

ผลของการเติมกากน้ำตาลและปุ๋ยฟอสฟอรัสในน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ

Effects of adding molasses and phosphorus fertilizer to thai dessert factory wastewater for biogas production through anaerobic digestion system

ณภัทร งามสิริเกียรติ¹, นพวรรณ เสมวิมล^{1,2,*}, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร^{1,2}, อรอนงค์ ผิวนิล^{1,2}, มัลลิกา ศรีชมภู², จุลบุตร จันทร์สุรย์², นิรุต อุปนันท์² และ ปาวิน วิจิตรตระการ²

Napat Ngamsirikiata, Noppawan Semvimola, Thanit Pattamapitoona, Onanong Phewnila, Manlika Srichomphu, Chulabut Chanthasoon, Nirut Uppanuntb and Pavin Wichittrakarn

Received: 25 July 2024 ; Revised: 16 September 2024 ; Accepted: 21 October 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาผลของการเติมกากน้ำตาลและปุ๋ยฟอสฟอรัสในน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทย เพื่อการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์เป็นแหล่งพลังงานทางเลือก วางแผนการวิจัยเป็น 3 ชุดการทดลองดังนี้ TR1 น้ำเสียเพียงอย่างเดียว TR2 น้ำเสียและกากน้ำตาล และ TR3 น้ำเสีย กากน้ำตาลและปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัส ดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลา 30 วัน ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียโดยมีพารามิเตอร์วิเคราะห์ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ซีโอดี และปริมาณของแข็ง รวมถึงองค์ประกอบธาตุอาหารทั้งหมดในรูปของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทุกๆ 3 วัน ตวงวัดปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ทุกวันและเก็บรวบรวมตัวอย่างในขวดเก็บตัวอย่างก๊าซสูญญากาศ (Glass vial) แล้วนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซมีเทนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ผลการทดลองพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง TR1 และ TR2 เท่ากับ 226.67 ± 15.07 และ 258.67 ± 23.71 มิลลิลิตร ตามลำดับ และมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.56 และ 0.61 L CH₄/g VS_{added} ตามลำดับ ซึ่งทั้งสองชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ในขณะที่ชุดการทดลอง TR3 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมน้อยที่สุด เท่ากับ 133.67 ± 20.36 มิลลิลิตร และมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.53 L CH₄/g VS_{added} สำหรับประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูป COD พบว่าชุดการทดลอง TR2 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 81.54 รองลงมาคือ ชุดการทดลอง TR1 (79.99%) และ TR3 (76.36%) แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงอัตราส่วนธาตุอาหารด้วยการเติมกากน้ำตาลในระบบไม่มีผลต่อการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพแต่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบไร้อากาศ ในขณะที่ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นจากการเติมปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัสมีผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง ซึ่งผลการวิจัยครั้งนี้สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางการพัฒนาระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกาศสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกต่อไป

คำสำคัญ: การย่อยสลายแบบไร้อากาศ, ก๊าซชีวภาพ, น้ำเสีย, โรงงานผลิตขนมไทย, ธาตุอาหาร

Abstract

This research aimed to study the effects of adding molasses and phosphorus fertilizer to Thai dessert factory wastewater to enhance biogas production as an alternative energy source for utilization. The experimental design consisted of three sets: TR1 (wastewater only), TR2 (wastewater and molasses), and TR3 (wastewater, molasses, and phosphorus liquid fertilizer). The experiment was conducted over a period of 30 days. The characteristics of the wastewater, including pH, chemical oxygen demand (COD), suspended solids (SS), and total nutrient content in terms of nitrogen and phosphorus, were analyzed every three days. Biogas production was collected and measured in

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ

² โครงการศึกษาวิจัยและพัฒนาสิ่งแวดล้อมแหลมผักเบี้ยอันเนื่องมาจากพระราชดำริ มูลนิธิชัยพัฒนา กรุงเทพฯ

¹ Department of Environmental science, Faculty of Environment, Kasetsart University, Bangkok, Thailand.

² The King's Royally Initiated Leam Phak Bia Environment Research and Development Project, Chaipattana Foundation, Bangkok, Thailand.

* Corresponding author: Email: Noppawan.sem@ku.th

glass vials, and its composition was analyzed using GC chromatography. The results indicated that the accumulated biogas volumes for the experimental sets TR1 and TR2 were 226.67 ± 15.07 and 258.67 ± 23.71 mL, respectively, with methane production potentials of 0.56 and 0.61 L CH₄/g VSadded, respectively. The two treatments showed no significant difference ($p>0.05$). In contrast, the experimental set TR3 showed the lowest accumulated biogas volume at 133.67 ± 20.36 mL and a methane production potential of 0.53 L CH₄/g VSadded. For the efficiency of organic matter removal in terms of COD, the experimental set TR2 exhibited the highest treatment efficiency, with a value of 81.54%. This was followed by experimental set TR1 (79.99%) and TR3 (76.36%). Thus, the adjustment of the nutrient ratio by adding molasses in the system did not significantly affect biogas production but did improve the wastewater treatment efficiency of the anaerobic system. However, the increased phosphorus concentration from phosphorus liquid fertilizer inhibited methanogenic bacteria activity, resulting in reduced biogas production efficiency. The results of this study can be applied to develop a biogas production system through an anaerobic digestion process as an alternative energy source for wastewater treatment.

Keywords: Anaerobic digestion, biogas, wastewater, Thai dessert factory, nutrients

บทนำ

กระบวนการผลิตขนมไทยมีการใช้น้ำในหลายขั้นตอนการผลิต ได้แก่ การล้างวัตถุดิบ การเตรียมวัตถุดิบประเภทแป้ง ถั่ว และน้ำตาล การประกอบอาหารโดยการนึ่งและการต้ม และการล้างอุปกรณ์ เป็นต้น โดยน้ำหลังเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตจะมีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีที่สูงมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้อากาศลดลง ทำให้เมื่อมีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำจะส่งผลต่อคุณภาพน้ำและก่อให้เกิดปัญหาหมกหมวนต่อสิ่งแวดล้อม (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2560) ดังนั้นแนวทางในการเลือกใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและเป็นวิธีการที่สามารถจัดการน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน อีกทั้งยังเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์ของเสียและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Bennich & Belyazid, 2017)

