือ Anaerobic seed

sludge จากถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ UASB ที่ใช้สำหรับผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการผลิตเบียร์ ของโรงงานเบียร์ ในการทดลองใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ทำจากพลาสติกขนาด 5 ลิตร ปริมาตรทำงาน 3.5 ลิตรประกอบด้วยกล้าเชื้อจุลินทรีย์ 2 ลิตร และน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจน (acidic effluent) 1.5 ลิตร และทำการไล่อากาศภายในถังหมักด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้เกิดสภาวะไร้อากาศภายในถังหมัก ทำการหมักที่อุณหภูมิ 35±3 องศาเซลเซียส ทำการศึกษาหาระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ (HRT) ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตมีเทน โดยทำการแปรผันระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 5 HRT ได้แก่ 12, 10, 8 และ6 days (วัน) จากการทดลองพบว่า ผลได้มีเทนและอัตราการผลิตมีเทนจะเพิ่มขึ้นเมื่อลด HRT จาก 12 วัน เป็น 10 วัน ที่ HTR 10 วัน มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน (methane content) ผลได้มีเทน (methane yield) และอัตราการผลิตมีเทน (methane production rate) สูงที่สุด เท่ากับ 71.3%, 155 mL-CH_4/g-COD และ 4629.1 mL-CH_4/L d ตามลำดับ

Liu และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตมีเทนจากน้ำทิ้งกระบวนการผลิตไฮโดรเจนของการย่อยร่วมระหว่าง activated sludge กับ food waste ที่ความเข้มข้นของสับสเตรทคงที่ 10 g-VS/Lและแปรผันอัตราส่วนของ food waste ที่ 10%, 20%, 30%, 40%, 54%, 85% และ 100% และใช้กล้าเชื้อจุลินทรีย์ 1.26 g dry weight ทุกชุดทดลอง หลังจากสิ้นสุดกระบวนการผลิตไฮโดรเจน น้ำทิ้งที่เหลือจากกระบวนการถูกนำมาใช้เป็นสับสเตรทสำหรับการผลิตมีเทน โดยใช้กล้าเชื้อจุลินทรีย์ (methane-producing seed sludge) 1.10 g (dry weight) และปรับ pH เป็น 7 และใช้อุณหภูมิในกระบวนการหมักที่ 37 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า ที่สัดส่วนของ food waste 10%, 20%, 30%, 40%, 54% และ 85% และ 100% ให้ผลได้มีเทนสูงสุดเท่ากับ 215.5, 258.0, 258.0, 333.6, 350.9, 353.5และ 321.9 mL-CH_4/g-VS ตามลำดับ

Nathao และคณะ (2013) ได้ศึกษาการผลิตมีเทนจากเศษอาหารแบบ 1 และ 2 ขั้นตอน โดยทำการแปรผันอัตราส่วนของสับสเตรทต่อกล้าเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 7.5 ซึ่งในกระบวนการหมักแบบ 2 ขั้นตอน มีค่าผลได้มีเทนสูงสุดเท่ากับเท่ากับ 94 mL-CH_4/g-VS สำหรับการผลิตมีเทนขั้นตอนเดียวให้ค่าผลได้มีเทนสูงสุดเท่ากับเท่ากับ 82 mL-CH_4/g-VSและพบว่าค่า energy recovery จากกระบวนการหมักแบบ 2ขั้นตอนมีค่าสูงกว่าแบบขั้นตอนเดียวถึง 18%

5. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมีปัจจัยสำคัญหลายอย่างเข้ามาเกียวข้อง (Ward และคณะ, 2008; Yadvika และคณะ, 2004; นคร, 2010)

5.1 ปริมาณของเหลวในถังปฏิกรณ์

การเติมน้ำหรือของเหลวเข้าไปในระบบจะช่วยเจือจาง (dilution) และรักษาระดับปริมาณของแข็งรวมในระบบให้ถูกต้องตามที่ออกแบบไว้ ระบบโดยทั่วไปจะมีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids) ประมาณ

10-25% หากมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบน้อยเกินไป จะทำให้ส่วนที่เป็นของแข็งบางส่วนเกิดการตกตะกอนลงสู่ก้นถังปฏิกรณ์ และหากปริมาณของแข็งทั้งหมดมีมากเกินไป ก็จะขัดขวางการไหลขึ้นของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

5.2 ความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์จะอยู่ในช่วง pH 6.5-7.5 แต่ช่วงที่ดีที่สุดต่อการผลิตก๊าซมีเทนจะเป็น 7.0-7.2 ถ้าหากในระบบมีค่า pH ต่ำกว่า 6.5 จะเกิดการยับยั้งแบคทีเรียในการผลิตก๊าซมีเทนอย่างรุนแรง ต้องรักษาความเป็นกรดด่างในระบบให้ดี เนื่องจากการทำงานของแบคทีเรียในกระบวนการแอซิเจนิซีสจะเกิดกรดระเหยง่ายมาเป็นจำนวนมาก ทำให้ระบบมาค่าความเป็นกรดด่างประมาณ 5.0 (ในระบบควรมีค่าของกรดไขมันระเหยไม่เกิน 4,000 มิลลิกรัม/ลิตร (อนุตร, 2545) แต่แบคทีเรียในกระบวนการผลิตมีเทนนั้นจะทำงานได้ดีที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างอยู่ระหว่าง 6.5-7.5 ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมค่าความเป็นกรดด่างในระบบ โดยจะควบคุมระยะเวลาในการหมักย่อยและเติมสารประเภทด่างเข้าไปในระบบเพื่อเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการผลิตมีเทน เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH) หรือโซเดียมไบคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ในบางกรณี ค่าความเป็นกรดด่างจะลดลงเนื่องจากการเติมสารอินทรีย์มากเกินไป การเพิ่มค่าจึงได้โดยการหยุดเติมสารอินทรีย์หรือลดอัตราการเติม

5.3 อุณหภูมิ

การย่อยแบบไร้อากาศเป็นการย่อยที่ต้องมีแบคทีเรียมาเกี่ยวข้อง ซึ่งสภาวะของอุณหภูมิที่แบคทีเรียสามารถทำงานได้จะอยู่ในช่วง 5-60 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาชีวเคมีจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น และอุณหภูมิที่แบคทีเรียเจริญเติบโตได้เป็นอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของเซลล์และกิจกรรมของเอนไซม์ภายในเซลล์ อุณหภูมิถูกแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ

1) ช่วงไซโครฟิลิค (Psychrophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส

2) ช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20 – 45 องศาเซลเซียส

3) ช่วงเทอร์มอฟิลิก (Thermophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 45 องศาเซลเซียส

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียมีอยู่ด้วยกัน 2 ช่วง คือ ช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic) 30-40 องศาเซลเซียส และช่วงเทอร์มอฟิลิก (Thermophilic) 45-55 องศาเซลเซียส (นคร, 2010) อุณหภูมิส่วนใหญ่ภายในถังปฏิกรณ์จะอยู่ที่ 30-40 องศาเซลเซียส หากต้องการหมักที่ช่วงเทอร์มอฟิลิกต้องให้ความร้อนภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายทางพลังงานมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างสารระเหยของกรดกับด่างในจำนวนที่มาก จึงต้องมีการลดความเป็นกรดด่าง (pH) ภายในถังปฏิกรณ์ แต่ข้อดีของการหมักในช่วงอุณหภูมิเทอร์มอฟิลิก คือจะช่วยให้ลดระยะเวลาในการหมักย่อยลง และเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายแก่แบคทีเรีย ถังปฏิกรณ์ที่ใช้จำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมอเพื่อป้องกันการเสียสมดุลระหว่างจำนวนแบคทีเรียในแต่ละกระบวนการย่อยๆ ช่วงอุณหภูมิอื่นที่สามารถเกิดการ

หมักได้ คือ ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) ที่ 5-25 องศาเซลเซียส (Saady and Mass, 2013; Dhaked et al., 2010; Kashyap et al., 2003)

5.4 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR)

อัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ไม่ควรป้อนในอัตราที่สูงเกินไป เนื่องจากการป้อนในอัตราที่สูงจะทำให้แบคทีเรียในกระบวนแอซิโดเจนิซีสผลิตกรดระเหยง่ายในจำนวนที่มากขึ้นกว่าปกติ ทำให้ค่าความเป็นกรดด่างในถังปฏิกรณ์มีความเป็นกรดสูง ส่งผลให้แบคทีเรียในกระบวนการมีเทนโนเจนิซีสไม่สารถอยู่ได้เนื่องจากค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียนี้คือ 6.5-7.5 จึงส่งผลให้ไม่สามารถผลิตมีเทนออกมาได้หรือผลิตออกมาได้น้อยมาก อัตราการป้อนสูงสุดขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัตถุดิบในกระบวนการ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สามารถคำนวณหาได้จากปริมาณของแข็งระเหยได้ (volatile solid: VS) หรืออาจจะคำนวณจากปริมาณความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (chemical oxygen demand: COD) ต่อปริมาตรของถังปฏิกรณ์ชีวภาพในแต่ละวัน อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูงสามารถลดต้นทุนในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ เนื่องจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้ก็จะมีขนาดเล็กลงด้วยซึ่งจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทนจะมีความต้องการคาร์บอนในปริมาณที่แตกต่างกัน (Zeikus, 1977) ซึ่งโดยปกติแล้วในกระบวนการผลิตมีเทนที่สภาวะที่เหมาะสมจะมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ป้อนเข้าระบบมีอยู่ประมาณ 8.0 - 10% (Hobson และคณะ, 1981) สูตรคำนวณ OLR แสดงในสมการ (1.1)

$$\text{Organic loading rate (OLR)} = (Q \times C) / V \qquad (1.1)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลของสารอินทรีย์ (L/h)

C คือ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ (g/L)

V คือ ปริมาตรทำงานของถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (L)

5.5 สารพิษ (Toxic substances)

โดยทั่วไปโลหะและสารต่างๆ จะมีความเป็นพิษ (Toxicity) ต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการ โดยจะเป็นตัวยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ซึ่งระดับความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารนั้นๆ หากมีการสะสมของสารบางอย่างภายในถังปฏิกรณ์ในปริมาณที่มากเกินจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ โดยอาจมีผลต่อการยับยั้ง (Inhibition) การเจริญเติบโต จนถึงทำให้แบคทีเรียตายได้ และจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพหรือเสถียรภาพของระบบลดลงระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศได้ แบ่งสารพิษที่มีผลต่อแบคทีเรีย เช่น พิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งมีผลต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน พิษของ

สารโลหะหนักชนิดต่างๆ พิษของแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) เป็นต้น สำหรับโลหะหนักบางชนิดเช่น นิเกิล (Ni) โคบอลท์ (Co) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) นั้นจัดเป็นธาตุอาหาร (trace element) ที่จำเป็นต่อแบคทีเรียด้วย ซึ่งมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียมีความต้องการในปริมาณที่ต่ำมาก โลหะและสารต่างๆ จะมีความเป็นพิษ (Toxicity) ต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการ โดยจะเป็นตัวยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ดังนี้

1) ออกซิเจน ปริมาณออกซิเจนแม้เพียงเล็กน้อยก็สามารถยับยั้งแบคทีเรียในการผลิตมีเทนได้ บรรยากาศที่เหมาะสมจึงควรเป็นสภาวะแบบรีดิวซิงสูงเพื่อรักษาระดับการเจริญเติบโตไว้ สารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง เช่นไนไตรท์หรือไนเตรต จะทำให้กิจกรรมการสร้างมีเทนของแบคทีเรียหยุดลง

2) กรดระเหยง่าย ผลของกรดระเหยง่ายต่อเชื้อจุลินทรีย์ไม่ค่อยชัดเจนนัก เนื่องจากผลของความเป็นกรดด่างเข้ามาซ้ำซ้อนด้วย ที่สภาพความเป็นกรดด่างคงที่ใกล้ๆ 7.0 กรดอะซิติกและกรดบิวทิริกไม่มีผลใดๆ แต่กรดโพรพิโอนิกที่ความเข้มข้นค่อนข้างสูงแสดงผลเป็นพิษต่อแบคทีเรีย

3) แอมโมเนีย เป็นสารที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการหมักกากตะกอน และมีระดับความรุนแรงของความเป็นพิษต่อแบคทีเรียขึ้อยู่กับรูปแบบที่เกิดขึ้น แอมโมเนียอิสระมีความเป็นพิษกว่ารูปแบบอื่นโดยที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จะส่งผลของพิษรุนแรง ถ้าเป็นประจุแอมโมเนียมต้องมีความเข้มข้นเกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงจะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ที่สภาพความเป็นกรดด่างเท่ากับ 7.2 หรือต่ำกว่า แอมโมเนียส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของประจุแอมโมเนียม ดังนั้นหากมีความเข้มข้นไม่สูงมากนักก็ไม่มีผลต่อแบคทีเรีย

4) ประจุโลหะเบา ในการหมักย่อยไร้อากาศ สภาวะมีแนวโน้มจะเป็นกรดมากขึ้นจากปริมาณกรดระเหยได้ที่เกิดขึ้น หากเกิดการไม่สมดุลกันของจำนวนเชื้อแบคทีเรียหลักสองแบบในกระบวนการ โดดยปกติจะมีการควบคุมความเป็นกรดโดยการเติมด่างลงไป การกระทำดังกล่าวจะต้องทำอย่างระมัดระวังอย่างมาก เพราะประจุโลหะเบาจากด่างมีความเป็นพิษต่อเชื้อแบคทีเรีย โดยเฉพาะพวกโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg)

5) ซัลไฟด์ สารประกอบซัลไฟด์เกิดจากปริมาณซัลเฟตในสารหมักและการสลายตัวของโปรตีนหาก ความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่ละลายได้เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร กิจกรรมของแบคทีเรียจะถูกยับยั้งอย่างรุนแรง และทำให้กระบวนการหมักล้มเหลวได้ แต่ที่ความเข้มข้นต่ำกว่านี้แบคทีเรียสามารถทนได้ ซัลไฟด์ที่ละลายได้มีผลต่อเซลล์แบคทีเรีย แต่ซัลไฟด์ที่ไม่ละลายจะไม่ส่งผลต่อเซลล์แบคทีเรีย ดังนั้นวิธีการควบคุมสามารถทำได้โดยการใส่เหล็กลงไปเพื่อทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์เพื่อให้ความเข้มข้นลดลง

6) โลหะหนัก มีความเป็นพิษแม้ที่ความเข้มข้นต่ำๆ แต่เฉพาะส่วนที่ละลายได้เท่านั้นที่จะเป็นพิษต่อเซลล์แบคทีเรีย

5.6 ปริมาณสารอาหารภายในสารอินทรีย์

เชื้อจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมีความต้องการแหล่งอาหารและโภชนาการอย่างเพียงพอในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวน ปริมาณของสารอาหาร (Nutrients) ภายในสารอินทรีย์หากมีปริมาณมากก็จะช่วยให้เกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำและแบคทีเรีย ฉะนั้นจึงต้องมีปริมาณที่เพียงพอในน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ที่นำมาหมัก หากมีแหล่งไนโตรเจนน้อย แบคทีเรียจะไม่สามารถผลิตเอนไซม์สำหรับใช้กับคาร์บอนได้ หากว่ามีปริมาณที่มากเกินไปก็จะเป็นอันตรายต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย อัตราส่วนที่เหมาะสมของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ควรอยู่ในช่วง 25:1 ถึง 30:1 โดยปกติแล้วกากตะกอนน้ำเสียและมูลสัตว์จะมีสารอาหารสำหรับเชื้อแบคทีเรียเหล่านี้ครบถ้วน แต่กับวัตถุดิบชนิดอื่นอาจจะต้องมีการใส่เพิ่มเติมลงไป

5.7 การกวนผสมภายในถังปฏิกรณ์

การกวนผสมเป็นขั้นตอนที่ทำให้สารอินทรีย์และแบคทีเรียในระบบเกิดการคลุกเคล้าผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และเพื่อกระจายความเข้มข้นและกระจายอุณหภูมิภายในบ่อหมัก ซึ่งจะทำให้เกิดสภาวะเสถียรเกิดการสมดุลของพลังงานที่เกิดขึ้นภายในบ่อหมัก และไม่ทำให้เกิดฝ้า (scum) ที่ระดับผิวซึ่งจะเป็นตัวกันไม่ให้ก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบไหลผ่านได้สะดวก

5.8 ลักษณะทางกายภาพของสารอินทรีย์ตั้งต้น

ขนาดของสารอินทรีย์ตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์มีผลต่อปริมาณมีเทนเป็นอย่างมาก หากสารอินทรีย์ตั้งต้นมีขนาดเล็กจะช่วยให้เกิดปริมาณมีเทนเพิ่มขึ้น เนื่องจากแบคทีเรียในกรบวนการไฮโดรไลซีสสามารถลดขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้ง่ายขึ้น ทำให้มีปริมาณของสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่มากขึ้นตามแบคทีเรียจึงสามารถผลิตมีเทนได้ในจำนวนมาก แต่หากขนาดของสารอินทรีย์มีขนาดที่เล็กเกินไป จะทำให้มีสารอินทรีย์ขนาดที่เล็กในปริมาณที่มาก ทำให้เกิดกรดระเหยง่ายเป็นปริมาณมากเกินความต้องการของระบบ ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดด่างของระบบมีค่าไม่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทน

5.9 การเตรียมวัตถุดิบก่อนป้อนเข้าถังหมัก

การเตรียมสภาพวัตถุดิบก่อนป้อนเข้าถังหมักจะช่วยเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพได้ การเตรียมสภาพช่วยทำให้การหมักย่อยของวัตถุดิบต่างๆ ง่ายขึ้น โดยเฉพาะกับพวกวัสดุที่มีเซลลูโลสหรือลิกนินสูง การเตรียมสภาพสุถุดิบจะช่วยทำให้พอลิเมอร์เหล่านี้แตกตัวมากขึ้นได้ เมื่อผ่านกระบวนการทางกายภาพ เคมี หรือความร้อน ตัวอย่างการเตรียมสภาพวัตถุดิบอาจทำได้โดยการใช้ด่างการสารเคมีร่วมกันความร้อน และการใช้อัลตราโซนิก

5.10 ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ไว้ภายในระบบ (Hydraulic retention time; HRT)

หากมีระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์มากขึ้นจะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้สูง ในขณะเดียวกันก็จะช่วยเพิ่มปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบให้สูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาจะทำให้แบคทีเรียมีเวลาในการเปลี่ยนกรดระเหยง่ายให้เป็นมีเทน แต่ถ้าใช้ระยะเวลากักเก็บที่นานมากเกินไป ก็

อาจจะทำให้ปริมาณแบคทีเรียมีมากเกินที่ระบบจะรับได้นอกจากนี้การเพิ่มระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ยังทำให้เชื้อจุลินทรียามารถปรับตัวให้เจริญในสารประกอบที่มีความเป็นพิษได้ ในการสร้างก๊าซมีเทนจากของแข็งระเหยง่าย ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพสามารถควบคุมได้จากระยะเวลาการกักเก็บซึ่งจะขึ้นอยู่กับเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการหมัก อย่างไรก็ตามระยะเวลากักเก็บที่มากกว่า 12 วันจะไม่สามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลายของแข็งระเหยง่ายง่ายได้และมีผลต่ออัตราการผลิตมีเทน การหลีกเลี่ยงการสูญเสียของเซลล์จุลินทรีย์ (wash out) ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพสามารถทำได้โดยการควบคุมระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ไม่ให้ต่ำกว่า 10-15 วัน (Chandra และคณะ, 2012)

Reungsang และคณะ (2016) ทำการศึกษาระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตมีเทนจากน้ำหมักที่เหลือจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้น้ำอ้อยเป็นสับสเตรทโดยกระบวนการหมักแบบกะ ทำการผลิตมีเทนแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ UASB (Upflow anaerobic sludge blanket) มีการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการหมักที่ 30 ±2 องศาเซลเซียสและแปรผันระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ที่ 6, 5, 4, 3 และ 2 วันพบว่า ระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ที่เหมาะสมเท่ากับ 4 วัน มีอัตราการผลิตมีเทนและมีผลได้มีเทนสูงที่สุดเท่ากับ 1.27±0.05 L-CH_4/L.day และ 348±13 mL-CH_4/g-COD ตามลำดับ

งานวิจัยของ Dareioti และ Kornaros (2015) ได้ทำการศึกษาระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่เหมาะสมในการการผลิตมีเทนจากน้ำเหลือทิ้งจากการผลิตไฮโดรเจนโดยการ co-digestion ระหว่าง ข้าวฟ่างหมัก (ensiled sorghum) หางนม (cheese whey) และ มูลวัว (liquid cow manure) ที่อัตราส่วน 55:40:5 (v/v/v) โดยใช้ถังหมักแบบ CSTR และควบคุมอุณหภูมิ mesophilic conditions (37 องศาเซลเซียส) โดยทำการแปรผันระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 24, 16 และ 12 วัน และใช้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่ 1.93, 2.90 และ 3.87 kg-VS/m^3.d. หรือ 3.58, 5.36 และ 7.15 kg-COD/m^3.d. ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 24 และ 16 วัน ให้ผลได้มีเทนสูงสุดเท่ากับ 326.42 ± 56.9 และ 310.34 ± 41.3 mL-CH_4/g-VS_{added} หรือ 223.09 และ 216.50 mL-CH_4/g-$COD_{consumed}$ ตามลำดับ

6. ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ

ในปัจจุบันมีการนำจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์และมีประสิทธิภาพมาใช้ในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์เป็นจำนวนมาก เนื่องจากเกษตรกรและผู้บริโภคเริ่มตระหนักถึงอันตรายจากสารเคมีทางการเกษตร ประกอบกับค่าใช้จ่ายของเกษตรกรหรือผู้ประการด้านการเกษตรเกี่ยวกับเรื่องปุ๋ยเคมีและสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชมีแนวโน้มที่สูงขึ้น เกษตรกรบางรายหรือนักวิจัยบางกลุ่มจึงได้ทำการศึกษาและวิจัยวิธีการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำขึ้นเพื่อใช้ทดแทนปุ๋ยเคมีหรือสารเคมีดังกล่าว และที่ผ่านมา สมเกียรติ และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาปุ๋ยอินทรีย์น้ำเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร โดยได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำสูตรต่าง ๆ ขึ้นในสถานีวิจัยเกษตรเขตชลประทานศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และทำการศึกษากระบวนการผลิต สำรวจและเก็บตัวอย่างปุ๋ยอินทรีย์น้ำของเกษตรกร

แต่ละแหล่งผลิตในเขตพื้นที่เกษตรกรรมเชียงใหม่-ลำพูน มาทำการศึกษาวิจัยทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและทดสอบในระดับแปลงทดลองในสถานีวิจัยฯ ผลการศึกษาวิจัยพบว่า เทคโนโลยีการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำดังกล่าวไม่มีความยุ่งยากหรือซับซ้อนแต่ประการใด และปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุดในการทำการเกษตรคือ ความสมดุลของธาตุสี่ที่อยู่ในธรรมชาติคือ ธาตุดิน ธาตุน้ำ ธาตุลม และธาตุไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งธาตุดิน ถ้าดินดีแล้ว พืชที่ปลูกก็จะมีความแข็งแรงสมบูรณ์สามารถต้านทานการเข้าทำลายของโรคและแมลงศัตรูพืชได้เป็นอย่างดี เพราะดินเป็นแหล่งธรรมชาติที่ให้อาหารแก่พืช อาหารแร่ธาตุเหล่านี้เกิดจากการสลายตัวผุพังของดินและอินทรีย์วัตถุที่กองทับถมในดินและบนดิน หากเราทำการศึกษาสภาพของดินในป่าจะพบว่าดินมีความอุดมสมบูรณ์ ต้นไม้นานาชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ดีโดยไม่มีใครนำปุ๋ยเคมีไปใส่ให้เลย ทั้งนี้เพราะธาตุอาหารพืชที่อยู่ในดินจะสะสมหมุนเวียนอยู่บนผิวดิน เมื่อครั้งเปิดป่าใหม่ ๆ การเพาะปลูกพืชจึงเจริญเติบโตงอกงามดีและมีผลผลิตสูงโดยไม่ต้องใส่ปุ๋ยเพราะพืชจะดึงดูดธาตุอาหารในดินซึ่งมีอยู่อย่างเพียงพอ และการเก็บเกี่ยวผลผลิตออกจากไร่นาแต่ละครั้งก็จะเกิดการสูญเสียธาตุอาหารพืชหรือปุ๋ยธรรมชาติในดินออกไปด้วย ดังนั้นการปลูกพืชและการเก็บเกี่ยวผลผลิตออกจากไร่นาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน จึงทำให้ดินกลายเป็นดินเลวเสื่อมโทรมไม่สมบูรณ์ การเพาะปลูกพืชก็จะไม่เจริญเติบโต ผลผลิตของพืชลดลง (ชมรมเกษตรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2544) วิธีการแก้ไขดินเลวหรือดินเสื่อมโทรมให้ดีขึ้นและสามารถปลูกพืชในพื้นดินนั้นต่อไปได้ต้องใช้วิธีการต่าง ๆ หลายวิธีร่วมกัน เช่น การเตรียมดินที่เหมาะสม การใช้พันธุ์พืชที่ดี การปฏิบัติดูแลรักษา และที่สำคัญที่สุดคือต้องมีการใช้ปุ๋ย ปุ๋ยมี 2 ประเภทคือ ปุ๋ยเคมีหรือปุ๋ยวิทยาศาสตร์เป็นปุ๋ยที่ได้จากการผลิตหรือสังเคราะห์โดยขบวนการทางเคมีจากดิน แร่ หรืออินทรีย์สารต่าง ๆ เช่น ปุ๋ยเคมีรูปที่ปั้นเป็นเม็ด เป็นผลึก (ปุ๋ยเกล็ด) และที่เป็นของเหลว (ปุ๋ยน้ำ) อีกประเภทหนึ่งคือปุ๋ยอินทรีย์ เป็นปุ๋ยที่ได้จากอินทรีย์สารต่าง ๆ เช่น ซากพืช ซากสัตว์ เศษพืชหรือสัตว์จากในไร่นา รวมทั้งเศษพืชหรือสัตว์จากโรงงานอุตสาหกรรมเกษตร ปุ๋ยอินทรีย์พวกนี้ได้แก่ ปุ๋ยคอก ปุ๋ยพืชสด ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยน้ำชีวภาพหรือน้ำสกัดชีวภาพ และปุ๋ยที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิดซึ่งเป็นพวกอินทรีย์สาร ส่วนประวัติการใช้ปุ๋ยหมักซึ่งเป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งในประเทศไทยมีมานานแล้วในกลุ่มคนผู้มีเชื้อสายจีนแต่เกษตรกรไทยเราไม่นิยมใช้ ต่อมาเมื่อมีการสำรวจดินโดยกรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พบว่าดินของประเทศไทยโดยส่วนรวมมีความอุดมสมบูรณ์ลดลงมาก รัฐบาลหรือเอกชนและเกษตรกรจึงได้เห็นความสำคัญของปุ๋ยหมัก ปุ๋ยอินทรีย์ และปุ๋ยอินทรีย์น้ำมากขึ้น จะเห็นได้ว่ามาระยะหลังได้มีโครงการวิจัยต่างๆ เกิดขึ้นมากมาย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงและบำรุงดินโดยใช้อินทรียวัตถุให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ปัจจุบันการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำมีบทบาทที่สำคัญยิ่งต่อระบบการเกษตรของประเทศไทยเรา จะเป็นเพราะว่าประชาชนผู้บริโภคได้หันมาสนใจเกี่ยวกับสุขภาพอนามัยของตนเองมากขึ้น เนื่องมาจากผลิตผลทางการเกษตรที่ผลิตออกมาสู่ผู้บริโภคจะต้องปลอดสารพิษไม่มีสารเคมีใด ๆ ตกค้าง ผลิตภัณฑ์ชนิดที่ว่านี้คือ ผักอินทรีย์ หรือผักที่ไม่ใช้สารเคมีป้องกันกำจัดโรคและศัตรูพืช ซึ่งเป็นผักที่ไม่มีสารเคมีตกค้างและปลอดสารพิษ

ในการผลิตผักอินทรีย์หรือผักที่ไม่ใช้สารเคมีป้องกันกำจัดโรคและศัตรูพืช ปุ๋ยอินทรีย์น้ำจะเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญในการผลิต (ศรีวรรณ, 2542)

ปุ๋ยอินทรีย์น้ำคือปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่เกิดจากกระบวนการหมักด้วยซากพืชซากสัตว์โดยมีเชื้อจุลินทรีย์เป็นตัวช่วยย่อยสลาย ปุ๋ยอินทรีย์น้ำที่ได้จากการหมักดองจะประกอบไปด้วยจุลินทรีย์และสารอินทรีย์หลากหลายชนิดเป็นปุ๋ยเสริมให้แก่พืชเพื่อเสริมธาตุอาหารให้กับพืช ในขณะที่พืชกำลังเจริญเติบโตน้ำสกัดชีวภาพจะให้ทั้งธาตุอาหารและเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (ชมรมเพื่อนเกษตรกร, 2544) ในขณะที่พืชกำลังเจริญเติบโตน้ำสกัดชีวภาพหรือปุ๋ยน้ำชีวภาพจะให้ทั้งธาตุอาหารและเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (สมเกียรติ, 2546)

วิธีการดำเนินการแผนงานวิจัย

1. ประชุมวางแผนการดำเนินโครงการย่อยแต่ละชุดโครงการ รวบรวมเอกสารและข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. เก็บรวบรวมเศษอาหารสำหรับใช้ในการทดลอง นำมาวิเคราะห์องค์ประกอบ
3. โครงการย่อยแต่ละโครงการเริ่มดำเนินการทดลอง ได้แก่

3.1 การศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพโดยใช้พีเอชบัฟเฟอร์ในกระบวนการหมักแบบกะ เพื่อขยายขนาดสู่กระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง

3.2 ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารสำหรับชุมชน

3.3 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยนำปุ๋ยอินทรีย์น้ำสูตรต่างๆ ไปทดสอบการเจริญเติบโตของต้นคะน้า

4. วิเคราะห์ผลการทดลอง รวบรวมข้อมูลและสรุปผลการทดลอง
5. เขียนรายงานสรุปผลการวิจัย เผยแพร่ผลการวิจัยในงานประชุมวิชาการ และตีพิมพ์เผยแพร่ผลงานวิจัย

บทที่ 2
การเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารโดยใช้พีเอชบัฟเฟอร์

บทนำ

เศษอาหารเป็นของเหลือทิ้งจากครัวเรือนที่มีปริมาณมากในแต่ละวัน จากข้อมูลสถานการณ์ขยะมูลฝอยของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2559 (กรมควบคุมมลพิษ, 2560) พบว่ามีปริมาณขยะมูลฝอยมากกว่า 27 ล้านตันต่อปี โดยร้อยละ 40-50 ของปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมดที่เกิดขึ้น เป็นขยะประเภทเน่าเสียง่ายอย่างเศษอาหาร ซึ่งจะเห็นได้ว่าเศษอาหารเหลือทิ้งจากครัวเรือนเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญและเร่งด่วนปัญหาหนึ่งของประเทศไทย กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (anaerobic digestion) เป็นการวิธีการจัดการเศษอาหารที่เหมาะสมที่สุดวิธีหนึ่ง เนื่องจากเศษอาหารเป็นของเสียที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน ซึ่งเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ทำให้เศษอาหารเหล่านั้นถูกย่อยสลายได้ง่าย และเปลี่ยนเป็นแก๊สชีวภาพที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแก๊สมีเทน สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านพลังงานทดแทนได้ แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณเศษอาหารที่เติมลงไปในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศจะต้องถูกควบคุมให้อยู่ในปริมาณที่เหมาะสมในแต่ละวัน เนื่องจากเศษอาหารเป็นของเสียที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย จึงมักประสบปัญหาเกี่ยวกับค่าพีเอชของกระบวนการหมักที่ลดต่ำลงอันเนื่องมาจากการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย (volatile fatty acids; VFAs) ในระบบ ซึ่งเกิดขึ้นในขั้นตอนแรกของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ โดยที่ของเสียต่างๆ จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดและเปลี่ยนให้เป็น VFAs ก่อนที่ VFAs เหล่านั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สมีเทนโดยจุลินทรีย์อีกกลุ่มหนึ่ง ดังนั้น หากผู้ควบคุมระบบไม่มีความรู้ความเข้าใจในเรื่องการควบคุมปริมาณเศษอาหารที่เติมเข้าไปในกระบวนการหมัก และมีการเติมเศษอาหารในปริมาณมากเกินไป จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดจะสร้าง VFAs ออกมาเร็วเกินไป จนค่าพีเอชลดต่ำลงกว่าค่าที่เหมาะสมของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน ซึ่งมีค่าพีเอชที่เหมาะสมประมาณ 6.8-7.2 กระบวนการผลิตแก๊สมีเทนจะเสียสมดุลและหยุดชะงักลง ส่งผลให้ระบบผลิตแก๊สชีวภาพล้มเหลว ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่สำคัญของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

การใช้พีเอชบัฟเฟอร์เป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถควบคุมค่าพีเอชของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ พีเอชบัฟเฟอร์คือสารที่มีคุณสมบัติในการควบคุมค่าพีเอชโดยการทำกรดให้เป็นกลาง (Acid neutralization) หรือช่วยดูดซับไฮโดรเจนอิออน (H^+) ส่งผลให้ค่าพีเอชไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น การใช้พีเอชบัฟเฟอร์จึงช่วยรักษาสมดุลของค่าพีเอชในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศได้ และส่งผลให้การผลิตแก๊สชีวภาพสามารถดำเนินไปได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร โดยศึกษาชนิดและความเข้มข้นของพีเอชบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร ชนิดของพีเอชบัฟเฟอร์ที่

ถูกเลือกมาทำการศึกษา เป็นพีเอชบัฟเฟอร์ที่มีประสิทธิภาพ แต่มีต้นทุนต่ำและสามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่น ได้แก่ ถ่านกัมมันต์(Activated carbon) ผงเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero valent iron หรือผงตะไบเหล็ก) และโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) หรือเบคกิ้งโซดาที่จำหน่ายตามท้องตลาด) เพื่อให้สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานได้จริงในชุมชน ผลการวิจัยที่ได้จึงสามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาปริมาณเศษอาหารจากครัวเรือน และเปลี่ยนขยะเหล่านั้นให้เป็นพลังงานทดแทนใช้ในชุมชนได้ ซึ่งเป็นการแก้ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมและพลังงานได้อย่างยั่งยืน

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาพีเอชบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาพีเอชบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารโดยใช้กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ โดยศึกษาความเข้มข้นที่เหมาะสมของพีเอชบัฟเฟอร์ 3 ประเภท ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ผงเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (Zero valent iron) และโซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$) ทำการทดลองโดยกระบวนการหมักแบบกะในขวดซีรั่มขนาด 500 มิลลิลิตร ปริมาตรทำงาน 300 มิลลิลิตร เก็บข้อมูลด้านการผลิตแก๊สมีเทนและค่าพีเอชของกระบวนการหมัก เพื่อให้ได้ชนิดและความเข้มข้นของพีเอชบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมที่สุด

ทบทวนวรรณกรรม

1. ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) หมายถึง ก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methane producing bacteria) โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กลง จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กเป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยมีก๊าซอื่นๆ เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือก๊าซไข่เน่า และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพต้องระวังไม่ให้อากาศเข้าไปสัมผัสกับแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนลดลง

ก๊าซชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เมื่อมีแบคทีเรีย สารอินทรีย์ และอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมในสภาวะที่ไม่มีอากาศ ในธรรมชาตินั้นก๊าซชีวภาพมักจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการหมักเช่น ก้นบ่อ ก้นแม่น้ำ ก้นทะเลสาบ หนองน้ำ บึงและนาข้าวที่มีน้ำ นอกจากนี้วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพยังเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากวัชพืชบก วัชพืชน้ำ ตลอดจนวัสดุเหลือทางการเกษตรและมูลสัตว์ โดยมีแบคทีเรียที่เรียกว่ามีเทนแบคทีเรีย เป็นตัวการสำคัญในการผลิต

ก๊าซชีวภาพประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน ประมาณ 50-70% และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณ 20-50% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย (NH_3) และไอน้ำ (H_2O) นอกจากนั้นยังมีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ เช่น ไซลอกเซน (Siloxane) โฟม คราบ (Scum) เมือกและตะกอนเป็นต้น บางครั้งอาจพบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) สูงถึง 1% (10,000 part per million (ppm)) ในกรณีที่น้ำเสียนั้นมีองค์ประกอบของสารซัลเฟต (SO_2^-) สูง ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (อนุตร, 2545)

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์
มีเทน (CH_4)	55-70
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	35-45
โฮโดรเจน (H_2)	0-1
ไนโตรเจน (N_2)	0-1
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	0-1
ออกซิเจน (O_2)	0-1

หมายเหตุ: ในตารางนี้ยังไม่ได้รวมถึงสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ ที่มีในก๊าซชีวภาพ เช่น ไซลอกเซน โฟม คราบ ตะกอนต่างๆ เป็นต้น ซึ่งความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสีย และการผลิตก๊าซชีวภาพ

2. มีเทน

มีเทน (Methane) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนพวกอัลเคน (alkane) มีสูตรเคมี คือ CH_4 เป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ติดไฟได้ ให้เปลวไฟสีชัด สว่างเรือง มีค่าพลังงาน 55.7 กิโลจูลต่อกรัม ไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้มีเทนคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สธรรมชาติ มีอยู่ประมาณร้อยละ 75 นอกจากนี้ยังมีปรากฏอยู่ตามแหล่งต่างๆในธรรมชาติ เช่น ตามหนองน้ำ บึง คลอง หรือตามพื้นดินที่มีซากพืชซากสัตว์ทับถมเน่าเปื่อยอยู่ แบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศ จะทำให้ซากพืชซากสัตว์ดังกล่าวย่อยสลายเกิดเป็นแก๊สมีเทน แก๊สมีเทนอาจได้มาจากการหมักมูลสัตว์หรือสารอินทรีย์ต่างๆและนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงราคาถูก และอาจพบได้ในชั้นถ่านหิน (Coal bed methane) โดยจากกระบวนการเกิดถ่านหินทำให้แก๊สมีเทนสะสมตัวและกัก

