

การพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าวโดยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ แบบแผ่นกั้นประยุกต์ (MABR)

Development of Biogas Production Systems from Rice Scraps by Modified Anaerobic Baffle Reactors (MABR)

เอนก สวาวินทร์^{1*} ฉานิกา แซ่แง ชุกลิน¹ และกัตตินาฏ สกกุลสวัสดิพันธ์¹
Aneak Sawain^{1*} Chanika Saenge Chooklin¹ and Kattinat Sagulsawasdipan¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าวโดยระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสีย ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่า 20 ลิตรต่อสัปดาห์ (0.08 ลิตรต่อลิตรน้ำเสีย) ผลการคำนวณการผลิตก๊าซชีวภาพจากค่าซีโอดีที่ถูกกำจัดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.03-0.24 ลิตรต่อกรัมซีโอดี ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาของการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพยาวนานขึ้น ระบบนี้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไร้อากาศทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดซีโอดี (ร้อยละ 88.9) นอกจากนี้ยังมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดของแข็งตกตะกอน (ร้อยละ 99.7) ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการตกตะกอนในระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์ อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องหมั่นเวียนน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบ สำหรับผสมกับวัตถุดิบก่อนป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อเป็นการรักษาอัตราส่วนอาหารต่อจุลินทรีย์

คำสำคัญ: เศษอาหาร เศษข้าว ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ ก๊าซชีวภาพ

¹ สาขาวิทยาศาสตร์ทางทะเลและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

* Corresponding author e-mail: aneak.ene@gmail.com, aneak.s@rmutsv.ac.th

Received: 12 May 2021, Revised: 1 June 2021, Accepted: 3 June 2021

Abstract

This research was demonstrated the potential of biogas production from rice scraps by the modified anaerobic baffle reactor system applied from automotive gas cylinders for biogas production and wastewater treatment. The results demonstrated the potential of the system to produced more than 20 liters of biogas per week (0.08 liters per liter of wastewater). The calculation of biogas production from the COD removal was found between 0.03 - 0.24 liters per gram of COD, tends to increase as the duration of the biogas production system is longer. This system can degrade organic matter in anaerobic condition, that high COD removal efficiency (88.9%). It was also highly efficient in removal of settleable solids (99.7%), as a consequence of the sedimentation process in the modified anaerobic baffle reactor system. However, it is necessary to circulate the wastewater effluent from the system to be mixed with raw materials before being fed into the biogas production system, in order to maintain the food to microorganisms (F/M) ratio.

Keywords: Food waste, Rice scraps, Anaerobic reactors, Biogas

บทนำ

จากการนำเสนอนโยบายเศรษฐกิจในรูปแบบ bio-circular-green economy (BCG) และมีการกล่าวถึงเศรษฐกิจหมุนเวียน (circular economy) ที่ได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและความต้องการลดปริมาณการปลดปล่อยคาร์บอน การนำขยะหรือของเสียกลับมาใช้ใหม่ในห่วงโซ่อุปทานและครอบคลุมความต้องการทางด้านพลังงานทดแทนของชุมชนและสถานประกอบการในท้องถิ่น เพื่อช่วยในการจัดการขยะและส่งเสริมประสิทธิภาพของการใช้ประโยชน์ทรัพยากร เป็นการนำรูปแบบเศรษฐกิจหมุนเวียนไปใช้อย่างเหมาะสม เนื่องจากวิธีนี้เป็น การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตทางชีวภาพ จึงมีทั้งการผลิตพลังงานทดแทนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ และผลิตภัณฑ์ชีวภาพ (เช่น ก๊าซชีวภาพ ปุ๋ยหมัก) ที่มีความคุ้มค่า (Diamantis *et al.*, 2021; Vlachokostas *et al.*, 2020) ทั้งนี้การแสวงหาข้อได้เปรียบของแหล่งวัตถุดิบที่มีความแตกต่างกัน สำหรับการจัดการพลังงานทดแทน ก่อให้เกิดความสนใจอย่างแพร่หลายในระดับโลก ในการใช้สารอินทรีย์ต่าง ๆ ของเสีย รวมถึงเศษอาหารเพื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ (Barati *et al.*, 2017; Mirmohamadsadeghi *et al.*, 2019) ซึ่งเป็นการอาศัยกระบวนการย่อยสลาย