การย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Digestion) เป็นหนึ่งในแนวทางการจัดการน้ำเสียที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสามารถลดการปนเปื้อนสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพช่วยลดปัญหาหมกหมวนในแหล่งน้ำที่เกิดจากการปล่อยน้ำทิ้งของกิจกรรมมนุษย์และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Tetteh & Rathilal, 2021) ซึ่งกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างกลุ่มแบคทีเรียสร้างกรดและกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทนในการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย และถูกเปลี่ยนรูปกลายเป็นก๊าซชีวภาพในขั้นตอนสุดท้าย (Raja & Wazir, 2017) ซึ่งก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ประโยชน์ควรมีก๊าซมีเทน (CH₄) เป็นองค์ประกอบหลักประมาณร้อยละ 50-70 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ประมาณร้อยละ 30-50 และก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) และแอมโมเนีย (NH₃) ปริมาณเล็กน้อยเป็นต้น (Ahmmad & Haque, 2014)

ทั้งนี้ปริมาณและคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้นั้นขึ้นอยู่กับอิทธิพลจากหลายปัจจัย โดยหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ คือ ปริมาณธาตุอาหารซึ่งแบคทีเรียแบบไม่ใช้อากาศควรมีปริมาณธาตุอาหารในรูปของอัตราส่วน COD:N:P อย่างน้อยที่สุดเท่ากับ 100:2.2:0.4 (กรมพลังงานทดแทน, 2542) แต่เนื่องจากคุณลักษณะของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยที่มีอัตราส่วนธาตุอาหารต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม (ณภัทร งามศิริเกียรติ และคณะ, 2567) ดังนั้นจึงได้มีการนำเทคนิคการหมักร่วม (Co-digestion) มาประยุกต์ใช้ในการปรับสมดุลอัตราส่วนธาตุอาหารด้วยการหมักร่วมกับกากน้ำตาลและปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัส โดยมีงานวิจัยของ Kalembe and Barbusinski (2017) พบว่ากากน้ำตาลสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึงร้อยละ 21 เมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีการหมักร่วมกับกากน้ำตาล ในขณะที่ปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัสถือเป็นวัสดุหมักร่วมที่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสสูงและมีไนโตรเจนต่ำ (Seachem, 2022) จึงทำให้ง่ายต่อการควบคุมอัตราธาตุอาหารสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ (กลั่นประทุม ปัญญาปิง และคณะ, 2564; จินตนา ทองเอี้ยว และคณะ, 2558; เอนก สวาทอินทรีย์ และคณะ, 2565)

งานวิจัยครั้งนี้จึงเป็นการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยและผลของการปรับสมดุลอัตราส่วนธาตุอาหารในน้ำเสีย เพื่อการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด โดยศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำจากการหมักแบบไม่ใช้อากาศ รวมถึงปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบก๊าซ เพื่อใช้เป็นแนวทางพัฒนาระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

1. ตัวอย่างน้ำเสียและวัสดุหมักร่วม

ตัวอย่างน้ำเสียสำหรับงานวิจัยครั้งนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากโรงงานผลิตขนมไทยทรัพย์สินกุล จังหวัดเพชรบุรี ซึ่งมีกระบวนการผลิตขนมไทยหลายชนิด เช่น ทองหยิบ ทองหยอด ฝอยทอง และหม้อแกง เป็นต้น ทำการเก็บตัวอย่างน้ำจากบ่อรวบรวมน้ำเสียที่รวบรวมน้ำเสียหลังเสร็จสิ้นกระบวนการผลิตก่อนส่งเข้าสู่ระบบบำบัด

วัสดุหมักร่วมที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ได้แก่ กากน้ำตาลเจือจางร้อยละ 50 (Molasses) เพื่อให้ช่วยต่อการผสมและย่อยสลาย และปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัสเจือจางร้อยละ 1 (Flourish Phosphorus) เนื่องจากเป็นวัสดุหมักราคาประหยัดและหาง่าย รวมถึงมีธาตุอาหารสูงและง่ายต่อการควบคุมอัตราส่วนธาตุอาหารของวัสดุหมัก

2. ถึงปฏิกรณ์สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

ดำเนินการวิจัยโดยใช้ชุดอุปกรณ์การผลิตก๊าซชีวภาพดัดแปลงจากวิธีการของ Kanu et al. (2015) ชุดอุปกรณ์ประกอบด้วย ขวดแก้วสี่ขาขนาด 2.5 ลิตร ปิดปากขวดด้วยจุกยางเจาะรู 2 รู สำหรับเสียบเทอร์โมมิเตอร์และแท่งแก้วที่ต่อเข้ากับสายซิลิโคนสำหรับเป็นทางไหลของก๊าซเข้าสู่ถุงเก็บก๊าซ (Gas sampling bag) ปริมาตร 0.5 ลิตร (Figure 1a) และชุดอุปกรณ์สำหรับการบำบัดน้ำเสียประกอบด้วย ขวดแก้วรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และวาล์วกันอากาศไหลย้อนกลับ (Figure 1b) ปิดรอยรั่วระหว่างข้อต่อด้วยการรื้อนและใช้กระดาษอลูมิเนียมฟอยล์ปิดขวดสำหรับจำลองระบบภายใต้สภาวะแบบไม่ใช้อากาศในระบบปิด