เก็บอยู่ในช่องว่างในเนื้อถ่านหิน แก๊สมีเทนเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสำคัญที่ใช้ในระบบอุตสาหกรรมและการขนส่ง ซึ่งจัดว่าเป็นเชื้อเพลิงที่ก่อมลพิษน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงถ่านหินและน้ำมัน

3. เศษอาหาร

เศษอาหารเป็นขยะหรือของเสียจากครัวเรือนและสถานประกอบการต่างๆ เช่น โรงอาหาร โรงแรม และแหล่งท่องเที่ยวต่างๆ เศษอาหารเหลือทิ้งจากการประกอบอาหารและจากการรับประทานถูกแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ (1) Procurement waste คือ ของเสียเศษอาหารที่ยังไม่ผ่านการทำอาหาร เกิดขึ้นระหว่างโซ่อุปทาน (2) Preparation waste คือ ของเสียเศษอาหารที่เกิดขึ้นระหว่างการเตรียมอาหาร (3) Plate waste คือ เศษอาหารที่เหลือจากการรับประทานซึ่งเศษอาหารโดยส่วนใหญ่มาจากส่วนที่เหลือทิ้งจากการประกอบอาหารและรับประทานอาหาร ซึ่งจะประกอบไปด้วย เนื้อสัตว์ ข้าว ผลไม้ และผัก ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นอินทรียวัตถุที่สามารถย่อยสลายเน่าเปื่อยได้ง่าย มีความชื้นสูง หากทิ้งไว้นานจะส่งกลิ่นเหม็นได้รวดเร็ว โดยที่องค์ประกอบของเศษอาการตามโรงอาหารหรือศูนย์อาหารจะประกอบไปด้วย ข้าวและเส้นก๋วยเตี๋ยว 54.3% ผัก 23.1% เนื้อสัตว์ 13.1% และส่วนที่กินไม่ได้ 9.1% (ศูนย์การเรียนรู้มหิดล, 2557) เศษอาหารที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่นิยมแสดงในรูปของน้ำหนักทั้งหมดต่อปี (kg/year, tonne/year, kg/day) ซึ่งภาพรวมของการเกิดเศษอาหารในทั่วโลกมีเป็นจำนวนมาก และมีแนวโน้มจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยเฉพาะในประเทศที่พัฒนาแล้วจะมีปริมาณเศษอาหารสูงถึง 50-55% (Troschinetz and Mihelcic, 2009) และมีการคาดการณ์ปริมาณเศษอาหารที่จะเกิดขึ้นทั่วโลกจะเพิ่มขึ้น 44% ระหว่าง ปี 2005-2025 (Antonis 2013, Thiet al., 2015) เนื่องจากการขยายตัวทางเศรษฐกิจ การเพิ่มขึ้นของประชากร และจากการที่มนุษย์มีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น ทำให้มีการอุปโภคและบริโภคที่สูงขึ้นตามไปด้วย จึงทำให้เกิดเศษอาหารในกลุ่มประเทศเอเชียในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจาก 278 ล้านตันเป็น 416 ล้านตัน

4. การผลิตมีเทนจากเศษอาหาร

เศษอาหารโดยส่วนใหญ่มาจากส่วนที่เหลือทิ้งจากการประกอบอาหารและรับประทานอาหาร ซึ่งจะประกอบไปด้วย เนื้อสัตว์ ข้าว ผลไม้ และผัก ซึ่งทั้งหมดนี้เป็นอินทรียวัตถุที่สามารถย่อยสลายเน่าเปื่อยได้ง่าย มีความชื้นสูง ในประเทศไทยมีเศษอาหารเกิดขึ้นทั้งหมดประมาณ 20,041 ตัน/วัน ในปี 2006 ซึ่งมีประมาณ 50% ของขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นทั้งหมด (Nguyan et al., 2007) องค์ประกอบของเศษอาหารส่วนใหญ่แล้วประกอบไปด้วยแป้ง โปรตีน และไขมัน และมีเซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลส ในปริมาณเล็กน้อย เนื่องจากเศษอาหารมีปริมาณสารอินทรีย์อยู่ค่อนข้างสูง และง่ายต่อกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ จึงมีงานวิจัยหลายๆ งานวิจัยที่มีการนำเศษอาหารไปผลิตพลังงานทดแทนภายใต้กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (Sreela-oret al., 2011) ไม่ว่าจะเป็นการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Sreela-oret al., 2015) หรือผลิตมีก๊าซเทน (Pisutpaisalet al., 2014) ยกตัวอย่างงานวิจัยที่มีการนำเศษอาหารไปใช้เป็นสับสเตรทในการผลิตก๊าซมีเทน ได้แก่ Pisutpaisal และคณะ (2014) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนแบบสองขั้นตอน โดยศึกษาการผลิตมีเทนจากเศษอาหารโดยตรง (food waste) เทียบกับการผลิตมีเทนจากน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจน

โดยใช้เศษอาหารเป็นสับสเตรท โดยใช้กล้าเชื้อจุลินทรีย์ จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแป้งมันสำปะหลัง (Upflow anaerobic sludge blanket; UASB) ผลิตมีเทนภายใต้อุณหภูมิ mesophilic fermentation โดยใช้ถังปฏิกรณ์ CSTR ขนาด 5 ลิตร ปริมาตรทำงาน 4 ลิตร ควบคุมอัตราการไหลที่ 5.5 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (organic loading rate) ที่ 24 g-COD/L/d ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 24 วัน pH 7จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการผลิตมีเทนโดยใช้เศษอาหารเป็นสับสเตรทเริ่มต้นโดยตรงทำให้ได้ผลได้มีเทน และมีอัตราการผลิตมีเทนเท่ากับ 364.3 mL-CH_4/g-VSและ 143.2 mL-CH_4/h และได้ทำการผลิตมีเทนจากน้ำเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้เศษอาหารเป็นสับสเตรท โดยควบคุมอัตราการไหลที่ 2.25 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้สภาวะอื่นๆของกระบวนการหมักเช่นเดียวกันกับการผลิตมีเทนจากเศษอาหารโดยตรง พบว่า น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนสามารถนำมาผลิตมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งได้ผลได้ของมีเทน และอัตราการผลิตมีเทนเท่ากับ 391.6 mL-CH_4/g-VS และ 168.1 mL-CH_4/h

EL-Mashad และ Zang (2010) ทำการศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการย่อยร่วมระหว่างมูลโคนมกับเศษอาหาร โดยกระบวนการหมักแบบกะในถังปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 1 ลิตร ปริมาตรทำงาน 500 มิลลิลิตร โดยทำการแปรผันอัตราส่วนของเศษอาหารและมูลโคนม คือ ผสมเศษอาหารที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 32% และ 48% กับมูลโคนม 68% และ 52% (based on volatile solid) ตามลำดับ และใช้กล้าเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดขยะมูลฝอย โดยเติมกล้าเชื้อจุลินทรีย์ 100 มิลลิลิตร หลังจากที่ทำการผสมสับสเตรทกับกล้าเชื้อจุลินทรีย์แล้วปรับปริมาตรของของเหลวให้ได้ 500 มิลลิลิตร และหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิ mesophilic (35±1 °C) จากการทดลองพบว่า หลังจากกระบวนการหมัก 30 วัน มีผลได้มีเทนสูงสุดเท่ากับ 282 และ 311 L-CH_4/kg-VS ของอัตราส่วนเศษอาหารต่อมูลโคนมที่ 32:68% และ 48:52% ตามลำดับ

สมจินตนา และคณะ (2554) ทำการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารร่วมกับกลีเซอรีนดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารและการเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการเติมกลีเซอรีนดิบที่ได้จากการผลิตไบโอดีเซลโดยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศในถังหมักขนาด 200 ลิตรแบบกึ่งกะ ปริมาตรของเหลวภายในถังหมัก 185 ลิตรระยะเวลาในการหมัก 111 วัน ในตอนเริ่มต้นเดินระบบใช้เศษอาหารอย่างเดียวป้อนที่อัตราภาระสารอินทรีย์เฉลี่ยในช่วง 0.306-1.245g/$L_{reactor}$.day (56.6-230.2 g/day) พบว่า ให้ผลผลิตของมีเทนเฉลี่ย 0.465 m^3-CH_4/kgCOD ที่อุณหภูมิห้อง และให้ค่าผลผลิตของก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 0.789 m^3biogas/kg-COD ในการป้อนกลีเซอรีนดิบร่วมกับเศษอาหารที่อัตราป้อนเศษอาหาร 1.245 g/$L_{reactor}$-day ปริมาตรก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเพิ่มขึ้นจาก 36.8 L/day เป็น 72.2 L/day และ 90.4 L/day หลังจากเพิ่มกลีเซอรีน 30.8 และ 46.3 mL/day ตามลำดับ

Sreela-or และคณะ (2015) ทำการศึกษาการผลิตมีเทนจากน้ำทิ้งของกระบวนการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้เศษอาหารเป็นสับสเตรท โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTRและใช้กล้าเชื้อจุลินทรีย์คือ.Anaerobic seed sludge จากถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ UASB ที่ใช้สำหรับผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียที่ออกมาจากกระบวนการผลิตเบียร์

ของโรงงานเบียร์ ในการทดลองใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ทำจากพลาสติกขนาด 5 ลิตร ปริมาตรทำงาน 3.5 ลิตร ประกอบด้วยกล้าเชื้อจุลินทรีย์ 2 ลิตร และน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจน (acidic effluent) 1.5 ลิตร และทำการไล่อากาศภายในถังหมักด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้เกิดสภาวะไร้อากาศภายในถังหมัก ทำการหมักที่อุณหภูมิ 35±3องศาเซลเซียสทำการศึกษาหาระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์(HRT) ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตมีเทน โดยทำการแปรผันระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 5 HRT ได้แก่ 12, 10, 8 และ6 days (วัน) จากการทดลองพบว่า ผลได้มีเทนและอัตราการผลิตมีเทนจะเพิ่มขึ้นเมื่อลด HRT จาก 12 วัน เป็น 10 วัน ที่ HTR 10 วัน มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน (methane content) ผลได้มีเทน (methane yield) และอัตราการผลิตมีเทน (methane production rate) สูงที่สุด เท่ากับ 71.3%, 155 mL-CH_4/g-COD และ 4,629.1 mL-CH_4/L d ตามลำดับ

Liu และคณะ (2013) ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตมีเทนจากน้ำทิ้งกระบวนการผลิตไฮโดรเจนของการย่อยร่วมระหว่าง activated sludge กับ food waste ที่ความเข้มข้นของสับสเตรทคงที่ 10 g-VS/L และแปรผันอัตราส่วนของ food waste ที่ 10%, 20%, 30%, 40%, 54%,85% และ 100% และใช้กล้าเชื้อจุลินทรีย์ 1.26 g dry weight ทุกชุดทดลอง หลังจากสิ้นสุดกระบวนการผลิตไฮโดรเจน น้ำทิ้งที่เหลือจากกระบวนการถูกนำมาใช้เป็นสับสเตรทสำหรับการผลิตมีเทน โดยใช้กล้าเชื้อจุลินทรีย์ (methane-producing seed sludge) 1.10 g (dry weight) และปรับ pH เป็น 7 และใช้อุณหภูมิในกระบวนการหมักที่ 37 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า ที่สัดส่วนของ food waste10%, 20%, 30%, 40%, 54% และ85% และ 100% ให้ผลได้มีเทนสูงสุดเท่ากับ 215.5, 258.0, 258.0, 333.6, 350.9, 353.5และ 321.9 mL-CH_4/g-VS ตามลำดับ

Nathao และคณะ (2013) ได้ศึกษาการผลิตมีเทนจากเศษอาหารแบบ 1 และ 2 ขั้นตอน โดยทำการแปรผันอัตราส่วนของสับสเตรทต่อกล้าเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมคือ 7.5 ซึ่งในกระบวนการหมักแบบ 2 ขั้นตอน มีค่าผลได้มีเทนสูงสุดเท่ากับเท่ากับ 94 mL-CH_4/g-VS สำหรับการผลิตมีเทนขั้นตอนเดียวให้ค่าผลได้มีเทนสูงสุดเท่ากับเท่ากับ 82 mL-CH_4/g-VSและพบว่าค่า energy recovery จากกระบวนการหมักแบบ 2 ขั้นตอนมีค่าสูงกว่าแบบขั้นตอนเดียวถึง 18%

5. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมีปัจจัยสำคัญหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง (Ward และคณะ, 2008; Yadvika และคณะ, 2004; นคร, 2010)

5.1 ปริมาณของเหลวในถังปฏิกรณ์

การเติมน้ำหรือของเหลวเข้าไปในระบบจะช่วยเจือจาง (dilution) และรักษาระดับปริมาณของแข็งรวมในระบบให้ถูกต้องตามที่ออกแบบไว้ ระบบโดยทั่วไปจะมีค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids) ประมาณ 10-25% หากมีปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบน้อยเกินไป จะทำให้ส่วนที่เป็นของแข็งบางส่วนเกิด

การตกตะกอนลงสู่ก้นถังปฏิกรณ์ และหากปริมาณของแข็งทั้งหมดมีมากเกินไป ก็จะขัดขวางการไหลขึ้นของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

5.2 ความเป็นกรด-ด่าง

ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมในถังปฏิกรณ์จะอยู่ในช่วง pH 6.5-7.5 แต่ช่วงที่ดีที่สุดต่อการผลิตก๊าซมีเทนจะเป็น 7.0-7.2 ถ้าหากในระบบมีค่า pH ต่ำกว่า 6.5 จะเกิดการยับยั้งแบคทีเรียในการผลิตก๊าซมีเทนอย่างรุนแรง ต้องรักษาความเป็นกรดด่างในระบบให้ดี เนื่องจากการทำงานของแบคทีเรียในกระบวนการแอซิเจนิซีสจะเกิดกรดระเหยง่ายมาเป็นจำนวนมาก ทำให้ระบบมาค่าความเป็นกรดด่างประมาณ 5.0 (ในระบบควรมีค่าของกรดไขมันระเหยไม่เกิน 4,000 มิลลิกรัม/ลิตร (อนุตร, 2545) แต่แบคทีเรียในกระบวนการผลิตมีเทนนั้นจะทำงานได้ดีที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างอยู่ระหว่าง 6.5-7.5 ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมค่าความเป็นกรดด่างในระบบ โดยจะควบคุมระยะเวลาในการหมักย่อยและเติมสารประเภทด่างเข้าไปในระบบเพื่อเพิ่มค่าความเป็นกรดด่างให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการผลิตมีเทน เช่น แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH) หรือโซเดียมไบคาร์บอเนต (Na_2CO_3) ในบางกรณี ค่าความเป็นกรดด่างจะลดลงเนื่องจากการเติมสารอินทรีย์มากเกินไป การเพิ่มค่าจึงได้โดยการหยุดเติมสารอินทรีย์หรือลดอัตราการเติม

5.3 อุณหภูมิ

การย่อยแบบไร้อากาศเป็นการย่อยที่ต้องมีแบคทีเรียมาเกี่ยวข้อง ซึ่งสภาวะของอุณหภูมิที่แบคทีเรียสามารถทำงานได้จะอยู่ในช่วง 5-60 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือปฏิกิริยาชีวเคมีจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น และอุณหภูมิที่แบคทีเรียเจริญเติบโตได้เป็นอุณหภูมิที่มีผลต่อองค์ประกอบของเซลล์และกิจกรรมของเอนไซม์ภายในเซลล์ อุณหภูมิถูกแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ

1) ช่วงไซโครฟิลิค (Psychrophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส

2) ช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20 – 45 องศาเซลเซียส

3) ช่วงเทอร์มอฟิลิก (Thermophilic) เป็นช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่า 45 องศาเซลเซียส

ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียมีอยู่ด้วยกัน 2 ช่วง คือ ช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic) 30-40 องศาเซลเซียส และช่วงเทอร์มอฟิลิก (Thermophilic) 45-55 องศาเซลเซียส (นคร, 2010) อุณหภูมิส่วนใหญ่ภายในถังปฏิกรณ์จะอยู่ที่30-40 องศาเซลเซียส หากต้องการหมักที่ช่วงเทอร์มอฟิลิกต้องให้ความร้อนภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายทางพลังงานมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างสารระเหยของกรดกับด่างในจำนวนที่มาก จึงต้องมีการลดความเป็นกรดด่าง (pH) ภายในถังปฏิกรณ์ แต่ข้อดีของการหมักในช่วงอุณหภูมิเทอร์มอฟิลิก คือจะช่วยให้ลดระยะเวลาในการหมักย่อยลง และเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายแก่แบคทีเรีย ถังปฏิกรณ์ที่ใช้จำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้สม่ำเสมอเพื่อป้องกันการเสียสมดุลระหว่างจำนวนแบคทีเรียในแต่ละกระบวนการย่อยๆ ช่วงอุณหภูมิอื่นที่สามารถเกิดการ

หมักได้ คือ ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) ที่ 5-25 องศาเซลเซียส (Saady and Mass, 2013; Dhaked et al., 2010; Kashyap et al., 2003)

5.4 อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR)

อัตราการป้อนสารอินทรีย์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ถังปฏิกรณ์ไม่ควรป้อนในอัตราที่สูงเกินไป เนื่องจากการป้อนในอัตราที่สูงจะทำให้แบคทีเรียในกระบวนแอซิโดเจนิซีสผลิตกรดระเหยง่ายในจำนวนที่มากขึ้นกว่าปกติ ทำให้ค่าความเป็นกรดด่างในถังปฏิกรณ์มีความเป็นกรดสูง ส่งผลให้แบคทีเรียในกระบวนการมีเทนโนเจนิซีสไม่สารถอยู่ได้เนื่องจากค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียนี้คือ 6.5-7.5 จึงส่งผลให้ไม่สามารถผลิตมีเทนออกมาได้หรือผลิตออกมาได้น้อยมาก อัตราการป้อนสูงสุดขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัตถุดิบในกระบวนการ

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สามารถคำนวณหาได้จากปริมาณของแข็งระเหยได้ (volatile solid: VS) หรืออาจจะคำนวณจากปริมาณความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (chemical oxygen demand: COD) ต่อปริมาตรของถังปฏิกรณ์ชีวภาพในแต่ละวัน อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูงสามารถลดต้นทุนในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ เนื่องจากถังปฏิกรณ์ชีวภาพที่ใช้ก็จะมีขนาดเล็กลงด้วยซึ่งจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทนจะมีความต้องการคาร์บอนในปริมาณที่แตกต่างกัน (Zeikus, 1977) ซึ่งโดยปกติแล้วในกระบวนการผลิตมีเทนที่สภาวะที่เหมาะสมจะมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ป้อนเข้าระบบมีอยู่ประมาณ 8.0 - 10% (Hobson และคณะ, 1981)

5.5 สารพิษ (Toxic substances)

โดยทั่วไปโลหะและสารต่างๆ จะมีความเป็นพิษ (Toxicity) ต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการ โดยจะเป็นตัวยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ซึ่งระดับความเป็นพิษจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารนั้นๆ หากมีการสะสมของสารบางอย่างภายในถังปฏิกรณ์ในปริมาณที่มากเกินจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ โดยอาจมีผลต่อการยับยั้ง (Inhibition) การเจริญเติบโต จนถึงทำให้แบคทีเรียตายได้ และจะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพหรือเสถียรภาพของระบบลดลงระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศได้แบ่งสารพิษที่มีผลต่อแบคทีเรีย เช่น พิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งมีผลต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน พิษของสารโลหะหนักชนิดต่างๆ พิษของแอมโมเนียมอิออน (NH_4^+) เป็นต้น สำหรับโลหะหนักบางชนิด เช่น นิเกิล (Ni) โคบอลท์ (Co) เหล็ก (Fe) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) นั้นจัดเป็นธาตุอาหาร (trace element) ที่จำเป็นต่อแบคทีเรียด้วย ซึ่งมีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียมีความต้องการในปริมาณที่ต่ำมาก โลหะและสารต่างๆ จะมีความเป็นพิษ (Toxicity) ต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการโดยจะเป็นตัวยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ดังนี้

1) ออกซิเจน ปริมาณออกซิเจนแม้เพียงเล็กน้อยก็สามารถยับยั้งแบคทีเรียในการผลิตมีเทนได้ บรรยากาศที่เหมาะสมจึงควรเป็นสภาวะแบบรีดิวซิงสูงเพื่อรักษาระดับการเจริญเติบโตไว้ สารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง เช่นไนไตรท์หรือไนเตรต จะทำให้กิจกรรมการสร้างมีเทนของแบคทีเรียหยุดลง

2) กรดระเหยง่าย ผลของกรดระเหยง่ายต่อเชื้อจุลินทรีย์ไม่ค่อยชัดเจนนัก เนื่องจากผลของความเป็นกรดด่างเข้ามาซ้ำซ้อนด้วย ที่สภาพความเป็นกรดด่างคงที่ใกล้ๆ 7.0 กรดอะซิติกและกรดบิวทิริกไม่มีผลใดๆ แต่กรดโพรพิโอนิกที่ความเข้มข้นค่อนข้างสูงแสดงผลเป็นพิษต่อแบคทีเรีย

3) แอมโมเนีย เป็นสารที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากการหมักกากตะกอน และมีระดับความรุนแรงของความเป็นพิษต่อแบคทีเรียขึ้นอยู่กับรูปแบบที่เกิดขึ้น แอมโมเนียอิสระมีความเป็นพิษกว่ารูปแบบอื่นโดยที่ความเข้มข้น 150 มิลลิกรัมต่อลิตร จะส่งผลของพิษรุนแรง ถ้าเป็นประจุแอมโมเนียมต้องมีความเข้มข้นเกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงจะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ที่สภาพความเป็นกรดด่างเท่ากับ 7.2 หรือต่ำกว่า แอมโมเนียส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของประจุแอมโมเนียม ดังนั้นหากมีความเข้มข้นไม่สูงมากนักก็ไม่มีผลต่อแบคทีเรีย

4) ประจุโลหะเบา ในการหมักย่อยไร้อากาศ สภาวะมีแนวโน้มจะเป็นกรดมากขึ้นจากปริมาณกรดระเหยได้ที่เกิดขึ้น หากเกิดการไม่สมดุลกันของจำนวนเชื้อแบคทีเรียหลักสองแบบในกระบวนการ โดยปกติจะมีการควบคุมความเป็นกรดโดยการเติมด่างลงไป การกระทำดังกล่าวจะต้องทำอย่างระมัดระวังอย่างมาก เพราะประจุโลหะเบาจากด่างมีความเป็นพิษต่อเชื้อแบคทีเรีย โดยเฉพาะพวกโซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg)

5) ซัลไฟด์ สารประกอบซัลไฟด์เกิดจากปริมาณซัลเฟตในสารหมักและการสลายตัวของโปรตีนหาก ความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่ละลายได้เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร กิจกรรมของแบคทีเรียจะถูกยับยั้งอย่างรุนแรงและทำให้กระบวนการหมักล้มเหลวได้ แต่ที่ความเข้มข้นต่ำกว่านี้แบคทีเรียสามารถทนได้ ซัลไฟด์ที่ละลายได้มีผลต่อเซลล์แบคทีเรีย แต่ซัลไฟด์ที่ไม่ละลายจะไม่ส่งผลต่อเซลล์แบคทีเรีย ดังนั้นวิธีการควบคุมสามารถทำได้โดยการใส่เหล็กลงไปเพื่อทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์เพื่อให้ความเข้มข้นลดลง

6) โลหะหนัก มีความเป็นพิษแม้ที่ความเข้มข้นต่ำๆ แต่เฉพาะส่วนที่ละลายได้เท่านั้นที่จะเป็นพิษต่อเซลล์แบคทีเรีย

5.6 ปริมาณสารอาหารภายในสารอินทรีย์

เชื้อจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมีความต้องการแหล่งอาหารและโภชนาการอย่างเพียงพอในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวน ปริมาณของสารอาหาร (Nutrients) ภายในสารอินทรีย์หากมีปริมาณมากก็จะช่วยให้เกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้น เนื่องจาก คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืชน้ำและแบคทีเรีย ฉะนั้นจึงต้องมีปริมาณที่เพียงพอในน้ำเสียหรือสารอินทรีย์ที่นำมาหมัก หากมีแหล่งไนโตรเจนน้อย แบคทีเรียจะไม่สามารถผลิตเอนไซม์สำหรับใช้กับคาร์บอนได้ หากว่ามีปริมาณที่มากเกินไปก็จะเป็นอันตรายต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย อัตราส่วนที่เหมาะสมของ

คาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ควรอยู่ในช่วง 25:1 ถึง 30:1 โดยปกติแล้วกากตะกอนน้ำเสียและมูลสัตว์จะมีสารอาหารสำหรับเชื้อแบคทีเรียเหล่านี้ครบถ้วน แต่กับวัตถุดิบชนิดอื่นอาจจะต้องมีการใส่เพิ่มเติมลงไป

5.7 การกวนผสมภายในถังปฏิกรณ์

การกวนผสมเป็นขั้นตอนที่ทำให้สารอินทรีย์และแบคทีเรียในระบบเกิดการคลุกเคล้าผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และเพื่อกระจายความเข้มข้นและกระจายอุณหภูมิภายในบ่อหมัก ซึ่งจะทำให้เกิดสภาวะเสถียรเกิดการสมดุลของพลังงานที่เกิดขึ้นภายในบ่อหมัก และไม่ทำให้เกิดฝ้า (scum) ที่ระดับผิวซึ่งจะเป็นตัวกันไม่ให้ก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบไหลผ่านได้สะดวก

5.8 ลักษณะทางกายภาพของสารอินทรีย์ตั้งต้น

ขนาดของสารอินทรีย์ตั้งต้นที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์มีผลต่อปริมาณมีเทนเป็นอย่างมาก หากสารอินทรีย์ตั้งต้นมีขนาดเล็กจะช่วยให้เกิดปริมาณมีเทนเพิ่มขึ้น เนื่องจากแบคทีเรียในกรบวนการไฮโดรไลซีสสามารถลดขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ได้ง่ายขึ้น ทำให้มีปริมาณของสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กที่มากขึ้นตามแบคทีเรียจึงสามารถผลิตมีเทนได้ในจำนวนมาก แต่หากขนาดของสารอินทรีย์มีขนาดที่เล็กเกินไป จะทำให้มีสารอินทรีย์ขนาดที่เล็กในปริมาณที่มาก ทำให้เกิดกรดระเหยง่ายเป็นปริมาณมากเกินความต้องการของระบบส่งผลให้ค่าความเป็นกรดด่างของระบบมีค่าไม่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทน

5.9 การเตรียมวัตถุดิบก่อนป้อนเข้าถังหมัก

การเตรียมสภาพวัตถุดิบก่อนป้อนเข้าถังหมักจะช่วยเพิมการผลิตก๊าซชีวภาพได้ การเตรียมสภาพช่วยทำให้การหมักย่อยของวัตถุดิบต่างๆ ง่ายขึ้น โดยเฉพาะกับพวกวัสดุที่มีเซลลูโลสหรือลิกนินสูง การเตรียมสภาพวัตถุดิบจะช่วยทำให้พอลิเมอร์เหล่านี้แตกตัวมากขึ้นได้ เมื่อผ่านกระบวนการทางกายภาพ เคมี หรือความร้อน ตัวอย่างการเตรียมสภาพวัตถุดิบอาจทำได้โดยการใช้ด่างการสารเคมีร่วมกันความร้อน และการใช้อัลตราโซนิก

5.10 ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ไว้ภายในระบบ (Hydraulic retention time; HRT)

หากมีระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์มากขึ้นจะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่ายได้สูง ในขณะเดียวกันก็จะช่วยเพิ่มปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบให้สูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากการเพิ่มระยะเวลาจะทำให้แบคทีเรียมีเวลาในการเปลี่ยนกรดระเหยง่ายให้เป็นมีเทน แต่ถ้าใช้ระยะเวลากักเก็บที่นานมากเกินไป ก็อาจจะทำให้ปริมาณแบคทีเรียมีมากเกินที่ระบบจะรับได้นอกจากนี้การเพิ่มระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ยังทำให้เชื้อจุลินทรียามารถปรับตัวให้เจริญในสารประกอบที่มีความเป็นพิษได้ ในการสร้างก๊าซมีเทนจากของแข็งระเหยง่าย ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพสามารถควบคุมได้จากระยะเวลาการกักเก็บซึ่งจะขึ้นอยู่กับเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการหมัก อย่างไรก็ตามระยะเวลากักเก็บที่มากกว่า 12 วันจะไม่สามารถเพิ่มอัตราการย่อยสลายของแข็งระเหยง่ายง่ายได้และมีผลต่ออัตราการผลิตมีเทน การหลีกเลี่ยงการสูญเสียของเซลล์จุลินทรีย์ (wash out) ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพสามารถทำได้โดยการควบคุมระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ไม่ให้ต่ำกว่า10-15 วัน (Chandra และคณะ, 2012)

Reungsang และคณะ (2016) ทำการศึกษาระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตมีเทนจากน้ำหมักที่เหลือจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้น้ำอ้อยเป็นสับสเตรทโดยกระบวนการหมักแบบกะ ทำการผลิตมีเทนแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบ UASB (Upflow anaerobic granula sludge bioreactor) มีการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการหมักที่ 30 ±2 องศาเซลเซียสและแปรผันระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ที่ 6, 5, 4, 3และ 2 วัน พบว่า ระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ที่เหมาะสมเท่ากับ 4 วัน มีอัตราการผลิตมีเทนและมีผลได้มีเทนสูงที่สุดเท่ากับ 1.27±0.05 L-CH_4/L.day และ 348±13 mL-CH_4/g-COD ตามลำดับ

งานวิจัยของ Dareioti และ Kornaros (2015) ได้ทำการศึกษาระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่เหมาะสมในการการผลิตมีเทนจากน้ำเหลือทิ้งจากการผลิตไฮโดรเจนโดยการ co-digestion ระหว่าง ข้าวฟ่างหมัก (ensiled sorghum) หางนม (cheese whey) และ มูลวัว (liquid cow manure) ที่อัตราส่วน 55:40:5 (v/v/v) โดยใช้ถังหมักแบบ CSTR และควบคุมอุณหภูมิ mesophilic conditions (37 องศาเซลเซียส) โดยทำการแปรผันระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ที่ 24, 16 และ 12 วัน และใช้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่ 1.93, 2.90 และ 3.87kg-VS/m^3.d. หรือ 3.58, 5.36 และ 7.15 kg-COD/m^3.d. ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์ 24 และ 16 วัน ให้ผลได้มีเทนสูงสุดเท่ากับ326.42 ± 56.9และ 310.34 ± 41.3 mL-CH_4/g-VS_{added} หรือ 223.09 และ 216.50 mL-CH_4/g-$COD_{consumed}$ตามลำดับ

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมสับสเตรทและหัวเชื้อจุลินทรีย์

1.1 รวบรวมเศษอาหารจากโรงอาหารในมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงครามสำหรับใช้ในกระบวนการหมัก โดยนำเศษอาหารมาแยกเอาส่วนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ออก เช่น ยาง ถุงพลาสติก ไม้เสียบลูกชิ้น กระดูก เป็นต้น จากนั้นนำเศษอาหารปั่นให้ละเอียดโดยใช้เครื่องปั่นอาหาร แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20 °C เพื่อรักษาสภาพก่อนนำมาใช้ โดยเศษอาหารส่วนหนึ่งจะถูกนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ค่าของแข็ง ทั้งหมด (Total solid; TS) ค่าของแข็งระเหยได้ (Volatile solid; VS) ปริมาณเถ้า (ash) ค่าพีเอช (pH) และค่าซีโอดี (Chemical oxygen demand; COD) ตามวิธีมาตรฐานของ American Public Health Association (1995) โดยมีขั้นตอนดังนี้

1.1.1 การวิเคราะห์ค่า TS, VS และ ash มีขั้นตอนดังนี้

- นำ crucible มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ประมาณ 2-6 ชั่วโม
- นำ crucible ที่ผ่านการอบแล้วมาวางในโถดูดความชื้นประมาณ 1 ชั่วโมง หรือจนกว่าจะอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นนำออกมาชั่งน้ำหนักโดยใช้เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (น้ำหนัก A กรัม)

- ชั่งตัวอย่างที่ผสมเข้ากันดีแล้ว ประมาณ 15-20 กรัม ใส่ลงใน crucible ที่ทราบน้ำหนักแล้วข้างต้น

- นำตัวอย่างจากข้อ 3) ไปอบให้แห้งในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ประมาณ 2-6 ชั่วโมง ทำให้เย็นในโถดูดความชื้น ประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นไปชั่งน้ำหนัก โดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (น้ำหนัก B กรัม)

- นำตัวอย่างจากข้อที่ 4) ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 °C ประมาณ 2-3 ชั่วโมง จากนั้นรอจนอุณหภูมิในเตาเผาลดลงต่ำกว่า 100 °C จึงนำออกมาวางไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น ประมาณ 1 ชั่วโมง

- ชั่งน้ำหนัก โดยใช้เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (น้ำหนัก D กรัม)

- คำนวณค่า TS, VS และ Ash ตามสมการ

$$TS\ (g/kg) = \frac{(B - A) \times 10^6}{C}$$

$$VS\ (g/kg) = \frac{(B - D) \times 10^6}{C}$$

$$Ash\ (g/kg) = TS - VS$$

เมื่อ A = น้ำหนักของ crucible (กรัม)

B = น้ำหนักของ crucible และของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากอบแห้งที่ 103-105 °C (กรัม)

C = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

D = น้ำหนักของ crucible และของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากเผาที่ 550 °C (กรัม)

1.1.2 การวิเคราะห์ค่า COD ด้วยวิธี Closed reflux มีขั้นตอนดังนี้

- เตรียมสารละลายมาตรฐาน Potassium dichromate ($K_2Cr_2O_7$) ความเข้มข้น 0.1 N โดยชั่งสาร $K_2Cr_2O_7$ หนัก 4.913 g ละลายลงในน้ำกลั่นปริมาตร 500 mL จากนั้นเติม H_2SO_4 ปริมาตร 167 mL และเติม $HgSO_4$ หนัก 33.3 g คนให้ละลายแล้วทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 1000 mL ใน volumetric flask

- เตรียมสารละลายกรด Sulfuric โดยชั่ง Ag_2SO_4 หนัก 5.5 g ลงใน H_2SO_4 ปริมาตร 1 L ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 1-2 วัน เพื่อให้ Ag_2SO_4 ละลาย

- เตรียมสารละลาย Ferroine indicator โดยชั่ง 1,10 Phenanthroline ($C_{12}H_8N_2.H_2O$) หนัก 1.485 g และ Iron sulfate ($FeSO_4.7H_2O$) หนัก 0.695 g ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 100 mL ใน volumetric flask

- เตรียมสารละลายมาตรฐาน FAS ความเข้มข้น 0.025 N โดยชั่ง $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2.6H_2O$ หนัก 9.8 g ละลายในน้ำกลั่น 500 mL แล้วเติม H_2SO_4 ปริมาตร 5 mL คนให้ละลายเข้ากัน จากนั้นปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 1000 mL ใน volumetric flask

- ล้างหลอดทดลองด้วย 20% H_2SO_4 ก่อนใช้ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของสารอินทรีย์

- นำตัวอย่างปริมาตร 2.5 mL ที่ผ่านการเจือจางแล้ว 10^{-2} ใส่ลงในหลอดทดลองที่เตรียมไว้ จากนั้นเติมสารละลาย 0.1 N $K_2Cr_2O_7$ ปริมาตร 1.5 mL ตามด้วยสารละลาย H_2SO_4 ปริมาตร 3.5 mL

- ปิดฝาหลอดทดลองให้แน่นพอดี เขย่าหลอดทดลองด้วย vortex mixer

- นำหลอดทดลองไปให้ความร้อนด้วย Heating block หรือ Hot air oven ที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วนำออกมาทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

- หยด ferroine indicator ลงไปในหลอดตัวอย่างจำนวน 1 หยด แล้วนำตัวอย่างมา titrate ด้วยสารละลาย FAS สารละลายจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีฟ้าอมเขียว และจะเป็นสีน้ำตาลแดงที่จุดยุติ ทำการบันทึกปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไป

- คำนวณความเข้มข้นของ FAS โดยการเติมสารเคมีเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์ตัวอย่างลงในหลอดทดลอง โดยใช้น้ำกลั่น 2.5 mL แทนน้ำตัวอย่าง (ไม่ต้องนำหลอดสารละลายไปให้ความร้อน) ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วหยด ferroine indicator ลงไป 1 หยด จากนั้น titrate สารละลายจนได้จุดยุติ บันทึกปริมาตรของ FAS ที่ใช้ไปแล้วคำนวณตามสมการ

$$\text{ความเข้มข้นของ FAS (N)} = \frac{\text{ปริมาตรของ 0.1 N } K_2Cr_2O_7 \times 0.1}{\text{ปริมาตรของ FAS ที่ใช้ tritrate (mL)}}$$

$$\text{คำนวณค่า COD ของตัวอย่าง จากสมการ} \quad \text{COD (mg/L)} = \frac{(A - B) \times N \times 8000}{\text{ปริมาตรของตัวอย่าง (mL)}}$$

เมื่อ A = mL ของ FAS ที่ใช้ titrate blank

B = mL ของ FAS ที่ใช้ titrate ตัวอย่าง

N = ความเข้มข้น (normality) ของ FAS

1.2 เม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไหลย้อนขึ้น (Upflow anaerobic sludge blanket; UASB) ของบริษัท ขอนแก่นบริวเวอรี่ จำกัด อ.เมือง จ.ขอนแก่น ได้ถูกนำมาใช้เป็นหัวเชื้อสำหรับกระบวนการผลิตมีเทน โดยเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่เก็บรวบรวมมาได้ จะถูกนำมาเก็บรักษาในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 °C เพื่อไม่ให้เสียสภาพก่อนนำมาใช้ในการทดลอง และส่วนหนึ่งได้ถูกนำมาวิเคราะห์ค่า TS และ VS ตามวิธีมาตรฐานของ APHA (1995) เพื่อใช้ในการกำหนดปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในการทดลอง

2. การออกแบบการทดลอง

การศึกษาผลของบัฟเฟอร์ชนิดต่างๆ ที่มีกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร ใช้กระบวนการหมักแบบกะ (Batch) ในขวดหมักปริมาตร 500 มิลลิลิตร ใช้ปริมาตรทำงาน 300 มิลลิลิตร กำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของเศษอาหารไว้เท่ากับ 30 g-VS/L แปรผันความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ชนิดต่างๆ ดังนี้

- <u>บัฟเฟอร์ชนิดสารเคมี</u> แปรผันความเข้มข้นของ $NaHCO_3$ ตั้งแต่ 9, 15, 21 และ 27 g/L กำหนดเป็นรหัสของทรีทเมนต์ ได้แก่ Na-1, Na-2, Na-3 และ Na-4 ตามลำดับ และแปรผันความเข้มข้นของ $CaCO_3$ ตั้งแต่ 9, 15, 21 และ 27 g/L กำหนดเป็นรหัสของทรีทเมนต์ ได้แก่ Ca-1, Ca-2, Ca-3 และ Ca-4 ตามลำดับ โดยมีทรีทเมนต์ควบคุม (Control) คือ การใช้เศษอาหารที่ความเข้มข้น 30 g-VS/L โดยไม่มีการเติมบัฟเฟอร์

- <u>บัฟเฟอร์จากเหล็กวาเลนซ์ศูนย์</u> แปรผันอัตราส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ (g-ZVI) ต่อเศษอาหาร ($g\text{-}VS_{food\ waste}$) ที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่ 0.5:1, 1:1, 1.5:1, 3:1, 5:1 กำหนดเป็นรหัสของแต่ละทรีทเมนต์ ได้แก่ ZV-1, ZV-2, ZV-3, ZV-4 และ ZV-5 ตามลำดับ และทรีทเมนต์ควบคุม (Control) คือ การใช้เศษอาหารที่ความเข้มข้น 30 g-VS/L โดยไม่มีการเติมเหล็กวาเลนซ์ศูนย์

- <u>บัฟเฟอร์จากถ่านกัมมันต์</u> แปรผันอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ (g-AC) ต่อเศษอาหาร ($g\text{-}VS_{food\ waste}$) ที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่ 0.5:1, 1:1, 1.5:1, 3:1, 5:1 กำหนดเป็นรหัสของแต่ละทรีทเมนต์ ได้แก่ AC-1, AC-2, AC-3, AC-4 และ AC-5 ตามลำดับ และทรีทเมนต์ควบคุม (Control) คือ การใช้เศษอาหารที่ความเข้มข้น 30 g-VS/L โดยไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 นำเศษอาหารมาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้นเท่ากับ 30 g-VS/L ปรับ pH เท่ากับ 7 ด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 3 M เพื่อให้มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน แล้วจึงผสมเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบ UASB สำหรับใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ความเข้มข้น 10 g-VS/L จากนั้นเติมบัฟเฟอร์ชนิดต่างๆ ลงไปในอัตราส่วนที่กำหนดในแผนการทดลอง แล้วจึงเติมส่วนผสมทั้งหมดลงในขวดหมักให้ได้ปริมาตรทำงาน 300 มิลลิลิตร ปิดฝาขวดหมักให้สนิท ไล่อากาศภายในขวดหมักออกด้วยแก๊สไนโตรเจนบริสุทธิ์เพื่อให้เกิดสภาวะไร้อากาศ จากนั้นหมักทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงในภาพที่ 2.1

ภาพที่ 2.1 การผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหารโดยใช้ชนิดและความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ที่แตกต่างกัน

3.2 เก็บข้อมูลปริมาตรแก๊สมีเทนด้วยวิธีแทนที่ของเหลว (Fluid displacement method) โดยต่อท่อแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้จากขวดหมักให้ไหลผ่านสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 3 M ดังแสดงในภาพที่ 2.2 เพื่อให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถูกดักจับไว้ในสารละลาย จากนั้นสารละลาย NaOH ที่อยู่ในขวดจะถูกแทนที่ออกมาด้วยแก๊สมีเทน ซึ่งปริมาตรสารละลาย NaOH ที่ถูกแทนที่จะเท่ากับปริมาตรแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้น

ภาพที่ 2.2 การวัดปริมาตรแก๊สมีเทนด้วยวิธีการแทนที่ของเหลว

3.3 เก็บข้อมูลค่า pH ระหว่างการหมักทุกๆ 3-5 วัน โดยการเก็บตัวอย่างน้ำหมักปริมาตร 2 มิลลิลิตร มาวัดค่า pH ด้วย pH meter

4. การคำนวณค่าผลได้และค่าพลังงานของมีเทน

การคำนวณค่าผลได้ของมีเทนในหน่วยมิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยได้ (mL/g-VS) จะต้องแปลงหน่วยปริมาตรแก๊สมีเทนจากการทดลองในหน่วยมิลลิลิตร (mL) ให้เป็นหน่วยมิลลิลิตรต่อลิตรสับสเตรท (mL/L) โดยการหารด้วยปริมาตรทำงานของแต่ละทรีตเมนต์ (ในการทดลองนี้ใช้ปริมาตรทำงานเท่ากับ 300 mL) ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\text{ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสม (mL/L)} = \frac{\text{ปริมาตรแก๊สมีเทนจากการทดลอง (mL)}}{\text{ปริมาตรทำงาน (mL)}} \times 1{,}000 \qquad (2.1)$$

เมื่อได้ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมในหน่วย mL/L แล้ว จึงทำการคำนวณค่าผลได้ของมีเทนโดยการหารด้วยค่าความเข้มข้นของสับสเตรทที่ใช้ในการทดลอง (ในการทดลองนี้ใช้เศษอาหารความเข้มข้น 30 g-VS/L) ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$\text{ค่าผลได้ของมีเทน (mL/g-VS)} = \frac{\text{ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสม (mL/L)}}{\text{ความเข้มข้นของสับสเตรท (g - VS/L)}} \qquad (2.2)$$

การคำนวณค่าพลังงานของมีเทนจากการทดลอง จะคิดต่อหนึ่งหน่วยกรัมของแข็งระเหยได้ (g-VS) ของสับสเตรท มีหน่วยเป็นกิโลจูลต่อกรัมของแข็งระเหยได้ (kJ/g-VS) โดยจะนำค่าผลได้ของมีเทนที่ผลิตได้ในหน่วย mL/g-VS ค่าความหนาแน่นของมีเทน (Methane density) และค่าความร้อนของมีเทน (Methane heating value) มาใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$\text{ค่าพลังงานของมีเทน (kJ/g-VS)} = \frac{\text{CH4 yield (mL/g - VS) x CH4 density (g/L) x CH4 heating value (kJ/g)}}{1{,}000} \qquad (2.3)$$

เมื่อ CH_4 Yield คือ ค่าผลได้ของมีเทน (mL/g-VS)

CH_4 Density คือ ค่าความหนาแน่นของมีเทน (มีค่าเท่ากับ 0.72 g/L)

CH_4 Heating Value คือ ค่าความร้อนของมีเทน (มีค่าเท่ากับ 50 kJ/g)

ผลการวิจัย

1. คุณสมบัติเบื้องต้นของเศษอาหารและหัวเชื้อจุลินทรีย์

ผลวิเคราะห์ค่า COD TS และ VS ของเศษอาหาร และเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ แสดงในตารางที่ 2.2 โดยจะเห็นได้ว่าค่า VS ของเศษอาหารมีค่าประมาณ 95% ของค่า TS แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่ของเศษอาหารเป็นสารอินทรีย์ เช่นเดียวกับเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งมีค่า VS ประมาณ 92% ของค่า TS

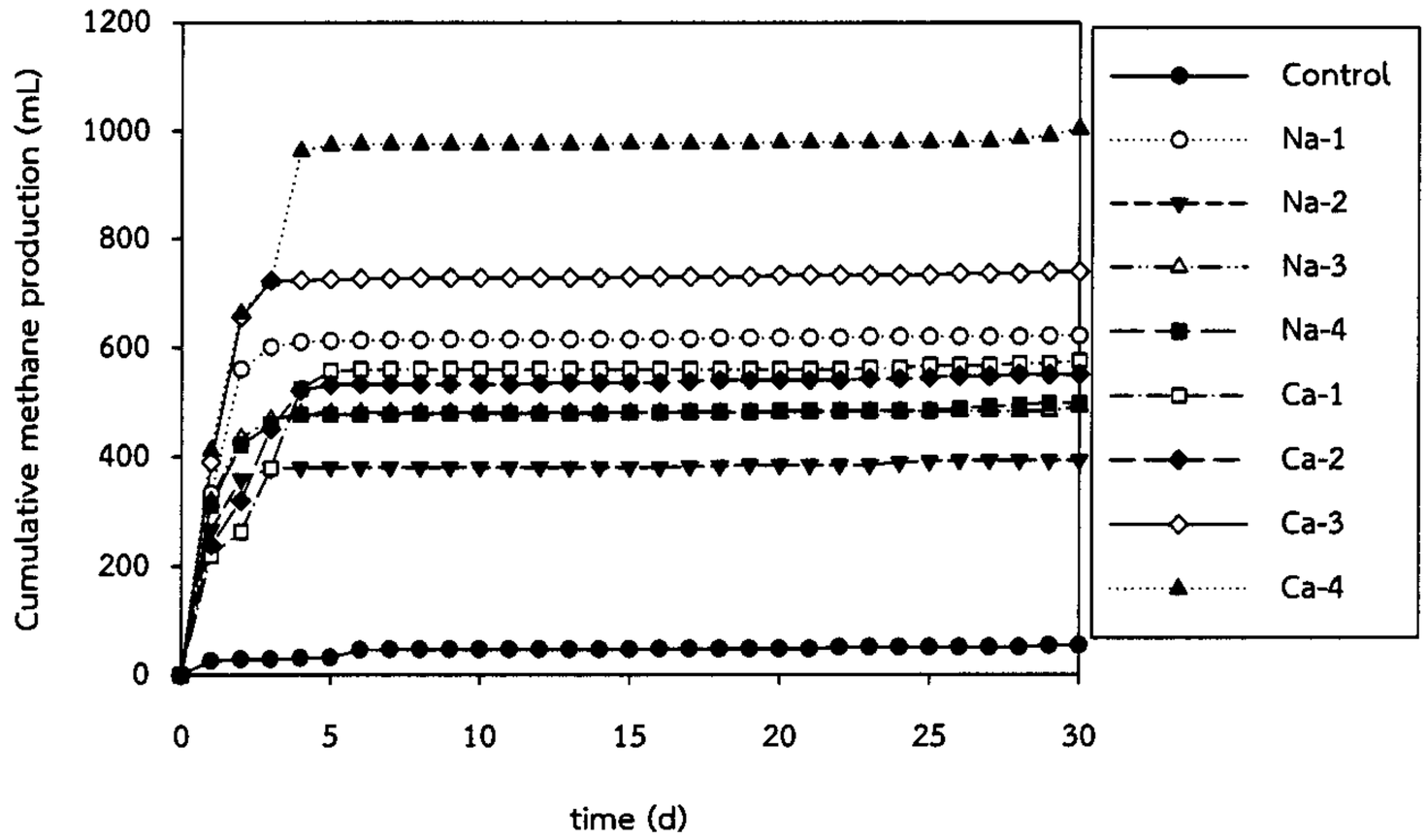
ตารางที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของเศษอาหาร และเม็ดตะกอนจุลินทรีย์

ค่าที่วิเคราะห์	เศษอาหาร	เม็ดตะกอนจุลินทรีย์
ค่า COD (chemical oxygen demand) (g/L)	135.91	ไม่ได้ทำการวิเคราะห์
ค่า TS (total solid) (g/kg)	188.01	133.28
ค่า VS (volatile solid) (g/kg)	178.48	122.52
เถ้า (ash) (g/kg)	9.53	10.76
pH	5.78	ไม่ได้ทำการวิเคราะห์

2. ชนิดและความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทน

2.1 ผลของการใช้บัฟเฟอร์ชนิดสารเคมี

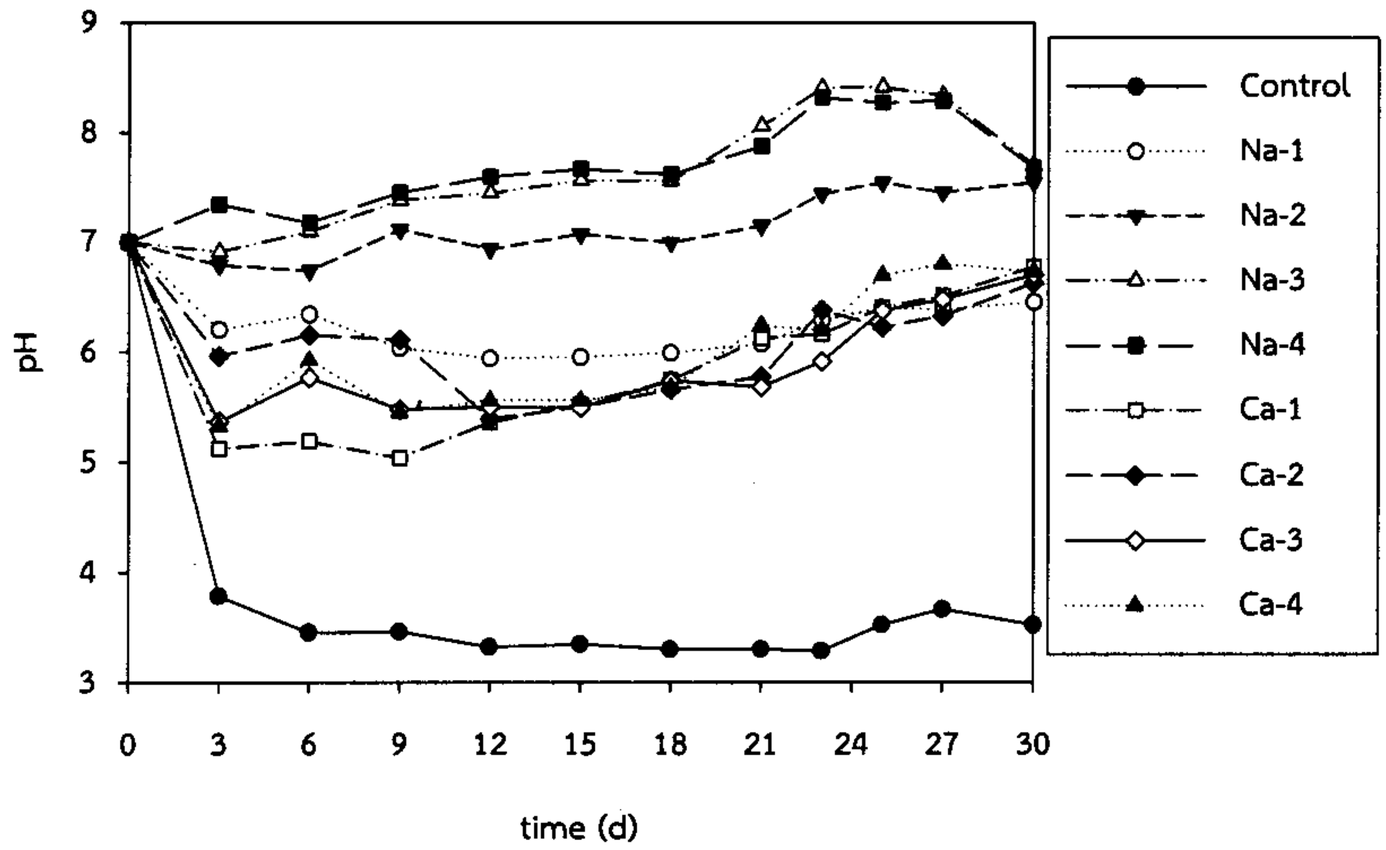
ผลการทดลองพบว่า การผลิตแก๊สมีเทนของทรีตเมนต์ที่ไม่มีการเติมบัฟเฟอร์ลงในกระบวนการหมัก (Control) ล้มเหลวลง เนื่องจากมีการเกิดแก๊สมีเทนเพียงแค่ช่วง 2-3 วันแรกของกระบวนการหมัก จากนั้นกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนได้หยุดชะงักลงไปจนถึงวันที่ 30 ของกระบวนการหมัก (ภาพที่ 2.3) ในขณะที่ทรีตเมนต์ที่มีการเติมบัฟเฟอร์ลงในกระบวนการหมัก เกิดการผลิตแก๊สมีเทนที่สูงกว่าทรีตเมนต์ควบคุมอย่างเห็นได้ชัด โดยปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมมีค่าแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ ซึ่งจะเห็นได้ว่า การใช้ความเข้มข้นของ $NaHCO_3$ ที่สูงกว่า 9 g/L ส่งผลให้ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมมีค่าลดลง ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของ $CaCO_3$ จาก 9 g/L เป็น 21 และ 27 g/L ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมมีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยทรีตเมนต์ที่มีปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมสูงที่สุดได้แก่ การใช้ $CaCO_3$ ที่ระดับความเข้มข้น 27 g/L (Ca-4) ได้ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมสูงที่สุดเท่ากับ 1,004 mL



ภาพที่ 2.3 ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมเมื่อใช้ชนิดและความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ที่แตกต่างกัน

ในด้านของค่า pH ของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ จะเห็นได้ว่าบัฟเฟอร์ช่วยควบคุมระดับ pH ของน้ำหมักได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับทรีตเมนต์ควบคุมที่ไม่มีการเติมบัฟเฟอร์ โดยในทรีตเมนต์ควบคุมนั้น ค่า pH ของน้ำหมักลดลงต่ำกว่า 4 ตั้งแต่วันที่ 3 ของการหมัก โดยมีค่า pH สุดท้ายเท่ากับ 3.52 (ภาพที่ 2.4) ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่เหมาะสมต่อกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ส่วนทรีตเมนต์ที่มีการใช้ $CaCO_3$ เป็นบัฟเฟอร์ พบว่าในช่วงแรกของกระบวนการหมัก ค่า pH ของแต่ละทรีตเมนต์ลดต่ำลงอยู่ในช่วง 5.2-5.9 เนื่องจากเป็นช่วงที่สับสเตรทถูกย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยง่าย แต่เมื่อเข้าสู่วันที่ 6 ของการหมัก จะเห็นได้ว่าค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะกรดไขมันระเหยง่ายเริ่มถูกใช้ไปในการสร้างแก๊สมีเทน โดยเมื่อสิ้นสุดการหมัก พบว่าค่า pH อยู่ในช่วง 6.6-6.7

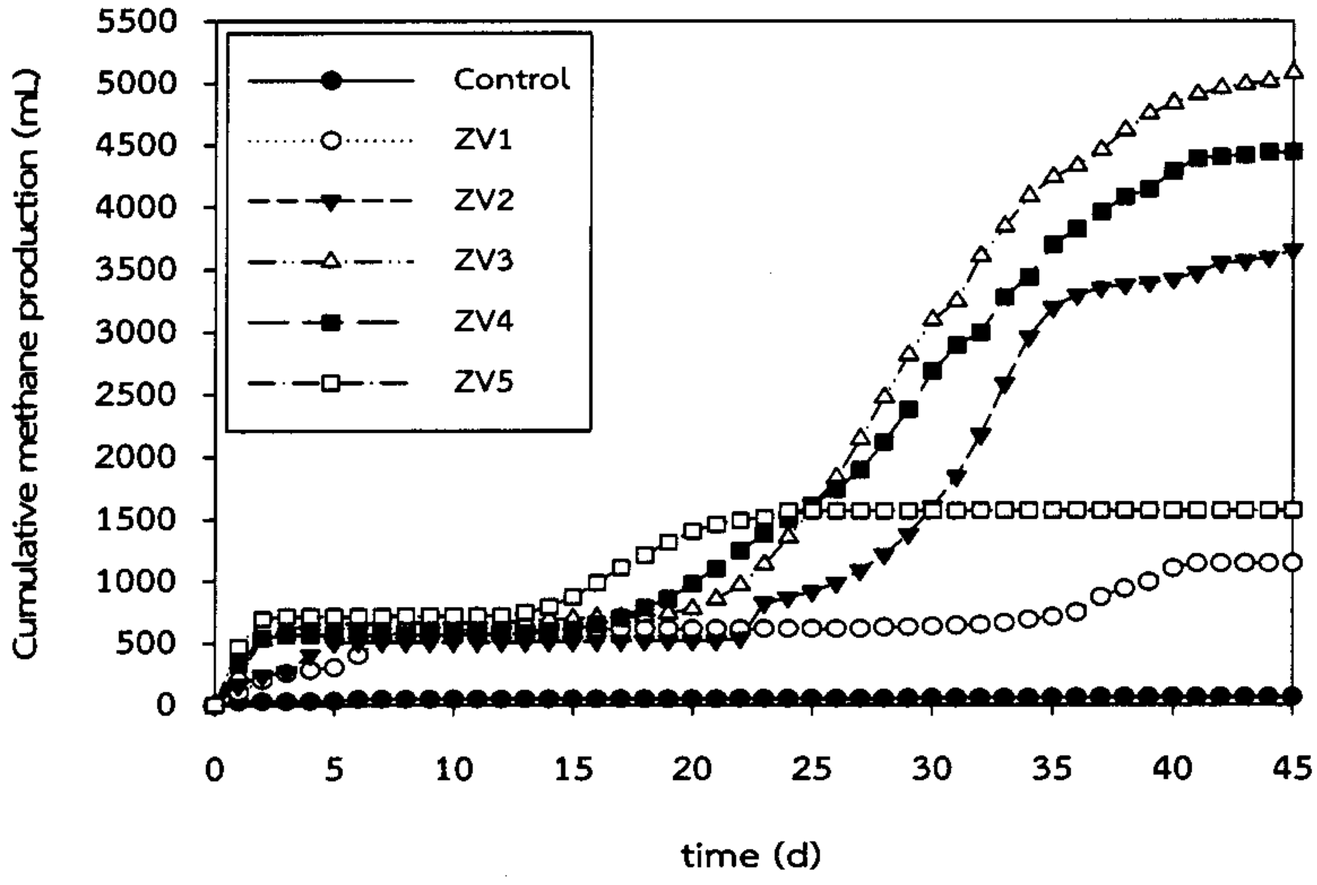
ในขณะที่ทรีตเมนต์ที่มีการใช้ $NaHCO_3$ เป็นบัฟเฟอร์ พบว่าสามารถควบคุมระดับของ pH ได้ดีกว่าการใช้ $CaCO_3$ โดยเฉพาะทรีตเมนต์ที่มีการใช้ความเข้มข้นตั้งแต่ 15 g/L ขึ้นไป จะเห็นได้ว่าค่า pH ลดต่ำลงเล็กน้อยในช่วงแรกของการหมัก และหลังจากนั้น ค่า pH ของกระบวนการหมักค่อนข้างคงตัวอยู่ในระดับที่เป็นกลางไปจนสิ้นสุดกระบวนการหมัก โดยมีค่าอยู่ในช่วง 7.5-7.6 แสดงให้เห็นว่า $NaHCO_3$ เป็นบัฟเฟอร์ที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มระดับ pH ของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศได้ดีกว่า $CaCO_3$ แต่อย่างไรก็ตาม แม้ว่าทรีตเมนต์ที่ใช้ $NaHCO_3$ เป็นบัฟเฟอร์จะมีค่า pH อยู่ในช่วงเหมาะสมที่สุดประมาณ 7.2 (Na-2) แต่ก็ไม่ได้เป็นทรีตเมนต์ที่มีการผลิตมีเทนดีที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากผลของสารยับยั้งที่พบในบัฟเฟอร์ $NaHCO_3$ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการผลิตมีเทน (อธิบายเพิ่มเติมในหัวข้ออภิปรายผล)



ภาพที่ 2.4 ค่า pH ของกระบวนการหมักเมื่อใช้ชนิดและความเข้มข้นของบัฟเฟอร์ที่แตกต่างกัน

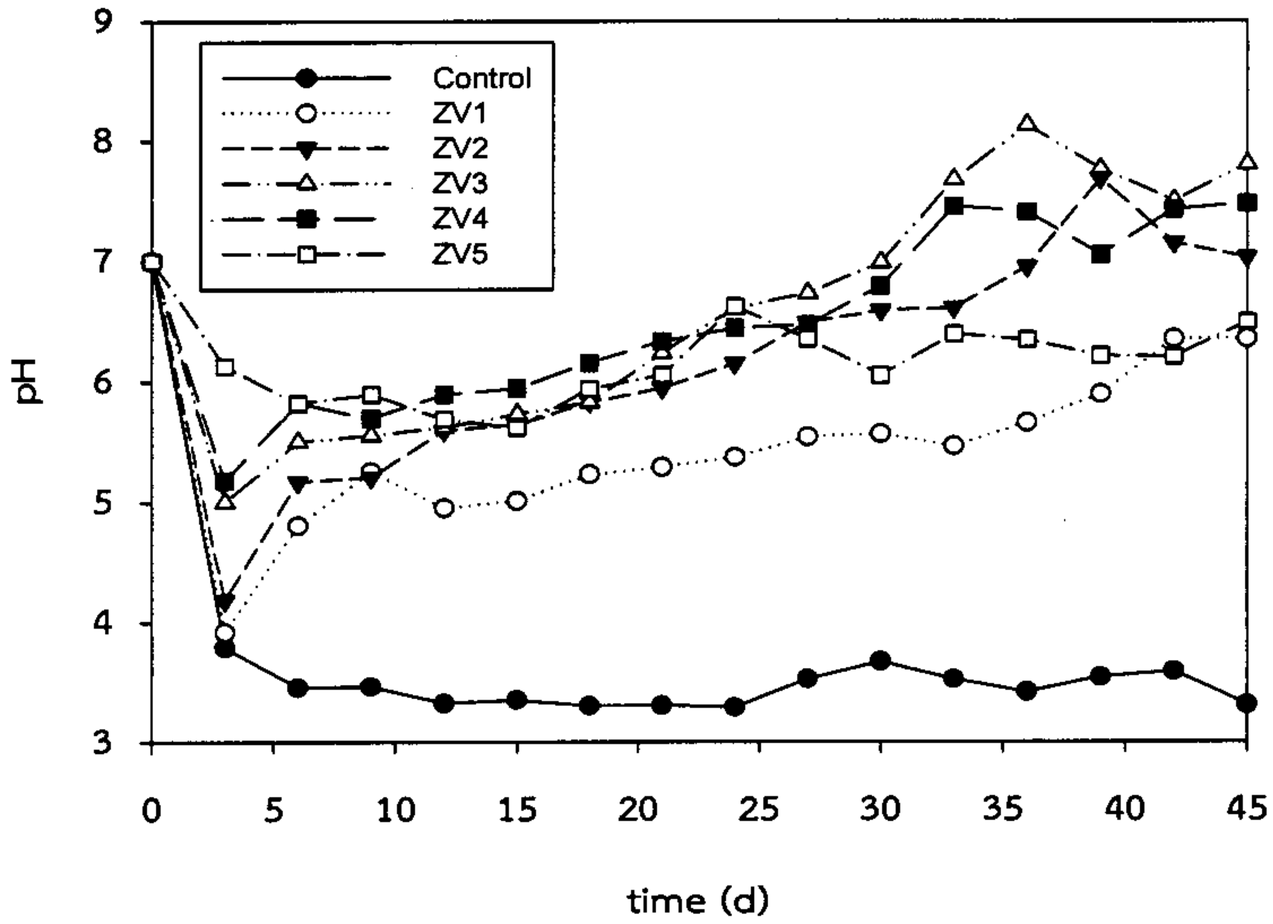
2.2 ผลของการใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นบัฟเฟอร์

ผลการทดลองพบว่า ทรีตเมนต์ที่ไม่มีการเติมเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ลงในกระบวนการหมัก (Control) มีปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมต่ำที่สุดเพียง 63 mL (ภาพที่ 2.5) ในขณะที่การเติมเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในกระบวนการหมัก ส่งผลให้เกิดการผลิตแก๊สมีเทนที่สูงกว่าทรีตเมนต์ควบคุมอย่างเห็นได้ชัด โดยในช่วงแรกของกระบวนการหมักนั้น สับสเตรทส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยง่ายก่อน จึงมีอัตราการเกิดแก๊สมีเทนต่ำ จากนั้นเมื่อกรดไขมันระเหยง่ายถูกเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทนโดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน จึงส่งผลให้อัตราการผลิตมีเทนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วันที่ 15 ไปจนสิ้นสุดกระบวนการหมัก โดยความเข้มข้นของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้การผลิตแก๊สมีเทนแตกต่างกัน กล่าวคือ เมื่อใช้อัตราส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อเศษอาหาร 0.5:1 (ZV-1) พบว่า ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมเพิ่มขึ้นเป็น 1,143 mL ซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อเศษอาหารเป็น 1:1 (ZV-2) และ 1.5:1 (ZV-3) พบว่า ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมมีค่าสูงขึ้นตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อเศษอาหารขึ้นเป็น 3:1 (ZV-4) และ 5:1 (ZV-5) พบว่าปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมมีค่าลดลงตามลำดับ ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า อัตราส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อเศษอาหารเท่ากับ 1.5:1 (ZV-3) เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งให้ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมสูงที่สุดเท่ากับ 5,081 mL



ภาพที่ 2.5 ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมเมื่อใช้อัตราส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อเศษอาหารที่แตกต่างกัน

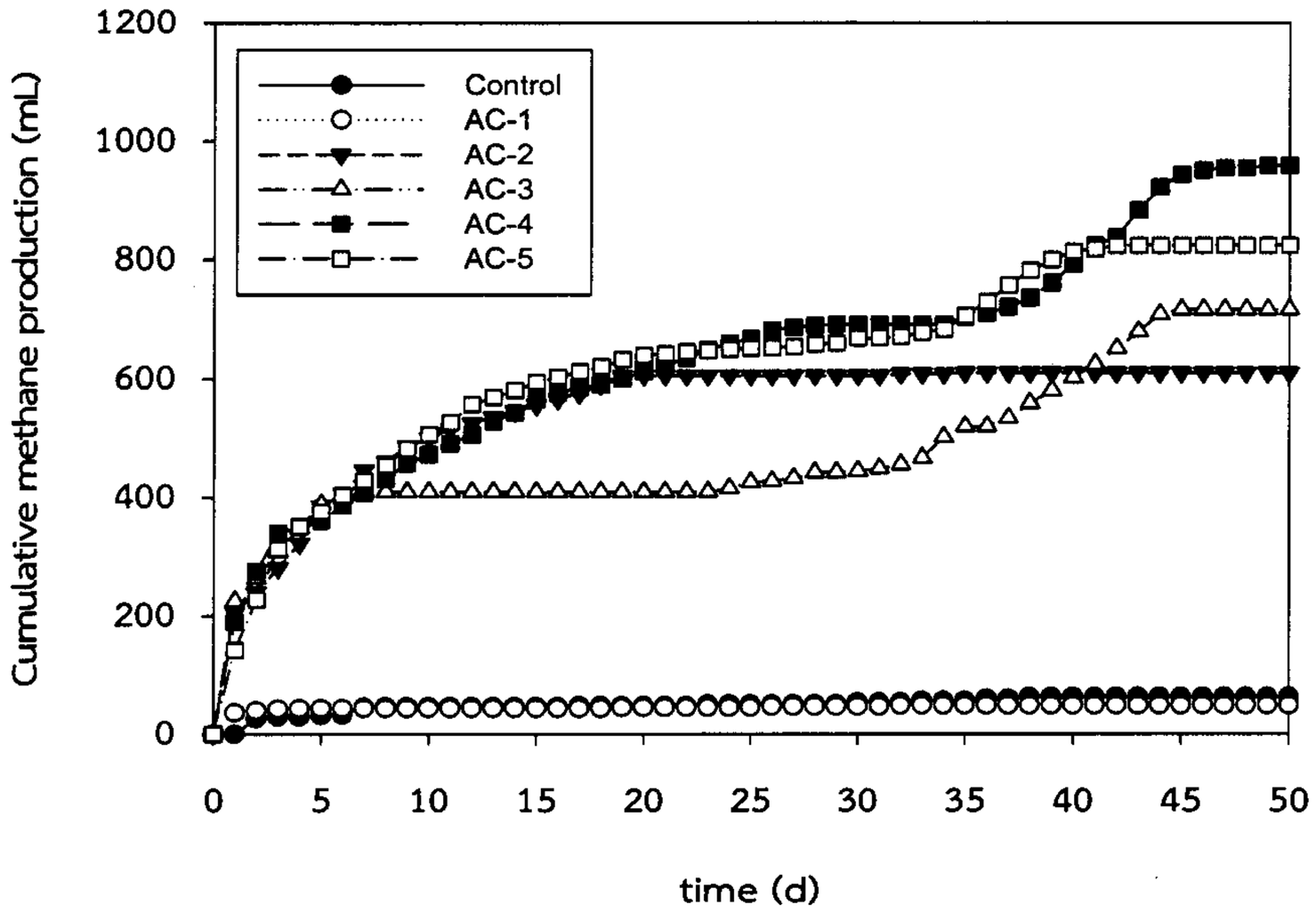
เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ส่งผลต่อค่า pH อย่างมีนัยสำคัญ โดยจะเห็นได้ว่า ทรีตเมนต์ควบคุมที่ไม่มีการเติมเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ มีค่า pH ลดลงต่ำกว่า 4 ตั้งแต่วันที่ 3 ของการหมัก และมีค่าอยู่ในช่วง 3.29-3.67 จนสิ้นสุดการหมัก (ภาพที่ 2.6) ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่เหมาะสมต่อกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ส่วนทรีตเมนต์ที่มีการเติมเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ พบว่า ในช่วงแรกของกระบวนการหมัก ค่า pH ของทุกทรีตเมนต์ลดต่ำลง โดยเฉพาะทรีตเมนต์ที่เติมเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในอัตราส่วนต่ำ (ZV-1 และ ZV-2) แต่เมื่อเข้าสู่วันที่ 6 ของการหมัก ค่า pH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเมื่อสิ้นสุดการหมัก พบว่าค่า pH ของทรีตเมนต์ที่มีการใช้อัตราส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อเศษอาหาร ตั้งแต่ 1:1 จนถึง 5:1 มีค่าอยู่ในช่วง 6.5-7.8 ซึ่งใกล้เคียงกับช่วงที่เหมาะสมของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ แต่ทั้งนี้ ค่า pH ของกระบวนการหมักไม่ได้สอดคล้องกับประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนเสมอไป ดังจะเห็นได้จากทรีตเมนต์ ZV-2 และ ZV-4 ซึ่งมีค่า pH ใกล้เคียง 7 มากกว่าทรีตเมนต์ ZV-3 (ภาพที่ 2.6) แต่มีปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมต่ำกว่า (ภาพที่ 3) เนื่องจากค่า pH ของกระบวนการหมักไม่ได้มีปัจจัยมาจากบัฟเฟอร์ที่เติมลงไปในระบบเท่านั้น แต่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายเพื่อเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทนด้วย ซึ่งเมื่อกรดไขมันระเหยง่ายถูกย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทนได้มาก จึงส่งผลทำให้ค่า pH เพิ่มสูงขึ้นด้วย ดังนั้น แม้ว่าทรีตเมนต์ ZV-3 จะมีค่า pH ที่สูงถึง 7.8 แต่มีปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมสูงที่สุด



ภาพที่ 2.6 ค่า pH ของกระบวนการหมักเมื่อใช้อัตราส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อเศษอาหารที่แตกต่างกัน

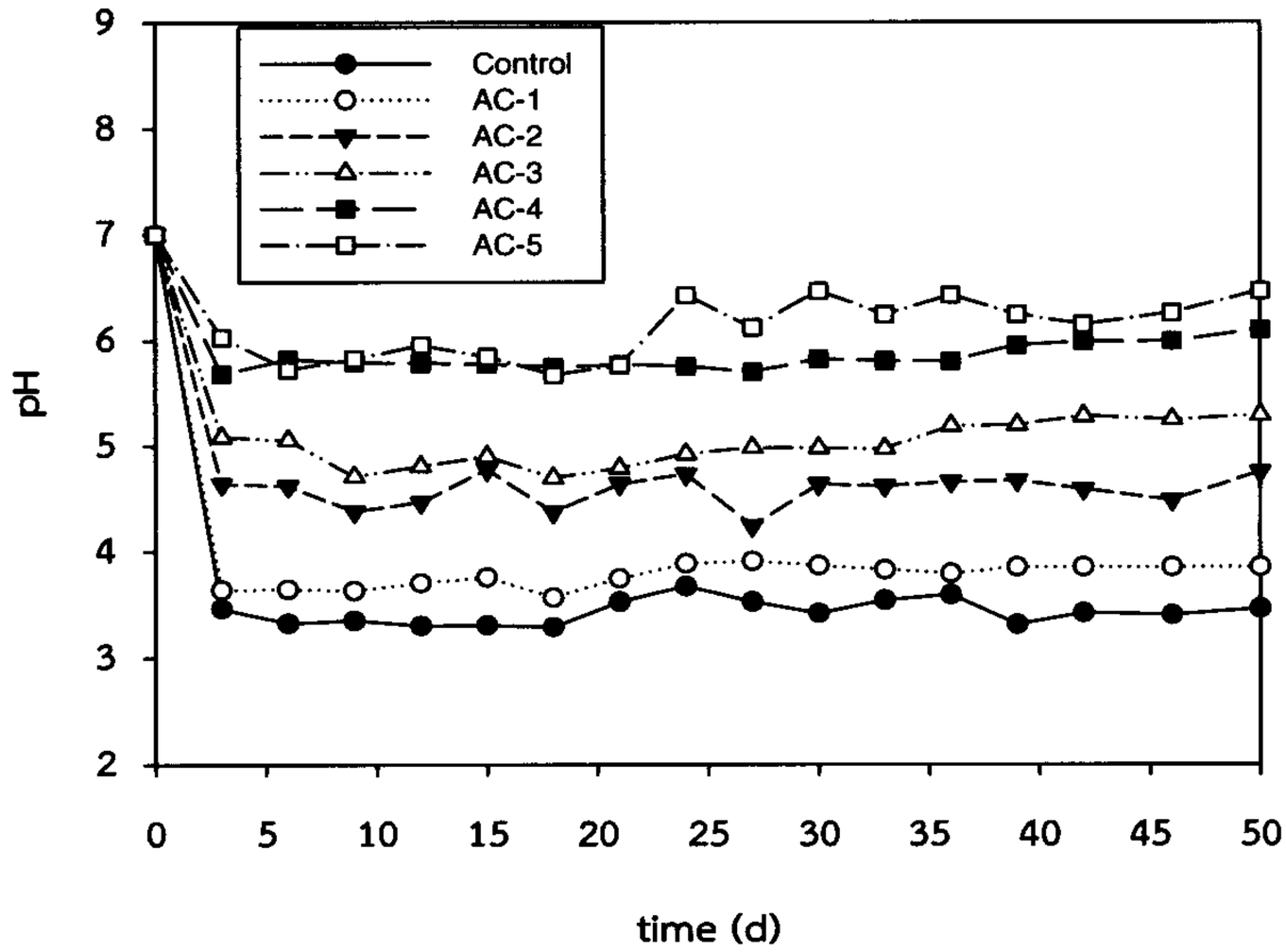
2.3 ผลของการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นบัฟเฟอร์