แบบไม่ใช้อากาศของวัสดุสารอินทรีย์ผ่านกระบวนการที่มีความซับซ้อนของปฏิกิริยาทางชีวเคมี โดยอาศัยจุลินทรีย์ (Mirmohamadsadeghi *et al.*, 2019; Rajaeifar *et al.*, 2017) โดยของเสียส่วนหนึ่งที่มีการทิ้งจากครัวเรือน คือ เศษอาหาร ที่มีความชื้นสูง ซึ่งประกอบด้วยของแข็งระเหยง่าย และมีความเค็ม หากปล่อยให้เกิดกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศก็อาจถือเป็นแหล่งของเสียที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การปลดปล่อยกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ รวมถึงการดึงดูดสัตว์ร้าย (หรือสัตว์ที่เป็นพาหะนำโรค) ให้เข้ามากินเศษอาหาร หรือแม้กระทั่งมีโอกาสของการเกิดการปนเปื้อนของน้ำใต้ดิน (Yasin *et al.*, 2013) ที่อาจส่งผลกระทบต่อคนในชุมชน โดยแนวทางการนำเศษอาหารไปใช้ประโยชน์ มีงานศึกษาวิจัยที่แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ (Florkowski *et al.*, 2018; Qi *et al.*, 2021; Ahamed *et al.*, 2015)

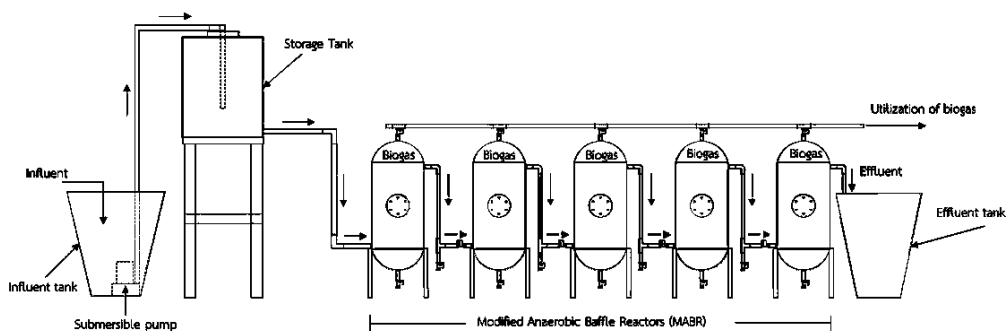
งานวิจัยนี้จึงเป็นการพัฒนาแนวทางการใช้ประโยชน์ของเสียที่เป็นเศษอาหาร โดยจำกัดเฉพาะเศษข้าวที่เหลือจากการบริโภคทั้งที่มาจากครัวเรือน ร้านอาหาร (โรงเรียน มหาวิทยาลัย ร้านอาหาร หรือสถานที่อื่น ๆ) เนื่องจากเศษข้าวมีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่สามารถอาศัยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพให้เป็นก๊าซชีวภาพได้ โดยใช้ระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์มีศักยภาพรองรับการบำบัดของเสียหรือน้ำเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง (Ahamed *et al.*, 2015) เนื่องจากการเดินระบบมีการผสมผสานสำหรับรองรับกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศที่ประกอบด้วยไฮโดรไลซิส (hydrolysis) การหมัก (fermentation) และเมทาโนจิเนซิส (methanogenesis) (Malakahmad *et al.*, 2011, Barber and Stuckey, 1999) ทั้งนี้เพื่อเป็นแนวทางในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าวสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนในครัวเรือน ซึ่งเป็นการสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจในรูปแบบ BCG ที่มีการสนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจในรูปแบบเศรษฐกิจหมุนเวียน ผ่านกระบวนการใช้ประโยชน์ทรัพยากรต่าง ๆ ซึ่งหมายรวมถึงการใช้ของเสียที่เกิดขึ้นจากภาคอุตสาหกรรมและในครัวเรือนหรือชุมชนให้เกิดประโยชน์ และมีความคุ้มค่ามากที่สุด ประกอบกับการสนับสนุนการพัฒนานวัตกรรมพลังงานสีเขียว (green energy) เพื่อตอบสนองการพัฒนาประเทศที่มีความยั่งยืนต่อไปในอนาคต โดยมีการคำนึงถึงและผลานความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุอุปกรณ์

งานวิจัยนี้ทำการประกอบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าว แสดงดังภาพที่ 1 โดยการดัดแปลงรูปแบบการใช้งานจากระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสีย (อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 15998) (เอนก, 2563 ก) ขนาดถังปฏิกรณ์ไร้อากาศปริมาตร 50 ลิตร จำนวน 5 ถัง (ปริมาตรส่วนของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ

รวม 250 ลิตร) ซึ่งภายในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศบรรจุยางในรถจักรยานยนต์สำหรับเสริมประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย (อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 16651) (เอนก, 2563 ข) เพื่อทำการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าว และทำการทดสอบการจุดติดไฟของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ด้วยชุดเตาก๊าซชีวภาพ (อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 16985) (เอนก, 2563 ค) เพื่อทดสอบศักยภาพและระยะเวลาการจุดติดไฟ โดยการดำเนินงานวิจัยทำการทดลองเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพจำนวน 3 ชุด และนำข้อมูลผลการทดลองที่ได้จากการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับการคำนวณค่าทางสถิติ เพื่อพิจารณาถึงศักยภาพการกำจัดของเสีย การผลิตก๊าซชีวภาพ และเสนอแนะแนวทางการดำเนินงานหรือการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป



ภาพที่ 1 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าว
ที่มา: ดัดแปลงจาก เอนก (2563 ก)

2. วัตถุดิบ

งานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบเศษข้าวจากโรงอาหารของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง และจากหอพักนักศึกษา โดยทำการแยกเศษข้าวจากเศษอาหารประเภทอื่น ๆ เนื่องจากเศษข้าวที่เหลือจากการบริโภคสามารถละลายน้ำได้ดี ซึ่งส่งผลดีต่อกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ ทั้งนี้การเตรียมวัตถุดิบสำหรับการป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการนำเศษข้าวผสมกับน้ำสะอาดและทำการกวนผสม เพื่อให้ได้วัตถุดิบเป็นเศษข้าวละลายน้ำที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีอยู่ระหว่าง 2,000-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เติมนลงในถังพักเพื่อรอทำการป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ในส่วนของน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์ม การดำเนินงานวิจัยนี้ได้ขอความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียจากสถานประกอบการโรงงานน้ำมันปาล์มแห่งหนึ่งในจังหวัดตรัง

3. การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

การเริ่มต้นเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (start-up biogas production systems) ดำเนินการโดยการนำวัตถุดิบซึ่งเป็นเศษข้าวละลายน้ำ ผสมกับน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์ม ที่มีจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซชีวภาพอยู่แล้ว โดยใช้ น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์มปริมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตร ทำการผสมกับเศษข้าวละลายน้ำปริมาณร้อยละ 60 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นการตัดแปลงวิธีการเริ่มต้นเดินระบบ โดยใช้ น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์มผลิตก๊าซชีวภาพ (เอนก และคณะ, 2558; Zwain *et al.*, 2013) เพื่อลดระยะเวลาการผลิตก๊าซชีวภาพให้เร็วขึ้น

การเดินระบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพหลังจากทำการการเริ่มต้นเดินระบบในครั้งแรก โดยใช้ น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์มเป็นส่วนผสม ในครั้งถัดมาทุก ๆ 1 สัปดาห์ เป็นการเติมวัตถุดิบเข้าสู่ระบบโดยการใช้ น้ำเสียที่ออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพปริมาณร้อยละ 40 โดยปริมาตร (ทดแทนน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์ม) ผสมกับเศษข้าวละลายน้ำปริมาณร้อยละ 60 ซึ่งเป็นการหมุนเวียนน้ำเสีย หรือการรีไซเคิลน้ำเสีย ที่ออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพกลับมาใช้ใหม่ เพื่อเป็นการรักษาระดับปริมาณของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ โดยในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีลักษณะการเดินระบบในรูปแบบแบทช์ (batch) ทำให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีระยะเวลาสำหรับกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์เท่ากับ 7 วัน (168 ชั่วโมง) สอดคล้องกับลักษณะการก่อเกิดของเสีย คือ เศษข้าว ที่ไม่ได้มีการเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดทั้งวัน ส่งผลให้การควบคุมดูแลระบบในลักษณะแบทช์ ทำงานได้ง่ายกว่าในสถานการณ์จริง โดยงานวิจัยนี้ดำเนินการทดลองเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพโดยการใช้วัตถุดิบเศษข้าวละลายน้ำและน้ำเสียจากการหมุนเวียนกลับมาผสมและเติมเข้าสู่ระบบใหม่ในปริมาณ 100 ลิตร ในแต่ละสัปดาห์ เพื่อทำการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพตลอดระยะเวลาดำเนินการทดลองต่อเนื่อง 6 สัปดาห์ โดยทำการคำนวณปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจากการวัดความสูงของน้ำในถังพักน้ำเสีย (storage tank) และทำการทดสอบเบื้องต้นสำหรับการจุดติดไฟของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ เพื่อพิจารณาถึงระยะเวลาสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

4. การประเมินศักยภาพระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

งานวิจัยนี้ทำการประเมินศักยภาพระบบผลิตก๊าซชีวภาพโดยการเก็บข้อมูลปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ ศักยภาพการจุดติดไฟในทุก ๆ 1 สัปดาห์ เพื่อแสดงถึงศักยภาพของการนำไปใช้ประโยชน์ เนื่องจากขยะประเภทเศษอาหารถูกมองว่าเป็นปัญหาจากการเพิ่มภาระการกำจัดในหลายพื้นที่ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรวมถึงการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Florkowski *et al.*, 2018) การประเมินศักยภาพการกำจัดสารอินทรีย์จากการวิเคราะห์วัตถุดิบในรูปของคุณภาพน้ำเสียที่ปล่อยเข้าสู่ระบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีพารามิเตอร์

สำหรับการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเสีย คือ สี (color) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อุณหภูมิ (temperature) ออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen: DO) ซีโอดี (chemical oxygen demand: COD) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (total suspended solids: TSS) และปริมาณของแข็งตกตะกอน (settable solid) ตามมาตรฐานวิธีการวิเคราะห์ (APHA *et al.*, 2012) และใช้ค่าซีโอดีสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ และศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีที่ถูกกำจัด

ผลการวิจัย

1. คุณลักษณะสมบัติของวัตถุดิบ

เมื่อผสมเศษข้าวกับน้ำสะอาดและทำการกวนผสม ทำให้ได้วัตถุดิบสำหรับป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในรูปของเหลวที่มีลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบแสดงดังตารางที่ 1 โดยลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบมีลักษณะสีขาวขุ่น และมีตะกอน ลักษณะทางเคมีของวัตถุดิบ ค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าเป็นด่างเล็กน้อย (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.57 ± 0.23) อุณหภูมิใกล้เคียงกับสภาพอากาศทั่วไป (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 30.13 ± 0.53 องศาเซลเซียส) เนื่องจากการทดลองในสภาพอากาศปกติ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำของวัตถุดิบก่อนป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีปริมาณต่ำกว่า 3.5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.96 ± 0.31 มิลลิกรัมต่อลิตร ในส่วนของปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีที่เป็นส่วนสำคัญของการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $2,511 \pm 232$ มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งในรูปของค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดและของแข็งตกตะกอนซึ่งเป็นเศษข้าวที่ละลายน้ำได้ไม่หมดมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 374 ± 41 และ 184 ± 22 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

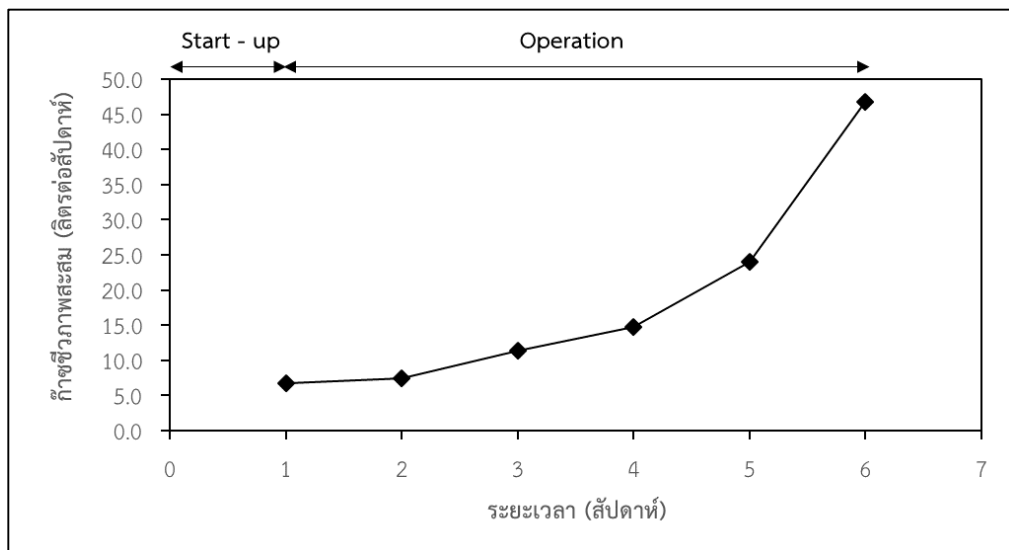
ตารางที่ 1 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบ

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์
สี	ขาวขุ่น
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	8.20-9.00
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	29.0-31.5
ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2.30-3.45
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	2,000-3,000
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	300-460
ของแข็งตกตะกอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	150-240

