

การศึกษาระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

The Study of the Mixing Duration Time and Recirculation Rate Effect to Biogas Production from Sweet Corn Waste by Dry Fermentation Process

ศศิธร ไสปา¹

Sasithorn Saipa¹

ฐปน ชื่นบาล²

Tapana Cheunbarn²

นิกราน หอมดวง¹

Nigran Homdoug

จุฑาภรณ์ ชนะถาวร¹

Jutaporn Chanathaworn

รจพรรณ นีรัญศิลป์^{1*}

Rotjapun Nirunsin^{1*}

^{1*}สาขาวิชาวิศวกรรมกรรมพลังงานทดแทน วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
จังหวัดเชียงใหม่ 50290 ประเทศไทย

^{1*}Renewable Energy Engineering, School of Renewaber Energy, Maejo University,
Chiang Mai 50290, Thailand.

²สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290 ประเทศไทย

²Environmental Technology, Faculty of Science, Maejo University,
Chiang Mai 50290, Thailand.

*Corresponding Author: rotjapun_energy@hotmail.com

(Received: September 18, 2019, Accepted: July 17, 2019)

บทคัดย่อ : งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในอุตสาหกรรมแปรรูปข้าวโพดหวาน และศึกษาระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง โดยทำการศึกษาภายใต้สภาวะการย่อยสลายแบบไร้อากาศในระดับต้นแบบ (Pilot Scale) ขนาด 1,000 L ด้วยกระบวนการหมักแบบกะ ภายใต้อุณหภูมิสภาวะแวดล้อม ที่ปริมาณค่าของแข็งทั้งหมด (TS) เริ่มต้น เท่ากับ 25% (w/v) และระยะเวลาที่เก็บ 30 days โดยแบ่งเงื่อนไขการทดลองออกเป็น 2 เงื่อนไข ได้แก่ กระบวนการหมักภายใต้อัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h รอบละ 10 mins ตั้งแต่เวลา 06.00–18.00 น. จากการศึกษาพบว่าที่อัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันเฉลี่ยเท่ากับ 283.34 และ 240.63 L/day ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของระบบ

เท่ากับ 9,060.86 และ 7,688.11 L สัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 58.4% และ 59.6% และศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยเท่ากับ 0.688 และ 0.564 L CH₄/g VS added ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัด COD, TS และ VS พบว่าที่อัตราการกวนผสมทุก 6 h ให้ค่าสูงกว่าอัตราการกวนผสมทุก 12 h คือ 8.11%, 7.67% และ 6.71% ตามลำดับ ดังนั้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งที่ทำการเพิ่มอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า สามารถเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้นถึง 15.15% และผลจากการวิจัยนี้สามารถนำไปประกอบการพิจารณา เพื่อจัดทำระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในปริมาณมากได้

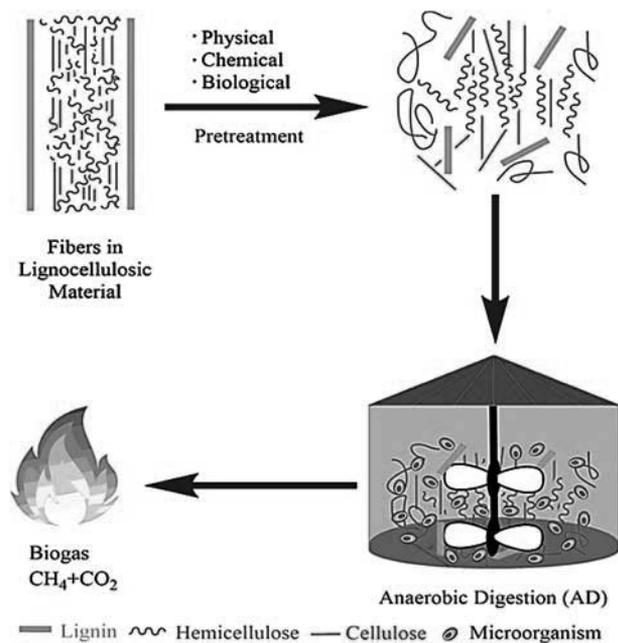
คำสำคัญ : ก๊าซชีวภาพ กระบวนการหมักแบบแห้ง อัตราการกวนผสม หมุนเวียนตะกอน

Abstract : The main purposes of this research are to study the potential of biogas production using sweet corn agricultural wastes from the food processing industry and to investigate the mixing duration time and recirculation rate of the sludge that affects the dry fermentation process. The experiment was set to produce the gases via dry batch anaerobic digestion which was carried out in pilot scale (1,000 L) under ambient temperature condition and fixing of the initial total solid (TS) at 25% (w/v). Hydraulic retention time was 30 days and the experiments were divided into two groups with the recirculating rate of every 6 and 12 h, 10 mins each time, from 6.00 am to 6.00 pm. The results of this study showed the effects of using the mixing duration and recirculating rate at every 6 and 12 h had a daily average biogas production at 283.34 and 240.63 L/day, the cumulative biogas content of the system were 9,060.86 and 7,688.11 L. The highest proportions of methane were 58.4% and 59.6%. The average methane productions potential were 0.688 and 0.564 L CH₄/g VS added. In addition, when comparing the efficiency of COD, TS and VS removal, it was found that the mixing rate of every 6 h gave higher value than the mixing rate of every 12 h, which were 77.08%, 61.26% and 62.56%, respectively. Therefore, the biogas production systems via dry fermentation process with the doubled recirculating rate were able to increase the gas production 15.15%. The results of this research can be used in establishing a biogas system with dry fermentation process for industrial plants that have large amounts of agricultural waste.

Keywords : Biogas, Dry Fermentation, Mixing, Recirculating Rate

1. บทนำ

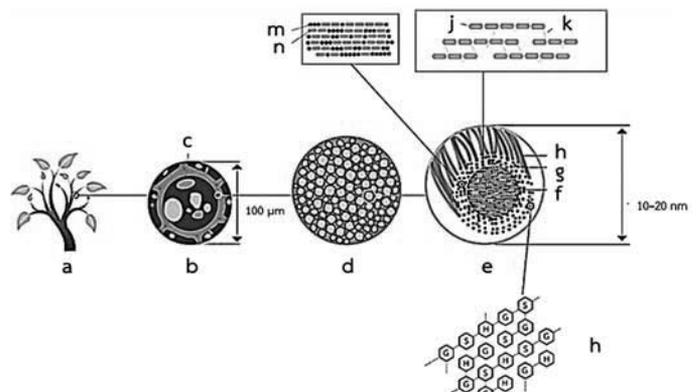
กากของเสียจากอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรจำพวกข้าวโพดหวาน (Sweet corn waste, SCW) ถือเป็นหนึ่งในชีวมวลที่มีศักยภาพสูงและสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานทดแทน ในกลุ่มเทคโนโลยีระบบก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถนำกากของเสียอุตสาหกรรมมาก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยเปลี่ยนจากวัสดุเหลือทิ้งเป็นพลังงานหมุนเวียนกลับไปใช้ในองค์กรหรือสถานประกอบการภายใต้กระบวนการย่อยในสภาวะการหมักแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion, AD) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส [2]

โดยกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จำแนกเป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการหมักแบบแห้ง (Dry anaerobic digestion) และแบบเปียก (Wet anaerobic digestion) ซึ่งมีการควบคุมการบ้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid, TS) ประมาณ 20%–40% และน้อยกว่า 20% [1] ตามลำดับ โดย

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นก๊าซมีเทน (CH₄) ค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนอยู่ระหว่าง 55%–65% ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้ทั้งความร้อนและไฟฟ้า [3, 4] และพลังงานที่ผลิตได้ดังกล่าวสามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตของสถานประกอบการได้ รวมถึงผลพลอยได้อื่นๆ ที่ได้จากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพอันประกอบไปด้วยปุ๋ยอินทรีย์ เชื้อเพลิงอัดแท่งหรือเม็ด เป็นต้น [5]



a = Plant, b = Plant cell, c = Plant wall, d = Macrofibril, e = Microfibril, f = Cellulose, g = Hemicellulose, h = Lignin, j = Glucose, k = Hydrogen bond, m = Pentose, n = Hexose

ภาพที่ 2 โครงสร้างของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส [6]

โดยทั่วไปโครงสร้างของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นสารประกอบจำพวกลิกโนเซลลูโลส ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งส่วนใหญ่จะพบ เซลลูโลส 40%–60% เฮมิเซลลูโลส 20%–30% และลิกนิน 15%–30% โดยประมาณ ซึ่งลักษณะองค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร [6] ดังแสดงในภาพที่ 2 สารประกอบลิกโนเซลลูโลสก่อนนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานก๊าซชีวภาพนั้นจะต้องทำการปรับสภาพเบื้องต้นก่อน เพื่อเพิ่มศักยภาพในการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ลดความเป็นผลึกของเซลลูโลสและเพิ่มความพรุนความวัสดุ ซึ่งกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบ สามารถ