ผลการทดลองพบว่า ทรีตเมนต์ที่ไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์ลงในกระบวนการหมัก (Control) มีปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมต่ำที่สุด (ภาพที่ 2.7) ในขณะที่การเติมถ่านกัมมันต์ในกระบวนการหมักในอัตราส่วน 0.5:1 (AC-1) ไม่มีความแตกต่างกันกับทรีตเมนต์ที่ไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารขึ้นเป็น 1:1 (AC-2) ส่งผลให้เกิดการผลิตแก๊สมีเทนที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารให้สูงขึ้นจาก 1:1 เป็น 1.5:1 (AC-3) และ 3:1 (AC-4) ส่งผลให้ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมเพิ่มสูงขึ้นเป็น 716 และ 959 mL ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารให้สูงขึ้นเป็น 5:1 (AC-5) พบว่า ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมมีค่าลดต่ำลง ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วนของถ่านกัมมมันต์ต่อเศษอาหารเท่ากับ 3:1 (AC-4) เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งให้ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมสูงที่สุดเท่ากับ 959 mL



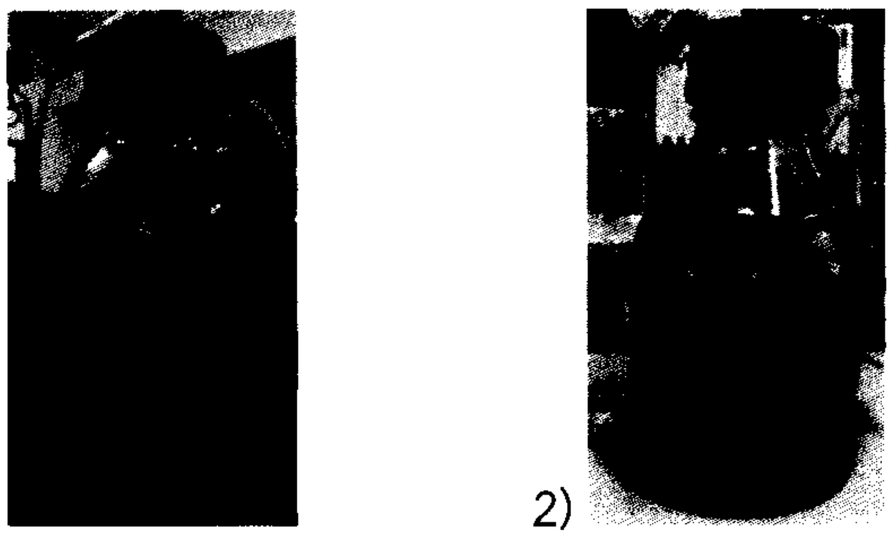
ภาพที่ 2.7 ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมเมื่อใช้อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารที่แตกต่างกัน

อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหาร ส่งผลต่อค่า pH อย่างมีนัยสำคัญ โดยจะเห็นได้ว่า ทรีตเมนต์ควบคุมที่ไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์มีค่า pH ลดต่ำลงกว่า 4 ตั้งแต่วันที่ 3 ของการหมัก และมีค่าอยู่ในช่วง 3.4-3.6 จนสิ้นสุดการหมัก (ภาพที่ 2.8) ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักแบบไร้อากาศล้มเหลว เช่นเดียวกับทรีตเมนต์ที่มีการเติมถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วน 0.5:1 ส่วนทรีตเมนต์ที่มีการเติมถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วน 1:1 และ 1.5:1 พบว่า ค่า pH ของกระบวนการหมักลดลงมาอยู่ในช่วง 4.6-5.2 ซึ่งยังคงอยู่ในช่วงที่เป็นกรด แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนดังกล่าว ยังไม่เพียงพอต่อการรักษาระดับ pH ให้ใกล้เคียงกับค่าที่เป็นกลาง แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารขึ้นเป็น 3:1 และ 5:1 พบว่าสามารถรักษาระดับ pH ของกระบวนการหมักให้อยู่ในช่วง 5.9-6.4 ซึ่งเมื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเติมถ่านกัมมันต์กับค่า pH สุดท้ายของกระบวนการหมักแล้ว จะเห็นได้ว่าค่า pH ของกระบวนการหมักจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ที่เติมลงไป



ภาพที่ 2.8 ค่า pH ของกระบวนการหมักเมื่อใช้อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารที่แตกต่างกัน

จากการสังเกตลักษณะทางกายภาพของน้ำหมักจากกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหารโดยมีการเติมถ่านกัมมันต์ลงไปในกระบวนการหมัก พบว่า สีของน้ำหมักมีลักษณะค่อนข้างใส (ภาพที่ 2.9) และไม่มีกลิ่นเหม็น ซึ่งเมื่อเทียบกับลักษณะทางกายภาพของน้ำหมักจากทรีทเมนต์ควบคุมแล้ว พบว่าน้ำหมักมีสีเหลืองอ่อนและมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวอย่างรุนแรง



ภาพที่ 2.9 ลักษณะทางกายภาพของน้ำหมักจากกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหาร
1) ทรีทเมนต์ที่มีการเติมถ่านกัมมันต์ลงไปในกระบวนการหมัก
2) ทรีทเมนต์ควบคุม

อภิปรายผลการวิจัย

ชนิดและความเข้มข้นของบัฟเฟอร์เป็นปัจจัยสำคัญต่อค่า pH และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหาร จากผลการวิจัยพบว่า กระบวนการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหารที่ระดับความเข้มข้นสูงโดยไม่มีการใช้บัฟเฟอร์ ส่งผลให้กระบวนการหมักล้มเหลวลง เนื่องจากเศษอาหารเป็นสับสเตรทที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์โบไฮเดรต จึงสามารถถูกย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยง่าย (VFAs) สะสมอยู่ในกระบวนการหมักได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ค่า pH ลดต่ำลงมากจนส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Zhao et al., 2008) ในขณะที่การใช้บัฟเฟอร์ ช่วยรักษาระดับ pH ของกระบวนการหมักได้ โดยเมื่อดูจากค่า pH ของกระบวนการหมักแล้ว จะเห็นได้ว่า $NaHCO_3$ เป็นบัฟเฟอร์ที่มีประสิทธิภาพในการรักษาระดับ pH ให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลางได้ดีกว่า $CaCO_3$ ซึ่งความเข้มข้นของ $NaHCO_3$ ที่เหมาะสมเท่ากับ 9 g/L ให้ปริมาตรมีเทนสะสม ค่าผลได้ของมีเทน และค่าพลังงานของมีเทนสูงที่สุด แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ $NaHCO_3$ ให้สูงกว่า 9 g/L พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตมีเทนมีค่าลดลง แม้ว่าทรีตเมนต์ดังกล่าวจะสามารถรักษาระดับของ pH ให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลางตลอดระยะเวลาการหมักได้ เนื่องจากการใช้ $NaHCO_3$ ที่ระดับความเข้มข้นสูงเกินไป ประจุโซเดียม (Na^+) ที่แตกตัวออกมาจากบัฟเฟอร์ในปริมาณสูงจะเกิดความเป็นพิษต่อเซลล์จุลินทรีย์ได้ (Gao et al., 2015) โดยที่ Chen et al. (2008) ได้รายงานไว้ว่า ระดับความเข้มข้นของประจุ Na^+ ที่สูงเกินไป จะส่งผลยับยั้งต่อกระบวนการเปลี่ยนกรดโพรพิโอนิกไปเป็นกรดอะซิติกให้เกิดได้ยากขึ้น ทำให้เกิดการสะสมของกรดโพรพิโอนิกในน้ำหมัก และส่งผลกระทบโดยตรงต่อการผลิตแก๊สมีเทน ซึ่งความเข้มข้นของประจุ Na^+ ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศควรอยู่ในช่วง 230-350 mg/L จึงจะเป็นช่วงที่เหมาะสม และส่งผลดีต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Kugelman & Chin, 1971; Patel & Roth, 1977)

ผลของการใช้ $CaCO_3$ เป็นบัฟเฟอร์ในกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหาร พบว่า ระดับ pH ของน้ำหมักเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักอยู่ในช่วง 6.6-6.7 ซึ่งแม้ว่าระดับ pH ของน้ำหมักจะมีค่าต่ำกว่าการใช้ $NaHCO_3$ เป็นบัฟเฟอร์ แต่ยังจัดว่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ คือประมาณ 6.5-7.2 (Appels et al., 2011; Zhao et al., 2008) และเมื่อดูจากประสิทธิภาพในการผลิตมีเทนของทรีตเมนต์ที่ใช้ $CaCO_3$ เป็นบัฟเฟอร์แล้ว พบว่ามีค่าสูงกว่าทรีตเมนต์ที่ใช้ $NaHCO_3$ เป็นบัฟเฟอร์ โดยที่การเพิ่มความเข้มข้นของ $CaCO_3$ ส่งผลให้การผลิตมีเทนมีค่าสูงขึ้นด้วย ซึ่งความเข้มข้นของ $CaCO_3$ เท่ากับ 27 g/L ให้ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสม ค่าผลได้ของมีเทน และค่าพลังงานของมีเทนสูงที่สุด เท่ากับ 1,004 mL, 111 mL/g-VS และ 4.02 kJ/g-VS ตามลำดับ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของประจุแคลเซียม (Ca^+) ในน้ำหมักส่งผลกระทบทางลบต่อกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนน้อยกว่าประจุ Na^+ โดยที่ Jackson-Moss et al. (1989) ได้รายงานว่าประจุ Ca^+ที่ระดับความเข้มข้นถึง 7,000 mg/L ไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ในขณะที่ Kugelman & McCarty (1964) ได้รายงานว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมของประจุ Ca^+ ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศคือ 200 mg/L ซึ่งความเข้มข้นที่ระดับ 2,500-4,000 mg/L ส่งผลกระทบเล็กน้อยต่อการผลิตมีเทน

และที่ระดับความเข้มข้น 8,000 mg/L จึงจะมีผลกระทบที่ชัดเจนต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน โดยผลกระทบทางลบของประจุ Ca^{+} ที่มีต่อกระบวนการหมักแบบไร้อากาศที่สามารถเห็นได้ชัดเจนนั้น ส่วนใหญ่จะเป็นเรื่องของการตกตะกอนจับตัวเป็นหินปูนและอุดตันระบบบำบัดน้ำเสีย (van Langerak et al., 1998) นอกจากนี้ Yu et al. (2001) ได้รายงานไว้ว่า ความเข้มข้นของประจุ Ca^{+} ในช่วง 100-200 mg/L ช่วยส่งเสริมกระบวนการฟอร์มตัวของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศได้

การใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นบัฟเฟอร์ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ จึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สมีเทนให้สูงขึ้นได้ เนื่องจากเหล็กวาเลนซ์ศูนย์มีคุณสมบัติในการเป็นบัฟเฟอร์ที่ดี โดยจะช่วยดักจับประจุไฮโดรเจนอิออน (H^{+}) ที่เกิดจาก VFAs จากกระบวนการหมัก จึงเป็นการควบคุมค่า pH ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด โดยประจุ H^{+} ที่จับกับเหล็กวาเลนซ์ศูนย์จะเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจน ดังแสดงในสมการที่ 2.4 จากนั้นแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น จะถูกแบคทีเรียในกลุ่ม hydrogenotrophic methanogens นำไปใช้ในการผลิตเป็นแก๊สมีเทน ดังแสดงในสมการที่ 2.5 ซึ่งสามารถรวมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ตามสมการที่ 2.6

$$ZVI + H^{+} \longrightarrow Fe^{2+} + H_2 \quad (2.4)$$

$$CO_2 + H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O \quad (2.5)$$

$$ZVI + H^{+} + CO_2 \longrightarrow Fe^{2+} + CH_4 + H_2O \quad (2.6)$$

นอกจากนี้ เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ยังมีส่วนช่วยในการลดค่าศักยภาพในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน (oxidation-reduction potential; ORP) โดยที่ค่า ORP เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดปัจจัยหนึ่งของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งโดยปกติแล้วค่า ORP ที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนควรมีค่าอยู่ในช่วง -350 mV หรือต่ำกว่า (Khanal & Huang, 2003) จึงจะแสดงถึงสภาวะไร้อากาศอย่างสมบูรณ์ (Strictly anaerobic condition) โดยที่ตัวของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เองนั้น มีค่าศักยภาพในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนอยู่ที่ -440 mV (Xiao et al., 2013) จึงทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ที่มีประสิทธิภาพ และสามารถจับกับตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agents) เช่น ออกซิเจน ที่อยู่ในกระบวนการหมักได้ ส่งผลให้ค่า ORP ลดต่ำลง และส่งผลดีต่อกระบวนการสร้างแก๊สมีเทน

แต่อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นหรืออัตราการใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นบัฟเฟอร์ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทน โดยในงานวิจัยนี้พบว่าอัตราส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อเศษอาหารที่เหมาะสมที่สุดคือ 1.5:1 หรือคิดเป็นความเข้มข้นของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เท่ากับ 45 g/L แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ให้สูงขึ้น พบว่าปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมและค่าผลได้ของมีเทนมีค่าลดลง โดยเฉพาะการใช้อัตราส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อเศษอาหารที่ระดับ 5:1

หรือคิดเป็นความเข้มข้นของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เท่ากับ 150 g/L ส่งผลให้ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมลดลงกว่า 69% เมื่อเทียบกับทรีตเมนต์ที่เหมาะสมที่สุด แสดงให้เห็นว่า การใช้ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในระดับที่สูงเกินไป ส่งผลเสียต่อกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตมีเทนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wu et al. (2015) ที่ได้ศึกษาผลของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ความเข้มข้นระดับต่างๆ ในกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนจากน้ำเสียฟาร์มสุกร โดยแปรผันความเข้มข้นของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ระดับ 3, 7, 15, 25 และ 50 g/L ผลการวิจัยพบว่า การใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ระดับ 25 g/L เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด และมีปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมสูงที่สุด ซึ่งผลที่ได้มีความแตกต่างจากงานวิจัยนี้ เนื่องจากงานวิจัยของ Wu et al. (2015) ใช้น้ำเสียฟาร์มสุกรเป็นสับสเตรท และโดยปกติแล้วมูลสุกรและมูลสัตว์ชนิดต่างๆ จะมีคุณสมบัติการเป็นบัฟเฟอร์ในตัว (Mata-Alvarez et al., 2014) ดังนั้น งานวิจัยของ Wu et al. (2015) จึงใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ความเข้มข้นเพียง 25 g/L ก็เพียงพอต่อการรักษาระดับพีเอชของกระบวนการหมักได้ ในขณะที่การใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่ระดับความเข้มข้น 50 g/L ส่งผลให้ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสมมีค่าลดลง เนื่องจากปฏิกิริยารีดิวซ์ของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก จะก่อให้เกิดประจุ Fe^{2+} (สมการที่ 2.4) ที่สามารถรวมตัวกับสารประกอบในกลุ่มไฮดรอกซิล และออกซิเจนที่ละลายในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบคอลลอยด์ได้หลายชนิด เช่น $Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$, $Fe(H_2O)_x^{2+}$ และ $Fe(H_2O)_x^{3+}$ (Noubactep, 2008) และยังสามารถเกิดเป็นออกไซด์ของเหล็ก เช่น FeOOH และ Fe_3O_4 (Zhu et al., 2014) ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ หากมีอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างเซลล์แบคทีเรียได้ แต่หากมีอยู่ในปริมาณที่มากเกินไป อาจส่งผลให้เกิดเป็นตะกอนจับอยู่บริเวณผนังเซลล์แบคทีเรีย และส่งผลให้เซลล์ถูกทำลายได้ (Watanabe et al., 2013)

ดังนั้น การใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นบัฟเฟอร์ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ จึงควรมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในด้านความเข้มข้นที่เหมาะสมกับสับสเตรทชนิดต่างๆ ด้านสภาวะที่ใช้ในการหมัก และด้านความแตกต่างของหัวเชื้อแบคทีเรียที่นำมาใช้ รวมถึงกระบวนการแยกเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ออกจากน้ำทิ้งของกระบวนการหมัก เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ทรีทเมนต์ที่ไม่มีการใช้ถ่านกัมมันต์ (Control) และที่ใช้ถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วน 0.5:1 พบว่า ค่า pH ลดต่ำลงถึงระดับ 3.4-3.6 (ภาพที่ 2.8) ส่งผลให้กระบวนการหมักล้มเหลว ในขณะที่การเพิ่มอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารให้สูงขึ้นเป็น 1:1, 1.5:1 และ 3:1 ช่วยรักษาระดับ pH ให้สูงขึ้นใกล้เคียงกับค่าที่เป็นกลาง และเพิ่มการผลิตแก๊สมีเทนให้สูงขึ้น ดังนั้น การใช้ถ่านกัมมันต์เป็นบัฟเฟอร์ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สมีเทนให้สูงขึ้นได้ เนื่องจากถ่านกัมมันต์จัดเป็นวัสดุคาร์บอนชนิดหนึ่งที่มีค่าความเป็นด่าง โดยในงานวิจัยนี้ ถ่านกัมมันต์มีค่า pH ประมาณ 8.18 จึงเป็นการเพิ่มค่าอัลคาไลนิตี้ (Alkalinity) ให้กับกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (Shen et al., 2015; Wang et al., 2017) แต่ทั้งนี้ ค่าอัลคาไลนิตี้ของถ่านกัมมันต์หรือถ่านชีวภาพขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในระหว่างกระบวนการไพโรไลซีส โดยการใช้

อุณหภูมิที่สูงขึ้น จะเป็นการเพิ่มค่าอัลคาไลนิตี้ของถ่านกัมมันต์หรือถ่านชีวภาพให้สูงขึ้นได้ (Zhang et al., 2018)

ในด้านของคุณภาพน้ำหมักจากกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหาร พบว่า ทรีตเมนต์ที่มีการใช้ถ่านกัมมันต์ในกระบวนการหมัก ลักษณะของน้ำหมักจะมีสีค่อนข้างใส และไม่มีกลิ่นเหม็น ทำให้น้ำทิ้งจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศที่มีการเติมถ่านกัมมันต์ ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับสภาพหลายขั้นตอนก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติ จึงส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติในการดูดซับที่ดี จึงช่วยดูดซับสีและกลิ่นของน้ำหมักได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งโดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์มีการนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อมได้หลายประการ เช่น ดูดซับกลิ่น ดูดซับโลหะหนัก ดูดซับสีในน้ำ (Menya et al., 2018)

อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหาร ซึ่งผลการวิจัยพบว่าการใช้อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารที่ระดับต่ำ (0.5:1) ไม่มีความแตกต่างกับทรีตเมนต์ที่ไม่ใช้ถ่านกัมมันต์ (Control) แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ให้สูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากคุณสมบัติด้านความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ ช่วยในการดูดซับ VFAs ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ และรักษาระดับ pH ของน้ำหมักให้เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด (Peng et al., 2018) โดยในงานวิจัยของ Zhang et al., (2019) ได้ศึกษาผลของการใช้ถ่านกัมมันต์ในกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหาร โดยใช้กระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง และแปรผันค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate; OLR) ผลการวิจัยพบว่า ในถังหมักที่มีการใช้ถ่านกัมมันต์มีอัตราการผลิตแก๊สมีเทนที่สูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่ม OLR โดยที่ถ่านกัมมันต์ช่วยรักษาระดับ pH ของกระบวนการหมักให้คงที่ได้ แต่เมื่อเทียบกับถังหมักที่ไม่มีการใช้ถ่านกัมมันต์แล้ว พบว่า pH ของน้ำหมักและอัตราการผลิตมีเทนมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่ม OLR ให้สูงขึ้น นอกจากนี้ คุณสมบัติในด้านการเป็นสื่อนำอิเล็กตรอนของถ่านกัมมันต์ยังช่วยส่งเสริมการทำงานของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศได้ เนื่องจากสารอินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ เมื่อถูกย่อยสลายในขั้นตอนแรกแล้วจะเกิดเป็น VFAs และสารประกอบชนิดอื่นๆ ที่หลากหลาย จุลินทรีย์ที่อยู่ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศจำเป็นต้องมีการทำงานร่วมกันเพื่อเปลี่ยน VFAs และสารประกอบเหล่านั้นให้กลายเป็นกรดอะซิติก ก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทน เรียกกระบวนการนี้ว่า Syntrophic metabolism โดยในกระบวนการนี้ จุลินทรีย์แต่ละชนิดจะมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนซึ่งกันและกันเพื่อเปลี่ยนสารประกอบเหล่านั้นให้เป็นกรดอะซิติก ซึ่งการใช้วัสดุคาร์บอนที่มีคุณสมบัติในการเป็นสื่อนำอิเล็กตรอน เช่น ถ่านกัมมันต์ หรือถ่านชีวภาพ ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ จึงเป็นการช่วยถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างเซลล์จุลินทรีย์แต่ละชนิด ส่งผลให้ VFAs ถูกเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก และแก๊สมีเทนได้รวดเร็วขึ้น (Yang et al., 2017) แต่อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะยังไม่มีรายงานผลกระทบทางลบที่ชัดเจนของการใช้ถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนที่สูงในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ แต่ในงานวิจัยนี้พบว่าการใช้ถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารที่อัตราส่วน 5:1 ส่งผลให้การผลิตแก๊สมีเทนมีค่าลดลง ถึงแม้ว่าจะช่วยรักษาระดับ pH ของกระบวนการหมักให้

ใกล้เคียงกับค่าที่เป็นกลางได้ก็ตาม ทั้งนี้คาดว่าเป็นเพราะการเติมถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนที่สูง ส่งผลให้ค่าของแข็งรวมของน้ำหมักมีค่าที่สูงขึ้น ทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนมวลสาร (Mass transfer rate) ระหว่างจุลินทรีย์กับสับสเตรทมีค่าที่ลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือน้ำหมักมีค่าความหนืดที่สูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการผสมกันระหว่างจุลินทรีย์กับสับสเตรทลดน้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตมีเทนต่ำลง ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของการใช้ถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนที่สูงในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ เพื่อให้สามารถนำถ่านกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้ได้อย่างเหมาะสมยิ่งขึ้น

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การผลิตมีเทนจากเศษอาหารที่ระดับความเข้มข้น 30 g-VS/L โดยไม่มีการใช้บัฟเฟอร์ควบคุมค่า pH ส่งผลให้กระบวนการหมักล้มเหลว เนื่องค่า pH ลดต่ำลงกว่า 4 จากการสะสมของ VFAs ในน้ำหมัก ในขณะที่การใช้บัฟเฟอร์ในกระบวนการหมัก ช่วยรักษาระดับ pH ของกระบวนการหมักให้เป็นกลาง และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนได้อย่างมีนัยสำคัญ แต่อย่างไรก็ตาม ชนิดและเข้มข้นของบัฟเฟอร์ เป็นปัจจัยสำคัญอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทน กล่าวคือ การใช้บัฟเฟอร์ชนิดสารเคมี ($NaHCO_3$ และ $CaCO_3$) ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตมีเทนได้น้อยที่สุด และมีข้อจำกัดด้านการใช้งานที่ระดับความเข้มข้นสูงๆ เนื่องจากความเข้มข้นของประจุ Na^+ และ Ca^+ ในน้ำหมัก ส่งผลยับยั้งโดยตรงต่อจุลินทรีย์กลุ่มผลิตมีเทน ซึ่งการใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นบัฟเฟอร์ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตมีเทนได้สูงที่สุด โดยอัตราส่วนของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ต่อเศษอาหารที่เหมาะสมคือ 1.5:1 ให้ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสม ค่าผลได้ของมีเทน และค่าพลังงานของมีเทนสูงที่สุด ในขณะที่การใช้ถ่านกัมมันต์เป็นบัฟเฟอร์ ในอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารที่เหมาะสมที่สุดคือ 3:1 เพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตมีเทนได้รองลงมา แต่เมื่อพิจารณาจากผลกระทบทางลบที่มีต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักแล้ว พบว่า ถ่านกัมมันต์ส่งผลกระทบทางลบน้อยที่สุด และยังช่วยในการดูดซับสีและกลิ่นของน้ำหมักได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้น้ำทิ้งจากกระบวนการหมักมีคุณภาพที่ดีขึ้นและส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม แต่ทั้งนี้ อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารที่เหมาะสม เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมถึงผลกระทบทางลบเมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนที่สูง เนื่องจากในงานวิจัยนี้พบว่า การใช้อัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารเท่ากับ 5:1 ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนลดลงกว่า 14% ทั้งนี้ คาดว่าการเติมถ่านกัมมันต์ลงไปในกระบวนการหมักในปริมาณมาก ไม่ได้ส่งผลกระทบทางลบต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักโดยตรง แต่ส่งผลให้ค่าของแข็งรวมของน้ำหมักมีค่าที่สูงขึ้น ทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนมวลสาร (Mass transfer rate) ระหว่างจุลินทรีย์กับสับสเตรทมีค่าที่ลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือน้ำหมักมีค่าความหนืดที่สูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการผสมกันระหว่างจุลินทรีย์กับสับสเตรทลดน้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตมีเทนต่ำลง ดังนั้น ถ่านกัมมันต์จึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมต่อการนำไป

ประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ และควรมีการวิจัยเชิงลึกเพิ่มเติมถึงอัตราส่วนที่เหมาะสม และผลกระทบต่างๆ ที่เกิดจากการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นบัฟเฟอร์

บรรณานุกรม

American Public Health Association. (1995). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19th ed. Washington D.C.: American Public Health Association.

Appels, L., Assche, A.V., Willems, K., Degrève, J., Impe, J.V., Dewil, R. (2011). Peracetic acid oxidation as an alternative pre-treatment for the anaerobic digestion of waste activated sludge. **Bioresource Technology, 102(5)**, 4124-4130.

Chen, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: a review. **Bioresource Technology, 99**, 4044-4064.

Feng, Y., Zhang, Y., Quan, X., Chen, S. (2014). Enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge digestion by the addition of zero valent iron. **Water Research, 52,** 242-250.

Gao, S., Huang, Y., Yang, L., Wang, H., Zhao, M., Xu, Z., Huang, Z., Ruan, W. (2015). Evaluation the anaerobic digestion performance of solid residual kitchen waste by $NaHCO_3$ buffering. **Energy Conversion and Management, 93**, 166-174.

Jackson-Moss, C.A., Duncan, J.R., Cooper, D.R. (1989). The effect of calcium on anaerobic digestion. **Biotechnology Letters, 11(3)**, 219-224.

Karri, S., Sierra-Alvarez, R., Field, J.A. (2005). Zero valent iron as an electron-donor for methanogenesis and sulfate reduction in anaerobic sludge. **Biotechnology and Bioengineering, 92**, 810-819.

Khanal, S.K., & Huang, J. (2003). ORP-based oxygenation for sulfide control in anaerobic treatment of high-sulfate wastewater. **Water Research, 37**, 2053-2062.

Kugelman, I.J., Chin, K.K. (1971). Toxicity, synergism, and antagonism in anaerobic waste treatment processes. **American Chemical Society Advances in Chemistry Series, 105**, 55-90.

Kugelman, I.J., McCarty, P.L. (1964). Cation toxicity and stimulation in anaerobic waste treatment. **Journal of the Water Pollution Control Federation, 37**, 97-116.

Lin, Y.C., Lu, F., Shao, L.M., He, P.J. (2013). Influence of bicarbonate buffer on the methanogenetic pathway during thermophilic anaerobic digestion. **Bioresource Technology, 137**, 245-253.

Lü, F., Luo, C., Shao, L., He, P. (2016). Biochar alleviates combined stress of ammonium and acids by firstly enriching *Methanosaeta* and then *Methanosarcina*. **Water Research, 90**, 34–43.

Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M., Fonoll, X., Pecesa, M., Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable & Sustainable Energy Reviews, 36**, 412–427.

Menya, E., Olupot, P.W., Storzc, H., Lubwamaa, M., Kiros, Y. (2018). Production and performance of activated carbon from rice husks for removal of natural organic matter from water: A review. **Chemical Engineering Research and Design, 129**, 271–296.

Mumme, J., Srocke, F., Heeg, K., Werner, M. (2014). Use of biochars in anaerobic digestion. **Bioresource Technology, 164**, 189-197.

Noubactep, C. (2008). A critical review on the process of contaminant removal in Fe0–H_2O systems. **Environmental Technology, 29**, 909–920.

Patel, G.B., Roth, L.A. (1977). Effect of sodium chloride on growth and methane production of methanogens. **Canadian Journal of Microbiology, 23**, 893-897.

Peng, H., Zhang, Y., Tan, D., Zhao, Z., Zhao, H., Quan, X. (2018). Roles of magnetite and granular activated carbon in improvement of anaerobic sludge digestion. **Bioresource Technology, 249**, 666-672.

Shen, Y., Linville, J.L., Urgun-Demirtas, M., Schoene, R.P., Snyder, S.W. (2015). Producing pipeline-quality biomethane via anaerobic digestion of sludge amended with corn stover biochar with in-situ CO_2 removal. **Applied Energy, 158**, 300-309.

van Langerak, E.P.A., Gonzales-Gil, G., van Aelst, A., van Lier, J.B., Hamelers, H.V.M., Lettinga, G. (1998). Effects of high calcium concentrations on the development of methanogenic sludge in upflow anaerobic sludge bed (UASB) reactors. **Water Research, 32(4)**, 1255-1263.

Wang, D., Ai, J., Shen, F., Yang, G., Zhang, Y., Deng, S., Zhang, J., Zeng, Y., Song, C. (2017). Improving anaerobic digestion of easy-acidification substrates by promoting buffering

capacity using biochar derived from vermicompost. **Bioresource Technology, 227**, 286-296.

Wang, G., Li, Q., Gao, X., Wang, X.C. (2018). Synergetic promotion of syntrophic methane production from anaerobic digestion of complex organic wastes by biochar: performance and associated mechanisms. **Bioresource Technology, 250**, 812-820.

Wang, Y., Zang, B., Gong, X., Liu, Y., Li, G. (2017). Effects of pH buffering agents on the anaerobic hydrolysis acidification stage of kitchen waste. **Waste Management, 68**, 603-609.

Watanabe, M., Yoneda, M., Morohashi, A., Hori, Y., Okamoto, D., Sato, A., Kurioka, D., Nittami, T., Hirokawa, Y., Shiraishi, T., Kawai, K., Kasai, H., & Totsuka, Y. (2013). Effects of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles on A549 cells. **International Journal of Molecular Sciences, 14**, 15546-15560.

Wu, D., Zheng, S., Ding, A., Sun, G., Yang, M. (2015). Performance of a zero valent iron-based anaerobic system in swine wastewater treatment. **Journal of Hazardous Materials, 286**, 1-6.

Xiao, X., Sheng, G.P., Mu, Y., Yu, H.Q. (2013). A modeling approach to describe ZVI-based anaerobic system. **Water Research, 47**, 6007-6013.

Yang, Y., Zhang, Y., Li, Z., Zhao, Z., Quan, X., Zhao, Z. (2017). Adding granular activated carbon into anaerobic sludge digestion to promote methane production and sludge decomposition. **Journal of Cleaner Production, 149**, 1101-1108.

Yu, H.Q., Tay, J.H., Fang, H.H.P. (2001). The roles of calcium in sludge granulation during UASB reactor start-up. **Water Research, 35(4)**, 1052-1060.

Zhang, J., Chua, Q.W., Mao, F., Zhang, L., He, Y., Tong, Y.W., Loh, K.C. (2019). Effects of activated carbon on anaerobic digestion - Methanogenic metabolism, mechanisms of antibiotics and antibiotic resistance genes removal. **Bioresource Technology Reports, 5**, 113-120.

Zhang, J., Zhao, W., Zhang, H., Wang, Z., Fan, C., Zang, L. (2018). Recent achievements in enhancing anaerobic digestion with carbon- based functional materials. **Bioresource Technology, 266**, 555-567.

Zhao, M.X., Yan, Q., Ruan, W.Q., Zou, H., Xu, Y. (2008). The influence of pH adjustment on biogas production from kitchen wastes by anaerobic fermentation. **Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 6(4)**, 45-49.

Zhao, Z., Li, Y., Quan, X., Zhang, Y. (2017). Towards engineering application: Potential mechanism for enhancing anaerobic digestion of complex organic waste with different types of conductive materials. **Water Research, 115**, 266-277.

Zhu, L., Gao, K., Jin, J., Lin, H., Xu, X. (2014). Analysis of ZVI corrosion products and their functions in the combined ZVI and anaerobic sludge system. **Environmental Science and Pollution Research, 21**, 12747-12756.

