

ศักยภาพของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

The Potential of Wastewater from Kha Nom Lah Production Process for Biogas Production

เอนก สาวะอินทร์^{1*} ฌานิกา แซ่แง ชุกลิ้น¹ ชุตินุช สุจริต² และสมรักษ์ รอดเจริญ³
Aneak Sawain^{1*}, Chanika Saenge Chooklin¹, Chutinut Sujarit² and Somrak Rodjaroen³

บทคัดย่อ

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลามีการปนเปื้อนสารอินทรีย์สูง ซึ่งเกิดจากการใช้น้ำในขั้นตอนการเตรียมแป้งจากข้าวสารสำหรับเป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิต ส่งผลให้น้ำเสียนี้อุดมไปด้วยสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อน และส่งผลให้เกิดมลพิษทางน้ำเมื่อมีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายศึกษาศักยภาพของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นแนวทางสำหรับการนำน้ำเสียนี้ไปใช้ประโยชน์และเป็นการบำบัดเพื่อลดภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ผ่านการกำจัดสารอินทรีย์เปลี่ยนให้เป็นก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาสามารถใช้ประโยชน์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพอยู่ระหว่าง 0.023 ± 0.001 ลิตรต่อลิตรน้ำเสียต่อวัน ผลการคำนวณผลผลิตก๊าซชีวภาพเปรียบเทียบกับค่าซีโอดีที่ถูกกำจัด มีค่าอยู่ระหว่าง 0.08 ± 0.02 ลิตรต่อกรัมซีโอดี ที่ถูกกำจัด การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียส่งผลให้มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดีและบีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 65.9 ± 0.8 และ 68.6 ± 2.3 ตามลำดับ ผลจากการตรวจวัดก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพแสดงให้เห็นถึงปริมาณก๊าซมีเทนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 62.2 ± 1.7 (% LEL) และจากการทดสอบพบว่าก๊าซชีวภาพสามารถจุดติดไฟได้ ซึ่งจะเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์น้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ สนับสนุนการผลิตพลังงานทดแทนจากของเสียในอุตสาหกรรมนี้ สามารถนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์ทดแทนก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ในกระบวนการผลิต หรือใช้ประโยชน์ในครัวเรือน เป็นพลังงานทดแทนเพื่อลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานต่อไปได้

คำสำคัญ: ขนมลา ก๊าซชีวภาพ การบำบัดน้ำเสีย พลังงานทดแทน

¹ สาขาวิทยาศาสตร์ทางทะเลและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

² สาขาอุตสาหกรรมอาหารและผลิตภัณฑ์ประมง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

³ สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

* corresponding author e-mail: aneak.ene@gmail.com

Received: 20 December 2021, Revised: 8 March 2022, Accepted: 14 March 2022

Abstract

Wastewater from the Kha Nom Lah production process is highly contaminated with organic matter, this is caused by the use of water in the process of preparing rice flour as raw materials in the production process. This wastewater has a foul smell caused by the decomposition process of contaminated organic matter and results in water pollution when it is released into public water sources. This research aims to study the potential of wastewater from the Kha Nom Lah production process for biogas production. It is a guideline for utilizing this wastewater and treating it to reduce the organic loading, through the removal of organic matter, turning it into biogas by anaerobic digestion process. The results demonstrate the potential of wastewater from the Kha Nom Lah production process to be utilized for biogas production. The biogas generation rate is between 0.023 ± 0.001 liter per liter of wastewater/day. The results of the biogas yield calculation compared to the COD removal, the values were between 0.08 ± 0.02 liter per gram of COD removed. The removal of organic matter in wastewater resulted in the average efficiency of removing organic matter in the form of COD and BOD was 65.9 ± 0.8 and 68.6 ± 2.3 percent, respectively. The results of the measurement of methane gas in biogas show that the average methane content was 62.2 ± 1.7 percent (% LEL), and from the test it was found that the biogas can ignite. This will be a guideline for utilizing wastewater from the Kha Nom Lah production process for biogas production, supporting the production of renewable energy from waste in this industry. The biogas produced can be used to replace LPG gas in the production process or use it in the household, as a renewable energy to reduce energy costs.

Keywords: Kha Nom Lah, Biogas, Wastewater treatment, Renewable energy

บทนำ

จากกระบวนการผลิตขนมลาในพื้นที่ชุมชนท้องถิ่นของจังหวัดนครศรีธรรมราช มีการปล่อยน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์ปริมาณมาก เนื่องจากในกระบวนการผลิตใช้ข้าวสาร (ข้าวเจ้า และข้าวเหนียว) เป็นวัตถุดิบสำหรับเตรียมแป้ง ซึ่งในขั้นตอนการผลิตมีการใช้น้ำปริมาณมาก ทำให้เมื่อมีการปล่อยน้ำเสียลงสู่คลองสาธารณะจึงเกิดปัญหาทางสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ตามมา รวมถึงระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนที่ต้องรองรับการบำบัดน้ำเสียที่ประสบปัญหาภิหาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง โดยเฉพาะในช่วงหน้าแล้งที่มีปริมาณน้ำในคลองระบายน้ำน้อยทำให้มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก จึงเกิดปัญหาน้ำเสียที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในคลองสาธารณะที่เป็นแหล่งรองรับน้ำเสียของชุมชน และอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้านอื่น ๆ ตามมาในอนาคต ดังนั้นการพัฒนา

ออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียให้มีความเหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตขนมลาจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยแนวทางการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียเป็นรูปแบบพลังงานที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีความยั่งยืน ซึ่งผลิตขึ้นด้วยกระบวนการย่อยสลายของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน ก่อให้เกิดการคืนทุนเชิงนิเวศและเศรษฐกิจ เมื่อเปรียบเทียบกับระบบพลังงานที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (Tetteh and Rathilai, 2021) ทั้งนี้ในการดำเนินงานทางด้านการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน มีการพิสูจน์แล้วว่าเป็นเทคโนโลยีที่สามารถก่อให้เกิดความยั่งยืนที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุดสำหรับการลด การรีไซเคิล และการกู้คืนทรัพยากรจากของเสียที่มีองค์ประกอบเป็นสารอินทรีย์ (Tetteh and Rathilai, 2021; Bennich and Belyazid, 2017) ซึ่งจะเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์ของเสียและลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมทางน้ำในพื้นที่ชุมชน อีกทั้งมีการกล่าวถึงการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์ที่มีลักษณะใกล้เคียงกับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลา โดยมีงานวิจัยกล่าวถึงการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากการปนเปื้อนของเสียประเภทแป้ง เช่น แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด ด้วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศและสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ (Padi *et al.*, 2022; Cruz *et al.*, 2021; Cremones *et al.*, 2020; Khongklai *et al.*, 2015) ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงแนวทางของการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาที่มีการปนเปื้อนแป้งในลักษณะที่คล้ายกับงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น

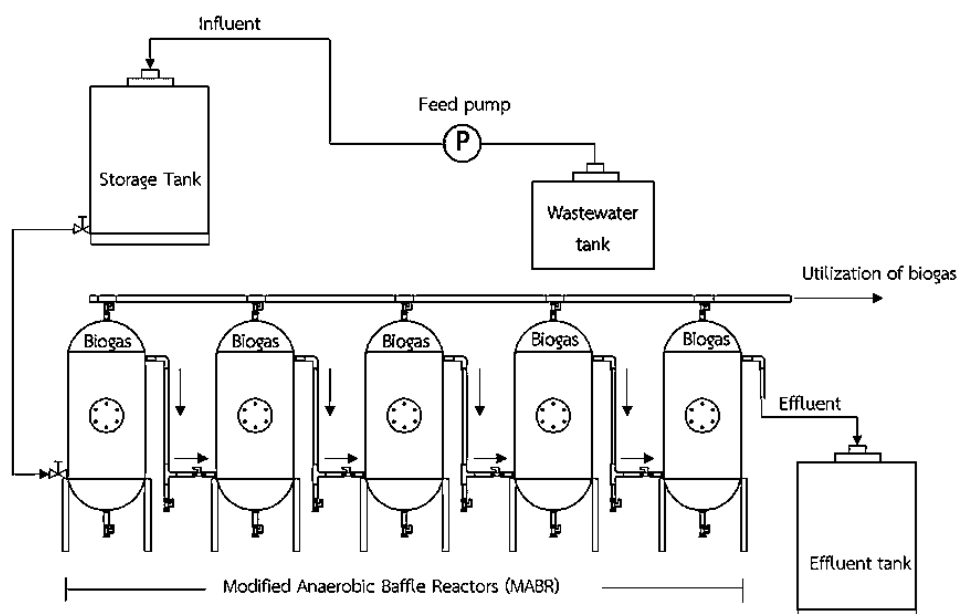
งานวิจัยนี้จึงเป็นการดำเนินการทดลองศึกษาศักยภาพของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับอุตสาหกรรมการผลิตขนมลาที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานทดแทน โดยการดำเนินงานทดลองมุ่งเน้นรองรับการพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่ (on-site wastewater treatment system) เพื่อทำการบำบัดน้ำเสีย ณ แหล่งกำเนิด โดยการดำเนินงานวิจัยจะเป็นการใช้องค์ความรู้ด้านการผลิตก๊าซชีวภาพและการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนแป้งด้วยการใช้ระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในรูปแบบระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นที่มีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์และตะกอนของเสียปริมาณมาก ก่อให้เกิดกลไกของการบำบัดด้วยความสามารถในการกักกักตะกอนและกระบวนการย่อยสลายของเสียในสภาวะไร้อากาศ มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียประกอบกับศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ (Fujihira *et al.*, 2018; Barber and Stuckey, 1999) ทั้งนี้เพื่อเป็นการสนับสนุนการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียในอุตสาหกรรมระดับชุมชน และลดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานสำหรับการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียสำหรับนำไปใช้งานได้จริง ทั้งในส่วนของการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน และการบำบัดเพื่อลดความสกปรกของน้ำเสีย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุอุปกรณ์ และวัตถุดิบน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลา

การดำเนินงานวิจัยนี้ใช้ชุดทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นชุดอุปกรณ์ระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงดังภาพที่ 1 และชุดอุปกรณ์อื่น ๆ (ดัดแปลงจาก เอนก และคณะ, 2564; Barber and Stuckey, 1999) เพื่อทำการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลา โดยวัตถุดิบ