แบ่งได้เป็น 4 วิธีหลัก ประกอบไปด้วยวิธีการทางกายภาพ วิธีการทางเคมี วิธีการทางกายภาพร่วมกับทางเคมี และวิธีการทางชีวภาพ โดยวิธีการปรับสภาพแบบทางชีวภาพถือเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ซึ่งวิธีการดังกล่าวเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า พืชหมัก (Silage) [5] โดยเป็นวิธีการรักษาพืชที่ทำการหมักร่วมโดยใช้แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดแลคติกเพื่อเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตไปเป็นกรดอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของกรดแลคติกส่วนใหญ่จะเกิดภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้อากาศ เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการหมักจะสามารถอยู่ได้นาน [2, 4] โดยคุณค่าทางอาหารจะไม่เปลี่ยนแปลงส่วนใหญ่นิยมนำพืชประเภทลิกโนเซลลูโลสมาเป็นส่วนประกอบหลัก เนื่องจากหาง่ายและต้นทุนในการผลิตต่ำ [5] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างแลคติกในพืชหมักอีกทั้งยังส่งผลให้ค่า pH ของพืชหมักจะลดลงต่ำกว่า 4 การที่ค่า pH มีค่าความเป็นกรดสูงส่งผลให้จำนวนจุลินทรีย์ที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการหมักลดลง ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมทำการเติมแบคทีเรียกลุ่มกรดแลคติกลงในพืชหมัก เพื่อเร่งกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้เร็วขึ้น [6]

จากการสำรวจปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากอุตสาหกรรมแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรแห่งหนึ่งในจังหวัดเชียงใหม่ พบว่าอุตสาหกรรมแห่งนี้มีปริมาณของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทข้าวโพดหวานเป็นจำนวนมากเฉลี่ยไม่ต่ำกว่า 100 Tons/day โดยปกติแล้วอุตสาหกรรมแห่งนี้มีระบบการจัดการปริมาณวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยการจำหน่ายให้แก่กลุ่มเกษตรกรโคนมและโคเนื้อ และหากมีปริมาณเหลือทิ้งมากเกินกว่าที่กลุ่มเกษตรกรโคนมและโคเนื้อจะรับได้ จะใช้วิธีการทำลายทิ้งด้วยการนำไปฝังกลบ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ในระยะยาว ทางบริษัทจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาการกำจัดของเสียดังกล่าวด้วยการเปลี่ยนเป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบของพลังงานก๊าซชีวภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Sopee and Natthanicha (2017) [7] ได้ทำการศึกษารผลิตก๊าซ

ชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานร่วมกับมูลสัตว์ (มูลวัว มูลสุกรและมูลแพะ) สัดส่วน เท่ากับ 1:1 (w/w) ด้วยกระบวนการหมักแห้งที่มีการป้อนสารอินทรีย์แบบครั้งเดียวและทำกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วย NaOH ค่าความเข้มข้น 2% (w/v) เป็นระยะเวลา 48 h ทำการอุณหภูมิควบคุม 35 ± 2 °C ความชื้น $74 \pm 3\%$ และค่าของแข็งทั้งหมดเริ่มต้นเท่ากับ 25% (w/v) จากการศึกษาพบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานร่วมกับมูลแพะมีค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biomethane potential, BMP) มากที่สุดเท่ากับ 68.2% ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน เท่ากับ 46.0% และศักยภาพของการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ $5.05 \text{ L CH}_4/\text{g VS}_{\text{Removed}}$

Meggyes and Nagy (2012) [8] ได้ทำการศึกษาใช้วัตถุดิบจากมูลสุกรผสมกับกากข้าวฟ่าง กากผลไม้ และกากข้าวโพด หมัก 43–50 days พบว่ากากของพืชชนิดต่างๆ มีผลต่อปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นแตกต่างกันคือ มูลสุกรผสมกากข้าวฟ่างได้มีเทน 52.0%–59.0% ใกล้เคียงกับที่ผสมกากข้าวโพด ได้มีเทน 52.2%–59.5% ผสมกากผลไม้ 50% ได้มีเทน 62.5%–74.9% และผสมกากผลไม้ 25% ได้มีเทนสูงสุด 66.8%–77.1%

Meixia, et al. (2014) [9] ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากซังข้าวโพดสำหรับการผลิตก๊าซมีเทน โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ Bionic คือถังปฏิกรณ์ที่ได้ทำการจำลองการย่อยสลายแบบสัตว์เคี้ยวเอื้อง โดยใช้ปริมาณของซังข้าวโพด เท่ากับ 100 g ร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ปริมาณ เท่ากับ 1,000 mL จากการศึกษาพบว่า ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด $265.5 \text{ mL/g VS}_{\text{added}}$ และผลิตก๊าซมีเทน 63.3% ของปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

Libin, et al. (2015) [10] ได้ทำการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการกวนผสม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการก่อตัวเป็นชั้นของซังข้าวโพด ซึ่งระบบทำการกำหนดระยะเวลาการกวนทุกๆ 2, 6 และ 10 h ทำการกวนผสมตลอดระยะเวลา

4.5 ระบบมีการกวนผสมภายในระบบ ซึ่งได้กำหนด อัตราการกวนผสมและหมุนเวียนน้ำทุกๆ 6 และ 12 h แต่จะรอบจะกวนผสมและหมุนเวียนรอบละ 10 mins

4.6 การย่อยสลายภายในได้อุณหภูมิสภาวะแวดล้อม

4.7 กระบวนการป้อนสารอินทรีย์แบบกะ

4.8 ระยะเวลาในการทดลอง 30 days

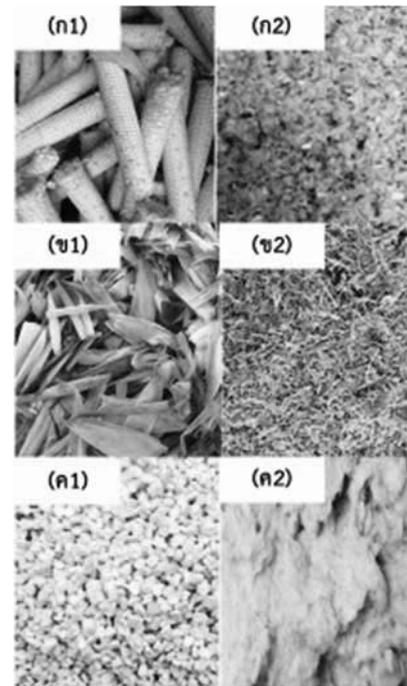
5. วิธีการดำเนินงานวิจัย

สำหรับขั้นตอนของการดำเนินการทำวิจัยจะแบ่ง ออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 วัสดุที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ส่วนที่ 2 วัสดุและอุปกรณ์ และส่วนที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง โดยมี รายละเอียดของแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

5.1 วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน ประกอบไปด้วย ชัง เปลือก และเมล็ดคัดทิ้ง ซึ่งสัดส่วนเหลือทิ้งที่เกิดจาก กระบวนการผลิตมีค่าเท่ากับ 54:44:2 (w/w) ดังแสดงใน ภาพที่ 3 ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานดังกล่าวเกิดจาก กระบวนการแปรรูปข้าวโพดหวานบรรจุกระป๋อง โดยก่อน นำวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานดังกล่าวเข้ายังระบบผลิต ก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งจะต้องทำการ ปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการปรับสภาพเชิงกลให้ ได้ขนาดของวัสดุหมักขนาดประมาณ 5-10 mm จากนั้น จะนำวัสดุหมักที่ได้หลังจากกระบวนการปรับสภาพเชิงกล ไปทำกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-acidification คือ การปรับสภาพให้วัสดุหมักเกิดกระบวนการหมักกรด ก่อนหรือการเปลี่ยนสารอาหารตั้งต้นจำพวก น้ำตาล กรด อะมิโนและกรดไขมัน เป็นต้น ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ ชนิดโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก (Acetic acid) กรด โพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดวาเลอริก (Valeric acid) และกรดแลคติก (Lactic acid) โดยกรดที่เกิดขึ้น ทั้งหมดมีสัดส่วนของกรดอะซิติกสูงสุด [11] และมีการ เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในขั้นตอนนี้ด้วย แบคทีเรีย สร้างกรดมีอัตราการเจริญเติบโตสูง และทนทานต่อสภาพ

แวดล้อมได้ดี สำหรับการทดลองในครั้งนี้จะใช้ระยะเวลา ในการปรับสภาพแบบ Pre-acidification ประมาณ 72 h [11, 12]



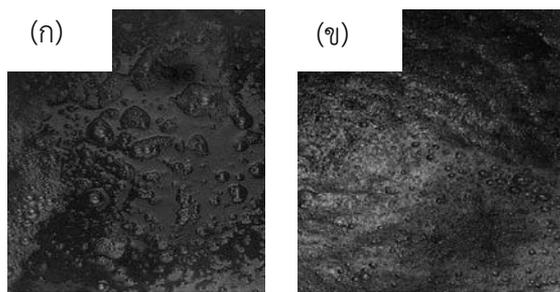
(ก) ชังข้าวโพดหวาน (ข) เปลือกข้าวโพดหวาน (ค) เมล็ดคัดทิ้ง ข้าวโพดหวาน (1) ก่อนปรับสภาพแบบ Pre-acidification (2) หลังปรับสภาพแบบ Pre-acidification