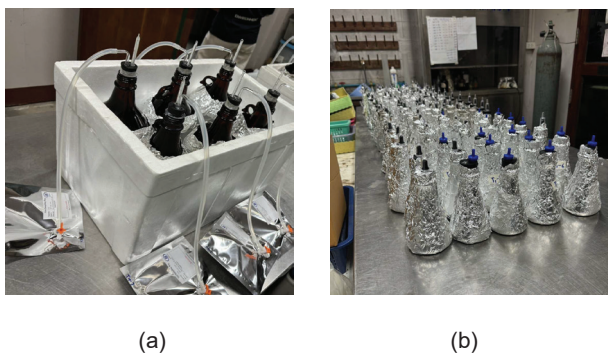


Figure 1 Set of equipment (a) biogas production (b) wastewater treatment

การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ

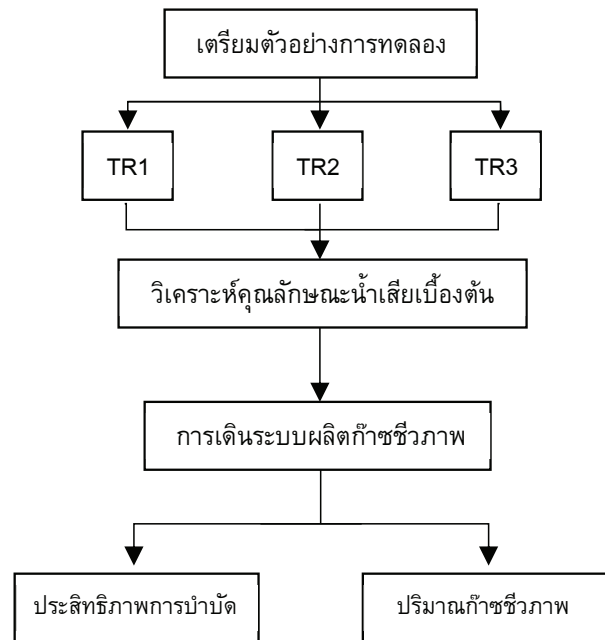


Figure 2 The conceptual biogas production Framework

กำหนดชุดการทดลองเป็น 3 ชุดการทดลอง ดังนี้ ชุดการทดลอง TR1 น้ำเสียเพียงอย่างเดียว เป็นชุดควบคุม ชุดการทดลอง TR2 น้ำเสียต่อกากน้ำตาลเจือจางร้อยละ 50 โดยมีอัตราส่วนเท่ากับ 50:1 และชุดการทดลอง TR3 น้ำเสียต่อกากน้ำตาลเจือจางร้อยละ 50 ต่อปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัสเจือจางร้อยละ 1 เท่ากับ 50:1:0.5 ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะของน้ำเสียเบื้องต้น โดยมีพารามิเตอร์และวิธีการวิเคราะห์แสดงดัง Table 1 ตามวิธีการมาตรฐานวิธีวิเคราะห์ (APHA et al., 2012) และทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ Analysis of Variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างโดยวิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

เริ่มเดินระบบในรูปแบบการป้อนอาหารแบบกะ (batch) ที่อุณหภูมิห้อง (30 ± 3 องศาเซลเซียส) แล้วทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง 30 วัน โดย 1 ชุดการทดลองจะประกอบด้วยแบบจำลองถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพจำนวน 3 ชุด และถึงปฏิกรณ์บำบัดน้ำเสียจำนวน 10 ชุด ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ โดย 1 ชุดการทดลอง เป็นตัวแทนระยะเวลาบำบัด 3 วัน

Table 1 Water quality parameters, units and analytical methods

Parameters	Units	Analytical Method
pH	-	pH Meter
COD	mg/l	Close Reflux Method
TS	mg/l	Gravimetric Method
VS	mg/l	Gravimetric Method
TKN	mg/l	Kjeldahl Method
Nitrate	mg/l	Brucine Method
TP	mg/l	Ascorbic acid

ประเมินประสิทธิภาพการบำบัดและการผลิตก๊าซชีวภาพ

ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ทุกๆ 3 วัน โดยมีพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) เพื่อดูแนวโน้มและความสัมพันธ์ของปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดกับผลผลิตปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น รวมถึงระยะเวลาเก็บที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพและการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ โดยนำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์หาคำนวนหาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบ วิธีการคำนวณแสดงดัง สมการที่ 1

$$\% \text{ Removal} = \frac{\text{influent} - \text{Effluent}}{\text{influent}} \times 100 \quad (1)$$

นอกจากนี้ดำเนินการเก็บตัวอย่างก๊าซจากถังเก็บก๊าซที่ต่อเชื่อมกับชุดอุปกรณ์การผลิตก๊าซชีวภาพทุกวันโดยใช้หลอดเก็บก๊าซ (Gas tight syringe) ดูดตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้นจากถังเก็บก๊าซที่มีวาล์วเปิดปิดการไหลของก๊าซจนถังเก็บก๊าซเป็นสุญญากาศ และปล่อยในขวดเก็บตัวอย่างก๊าซสุญญากาศ (Glass vial) ขนาด 20 มิลลิลิตร จดบันทึกปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นทุกวันและนำตัวอย่างก๊าซไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซมีเทน (CH_4) โดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography- mass spectrometry (GC/MS) ยี่ห้อ Agilent รุ่น 5975) เพื่อใช้เปรียบเทียบกับศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพตามวิธีของ Nielfa *et al.* (2015) แบบจำลองศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด ($\text{BMP}_{\text{thCOD}}$) แสดงดังสมการที่ 2 สำหรับพิจารณาถึงแนวทางการใช้ประโยชน์ต่อไป

$$\text{BMP}_{\text{thCOD}} = \frac{n_{\text{methane}} \times R \times T}{P \times \text{VS}_{\text{added}}} \quad (2)$$

$$\text{เมื่อ } n_{\text{methane}} = \frac{\text{COD}}{64 \text{ (g/mol)}} \quad (3)$$

$\text{BMP}_{\text{thCOD}}$ คือ ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด ($\text{L CH}_4/\text{g VS}_{\text{added}}$)

n_{methane} คือ จำนวนโมเลกุลของมีเทน (mol)

R คือ ค่าคงตัว (0.082 atm L/mol K)

T คือ ที่อุณหภูมิ 35°C (308 K)

P คือ ที่ความดันปกติ (1 atm)

ผลและวิจารณ์การทดลอง

1. คุณลักษณะของวัสดุหมัก

น้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีลักษณะทางกายภาพ คือ มีสีน้ำตาลอมเหลือง มีตะกอนแขวนลอยปริมาณมาก ซึ่งเป็นตะกอนสารอินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการเตรียมวัตถุดิบและกระบวนการผลิตขนมไทย และมีกลิ่นเปรี้ยวจากน้ำหมักชีวภาพที่ใช้ในการผสมน้ำล้างพื้นเพื่อทำความสะอาด ส่งผลให้น้ำเสียตัวอย่างมีปริมาณสารอินทรีย์สูงและมีสภาพเป็นกรด จากผลการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียในชุดการทดลอง TR1 เป็นชุดควบคุม เทียบกับคุณลักษณะน้ำเสียที่ใช้วิธีการหมักร่วมเพื่อปรับอัตราส่วนธาตุอาหารในชุดการทดลอง TR2 และ TR3 พบว่าชุดการทดลอง TR1 น้ำเสียเพียงอย่างเดียวมีค่าความเป็นกรด-ด่างค่อนข้างต่ำอยู่ที่ 5.69 มีค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) เท่ากับ $5,333.33 \pm 923.76$ มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 95.84 สำหรับคุณภาพน้ำเสียที่ใช้วิธีการหมักร่วมในชุดการทดลอง TR2 และ TR3 มีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงเล็กน้อย เท่ากับ 5.55 และ 5.43 ตาม