น้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลา ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาของวิสาหกิจชุมชนผลิตขนมลา บ้านศรีสมบูรณ์ (หอยราก) ตำบลหูล่อง อำเภopakพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ทั้งนี้ น้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลามีการปนเปื้อนสารอินทรีย์สูงที่เป็นสิ่งเจือปนที่เกิดจากขั้นตอนการเตรียมแป้งจากข้าวสารพื้นเมือง และข้าวเหนียว เพื่อเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตขนมลา โดยทำการรวบรวมน้ำเสียในช่วงระยะเวลาที่มีการผลิตขนมลา บรรจุในถังพลาสติกปิดมิดชิดก่อนทำการขนส่งจากสถานประกอบการ เพื่อนำมาใช้ในการดำเนินงานทดลองและพิจารณาศักยภาพของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 1 ระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ
ที่มา: ดัดแปลงจาก เอนก และคณะ (2564)

2. การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพในครั้งแรก ดำเนินการเริ่มต้นโดยการนำตัวอย่างน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลามาผสมกับน้ำเสียจากระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ (ดัดแปลงจาก เอนก และคณะ, 2564) โดยมีการดัดแปลงปรับเปลี่ยนปริมาณสำหรับการผสมจากการทดสอบเบื้องต้นที่ดำเนินการไว้ก่อนหน้านี้ โดยการนำน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาในปริมาณอัตราส่วนร้อยละ 40 โดยปริมาตร ผสมกับน้ำเสียจากระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในอัตราส่วนร้อยละ 60 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นการดัดแปลงวิธีการเริ่มต้นเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพโดยการนำน้ำเสียจากระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศที่มีกลุ่มจุลินทรีย์ผลิตก๊าซชีวภาพอยู่แล้วมาผสมร่วมกับน้ำเสียแหล่งใหม่ (เอนก และคณะ, 2558; Zwain *et al.*, 2013) เพื่อให้จุลินทรีย์มีการปรับสภาพและผลิตก๊าซชีวภาพได้เร็วขึ้น

การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพหลังจากการเริ่มต้นเดินระบบในครั้งแรก ดำเนินการโดยนำน้ำเสียที่ไหลออกจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในลำดับสุดท้าย กลับมาผสมรวมกับน้ำเสียจากระบบการผลิตขมลาในปริมาณอัตราส่วนร้อยละ 40 โดยปริมาตร ผสมกับน้ำเสียจากระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในอัตราส่วนร้อยละ 60 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นการหมุนเวียนน้ำเสียหรือการรีไซเคิลน้ำเสีย ที่ออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นการรักษาระดับปริมาณของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ ทั้งนี้การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะมีรูปแบบการเดินระบบในรูปแบบ (batch) ที่มีระยะเวลาพักน้ำเสียในระบบสำหรับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 7 วัน (168 ชั่วโมง) (เอนก และคณะ, 2564) ซึ่งการดำเนินงานเดินระบบในรูปแบบนี้จะมีความสอดคล้องกับการก่อเกิดน้ำเสียจากระบบการผลิตขมลาที่ไม่ได้มีการผลิตทุกวัน และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสถานการณ์จริงได้ โดยงานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 9 สัปดาห์ เพื่อเก็บข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซมีเทนในผลผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้เครื่องตรวจวัดก๊าซมีเทน (ผลิตภัณฑ์ของ Jinan nova environment technology co., ltd. รุ่น NS500-CH4) และทดสอบเบื้องต้นการจุดติดไฟของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ด้วยชุดเตาก๊าซชีวภาพ (เอนก, 2563) เพื่อพิจารณาถึงแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์

3. การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสีย

การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในทุก ๆ สัปดาห์ ร่วมกับการประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย จากการเก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนและหลังผ่านชุดทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีพารามิเตอร์สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย คือ สี (color) อุณหภูมิ (temperature) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ซีโอดี (chemical oxygen demand: COD) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (total suspended solids: TSS) และปริมาณของแข็งตกตะกอน (settable solid) ตามมาตรฐานวิธีการวิเคราะห์ (APHA *et al.*, 2012) และใช้ค่าซีโอดี และบีโอดี (biochemical oxygen demand: BOD) สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ และคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีที่ถูกกำจัด

ผลการวิจัย

1. ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากระบบการผลิตขมลา

น้ำเสียจากระบบการผลิตขมลา แสดงดังภาพที่ 2 เกิดขึ้นจากขั้นตอนการเตรียมแป้งจากวัตถุดิบ คือ ข้าวสาร (ข้าวเจ้าพันธุ์พื้นเมือง) และข้าวเหนียว ซึ่งในขั้นตอนการเตรียมแป้งก่อให้เกิดน้ำเสียจากการนำข้าวสารมาแช่น้ำก่อนทำการโม่หรือบดให้ละเอียด น้ำเสียที่เกิดจากการแยกตัวออกจากแป้งที่วางทิ้งไว้ให้นอนกัน และน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนอื่น ๆ ตามกรรมวิธีการผลิตที่อาจมีความแตกต่างออกไปตามแต่ละผู้ประกอบการผลิตขมลา โดยลักษณะน้ำเสียจากระบบการผลิตขมลาจะมีลักษณะทางกายภาพโดยทั่วไป คือ มีสีขาวขุ่น และมีกลิ่นเหม็น (กลิ่นเหม็นเปรี้ยว) จากการก่อเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2 น้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาที่เกิดจากขั้นตอนการเตรียมแป้ง