กรมควบคุมมลพิษ. (2561). (ร่าง) รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2560. สืบค้น 10 มกราคม 2561, จาก http://www.pcd.go.th/file/02-03-60.pdf

บทที่ 3

การออกแบบชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารสำหรับชุมชน 4.0

บทนำ

ปัจจุบันโลกประสบปัญหาวิกฤตด้านพลังงาน เพราะความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร และการขยายตัวทางเศรษฐกิจ ทั้งภาคเกษตรกรรม อุตสาหกรรม การขนส่ง และการท่องเที่ยว โดยพลังงานที่ใช้เกือบทั้งหมดได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิลและผลิตเองได้น้อยในประเทศ จึงมีการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศเพิ่มมากขึ้น ซึ่งคิดเป็นมูลค่ามหาศาล เช่น แก๊สธรรมชาติ ถ่านหิน และน้ำมัน (Kannika and et al., 2013) จึงเกิดความกังวลอย่างมากเกี่ยวกับความยั่งยืนทางด้านพลังงานในอนาคต จากรายงานสถิติพลังงานของประเทศไทยประจำปี 2555 โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน พบว่า ประเทศไทยมีการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายเพิ่มขึ้นทุกปี โดยในปี 2555 มีการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายมากกว่าปี 2554 อยู่ 3.9% ซึ่งโดยส่วนมากมาจากพลังงานเชิงพาณิชย์ ทางรัฐบาลจึงมีนโยบายส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนที่ผลิตได้ภายในประเทศ ประกอบด้วย พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ ชีวมวล แก๊สชีวภาพ ขยะ และเชื้อเพลิงชีวภาพ โดยการปรับปรุงแผนพัฒนาและส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทน 15 ปี เป็นแผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579 (แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579, 2558) ดังนั้นการผลักดันให้ใช้พลังงานทดแทนเพิ่มมากขึ้น จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

นอกจากนี้ การขยายตัวทางเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วทำให้พฤติกรรมการบริโภคของประชาชนในประเทศเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้เกิดปัญหาขยะมูลฝอยตามมาภายในประเทศ ในปี 2556 มีขยะมูลฝอยมีปริมาณมากถึง 26.77 ล้านตัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2557) ในปัจจุบันการกำจัดขยะมูลฝอยเป็นส่วนใหญ่ยังไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการ ก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของประชาชน อย่างไรก็ตาม ขยะชุมชนเหล่านี้มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นพลังงาน ดังนั้นการนำขยะมาเพิ่มมูลค่าเป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ เช่น ไฟฟ้า ความร้อน หรือเชื้อเพลิง จึงเป็นทางเลือกหนึ่ง ซึ่งนอกจากจะแก้ปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมได้แล้วยังช่วยแก้วิกฤตด้านพลังงานของประเทศได้อีกด้วย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างชุดต้นแบบเครื่องผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารแบบครบวงจร
2. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของชุดต้นแบบเครื่องผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารแบบครบวงจร

ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้จะทำการออกแบบและสร้างชุดต้นแบบเครื่องผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารแบบครบวงจร โดยเครื่องผลิตแก๊สชีวภาพนี้จะถูกออกแบบให้อยู่ภายในชุดเดียวกัน

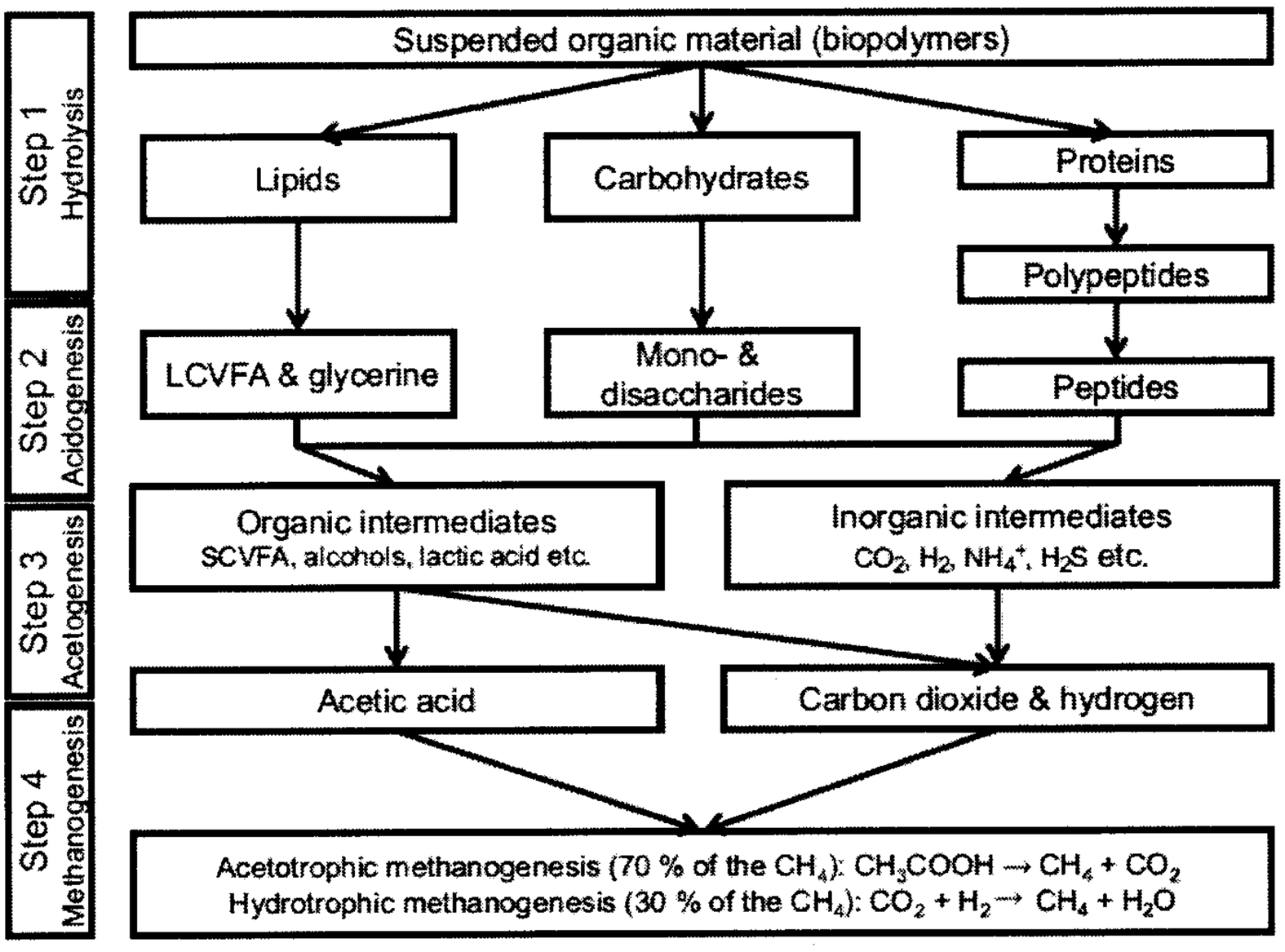
ทบทวนวรรณกรรม

แก๊สชีวภาพ (Biogas) หมายถึง แก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methane producing bacteria) โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กลง จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กเป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นแก๊สมีเทน (CH_4) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยมีแก๊สอื่นๆ เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือแก๊สไข่เน่า และแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น กระบวนการเกิดแก๊สชีวภาพต้องระวังไม่ให้อากาศเข้าไปสัมผัสกับแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนลดลง

แก๊สชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เมื่อมีแบคทีเรีย สารอินทรีย์ และอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมในสภาวะที่ไม่มีอากาศ ในธรรมชาตินั้นแก๊สชีวภาพมักจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการหมักเช่น ก้นบ่อ ก้นแม่น้ำ ก้นทะเลสาบ หนองน้ำ บึงและนาข้าวที่มีน้ำ นอกจากนี้วัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพยังเป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากวัชพืชบก วัชพืชน้ำ ตลอดจนวัสดุเหลือทางการเกษตรและมูลสัตว์ โดยมีแบคทีเรียที่เรียกว่า มีเทนแบคทีเรีย เป็นตัวการสำคัญในการผลิต ซึ่งกระบวนการเกิดแก๊สชีวภาพจะเกิดผ่านกระบวนการย่อยสลายในสภาวะไม่ใช้อากาศ (Anaerobic digestion) 4 ขั้นตอนดังแสดงในภาพที่ 3.1 ซึ่งในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศประกอบด้วยการย่อยสลายหลายขั้นตอนที่มีความซับซ้อน โดยการทำงานร่วมกันของแบคทีเรียหลายกลุ่ม แต่ละกลุ่มก็จะทำหน้าที่ต่างกันในแต่ละขั้นตอนของการย่อยสลาย เพื่อให้ได้แก๊สชีวภาพซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้

เนื่องจากแก๊สชีวภาพมีปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ผสมอยู่ด้วย จึงเป็นข้อจำกัดหนึ่งในการใช้งาน เนื่องจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่ไม่ติดไฟ ดังนั้นแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้จะต้องมีปริมาณของแก๊สมีเทนสูงพอที่จะนำไปใช้ประโยชน์ จากการค้นพบว่าแก๊สมีเทนจำนวน 1 ลูกบาศก์ฟุต จะให้ค่าความร้อนประมาณ 500-1,000 Btu (1 Btu= 1055.1 J) การใช้ประโยชน์จากแก๊สชีวภาพก็มีข้อจำกัดอยู่บ้าง เช่น บ่อหมักต้องอยู่ไม่ไกลจากสถานที่ที่ใช้งาน น้ำไม่ท่วมพื้นที่บ่อหมักและไม่สามารถอัดแก๊สมีเทนให้มีปริมาตรเล็กลงเพื่อการขนย้ายไปยังแหล่งต่างได้ๆ เนื่องจากแก๊สมีเทนมีค่าอุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature) ต่ำมาก และมีค่าความดันวิกฤต (Critical pressure) ต่ำมากเช่นกัน ดังนั้นการใช้แก๊สชีวภาพจึงจำกัดอยู่เฉพาะครัวเรือนเป็นส่วนใหญ่ เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้ม นอกจากจากนี้ยังได้มีการนำแก๊สชีวภาพไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า และใช้ในการสูบน้ำ

(ใช้กับเครื่องยนต์เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า) ผลิตเป็นแก๊สชีวภาพอัด (Compressed Bio Gas, CBG) หรือนำไปใช้แทนแก๊สแอลพีจี เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2556) ซึ่งจะทำให้ประหยัดค่าเชื้อเพลิง และค่ากระแสไฟฟ้า ของเสียหรือกากที่เหลือจากการย่อยสลายสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยให้กับดินได้ เป็นการลดมลภาวะที่เกิดขึ้นเนื่องจากของเสียทางการเกษตร รักษาสภาพแวดล้อม เช่น ลดปัญหาน้ำเสีย เป็นการนำเอาพลังงานที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและสูญเสียไปมาใช้ให้เกิดประโยชน์



ภาพที่ 3.1 แสดงขั้นตอนในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ (Madsen และคณะ, 2011)

แก๊สชีวภาพประกอบไปด้วยแก๊สหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นแก๊สมีเทนประมาณ 50-70% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 20-50% ส่วนที่เหลือเป็นแก๊สอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย (NH_3) และไอน้ำ (H_2O) นอกจากนั้นยังมีสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ เช่น ไซลอกเซน (Siloxane) โฟม คราบ (Scum) เมือก และตะกอน เป็นต้น บางครั้งอาจพบปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) สูงถึง 1% (10,000 part per million (ppm)) ในกรณีที่น้ำเสียนั้นมีองค์ประกอบของสารซัลเฟต (SO_4^{2-}) สูง (อนุตร, 2545) ดังแสดงในตารางที่ 3.1

มีเทนเป็นแก๊สที่ให้พลังงานหลัก ส่วนออกซิเจนและไนโตรเจนนั้น อาจจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีการเติมอากาศในท่อเพื่อกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ ขณะที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้น แม้จะให้พลังงานแต่ก็มีผลเสียต่อระบบการใช้งาน เพราะเมื่อไฮโดรเจนซัลไฟด์รวมกับน้ำหรือความชื้นก็จะมีฤทธิ์เป็นกรด เกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์ได้ นอกจากนั้น ความชื้นยังทำให้เกิดคราบตะกรัน เมือกหรือตะกอนจุลินทรีย์ที่อุปกรณ์ต่างๆ เช่น Safety valve ซึ่งมี

ผลต่อระบบความปลอดภัยของเครื่องจักร แก๊สชีวภาพที่มาจากขยะชุมชนจะมี Trace gas เช่น ไซลอกเซนเจือปนอยู่บ้าง ซึ่งไซลอกเซนจะทำให้เกิดคราบตะกรันซิลิกอน และเกิดการกัดกร่อนในเครื่องจักร เช่น ที่ลูกสูบของเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้เครื่องจักรเกิดความเสียหาย และเป็นอันตรายต่อการใช้งาน การผลิตแก๊สชีวภาพเป็นวิธีการหนึ่งในการผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวล ซึ่งเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ ในสภาวะที่ไม่มีแก๊สออกซิเจนโดยแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Anaerobic bacteria) ทำให้เกิดแก๊สชีวภาพ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นแก๊สมีเทน

ตารางที่ 3.1 แสดงองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์
มีเทน (CH_4)	55-70
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	35-45
โฮโดรเจน (H_2)	0-1
ไนโตรเจน (N_2)	0-1
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	0-1
ออกซิเจน (O_2)	0-1

หมายเหตุ: ในตารางนี้ยังไม่ได้รวมถึงสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ ที่มีในแก๊สชีวภาพ เช่น ไซลอกเซน โฟม คราบ และตะกอนต่างๆ เป็นต้น ซึ่งความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อนเหล่านี้ มากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียและการผลิตแก๊สชีวภาพ

มีเทน (Methane) เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนพวกอัลเคน (Alkane) มีสูตรเคมี คือ CH_4 เป็นแก๊สไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ติดไฟได้ ให้เปลวไฟสีชัด สว่างเรือง มีค่าพลังงาน 55.7 กิโลจูลต่อกรัม ไอเสียที่ได้จากการเผาไหม้มีเทนคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สธรรมชาติ มีอยู่ประมาณร้อยละ 75 นอกจากนี้ยังมีปรากฏอยู่ตามแหล่งต่างๆ ในธรรมชาติ เช่น ตามหนองน้ำ บึง คลอง หรือตามพื้นดินที่มีซากพืชซากสัตว์ทับถมเน่าเปื่อยอยู่ แบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศจะทำให้ซากพืชซากสัตว์ดังกล่าวย่อยสลายเกิดเป็นแก๊สมีเทน แก๊สมีเทนอาจได้มาจากการหมักมูลสัตว์หรือสารอินทรีย์ต่างๆ และนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงราคาถูก และอาจพบได้ในชั้นถ่านหิน (Coal bed methane) โดยจากกระบวนการเกิดถ่านหินทำให้แก๊สมีเทนสะสมตัวและกักเก็บอยู่ในช่องว่างในเนื้อถ่านหิน แก๊สมีเทนเป็นแก๊สเชื้อเพลิงสำคัญที่ใช้ในระบบอุตสาหกรรมและการขนส่ง ซึ่งจัดว่าเป็นเชื้อเพลิงที่ก่อมลพิษน้อยกว่าเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงถ่านหินและน้ำมัน

กระบวนการหมักแบบไร้อากาศเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้อากาศ (Anaerobic digestion) โดยกลุ่มจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ มีขั้นตอนในกระบวนการย่อยสลายแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

1) Hydrolysis

ขั้นตอน Hydrolysis หรือเรียกอีกอย่างว่ากระบวนการแตกสลายโพลิเมอร์ ในขั้นตอนนี้ สารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบซับซ้อนต่างๆ เช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต จะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายให้อยู่ในรูปสารประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโน กรดไขมัน น้ำตาล โดยเอนไซม์ที่ถูกขับออกมาจากเซลล์จุลินทรีย์ กระบวนการย่อยสลายในขั้นตอนนี้จัดว่าเป็นขั้นตอนสำคัญและถือเป็นข้อจำกัดของกระบวนการย่อยสลายที่จะเกิดในขั้นต่อไป (Henze และ Harremoes, 1983; van Haandel และ Lettinga, 1994; Appels และคณะ, 2008)

2) Acidogenesis

ในขั้นตอนนี้จะเข้าสู่กระบวนการหมัก (Fermentation) สารประกอบละลายน้ำได้จากการย่อยสลายในขั้นตอน Hydrolysis จะถูกแบคทีเรียกลุ่มที่เรียกว่า Fermentative หรือ Acidogenic bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มเดียวกับขั้นตอนที่หนึ่งใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงาน ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ซึ่งโมเลกุลจะมีอะตอมของคาร์บอนไม่เกิน 5 ตัว เช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดโพรพิออนิก (C_2H_5COOH) กรดบิวทีริก (C_3H_7COOH) เป็นต้น และสารอื่นๆ เช่น เอทานอล (C_2H_5OH) ไฮโดรเจน (H_2) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria)

3) Acetogenesis

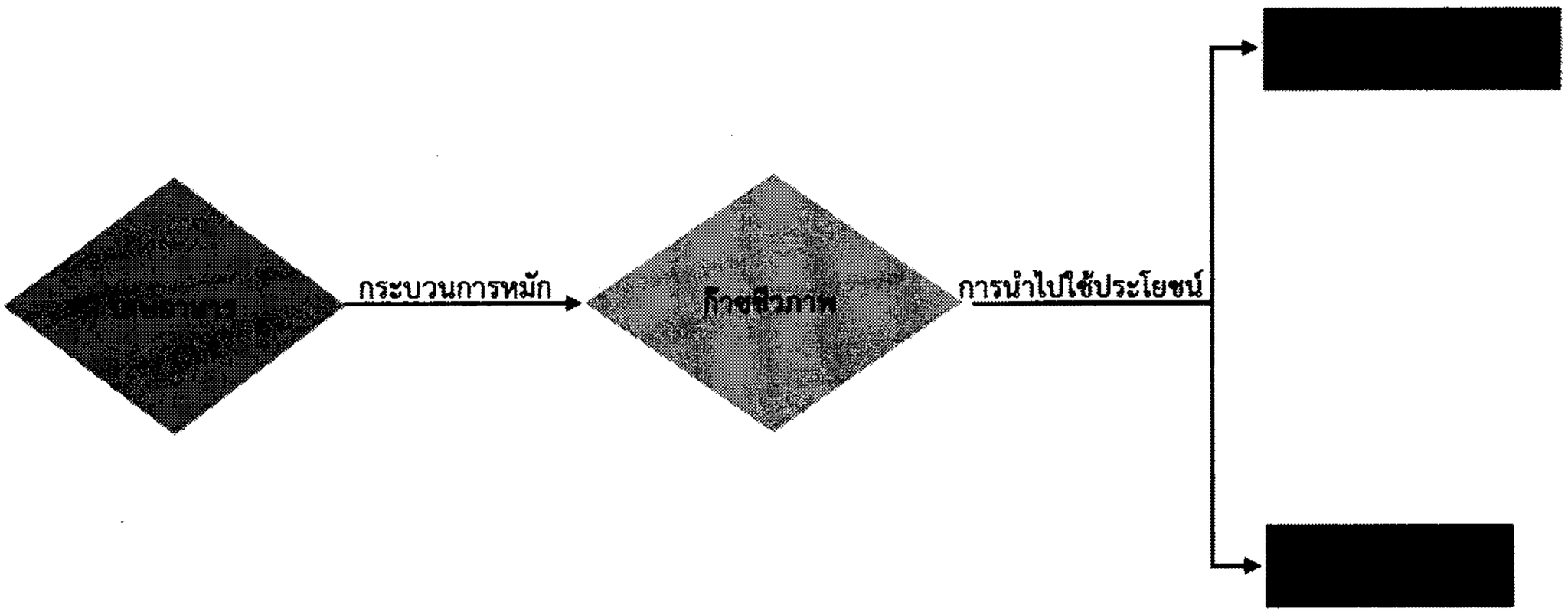
กรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่เกิดขึ้นในขั้นตอน Acidogenesis จะถูกแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตจีนิค (Acetogenic bacteria) เปลี่ยนให้เป็นกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบที่สำคัญในการผลิตมีเทน ปฏิกิริยานี้ถือเป็นปฏิกิริยาสำคัญในการหลีกเลี่ยงไม่ให้มีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงพอที่จะยับยั้งกระบวนการผลิตมีเทน ขั้นตอน acetogenesis ประกอบไปด้วยแบคทีเรียสองกลุ่มหลักคือ Hydrogen-producing acetogenic bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้กรดไขมันระเหยง่ายจากขั้นตอน Acidogenesis ในการสร้างกรดอะซิติก ทำให้ได้ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาเป็นผลพลอยได้ (By-product) ส่วนแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งที่ใช้ไฮโดรเจนและคาร์บอนได้ออกไซด์ในการสร้างกรดอะซิติก จะเรียกว่า Homoacetogens หรือเรียกอีกอย่างได้ว่า Hydrogen-consuming bacteria แบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดอาจรวมเรียกว่าเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ผลิตแก๊สมีเทน (Non-methanogenic bacteria)

4) Methanogenesis

กรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสับสเตรทที่สำคัญในขั้นตอนการผลิตมีเทน (Methanogenesis) ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ สารตั้งต้นที่มีความสำคัญมากที่สุดสำหรับขั้นตอนนี้คือ กรดอะซิติก โดยที่แก๊สมีเทนที่

ผลิตได้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของทั้งหมดจะมาจากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มที่เรียกว่า Acetotrophic methanogens ซึ่งจะใช้กรดอะซิติกเป็นสับสเตรทในการสร้างมีเทน ส่วนแก๊สมีเทนอีก 30 เปอร์เซ็นต์ที่เหลือจะมาจากการทำงานของแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งเรียกว่า Hydrogenotrophic methanogens ซึ่งจะใช้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสับสเตรทสำหรับการผลิตแก๊สมีเทน ในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้อากาศนี้ แบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมมาก และมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ ดังนั้นการเจริญเติบโตและปริมาณของแบคทีเรียกลุ่มนี้จึงเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ (Madsen และคณะ, 2011)

ชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารต้นแบบสำหรับชุมชนนี้จะถูกออกแบบตามหลักการทางด้านวิศวกรรม โดยชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารจะประกอบด้วยชุดบดปั่นเศษอาหาร ชุดหมักเศษอาหารและเก็บแก๊สชีวภาพ และชุดสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น พลังงานความร้อนหรือพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งถูกออกแบบให้อยู่ภายในเครื่องเดียวกัน ทำให้เคลื่อนย้ายได้ง่าย สะดวก และเหมาะสำหรับชุมชนในยุค 4.0 โดยกระบวนการทำงานแสดงในภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 ขั้นตอนการทำงานของชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารต้นแบบสำหรับชุมชน

จากการสำรวจงานวิจัยและงานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ทั้งในประเทศและต่างประเทศ พบว่ามีการใช้แก๊สชีวภาพดังต่อไปนี้

Kaewchung Utai และ Sutabutr Harit (1984) ได้ทำการศึกษาการนำแก๊สชีวภาพมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลเล็กที่ใช้ในงานเกษตรกรรม โดยใช้แก๊สชีวภาพที่มีปริมาณแก๊สมีเทน 63% ร่วมกับน้ำมันดีเซลกับเครื่องยนต์ดีเซลขนาดเล็ก ยี่ห้อยันมาร์ขนาด 7.4 Hp ทดสอบที่ความเร็วรอบคงที่ 2,200 rpm ให้โหลด

ปานกลาง พบว่าสามารถประหยัดน้ำมันดีเซลได้ 44% โดยไม่มีการน๊อก และหากมีการน๊อกเล็กน้อยจะประหยัดน้ำมันดีเซลได้ 86% ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์เดียวกัน

สมชาย พัฒนา และเอกรัฐ สมินทรปัญญา (2534) ได้ศึกษาการใช้แก๊สชีวภาพมาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์และเครื่องสูบน้ำ โดยใช้เครื่องยนต์ดีเซลและเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ซึ่งในเครื่องยนต์ดีเซลจะสามารถใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซล เมื่อเดินเครื่องยนต์แล้ว จะทำให้ประหยัดน้ำมันดีเซลได้ 10-64% ในเครื่องยนต์ที่มีห้องเผาไหม้แบบล่วงหน้า และสามารถประหยัดน้ำมันได้ 64-81% ในเครื่องยนต์ที่มีห้องเผาไหม้แบบฉีดตรง เมื่อใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันดีเซลจะทำให้กำลังของเครื่องยนต์มากกว่าการใช้น้ำมันดีเซลเป็นเชื้อเพลิงปกติประมาณ 10% ที่ความเร็วรอบของเครื่องยนต์เดียวกัน ในส่วนของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนจะสามารถใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงได้โดยไม่ต้องใช้น้ำมันแก๊สโซลีนเป็นเชื้อเพลิงร่วมด้วย และการใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงร่วมกับน้ำมันแก๊สโซลีนจะทำให้กำลังของเครื่องยนต์ลดลงประมาณ 13% เมื่อใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนจะทำให้เครื่องยนต์สามารถทำงานได้ที่ความเร็วรอบในช่วงแคบๆ ซึ่งเครื่องยนต์จะให้กำลังน้อยกว่าการใช้น้ำมันแก๊สโซลีนเป็นเชื้อเพลิงปกติ แต่ว่าเมื่อใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงแล้ว เครื่องยนต์สามารถเผาไหม้ได้สมบูรณ์โดยไม่สามารถตรวจพบว่ามีปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ในแก๊สไอเสียเลย ในขณะที่ใช้น้ำมันแก๊สโซลีนเป็นเชื้อเพลิงทำให้เกิด CO ถึง 3-11.5%

กฤษฎา กิ้มเส้ง และ พิชัย อัมระนันท์ (2535) ได้ศึกษาระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมจากเครื่องยนต์ใช้แก๊สชีวภาพ โดยใช้เครื่องยนต์แก๊สโซลีนผลิตกระแสไฟฟ้า 20 kW ทำการทดสอบที่ความเร็วรอบ 1,750 2,000 2,250 2,500 และ 2,750 rpm พบว่าถ้าไม่มีการดึงความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์มาใช้ประสิทธิภาพจะอยู่ระหว่าง 20-30% แต่ถ้ามีการดึงความร้อนจากไอเสียเครื่องยนต์มาใช้ โดยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อผลิตน้ำร้อน ประสิทธิภาพรวมจะอยู่ระหว่าง 24-43% และมีอัตราผลตอบแทน (IRR) เมื่อมีการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ความเร็วรอบ 1,750 2,000 2,250 2,500 และ 2,750 rpm เป็น 56.4 52.4 52.8 55.4 และ 57.2% ตามลำดับ โดยมีระยะคือทุนเป็น 1.94 1.91 1.83 และ 1.78 ปี ตามลำดับ

ศูนย์อนุรักษ์ช้างไทย (2542) ได้นำแก๊สชีวภาพจากบ่อหมักมูลช้างมาเป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์แก๊สโซลีนดัดแปลงใช้ขับปั๊มน้ำ และเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อใช้ในศูนย์อนุรักษ์ช้างไทย อ.ห้างฉัตร จ.ลำปาง แก๊สชีวภาพมีปริมาณ CH_4 ประมาณ 55% โดยใช้กับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน 4 สูบ ขนาดปริมาตรความจุกระบอกสูบ 1,166 cc มีกำลังเครื่องยนต์ระบุ 73 Hp ที่ความเร็ว 6,000 rpm ต่อเข้ากับปั๊มน้ำแบบแรงเหวี่ยงมี Static head 21.5 m สามารถสูบน้ำได้วันละ 21.54 m^3 และใช้กับเครื่องยนต์แก๊สโซลีน ขนาด 1,800 cc มีกำลังเครื่องยนต์ระบุ 97 Hp เพื่อขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า 1 เฟส 220 V ความถี่อยู่ระหว่าง 48-52 Hz จ่ายกระแสไฟฟ้าสายส่งรวมเป็นระยะทาง 1,590 m ให้กับหลอดไฟฟ้าฟลูออเรสเซนต์เพื่อส่องสว่างขนาด 18 W จำนวน 70 หลอด ภายในบ้านพักควาญช้าง และบ้านพักรับรอง คิดเป็นกำลังไฟฟ้า 1.347 kW เครื่องยนต์มีอัตราการสิ้นเปลืองแก๊สเฉลี่ย 5.387 m^3/hr

ปรีชา ศิริชาญ (2544) ได้ศึกษาการวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพ โดยใช้ Energy costing ทั้งกรณีรวมและไม่รวมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และประเมินค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้วิธี Numerical Environmental Total Standard (NETS) ร่วมกับ Externality cost การวิเคราะห์ใช้ฟาร์มสุกร 4 แห่ง ที่มีขนาดระบบแก๊สชีวภาพ 1,000-5,000 m^3 และมีขนาดระบบผลิตไฟฟ้า 37-138 kW พบว่า ต้นทุนราคาไฟฟ้าจะมีค่าลดลง หากฟาร์มสุกรมีอัตราส่วนขนาดระบบผลิตไฟฟ้าต่อระบบผลิตแก๊สชีวภาพและจำนวนชั่วโมงเดินเครื่องต่อวันมากขึ้น กรณีไม่รวมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ฟาร์มที่มีอัตราส่วนขนาดระบบผลิตไฟฟ้าต่อระบบผลิตแก๊สชีวภาพ 750 W/m^3 และเดินเครื่อง 24 hr/day จะมีค่าต้นทุนราคาไฟฟ้าสุดสุดเท่ากับ 3.62 Baht/kW-hr หรือ 1.005 Baht/MJ ส่วนกรณีที่มีการรวมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจาก CO_2 และ CH_4 ต้นทุนราคาค่าไฟฟ้าจะมีค่าลดลงอีก 0.30 Baht/kW-hr และเมื่อเปรียบเทียบกับโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนร่วมขนาด 422 kW ภายในโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีประสิทธิภาพระบบ 54% มีต้นทุนราคาไฟฟ้ากรณีไม่รวมผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเท่ากับ 1.35 Baht/kW-hr พบว่าระบบผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพต่ำกว่า 3.2 เท่า และมี ต้นทุนไฟฟ้าสูงกว่า 2.7 เท่า

สมบูรณ์ ศิริพรมงคลชัย (2546, 2550) ได้ศึกษาการปรับปรุงคาร์บูเรเตอร์สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้แก๊สชีวภาพ จากผลทดสอบการทำงานของชุดผลิตกระแสไฟฟ้าจากเครื่องยนต์แก๊สชีวภาพ ปรากฏว่าคาร์บูเรเตอร์ที่ออกแบบและสร้างขึ้นนี้ มีช่วงในการหมุนปรับที่ทำให้เครื่องยนต์ทำงานอยู่ได้มีช่วงกว้างถึง 25% ของระยะการเปิดทั้งหมดของเข็ม โดยการเปิดของเข็มควบคุมปริมาณแก๊สชีวภาพครั้งละ 1.6% ส่งผลให้ค่าอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (λ) เปลี่ยนไป 0.026 และ 0.031 ที่สภาวะการทำงาน 3,000 rpm และ 1,500 rpm ตามลำดับ โดยผลจากการเปลี่ยนแปลงระหว่างปริมาณเชื้อเพลิงกับพื้นที่หน้าตัดของนมหนูมีความสัมพันธ์กันในลักษณะเชิงเส้น ซึ่งส่งผลให้เกิดความง่ายในการปรับ เนื่องจากแต่เดิมมักจะใช้บอลวาล์วเป็นตัวปรับปริมาณแก๊สชีวภาพ ซึ่งบอลวาล์วนั้นจะมีช่วงในการหมุนปรับที่แคบมาก และจากการทดสอบกับเครื่องยนต์ที่สภาวะการทำงาน 3,000 rpm จะให้ประสิทธิภาพเครื่องยนต์สูงถึง 22.14% ณ ตำแหน่งไฟจุดระเบิด 51° ก่อนศูนย์ตายบน มีค่าอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (λ) 1.021 และผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 14.48 kW ในขณะที่สภาวะการทำงาน 1,500 rpm จะให้ประสิทธิภาพเครื่องยนต์ 19.74% ณ ตำแหน่งไฟจุดระเบิด 48° ก่อนศูนย์ตายบน มีค่าอัตราส่วนอากาศส่วนเกิน (λ) 0.989 และผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 6.68 kW การใช้คาร์บูเรเตอร์แบบใหม่นี้จะทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น 8.14% เมื่อให้ชุดผลิตกระแสไฟฟ้านี้ทำงานที่ 3,000 rpm ในขณะที่เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น 5.74% เมื่อให้ชุดผลิตกระแสไฟฟ้านี้ทำงานที่ 1,500 rpm และยังพบว่าปริมาณ CO H_2S และไฮโดรคาร์บอนจากแก๊สไอเสีย ซึ่งเป็นแก๊สพิษมีค่าต่ำมาก จนอยู่ในระดับที่ไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์และสภาวะแวดล้อม เมื่อวิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยสมมุติให้ชุดผลิตกระแสไฟฟ้านี้ทำงานวันละ 8 hr และอัตราค่าไฟฟ้าที่ต้องซื้อจากการไฟฟ้าเป็น 3 Baht/kW-hr จะพบว่าการใช้คาร์บูเรเตอร์แบบใหม่และให้ชุดผลิตกระแสไฟฟ้านี้ทำงานที่ 3,000 rpm

จะประหยัดค่าไฟฟ้าที่ต้องซื้อจากการไฟฟ้าได้เดือนละประมาณ 10,000 Baht และจะมีระยะเวลาคืนทุน 1.02 year หรือ 1 year 8 day ในขณะที่ถ้าให้ชุดผลิตกระแสไฟฟ้านี้ทำงานที่ 1,500 rpm จะประหยัดค่าไฟฟ้าที่ต้องซื้อจากการไฟฟ้าได้เดือนละประมาณ 4,800 Baht และจะมีระยะเวลาคืนทุน 2.31 year หรือ 2 year 3 months ซึ่งจะเห็นได้ว่างานวิจัยที่ผ่านมา หากเป็นเครื่องยนต์ขนาดเล็กแล้วจะเป็นเครื่องยนต์ดีเซลที่ไม่ได้ใช้แก๊สชีวภาพทั้งหมด แต่เป็นการใช้เชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันดีเซล และแก๊สชีวภาพ ในส่วนของเครื่องยนต์แก๊สโซลีนถึงแม้จะเป็นการใช้แก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงทั้งหมดแต่จะเน้นไปที่การปรับปรุงเครื่องยนต์ขนาดใหญ่เพื่อนำมาเป็นต้นกำลังในการผลิตไฟฟ้า ซึ่งไม่ได้มีการออกแบบหรือทำการปรับปรุงเครื่องยนต์แก๊สโซลีนขนาดเล็กให้สามารถใช้แก๊สชีวภาพได้อย่างเหมาะสม

ดังนั้นการวิจัยเรื่องการออกแบบชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารสำหรับชุมชน 4.0 นี้ จะเป็นประโยชน์สำหรับชุมชนในการการนำแก๊สชีวภาพไปใช้งานได้อีกทางหนึ่ง และสามารถแก้ไขปัญหาเรื่องขยะจากเศษอาหารได้เป็นอย่างดี อันจะส่งผลให้ประชาชนในพื้นที่สามารถยกระดับคุณภาพชีวิตได้ดีขึ้น อีกทั้งยังสามารถตอบสนองนโยบายรัฐได้เป็นอย่างดีอีกด้วย

วิธีการดำเนินการวิจัย

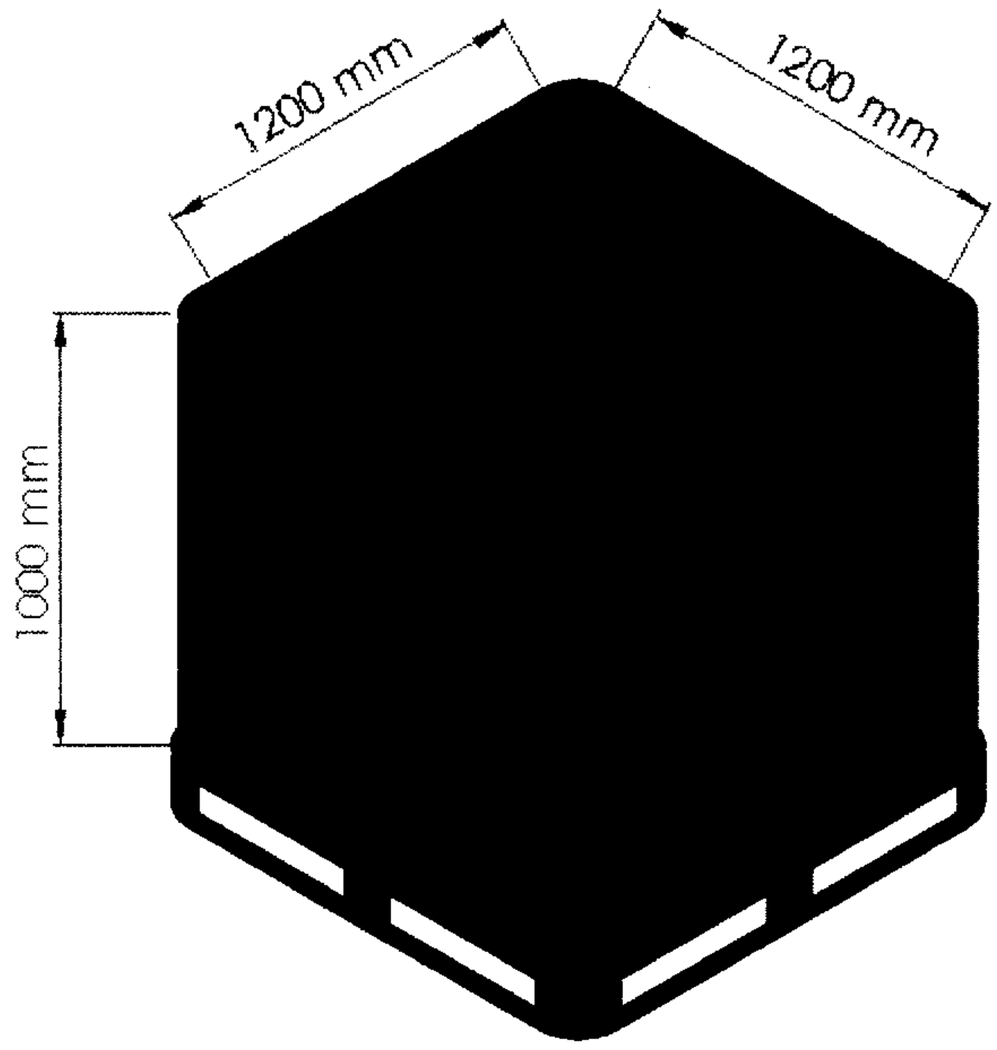
การวิจัยเรื่องการออกแบบชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารสำหรับชุมชน 4.0 ประกอบด้วยอุปกรณ์ในชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร อุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูลในงานวิจัย วิธีการดำเนินงานวิจัยและการทดสอบโดยมีการอธิบายรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์ในชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารและอุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูลในงานวิจัย

ชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารสำหรับชุมชน ใช้ในการทดสอบหาประสิทธิภาพของชุดต้นแบบเครื่องผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารแบบครบวงจร รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในแต่ละส่วนแสดงในหัวข้อดังต่อไปนี้

1.1 ชุดหมักเศษอาหารและเก็บแก๊สชีวภาพ

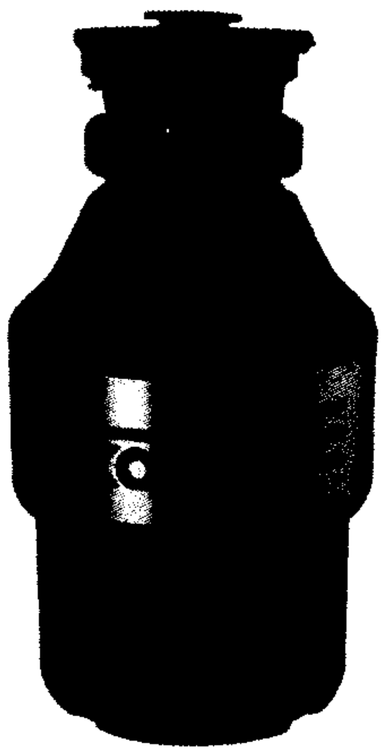
ชุดหมักเศษอาหารและเก็บแก๊สชีวภาพมีรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 1.2 เมตร ยาว 1.2 เมตร และสูง 1 เมตร ทำจากพลาสติกปูบ่อ HDPE หนา 2 มิลลิเมตร โครงถังด้านนอกทำจากเหล็ก และฐานรองรับด้านล่างทำจากจากพลาสติก ภายในชุดหมักเศษอาหารและเก็บแก๊สชีวภาพประกอบด้วย ท่อป้อนเศษอาหารขนาด 2 นิ้ว ท่อน้ำล้นขนาด 1 นิ้ว ท่อเก็บตัวอย่างน้ำหมักพร้อมวาล์วเปิด-ปิดขนาด 3 นิ้ว และด้านบนของชุดหมักเศษอาหารและเก็บแก๊สชีวภาพติดตั้งท่อทางออกของแก๊สชีวภาพพร้อมวาล์วเปิด-ปิดขนาด 0.5 นิ้ว ดังแสดงในภาพที่ 3.3 ภาพที่ 3.5 และภาพที่ 3.6