ลำดับ แต่มีค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีเพิ่มขึ้น (COD) เท่ากับ $6,933.33 \pm 461.88$ และ $5,866 \pm 461.88$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ รวมทั้งค่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 86.06 และ 84.50 ตามลำดับ โดยจาก Table 2 พบว่าอัตราส่วนธาตุอาหารในรูปของ COD:N:P ของทั้ง 3 ชุดการทดลองมีปริมาณธาตุอาหารที่

จำเป็นต่อการเจริญเติบโตและกระบวนการย่อยสลายของกลุ่มแบคทีเรียแบบไม่ใช้อากาศ โดยเฉพาะฟอสฟอรัสมีปริมาณค่อนข้างต่ำ เนื่องจากปริมาณธาตุอาหารที่กลุ่มแบคทีเรียใช้ในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศควรมีอัตราส่วนในรูป COD:N:P อย่างน้อยเท่ากับ 100:2.2:0.4 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2564)

Table 2 Characteristics of substrate and co-digestion

Parameter	Experimental		
	TR1	TR2	TR3
pH*	5.69 ± 0.03 a	5.55 ± 0.01 b	5.43 ± 0.02 c
COD (mg/l)*	$5,333.33 \pm 923.76$ b	$6,933.33 \pm 461.88$ a	$5,866.67 \pm 461.88$ ab
TS (mg/l)*	$4,116.85 \pm 53.40$ c	$5,193.67 \pm 108.09$ a	$4,922.19 \pm 110.51$ b
VS (mg/l)*	$3,945.67 \pm 72.14$ c	$4,469.67 \pm 109.43$ a	$4,159.40 \pm 119.75$ b
TN (mg/l)*	87.80 ± 5.56 c	156.98 ± 7.82 a	111.88 ± 5.30 b
TP (mg/l)*	10.15 ± 2.65 c	12.92 ± 1.28 b	19.70 ± 2.10 a
COD:N:P	100:1.73:0.20	100:2.18:0.18	100:2.00:0.34

* Different with letters (a-c) in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$)

2. ผลผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลการทดลองการหมักน้ำเสียโรงงานขนมไทยทั้ง 3 ชุดการทดลองในระบบหมักแบบไม่ใช้อากาศที่อุณหภูมิห้องระยะเวลาในการทดลอง 30 วัน จาก Figure 3 แสดงให้เห็นว่าทุกชุดการทดลองมีผลผลิตก๊าซสะสมเกิดขึ้น โดยชุดการทดลอง TR2 น้ำเสียต่อกากน้ำตาลมีปริมาณก๊าซสะสมสูงสุด รองลงมาคือชุดการทดลอง TR1 ชุดควบคุม เท่ากับ 258.67 ± 23.71 และ 226.67 ± 15.07 มิลลิลิตร ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติ Analysis of Variance (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างโดยวิธี Duncan's multiple range test พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ในขณะที่ชุดการทดลอง TR 3 น้ำเสียต่อกากน้ำตาลต่อปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัสมีผลผลิตปริมาณก๊าซสะสมน้อยสุดเท่ากับ 133.67 ± 20.36 มิลลิลิตร ซึ่งมีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จาก Figure 4 พบว่า ทุกชุดการทดลองมีอัตราการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้นสูงสุดในช่วงวันที่ 3 ก่อนที่ระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ในวันที่ 15 เป็นต้นไป โดยชุดการทดลอง TR1, TR2 และ TR3 มีอัตราการผลิตก๊าซที่สภาวะคงที่เฉลี่ยเท่ากับ 5.05 ± 0.49 , 6.72 ± 3.99 และ 2.45 ± 1.89 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นน้ำเสียมีปริมาณสารอินทรีย์อยู่มากและย่อยสลายง่ายสำหรับให้กลุ่มแบคทีเรียใช้เป็นแหล่งอาหารและพลังงานในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนเซลล์ ทำให้เกิดการย่อยสลาย

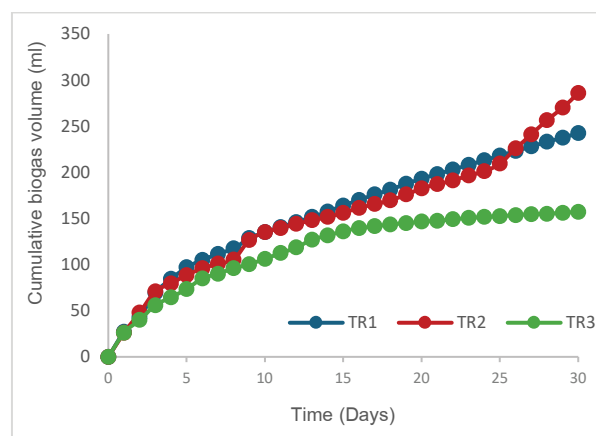


Figure 3 Cumulative biogas production in anaerobic reactor

สารอินทรีย์และเกิดก๊าซขึ้นอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ในช่วงหลังจากนั้นจะเหลือปริมาณสารอินทรีย์อยู่น้อยและย่อยสลายยาก จึงทำให้เกิดการผลิตก๊าซลดน้อยลง (Zhang et al., 2014) ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Konkol et al. (2018) ที่ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียของโรงงานผลิตเบเกอรี่ซึ่งมีการใช้วัตถุดิบประเภทแป้งเช่นเดียวกับกระบวนการผลิตขนมไทย ดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลา 55 วัน พบว่าระบบย่อยหมักแบบไม่ใช้อากาศจะเริ่มเข้าสู่สภาวะการผลิตก๊าซเริ่มลดลงและคงที่ในช่วงวันที่ 15-16 ของการทดลอง