ภาพที่ 3 วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

5.2 หัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยกระบวนการหมักแห้งจะใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากกาก ตะกอนจุลินทรีย์น้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Anaerobic filter ร่วมกับกากตะกอนมูลสุกรจากระบบ ผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Modified cover lagoon จาก ฟาร์มสุกรขนาดกลางในเขตพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ดังแสดง ในภาพที่ 4 โดยสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียต่อ กากตะกอนมูลสุกร คือ 1:2 (v/v) [4, 5] ก่อนนำวัสดุหมัก หลักคือ วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานจำพวก ชัง เปลือก

และเมล็ดคัดทิ้งเข้าระบบ จะต้องทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ โดยการนำหัวเชื้อจุลินทรีย์ใส่ถังถึงปฏิกรณ์ ก่อนเป็นระยะเวลา 7 days เพื่อให้หัวเชื้อจุลินทรีย์เกิดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้สิ้นสุดกระบวนการก่อน อีกทั้งยังเป็นการลดผลกระทบต่อหัวเชื้อที่จะส่งผลกระทบต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแห้ง [2, 3]



(ก) กากตะกอนน้ำเสีย (ข) กากตะกอนมูลสุกร

ภาพที่ 4 หัวเชื้อจุลินทรีย์

5.3 วัสดุและอุปกรณ์

1) ถังปฏิกรณ์ระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

สำหรับวัสดุและอุปกรณ์ของถังปฏิกรณ์สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ดังแสดงในภาพที่ 5 ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก

ส่วนที่ 1 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะใช้ถังปฏิกรณ์เป็นถังชนิดไฟเบอร์กลาส (Fiberglass) จำนวน 1 ถัง ที่มีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อน ทนความร้อนและสารเคมีได้สูง รวมทั้งเป็นฉนวนไฟฟ้า สามารถป้องกันไฟฟ้าสถิตย์ได้ สามารถรองรับวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานได้มากถึง 200 kg ระบบมีการกวนผสมภายในระบบที่อัตราการหมุนของมอเตอร์เท่ากับ 60 rpm และหมุนเวียนตะกอนภายในระบบที่อัตราการไหลเท่ากับ

60 L/mins

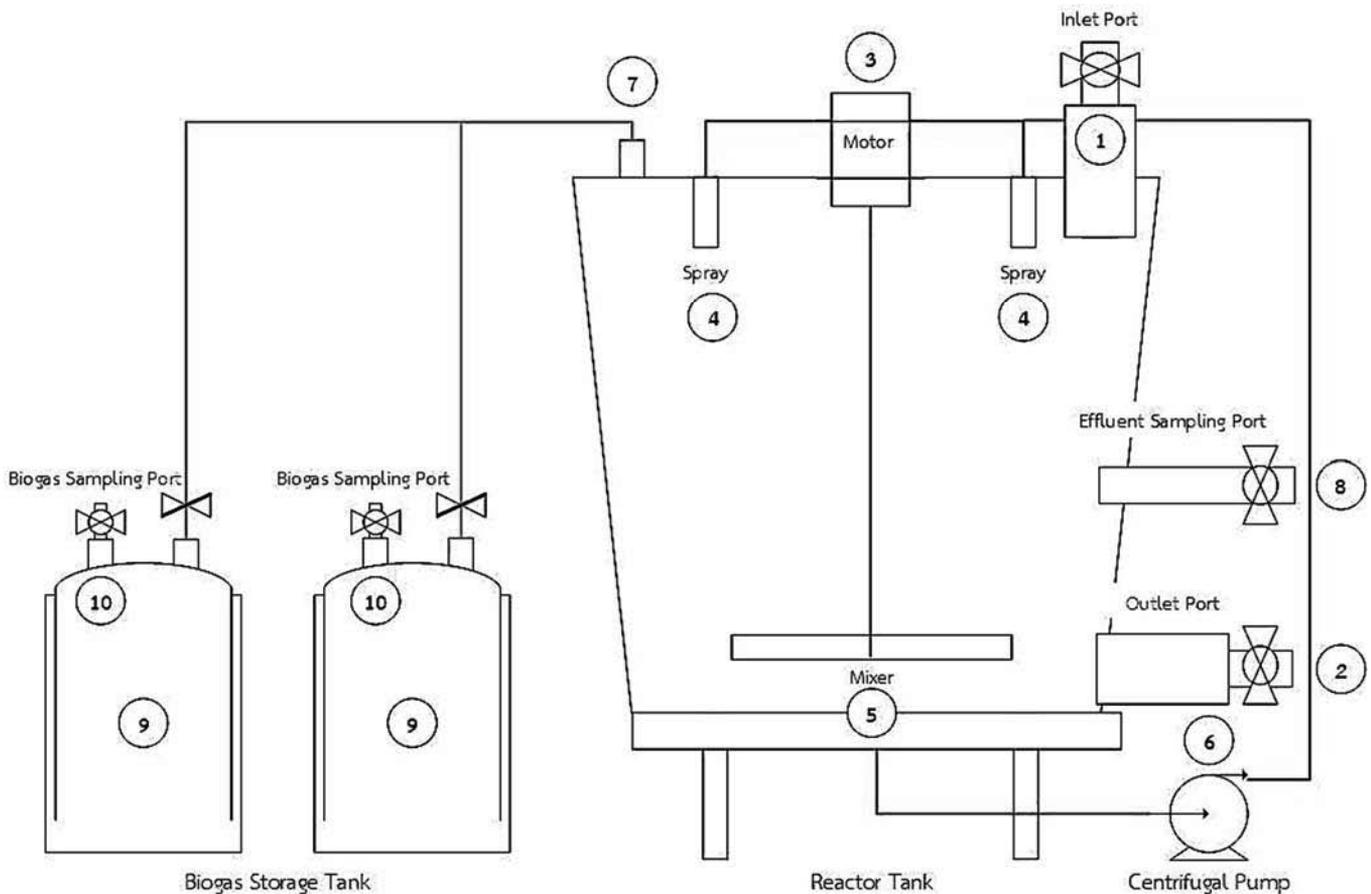
ส่วนที่ 2 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ สำหรับระบบเก็บก๊าซชีวภาพจะใช้ถังเก็บก๊าซชีวภาพชนิด High density polyethylene (HDPE) ขนาด 150 L จำนวน 2 ถัง ที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นสูง แข็งแรง ทนทานต่อการกระแทก ทนทานต่อสภาพความเป็นกรด-ด่าง และไม่ไวต่อสารเคมี

2) หลักการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

โดยหลักการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งจะใช้หลักการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้อากาศ ขนาด 1,000 L ปริมาตรของวัสดุหมักเท่ากับ 500 L ลักษณะของกระบวนการหมักแบบกะ ระยะเวลาในการทดลอง 30 days สำหรับการเริ่มต้นทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งจะต้องทำการเติมวัสดุหมักเข้าถังระบบ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานและหัวเชื้อจุลินทรีย์ สัดส่วน 1 kg : 4 L [13] เข้าถังทางเข้าวัสดุหมักหมายเลข 1 โดยจะต้องทำการปรับค่า TS เริ่มต้น เท่ากับ 25% (w/v) [7, 8] จากนั้นทำการปิดระบบแล้วทำการกวนผสมหมายเลข 5 และหมุนเวียนตะกอนหมายเลข 6 มายังท่อผันตะกอนหมายเลข 4 ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยอัตราการกวนและหมุนเวียนจะทำการกวนผสมทุกๆ 6 และ 12 h แบบ Day time (06.00–18.00 น.) แต่ละรอบการกวนและหมุนเวียนตะกอนจะใช้ระยะเวลารอบละ 10 mins โดยระยะเวลาที่ใช้ในการกวนผสมได้ทำการอ้างอิงมาจากงานวิจัยของ Libin, et al. (2015) [10] ที่ได้ทำการศึกษารกวนผสมภายในระบบทุกๆ 2, 4, 8, 12 และ 24 h จากการศึกษพบว่า ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุด คือ 2 h รองลงมา คือ 4, 8, 12 และ 24 h ตามลำดับ ซึ่งพบว่าอัตราการกวนผสมที่แตกต่างกัน 2 เท่า จะให้ผลผลิตของก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกัน ดังนั้นจากการศึกษา งานวิจัยดังกล่าวจึงมาเป็นหัวข้อในการศึกษาผลของระยะเวลา

การกวนผสมที่อัตราการผสมแตกต่างกัน 2 อัตราการกวนผสมคือ ทุกๆ 6 และ 12 h เพื่อศึกษาความแตกต่างของผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการกวนผสม สำหรับจุดเก็บตัวอย่างวัสดุหมักหมายเลข 8 สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่าพารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ประกอบด้วยค่า pH, TS, VS, COD, VFA และ ALK ตามลำดับ ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทุก 3 days [7, 10] จากนั้นเมื่อระบบมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น ก๊าซชีวภาพจะไหลผ่านท่อลำเลียงก๊าซชีวภาพหมายเลข 7 มายังถังเก็บก๊าซชีวภาพขนาด 250 L จำนวน 2 ถัง หมายเลข 9 ที่มีแรงดันน้อยกว่า โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะใช้หลักการแทนที่ด้วยน้ำ เพื่อรักษาสมดุลแรงดันทั้งหมดภายในระบบให้เท่ากัน โดยจะสังเกตได้