หมายเหตุ:- การเตรียมวัตถุดิบ โดยการผสมเศษข้าวกับน้ำสะอาด ควบคุมความเข้มข้นของเศษข้าวละลายน้ำให้มีค่าซีโอดีอยู่ระหว่าง 2,000-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลจากการเริ่มต้นเดินระบบในครั้งแรกเป็นการผสมน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์มกับวัตถุดิบเศษข้าวละลายน้ำ และทำการป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในรูปแบบของระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประกบจากถังบรรจุก๊าซรถยนต์ พบว่ามีการเกิดก๊าซชีวภาพได้ตั้งแต่วันที่ 1 สัปดาห์แรก (หลังเริ่มต้นเดินระบบ 2 วัน) ผลจากการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาดำเนินการทดลอง พบว่าก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่สัปดาห์แรก แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในช่วงระยะเวลาเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในแต่ละสัปดาห์เพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 20 ลิตรต่อสัปดาห์ เมื่อระยะเวลาหลังทำการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพผ่านไป 4 สัปดาห์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงระบบมีศักยภาพและความเสถียรมากขึ้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปหลายสัปดาห์ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการปรับสภาพของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบให้เข้ากับสภาพใหม่ จนสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณมากขึ้น และมีความสม่ำเสมอ ผลการทดสอบเบื้องต้นการใช้ก๊าซชีวภาพสำหรับจุดติดไฟด้วยชุดเตาก๊าซชีวภาพ แสดงดังภาพที่ 3 พบว่าก๊าซชีวภาพสามารถจุดติดไฟได้ดี โดยระยะเวลาในการจุดติดไฟขึ้นอยู่กับปริมาณการกักเก็บก๊าซชีวภาพและการควบคุมปริมาณการปล่อยก๊าซชีวภาพ ซึ่งจากการทดสอบระยะเวลาการจุดติดไฟด้วยชุดเตาก๊าซชีวภาพ เมื่อควบคุมปริมาณการปล่อยก๊าซชีวภาพที่ทำให้เกิดเปลวไฟที่มีความสูงประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่กักเก็บไว้ในระบบถังปฏิกรณ์

ไร่อากาศ 100 ลิตร จะสามารถจุดติดได้ระยะเวลาประมาณ 30 นาที ในสภาวะอากาศปกติ ซึ่งสามารถพิจารณาแนวทางการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้



ภาพที่ 3 การทดสอบการจุดติดไฟของก๊าซชีวภาพจากเศษข้าวด้วยชุดเตาก๊าซชีวภาพ

3. การประเมินศักยภาพระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ 2 พบว่าน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีสีดำแต่มีปริมาณตะกอนน้อยมาก ผลจากการตรวจวัดค่าความเป็นกรด-ด่างมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับก่อนเข้าระบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.77 ± 0.27) อุณหภูมิใกล้เคียงกับสภาพอากาศโดยรอบ (ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 29.42 ± 0.82 องศาเซลเซียส) ในส่วนของค่าออกซิเจนละลายน้ำมีค่าเฉลี่ยต่ำกว่า 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นผลจากการผ่านกระบวนการหมักในระบบถังปฏิกรณ์ไร่อากาศ ปริมาณสารอินทรีย์ในรูปค่าซีโอดีมีค่าลดลงอย่างมากเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบ โดยซีโอดีของน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 278 ± 24 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของแข็งในรูปของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และของแข็งตกตะกอนมีปริมาณลดลงเช่นเดียวกัน โดยปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และของแข็งตกตะกอนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 209 ± 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 0.467 ± 0.205 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณของแข็งตกตะกอนมีปริมาณลดลงอย่างมาก

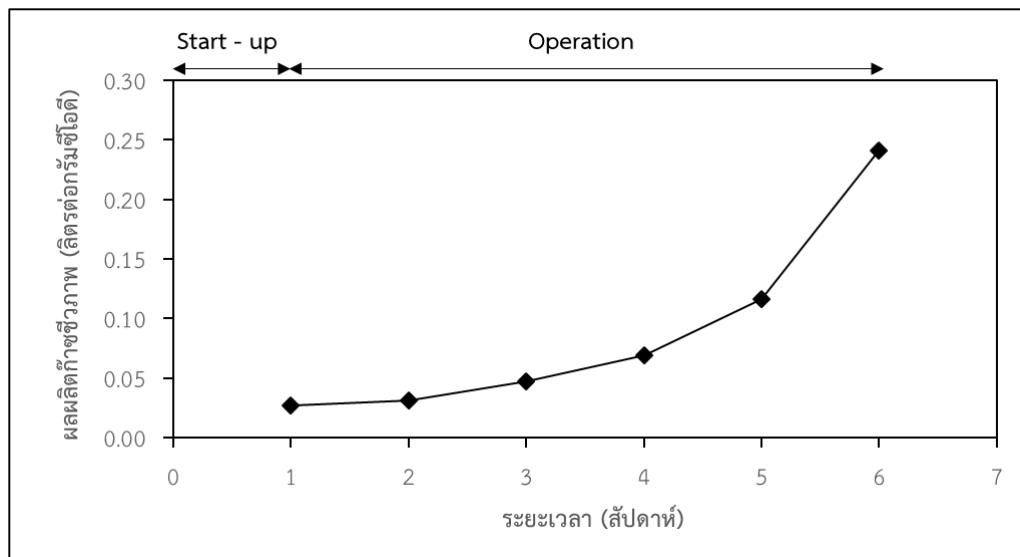
ตารางที่ 2 ลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์
สี	ดำ
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	7.30-8.20
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	28.0-30.5
ออกซิเจนละลายน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	< 1.0
ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	240-310
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)	150-270
ของแข็งตกตะกอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	0.2-1.0

การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดของเสีย เมื่อทำการทดลองใช้วัตถุดิบเป็นเศษข้าวละลายน้ำ พบว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพในรูปแบบระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์มีศักยภาพในการบำบัดของเสียผ่านกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในระบบ โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปค่าซีไอดีร้อยละ 88.9 ± 1.1 แต่มีศักยภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมดค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้เป็นผลมาจากการปนเปื้อนสารแขวนลอยที่เป็นของเสียส่วนที่เหลือและตะกอนของจุลินทรีย์ที่ไหลออกมาพร้อมกับน้ำเสีย โดยประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งแขวนลอยทั้งหมดมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 37.6 ± 11.3 ซึ่งผลจากการปนเปื้อนสารแขวนลอยที่เป็นตะกอนของจุลินทรีย์และไหลออกมาพร้อมกับน้ำเสีย ส่งผลทำให้ปริมาณจุลินทรีย์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพลดลงหากไม่ทำการหมุนเวียนน้ำกลับ อย่างไรก็ตามระบบนี้มีศักยภาพในการกำจัดของแข็งตกตะกอนสูงมาก ซึ่งสังเกตได้จากผลการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งตกตะกอนที่มีค่าเฉลี่ยร้อยละ 99.7 ± 0.1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงระบบผลิตก๊าซชีวภาพในรูปแบบระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์มีศักยภาพในการดักตะกอนผ่านกระบวนการตกตะกอนของของแข็งให้ติดค้างอยู่ในระบบ ส่งผลทำให้มีปริมาณของแข็งตกตะกอนลดลงอย่างมาก จากการคำนวณปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพจากค่าซีไอดีที่ถูกกำจัด (ภาพที่ 4) พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.03-0.24 ลิตรต่อกรัมซีไอดี โดยในช่วงเริ่มต้นเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจะมีปริมาณน้อยแต่จะมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีระยะเวลาผ่านไปนานขึ้น

ตารางที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพการบำบัด

พารามิเตอร์	ประสิทธิภาพการกำจัด (ร้อยละ)
ซีไอดี	88.9 ± 1.1
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	37.6 ± 11.3
ของแข็งตกตะกอน	99.7 ± 0.1



ภาพที่ 4 ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพจากสารอินทรีย์ในรูปค่าชีโอดีที่ถูกกำจัด

การอภิปรายผลการวิจัย

การดำเนินงานทดลองเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าว ในส่วนของผลของการเตรียมวัตถุดิบ พบว่าปริมาณของแข็งที่ปนเปื้อนในวัตถุดิบส่งผลต่อการเกิดปัญหาการอุดตันของระบบต่อการเดินระบบจึงควรควบคุมให้มีปริมาณตะกอยไม่มากจนเกินไป เพื่อป้องกันการเกิดปัญหาการอุดตันของระบบต่อ หากมีปริมาณตะกอนของแข็งปริมาณมากอาจใช้วิธีการแยกของแข็งตกตะกอนออกจากวัตถุดิบก่อนป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะมีส่วนช่วยในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้มีความเสถียรมากขึ้น โดยในส่วนของ การเดินระบบโดยใช้น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์ม แสดงให้เห็นถึงวิธีการและศักยภาพของการใช้น้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศในระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์มมีส่วนช่วยในการเริ่มต้นเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และทำให้เกิดก๊าซชีวภาพได้เร็วขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของเอนก และคณะ (2558) และ Zwain *et al.* (2013) ที่มีการนำของเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำมันปาล์มมาใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพทำให้เกิดก๊าซชีวภาพได้เร็วขึ้นเช่นเดียวกัน อย่างไรก็ตามการปรับสภาพของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตก๊าซชีวภาพต้องอาศัยระยะเวลาในการปรับสภาพให้เข้ากับสภาวะใหม่โดยเฉาะกลุ่มจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทน (CH_4) รวมถึงชนิดของสารอินทรีย์ที่ต่างไปจากเดิม ซึ่งมีความสำคัญต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพที่สามารถจุดติดไฟได้ โดยผลการดำเนินงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพผ่านไปนานมากขึ้น

ผลการดำเนินงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าวโดยระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสียที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่า 20 ลิตรต่อสัปดาห์ (0.08 ลิตรต่อลิตรน้ำเสีย) โดยอาศัยการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีการนำไปใช้ทั่วโลก เพื่อเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงาน (Westerholm *et al.*, 2020) อีกทั้งมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีสูง (เฉลี่ยร้อยละ 88.9±1.1) ซึ่งอยู่ในช่วงประสิทธิภาพของการกำจัดสารอินทรีย์กลุ่มคาร์โบไฮเดรต (Barber and Stuckey, 1999) อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพของการกำจัดของแข็งตกตะกอนสูงเช่นเดียวกัน (เฉลี่ยร้อยละ 99.7±0.1) ซึ่งเป็นผลจากการที่ระบบมีศักยภาพในการกักเก็บตะกอนให้อยู่ในระบบผ่านกระบวนการตกตะกอนในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ แต่ผลจากการมีตะกอนจุลินทรีย์ปนเปื้อนออกมาพร้อมกับน้ำเสียที่ไหลออกมาจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอยค่อนข้างต่ำ (เฉลี่ยร้อยละ 37.6±11.3) และส่งผลให้ต้องมีการหมุนเวียนน้ำกลับไปผสมกับวัตถุดิบที่ป้อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อรักษาระดับปริมาณจุลินทรีย์ ผลการคำนวณปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจากค่าซีไอดีที่ถูกกำจัดพบว่ามีความอยู่ระหว่าง 0.03-0.24 ลิตรต่อกรัมซีไอดี ซึ่งแนวโน้มมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพนานขึ้น โดยเป็นผลจากความต้องการระยะเวลาในการปรับสภาพของจุลินทรีย์ให้เข้ากับสภาวะใหม่ ซึ่งการปรับสภาพของเสียหรือการเตรียมวัตถุดิบให้อยู่ในสภาวะละลายน้ำ เป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีส่วนช่วยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบสามารถเกิดขึ้นได้ดี ในส่วนของน้ำเสียที่ออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพยังต้องทำการบำบัด เนื่องจากยังมีความสกปรกสูงที่อาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นรบกวน ซึ่งอาจจำเป็นต้องเพิ่มเติมกระบวนการเติมอากาศ กระบวนการบำบัดด้วยพืชน้ำ หรือ กระบวนการบำบัดรูปแบบอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดให้กับน้ำเสียที่ไหลออกจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ให้มีปริมาณความสกปรกลดน้อยลงและเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้กับน้ำเสียจนไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หรืออาจพิจารณาถึงแนวทางการนำน้ำหลังผ่านการบำบัดไปใช้หมุนเวียนก่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าว โดยการใช้งานระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์ เนื่องจากผลการดำเนินงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ผ่านกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ ผลิตเป็นก๊าซชีวภาพที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับเป็นพลังงานทดแทนแก๊ส LPG ได้ จึงสามารถใช้เป็นวิธีการประยุกต์ใช้งานสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษข้าว รวมถึงเป็นแนวทางการพัฒนานวัตกรรม สิ่งประดิษฐ์ เพื่อสนับสนุนการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียในครัวเรือนหรือชุมชน

ประเภทอื่น ๆ ก่อให้เกิดกระบวนการใช้ทรัพยากรในชุมชนอย่างคุ้มค่า โดยผลการดำเนินงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงผลผลิตก๊าซชีวภาพสามารถนำไปใช้งานในสถานการณ์จริงได้ในระดับครัวเรือน อย่างไรก็ตามระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดของการเดินระบบที่ต้องอาศัยทักษะความเข้าใจของผู้ควบคุมดูแลระบบ ซึ่งสามารถพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพให้มีความสะดวกในการเดินระบบและมีความเหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริงในครัวเรือนหรือชุมชนมากยิ่งขึ้น รวมถึงการพัฒนาแบบเก็บกักก๊าซชีวภาพให้สามารถนำไปใช้งานได้ยาวนานตามความประสงค์ของผู้ใช้ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์สร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียในครัวเรือนหรือชุมชน สนับสนุนการพัฒนาเศรษฐกิจในรูปแบบ BCG หรือ การพัฒนานวัตกรรมพลังงานสีเขียว ในระดับชุมชน ตลอดจนการพัฒนาชุมชนให้มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม หรือเป็นแนวทางการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เป็นผลจากการพัฒนาเศรษฐกิจและชุมชน เพื่อนำไปสู่การพัฒนาประเทศให้มีความยั่งยืนทางด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมต่อไปในอนาคต