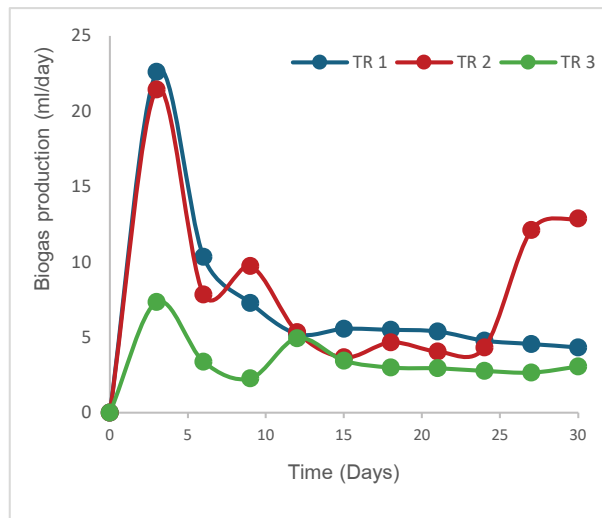


Figure 4 Biogas production rate from Thai dessert factory wastewater

ทั้งนี้เห็นได้ว่าปริมาณผลผลิตก๊าซสะสมช่วง 25 วันแรกของการทดลอง TR1 สูงกว่าชุดการทดลอง TR2 และ TR3 เท่ากับ 204.67 ± 38.00 , 191.67 ± 36.06 และ 129 ± 24.74 มิลลิลิตร ตามลำดับ ในขณะที่หลังวันที่ 25 ชุดการทดลอง TR2 มีอัตราผลิตก๊าซเพิ่มขึ้น เนื่องจากชุดการทดลอง TR2 และ TR3 มีการหมักร่วมกับกากน้ำตาลเจือจางร้อยละ 50 ทำให้มีปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยส่งเสริมกิจกรรมการทำงานของแบคทีเรียภายในระบบแบบไม่ใช้อากาศ เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในการเจริญเติบโตและกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Fernández *et al.*, 2005) โดยองค์ประกอบหลักของกากน้ำตาลประกอบไปด้วยน้ำตาลซูโครส (Sucrose) ซึ่งเป็นสารชีวโมเลกุล จึงทำให้แบคทีเรียย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศยังไม่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานในการย่อยสลายได้ทันที (บุญช่วย ปานอินทร์, 2558) ดังนั้นจึงต้องใช้ระยะเวลานานขึ้นในการย่อยสลายให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวก่อนนำมาใช้ในระบบการย่อยสลายและผลิตก๊าซชีวภาพ (Emberlin *et al.*, 2018) จึงเป็นสาเหตุทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นในช่วงท้ายการทดลอง ในขณะที่ปริมาณฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นในชุดการทดลอง 3 ส่งผลให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพลดลง สอดคล้องกับการศึกษาของ Mancipe-Jiménez *et al.* (2017) ที่ได้ศึกษาผลของปริมาณฟอสฟอรัสต่อระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ พบว่าปริมาณฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ภายในระบบมีสภาพความเป็นกรดมากและนานขึ้น มีผลทำให้ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทน เนื่องจากการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของกลุ่มจุลินทรีย์ชนิดเส้นใยซึ่งเป็นกลุ่มจุลินทรีย์สร้างกรด จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดค่าความสกปรกในรูปค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) และอัตราผลิตก๊าซชีวภาพลดลงถึงร้อยละ 20 และ 18 ตามลำดับ

3. ผลของความเป็นกรดต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการย่อยสลายเป็นระยะเวลา 30 วัน ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าในช่วงแรกของกระบวนการย่อยสลายชุดการทดลองที่ TR1 และ TR2 มีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงอยู่ในช่วง 4.15 - 4.76 และปรับตัวเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงท้ายการทดลอง ในขณะที่ในชุดการทดลอง TR3 พบว่าในระหว่างเดินระบบค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงถึง 3.49 และมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างหลังผ่านกระบวนการย่อยสลายเพียงเล็กน้อย แสดงดัง Figure 5 เนื่องจากเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสะสมในระบบมากเกินไป ทำให้ระบบมีสภาวะเป็นกรด โดยการดอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตก๊าซมีเทนของกลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogens) เมื่อถูกนำมาใช้ในระบบผลิตก๊าซมีเทนจะส่งผลให้ระบบมีค่าความเป็นกรด-ด่างปรับตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (Song *et al.*, 2014) แสดงให้เห็นว่าระบบมีการรักษาเสถียรภาพจากกิจกรรมของกลุ่มจุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทน จึงทำให้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายลดลงและระบบไม่ถูกยับยั้งการทำงานจากสภาวะกรดภายในระบบ (Sun *et al.*, 2020) แต่อย่างไรก็ตามเมื่อมีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบมากเกินไปจะส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของกลุ่มแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน (Methanogens) มีประสิทธิภาพลดลง (Shyan *et al.*, 2023) สอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพและอัตราผลิตก๊าซชีวภาพที่กล่าวมาข้างต้น (Figure 2, 3) ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรียแบบไม่ใช้อากาศควรมีค่าอยู่ในช่วง 6.5-7.5 (Ail *et al.*, 2019; Mao *et al.*, 2017) เนื่องจากอาจส่งผลให้กลุ่มแบคทีเรียผลิตก๊าซชีวภาพถูกยับยั้งการเจริญเติบโตและมีจำนวนเซลล์ลดลง ส่งผลต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Bahira *et al.*, 2018) ในขณะที่การศึกษาของ Ali *et al.* (2019) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุหมักที่มีค่าความเป็นกรดต่ำเริ่มต้นเท่ากับ 3.5 และ 4.5 เป็นระยะเวลา 163 วัน โดยทั้งสองชุดการทดลองมีผลผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น และเมื่อทำการตรวจสอบทางด้านอนุพันธศาสตร์พบว่าแบคทีเรีย *Methanoxithrix soehngenii* มีความหนาแน่นของประชากรถึงร้อยละ 96.3 และ 86.75 ตามลำดับ ซึ่งจัดเป็นแบคทีเรียที่มีความสำคัญในการผลิตก๊าซชีวภาพและมีความทนทานต่อสภาวะกรด โดยเมื่อมีระยะเวลาเก็บกักภายในระบบที่เพียงพอจะทำให้กลุ่มแบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถปรับตัวต่อสภาวะกรดและดำเนินกิจกรรมต่อไป