(ก) ขั้นตอนการเตรียมแป้งที่ก่อให้เกิดน้ำเสีย

(ข) น้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาที่มีลักษณะทางกายภาพที่ขาวขุ่น

ทั้งนี้การปนเปื้อนของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาจึงเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดจากข้าวสารและแป้งในขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ ส่งผลให้น้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลามีลักษณะสมบัติแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างค่อนข้างต่ำจากการเกิดกระบวนการย่อยสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย ผลการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอยมีมากกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นตะกอนแป้งหรือสารอินทรีย์ที่เกิดจากกระบวนการเตรียมแป้งจากข้าวสาร ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ง่าย ส่งผลให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นมีค่าซีโอดีและบีโอดีสูงตามไปด้วย โดยผลการวิเคราะห์น้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาแสดงให้เห็นถึงปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดี และบีโอดีมีปริมาณมากกว่า 8,000 และ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ซึ่งลักษณะของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาดังกล่าวข้างต้น เมื่อมีการปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะจะก่อให้เกิดการสะสมของของเสียและเกิดการเน่าเสีย ก่อเกิดกลิ่นเหม็นรบกวนในบริเวณพื้นที่ชุมชน โดยเฉพาะในช่วงเทศกาลวันสารทเดือนสิบ เนื่องจากในพื้นที่ชุมชนมีการผลิตขนมลามีปริมาณมาก และมีการปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะปริมาณมากจนเกิดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมตามมา จากปัญหาดังกล่าวทำให้ชุมชนมีความต้องการเทคนิค วิธีการ หรือนวัตกรรม เพื่อใช้สำหรับการป้องกันแก้ไขปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมทางน้ำที่เกิดขึ้น เนื่องจากส่งผลกระทบต่อสุขภาพของคนในพื้นที่ชุมชนจากการได้รับกลิ่นเหม็นรบกวน และผลกระทบกับนักท่องเที่ยวที่จะส่งผลกระทบต่อส่งเสริมการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมในพื้นที่ ทำให้จำเป็นต้องมีรูปแบบกระบวนการบำบัดรองรับน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตขนมลา

ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลา

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์*
สี	ขาวขุ่น
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	30.0-31.0
ความเป็นกรด-ด่าง	6.50-6.90
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,000-3,000
ของแข็งตกตะกอน (มิลลิลิตรต่อลิตร)	15.0-50.0
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	8,000-15,000
บีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	4,400-8,500

หมายเหตุ: - * เป็นผลการวิเคราะห์น้ำเสียที่ได้จากการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาของผู้ประกอบการรายหนึ่งในพื้นที่ ตำบลหูล่อง อำเภอปากพนัง จังหวัดนครศรีธรรมราช ซึ่งอาจมีความแตกต่างจากแหล่งผลิตในพื้นที่อื่น ที่เป็นผลจากการใช้วัตถุดิบและขั้นตอนการผลิตที่แตกต่างกัน

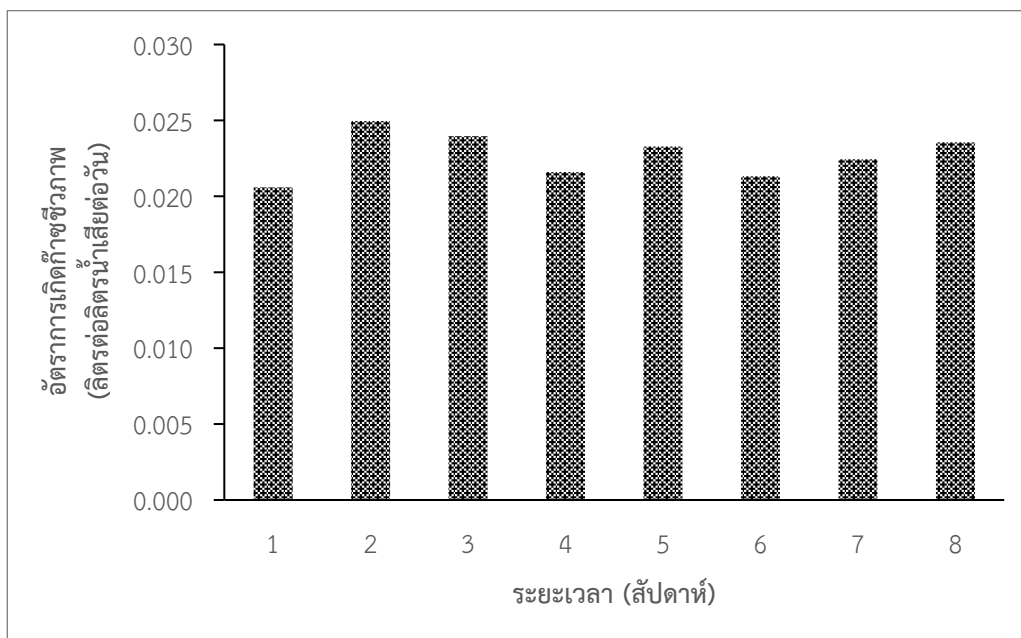
ผลจากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลา แสดงให้เห็นถึงลักษณะการปนเปื้อนสารอินทรีย์สูง โดยน้ำเสียมีค่าอัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดีมากกว่า 0.5 ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ง่ายด้วยเทคนิคทางชีววิทยา (Meena *et al.*, 2019; Eddy *et al.*, 2013) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเล็งเห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้ประโยชน์น้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ และส่งผลให้ความสกปรกที่เกิดจากการปนเปื้อนสารอินทรีย์ลดลงด้วยจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศในระบบบำบัดน้ำเสียในรูปแบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการใช้ประโยชน์จากน้ำเสียสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนก๊าซปิโตรเลียมเหลว (liquefied petroleum gas: LPG) ในกระบวนการผลิตต่อไปได้ โดยงานวิจัยนี้เป็นการดำเนินการวิจัยเพื่อสนับสนุนการพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่ สำหรับเป็นแนวทางให้ผู้ประกอบการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปในอนาคต เพื่อลดผลกระทบจากปัญหาน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตขนมลา

2. ผลการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลา พบว่ามีปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่าน้ำเสียจากแหล่งอื่น ๆ ที่มีการใช้แป้งข้าวเจ้าเป็นวัตถุดิบ เช่น น้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมจีน (เอนก และคณะ, 2558) ทำให้การดำเนินงานทดสอบเบื้องต้นพบว่าการรีไซเคิลเพื่อหมุนเวียนน้ำเสียกลับไปผสมรวมกับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาต้องใช้อัตราการรีไซเคิลที่สูงกว่า โดยงานวิจัยนี้พบว่าต้องใช้อัตราการรีไซเคิลน้ำเสียที่ไหลออกจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในอัตราร้อยละ 60 ซึ่งทำให้ต้องใช้น้ำเสียที่ทำการหมุนเวียนกลับมาผสมในปริมาณมากกว่าน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลา (น้ำเสียเริ่มต้น) ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์

ไร้อากาศ และเป็นการแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการควบคุมปริมาณการหมุนเวียนน้ำเสียที่ไหลออกจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศกลับมาผสมรวมกับน้ำเสียจากกระบวนการผลิต

ผลการดำเนินงานทดลองแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาสามารถใช้สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพได้ ข้อมูลผลผลิตก๊าซชีวภาพในช่วงระยะเวลาของการดำเนินการทดลอง แสดงดังภาพที่ 3 โดยผลการทดลองพบว่ามียัตราการเกิดก๊าซชีวภาพอยู่ระหว่าง $0.021 \pm 0.001 - 0.025 \pm 0.003$ ลิตรต่อลิตรน้ำเสียต่อวัน



ภาพที่ 3 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากการทดสอบใช้น้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลา

ผลจากการตรวจวัดก๊าซมีเทนในผลผลิตก๊าซชีวภาพแสดงให้เห็นถึงปริมาณก๊าซมีเทนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 62.2 ± 1.7 (% LEL) และจากการทดสอบการจุดติดไฟของผลผลิตก๊าซชีวภาพด้วยชุดเตาก๊าซชีวภาพ (เอนก, 2563) พบว่าก๊าซชีวภาพสามารถจุดติดไฟได้ แสดงดังภาพที่ 4 ในลักษณะที่คล้ายกับก๊าซปิโตรเลียมเหลว โดยระยะเวลาการจุดติดไฟขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นและกักเก็บไว้ในระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ (การติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับใช้งานจริงสามารถประยุกต์ออกแบบขยายขนาดของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ หรือเพิ่มเติมชุดอุปกรณ์อื่นให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณมากเพื่อรองรับการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์) ซึ่งผลการดำเนินงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงแนวทางการนำน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลามาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพได้ ร่วมกับการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียในรูปแบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศซึ่งจะเป็นแนวทางการใช้ประโยชน์น้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพสนับสนุนการผลิตพลังงานทดแทนจากของเสีย เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในกระบวนการผลิต หรือใช้ประโยชน์ในครัวเรือนทดแทนก๊าซปิโตรเลียมเหลวต่อไปได้