จากความสูงของถังเก็บก๊าซชีวภาพที่ดันสูงขึ้น ซึ่งแรงดันภายในระบบทำการดันน้ำให้เคลื่อนที่ต่างไปจากตำแหน่งเดิม [14] จากนั้นนำความสูงที่เปลี่ยนแปลงไปของถังเก็บก๊าซชีวภาพไปคำนวณหาปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของระบบในแต่ละวัน จากนั้นเมื่อต้องการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจะทำการนำเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพแบบ Gas analyzer portable ยี่ห้อ Geotech รุ่น Biogas 5000 มาต่อเข้ายังจุดเก็บก๊าซชีวภาพหมายเลข 10 เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ จากนั้นเมื่อสิ้นสุดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อต้องการนำวัสดุหมักออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพสามารถนำวัสดุหมักออกได้ บริเวณทางออกของวัสดุหมักหมายเลข 2



(1) Inlet port (2) Outlet port (3) Motor (4) Spray (5) Mixer (6) Pump
 (7) Gas outlet (8) Effluent sampling port (9) Biogas storage tank (10) Biogas sampling port

ภาพที่ 5 แผนภาพแสดงลักษณะของถังปฏิกรณ์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

3) ขั้นตอนการทดลอง

สำหรับการทดลองของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L ปริมาตรของวัสดุหมักเท่ากับ 500 L ค่า TS เริ่มต้น เท่ากับ 25% (w/v) ลักษณะการป้อนสารอินทรีย์แบบกะ ระยะเวลาการทดลอง 30 days ทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 เงื่อนไขการทดลอง ภายใต้การศึกษาผลของอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง โดยทำการกำหนดอัตราการกวนและหมุนเวียนจะทำทุกๆ 6 และ 12 h แบบ Day time (06.00–18.00 น.) แต่ละรอบกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนรอบละ 10 mins ซึ่งมีขั้นตอนของกระบวนการทดลองดังต่อไปนี้

1. เก็บวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 วัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดหวาน ประกอบไปด้วย ชัง เปลือก และเมล็ดคั่วทั้งจากกระบวนการผลิตในสัดส่วน 54:44:2 (w/w) และส่วนที่ 2 หัวเชื้อจุลินทรีย์ ประกอบไปด้วย 2 ชนิด คือ กากตะกอนน้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Anaerobic filter ร่วมกับกากตะกอนมูลสุกรจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Modified cover lagoon จากฟาร์มสุกรขนาดกลางในสัดส่วน 1:2 (v/v)

2. ทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการนำหัวเชื้อจุลินทรีย์มาผลิตก๊าซชีวภาพให้สิ้นสุดกระบวนการก่อนนำวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานเข้ายังระบบ โดยจะใช้ระยะเวลาในการปรับสภาพประมาณ 7 days

3. ทำการปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน จำพวก ชัง เปลือก และเมล็ดคั่วทั้งข้าวโพดหวาน ด้วยกระบวนการเชิงกลด้วยเครื่องสับหรือบดย่อยให้ได้ขนาด 5–10 mm เพื่อให้มีพื้นที่การย่อยสลายของจุลินทรีย์ทำงานได้ดีขึ้น จากนั้นจะทำการปรับสภาพแบบ Pre-acidification ภายใต้ระบบแบบปิดเป็นระยะเวลา 72 h เพื่อลดขั้นตอนของกระบวนการหมักกรดภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแห้ง

4. จากนั้นเมื่อวัตถุดิบต่างๆ ได้มีการเตรียมความพร้อมในการนำเข้ากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยกระบวนการหมักแห้งแล้ว ให้นำชัง เปลือก และเมล็ดข้าวโพดหวานคั่วทั้งที่ได้ทำการปรับสภาพแล้วเข้าระบบ โดยสัดส่วนของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์ เท่ากับ 1 kg : 4 L และค่า TS เริ่มต้น เท่ากับ 25% (w/v)

5. จากนั้นให้ทำการปิดระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเตรียมการดำเนินการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งกระบวนการทดลองจะใช้ระยะเวลาของแต่ละการทดลอง 30 days โดยระบบดังกล่าวเป็นระบบการป้อนสารอินทรีย์แบบครั้งเดียว (Batch fermentation) โดยระบบจะมีการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนภายในระบบทุกๆ 6 และ 12 h แบบ Day time (06.00–18.00 น.) แต่ละรอบการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน รอบละ 10 mins

6. เมื่อระบบมีการผลิตก๊าซชีวภาพขึ้น ก็จะทำการการพิจารณาหาปริมาณของก๊าซชีวภาพจะทำการเติมน้ำลงในถังพลาสติกใสให้ท่วมถังเก็บก๊าซ โดยเปิดวาล์วก๊าซทองเหลือง เพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในถังเก็บก๊าซออกให้หมด

7. เติมน้ำลงในถังเก็บก๊าซชีวภาพด้านนอก โดยให้อยู่ที่ระดับอ้างอิง (0 cm) ตรวจสอบการรั่วซึมหลังการเติมวัตถุดิบ และวาล์ว เปิด-ปิด ให้อยู่ในตำแหน่งปกติ (ปิดวาล์วทุกวาล์ว)

8. ตั้งชุดการทดลอง ในบริเวณที่โล่งแจ้ง ซึ่งมีแสงแดดส่องทั่วถึงตลอดทั้งวัน เพื่อให้อุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของหัวเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

9. การบันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบจะสามารถสังเกตได้จากการยกตัวสูงขึ้นของถังเก็บก๊าซชีวภาพ โดยจะมีระดับของถังเก็บก๊าซที่สูงต่างกันตามแต่ละความสูงของถังเก็บก๊าซชีวภาพ จากนั้นนำความสูงที่ได้จากข้างถังเก็บก๊าซไปเข้ายังสมการคำนวณ เพื่อหาปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน

10. เมื่อทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของระบบเรียบร้อยแล้วให้ทำการวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยใช้เครื่องวัดก๊าซชีวภาพ Gas analyzer portable ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

11. การเก็บตัวอย่าง เพื่อนำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยวัตถุประสงค์ที่จะนำไปผลิตก๊าซชีวภาพต้องทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบก่อนเริ่มต้นการทำงานของระบบ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบไปด้วย ค่า pH, COD, TS, VS, VFA และ ALK ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ [1, 5]

สำหรับวิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งที่มีการกวนผสมและการหมุนเวียนตะกอนภายในระบบจะทำการวิเคราะห์ซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์ซึ่งจะมีวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

คุณสมบัติ	หน่วย	ตัวอย่าง	ความถี่	วิธีวิเคราะห์
pH ¹	-	วัสดุหมัก	1 day	APHA 4500
COD	g/L	วัสดุหมัก	3 days	APHA 5220
TS	mg/g	วัสดุหมัก	3 days	APHA 2540
VS	mg/g	วัสดุหมัก	3 days	APHA 2540
ALK	mg CaCO ₃ /L	วัสดุหมัก	3 days	APHA 2310
VFA	mg CH ₃ COOH/L	วัสดุหมัก	3 days	APHA 2310
Temperature ²	°C	ระบบ	1 day	Thermometer
Biogas volume	L	ก๊าซชีวภาพ	1 day	Water Replacement
Biogas composition ³	%	ก๊าซชีวภาพ	1 day	Biogas Analyzer

หมายเหตุ : ¹ยี่ห้อ Eutech รุ่น pH 510 (±0.01)

²ยี่ห้อ Elitech รุ่น BT-3 (±1°C)

³ยี่ห้อ Geotech รุ่น Biogas 5000 (±0.5%)

6. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

6.1 คุณลักษณะของสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

1) วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

สำหรับลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานก่อนการปรับสภาพแบบ Pre-acidification ประกอบไปด้วย ชังข้าวโพดหวานมีลักษณะทางกายภาพสีเหลืองอ่อน แข็ง ความชื้นสูง ขนาดความยาว 10–15 cm เปลือกข้าวโพดหวานเปลือกมีลักษณะทางกายภาพสีเขียวอ่อนจนถึงเข้ม แข็ง ความชื้นสูง ขนาดความยาว 10–15 cm และเมล็ดคัดทิ้งข้าวโพดหวานมีลักษณะทางกายภาพสีเหลืองเข้ม อ่อนนิ่ม ความชื้นสูง ความยาว 1–2 cm และหลังจากทำการปรับสภาพแบบ Pre-acidification ประกอบไปด้วย ชังข้าวโพดหวานมีลักษณะทางกายภาพสีเหลืองอ่อน แข็ง ความชื้นสูง เปลือกข้าวโพดหวานเปลือกมีลักษณะทางกายภาพสีเขียวอ่อนจนถึงเข้ม แข็ง ความชื้นสูง และเมล็ดคัดทิ้งข้าวโพดหวานมีลักษณะทางกายภาพสีเหลืองเข้ม อ่อนนิ่ม ความชื้นสูง โดยขนาดของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานจะมีขนาด 5–10 mm ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งหลังการปรับสภาพเชิงกลจะนำวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานจำพวก ชัง เปลือก และเมล็ดคัดทิ้งมาผสมกันในสัดส่วน 54:44:2 (w/w) และลักษณะทางเคมีที่ได้ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ประกอบไปด้วยค่า pH, Moisture Content, TS, VS และ C/N Ratio ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 พบว่าค่า pH ในวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานหมักลดลงก่อนกระบวนการปรับสภาพด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification จากค่า pH เท่ากับ 6.75 ± 0.32 เป็นค่า pH เท่ากับ 3.76 ± 0.12 มีค่า pH ที่ค่อนข้างเป็นกรด เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสารชีวโมเลกุลภายในของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ขนาดเล็ก เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพอีกทั้งยังพบว่าส่งผลทำให้

จุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ต้องการในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ
ลดจำนวนลง

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

คุณสมบัติ	หน่วย	ปริมาณ
ก่อนปรับสภาพด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification 72 h		
pH	-	6.75±0.32
Moisture Content	%	69.09±5.85
TS	mg/g	309.05±5.85
VS	mg/g	260.76±6.73
VS/TS Ratio	-	0.84±0.01
C/N Ratio	-	32.64
Cellulose	%	30.16
Hemicellulose	%	40.08
Lignin	%	5.56
หลังปรับสภาพด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification 72 h		
pH	-	3.76±0.12
Moisture Content	%	69.11±12.29
TS	mg/g	308.91±12.29
VS	mg/g	269.42±8.69
VS/TS Ratio	-	0.87±0.02
C/N Ratio	-	32.55
Cellulose	%	24.52
Hemicellulose	%	32.63
Lignin	%	4.08

เนื่องจากไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่มีความเป็นกรดได้ ถ้าปริมาณกรดแลคติกที่ผลิตได้มีมาก จุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดแลคติกเองก็จะหยุดการเจริญเติบโตด้วยเช่นกัน ทำให้วัสดุเหลือทิ้งหมักเข้าสู่สภาวะคงที่ จุลินทรีย์จะหยุดการใช้สารอาหารในพืช เพื่อการเจริญเติบโตทำให้เหลือปริมาณสารอาหารในพืชหมักมากขึ้น ลดการสูญเสียโภชนะเช่น โปรตีนในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน (NH₃-N) [5] และค่า TS ก่อน และหลังปรับสภาพ มีค่า เท่ากับ 30.91% และ 30.89% ตามลำดับ และค่า VS มีค่า เท่ากับ 26.08% และ 26.94% ตาม

ลำดับ โดยอัตราส่วน VS/TS มีค่าเท่ากับ 0.84±0.01 และ 0.87±0.02 ตามลำดับ พบว่าค่า VS/TS Ratio ดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่า VS/TS Ratio ควรอยู่ในช่วง 0.69–0.95 โดยจะให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุดคือ 0.95 [15, 16] และค่า C/N Ratio มีค่าเท่ากับ 32.64 และ 32.55 พบว่าค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นวัตถุดิบ สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดย C/N Ratio ของวัตถุดิบตั้งต้นที่สามารถนำมาผลิตก๊าซชีวภาพคือ ตั้งแต่ 8–35 [17, 18] แต่ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะอยู่ในช่วง 20–35 [9, 19]

2) หัวเชื้อจุลินทรีย์

สำหรับลักษณะของหัวเชื้อจุลินทรีย์อันประกอบไปด้วยกากตะกอนน้ำเสียมีลักษณะทางกายภาพเป็นสารแขวนลอย เม็ดกลมเล็กสีดำ มีการตกตะกอนไม่มีกลิ่นเหม็นเกิดจากการหมักตัวของสารอินทรีย์ และกากตะกอนมูลสุกรมีลักษณะทางกายภาพเป็นสารแขวนลอยเม็ด

ตารางที่ 3 คุณลักษณะของหัวเชื้อจุลินทรีย์

คุณสมบัติ	หน่วย	ปริมาณ
pH	-	7.72±0.18
Moisture Content	%	90.23±16.83
COD	mg/L	98,258.17±21.73
TS	mg/L	97,682.54±16.83
VS	mg/L	81,425.68±16.21
VS/TS Ratio	-	0.73±0.64
VFA	mg CH ₃ COOH/L	1,042.17±11.73
ALK	mg CaCO ₃ /L	4,685.76±12.49
VFA/ALK Ratio	mg CH ₃ COOH/ mg CaCO ₃	0.25±0.36
C/N Ratio	-	9.13

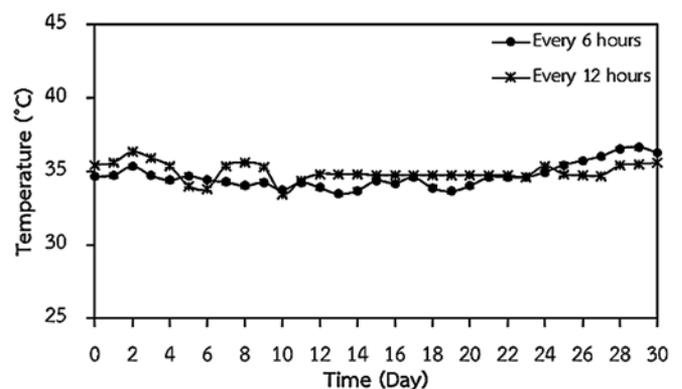
กลมเล็กสีน้ำตาลเข้ม มีการตกตะกอนและไม่มีการก่อกำเนิดขึ้น เนื่องจากตะกอนที่ได้เกิดจากการชะล้างคอกหมูด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ของฟาร์มหมูจึงทำให้ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้ยังมีกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์หลงเหลืออยู่ ดังแสดงในภาพที่ 4 และลักษณะทางเคมีที่ได้ทำการ วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ประกอบไปด้วยค่า pH, Moisture content, COD, TS, VS, VFA, ALK และ C/N Ratio ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 พบว่าค่า pH มีค่าเท่ากับ 7.72 ± 0.18 พบว่าค่าดังกล่าวมีค่าที่ค่อนข้างเป็นเบสอ่อน เนื่องมาจาก อัตราส่วนผสมระหว่างกากตะกอนมูลสุกรกับกากตะกอน น้ำเสียเท่ากับ 2:1 ซึ่งคุณสมบัติของกากตะกอนมูลสุกรเกิด จากการชะล้างคอกหมูด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ของฟาร์มหมู โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่า pH ที่เป็นเบส แก่จึงส่งผลทำให้ค่าสูงกว่าปกติเพียงเล็กน้อย สำหรับ ค่า pH ที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ใช้ในการดำรงชีวิตและใช้ ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ควรมีค่าอยู่ในช่วง 6.5–7.5 [3, 4] และค่า Chemical oxygen demand (COD) มีค่าเท่ากับ 98.25 ± 21.73 g/L พบว่าค่า ดังกล่าว ยังบ่งบอกถึงศักยภาพในการนำหัวเชื้อจุลินทรีย์มาเป็นหัว เชื้อในการเดินระบบ โดยค่า COD ที่เหมาะสมต่อการนำ มาผลิตก๊าซชีวภาพและให้ค่าความคุ้มค่าต่อการลงทุนของ ระบบผลิตก๊าซชีวภาพควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 1,200 mg/L [1, 9] และค่า VS/TS Ratio มีค่าเท่ากับ 0.73 ± 0.64 พบ ว่าค่าดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็น หัวเชื้อจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่า VS/TS Ratio ของตะกอนจุลินทรีย์ในบ่อหมักแบบไร้อากาศจะ มีค่าอยู่ในช่วง 0.70–0.85 [16] อีกทั้งยังพบว่าเมื่อระบบ มีการเพิ่ม ค่า VS/TS Ratio ให้สูงขึ้นระบบสามารถผลิต ก๊าซชีวภาพได้สูงขึ้น และจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบยังสามารถ รักษาเสถียรภาพในระบบในคงที่ได้อย่างต่อเนื่อง และค่า VFA/ALK Ratio มีค่าเท่ากับ 0.25 ± 0.36 พบว่าค่าดังกล่าว อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ไม่เกิน 0.4 แสดงถึงกำลังในการบำบัดเฟอร์สูง หากอัตราส่วน

ดังกล่าวมีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่ากำลังบำบัดเฟอร์ของระบบ มีค่าต่ำมาก โดยอัตราการบำบัดเฟอร์ของระบบที่มีค่าน้อย กว่า 0.4 จะส่งผลทำให้ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพใน การทำงาน โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีใดๆ [17] และ ค่า C/N Ratio มีค่าเท่ากับ 9.13 พบว่า ค่าดังกล่าวมีค่าที่ ค่อนข้างต่ำ แต่ก็ยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการนำมา เป็นหัวเชื้อในการเดินระบบ โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อ ไนโตรเจนที่สามารถใช้ผลิตก๊าซชีวภาพคือ ตั้งแต่ 8–35 [18]

6.2 ผลการศึกษาอุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับค่าอุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ เพื่อให้เกิดกระบวนการ ผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจุลินทรีย์จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ ประมาณ 35 ± 2 °C ฉะนั้น เพื่อให้การทำงานของจุลินทรีย์ กลุ่มนี้ดำเนินการไปได้ด้วยดี ส่งผลทำให้เกิดก๊าซชีวภาพ ในปริมาณมากจะต้องรักษาอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ให้ อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ [11, 12]