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ยังอาจต้องมีการศึกษาหรือพัฒนาเพิ่มเติมถึงกระบวนการควบคุมดูแลระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อให้มีศักยภาพในการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพ หรือการเพิ่มความสะดวกในการควบคุมดูแล เช่น การออกแบบติดตั้งเพิ่มเติมระบบควบคุมอัตโนมัติ หรือการพัฒนาในรูปแบบอื่น ๆ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณหน่วยงาน สาขาวิทยาศาสตร์ทางทะเลและสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย รวมถึงผู้ช่วยวิจัย และนักศึกษา ในการสนับสนุนการดำเนินงานวิจัย ทำให้งานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จในการดำเนินงาน

เอกสารอ้างอิง

- เอนก สวาทอินทร์. (2563 ก). ระบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นประยุกต์จากถังบรรจุก๊าซรถยนต์ สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพและบำบัดน้ำเสีย. *อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 15998*. กรุงเทพฯ: กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพาณิชย์.
- เอนก สวาทอินทร์. (2563 ข). ยางไนโรจกียานยนต์สำหรับเสริมประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย. *อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 16651*. กรุงเทพฯ: กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพาณิชย์.
- เอนก สวาทอินทร์. (2563 ค). ชุดเตาก๊าซชีวภาพ. *อนุสิทธิบัตรไทย เลขที่ 16985*. กรุงเทพฯ: กรมทรัพย์สินทางปัญญา กระทรวงพาณิชย์.

- เอนก สวาทอินทร์ ชุตินุช สุจริต มณีรัตน์ สุทธิวงศ์ และศรีัญญา พูลเขาล้าน. (2558). ผลของอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตเส้นขนมจีนกับน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันปาล์มที่มีต่อการเริ่มเกิดก๊าซชีวภาพ. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลครั้งที่ 7. (หน้าที่ 312-321). นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน.
- Ahamed, A., Chen, C.L., Rajagopal, R., Wu, D., Mao, Y., Ho, I.j.R., Lim, J.W. and Wang, J.Y. (2015). Multi-phased anaerobic baffled reactor treating food waste. *Bioresource Technology*, 182, 239-244.
- 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.
- Barati, M.R., Aghbashlo, M., Ghanavati, H., Tabatabaei, M., Sharifi, M., Javadirad, G., Dadak, A. and Soufiyan, M.M. (2017). Comprehensive exergy analysis of a gas engine-equipped anaerobic digestion plant producing electricity and biofertilizer from organic fraction of municipal solid waste. *Energy Conversion and Management*, 151(1), 753-763.
- Diamantis, V., Eftaxias, A., Stamatelatos, K., Noutsopoulos, C., Vlachokostas, C. and Aivasidis, A. (2021). Bioenergy in the era of circular economy: Anaerobic digestion technological solutions to produce biogas from lipid-rich wastes. *Renewable Energy*, 168, 438-447.
- Florkowski, W.J., Us, A. and Klepacka, A.M. (2018). Food waste in rural households support for local biogas production in Lubelskie Voivodship (Poland). *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 46-52.
- Malakahmad, A., Ezlin, A.B.N., and Ahahrom Md.Z. (2011). Study on performance of a modified anaerobic baffled reactor to treat high strength wastewater. *Journal of Applied Sciences*, 11(8), 1449-1452.

- Mirmohamadsadeghi, S., Karimi, K., Tabatabaei, M. and Aghbashlo, M. (2019). Biogas production from food wastes: A review on recent developments and future perspectives. *Bioresource Technology Reports*, 7, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100202>.
- 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>.
- Rajaeifar, M.A., Ghanavati, H., Dashti, B.B., Heijungs, R., Aghbashlo, M. and Tabatabaei, M. (2017). Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 414-439.
- Vlachokostas, C., Achillas, C., Agnantiaris, I., Michailidou, A. V., Pallas, C., Feleki, E. and Moussiopoulos, N. (2020). Decision support system to implement units of alternative biowaste treatment for producing bioenergy and boosting local bioeconomy. *Energies*, 13(9), doi: <https://doi.org/10.3390/en13092306>.
- 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>.
- Yasin, N.H.M., Mumtaz, T. and Hassan, M.A. (2013). Food waste and food processing waste for biohydrogen production: A review. *Journal of Environmental Management*, 130, 375-385.
- 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.