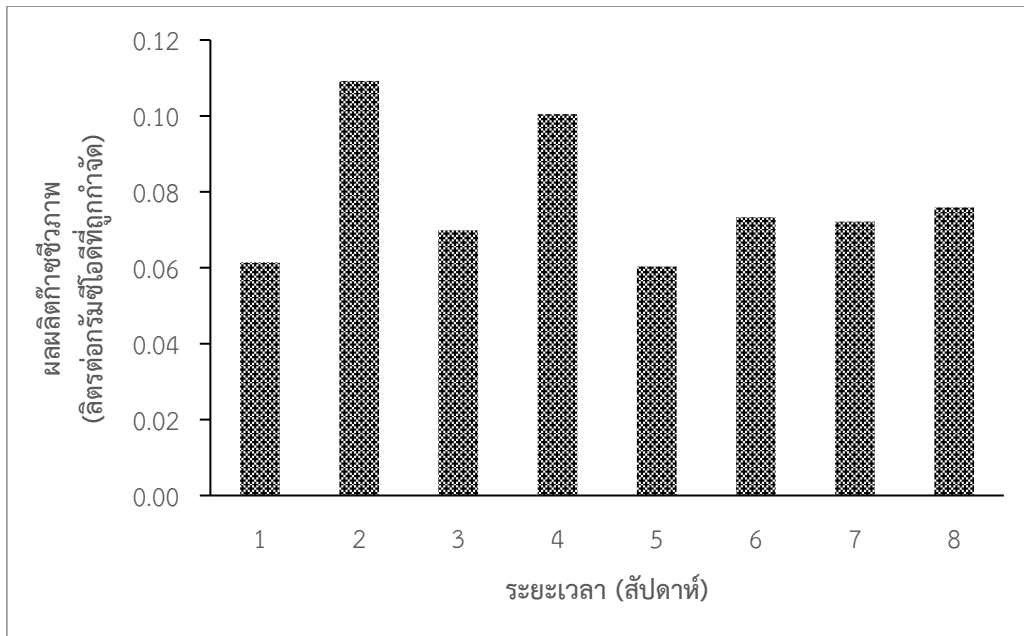


ภาพที่ 4 การทดสอบการจุดติดไฟของก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลา

3. การประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสีย

เมื่อพิจารณาถึงศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยจากการคำนวณผลผลิตก๊าซชีวภาพ เปรียบเทียบกับค่าซีโอดีที่ถูกกำจัด แสดงดังภาพที่ 5 พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง $0.06 \pm 0.01 - 0.11 \pm 0.01$ ลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ถูกกำจัด ซึ่งผลการดำเนินงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่นิยมใช้กันทั่วโลก สำหรับเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงาน (Westerholm *et al.*, 2020) นั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาได้ อีกทั้งยังมีศักยภาพผลิตก๊าซชีวภาพที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทดแทนก๊าซปิโตรเลียมเหลวในกระบวนการผลิต หรือนำไปใช้ประโยชน์ในครัวเรือนต่อไปได้

ผลจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพ ทำให้ปริมาณความสกปรกของน้ำเสียมีปริมาณลดลง โดยผลการวิเคราะห์น้ำเสียหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งผลการวิเคราะห์น้ำเสียหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการบำบัดน้ำเสียที่สามารถทำให้ค่าความสกปรกลดลงอย่างมาก โดยในส่วนของ การบำบัดตะกอนแป้งที่ปนเปื้อนในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลา เมื่อพิจารณาจากค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและของแข็งตกตะกอน พบว่ามีประสิทธิภาพการบำบัดเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 60.2 ± 0.9 และ 29.6 ± 0.5 ตามลำดับ อีกทั้งมีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีและบีโอดีเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 65.9 ± 0.8 และ 68.6 ± 2.3 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการบำบัดน้ำเสียในสภาวะไร้อากาศสามารถกำจัดของเสียย่อยสลายกลายเป็นผลผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้ความสกปรกของน้ำเสียลดลง อย่างไรก็ตามจากปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในรูปของค่าซีโอดีและบีโอดีที่ยังคงเหลืออยู่มากกว่า 2,000 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทำให้ยังต้องมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพจนสามารถนำไปใช้ประโยชน์หรือปล่อยสู่ธรรมชาติต่อไปได้



ภาพที่ 5 ผลผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกระบวนการผลิตขนมลาเทียบกับค่าชีโอดีที่ถูกกำจัด

ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของน้ำเสียหลังผ่านระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์
สี	ดำ
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	29.7±0.4
ความเป็นกรด-ด่าง	6.48±0.1
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	539.4±84.9
ของแข็งตกตะกอน (มิลลิลิตรต่อลิตร)	16.1±1.8
ชีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2,812±607
บีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	1,380±82

การอภิปรายผลการวิจัย

ผลการดำเนินงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาสามารถใช้เป็นวัตถุดิบผลิตก๊าซชีวภาพที่สามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนก๊าซปิโตรเลียมเหลวได้ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลามีศักยภาพสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีค่าเฉลี่ยอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.023 ± 0.001 ลิตรต่อลิตร น้ำเสียต่อวัน ซึ่งเป็นผลผลิตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศที่มีผลผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปชีโอดี เฉลี่ยเท่ากับ 0.08 ± 0.02 ลิตรต่อกรัมชีโอดีที่ถูกกำจัด ผลจากการตรวจวัดก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพแสดงให้เห็นถึงปริมาณก๊าซมีเทนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 62.2 ± 1.7 (% LEL) และจากการทดสอบพบว่าก๊าซชีวภาพสามารถจุดติดไฟได้ สอดคล้องกับงานวิจัยที่

สามารถผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนแป้ง (แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวโพด) (Padi *et al.*, 2022; Cruz *et al.*, 2021; Cremones *et al.*, 2020; Khongkhiang *et al.*, 2015) อีกทั้งผลจากการย่อยสลายของเสียก่อให้เกิดการบำบัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสีย โดยผลจากการวิเคราะห์น้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่าซีไอดี และบีไอดี ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาในสภาวะไร้อากาศ สามารถกำจัดของเสียย่อยสลายกลายเป็นผลผลิตก๊าซชีวภาพจนทำให้ความสกปรกของน้ำเสียลดลง สอดคล้องกับการใช้งานกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางสำหรับการบำบัดของเสียชนิดอื่น ๆ เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดการบำบัดที่มีประสิทธิภาพและได้ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานทดแทน (Qi *et al.*, 2021; Hu *et al.*, 2018) อย่างไรก็ตามจากปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในรูปของค่าซีไอดีและบีไอดีคงเหลือที่ยังมีค่าสูง (ซีไอดีและบีไอดีคงเหลือมากกว่า 2,000 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ) ทำให้ยังต้องมีการบำบัดน้ำเสียเพิ่มเติมต่อเนื่องจากระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ อาทิเช่น กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนเพื่อเพิ่มออกซิเจนให้กับน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสียในรูปแบบบึงประดิษฐ์ขนาดเล็กที่สามารถทำการติดตั้งในพื้นที่ชุมชน (Gikas and Tsihrantzis, 2012) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดจนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ หรือทำให้น้ำทิ้งที่ปล่อยออกจากระบบบำบัดน้ำเสียผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งสามารถปล่อยออกสู่ธรรมชาติต่อไปได้ อีกทั้งเป็นการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อรองรับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาให้มีความสมบูรณ์ทางด้านการจัดการน้ำเสียมากขึ้น ส่งเสริมแนวคิดของการจัดการน้ำเสียที่ครอบคลุมถึงการบำบัดอย่างมีประสิทธิภาพและการใช้ประโยชน์อย่างเหมาะสม (Gudiukaite *et al.*, 2021; Meena *et al.*, 2019) ซึ่งจะเป็นแนวทางหนึ่งในการสร้างรากฐานที่สำคัญของเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) (Gudiukaite *et al.*, 2021; Nagarajan *et al.*, 2020) เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนารูปแบบการจัดการน้ำเสียสำหรับอุตสาหกรรมในชุมชนในรูปแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่ที่กำลังได้รับความนิยมในพื้นที่ที่ประสบปัญหาการจัดการน้ำเสียด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบศูนย์กลาง (Knisz *et al.*, 2021) เนื่องจากสามารถช่วยในการบำบัดน้ำเสียให้มีความสกปรกลดน้อยลงจนส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในชุมชนน้อยที่สุด

สรุปผลการวิจัย

ผลจากการดำเนินงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาสามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพได้ภายใต้การบำบัดในสภาวะไร้อากาศ โดยมีค่าเฉลี่ยผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.023 ± 0.001 ลิตรต่อลิตรน้ำเสียต่อวัน และอัตราผลผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีเฉลี่ยเท่ากับ 0.08 ± 0.02 ลิตรต่อกรัมซีไอดีที่ถูกกำจัด อีกทั้งยังช่วยลดความสกปรกของน้ำเสียทั้งในส่วนของปริมาณของแข็งแขวนลอย ของแข็งตกตะกอน และลดปริมาณการปนเปื้อนสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีและบีไอดี ซึ่งจะเป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลาให้ก่อเกิดประโยชน์ทางด้านการผลิตพลังงานทดแทนจากของเสีย และลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ชุมชนโดยรอบ โดยผลงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบติดกับที่สำหรับติดตั้งในพื้นที่ชุมชน เพื่อตอบสนองต่อ

ความต้องการของผู้ประกอบการ หน่วยงานส่วนท้องถิ่นที่รับผิดชอบ รวมถึงชาวบ้านในพื้นที่ชุมชนโดยรอบ ในการแก้ไขปัญหาผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากปัญหาน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมลา อีกทั้งยังสามารถเป็นแนวทางในการสร้างความยั่งยืนในการจัดการและแก้ไขปัญหา น้ำเสียจากอุตสาหกรรมในระดับชุมชนต่อไปในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ยังคงต้องมีการศึกษาพัฒนาเพิ่มเติมในส่วนของการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียหลังผ่านถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ เนื่องจากยังต้องทำการบำบัดเพิ่มเติมเพื่อลดความสกปรกและปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ดียิ่งขึ้น เพื่อป้องกันผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศในพื้นที่ชุมชน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณผู้ช่วยนักวิจัยวิจัย และนักศึกษา ผู้ช่วยเก็บข้อมูลผลการดำเนินงานทดลอง ผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชนผลิตขนมลา บ้านศรีสมบูรณ์ (หอยราก) ตำบลหูล่อง อำเภopakpang จังหวัดนครศรีธรรมราช ในการอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับน้ำเสีย รวมถึงหน่วยงาน สาขาวิทยาศาสตร์ทางทะเลและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ในการอำนวยความสะดวกพื้นที่ดำเนินงานวิจัย และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช ในการสนับสนุนทุนดำเนินงานวิจัยและการประสานงานภายใต้ทุนวิจัยโครงการริเริ่มสำคัญ (flagship project) ปีงบประมาณ 2563 (สัญญาเลขที่ A13F630073) สนับสนุนโดยกองทุนส่งเสริม ววน. และหน่วย บพท. จนทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการดำเนินงาน

เอกสารอ้างอิง

- เอนก สวาทอินทร์ ชุติณัฐ สุจริต มณีรัตน์ สุทธิวงศ์ และศรีธัญญา พูลเขาล้าน. (2558). ผลของอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตเส้นขนมจีนกับน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันปาล์มที่มีต่อการเริ่มเกิดก๊าซชีวภาพ. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 7*. (หน้า 312-321). นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.
- เอนก สวาทอินทร์ ฌานิกา แสงแ่ง ชุกกลิน และกัตตินาฏ สกฤตสวัสดิพันธ์. (2564). การพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าวโดยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์ (MABR). *วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 40(1), 121-134.
- เอนก สวาทอินทร์. (2563). ชุดเตาผลิตก๊าซชีวภาพ. *อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 16985*. กรุงเทพฯ: กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพาณิชย์.
- APHA, AWWA and WEF. (2012). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. (22nd ed). Washington, DC: American public health association (APHA), American water works association (AWWA) and water environment federation (WEF).