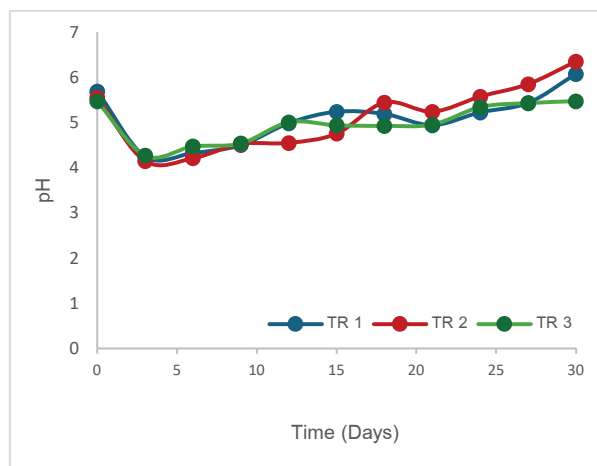


Figure 5 pH results for all the substrates and co-digestion

4. ประสิทธิภาพการบำบัด

ผลการพิจารณาประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปของค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และค่าปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) ที่ระยะเวลา 30 วัน แสดงดัง Table 3 พบว่าชุดการทดลอง TR2 มีประสิทธิภาพการบำบัดสูงที่สุด มีค่าเท่ากับร้อยละ 81.54, 35.90 และ 47.75 ตามลำดับ รองลงมาคือชุดการทดลอง TR1 มีค่าเท่ากับร้อยละ 79.99, 20.60 และ

43.22 และชุดการทดลอง TR3 มีค่าเท่ากับร้อยละ 76.36, 34.79 และ 50.43 ตามลำดับ ซึ่งมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้กล่าวมาข้างต้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ Santos *et al.* (2022) พบว่าปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ลดลง เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์และเปลี่ยนรูปเป็นก๊าซชีวภาพโดยกลุ่มแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกาศ ดังนั้นการคำนวณประสิทธิภาพบำบัดของระบบจึงทำให้สามารถช่วยอธิบายและติดตามกระบวนการย่อยสลายของระบบได้ และเมื่อพิจารณาจากค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ที่ลดลงตลอดการทดลอง แสดงดัง Figure 6 พบว่าระบบเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ตั้งแต่วันที่ 15 เป็นต้นไป ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับอัตราผลิตก๊าซชีวภาพที่กล่าวมาข้างต้น โดยชุดการทดลอง TR1, TR2 และ TR3 มีประสิทธิภาพการบำบัดที่สภาวะคงที่ (วันที่ 15-30) เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 74.80 ± 3.34 , 79.08 ± 2.33 และ 69.45 ± 5.66 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดใกล้เคียงกับงานวิจัยของจินตนา ทองเอี้ยว และคณะ (2558) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเหลือทิ้งขนมหวานหลังจากการหมักเป็นระยะเวลา 15 วัน พบว่าระบบหมักแบบไม่ใช้ออกาศมีประสิทธิภาพการบำบัดค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) สูงสุดเท่ากับร้อยละ 75.8

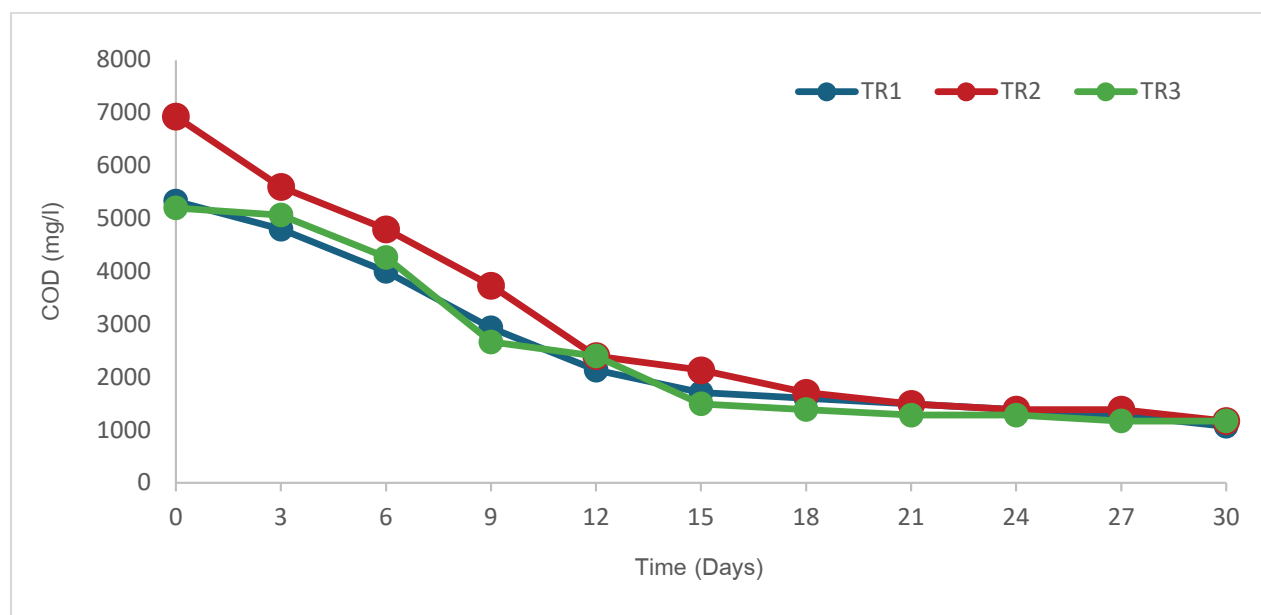


Figure 6 COD results for all the substrates and co-digestion

Table 3 Characteristics of influent in feed tank and effluent from anaerobic reactor

Parameters		TR1	TR2	TR3
pH*	Influent*	5.69 ± 0.03 a	5.55 ± 0.01 b	5.43 ± 0.02 c
	Effluent*	6.07 ± 0.03 a	6.35 ± 0.15 a	5.24 ± 0.20 b
% Removal		-	-	-
COD (mg/l)	Influent*	5,333.33 ± 923.76 b	6,933.33 ± 461.88 a	5,866.67 ± 461.88 ab
	Effluent	1,067 ± 184.75	1,280 ± 184.75	1,387 ± 92.38
% Removal		79.99	81.54	76.36
TS (mg/l)	Influent	4,116.85 ± 53.40 c	5,193.67 ± 108.09 a	4,922.19 ± 110.51 b
	Effluent*	3,268.86 ± 169.71 ab	3,328.89 ± 61.67 ab	3,136.67 ± 175.34 b
% Removal		20.60	35.90	34.79
VS (mg/l)	Influent*	3,945.67 ± 72.14 c	4,469.67 ± 109.43 a	4,159.40 ± 119.75 b
	Effluent	2,240.25 ± 175.64	2,335.56 ± 46.71	2,014.11 ± 155.07
% Removal		43.22	47.75	50.43