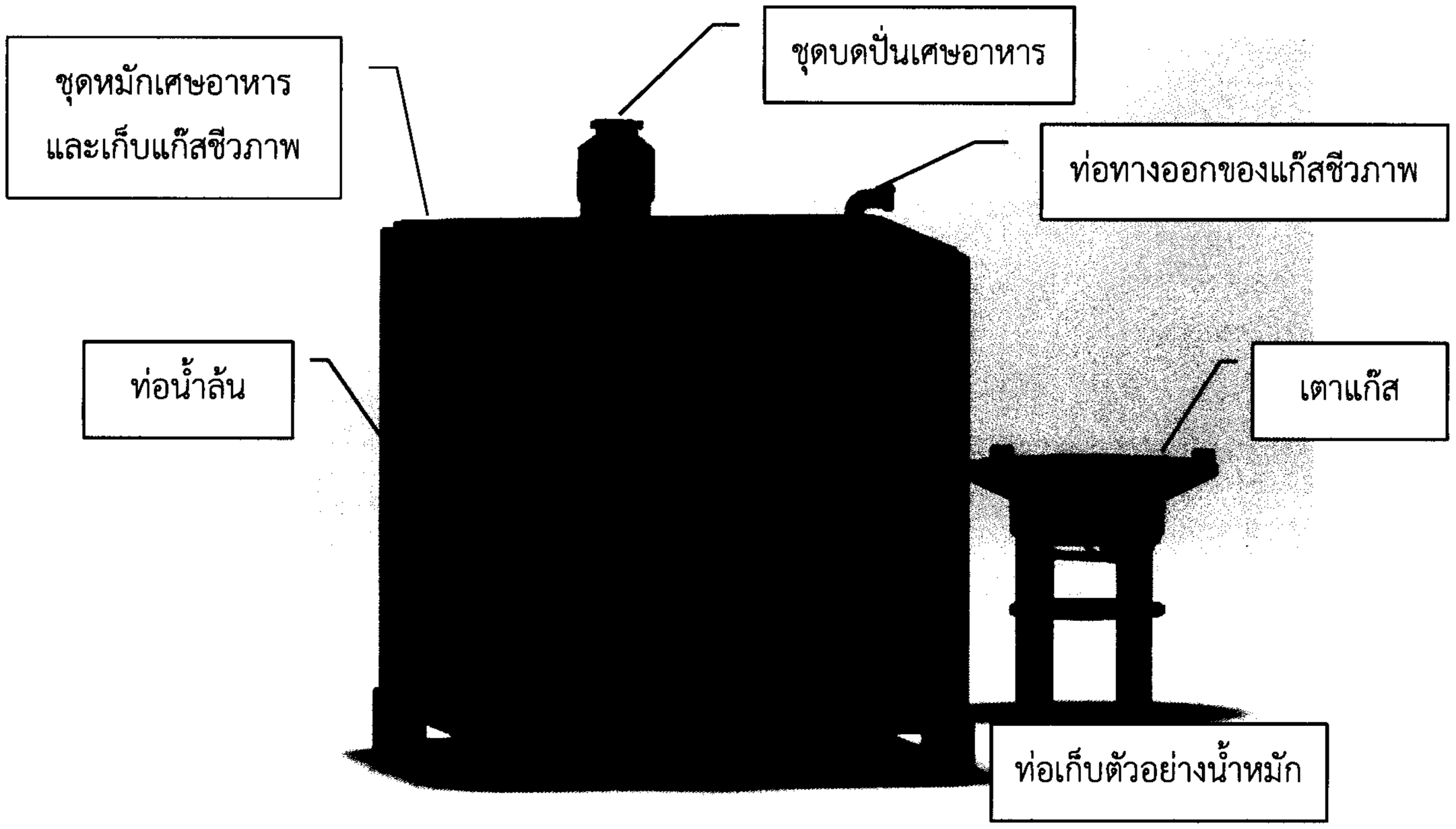
ภาพที่ 3.3 แบบจำลองและขนาดของชุดหมักเศษอาหารและเก็บแก๊สชีวภาพ

1.2 ชุดบดปั่นเศษอาหาร

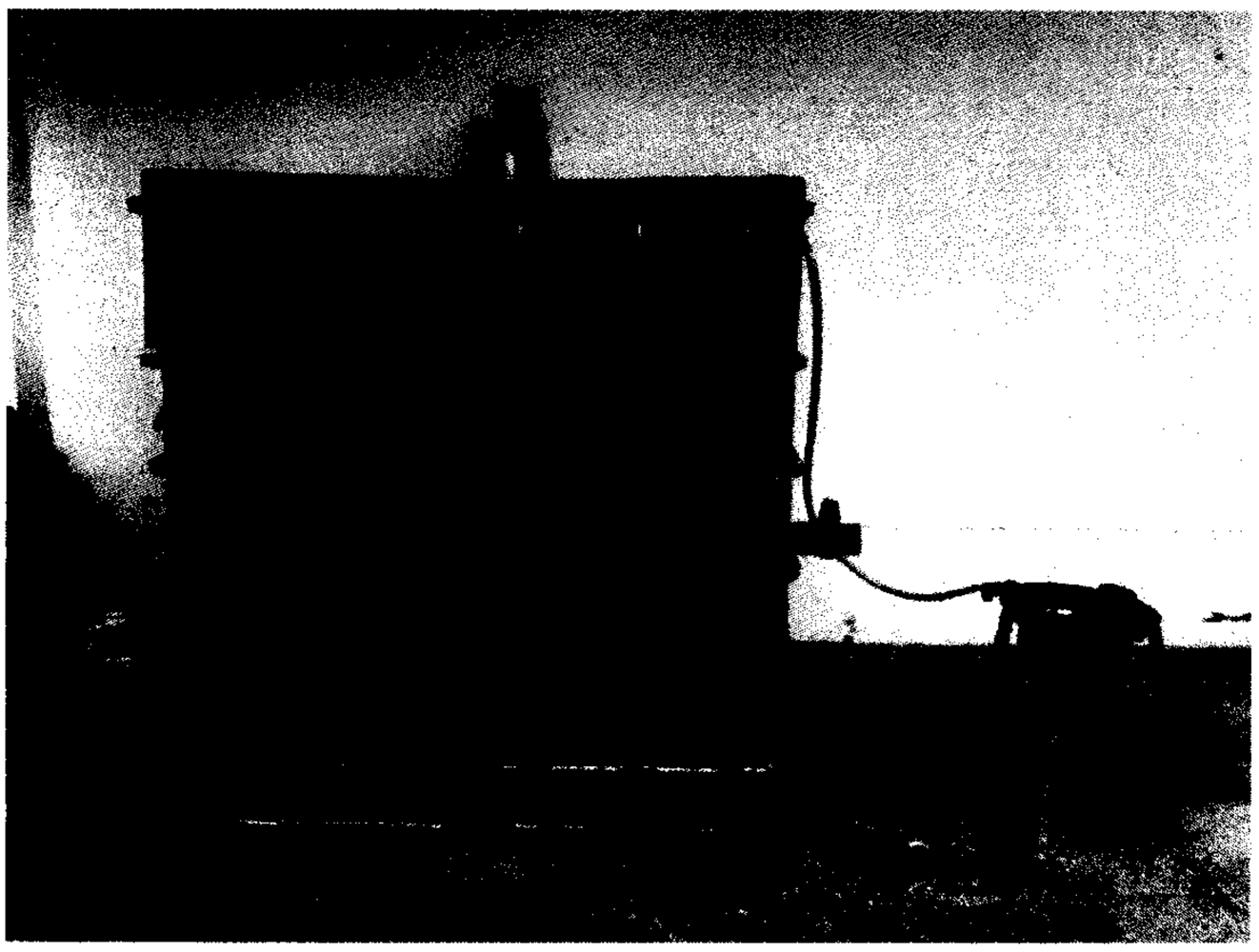
ชุดบดปั่นเศษอาหารใช้เครื่องบดเศษอาหาร ยี่ห้อ Teka รุ่น TR34.1 ขนาด 18.3 X 15 X 31.8 เซนติเมตร ภายในประกอบด้วยใบปั่นทำจากสเตนเลส เพื่อป้องกันการเกิดสนิม และใช้มอเตอร์กระแสสลับขนาด 220 โวลต์ 0.75 แรงม้า เป็นต้นกำลังเพื่อขับใบปั่นให้หมุนในการลดขนาดของเศษอาหาร ดังแสดงในภาพที่ 3.4



ภาพที่ 3.4 เครื่องบดเศษอาหาร



ภาพที่ 3.5 แบบจำลองชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารสำหรับชุมชน



ภาพที่ 3.6 ชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารสำหรับชุมชน

1.3 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) แบบตั้งโต๊ะ ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น S220 มีแท่งสำหรับจุ่มน้ำเพื่อวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยตัวเครื่องสามารถบันทึกข้อมูลได้ ดังแสดงในภาพที่ 3.7

ภาพที่ 3.7 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง

1.4 เครื่องวัดปริมาณแก๊สชีวภาพ

เครื่องวัดปริมาณแก๊สชีวภาพใช้หลักการแทนที่น้ำเพื่อวัดปริมาตรแก๊สและแสดงผลด้วยจอดิจิตอลเพื่อแสดงผลการเกิดแก๊สชีวภาพ ดังภาพที่ 3.8

ภาพที่ 3.8 เครื่องวัดปริมาณแก๊สชีวภาพ

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยครั้งนี้เป็นการหมักแก๊สชีวภาพจากชุดหมักเศษอาหารและเก็บแก๊สชีวภาพ โดยใช้ถังขนาด 1,440 ลิตร วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพคือ มูลสุกรสดสำหรับการเริ่มต้นกระบวนการหมักและใช้เศษอาหารเมื่อมีค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6.5-7.5 โดยการทดสอบหาปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในระยะเวลา 15 วัน ซึ่งมีขั้นตอนการวิจัยดังนี้

2.1 เตรียมมูลสุกรสดปริมาณ 25 กิโลกรัม

2.2 นำมูลสุกรที่เตรียมไว้ใส่ลงในถังหมักและเติมน้ำปริมาณ 150 ลิตร (อัตราส่วน 1:6) หลังจากนั้นทำการหมักเป็นเวลา 3 วัน และทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักทุกๆ วันหลังจากการเติมมูลสุกร โดยควบคุม pH ให้อยู่ในช่วง 6.5-7.5

2.3 ทำการเติมเศษอาหารบดละเอียดปริมาณ 0.5 กิโลกรัม พร้อมกับเติมน้ำปริมาณ 4.5 ลิตร (อัตราส่วน 1:9) ซึ่งค่า pH อยู่ในช่วง 6.5-7.5 หลังจากนั้นทำการหมักเป็นระยะเวลา 4 วัน จนเริ่มต้นกระบวนการเกิดแก๊สชีวภาพ และทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักทุกวันและบันทึกผล

2.4 ทำการเติมเศษอาหารบดละเอียดปริมาณ 0.5 กิโลกรัม พร้อมกับเติมน้ำปริมาณ 4.5 ลิตร (อัตราส่วน 1:9) ทุกวัน และทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมัก และบันทึกปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นเป็นระยะเวลา 15 วัน

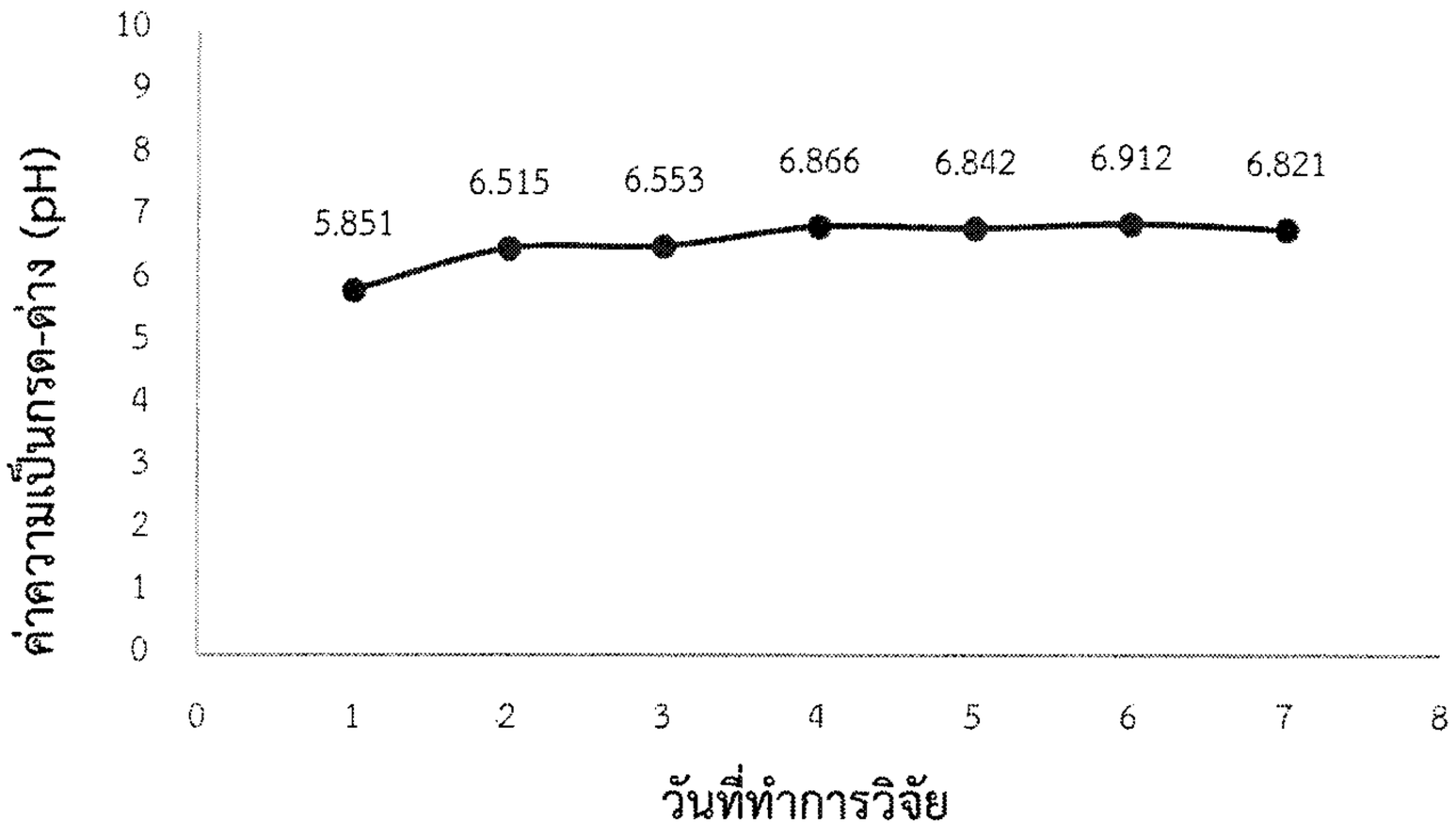
ผลการวิจัย

1. ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักในถังหมักแก๊สชีวภาพ

การทดลองวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักในถังหมักแก๊สชีวภาพ โดยใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่างแบบตั้งโต๊ะ และทำการเก็บตัวอย่างน้ำหมักชีวภาพทุกวัน เวลา 14.00 น. เป็นระยะเวลา 21 วัน

ตารางที่ 3.2 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักในถังหมักแก๊สชีวภาพสัปดาห์ที่ 1

วันที่/เดือน/ปี	เวลา	ค่า pH	ปริมาณน้ำปูนขาว (L)	ปริมาณเศษอาหาร (L)
24/06/2562	14.00	5.851	0.5	-
25/06/2562	14.00	6.515	-	-
26/06/2562	14.00	6.553	-	-
27/06/2562	14.00	6.866	-	5
28/06/2562	14.00	6.842	-	5
29/06/2562	14.00	6.912	-	5
30/06/2562	14.00	6.821	-	5
ค่าเฉลี่ย		**6.622**		



ภาพที่ 3.9 กราฟแสดงผลค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมัก สัปดาห์ที่ 1

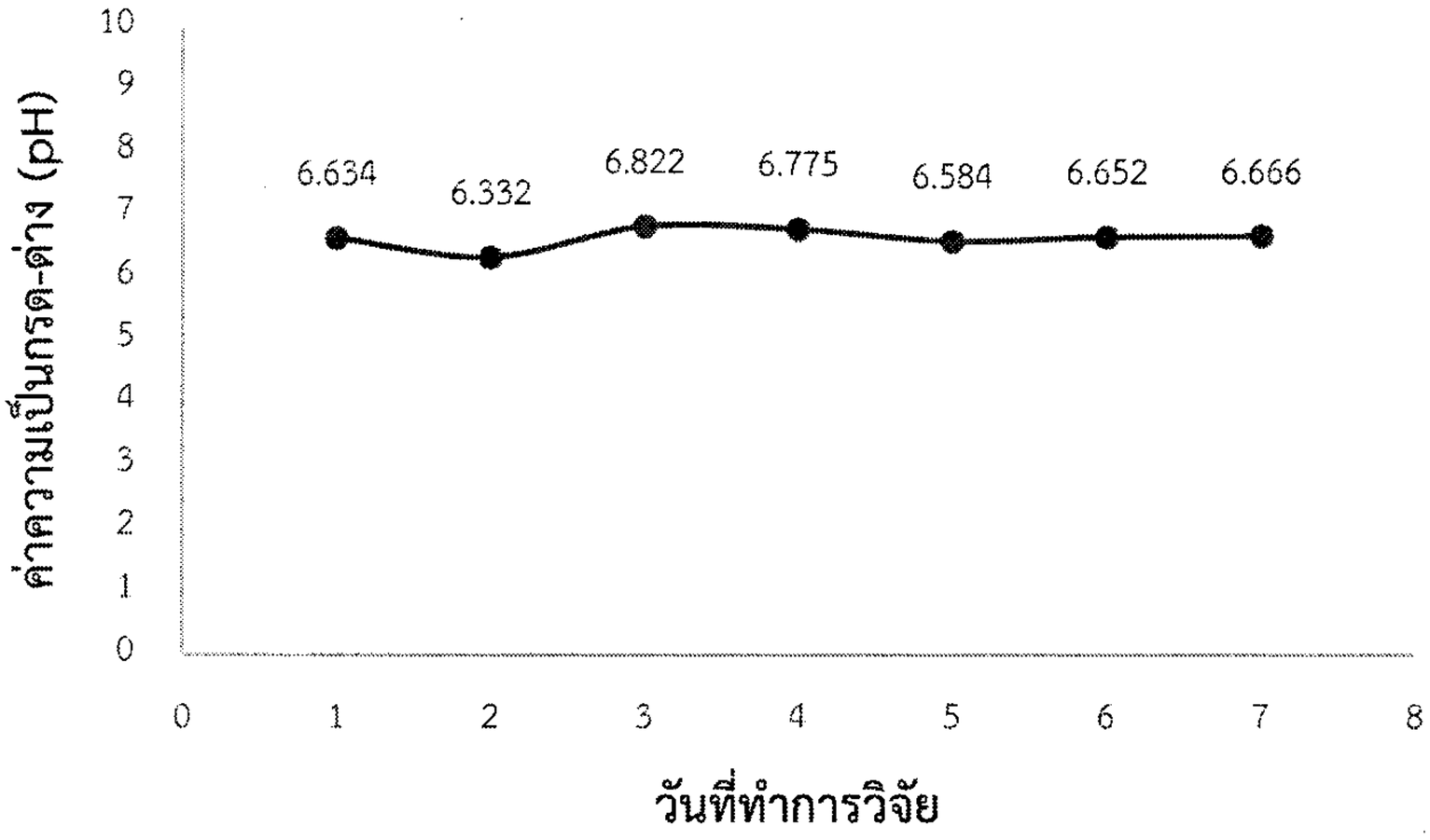
จากตารางที่ 3.2 และภาพที่ 3.9 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำหมักในถังหมักแก๊สชีวภาพ สัปดาห์ที่ 1 โดยทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักพบว่า วันแรกของการหมัก ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5.851 มีสภาวะเป็นกรด จึงทำการเติมน้ำปูนขาวปริมาณ 0.5 ลิตร เพื่อปรับค่าความเป็นกรด-ด่างภายในถังหมักให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสม วันที่ 2 3 และ 4 ค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าเท่ากับ 6.515 6.553 และ 6.886 ตามลำดับ ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่าง ดังกล่าวอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหมักแก๊สชีวภาพ ดังนั้นในวันที่ 4 จึงทำการเติมเศษอาหารเข้าไปเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพ และทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ในวันที่ 5 6 และ 7 พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6.842 6.912 และ 6.821 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ จึงหยุดการควบคุม pH ด้วยการเติมปูนขาว และดำเนินการหมักด้วยการเติมเศษอาหารต่อไปจนครบระยะเวลา 15 วัน

สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำหมักในถังหมักแก๊สชีวภาพในสัปดาห์ที่ 2 (ตารางที่ 3.3 และภาพที่ 3.10) โดยทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมัก พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างยังอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม คือ มีค่าเท่ากับ 6.634 จึงทำการเติมเศษอาหารปริมาณรวม 5 ลิตร วันที่ 2 ค่าความเป็นกรด-ด่างภายในถังหมักแก๊สชีวภาพลดลงเหลือ 6.332 ซึ่งอยู่ในสภาวะที่เป็นกรดแก่ จึงทำการปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยการเติมถ่านกัมมันต์ เพื่อปรับสภาวะความเป็นกรดของน้ำหมักให้เข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหมักแก๊สชีวภาพ จากนั้นวันที่ 3 4 และ 5 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม จึงทำการเติมเศษอาหารลงไป

เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพ แต่ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในวันที่ 5 ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง เท่ากับ 6.584 จึงทำการเติมถ่านกัมมันต์ร่วมกับเศษอาหาร เพื่อช่วยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างภายในถังหมัก เพื่อไม่ให้ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำไปมากจนเกินไป ซึ่งวันที่ 6 และ 7 ค่าความเป็นกรด-ด่างภายในถังหมักมีค่าเท่ากับ 6.652 และ 6.666 ตามลำดับ ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหมักแก๊สชีวภาพ

ตารางที่ 3.3 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักแก๊สชีวภาพสัปดาห์ที่ 2

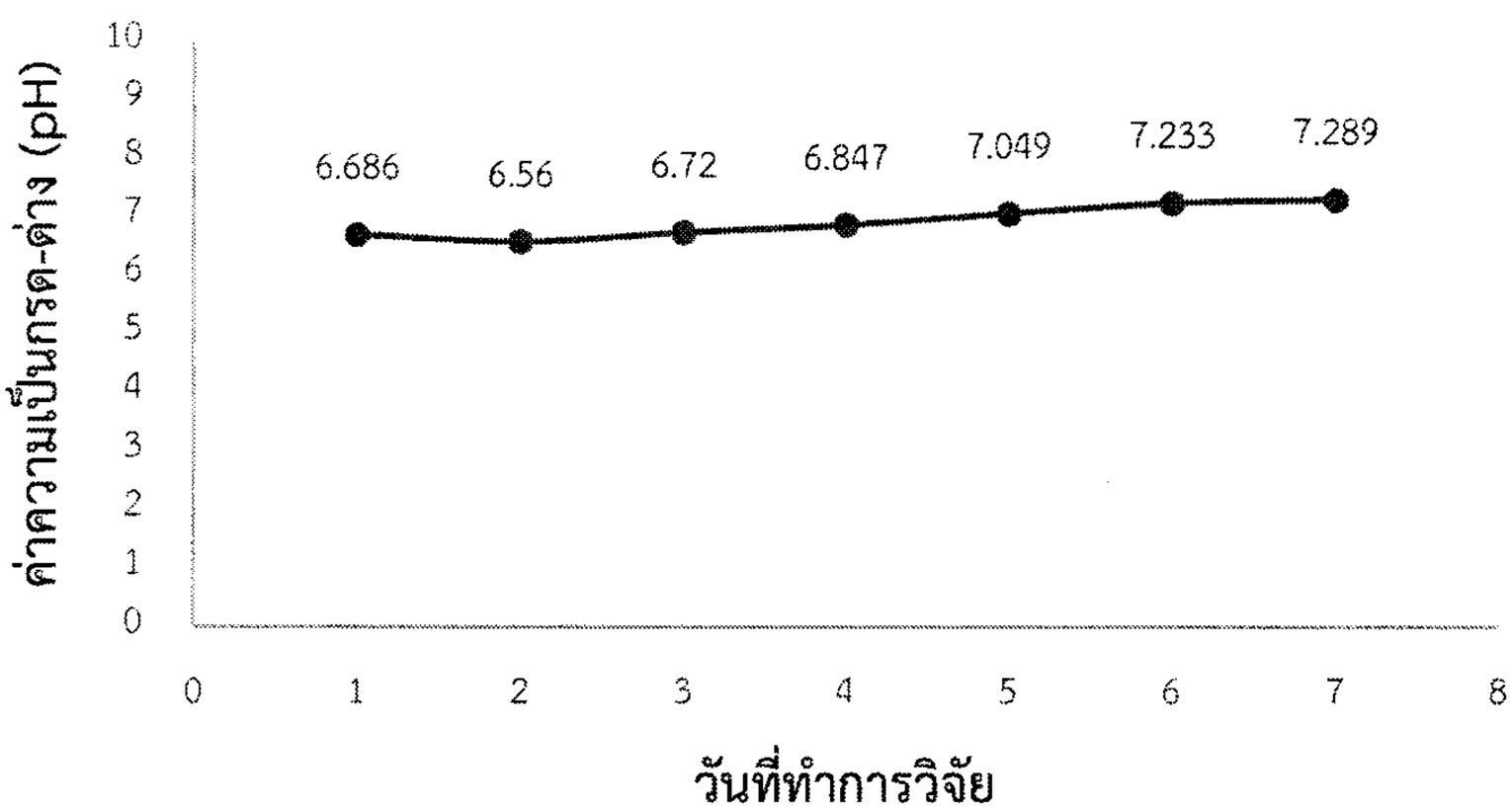
วันที่/เดือน/ปี	เวลา	ค่า pH	ปริมาณเศษอาหาร (L)
01/07/2562	14.00	6.634	5
02/07/2562	14.00	6.332	5
03/07/2562	14.00	6.822	5
04/07/2562	14.00	6.775	5
05/07/2562	14.00	6.584	5
06/07/2562	14.00	6.652	5
07/07/2562	14.00	6.666	5
ค่าเฉลี่ย		**6.637**	



ภาพที่ 3.10 กราฟแสดงผลค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมัก สัปดาห์ที่ 2

ตารางที่ 3.4 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักแก๊สชีวภาพสัปดาห์ที่ 3

วันที่/เดือน/ปี	เวลา	ค่า pH	ปริมาณเศษอาหาร (L)
08/07/2562	14.00	6.686	5
09/07/2562	14.00	6.560	5
10/07/2562	14.00	6.720	5
11/07/2562	14.00	6.847	5
12/07/2562	14.00	7.049	5
13/07/2562	14.00	7.233	5
14/07/2562	14.00	7.289	5
ค่าเฉลี่ย		**6.912**	



ภาพที่ 3.11 กราฟแสดงผลค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมัก สัปดาห์ที่ 3

จากตารางที่ 3.4 และภาพที่ 3.11 แสดงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำหมักในถังหมักแก๊สชีวภาพใน สัปดาห์ที่ 3 โดยทำการวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำหมักพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างยังคงอยู่ในสภาวะที่เหมาะสม คือ มีค่าเท่ากับ 6.686 จึงทำการเติมเศษอาหารปริมาณรวม 5 ลิตร แต่ในวันที่ 2 ค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักลดต่ำลงเท่ากับ 6.560 จึงทำการเติมถ่านกัมมันต์ร่วมกับเศษอาหาร เพื่อช่วยปรับค่าความเป็นกรด-ด่างภายในถังหมักเพื่อไม่ให้ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำไปมากจนเกินไป ซึ่งวันที่ 10 11 12 13 และ 14 ค่า pH ภายใน

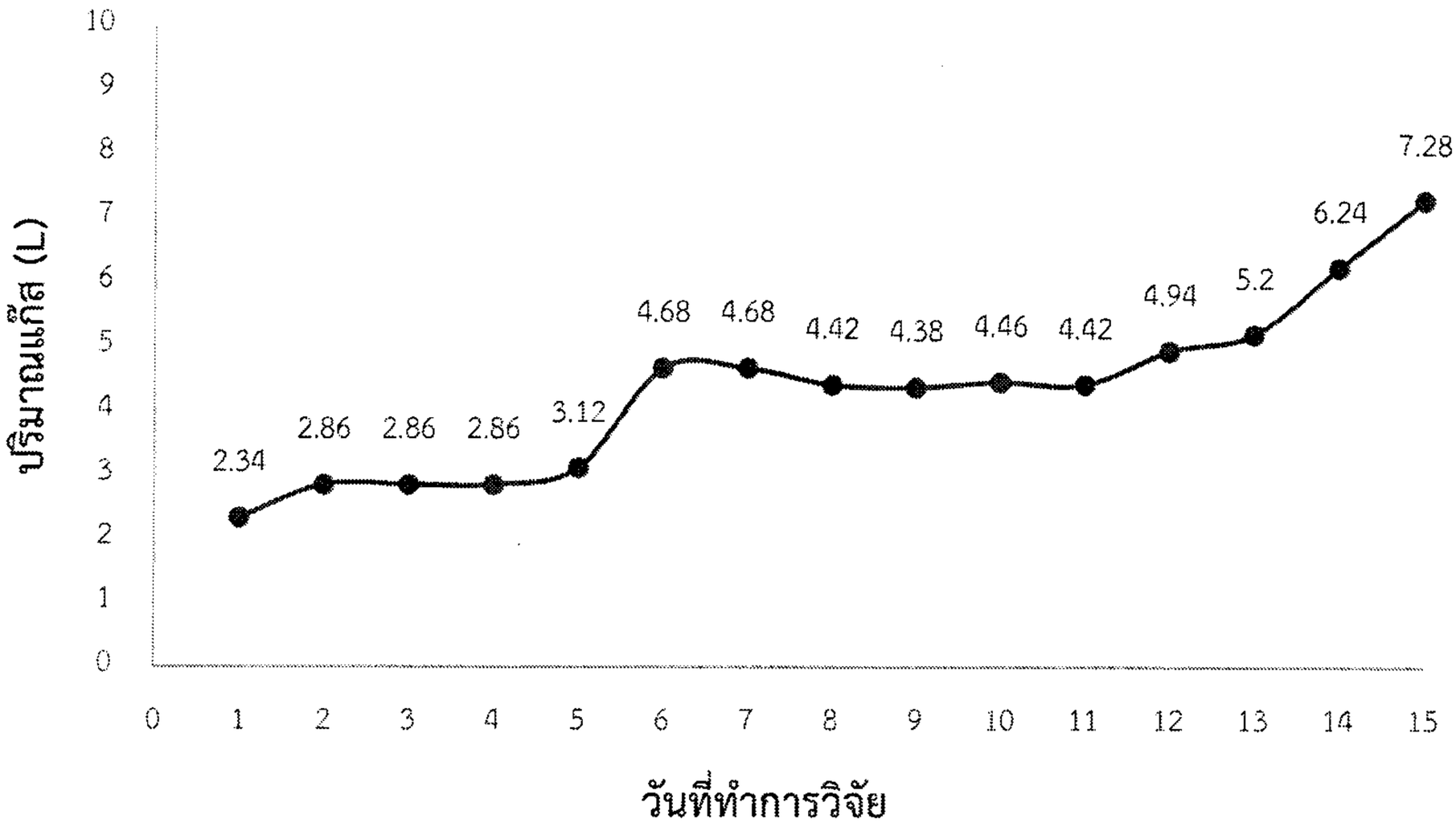
ถังหมักมีค่าเท่ากับ และ 6.720 6.847 7.049 7.233 และ 7.289 ตามลำดับ ค่า pH อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการหมักแก๊สชีวภาพ

2. ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้จากชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร

การทดสอบหาอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร โดยใช้เครื่องวัดปริมาตรแก๊ส ซึ่งทำการติดตั้งเครื่องวัดปริมาตรแก๊ส และเริ่มต้นการทดสอบในวันที่ 30 มิถุนายน 2562 และทำการบันทึกข้อมูลทุกวัน เวลา 14.00 น. ดังแสดงผลในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตารางแสดงปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้จากชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร

วันที่/ เดือน/ ปี	เวลา	ค่า pH	ปริมาณแก๊สที่ได้ (L)
30/06/2562	14.00	6.821	2.34
01/07/2562	14.00	6.634	2.86
02/07/2562	14.00	6.332	2.86
03/07/2562	14.00	6.822	2.86
04/07/2562	14.00	6.775	3.12
05/07/2562	14.00	6.584	4.68
06/07/2562	14.00	6.652	4.68
07/07/2562	14.00	6.666	4.42
08/07/2562	14.00	6.686	4.38
09/07/2562	14.00	6.560	4.46
10/07/2562	14.00	6.720	4.42
11/07/2562	14.00	6.847	4.94
12/07/2562	14.00	7.049	5.20
13/07/2562	14.00	7.233	6.24
14/07/2562	14.00	7.289	7.28
เฉลี่ย			4.32



ภาพที่ 3.12 กราฟแสดงปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้จากชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร

จากภาพที่ 3.12 แสดงปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยทำการเก็บข้อมูลระว่างวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2562 - วันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 เป็นระยะเวลารวมทั้งสิ้น 15 วัน พบว่า ชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหาร สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้มีค่าเท่ากับ 2.34 2.86 2.86 2.86 3.12 4.68 4.42 4.38 4.16 4.16 4.42 4.94 5.20 6.24 และ 7.28 ลิตร ตามลำดับ ซึ่งปริมาณแก๊สชีวภาพจะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้น ตามระยะเวลาการหมัก โดยปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพเฉลี่ยที่เกิดขึ้นของเศษอาหารในช่วงระยะเวลา 15 วัน มีค่าเท่ากับ 4.32 ลิตร

อภิปรายผลการวิจัย

การผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารมีผลมาจากสภาวะค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการหมักแก๊สชีวภาพ ซึ่งสภาวะความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับการหมักแก๊สชีวภาพอยู่ในช่วง 6.5-7.5 (สมจินตนา และคณะ, 2554; Spyridon et al., 2019) หากค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 5 จะเป็นอัตรายต่อการเกิดมีเทน (ณัฏฐา, 2557) เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักมีค่าลดต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมจึงทำการเติมน้ำปูนขาวเพื่อทำการปรับสภาวะความเป็นกรด-ด่างของน้ำหมักในช่วงสัปดาห์แรก เนื่องจากน้ำปูนขาวจะเป็นตัวปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างในถังหมักให้อยู่ในสภาวะที่เป็นกลางพอดี (คู่มือการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพสู่ชุมชนเพื่อแก้ปัญหาการกำจัดผักตบชวาอย่างยั่งยืน, 2560) และเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างภายในถังหมักอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมจึงทำการเติมเศษอาหารลงไปเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งเศษอาหารมีคุณลักษณะเป็นอินทรีย์สารสามารถย่อย

สลายได้โดยจุลินทรีย์ ซึ่งจะเกิดการย่อยสลายจากสารโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารโมเลกุลเล็กและเกิดกระบวนการหมัก หลังจากนั้นจึงเกิดเป็นแก๊สชีวภาพ (พัชรี, 2559) ดังนั้นการนำเศษอาหารมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพจึงทางเลือกหนึ่งในการแก้ไขปัญหาเรื่องของเสียจากเศษอาหารได้ รวมไปถึงสามารถลดปัญหาเรื่องมลพิษและสิ่งแวดล้อมได้ อีกทั้งยังทำให้ประชาชนรู้จักการจัดการของเสียจากเศษอาหารได้เป็นอย่างดี

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารสำหรับชุมชนที่ออกแบบมีขนาดกว้าง 1.2 เมตร ยาว 1.2 เมตร และสูง 1 เมตร ทำจากพลาสติกปูบ่อ HDPE หนา 2 มิลลิเมตร โดยโครงสร้างด้านนอกทำจากเหล็ก และฐานรองรับด้านล่างทำจากจากพลาสติก ภายในชุดหมักเศษอาหารและเก็บแก๊สชีวภาพประกอบด้วย ท่อป้อนเศษอาหารขนาด 2 นิ้ว ท่อน้ำล้นขนาด 1 นิ้ว ท่อเก็บตัวอย่างน้ำหมักพร้อมวาล์วเปิด-ปิดขนาด 3 นิ้ว และด้านบนของชุดหมักเศษอาหารและเก็บแก๊สชีวภาพติดตั้งท่อทางออกของแก๊สชีวภาพพร้อมวาล์วเปิด-ปิดขนาด 0.5 นิ้ว นำมาใช้เป็นชุดผลิตแก๊สชีวภาพต้นแบบ โดยใช้เศษอาหารเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพ พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 6.72 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมและและสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้เฉลี่ย 4.32 ลิตรต่อวัน

บรรณานุกรม

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2557). สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2557.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579.

กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน พลังงานทดแทน (2545). [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา http://www.dedp.go.th.

กฤษฎา กิ้มเส้ง และพิชัย อัมระนันท์. (2534). ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมจากเครื่องยนต์ใช้แก๊สชีวภาพ. ปริญญานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

คู่มือการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพสู่ชุมชนเพื่อแก้ปัญหาการกำจัดผัดตบชวาอย่างยั่งยืน. (2560). [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา http://www.thai-explore.net/file_upload/submitter/file_doc/445a04a5f4a7fde735b771c7defffd59.pdf

ณัฏฐา กาญจนขุนดี. (2557). วิธีการผลิตแก๊สชีวภาพสำหรับครัวเรือน ระหว่างไทยประดิษฐ์กับฝรั่งทำใคร เจ๋งกว่า. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา https://is.gd/PpW6Jz

ปรีชา ศิริชาญ. (2540). การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พัชรี อินธนู. (2559). เศษอาหาร. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา
https://erp.mju.ac.th/acticleDetail.aspx?qid=447

สมชาย พัฒนา และเอกรัฐ สมินทรปัญญา. (2534). การใช้แก๊สชีวภาพเดินเครื่องยนต์และเครื่องสูบน้ำ. ปริญญานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สมบูรณ์ ศิริพรมงคลชัย. (2546). การปรับปรุงคาร์บูเรเตอร์สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้แก๊สชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สมจินตนา ลิ้มสุข ปุณยวี เพียรธรรม และอนุรักษ์ ปีติรักษ์สกุล. (2554). การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารร่วมกับกลีเซอรีนดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล. วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 38(2). หน้า 101-110.

Kannika Rengsirikul, Yasuyuki Ishii, Kunn Kangvansaichol, Prapa Sripichitt, Vittaya Punsuvon, Pilanee Vaithanomsat, Ganda Nakamanee, and Sayan Tudsri. (2013). Biomass Yield, Chemical Composition and Potential Ethanol Yields of 8 Cultivars of Napiergrass (Pennisetum purpureum Schumach.) Harvested 3-Monthly in Central Thailand. Journal of Sustainable Bioenergy Systems. 3(2), 107-112.