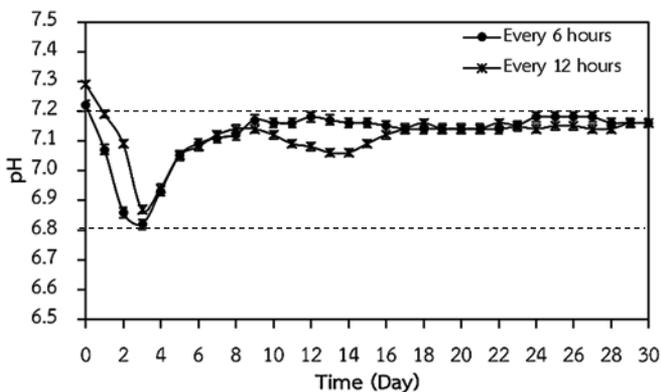
ภาพที่ 6 อุณหภูมิภายในเฉลี่ยของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

จากภาพที่ 6 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมและหมวนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h ซึ่งอุณหภูมิภายในเฉลี่ยของระบบผลิตก๊าซ ชีวภาพอยู่ในช่วง 33.51–36.66 และ 33.45–36.35°C

โดยระบบมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งอุณหภูมิจะแปรผันตามอุณหภูมิของสภาพอากาศแวดล้อม โดยอุณหภูมิภายในถังปฏิกริยาเป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งอุณหภูมิในช่วงนี้มีชื่อเรียกว่า Mesophilic rang จะมีอุณหภูมิประมาณ 20–45°C [8, 9]

6.3 ผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ใช้ในการดำรงชีวิตและใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนคือ ควรอยู่ในช่วง 6.5–7.5 [9] ซึ่ง ถ้าค่า pH สูงหรือต่ำกว่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพลดลง [4] โดยค่า pH ที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนมากที่สุดสำหรับใช้ในการดำรงชีวิตและผลิตก๊าซมีเทน คือ ควรในช่วงระหว่าง 6.8–7.2 [14, 18]



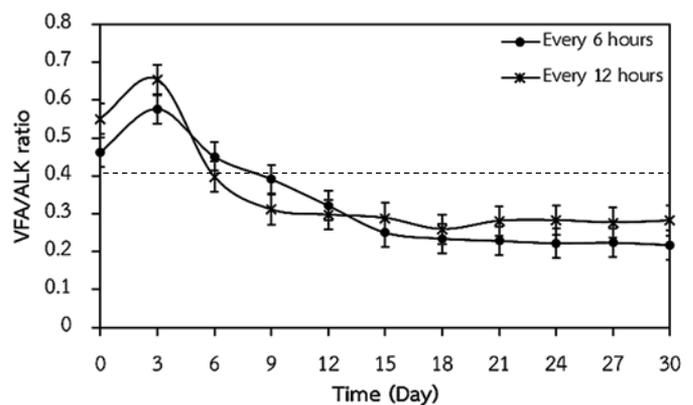
ภาพที่ 7 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จากภาพที่ 7 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h โดยค่า pH ของระบบอยู่ในช่วง 6.82–7.22 และ 6.67–7.29 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์สร้างมีเทนสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และเหมาะสมต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศ [12, 19] โดยในวันที่ 1–3 ของการทดลองของทั้ง 2 เงื่อนไขมีค่า pH ที่ลดลงอย่างรวดเร็ว อันเนื่องมาจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

ที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-acidification [20] ได้เปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายขนาดเล็ก เพื่อเปลี่ยนไปเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ [21]

6.4 ผลการศึกษาค่าสัดส่วนของค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ต่อค่าสภาพความเป็นด่าง (ALK)

สำหรับสัดส่วนกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ต่อสภาพความเป็นด่าง (ALK) สภาพความเป็นกรดและความเป็นด่างเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากต่อการทำงานของแบคทีเรียในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งต้องอาศัยแบคทีเรียสองพวกทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่อง โดยปกติปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายจะอยู่ในรูปของกรดอะซิติก (CH_3COOH) ควรมีค่าอยู่ในช่วง 50–500 mg/L [3] หากปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายในรูปของกรดอะซิติกมีค่ามากกว่า 2,000 mg/L [4, 5] จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพลดลง ส่วนค่าความเป็นด่างไม่ควรต่ำกว่า 1,000 mg/L ในรูปของหินปูน (CaCO_3) [11] เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดค่าพีเอชภายในระบบมีค่าลดต่ำลงจนเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบ [12, 14]



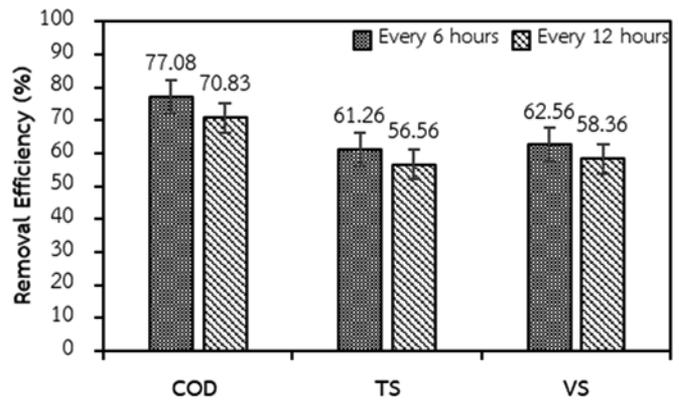
ภาพที่ 8 ค่า VFA/ALK Ratio

จากภาพที่ 8 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h อัตราส่วน VFA/ALK อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ไม่เกิน 0.4 [11, 20]

โดยมีค่า VFA/ALK Ratio เฉลี่ย เท่ากับ 0.33 และ 0.35 ตามลำดับ โดยในวันที่ 0-6 ของการทดลองพบว่า VFA/ALK ratio มีค่าที่เกิน 0.4 แต่ต่ำกว่า 0.8 ซึ่งค่าดังกล่าวส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อค่า pH สามารถที่จะลดลงได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย ซึ่งค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) และค่าสภาพความเป็นด่าง (ALK) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,843.45 และ 1,948.99 mg/L และ 5,682.42 และ 5,470.56 mg/L ตามลำดับ โดยค่าดังกล่าวของทั้ง 2 เงื่อนไขอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะถูกจุลินทรีย์ภายในถังปฏิกิริยาไปใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จะทำให้ปริมาณ VFA ลดลงและการที่ปริมาณ VFA มีค่าไม่เกิน 4,000 mg/L [4, 20] แสดงให้เห็นถึงระบบไม่เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายทำให้ไม่มีผลไปยังยังการทำงานของจุลินทรีย์จำพวก Acetogenic bacteria และ Methanogenic bacteria [11, 12]

6.5 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS

สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะพิจารณาจากการกำจัดค่า Chemical oxygen demand (COD), Total solid (TS) และ Volatile solid (VS) ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่า COD แสดงถึงความต้องการปริมาณออกซิเจนของน้ำเสียที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ [2, 4] ค่า TS แสดงถึงปริมาณของแข็งทั้งหมด ซึ่งเป็นสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออกจากวัสดุหมักแล้วนำไปอบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C [5, 7] จะบ่งบอกถึงลักษณะในการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบว่ามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายหรือลดปริมาณของเสียในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ และค่า VS แสดงถึงของแข็งระเหยได้ เมื่อนำ TS ไปเผาที่อุณหภูมิ 550 °C จะทำให้ทราบถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในวัสดุหมัก [7, 11]

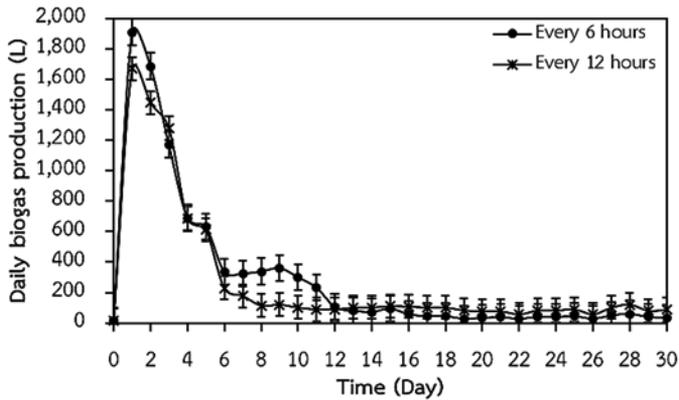


ภาพที่ 9 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS

จากภาพที่ 9 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 h มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD, TS และ VS มีค่าเท่ากับ 77.08%, 61.26% และ 62.56% ตามลำดับ และทุกๆ 12 h มีค่าเท่ากับ 70.83%, 56.56% และ 58.36% ตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 h จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ตามลำดับ ได้ดีกว่าอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 12 h เท่ากับ 8.11%, 7.67% และ 6.71% ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าระบบมีการกวนผสมภายในระบบสามารถลดปัญหาการเกิดชั้นตะกอนลอยได้ ซึ่งการกวนผสมทำให้สารอินทรีย์และจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียในถังปฏิกิริยาผสมกันอย่างต่อเนื่องเป็นสิ่งสำคัญที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก [17] โดยภายในถังปฏิกิริยามีการกวนผสมอย่างทั่วถึงอาจจะทำให้จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียสามารถสัมผัสกับสารอินทรีย์มากขึ้นและทั่วถึงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดค่า COD, TS และ VS เพิ่มสูงขึ้นถึง 60% [19, 22]