* Different with letters (a-c) in the same column indicate significant differences (p < 0.05)

5. ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละวันและการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) พบว่าทุกชุดการทดลองมีผลผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น แต่ก๊าซชีวภาพที่ได้จากทุกชุดการทดลองมีองค์ประกอบร้อยละก๊าซมีเทนน้อยมากประมาณ 20 ppm ตลอดจนการทดลองหรือเกือบเทียบเท่ากับมีเทนในชั้นบรรยากาศ 1.5 ppm (Ehhalt, 1967) ทั้งนี้เนื่องจากสภาพความเป็นกรดในระบบที่ไม่ได้รับการควบคุมจึงมีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของกลุ่มแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทน (Atasoy *et al.*, 2019) ประกอบกับอาจเกิดการรั่วไหลออกของก๊าซในระหว่างที่เก็บตัวอย่างจึงทำให้ค่าที่วิเคราะห์ได้น้อยกว่าเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Singharat *et al.* (2017) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียเบเกอรี่โดยก๊าซชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบก๊าซมีเทนร้อยละ 46.4-60.8 และมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.481 L CH₄/g VS_{removed} ซึ่งใกล้เคียงกับ งานวิจัยของ Ziemiński and Kowalska-Wentel (2015) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากหัวผักกาดหวานหมักร่วมกับน้ำกากส่า ซึ่งก๊าซชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบก๊าซมีเทนร้อยละ 62 และมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.598 L CH₄/g VS_{removed} ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จึงใช้การคำนวณค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน โดยคำนวณจากปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) เปรียบเทียบกับปริมาณของแข็งระเหยง่าย (VS) ตั้งต้นของวัสดุหมัก (BMP_{thCOD}) ดังสมการที่ 2 พบว่า ชุดการทดลอง TR2

มีค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 0.61 L CH₄/g VS_{added} รองลงมาคือชุดการทดลอง TR1 และชุดการทดลอง TR3 เท่ากับ 0.56 และ 0.53 L CH₄/g VS_{added} ตามลำดับ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Carucci *et al.* (2005) ที่พบว่าการใช้วิธีการหมักร่วม (Co-digestion) จะให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าการหมักวัตถุดิบอย่างใดอย่างหนึ่งเพียงอย่างเดียว

สรุปผลการวิจัย

จากผลการดำเนินงานวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยด้วยวิธีการหมักร่วมกับกากน้ำตาลและปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัส พบว่าชุดการทดลอง TR2 และ TR3 ที่มีการหมักกับกากน้ำตาลและปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัส สามารถช่วยปรับปรุงสมดุลอัตราส่วนธาตุอาหาร โดยการเพิ่มความเข้มข้นของปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส รวมถึงปริมาณสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปของซีโอดี ส่งผลทำให้ชุดการทดลอง TR 2 มีศักยภาพผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 0.61 L CH₄/g VS_{added} โดยหลังการหมักเป็นระยะเวลา 30 วัน มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 258.67 ± 23.71 มิลลิลิตร รองลงมาคือชุดการทดลอง TR1 ที่มีศักยภาพผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.56 L CH₄/g VS_{added} และมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 226.67 ± 15.07 มิลลิลิตร ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าในน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทยมีปริมาณธาตุอาหารเพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจน แต่อย่างไรก็ตามเนื่องด้วยองค์ประกอบส่วนใหญ่ของกากน้ำตาลนั้นคือสารชีวโมเลกุลซึ่งย่อยสลายได้ยากและใช้เวลานาน จึงทำให้

ช่วงหลังวันที่ 25 ของการทดลองมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในชุดการทดลอง TR2 เพิ่มขึ้นในขณะที่ TR1 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมคงที่ โดยในชุดการทดลองที่มีการหมักร่วมกับปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัส TR3 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมน้อยสุดเท่ากับ 133.67 ± 20.36 มิลลิลิตร และมีศักยภาพผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ $0.53 \text{ L CH}_4/\text{g VS}$ ^{added} เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณฟอสฟอรัสมีผลทำให้ภายในระบบมีสภาพเป็นกรดมากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้กลุ่มแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนเจริญเติบโตช้าและส่งผลให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่มีการหมักร่วมกับปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัส

ข้อเสนอแนะ

ทั้งนี้งานวิจัยนี้ยังคงต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการเพิ่มระยะเวลาเก็บกากสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการหมักร่วมกับกากน้ำตาลและปุ๋ยน้ำฟอสฟอรัส สำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นสารชีวโมเลกุลคู่ รวมถึงการปรับตัวของกลุ่มแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนต่อสภาวะกรดภายในระบบ เพื่อการพัฒนาระบบการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับการใช้ประโยชน์ในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2564). *ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับก๊าซชีวภาพ* (พิมพ์ครั้งที่ 1). ศูนย์บริการวิชาการด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.

กลั่นประทุม ปัญญาปิง, รสสุคนธ์ จະวะนะ, ขนิษฐา ราชบังเหิง, ธิติรัตน์ พิสิฐชัยกร, & ชีรเมธ นาปริง. (2564). การอัดก๊าซชีวภาพในถังบรรจุก๊าซและการใช้หุงต้ม. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา*, 6(1), 12–17.

จินตนา ทองเอี้ยว, บุญญฤทธิ์ เผ่าเพ็ง, & พงษ์ศักดิ์ นพรัตน์. (2558). การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเหลือทิ้งขนมหวาน. ใน *การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8* (น. 99–102). สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ.