Kaewchung Utai, Sutabutr Harit. (1984). Use of biogas as supplementary fuel for a diesel engine. Regional Seminar on Simulation & Design in Solar Energy Applications.

Spyridon Achinas, Yu Li, Vasileios Achinas, and Gerrit Jan Willem Euverink. 2019. Biogas Potential from the Anaerobic Digestion of Potato Peels: Process Performance and Kinetics Evaluation. Energies. 12(12): 2311; https://doi.org/10.3390/en12122311.

Sittiboon Siripornakarachai and Thawan Sucharitakul. (2007). Modification of Diesel Engine for Electricity Production Fueled by Biogas. 6TH Asia Pacific Conference on Sustainable Energy and Environmental Technologies (APCSEET 2007). International Conference.

Sittiboon Siripornakarachai and Thawan Sucharitakul. (2006). Tuning of MultiValve Automotive Engine for Electricity Production Fueled by Biogas. International Conference on Green and Sustainable Innovation (ICGSI 2006).

บทที่ 4
การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำ จากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่มีต่อผลผลิตคะน้า

บทนำ

ในปัจจุบันปริมาณขยะอินทรีย์จำพวกเศษอาหารมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นทุกวัน เนื่องมาจากจำนวนประชากรที่เพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้มีความต้องการอาหารมากขึ้น นอกจากนั้นยังมีร้านอาหารประเภทต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นร้านหมูกระทะ ร้านสุกี้ ร้านชาบู อาหารตามสั่ง ที่เปิดขายเพิ่มมากขึ้นทุกวัน ซึ่งกิจการดังกล่าวทำให้เกิดปริมาณเศษอาหารเป็นจำนวนมาก ซึ่งมีการนำไปใช้ประโยชน์ไม่ถึงร้อยละ 30 โดยการนำไปใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่จะนำไปใช้เป็นอาหารสุกร การผลิตปุ๋ย และการนำมาผลิตแก๊สชีวภาพ ในส่วนของแก๊สชีวภาพได้รับความนิยมในชุมชนเป็นอย่างมากเนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ง่าย ใช้ของเสียได้หลายประเภท ลงทุนต่ำ และแก๊สชีวภาพที่ได้จากกระบวนการหมักของเสียเหลือใช้ต่างๆ จะถูกนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทั้งการนำมาหุงต้มในชุมชนครัวเรือน หรือนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า ทำให้เป็นการใช้ประโยชน์จากของเสียที่มีประสิทธิภาพ และคุ้มทุน แต่อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพในปัจจุบันจะมีของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตทั้งในรูปของแข็ง และของเหลว ซึ่งหากปล่อยสู่ธรรมชาติโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัดจะทำให้เกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมได้ จากปัญหาดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงได้ให้ความสนใจที่จะนำของเสียจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารดังกล่าวมาผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำ เพื่อใช้เพิ่มการเจริญเติบโตของพืช และเป็นการลดของเสียในสิ่งแวดล้อม

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นการลดปริมาณของเสียเหลือทิ้ง และนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่มีต่อผลผลิตคะน้า

ขอบเขตของโครงการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง โดยมีตัวแปรต้น คือ ความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (เปอร์เซ็นต์) ปริมาณการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (มิลลิลิตรต่อต้น) และความถี่ในการใส่ (วัน) ซึ่งมีตัวแปรตาม คือ ผลผลิตของผักคะน้า

ทบทวนวรรณกรรม

ในปัจจุบันมีการนำจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์และมีประสิทธิภาพมาใช้ในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์เป็นจำนวนมาก เนื่องจากเกษตรกรและผู้บริโภคเริ่มตระหนักถึงอันตรายจากสารเคมีทางการเกษตร ประกอบกับค่าใช้จ่ายของเกษตรกรหรือผู้ประการด้านการเกษตรเกี่ยวกับเรื่องปุ๋ยเคมีและสารเคมีป้องกันกำจัดศัตรูพืชมีแนวโน้มที่สูงขึ้น เกษตรกรบางรายหรือนักวิจัยบางกลุ่มจึงได้ทำการศึกษาและวิจัยวิธีการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำขึ้นเพื่อใช้ทดแทนปุ๋ยเคมีหรือสารเคมีดังกล่าว และที่ผ่านมา สมเกียรติ และคณะ (2545) ได้ทำการศึกษาวิจัยและพัฒนาปุ๋ยอินทรีย์น้ำเพื่อเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร โดยได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำสูตรต่าง ๆ ขึ้นในสถานีวิจัยเกษตรเขตชลประทานศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และทำการศึกษากระบวนการผลิต สำรวจและเก็บตัวอย่างปุ๋ยอินทรีย์น้ำของเกษตรกรแต่ละแหล่งผลิตในเขตพื้นที่เกษตรกรรมเชียงใหม่-ลำพูน มาทำการศึกษาวิจัยทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและทดสอบในระดับแปลงทดลองในสถานีวิจัยฯ ผลการศึกษาวิจัยพบว่า เทคโนโลยีการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำดังกล่าวไม่มีความยุ่งยากหรือซับซ้อนแต่ประการใด และปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุดในการทำการเกษตรคือ ความสมดุลของธาตุสี่ที่อยู่ในธรรมชาติคือ ธาตุดิน ธาตุน้ำ ธาตุลม และธาตุไฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งธาตุดิน ถ้าดินดีแล้ว พืชที่ปลูกก็จะมีความแข็งแรงสมบูรณ์สามารถต้านทานการเข้าทำลายของโรคและแมลงศัตรูพืชได้เป็นอย่างดี เพราะดินเป็นแหล่งธรรมชาติที่ให้อาหารแก่พืช อาหารแร่ธาตุเหล่านี้เกิดจากการสลายตัวผุพังของดินและอินทรียวัตถุที่กองทับถมในดินและบนดิน หากเราทำการศึกษาสภาพของดินในป่าจะพบว่าดินมีความอุดมสมบูรณ์ ต้นไม้นานาชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ดีโดยไม่มีใครนำปุ๋ยเคมีไปใส่ให้เลย ทั้งนี้เพราะธาตุอาหารพืชที่อยู่ในดินจะสะสมหมุนเวียนอยู่บนผิวดิน เมื่อครั้งเปิดป่าใหม่ ๆ การเพาะปลูกพืชจึงเจริญเติบโตงอกงามดีและมีผลผลิตสูงโดยไม่ต้องใส่ปุ๋ยเพราะพืชจะดึงดูดธาตุอาหารในดินซึ่งมีอยู่อย่างเพียงพอ และการเก็บเกี่ยวผลผลิตออกจากไร่นาแต่ละครั้งก็จะเกิดการสูญเสียธาตุอาหารพืชหรือปุ๋ยธรรมชาติในดินออกไปด้วย ดังนั้นการปลูกพืชและการเก็บเกี่ยวผลผลิตออกจากไร่นาอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน จึงทำให้ดินกลายเป็นดินเลวเสื่อมโทรมไม่สมบูรณ์ การเพาะปลูกพืชก็จะไม่เจริญเติบโต ผลผลิตของพืชลดลง (ชมรมเกษตรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, 2544) วิธีการแก้ไขดินเลวหรือดินเสื่อมโทรมให้ดีขึ้นและสามารถปลูกพืชในพื้นดินนั้นต่อไปได้ต้องใช้วิธีการต่าง ๆ หลายวิธีร่วมกัน เช่น การเตรียมดินที่เหมาะสม การใช้พันธุ์พืชที่ดี การปฏิบัติดูแลรักษา และที่สำคัญที่สุดคือต้องมีการใช้ปุ๋ย ปุ๋ยมี 2 ประเภทคือ ปุ๋ยเคมีหรือปุ๋ยวิทยาศาสตร์เป็นปุ๋ยที่ได้จากการผลิตหรือสังเคราะห์โดยขบวนการทางเคมีจากดิน แร่ หรืออินทรีย์สารต่าง ๆ เช่น ปุ๋ยเคมีรูปที่ปั้นเป็นเม็ด เป็นผลึก (ปุ๋ยเกล็ด) และที่เป็นของเหลว (ปุ๋ยน้ำ) อีกประเภทหนึ่งคือปุ๋ยอินทรีย์ เป็นปุ๋ยที่ได้จากอินทรีย์สารต่าง ๆ เช่น ซากพืช ซากสัตว์ เศษพืชหรือสัตว์จากในไร่นา รวมทั้งเศษพืชหรือสัตว์จากโรงงานอุตสาหกรรมเกษตร ปุ๋ยอินทรีย์พวกนี้ได้แก่ ปุ๋ยคอก ปุ๋ยพืชสด ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยน้ำชีวภาพหรือน้ำสกัดชีวภาพ และปุ๋ยที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิดซึ่งเป็นพวกอินทรีย์สาร ส่วนประวัติการใช้ปุ๋ยหมักซึ่งเป็นปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งในประเทศ

ไทยมีมานานแล้วในกลุ่มคนผู้มีเชื้อสายจีนแต่เกษตรกรไทยเราไม่นิยมใช้ ต่อมาเมื่อมีการสำรวจดินโดยกรมพัฒนาที่ดิน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พบว่าดินของประเทศไทยโดยส่วนรวมมีความอุดมสมบูรณ์ลดลงมาก รัฐบาลหรือเอกชนและเกษตรกรจึงได้เห็นความสำคัญของปุ๋ยหมัก ปุ๋ยอินทรีย์ และปุ๋ยอินทรีย์น้ำมากขึ้น จะเห็นได้ว่ามาระยะหลังได้มีโครงการวิจัยต่างๆ เกิดขึ้นมากมาย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงและบำรุงดินโดยใช้อินทรียวัตถุให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ปัจจุบันการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำมีบทบาทที่สำคัญยิ่งต่อระบบการเกษตรของประเทศไทยเรา จะเป็นเพราะว่าประชาชนผู้บริโภคได้หันมาสนใจเกี่ยวกับสุขภาพอนามัยของตนเองมากขึ้น เนื่องมาจากผลิตผลทางการเกษตรที่ผลิตออกมาสู่ผู้บริโภคจะต้องปลอดสารพิษไม่มีสารเคมีใดๆ ตกค้าง ผลิตภัณฑ์ชนิดที่ว่านี้คือ ผักอินทรีย์ หรือผักที่ไม่ใช้สารเคมีป้องกันกำจัดโรคและศัตรูพืช ซึ่งเป็นผักที่ไม่มีสารเคมีตกค้างและปลอดสารพิษในการผลิตผักอินทรีย์หรือผักที่ไม่ใช้สารเคมีป้องกันกำจัดโรคและศัตรูพืช ปุ๋ยอินทรีย์น้ำจะเป็นปัจจัยหลักที่สำคัญในการผลิต (ศรีวรรณ, 2542)

ปุ๋ยอินทรีย์น้ำคือปุ๋ยอินทรีย์ชนิดหนึ่งที่เกิดจากกระบวนการหมักด้วยซากพืชซากสัตว์โดยมีเชื้อจุลินทรีย์เป็นตัวช่วยย่อยสลาย ปุ๋ยอินทรีย์น้ำที่ได้จากการหมักดองจะประกอบไปด้วยจุลินทรีย์และสารอินทรีย์หลากหลายชนิดเป็นปุ๋ยเสริมให้แก่พืชเพื่อเสริมธาตุอาหารให้กับพืช ในขณะที่พืชกำลังเจริญเติบโตน้ำสกัดชีวภาพจะให้ทั้งธาตุอาหารและเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (ชมรมเพื่อนเกษตรกร, 2544) ในขณะที่พืชกำลังเจริญเติบโต น้ำสกัดชีวภาพหรือปุ๋ยน้ำชีวภาพจะให้ทั้งธาตุอาหารและเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (สมเกียรติ, 2546)

วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยเรื่อง การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่มีต่อผลผลิตคะน้า มีวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

การทดลองในครั้งนี้ใช้การออกแบบการทดลองการตอบสนองพื้นที่ผิว (Response surface methodology ; RSM) โดยการใช้การทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) โดยศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่มีต่อผลผลิตคะน้า

การดำเนินงานวิจัย

1. ขั้นตอนการปลูกผักคะน้า

   1.1 เพาะเมล็ดพันธุ์คะน้าในถาดเพาะปริมาณ 1 เมล็ดต่อ 1 หลุม ทำการรดน้ำวันละ 2 ครั้ง

   1.2 เมื่อต้นกล้าคะน้ามีใบจริง 2-3 ใบ ให้ทำการย้ายลงปลูกในกระถางที่เตรียมไว้

2. ขั้นตอนการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำ

   2.1 นำของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ มาทำการผสมกับน้ำกากส่าในอัตราส่วน 10 ต่อ 2

2.2 นำวัตถุดิบที่ผสมแล้วจากขั้นตอนที่ 2.1 มาหมักในถังพลาสติกแบบมีฝาปิดขนาด 200 ลิตร

2.3 เมื่อหมักได้ 45 วันจึงนำมาใช้ในการทดลอง

3. ขั้นตอนการทดลอง

3.1 นำดินใส่กระถางขนาด 7x10 นิ้ว 40 กระถาง

3.2 ย้ายกล้าคะน้าลงปลูก รดน้ำในกระถางให้ชุ่ม

3.3 ใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำตามที่ได้ออกแบบการทดลองทุก 7 วัน หลังย้ายกล้า

แผนการทดลองเพื่อศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่มีต่อผลผลิตคะน้า โดยใช้วิธีการตอบสนองต่อพื้นที่ผิว (RSM) แบบ Central Composite Design (CCD)

การทดลองในครั้งนี้ใช้การออกแบบการทดลองทางสถิติแบบพื้นที่ตอบสนองพื้นที่ผิว แผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) โดยศึกษาการหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่มีผลต่อน้ำหนักสดของคะน้าโดยทำการศึกษาปัจจัยหลักจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (เปอร์เซ็นต์) ปริมาณการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (มิลลิลิตรต่อต้น) และความถี่ในการใส่ (วัน) ซึ่งในแต่ละปัจจัยมีการแปรผันระดับปัจจัยเป็น 5 ระดับ ได้แก่ ระดับลบแอลฟา ($-\alpha$) ระดับต่ำ (low level) ระดับกลาง (medium level) ระดับสูง (high level) และระดับแอลฟา (α) ดังที่แสดงไว้ในตารางที่ 1และชุดการทดลองการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของคะน้า โดยใช้การออกแบบการทดลองทางสถิติ Central Composite Design (CCD)โดยทำการอาศัยแบบจำลองเต็มรูปแบบ (full model) ดังสมการที่ 4.1

$$Y = \beta_o + \Sigma \beta_i X_i$$

Y = Resposnse

β_o = the Model Intercept

β_i = the Linear Coefficient

X_i = the Level of the Independent Variable (4.1)

โดยใช้การออกแบบการทดลองทางสถิติแบบส่วนผสมกลางดังที่แสดงไว้ใน ตารางที่ 4.1 กำหนดค่าตอบสนอง (response) คือ น้ำหนักสดของคะน้า

ตารางที่ 4.1 ระดับของปัจจัยในการออกแบบการทดลองทางสถิติแบบส่วนผสมกลาง

Code	Variable	Parameter value				
		-α	Low	Medium	High	α
X_1	ความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (เปอร์เซ็นต์)	3.18	10.00	20.00	30.00	36.82
X_2	ปริมาณการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (มิลลิลิตรต่อต้น)	53.18	60.00	70.00	80.00	86.82
X_3	ความถี่ในการใส่ (วัน)	3.00	4.00	6.00	8.00	9.00

ทำการให้ปุ๋ยอินทรีย์น้ำแก่คะน้าครั้งแรกเมื่อคะน้าอายุ 14 วัน โดยการรดที่โคนต้นที่ความเข้มข้นตามที่ได้ออกแบบไว้ใน ตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การให้ปุ๋ยอินทรีย์น้ำตามการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง ตามระดับของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (X_1), ปริมาณการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (X_2) ความถี่ในการใส่ (X_3)

Run	X_1 (Code)	X_1 (Observed)	X_2 (Code)	X_2 (Observed)	X_3 (Code)	X_3 (Observed)
1	-1.682	3.18	0.000	70.00	0.000	6.00
2	0.000	20.00	0.000	70.00	0.000	6.00
3	0.000	20.00	0.000	70.00	0.000	6.00
4	1.000	30.00	-1.000	60.00	1.000	8.00
5	1.000	30.00	-1.000	60.00	-1.000	4.00
6	0.000	20.00	0.000	70.00	0.000	6.00
7	0.000	20.00	0.000	70.00	-1.682	3.00
8	0.000	20.00	0.000	70.00	0.000	6.00
9	-1.000	10.00	-1.000	60.00	-1.000	4.00
10	-1.000	10.00	1.000	80.00	-1.000	4.00
11	0.000	20.00	-1.682	53.18	0.000	6.00
12	-1.000	10.00	1.000	80.00	1.000	8.00
13	0.000	20.00	0.000	70.00	1.682	9.00
14	1.682	36.82	0.000	70.00	0.000	6.00

Run	X_1 (Code)	X_1 (Observed)	X_2 (Code)	X_2 (Observed)	X_3 (Code)	X_3 (Observed)
15	1.000	30.00	1.000	80.00	-1.000	4.00
16	0.000	20.00	0.000	70.00	0.000	6.00
17	0.000	20.00	1.682	86.82	0.000	6.00
18	0.000	20.00	0.000	70.00	0.000	6.00
19	-1.000	10.00	-1.000	60.00	1.000	8.00
20	1.000	30.00	1.000	80.00	1.000	8.00

หมายเหตุ -1.682= -α level, -1=Low level, 0=Medium level, 1=High level, 1.682= α level

การบันทึกผลการทดลอง

บันทึกข้อมูลน้ำหนักสดทั้งต้นของคะน้าเมื่ออายุครบ 45 วัน โดยทำการถอนพร้อมราก และชั่งน้ำหนักในหน่วยกรัมต่อต้น

การวิเคราะห์ข้อมูล

โดยการบันทึกข้อมูลน้ำหนักสดของคะน้า และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Design Expert โดยการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง

การพิสูจน์แบบจำลอง

ทำการพิสูจน์แบบจำลองภายหลังจากที่ได้สภาวะที่เหมาะสมต่อค่าตอบสนอง (Response) คือ น้ำหนักสดของคะน้าโดยทำการทดลองซ้ำอีกครั้งจำนวน 1 การทดลอง 6 สภาวะได้แก่ ระดับเหมาะสม (Optimum) ระดับสูง (High) ระดับกลาง (Medium) ระดับต่ำ (Low) การใส่ปุ๋ยยูเรีย (Add urea) และไม่ใส่ปุ๋ยยูเรีย (Control) สภาวะละ 3 ซ้ำ

ผลการวิจัย

ผลของปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักสดคะน้า (Y) จากการทดลองครั้งนี้ ได้แก่ ความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (X_1), ปริมาณการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (X_2) ความถี่ในการใส่ (X_3) สามารถเขียนเป็นสมการถดถอยได้ดังนี้

$$Y = 98.64+12.15X_1+9.55X_2+3.82X_3+7.19X_1X_2-5.38X_1X_3-1.82X_2X_3-16.25X_1^2-10.80X_2^2-12.25X_3^2$$

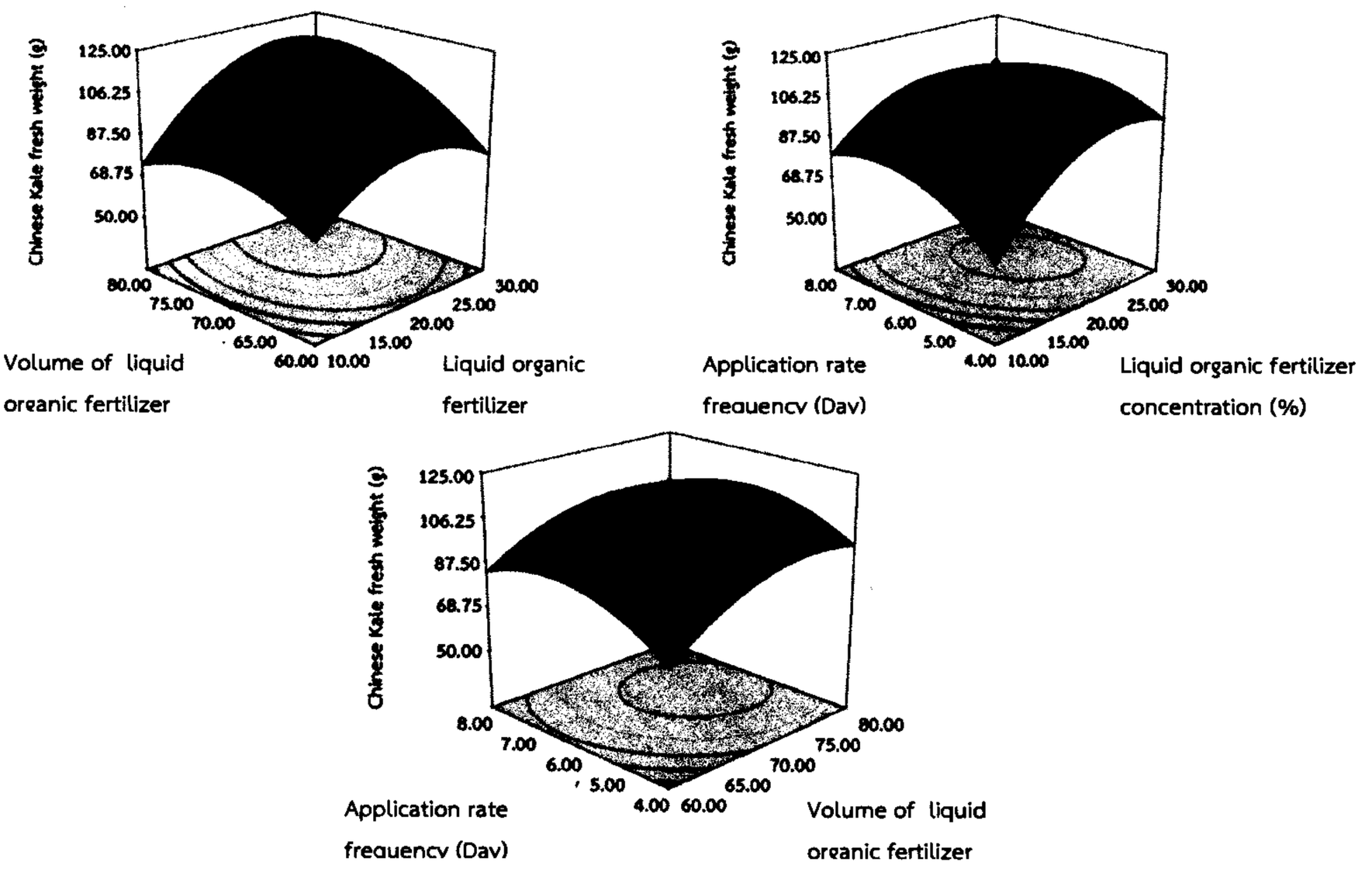
การวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมการแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษา และค่าการตอบสนองต่อการใช้ปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่มีต่อน้ำหนักสดของคะน้าที่ค่าความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 4.3) โดยใช้แผนการทดลองแบบส่วนผสมกลางมีค่า R^2 เท่ากับร้อยละ 98.86 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการอธิบายความแปรปรวนที่มีต่อการตอบสนองดังสมการที่ได้ โดยสามารถนำไปใช้ในการอธิบายผลการทดลองได้ใกล้เคียงกับค่าจริงในการทดลองใช้ปุ๋ยอินทรีย์น้ำที่มีต่อน้ำหนักสดของคะน้าถึงร้อยละ 98.85 ค่าความไม่เหมาะสมของแบบจำลองกับผลการทดลอง (Lack of fit) พบว่าไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ (P=0.0901) แสดงว่าแบบการทดลองที่ใช้มีความเหมาะสมกับโมเดลที่ใช้ในการทดสอบและเมื่อพิจารณาถึงปัจจัยหลักที่คาดว่าจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตของคะน้าได้แก่ ความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (เปอร์เซ็นต์) ปริมาณการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (มิลลิลิตรต่อต้น) และความถี่ในการใส่ (วัน) พบว่าปัจจัยทั้ง 3 ส่งผลต่อน้ำหนักสดของคะน้าที่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 4.3 แสดงการวิเคราะห์ผลทางสถิติของสมการแสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่ศึกษา และค่าการตอบสนองต่อการใช้ปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่มีต่อน้ำหนักสดของคะน้า

Source	Sum of squares	Mean square	P value
Model	10572.50	1174.67	0.0011*
X_1	1967.90	1976.90	0.0033*
X_2	1249.03	1249.03	0.0124*
X_3	202.40	202.40	0.0248*
X_1X_2	416.16	416.16	0.1093
X_1X_3	231.13	231.13	0.2195
X_2X_3	26.72	26.72	0.6655
X_1^2	3812.76	3812.76	0.0003*
X_2^2	1689.62	1689.62	0.0053*
X_3^2	2176.68	2176.68	0.0024*
Residual	1347.02	134.70	
Lack of fit	1058.33	211.67	0.0901
Pure error	288.69	57.74	
R^2	0.99		

หมายเหตุ * ($P<0.05$)

ภาพที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงน้ำหนักสดของคะน้าที่ได้จากการทดลองต่ำสุดอยู่ที่ 38.62 กรัม และสูงสุดอยู่ที่ 96.58 กรัม น้ำหนักสดของคะน้าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำตั้งแต่ 10.00 เปอร์เซ็นต์ ถึง 26.29 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่น้ำหนักสดของคะน้าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำสูงกว่า 26.29 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักสดของคะน้าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณในการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ ตั้งแต่ 60.00 มิลลิลิตรต่อต้น ถึง 74.13 มิลลิลิตรต่อต้น ในขณะที่น้ำหนักสดของคะน้าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณในการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำสูงกว่า 74.13 มิลลิลิตรต่อต้น น้ำหนักสดของคะน้าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่ในการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำตั้งแต่ 4.00 ถึง 6.00 วัน และน้ำหนักสดของคะน้าลดลงเมื่อเพิ่มความถี่ในการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำสูงกว่า 6.00 วัน



ภาพที่ 4.1 แสดงผลการตอบสนองต่อพื้นที่ผิวที่มีต่อน้ำหนักสดคะน้าจากปัจจัยแต่ละระดับของความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (X_1), ปริมาณการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ (X_2) ความถี่ในการใส่ (X_3)

จากผลการทดลองพบว่าการให้ความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ 26.29 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณในการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ 74.13 มิลลิลิตรต่อต้น และความถี่ในการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ 6.00 วัน ส่งผลให้น้ำหนักสดของคะน้าสูงสุดภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากสมการการทำนายจะได้น้ำหนักสดของคะน้า 98.64 กรัม ในขณะที่น้ำหนักสดของคะน้าที่ได้จากการทดลองอยู่ที่ 96.58 กรัม (ตารางที่ 4.4) ซึ่งค่าที่ได้มีความแตกต่างจากสมการเพียงร้อยละ 1.15

ตารางที่ 4.4 การพิสูจน์แบบจำลอง

Condition	Liquid organic fertilizer concentration (%)	Volume of liquid organic fertilizer (mL/plant)	Application rate frequency (Day)	Fresh weight (g)	
				Predicted	Observed
Optimum	26.29	74.13	6.00	98.64	96.58
High	30.00	80.00	8.00	-	78.51
Medium	20.00	70.00	6.00	-	90.62
Low	10.00	60.00	4.00	-	5.86
Add uria	-	-	-	-	107.03
Control	-	-	-	-	39.68

อภิปรายผลการวิจัย

การใช้ปุ๋ยในการเพาะปลูกพืชต้องใช้ในความเข้มข้นที่เหมาะสมกับพืช เพื่อให้พืชได้รับปริมาณธาตุอาหารอย่างเพียงพอส่งผลให้พืชเจริญเติบโตได้ดี (Anugoolprasert & Rithichai, 2015) และไม่เป็นอันตรายต่อต้นพืชจากความเข้มข้นที่สูงเกินไป ซึ่งหากพืชได้รับปุ๋ยในความเข้มข้นมากเกินไปจะทำให้ธาตุอาหารเป็นอันตรายต่อพืช ส่งผลให้พืชเจริญเติบโตช้าลง (Editorial board of nature farming journal, 2007) โดยจะทำให้ในเซลล์พืชมีความเข้มข้นของธาตุอาหารสูง การตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และการสังเคราะห์แสงจะลดลง ส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตลดลง (Osotspa, 2014) นอกจากนั้นความถี่ในการใส่ปุ๋ยให้กับพืชก็เป็นปัจจัยที่สำคัญเนื่องจากหากใส่ในปริมาณที่เหมาะสมต่อความต้องการของพืชจะทำให้พืชมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น (Prayoonrat & Dangnongpan, 2006) หากความถี่ในการใส่ปุ๋ยสูงเกินไปจะทำให้จำนวนครั้งในการใส่ปุ๋ยลดลง ทำให้พืชได้รับธาตุอาหารน้อยจนขาดแคลนส่งผลให้การเจริญเติบโตของพืชหยุดชะงักหรือเจริญเติบโตช้าลง (Treelokes, 2013)

จากการวิจัยพบว่าปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพสามารถส่งผลให้น้ำหนักสดของคะน้าใกล้เคียงกับการใช้ปุ๋ยเคมี แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่สามารถใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารพืชที่สำคัญและมีต้นทุนต่ำ

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการทดลอง การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่มีต่อผลผลิตคะน้า ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณของเสียเหลือทิ้ง และนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ และหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่มีต่อผลผลิตคะน้าโดยออกแบบการทดลองทางสถิติแบบส่วนผสมกลางพบว่า สภาวะของปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเพิ่มปริมาณน้ำหนักสดของคะน้า คือ ความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ 26.29 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณในการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ 74.13 มิลลิลิตรต่อต้น และความถี่ในการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ 6.00 วัน ส่งผลให้ได้น้ำหนักสดของคะน้าเท่ากับ 96.58 กรัม ซึ่งผลจากการวิจัยสามารถนำของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารซึ่งเป็นของเสียเหลือทิ้งมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการนำมาผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำ ซึ่งสามารถเป็นแนวทางในการลดปริมาณของเสียดังกล่าวสู่สิ่งแวดล้อมได้

ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมด้านอื่น ๆ เช่น ด้านการตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ และด้านสุขภาวะหลังการบริโภคผักคะน้าที่ใช้ปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพรด จึงจะสามารถแนะนำให้เกษตรกรนำไปปฏิบัติได้อย่างถูกต้องปลอดภัย

บรรณานุกรม

ชมรมเพื่อนเกษตร. 2544. รวมสูตรการผลิตชีวภาพเพื่อชีวิต. วารสารเพื่อนเกษตร อำเภอวิเศษชัยชาญ จังหวัดอ่างทอง.

ชมรมเกษตรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2544. เกษตรออแกนิคและสิ่งแวดล้อม โดยเทคนิคน้ำสกัดชีวภาพ (Bioextract;BE) กองพัฒนาการบริหารงานเกษตร กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.

ศรีวรรณ รื่นเริง. 2542. ชนิดและประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ที่พบในปุ๋ยหมัก วัสดุเหลือใช้และหัวเชื้อตัวเร่งชนิดต่าง ๆ. ปัญหาพิเศษปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาปฐพีศาสตร์และอนุรักษศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สมเกียรติ สุวรรณคีรี จตุรงค์ พวงมณี จำลอง โพธาเจริญ และสิทธิชัย ลอดแก้ว. 2545. การวิจัยและพัฒนาน้ำสกัดชีวภาพเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตร. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สมเกียรติ สุวรรณคีรี. 2546. ผลของการใช้น้ำสกัดชีวภาพต่อผลผลิตผักกาดคะน้า. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

Anugoolprasert, O. & Rithichai, P. (2015). Effect of high quality organic fertilizer on yield and quality of lettuce, **Thai Journal of Science and Technology**, 4, 81-94.

Editorial board of nature farming journal. (2007). Human urine substitute chemical fertilizers are good for the environment. **Nature Farming Journal**, 10, 27-37.

Osotspa, Y. (2014). **Foliar Fertilizers**. Bangkok, Faculty of Agriculture, Kasetsart University.

Prayoonrat, P. & Dangnongpan, Y. (2006). Effect of enzyme ionic plasma concentration on growth of brassica pekinensis. **Burapha Science Journal**, 11, 78-85.

Treelokes, R. (2013). Effect of fertilizers application on growth and yield of some vegetable crops. **Prawarun Agriculture Journal**, 10, 19-27.

บทที่ 5
อภิปรายผล สรุปและข้อเสนอแนะ

แผนการวิจัยเรื่อง นวัตกรรมการบูรณาการการใช้ประโยชน์จากเศษอาหารแบบครบวงจร แบ่งออกเป็น 3 โครงการวิจัยหลัก คือ 1) การศึกษาชนิดและความเข้มข้นของพีเอชบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพจากขยะเศษอาหาร 2) การออกแบบชุดผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารสำหรับชุมชน 4.0 และ 3) การหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่มีต่อผลผลิตคะน้า สามารถอภิปรายผลการวิจัย สรุปผลการวิจัย และมีข้อเสนอแนะจากการวิจัย ดังนี้

อภิปรายผลการวิจัยของแผนงานวิจัย

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า ปริมาณเศษอาหารที่เติมลงไปในกระบวนการผลิตแก๊สมีเทน ส่งผลกระทบโดยตรงต่อค่า pH ของกระบวนการหมัก ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่ออัตราการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหาร เนื่องจากเศษอาหารเป็นสับสเตรทที่มีองค์ประกอบหลักเป็นคาร์โบไฮเดรต จึงสามารถถูกย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยง่าย (VFAs) สะสมอยู่ในกระบวนการหมักได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ค่า pH ลดต่ำลงมาก จนส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Zhao et al., 2008) ซึ่งในทางปฏิบัติแล้ว การคำนวณปริมาณเศษอาหารที่เติมเข้าสู่ระบบต่อวันอาจเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เมื่อชุมชนต้องเป็นผู้ปฏิบัติด้วยตนเอง ดังนั้น การใช้บัฟเฟอร์ในการควบคุมค่า pH ของกระบวนการหมัก จึงเป็นสิ่งหนึ่งที่จะช่วยรักษาเสถียรภาพของกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนให้คงที่ และลดความเสี่ยงในการล้มเหลวได้ จากการวิจัย พบว่า ชนิดและความเข้มข้นของบัฟเฟอร์เป็นปัจจัยสำคัญต่อค่า pH และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหาร ซึ่งการใช้บัฟเฟอร์ชนิดสารเคมี ได้แก่ $NaHCO_3$ และ $CaCO_3$ มีประสิทธิภาพในการรักษาระดับ pH ของกระบวนการหมักได้ดี แต่มีข้อจำกัดในด้านความเข้มข้นของการใช้ เนื่องจากประจุโซเดียม (Na^+) ที่แตกตัวออกมาจากบัฟเฟอร์ในปริมาณสูง จะส่งผลยับยั้งต่อกระบวนการเปลี่ยนกรดโพรพิโอนิกไปเป็นกรดอะซิติกให้เกิดได้ยากขึ้น ทำให้เกิดการสะสมของกรดโพรพิโอนิกในน้ำหมัก และส่งผลกระทบโดยตรงต่อการผลิตแก๊สมีเทน (Chen et al., 2008) นอกจากนี้ ประจุ Ca^+ ยังส่งผลต่อกระบวนการหมักแบบไร้อากาศในด้านการตกตะกอนจับตัวเป็นหินปูนและอุดตันระบบบำบัดน้ำเสีย (van Langerak et al., 1998) ส่งผลให้เกิดปัญหาในระยะยาวได้

เมื่อใช้เหล็กวาเลนซ์ศูนย์เป็นบัฟเฟอร์ในกระบวนการผลิตมีเทน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สมีเทนให้สูงขึ้นได้ เนื่องจากเหล็กวาเลนซ์ศูนย์มีคุณสมบัติในการเป็นบัฟเฟอร์ที่ดี โดยจะช่วยดักจับประจุไฮโดรเจนอิออน (H^+) ที่เกิดจาก VFAs จากกระบวนการหมัก จึงเป็นการควบคุมค่า pH ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด โดยประจุ H^+ ที่จับกับเหล็กวาเลนซ์ศูนย์จะเกิดเป็น

แก๊สไฮโดรเจน จากนั้นแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น จะถูกแบคทีเรียในกลุ่ม hydrogenotrophic methanogens นำไปใช้ในการผลิตเป็นแก๊สมีเทน นอกจากนี้ เหล็กวาเลนซ์ศูนย์ยังมีส่วนช่วยในการลดค่าศักยภาพในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน (oxidation-reduction potential; ORP) โดยที่ค่า ORP เป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดปัจจัยหนึ่งของกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งโดยปกติแล้วค่า ORP ที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนควรมีค่าอยู่ในช่วง -350 mV หรือต่ำกว่า (Khanal & Huang, 2003) จึงจะแสดงถึงสภาวะไร้อากาศอย่างสมบูรณ์ (Strictly anaerobic condition) โดยที่ตัวของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์เองนั้น มีค่าศักยภาพในการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนอยู่ที่ -440 mV (Xiao et al., 2013) จึงทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) ที่มีประสิทธิภาพและสามารถจับกับตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agents) เช่น ออกซิเจน ที่อยู่ในกระบวนการหมักได้ ส่งผลให้ค่า ORP ลดต่ำลง และส่งผลดีต่อกระบวนการสร้างแก๊สมีเทน แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ความเข้มข้นของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ในระดับที่สูงเกินไป ส่งผลเสียต่อกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตมีเทนลดลง เนื่องจากปฏิกิริยารีดิวซ์ของเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก จะก่อให้เกิดประจุ Fe^{2+} ที่สามารถรวมตัวกับสารประกอบในกลุ่มไฮดรอกซิล และออกซิเจนที่ละลายในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบคอลลอยด์ได้หลายชนิด เช่น $Fe(OH)_2$, $Fe(OH)_3$, $Fe(H_2O)_x^{2+}$ และ $Fe(H_2O)_x^{3+}$ (Noubactep, 2008) และยังสามารถเกิดเป็นออกไซด์ของเหล็ก เช่น FeOOH และ Fe_3O_4 (Zhu et al., 2014) ซึ่งสารประกอบเหล่านี้ หากมีอยู่ในปริมาณที่เหมาะสม จะช่วยส่งเสริมปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างเซลล์แบคทีเรียได้ แต่หากมีอยู่ในปริมาณที่มากเกินไป อาจส่งผลให้เกิดเป็นตะกอนจับอยู่บริเวณผนังเซลล์แบคทีเรีย และส่งผลให้เซลล์ถูกทำลายได้ (Watanabe et al., 2013)