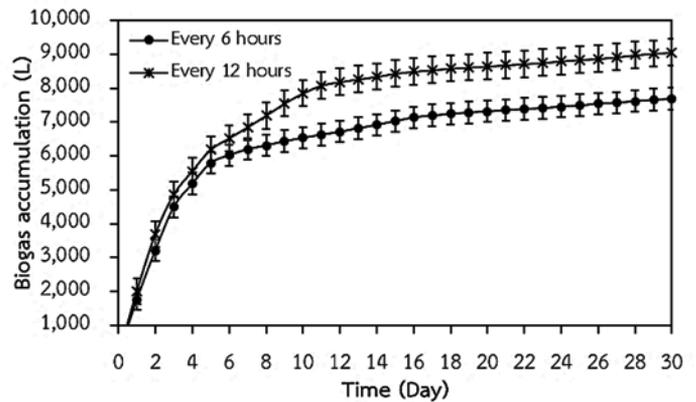
6.6 ผลการศึกษาปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยใช้จุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ต้องการออกซิเจนในการเกิดปฏิกิริยาทำให้เกิดกลุ่มก๊าซขึ้นขณะเกิดการย่อยสลาย โดยกลุ่มก๊าซนี้เรียกว่า ก๊าซชีวภาพ [11, 12]



ภาพที่ 10 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน

จากภาพที่ 10 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราความผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันเฉลี่ยเท่ากับ 283.34 และ 240.63 L/day ตามลำดับ โดยวันที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดคือ วันที่ 2 ของทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลอง ซึ่งมีค่าสูงถึง 1,910.73 และ 1,669.94 L/day โดยปริมาณก๊าซชีวภาพของทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองจะเกิดขึ้นมากที่สุดในช่วง 1-7 day แรกของการทดลอง อันเนื่องมาจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบนี้เป็นกระบวนการหมักแบบกะ ซึ่งมีการเติมสารอาหารเข้าระบบเพียงครั้งเดียว [7, 9] เมื่อจุลินทรีย์ทำการย่อยอาหารอย่างต่อเนื่องจะส่งผลให้ปริมาณสารอาหารในระบบลดลง เป็นสาเหตุทำให้ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ลดลง [5, 7] อีกทั้งยังพบว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุประเภทของแข็ง เมื่อระบบที่มีการกวนผสมภายในระบบในอัตราความถี่ที่ลดลง 50% จะส่งผลทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดต่ำลงมากถึง 10%-20% [10, 12]

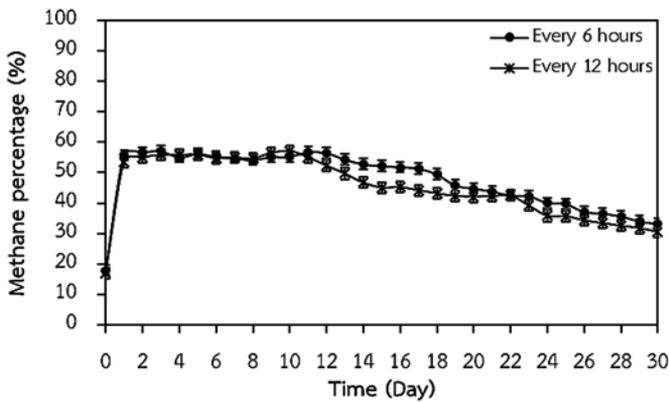


ภาพที่ 11 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมด

จากภาพที่ 11 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราความผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของระบบตลอดระยะเวลาในการทดลอง 30 days มีค่าเท่ากับ 9,060.86 และ 7,688.11 L ตามลำดับ โดยในช่วงวันที่ 6 ถึงวันที่ 10 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันของระบบการกวนผสมทุกๆ 6 h มีค่าสูงกว่าทุกๆ 12 h เนื่องมาจากค่า pH ของระบบมีค่าที่สูงกว่าและเหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพส่งผลทำให้ปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมดในช่วงดังกล่าวสูงตามไปด้วย [7, 19] อีกทั้งเมื่อระบบได้ทำการเพิ่มอัตราความผสมเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า หรือ 50% จากทุก 12 h เป็นทุก 6 h สามารถเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากถึง 15.15%

6.7 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน

โดยองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจะประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 50%-70% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 30%-50% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่นๆ เช่น แอมโมเนีย (NH_3) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และไอน้ำ (H_2O) เป็นต้น [14, 19] โดยก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่สูงมากกว่า 50% สามารถจุดติดไฟได้ดี และสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิง เพื่อผลิตพลังงานความร้อน ผลิตพลังงานกล และผลิตพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น [12, 20]

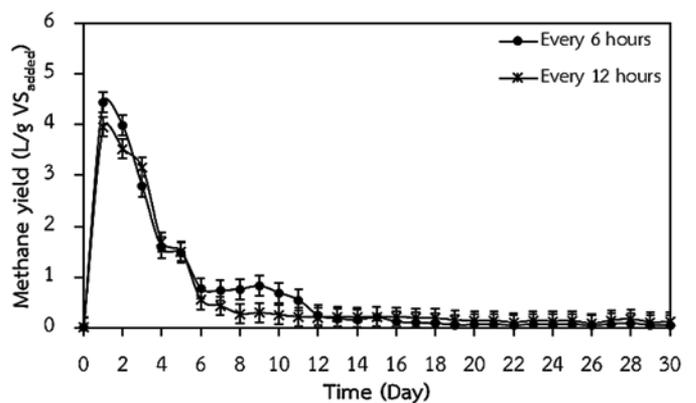


ภาพที่ 12 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน

จากภาพที่ 12 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 17.9%–58.4% และ 16.8%–59.6% ตามลำดับ และมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ยเท่ากับ 46.4% และ 44.0% ตามลำดับ ตลอดระยะเวลา 30 days โดยในช่วงวันที่ 12 ถึงวันที่ 30 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่อัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 h มีค่าที่มากกว่าทุกๆ 12 h เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ เช่น pH, VFA/ALK ratio และประสิทธิภาพของระบบมีค่าที่มากกว่าและอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพทำให้อินทรีย์ที่มีอยู่ภายในระบบสามารถเปลี่ยนอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนได้ง่ายกว่า [9, 10] สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพนี้มีอัตราการการผลิตของก๊าซมีเทนเฉลี่ย เท่ากับ 154.65 และ 134.92 L CH₄/day อีกทั้งยังมีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) มากที่สุด เท่ากับ 783 และ 794 ppm ตามลำดับ และมีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เฉลี่ย เท่ากับ 122.06 และ 126.69 ppm ตามลำดับ ซึ่งองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพมีสัดส่วน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

คุณสมบัติ	หน่วย	ปริมาณ
กวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 6 h		
Methane (CH ₄)	%(v/v)	17.9–58.4
Carbon dioxide (CO ₂)	%(v/v)	24.6–45.3
Oxygen (O ₂)	%(v/v)	0.0–5.5
Hydrogen sulphide (H ₂ S)	ppm	0–783
กวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 12 h		
Methane (CH ₄)	%(v/v)	16.8–59.6
Carbon dioxide (CO ₂)	%(v/v)	26.9–45.2
Oxygen (O ₂)	%(v/v)	0.0–10.5
Hydrogen sulphide (H ₂ S)	ppm	0–794



ภาพที่ 13 ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะ

6.8 ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะ

สำหรับผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะ คือ ปริมาณของก๊าซมีเทนต่อการย่อยสลายของสารอินทรีย์ต่อหน่วย โดยในขั้นตอนนี้จะทำการพิจารณาปริมาณของผลผลิตของก๊าซมีเทนต่อหน่วยของแข็งระเหยง่าย เนื่องจากวัตถุประสงค์ที่ได้ทำการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นของแข็ง คือ วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

จากภาพที่ 13 พบว่าทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ย เท่ากับ 0.688 และ 0.564 L CH₄/g VS_{added} และมีศักยภาพ

ในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 4.600 และ 3.851 L $\text{CH}_4/\text{g VS}_{\text{added}}$ โดยปกติของผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะที่เกิดจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-acidification จะอยู่ในช่วง 0.174–2.249 L $\text{CH}_4/\text{g VS}_{\text{added}}$ [21] โดยผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะมีความสอดคล้องกับปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน [8, 11] ดังแสดงในภาพที่ 10 และสัดส่วนของก๊าซมีเทน โดยสัดส่วนของก๊าซมีเทน ดังแสดงในภาพที่ 12 เมื่อก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันและสัดส่วนของก๊าซมีเทนมีปริมาณที่ลดลงจะส่งผลโดยตรงทำให้ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะมีปริมาณที่ลดลงตามไปด้วย [7]

7. สรุปผลการทำวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง โดยทำการศึกษาภายใต้สภาวะการย่อยสลายแบบไร้อากาศขนาด 1,000 L ปริมาตรใช้จริง 500 L ระบบมีลักษณะการป้อนวัสดุหมักแบบกะ (Batch fermentation) วัตถุดิบที่ใช้คือ วัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวาน ประกอบไปด้วย ชัง เปลือกและเมล็ดคั่วคั่วทั้งในสัดส่วน 54:44:2 (w/w) โดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์คือ กากตะกอนมูลสุกรและกากตะกอนน้ำเสียในสัดส่วน 2:1 (v/v) ซึ่งอัตราส่วนวัตถุดิบ : หัวเชื้อจุลินทรีย์ เท่ากับ 1 kg : 4 L โดยแบ่งเงื่อนไขการทดลองออกเป็น 2 เงื่อนไขภายใต้อัตราส่วนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 และ 12 h เป็นระยะเวลารอบละ 10 mins ตั้งแต่เวลา 06.00–18.00 น. ทำการศึกษาในระดับต้นแบบ (Pilot scale) ภายใต้อุณหภูมิสภาพแวดล้อม เป็นระยะเวลาในการทดลองจำนวน 30 days จากการศึกษาพบว่า อัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 6 h มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันเฉลี่ย เท่ากับ 283.34 L/day ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของระบบ เท่ากับ 9,060.86 L สัดส่วน

ของก๊าซมีเทนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 57.1% ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยเท่ากับ 0.688 L $\text{CH}_4/\text{g VS}_{\text{added}}$ ประสิทธิภาพในการกำจัด COD, TS และ VS เท่ากับ 77.08%, 61.26% และ 62.56% ตามลำดับ ดังนั้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง เมื่อระบบได้ทำการเพิ่มอัตราการกวนผสมเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าสามารถเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากถึง 15.15% และการนำวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานมาเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถเป็นแนวทางในการจัดการปัญหาของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรอย่างถูกวิธี รวมถึงเป็นแนวทางในการนำวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานมาผลิตเป็นพลังงานทดแทน เพื่อใช้ลดต้นทุนในการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมได้อีกทางหนึ่ง

8. ข้อเสนอแนะ

- 8.1 ระบบควรมีการศึกษาระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 0, 3, 6, 12 และ 24 h
- 8.2 ระบบควรมีการศึกษาระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน เป็นระยะเวลา 24 h
- 8.3 ระบบควรมีการศึกษาแยกระหว่างระบบการกวนผสมและระบบการหมุนเวียนตะกอน

9. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณคณะผู้บริหารของบริษัท ชันสวีท จำกัด (มหาชน) จังหวัดเชียงใหม่ ที่ได้ให้โอกาสในการทำวิทยุวิจัยร่วมกับสถานประกอบการ รวมถึงบุคลากรแผนกระบบบำบัดน้ำเสียและระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ให้คำแนะนำ การสนับสนุน รวมทั้งความรู้ในด้านระบบผลิตก๊าซชีวภาพตลอดจนให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ อีกทั้งยังต้องขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากวิทยาลัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” ประจำปี

ปี 2560 ทุนาการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ “ทุนศิษย์ก้นกุฏิ” ประจำปี 2560 และทุนสนับสนุนการวิจัยแผนงานเสริมสร้างศักยภาพและพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ตามทิศทางการศึกษา การวิจัยและนวัตกรรมประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2562 จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

10. บรรณานุกรม

- (1) นคร ทิพย์วงศ์, “เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล,” สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2553
- (2) P. Schultze, A. Seidel-Morgenstern, H. Lorenz, M. Leschinsky, G. Unkelbach, “Advanced Process for Precipitation of Lignin from Ethanol Organosolv Spent Liquors,” *Bioresource Technology*, vol. 199, pp. 128-134, 2016.
- (3) อัจฉริยา เจริญวัย, สิริชัย คุณภาพดีเลิศ, “ผลของเวลาเก็บกักทางเซลล์และค่าความเข้มข้นของบิสฟีนอลเอต่อสมรรถนะของถังปฏิกรณ์ชีวมวลแบบเบรค,” *วิทยานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2556.
- (4) จินตนา ทองเอี้ยว, บุญญฤทธิ์ เผ่าเพ็ง, พงษ์ศักดิ์ นรรัตน์, “การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเหลือทิ้งขนมหวาน,” *การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 8, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, วันที่ 4-8 พฤศจิกายน 2558, หน้า 99-102*, 2558.
- (5) สุพจน์ เกิดมี, “พัฒนาการใช้พลังงานก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์และเศษวัสดุทางการเกษตร,” *คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์*, 2555.
- (6) S. P. Kumar S. Singh, I. M. Mishra, D. K. Adhikari, “Continuous ethanol production by *Kluyveromyces* sp. IPE453 immobilized on bagasse chips in packed bed reactor,” *Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels*, vol. 2, no. 1, pp. 1-6, 2011.
- (7) P. Sopee, P., S. Natthanicha, “Methane production potential from anaerobic co-digestions of different animal dung and sweet corn residuals,” *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 943-948, 2017.
- (8) A. Meggyes, V. Nagy, “Biogas and energy production by utilization of different agricultural wastes,” *acta Polytechnica Hungarica*, vol. 9, no. 6, pp. 65-80, 2012.
- (9) Z. Meixia, Z. Guangming, Z. Panyue, F. Shiyang, J. Shuguang, W. Dan, W., F. Wei, “Anaerobic digestion of corn stovers for methane production in a novel bionic reactor,” *Bioresource Technology*, vol. 166, pp. 606-609, 2014.
- (10) T. Libin, Z. Dexun, Y. Hairong, W. Linfeng, Z. Xin, L. Xiujin “Identifying proper agitation interval to prevent floating layers formation of corn stover and improve biogas production in anaerobic digestion,” *Bioresource Technology*, vol. 186, pp. 1-7, 2015.
- (11) ชลลดา แดงประดับ, “ผลของเวลาเก็บกักต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดหมัก โดยกระบวนการไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน,” *ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 2554.
- (12) ทวีพันธ์ สเลอาด, “ผลของเวลาการกวนผสมและการเวียนตะกอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร โดยระบบหมักแบบไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง,” *วิทยานิพนธ์, วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย*, 2554.
- (13) P. Pompan, N. Annop, A. Birgitte, C. Pawinee, “Anaerobic co-digestion of cassava pulp and pig manure: effects of waste ratio and inoculum-substrate ratio,” *The 2nd Joint International Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)”, 21-23 November 2006. Bangkok, Thailand, 2006.*
- (14) ทรงวุฒิ นิรัฐศิลป์, “คู่มือแนะนำการติดตั้งและใช้งานระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์,” *งานบริการและวิจัยด้านพลังงาน, ศูนย์ฝึกศึกษาบุคลากรด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร, กรมการพลังงานทหาร, หน้า 2-22.*, 2555.
- (15) S. Michel, W. H. Stijn, H. Van, H. Sander, V. Han, R. Katleen, “Laccase enzyme detoxifies hydrolysates and improves biogas production from hemp straw and miscanthus,” *Bioresource Technology*, vol. 244, no. 1, pp. 597-604, 2017.
- (16) O. Akindele, B. Kamoru, A. Olusola, “Biogas production from anaerobic co-digestion of corn cobs with pig and poultry droppings,” *Journal of Engineering Research and Development (AJERD)*, vol. 1, no. 2, pp. 273-282, 2018.
- (17) X. Wang, X. Duan, J. Chen, K. Fang, L. Feng, Y. Yan, Q. Zhou, “Enhancing anaerobic digestion of waste activated sludge by pretreatment: effect of volatile to total solids,” *Journal of Environmental Technology*, vol. 37, pp. 1520-1529, 2016.
- (18) กิตติยา บ่อมเงิน, ประภา ไร่สะลม, รัชพล พะวงศรีรัตน์, “การผลิตแก๊สชีวภาพจากต้นธูปฤๅษีที่ผ่านการปรับสภาพ (*Typha angustifolia* L.) ร่วมกับมูลวัวโดยกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ,” *Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University, ปีที่ 4, ฉบับที่ 5, เดือนกันยายน - ตุลาคม, หน้า 28-41*, 2560.

- (19) B. Budiyo, L. Syaichurrozi, S. Sumardiono, "Biogas production from bioethanol waste: the effect of pH and urea addition to biogas production rate," *Waste Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 2338-6207, 2013.
- (20) H. Young, S. Kyung, E. Richard, "Pre-acidification in anaerobic sludge bed process treating brewery wastewater," *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 35, pp. 4267-4276, 2001.
- (21) E. Ignatius, A. P. Jabakumar, "Optimization of pre-hydrolysis conditions for the productions of biogas," Thesis (Sustainable Technology and Industrial Biotechnology), School of Engineering. University of Boras, Sweden, 2011.
- (22) C. Chen, D. Zheng, G. J. Liu, L. W. Deng, Y. Long, Z. H. Fan, "Continuous dry fermentation of swine manure for biogas production," Waste Chalcombe Publications, Marlow, Bucks, UK., 2015.