ณภัทร งามศิริเกียรติ, นพวรรณ เสมิมูล, ธนิศร์ ปัทมพิฑูร, อรอนงค์ ผิวนิล, จุลบุตร จันทร์สุรย์, นิรุติ อุปนันท์, & ภาวิน วิจิตรตระการ. (2567). คุณลักษณะของน้ำเสียโรงงานผลิตขนมไทย จังหวัดเพชรบุรี ที่มีความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ. ใน *การประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 62* (น. 372–379). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุญช่วย ปานอินทร์. (2558). *การศึกษาความเหมาะสมในการใช้น้ำตาลทรายดิบเพื่อเป็นทางเลือกในการผลิตเอทานอล* [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์]. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

สำนักจัดการคุณภาพน้ำ. (2560). *คู่มือระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน*. กรมควบคุมมลพิษ, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

เอนก สาระอินทร์, ฌานิกา แซ่แง ซุกลิ้น, ชุตินุช สุจริต, & สมรักษ์ รอดเจริญ. (2565). ศักยภาพของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ. *วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 41(1), 35–48.

Atasoy, M., Eyice, O., Schnürer, A., & Cetecioglu, Z. (2019). Volatile fatty acids production via mixed culture fermentation: Revealing the link between pH, inoculum type and bacterial composition. *Bioresource Technology*, 292, 121889. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121889>

Ahmmad, R. M., & Haque, S. (2014). Providing electricity by digester types on biogas productions from municipal solid waste in Dhaka City, Bangladesh. *International Journal of Energy, Information and Communications*, 5(3), 13–22.

Ali, S., Hua, B., Huang, J. J., Droste, R. L., Zhou, Q., Zhao, W., & Chen, L. (2019). Effect of different initial low pH conditions on biogas production, composition, and shift in the aceticlastic methanogenic population. *Bioresource Technology*, 289, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.09.074>

Bahira, B. Y., Baki, A. S., & Bello, A. (2018). Effect of varying pH on biogas generation using cow dung. *Direct Research Journal of Biology and Biotechnology*, 4(3), 28–33. <https://doi.org/10.26765/DRJAFS.2018.7198>

Bennich, T., & Belyazid, S. (2017). The route to sustainability—Prospects and challenges of the bio-based economy. *Sustainability*, 9(6), 887. <https://doi.org/10.3390/su9060887>

Carucci, G., Carrasco, F., Trifoni, K., Majone, M., & Beccari, M. (2005). Anaerobic digestion of food industry wastes: Effect of co-digestion on methane yield. *Journal of Environmental Engineering*, 131(7), 1037–1045. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:7\(1037](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:7(1037)

- Ehhalt, D. H. (1967). Methane in the atmosphere. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 17(8), 518–519. <https://doi.org/10.1080/00022470.1967.10469024>
- Emberlin, E., Howay, I., Leasau, Z., Reyes, I., & Roberts, B. (2018). Effect of sugars on the rate of ethanol production during anaerobic respiration of yeast. *Journal of Undergraduate Biology Laboratory Investigations*, 1(1).
- Fernández, A., Sánchez, A., & Font, X. (2005). Anaerobic co-digestion of a simulated organic fraction of municipal solid wastes and fats of animal and vegetable origin. *Biochemical Engineering Journal*, 26(1), 22–28. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2005.04.018>
- Kalemba, K., & Barbusinski, K. (2017). Anaerobic co-digestion of sewage sludge and molasses. *E3S Web of Conferences*, 22, 00075. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200075>
- Kanu, I. R., Aspray, T. J., Arthur, S., & Adeloje, A. (2015). Laboratory experiment to select variables for predicting foaming in anaerobic digester. In *Proceedings of the Infrastructure and Environment Scotland 3rd Postgraduate Conference* (pp. 77–83). Heriot-Watt University.
- Konkol, I., Swierczek, L., & Cenian, A. (2018). Biogas production from bakery wastes-dynamics, retention time and biogas potential. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 63(1), 32–34.
- Mancipe-Jiménez, D. C., Costa, C., & Márquez, M. C. (2017). Methanogenesis inhibition by phosphorus in anaerobic liquid waste treatment. *Waste Treatment and Recovery*, 2(1), 1–8.
- Mao, C., Zhang, T., Wang, X., Feng, Y., Ren, G., & Yang, G. (2017). Process performance and methane production optimizing of anaerobic co-digestion of swine manure and corn straw. *Scientific Reports*, 7(1), 9379. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09971-7>
- Nielfa, A., Cano, R., & Fdz-Polanco, M. (2015). Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Biotechnology Reports*, 5, 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2014.10.005>
- Raja, I., & Wazir, S. (2017). Biogas production: The fundamental processes. *Universal Journal of Engineering Science*, 5(2), 29–37. <https://doi.org/10.13189/ujes.2017.050202>
- Santos, A. D., Silva, J. R., Castro, L., & Quinta-Ferreira, R. (2022). A biochemical methane potential of pig slurry. *Energy Reports*, 8, 153–158. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.244>
- Seachem. (2022, May 14). *Seachem flourish phosphorus*. <https://seachem.my/blogs/news/seachem-flourish-phosphorus>
- Shyan, L. L., Nanyan, N. S. M., Ismail, N., Al-Gheethi, A., Nguyen, H. H. T., Vo, D. V. N., & El Enshasy, H. A. (2023). Effort to mitigate volatile fatty acid inhibition by using mixed inoculum and compost for the degradation of food waste and the production of biogas. *Sustainability*, 15(2), 1185. <https://doi.org/10.3390/su15021185>
- Singharat, K., Sangkarak, S., Pongsuk, O., & Junyapoon, S. (2017). Biogas production from bakery wastewater in two-stage anaerobic digestion system. *KMITL Science and Technology Journal*, 17(1), 103–112.
- Song, Z., Yang, G., Liu, X., Yan, Z., Yuan, Y., & Liao, Y. (2014). Comparison of seven chemical pretreatments of corn straw for improving methane yield by anaerobic digestion. *PLoS ONE*, 9(4), e93282. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0093282>
- Sun, M., Liu, B., Yanagawa, K., Ha, N. T., Goel, R., Terashima, M., & Yasui, H. (2020). Effects of low pH conditions on decay of methanogenic biomass. *Water Research*, 179, 115883. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115883>
- Tetteh, E. K., & Rathilal, S. (2021). Biogas production from wastewater treatment-evaluating anaerobic and biomagnetic systems. *Water-Energy Nexus*, 4, 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.wen.2021.11.002>
- Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., & Tan, T. (2014). Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>
- Zieminski, K., & Kowalska-Wentel, M. (2015). Effect of enzymatic pretreatment on anaerobic co-digestion of sugar beet pulp silage and vinasse. *Bioresource Technology*, 180, 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.035>