- Barber, W.P. and Stuckey, D.C. (1999). The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: A review. *Water Research*, 33(7), 1559-1578.
- Bennich, T. and Belyazid, S. (2017). The route to sustainability-prospects and challenges of the bio-based economy. *Sustainability*, 9(6), doi: <https://doi.org/10.3390/su9060887>.
- Cremonez, P.A., Sampaio, S.C., Teleken, J.G., Meier, T.W., Frigo, E.P., Rossi, E.D., Silva, E.D. and Rosa, D.M. (2020). Effect of substrate concentrations on methane and hydrogen biogas production by anaerobic digestion of a cassava starch-based polymer. *Industrial Crops and Products*, 151, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112471>.
- Cruz, I.A., Andrade, L.R.S., Bharagava, R.N., Nadda, A.K., Bilal, M., Figueiredo, R.T. and Ferreira, L.F.R. (2021). Valorization of cassava residues for biogas production in Brazil based on the circular economy: An updated and comprehensive review. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, doi: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100196>.
- Eddy, M.A., Burton, F.L., Tchobanoglous, G. and Tsuchihashi, R., (2013). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*. (5th ed). New York: McGraw-Hill education.
- Fujihira, T., Seo, S., Yamaguchi, T., Hatamoto, M. and Tanikawa, D. (2018). High-rate anaerobic treatment system for solid/lipid-rich wastewater using anaerobic baffled reactor with scum recovery. *Bioresource Technology*, 263, 145-152, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.091>.
- Gikas, G.D., and Tsihrintzis, V.A. (2012). A small-size vertical flow constructed wetland for on-site treatment of household wastewater. *Ecological Engineering*, 44, 337-343, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.016>.
- Gudiukaite, R., Nadda, A.K., Gricajeva, A., Shanmugam, S., Nguyen, D.D. and Lam, S.S. (2021). Bioprocesses for the recovery of bioenergy and value-added products from wastewater: A review. *Journal of Environmental Management*, 300, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113831>.
- Hu, Y., Kobayashi, T., Zhen, G., Shi, C. and Xu, K.Q. (2018). Effects of lipid concentration on thermophilic anaerobic co-digestion of food waste and grease waste in a siphondriven self-agitated anaerobic reactor. *Biotechnology Reports*, 19, doi: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2018.e00269>.
- Khongkliang, P., Kongjan, P. and O-Thong, S. (2015). Hydrogen and methane production from starch processing wastewater by thermophilic two-stage anaerobic digestion. *Energy Procedia*, 79, 827-832, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.573>.

- Knisz, J., Shetty, P., Writh, R., Maroti, G., Karches, T., Dalko, I., Balint, M., Vadkert, E., and Biro, T. (2021). Genome-level insights into the operation of an on-site biological wastewater treatment unit reveal the importance of storage time. *Science of the Total Environment*, 766, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144425>.
- Meena, R.A.A., Kannah, R.Y., Sindhu, J., Ragavi, J., Kumar, G., Gunasekaran, M. and Banu, J.R. (2019). Trends and resource recovery in biological wastewater treatment system. *Bioresource Technology Reports*, 7, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100235>.
- Nagarajan, D., Lee, D. J., Chen, C. Y. and Chang, J. S. (2020). Resource recovery from wastewaters using microalgae- based approaches: A circular bioeconomy perspective. *Bioresource Technology*, 302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122817>.
- Padi, R.K., Chimphango, A. and Roskilly, A.P. (2022). Economic and environmental analysis of waste-based bioenergy integration into industrial cassava starch processes in Africa. *Sustainable production and consumption*, 31, 67-81, doi: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.02.002>.
- Qi, W.K., Liu, L.F., Shi, Q., Wang, C., Li, Y.Y. and Peng, Y. (2021). Detailed composition evolution of food waste in an intermittent self-agitation anaerobic digestion baffled reactor. *Bioresource Technology*, 320(Part A), doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124342>.
- Tetteh, E.K. and Rathilal S. (2021). Biogas production from wastewater treatment-evaluating anaerobic and biomagnetic systems. *Water-Energy Nexus*, 4, 165-173, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wen.2021.11.004>.
- Westerholm, M., Liu, T. and Schnurer, A. (2020). Comparative study of industrial-scale high-solid biogas production from food waste: Process operation and microbiology. *Bioresource Technology*, 304, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122981>.
- Zwain, H. M., Hassan, S. R., Zaman, N. Q., Aziz, H. A. and Dahlan, I. (2013). The start-up performance of modified anaerobic baffled reactor (MABR) for the treatment of recycled paper mill wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(1-2), 61-64, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.03.007>.