ในขณะที่การใช้ถ่านกัมมันต์เป็นบัฟเฟอร์นั้น ช่วยรักษาระดับ pH และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนได้อย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกับบัฟเฟอร์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากคุณสมบัติด้านความพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ ช่วยในการดูดซับ VFAs ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ และรักษาระดับ pH ของน้ำหมักให้เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด (Peng et al., 2018) นอกจากนี้ การใช้ถ่านกัมมันต์เป็นบัฟเฟอร์ยังส่งผลกระทบทางลบต่อกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับการใช้บัฟเฟอร์ชนิดอื่นๆ ถึงแม้ว่าการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นบัฟเฟอร์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนได้ไม่เท่ากับเหล็กวาเลนซ์ศูนย์ก็ตาม เนื่องจากเมื่อดูจากผลการทดลองแล้ว พบว่า สามารถใช้ถ่านกัมมันต์เป็นบัฟเฟอร์ได้ในความเข้มข้นที่สูงถึง 90 g/L ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุด และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นไปที่ระดับ 150 g/L พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตมีเทนมีค่าลดลงเล็กน้อย (ประมาณ 14%) ทั้งนี้คาดว่าเป็นเพราะการเติมถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนที่สูง ส่งผลให้ค่าของแข็งรวมของน้ำหมักมีค่าที่สูงขึ้น ทำให้อัตราการแลกเปลี่ยนมวลสาร (Mass transfer rate) ระหว่างจุลินทรีย์กับสับสเตรทมีค่าที่ลดลง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือน้ำหมักมีค่าความหนืดที่สูงขึ้น ทำให้ความสามารถในการผสมกันระหว่างจุลินทรีย์กับสับสเตรทลดน้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตมีเทนต่ำลง แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่ปรากฏผลกระทบในด้านอื่นๆ ที่ชัดเจน และจากการสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่า ยังไม่มีรายงานผลกระทบ

ทางลบที่ชัดเจนของการใช้ถ่านกัมมันต์ในอัตราส่วนสูง นอกจากผลกระทบด้านการทำให้ค่าของแข็งรวมของน้ำหมักมีค่าที่สูงขึ้น ดังที่กล่าวมาข้างต้น นอกจากนี้ ในด้านของคุณภาพน้ำหมักจากกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหาร พบว่า ทรีทเมนต์ที่มีการใช้ถ่านกัมมันต์ในกระบวนการหมัก ลักษณะของน้ำหมักจะมีสีค่อนข้างใส และไม่มีกลิ่นเหม็น ทำให้น้ำทิ้งจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศที่มีการเติมถ่านกัมมันต์ ไม่จำเป็นต้องผ่านกระบวนการปรับสภาพหลายขั้นตอนก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติ จึงส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติในการดูดซับที่ดี จึงช่วยดูดซับสีและกลิ่นของน้ำหมักได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งโดยปกติแล้วถ่านกัมมันต์มีการนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านสิ่งแวดล้อมได้หลายประการ เช่น ดูดซับกลิ่น ดูดซับโลหะหนัก ดูดซับสีในน้ำ (Menya et al., 2018)

เมื่อเพิ่มขนาดถังหมักจากระดับห้องปฏิบัติการมาเป็นถังหมักขนาดครัวเรือน ปริมาตรทำงาน 1,000 ลิตร พบว่า สามารถรองรับปริมาณเศษอาหารได้ประมาณวันละ 3-5 กิโลกรัม ขึ้นอยู่กับเสถียรภาพของระบบในขณะนั้น ซึ่งถือว่าเพียงพอต่อการใช้งานในระดับครัวเรือน โดยเมื่อมีการใช้บัฟเฟอร์จะช่วยรักษาระดับ pH ของน้ำหมักได้ดีขึ้น ซึ่งในการวิจัยนี้ มีการทดสอบบัฟเฟอร์ 2 ชนิด คือ ปูนขาว และถ่านกัมมันต์ ผลการวิจัยพบว่า มีประสิทธิภาพในการควบคุมระดับ pH ของน้ำหมักได้ใกล้เคียงกัน และเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายในชุมชน แต่อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติจริงแล้ว ถ่านกัมมันต์อาจมีข้อจำกัดในด้านความรวดเร็วในการปรับค่า pH ในกรณีที่มีความผันผวนของค่า pH ในระบบ จากการเติมเศษอาหารคราวละมากๆ จนเกิดกรดไขมันระเหยง่ายสะสมในปริมาณสูง เนื่องจากการใช้ถ่านกัมมันต์ ต้องใช้ในปริมาณที่เพียงพอ และต้องใช้ระยะเวลาในการดูดซับกรดไขมันระเหยง่ายที่สะสมอยู่ในระบบ เพื่อปรับค่า pH ให้ใกล้เคียงกับค่าที่เป็นกลาง แต่จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าปูนขาว หรือ $CaCO_3$ มีประสิทธิภาพในการปรับค่า pH ให้ใกล้เคียง 7.0 ได้รวดเร็วกว่าถ่านกัมมันต์ โดยใช้ในปริมาณที่ต่ำกว่า ดังนั้น ในทางปฏิบัติจริง จึงควรให้ชุมชนใช้ปูนขาวในขั้นตอนการเริ่มกระบวนการหมัก เนื่องจากจะมีความผันผวนของค่า pH สูง และเมื่อระบบเริ่มผลิตแก๊สชีวภาพได้อย่างคงที่แล้ว จึงใช้ถ่านกัมมันต์เติมลงไปในระบบ เพื่อรักษาระดับ pH ในระยะยาว โดยมีผลกระทบทางลบต่อจุลินทรีย์น้อยกว่าการใช้ปูนขาว

นอกจากนี้ กากตะกอนและน้ำทิ้งจากกระบวนการหมัก ยังสามารถนำมาใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้ โดยผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่า กากตะกอนของเสียจากกระบวนการผลิตมีเทนจากเศษอาหาร เมื่อนำมาหมักร่วมกับน้ำกากส่าแล้ว จะช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตให้กับพืชที่ปลูกได้ โดยต้องใช้ในระดับความเข้มข้นและในปริมาณที่เหมาะสม เนื่องจากการใช้ปุ๋ยในการเพาะปลูกพืช ต้องใช้ในความเข้มข้นที่เหมาะสมกับพืช เพื่อให้พืชได้รับปริมาณธาตุอาหารอย่างเพียงพอส่งผลให้พืชเจริญเติบโตได้ดี (Anugoolprasert & Rithichai, 2015) และไม่เป็นอันตรายต่อต้นพืชจากความเข้มข้นที่สูงเกินไป ซึ่งหากพืชได้รับปุ๋ยในความเข้มข้นมากเกินไปจะทำให้ธาตุอาหารเป็นอันตรายต่อพืช ส่งผลให้พืชเจริญเติบโตช้าลง (Editorial board of nature farming journal, 2007) โดยจะทำให้ในเซลล์พืชมีความเข้มข้นของธาตุอาหารสูง การตรึงคาร์บอนไดออกไซด์และการสังเคราะห์แสงจะลดลง ส่งผลให้พืชมีการเจริญเติบโตลดลง (Osotspa, 2014) นอกจากนั้น ความถี่ในการใส่ปุ๋ยให้กับพืชก็เป็น

ปัจจัยที่สำคัญเนื่องจากหากใส่ในปริมาณที่เหมาะสมต่อความต้องการของพืชจะทำให้พืชมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น (Prayoonrat & Dangnongpan, 2006) หากความถี่ในการใส่ปุ๋ยสูงเกินไปจะทำให้จำนวนครั้งในการใส่ปุ๋ยลดลง ทำให้พืชได้รับธาตุอาหารน้อยจนขาดแคลนส่งผลให้การเจริญเติบโตของพืชหยุดชะงักหรือเจริญเติบโตช้าลง (Treelokes, 2013) จากการวิจัยพบว่า ปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพสามารถส่งผลให้น้ำหนักสดของคะน้าใกล้เคียงกับการใช้ปุ๋ยเคมี แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่สามารถใช้เป็นแหล่งธาตุอาหารพืชที่สำคัญและมีต้นทุนต่ำ

สรุปผลการวิจัย

ถ่านกัมมันต์เป็นบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนจากเศษอาหาร เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น และมีประสิทธิภาพสูงในการรักษาระดับ pH ของน้ำหมัก โดยความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่สุด คือ 90 g/L หรือคิดเป็นอัตราส่วนของถ่านกัมมันต์ต่อเศษอาหารเท่ากับ 3:1 ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนได้สูงที่สุด และถึงแม้ว่าจะใช้ความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ที่สูงถึง 150 g/L ก็ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตมีเทนเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์มีผลกระทบต่ำต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ เมื่อเทียบกับการใช้บัฟเฟอร์ชนิดอื่นๆ และเมื่อทดลองเพิ่มขนาดกระบวนการผลิตขึ้นในระดับครัวเรือน พบว่า ระบบสามารถรองรับเศษอาหารได้ในปริมาณ 3-5 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานในระดับครัวเรือน และสามารถใช้บัฟเฟอร์ที่เป็นปูนขาวหรือถ่านกัมมันต์ได้ โดยมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ กากตะกอนและน้ำทิ้งจากกระบวนการหมัก ยังสามารถนำมาผลิตปุ๋ยอินทรีย์น้ำเพื่อใช้ประโยชน์ทางการเกษตรได้ โดยผลการทดลองพบว่า สภาวะของปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเพิ่มปริมาณน้ำหนักสดของคะน้า คือ ความเข้มข้นของปุ๋ยอินทรีย์น้ำ 26.29 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณในการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ 74.13 มิลลิลิตรต่อต้น และความถี่ในการใส่ปุ๋ยอินทรีย์น้ำ 6.00 วัน ส่งผลให้ได้น้ำหนักสดของคะน้าเท่ากับ 96.58 กรัม

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการวิจัยเชิงลึกเพิ่มเติมถึงอัตราส่วนที่เหมาะสม และผลกระทบต่างๆ ที่เกิดจากการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นบัฟเฟอร์

2. ควรศึกษาประสิทธิภาพของถังหมักแก๊สมีเทนจากเศษอาหารในระยะยาว เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการปรับปรุงและพัฒนาสำหรับการใช้งานในเชิงพาณิชย์ต่อไป

3. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากกากตะกอนและน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแก๊สมีเทนด้านอื่นๆ เช่น การตรวจสอบเชื้อจุลินทรีย์ปนเปื้อนในปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ และด้านสุขภาวะหลังการบริโภคผักคะน้าที่ใช้ปุ๋ยอินทรีย์น้ำจากของเสียกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพรด จึงจะสามารถแนะนำให้เกษตรกรนำไปปฏิบัติได้อย่างถูกต้องปลอดภัย

บรรณานุกรมรวม

American Public Health Association. (1995). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19th ed. Washington D.C.: American Public Health Association.

Anugoolprasert, O. & Rithichai, P. (2015). Effect of high quality organic fertilizer on yield and quality of lettuce, **Thai Journal of Science and Technology**, 4, 81-94.

Appels, L., Assche, A.V., Willems, K., Degrève, J., Impe, J.V., Dewil, R. (2011). Peracetic acid oxidation as an alternative pre-treatment for the anaerobic digestion of waste activated sludge. **Bioresource Technology, 102(5)**, 4124-4130.

Chen, Y., Cheng, J.J., Creamer, K.S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: a review. **Bioresource Technology, 99**, 4044-4064.

Editorial board of nature farming journal. (2007). Human urine substitute chemical fertilizers are good for the environment. **Nature Farming Journal**, 10, 27-37.

Feng, Y., Zhang, Y., Quan, X., Chen, S. (2014). Enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge digestion by the addition of zero valent iron. **Water Research, 52,** 242-250.

Gao, S., Huang, Y., Yang, L., Wang, H., Zhao, M., Xu, Z., Huang, Z., Ruan, W. (2015). Evaluation the anaerobic digestion performance of solid residual kitchen waste by $NaHCO_3$ buffering. **Energy Conversion and Management, 93**, 166-174.

Jackson-Moss, C.A., Duncan, J.R., Cooper, D.R. (1989). The effect of calcium on anaerobic digestion. **Biotechnology Letters, 11(3)**, 219-224.

Kaewchung Utai, Sutabutr Harit. (1984). Use of biogas as supplementary fuel for a diesel engine. Regional Seminar on Simulation & Design in Solar Energy Applications.

Kannika Rengsirikul, Yasuyuki Ishii, Kunn Kangvansaichol, Prapa Sripichitt, Vittaya Punsuvon, Pilanee Vaithanomsat, Ganda Nakamanee, and Sayan Tudsri. (2013). Biomass Yield, Chemical Composition and Potential Ethanol Yields of 8 Cultivars of Napiergrass (Pennisetum purpureum Schumach.) Harvested 3-Monthly in Central Thailand. Journal of Sustainable Bioenergy Systems. 3(2), 107-112.

Karri, S., Sierra-Alvarez, R., Field, J.A. (2005). Zero valent iron as an electron-donor for methanogenesis and sulfate reduction in anaerobic sludge. **Biotechnology and Bioengineering, 92**, 810-819.

Khanal, S.K., & Huang, J. (2003). ORP-based oxygenation for sulfide control in anaerobic treatment of high-sulfate wastewater. **Water Research, 37**, 2053-2062.

Kugelman, I.J., Chin, K.K. (1971). Toxicity, synergism, and antagonism in anaerobic waste treatment processes. **American Chemical Society Advances in Chemistry Series, 105**, 55-90.

Kugelman, I.J., McCarty, P.L. (1964). Cation toxicity and stimulation in anaerobic waste treatment. **Journal of the Water Pollution Control Federation, 37**, 97-116.

Lin, Y.C., Lu, F., Shao, L.M., He, P.J. (2013). Influence of bicarbonate buffer on the methanogenetic pathway during thermophilic anaerobic digestion. **Bioresource Technology, 137**, 245-253.

Lü, F., Luo, C., Shao, L., He, P. (2016). Biochar alleviates combined stress of ammonium and acids by firstly enriching *Methanosaeta* and then *Methanosarcina*. **Water Research, 90**, 34–43.

Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M., Fonoll, X., Pecesa, M., Astals, S. (2014). A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable & Sustainable Energy Reviews, 36**, 412–427.

Menya, E., Olupot, P.W., Storzc, H., Lubwamaa, M., Kiros, Y. (2018). Production and performance of activated carbon from rice husks for removal of natural organic matter from water: A review. **Chemical Engineering Research and Design, 129**, 271–296.

Mumme, J., Srocke, F., Heeg, K., Werner, M. (2014). Use of biochars in anaerobic digestion. **Bioresource Technology, 164**, 189-197.

Noubactep, C. (2008). A critical review on the process of contaminant removal in Fe0–H_2O systems. **Environmental Technology, 29**, 909–920.

Osotspa, Y. (2014). **Foliar Fertilizers**. Bangkok, Faculty of Agriculture, Kasetsart University.

Patel, G.B., Roth, L.A. (1977). Effect of sodium chloride on growth and methane production of methanogens. **Canadian Journal of Microbiology, 23**, 893-897.

Peng, H., Zhang, Y., Tan, D., Zhao, Z., Zhao, H., Quan, X. (2018). Roles of magnetite and granular activated carbon in improvement of anaerobic sludge digestion. **Bioresource Technology, 249**, 666-672.

Prayoonrat, P. & Dangnongpan, Y. (2006). Effect of enzyme ionic plasma concentration on growth of brassica pekinensis. **Burapha Science Journal**, 11, 78-85.

Shen, Y., Linville, J.L., Urgun-Demirtas, M., Schoene, R.P., Snyder, S.W. (2015). Producing pipeline-quality biomethane via anaerobic digestion of sludge amended with corn stover biochar with in-situ CO_2 removal. **Applied Energy, 158**, 300-309.

Sittiboon Siripornakarachai and Thawan Sucharitakul. (2006). Tuning of MultiValve Automotive Engine for Electricity Production Fueled by Biogas. International Conference on Green and Sustainable Innovation (ICGSI 2006).

Sittiboon Siripornakarachai and Thawan Sucharitakul. (2007). Modification of Diesel Engine for Electricity Production Fueled by Biogas. 6TH Asia Pacific Conference on Sustainable Energy and Environmental Technologies (APCSEET 2007).International Conference.

Treelokes, R. (2013). Effect of fertilizers application on growth and yield of some vegetable crops. **Prawarun Agriculture Journal**, 10, 19-27.

van Langerak, E.P.A., Gonzales-Gil, G., van Aelst, A., van Lier, J.B., Hamelers, H.V.M., Lettinga, G. (1998). Effects of high calcium concentrations on the development of methanogenic sludge in upflow anaerobic sludge bed (UASB) reactors. **Water Research, 32(4)**, 1255-1263.

Wang, D., Ai, J., Shen, F., Yang, G., Zhang, Y., Deng, S., Zhang, J., Zeng, Y., Song, C. (2017). Improving anaerobic digestion of easy-acidification substrates by promoting buffering capacity using biochar derived from vermicompost. **Bioresource Technology, 227**, 286-296.

Wang, G., Li, Q., Gao, X., Wang, X.C. (2018). Synergetic promotion of syntrophic methane production from anaerobic digestion of complex organic wastes by biochar: performance and associated mechanisms. **Bioresource Technology, 250**, 812-820.

Wang, Y., Zang, B., Gong, X., Liu, Y., Li, G. (2017). Effects of pH buffering agents on the anaerobic hydrolysis acidification stage of kitchen waste. **Waste Management, 68**, 603-609.

Watanabe, M., Yoneda, M., Morohashi, A., Hori, Y., Okamoto, D., Sato, A., Kurioka, D., Nittami, T., Hirokawa, Y., Shiraishi, T., Kawai, K., Kasai, H., & Totsuka, Y. (2013). Effects of Fe_3O_4 magnetic nanoparticles on A549 cells. **International Journal of Molecular Sciences, 14**, 15546-15560.

Wu, D., Zheng, S., Ding, A., Sun, G., Yang, M. (2015). Performance of a zero valent iron-based anaerobic system in swine wastewater treatment. **Journal of Hazardous Materials, 286**, 1-6.

Xiao, X., Sheng, G.P., Mu, Y., Yu, H.Q. (2013). A modeling approach to describe ZVI-based anaerobic system. **Water Research, 47**, 6007-6013.

Yang, Y., Zhang, Y., Li, Z., Zhao, Z., Quan, X., Zhao, Z. (2017). Adding granular activated carbon into anaerobic sludge digestion to promote methane production and sludge decomposition. **Journal of Cleaner Production, 149**, 1101-1108.

Yu, H.Q., Tay, J.H., Fang, H.H.P. (2001). The roles of calcium in sludge granulation during UASB reactor start-up. **Water Research, 35(4)**, 1052-1060.

Zhang, J., Chua, Q.W., Mao, F., Zhang, L., He, Y., Tong, Y.W., Loh, K.C. (2019). Effects of activated carbon on anaerobic digestion - Methanogenic metabolism, mechanisms of antibiotics and antibiotic resistance genes removal. **Bioresource Technology Reports, 5**, 113-120.

Zhang, J., Zhao, W., Zhang, H., Wang, Z., Fan, C., Zang, L. (2018). Recent achievements in enhancing anaerobic digestion with carbon- based functional materials. **Bioresource Technology, 266**, 555-567.

Zhao, M.X., Yan, Q., Ruan, W.Q., Zou, H., Xu, Y. (2008). The influence of pH adjustment on biogas production from kitchen wastes by anaerobic fermentation. **Chinese Journal of Bioprocess Engineering, 6(4)**, 45-49.

Zhao, Z., Li, Y., Quan, X., Zhang, Y. (2017). Towards engineering application: Potential mechanism for enhancing anaerobic digestion of complex organic waste with different types of conductive materials. **Water Research, 115**, 266-277.

Zhu, L., Gao, K., Jin, J., Lin, H., Xu, X. (2014). Analysis of ZVI corrosion products and their functions in the combined ZVI and anaerobic sludge system. **Environmental Science and Pollution Research, 21**, 12747-12756.

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. (2557). สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2557.

กรมควบคุมมลพิษ. (2561). (ร่าง) รายงานสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2560. สืบค้น 10 มกราคม 2561, จาก http://www.pcd.go.th/file/02-03-60.pdf

กรมพัฒนาและส่งเสริมพลังงาน พลังงานทดแทน (2545). [ออนไลน์] แหล่งที่มา http://www.dedp.go.th.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2558). แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ. 2558-2579.

กฤษฎา กิ้มเส้ง, พิชัย อัมระนันท์. (2534). ระบบผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมจากเครื่องยนต์ใช้แก๊สชีวภาพ. ปริญญานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

คู่มือการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพสู่ชุมชนเพื่อแก้ปัญหาการกำจัดผัดตบชวาอย่างยั่งยืน. (2560). [ออนไลน์] แหล่งที่มา http://www.thai-explore.net/file_upload/submitter/file_doc/445a04a5f4a7fde735b771c7defffd59.pdf

ณัฏฐา กาญจนขุนดี. (2557). วิธีการผลิตแก๊สชีวภาพสำหรับครัวเรือน ระหว่างไทยประดิษฐ์กับฝั่งทำใคร เจ๋งกว่า. [ออนไลน์] แหล่งที่มา https://www.khundee.com/

ปรีชา ศิริชาญ. (2540). การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตไฟฟ้าจากแก๊สชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พัชรี อินธนู. (2559). เศษอาหาร. [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา https://erp.mju.ac.th/acticleDetail.aspx?qid=447

ศรีวรรณ รื่นเริง. 2542. ชนิดและประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ที่พบในปุ๋ยหมัก วัสดุเหลือใช้ ศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สมเกียรติ สุวรรณคีรี. 2546. ผลของการใช้น้ำสกัดชีวภาพต่อผลผลิตผักกาดคะน้า. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ศูนย์วิจัยเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สมจินตนา ลิ้มสุข ปุณยวี เพียรธรรม และอนุรักษ์ ปีติรักษ์สกุล. (2554). การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารร่วมกับกลีเซอรีนดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล. วิศวกรรมสาร มข. ปีที่ 38(2). หน้า 101-110.

สมชาย พัฒนา และเอกรัฐ สมินทรปัญญา. (2534). การใช้แก๊สชีวภาพเดินเครื่องยนต์และเครื่องสูบน้ำ. ปริญญานิพนธ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สมบูรณ์ ศิริพรมงคลชัย. (2546). การปรับปรุงคาร์บูเรเตอร์สำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในที่ใช้แก๊สชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ประวัติผู้วิจัย

<u>ส่วน ง</u> : **ประวัติคณะผู้วิจัย**

หัวหน้าชุดโครงการวิจัย และหัวหน้าโครงการวิจัยที่ 1

1. **ชื่อ-นามสกุล** นายชัชวินทร์ นวลศรี

   ชื่อ-นามสกุล Mr. Chatchawin Nualsri

2. **หมายเลขบัตรประชาชน** 1-1899-00057-42-0

3. **ตำแหน่งปัจจุบัน** ประธานหลักสูตรสาขาวิชาเกษตรศาสตร์

   (เวลาที่ใช้ในการทำวิจัย 15 ชั่วโมงต่อสัปดาห์)

4. **หน่วยงานและสถานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก**

หลักสูตรสาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
โทรศัพท์ 055-267000 ต่อ 5306 โทรศัพท์มือถือ 086-9256168 E-mail : chatchawin.n@gmail.com

ที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก หลักสูตรสาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร
มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ต.พลายชุมพล อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

5. **ประวัติการศึกษา**

วุฒิการศึกษา	จากสถาบัน	สาขาวิชา	ปีที่จบการศึกษา
ปริญญาเอก (ปร.ด.)	มหาวิทยาลัยขอนแก่น	เทคโนโลยีชีวภาพ	พ.ศ. 2559
ปริญญาโท (วท.ม.)	มหาวิทยาลัยนเรศวร	พลังงานทดแทน	พ.ศ. 2554
ปริญญาตรี (วท.บ.)	มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี	เทคโนโลยีอุตสาหกรรม	พ.ศ. 2551

6. **สาขาวิชาที่มีความชำนาญพิเศษ**

   - Bio-hydrogen
   - Anaerobic digestion
   - Biomass energy
   - Waste utilization

7. **ประสบการณ์เกี่ยวกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ**

ปี (ระยะเวลา)	สถานะ	เรื่อง (แหล่งทุน)
2560-2561	หัวหน้าโครงการ	การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตมีเทนจากน้ำกากส่าด้วยการหมักร่วมกับกากน้ำตาล (มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม)
2560	หัวหน้าโครงการ	การศึกษาพฤติกรรมและแนวทางการจัดการขยะเปลือกกล้วยเพื่อใช้เป็นต้นแบบการจัดการขยะอย่างยั่งยืนของชุมชนหนองตูม อ.กงไกรลาศ จ.สุโขทัย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.)

8. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Nualsri C., Reungsang A., Plangklang P. Biochemical hydrogen and methane potential of sugarcane syrup using a two-stage anaerobic fermentation process. Industrial Crops and Products 2016: 82; 88-99.

Nualsri C., Kongjan P., Reungsang A. Direct integration of CSTR-UASB reactors for two-stage hydrogen and methane production from sugarcane syrup. International Journal of Hydrogen Energy 2016: 41(40); 17884-17895.

Nualsri C., Kongjan P., Reungsang A., Imai T. Effect of biogas sparging on the performance of bio-hydrogen reactor over a long-term operation. Plos One 2017: 12 (2), e0171248.

หัวหน้าโครงการวิจัยที่ 2

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ว่าที่ ร.ท. คงเดช พะสีนาม

   ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Acting Lt. Khongdet Phasinam

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 1 3097 00001 291

3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำหลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร

4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (e-mail)

หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร
มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม เลขที่ 156 หมู่ 5 ตำบลพลายชุมพล อำเภอเมืองพิษณุโลก
จังหวัดพิษณุโลก รหัสไปรษณีย์ 65000 โทรศัพท์ (055) 267080 โทรสาร (055) 267081
e-mail: phasinam@psru.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

   ปริญญาตรี สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

   ปริญญาตรี สาขาวิชา สารสนเทศศาสตร์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

   ปริญญาโท สาขาวิชา วิศวกรรมการจัดการพลังงาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

   ปริญญาเอก สาขาวิชา วิศวกรรมเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

   - Computer Aided Design
   - Power and Machinery
   - Renewable Energy

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศโดยระบุสถานภาพในการทำการวิจัยว่าเป็นผู้อำนวยการแผนงานวิจัย หัวหน้าโครงการวิจัย หรือผู้ร่วมวิจัยในแต่ละผลงานวิจัย

7.1 บทความวิจัย/วิชาการที่ตีพิมพ์:

7.1.1 เกียรติศักดิ์ นิคมชัยประเสริฐ, คงเดช พะสีนาม และ วีรชัย อาจหาญ. (2553). *การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสม. ในการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11* (333-338).

7.1.2 คงเดช พะสีนาม และ วีรชัย อาจหาญ. (2553). *การศึกษาสมรรถนะและการสึกหรอของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซลผสม. ในการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 11* (339-344).

7.1.3 สาวิตรี คำหอม, พินิจ จิรัคคกุล, คงเดช พะสีนาม และ วีรชัย อาจหาญ. (2554). *การศึกษาแนวทางการบริหารจัดการและต้นทุนของ การเก็บรวบรวม การแปรรูปฟางข้าว ที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นวัตถุดิบ. ในการประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 12.*

7.1.4 Phasinam, K., Junyusen, P., Vatakit, K. &Somphong, J. (2012).*Study on Track Frame Strength of a Thai-Made Rice Combine Harvester. The 13 th Thai Society of Agricultural Engineering National*In*Conference and The 5 th Thai Society of Agricultural Engineering International Conference* (66-71).

7.1.5 Phasinam, K., Junyusen, P., Vatakit, K. &Somphong, J. (2013).*Study on Track Frame Strength and Optimum Ratio of Thai-Made Rice Combine Harvester Model.*In*The 14 th Thai Society of Agricultural Engineering National Conference and The 6 th Thai Society of Agricultural Engineering International Conference* (340-345).

7.1.6คงเดช พะสีนาม, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน, จรูญศักดิ์ สมพงศ์ และคธา วาทกิจ. (2557). *การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงช่วงล่างของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. ในการประชุมวิชาการงานเกษตรแฟร์นนทรีอีสาน ครั้งที่ 2* (62-71).

7.1.7คงเดช พะสีนาม, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน, คธา วาทกิจ, จรูญศักดิ์ สมพงศ์ และ ยงยุทธ เสียงดัง. (2559). การปรับปรุงความแข็งแรงของโครงช่วงล่างของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทย. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ,2*(2), 97-106.

7.1.8 คงเดช พะสีนาม และ วีรชัย อาจหาญ. (2559). การศึกษาสมรรถนะและมลพิษของเครื่องยนต์ดีเซลรอบกลางเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซล. *วารสารวิชาการ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, 8*(8), 115-128.

7.1.9 คงเดช พะสีนาม, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน, คธา วาทกิจ และ จรูญศักดิ์ สมพงศ์. (2559). *การปรับปรุงความแข็งแรงของโครงช่วงล่างของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทย.*ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 3* (27-33).

7.1.10 คงเดช พะสีนาม, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน, คธา วาทกิจ และจรูญศักดิ์ สมพงศ์. (2559). การวิเคราะห์ความแข็งแรงของโครงช่วงล่างเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และวิธีการทดสอบแรง. *วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย, 22*(2), 24-29.

7.1.11 รัฏฐชัย สายรวมญาติ, คงเดช พะสีนาม และ ธันวมาส กาศสนุก. (2560). *การออกแบบ และพัฒนานาข้าวในเขตชลประทานตามแนวทฤษฎีใหม่ ; ต.บ้านป่า อ.เมือง จ.พิษณุโลก.* ในการประชุมวิชาการระดับชาติพิบูลสงครามวิจัย *ครั้งที่ 3* (67-72).

7.1.12 ยงยุทธ เสียงดัง, พยุงศักดิ์ จุลยุเสน และ คงเดช พะสีนาม. (2560). เส้นทางที่เหมาะสมของปลายแขนกลกรีดยางพารา. *วารสารวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ, 3*(1), 25-35.

7.1.13 ธันวมาส กาศสนุก, ดามร บัณฑุรัตน์ และ คงเดช พะสีนาม. (2560). ความยาวท่อแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมสำหรับระบบเก็บกักความร้อนแบบเปลี่ยนสถานะ. *วารสารวิชาการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง, 10*(2), 38-47.

7.1.14 คงเดช พะสีนาม, ธันวมาส กาศสนุก และ วีรชัย อาจหาญ. (2561). การศึกษาสมรรถนะของเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้น้ำมันดีเซลจากขยะพลาสติก. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติพิบูลสงครามวิจัย ครั้งที่ 4* 425-432.

7.1.15 สุธาทิพย์ วงศ์พันธุ์เสือ, พลอยไพลิน สีแดง, ธันวมาส กาศสนุก และ คงเดช พะสีนาม. (2561). การศึกษาการใช้ขี้เลื่อยไม้ฉำฉา ขี้เลื่อยไม้ยางพารา และฟางข้าวเป็นวัสดุเพาะเห็ดนางฟ้า. ใน *การประชุมวิชาการโครงงานวิศวกรรมเกษตรแห่งชาติ ครั้งที่ 24* 112-115.

7.1.16 ประกอบ เมืองเกิด, สิปปกร โพธิ์ประเสริฐ, ธันวมาส กาศสนุก และ คงเดช พะสีนาม. (2561). การออกแบบระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของเครื่องปลูกพืชไมโครกรีนแบบอัตโนมัติ. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ เรื่องคุณภาพของการบริหารจัดการและนวัตกรรม ครั้งที่ 3* 995-1000.

7.1.17 ชัยณรงค์ งามโสภา, บุญญารัตน์ แว่นฟ้า, ธันวมาส กาศสนุก และ คงเดช พะสีนาม. (2562). ศึกษาการเจริญของเส้นใยและผลผลิตของเห็ดนางฟ้าเมื่อใช้ขี้เลื่อยไม้ยางพาราและขี้เลื่อยไม้ฉำฉาเป็นวัสดุเพาะ. ใน *การประชุมวิชาการโครงงานวิศวกรรมเกษตรแห่งชาติ ครั้งที่ 25* 62-66.

7.1.18 ธันวมาส กาศสนุก และ คงเดช พะสีนาม. (2561). การออกแบบเครื่องจักตอก. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมฟาร์มและเทคโนโลยีการควบคุมอัตโนมัติ ครั้งที่ 5* 146-150.

7.1.19 คงเดช พะสีนาม, ธันวมาส กาศสนุก, เกียรติศักดิ์ นิคมชัยประเสริฐ และ วีรชัย อาจหาญ. (2562). การศึกษาสมรรถนะและการสึกหรอของเครื่องยนต์ดีเซลรอบปานกลางเมื่อใช้น้ำมันไบโอดีเซล. *PSRU Journal of Science and Technology, 4*(1): 28-38.

7.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว:

7.2.1 การศึกษาแนวทางบริหารจัดการขยะชุมชน เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนแบบครบวงจร (ระดับชุมชน)

- ปีที่พิมพ์ 2552
- สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย
- แหล่งทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

7.2.2 การศึกษาสังเคราะห์ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับพลังงานทางเลือก

- ปีที่พิมพ์ 2552
- สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย
- แหล่งทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

7.2.3 การศึกษาต้นแบบโรงงานผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับชุมชน

- ปีที่พิมพ์ 2553
- สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย
- แหล่งทุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7.2.4 การประเมินวัตถุดิบและเทคโนโลยีการผลิตถ่านชีวมวล

- ปีที่พิมพ์ 2553
- สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย
- แหล่งทุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7.2.5 การประเมินวัตถุดิบและเทคโนโลยีการผลิตพลังงานจากเหง้ามันสำปะหลัง

- ปีที่พิมพ์ 2553
- สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย
- แหล่งทุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7.2.6 การออกแบบและทดสอบเตาผลิตก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวลแบบสองทางสำหรับการอบแห้งและการผลิตกระแสไฟฟ้า

- ปีที่พิมพ์ 2553
- สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย
- แหล่งทุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7.2.7 การพัฒนาต้นแบบสถานีผลิตไฟฟ้าและความร้อนขนาดเล็กโดยใช้เตาผลิตก๊าซชีวมวลแบบสองทางออก

- ปีที่พิมพ์ 2553
- สถานภาพ ผู้ร่วมวิจัย
- แหล่งทุน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

7.2.8 การออกแบบโครงช่วงล่างของเครื่องเกี่ยวนวดข้าวไทยโดยการวิเคราะห์แบบจำลอง

- ปีที่พิมพ์ 2558
- สถานภาพ หัวหน้าโครงการวิจัย
- แหล่งทุน สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

7.2.9 เครื่องเพาะถั่วงอกอัจฉริยะ

- ปีที่พิมพ์ 2558
- แหล่งทุน มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
- สถานภาพ หัวหน้าโครงการ

7.2.10 การใช้ขี้เลื่อยไม้ฉำฉาเป็นส่วนผสมของขี้เลื่อยไม้ยางพาราในการเพาะเห็ดนางฟ้า

- ปีที่พิมพ์ 2562
- แหล่งทุนมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
- สถานภาพ หัวหน้าโครงการ

7.2.11 การพัฒนากระบวนการผลิตและออกแบบบรรจุภัณฑ์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นของชาร์มมิง เฮอร์เบอร์

- ปีที่พิมพ์ 2562
- แหล่งทุน สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)
- สถานภาพ หัวหน้าโครงการ

หัวหน้าโครงการวิจัยที่ 3

1. ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) นางสาวปุณณดา ทะรังศรี
   ชื่อ - นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Miss. PunnadaTharangsri
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 1-4606-00014-03-1
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์
4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก
   หลักสูตรสาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร
   มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
   โทรศัพท์ : 055-267080 ต่อ 9306 โทรสาร : 055-267081
   โทรศัพท์มือถือ : 062-4149642 E-mail : g.punnada@gmail.com
5. ประวัติการศึกษา
   พ.ศ. 2558 ส.ม. อนามัยสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น
   พ.ศ. 2551 วท.บ. เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ
   - การจัดการทรัพยากรเกษตร - ข้าวไร่
   - การศึกษาชุมชนเกษตร - Solidification/Stabilization
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
   7.1 หัวหน้าโครงการวิจัย : -
   7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและทำเสร็จแล้ว :

จักรกฤช ศรีละออ วณิชญา ฉิมนาค ขนิษฐา ไชยแก้ว ประหยัด แผนสมบูรณ์ และ**ปุณณดา ทะรังศรี.** 2016. การสำรวจ รวบรวม และศึกษาการใช้ประโยชน์จากพืชอาหารพื้นถิ่นในจังหวัดพิษณุโลก. วารสารเพชรบูรณ์สาร, 18: 17-26.

7.3 งานวิจัยที่กำลังทำ :

- การคัดเลือกสายพันธุ์ข้าวพื้นเมือง ต่อการทนแล้งและให้ผลผลิตสูง
  แหล่งทุน : สกอ. *สถานภาพในการทำวิจัย* : ผู้ร่วมวิจัย
  ระยะเวลา : พฤษภาคม 2560 – เมษายน 2561
- โครงการการศึกษาพฤติกรรมและแนวทางการจัดการขยะเปลือกกล้วยเพื่อใช้เป็นต้นแบบการจัดการขยะอย่างยั่งยืนของชุมชนหนองตูม อ.กงไกรลาศ จ.สุโขทัย
  แหล่งทุน : สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ (สสส.)
  สถานภาพในการทำวิจัย : ผู้ร่วมวิจัย
  ระยะเวลา : พฤษภาคม 2560 – เมษายน 2561