# การเพิ่มประสิทธิภาพผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอน ณ สภาวะเมโซฟิลิก

# The Enhancement of Biogas Production from Food Waste by Using Two-stage Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor at Mesophilic Temperature

พัชรี อินธนู[1*]และกาญจนา สมฤทธิ์[2]
Patcharee Intanoo[1*] and Kanjana Somrit[2]

[1]สาขานวัตกรรมเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290 ประเทศไทย
[2]สาขาเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290 ประเทศไทย
[1]Department of Industrial Chemistry Innovation, Faculty of Science, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand
[2]Department of Industrial Chemistry and Textile Technology, Faculty of Science, Maejo University, Chiang Mai 50290, Thailand
*Corresponding author, e-mail: patchareeintanoo@gmail.com
(Received: Dec 9, 2024; Revised: Jul 25, 2025; Accepted: Aug 11, 2025)

**บทคัดย่อ**

ในปัจจุบันความต้องการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นโดยเฉพาะการใช้พลังงานฟอสซิลซึ่งตรงกันข้ามกับปริมาณทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัด เพื่อรองรับความต้องการพลังงานอย่างยั่งยืนจึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพลังงานทางเลือกที่มีสมบัติใกล้เคียงกับพลังงานฟอสซิลนั่นคือ การผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารโดยใช้ถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอน (Two-stage Upflow Anaerobic Sludge Blanket: UASB) ภายใต้สภาวะเมโซฟิลิก (คือ สภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 37 องศาเซลเซียส) และติดตามค่าความเป็นกรดด่างให้อยู่ในช่วง 4.50–7.50 ด้วยอัตราการป้อนกลับ ที่ 1:1 จากการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอนที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในช่วง 10.54 ถึง 26.40 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของขนาดถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในช่วง 8.10 ถึง 21.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของขนาดถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตรพบว่า ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมที่ 21.07 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของขนาดถังปฏิกรณ์ 5 ลิตร และที่ 18.90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของขนาดถังปฏิกรณ์ 16 ลิตร ระบบมีประสิทธิภาพในการผลิตชีวภาพสูงสุดในรูปของอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสูงสุดเท่ากับ 33.85 มิลลิลิตรต่อวัน ผลได้ของแก๊สมีเทนสูงสุดคือ 0.114 มิลลิลิตร ($CH_4$) ต่อกิโลกรัมซีโอดีขาเข้า หรือ 2.38 มิลลิลิตร ($CH_4$) ต่อกิโลกรัมซีโอดีขาออก และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนเฉพาะเจาะจงสูงสุดเท่ากับ 1.58 มิลลิลิตร ($CH_4$) ต่อลิตรต่อวัน หรือ 4.19 มิลลิลิตร ($CH_4$) ต่อกรัมแบคทีเรียต่อวัน ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารมากที่สุดคือ ร้อยละ 45.14

**คำสำคัญ :** แก๊สชีวภาพ เศษอาหาร ถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้น พลังงานทางเลือก

**Abstract**

At present, the demand for energy is increasing, particularly for fossil fuels, which contrasts with the limited availability of natural resources. To sustainably meet this growing demand, alternative energy production technologies with properties similar to fossil fuels have been developed. One such technology is the production of biogas from food waste using a two-stage upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor under mesophilic conditions, maintained at a constant temperature of 37°C and a pH range between 4.50–7.50 with a recycle ratio at 1:1. The study on biogas production from food waste using the two-stage UASB reactor was operated at different COD loading rate ranging from 10.54 to 26.40 kg/$m^3$d based on working volume of 5 liter and 8.10 to 21.60 kg/$m^3$d based on working volume of 16 liter. From the study, it revealed that at an optimal COD loading rate of 21.07 and 18.90 kg/$m^3$d based on

working volume of 5 and 16 liter, respectively, the system gave the highest methane production performance. It performed in term of the maximum methane production rate of 33.85 ml/d, with a specific methane production rate of 1.58 ml $CH_4$/l d (or 4.19 ml $CH_4$/g bacteria d) and a maximum methane yield of 0.114 ml $CH_4/COD_{applied}$ (or 2.38 ml $CH_4/COD_{removed}$). This is corresponding to the maximum COD removal of 45.14 %.

**Keywords:** Biogas, Food waste, Upflow anaerobic sludge blanket reactor, Alternative energy

**บทนำ**

มนุษย์จัดเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้เกิดขยะอาหาร และโลกมีปริมาณของขยะอาหารมากถึง 2.50 พันล้านตันต่อปี (Electricity Generating Authority of Thailand: EGAT, 2025) ในขณะที่ประเทศไทยพบปริมาณการเกิดขยะอาหารประมาณ 12.00 ล้านตันต่อปี ซึ่งขยะอาหารเหล่านี้เกิดมาจาก 3 ภาคหลักคือ ภาคครัวเรือนคิดเป็นร้อยละ 77.00 ภาคธุรกิจบริการด้านร้านอาหารคิดเป็นร้อยละ 18.00 และภาคธุรกิจการจัดจำหน่ายอาหารคิดเป็นร้อยละ 5.00 เมื่อคิดเป็นค่าดัชนีปริมาณขยะอาหารระดับชาติพบว่าปริมาณขยะอาหารที่เกิดขึ้นจากภาคครัวเรือน ภาคธุรกิจบริการด้านร้านอาหาร และภาคธุรกิจการจัดจำหน่ายอาหารคือ 97 29 และ 16 กิโลกรัมต่อคนต่อปี ตามลำดับ (Vgreenku, 2025) ประกอบกับในปัจจุบันประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องซึ่งสวนทางกับปริมาณทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดส่งผลให้พลังงานชีวมวลได้รับความสนใจในฐานะพลังงานทางเลือกเพื่อทดแทนพลังงานจากแหล่งเดิม ทั้งนี้พลังงานชีวมวลสามารถตอบสนองต่อความต้องการใช้พลังงานได้อย่างต่อเนื่องและมีหลายรูปแบบตามกระบวนการผลิต สำหรับพลังงานชีวมวลในรูปแบบแก๊ส เรียกว่า แก๊สชีวภาพ นั้นถือเป็นพลังงานชีวมวลที่มีกระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน มีต้นทุนการผลิตต่ำ และมีความปลอดภัย เนื่องจากสามารถผลิตได้จากของเสียอินทรีย์ที่พบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น เศษอาหารหรือขยะอาหาร และเศษผักผลไม้ นอกจากนี้การนำเศษอาหารมาใช้เป็นแหล่งผลิตแก๊สชีวภาพยังช่วยลดปริมาณขยะอินทรีย์ (Pradeshwaran *et al.,* 2024) ซึ่งหากปล่อยทิ้งไว้โดยไม่ผ่านกระบวนการจัดการที่เหมาะสมอาจก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สเรือนกระจกประเภทแก๊สมีเทน ซึ่งมีศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนสูงกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 30 เท่า (Saiphet *et al.,* 2023) ดังนั้นเพื่อการจัดการขยะอาหารที่ยั่งยืนและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ขยะอาหารจึงถูกนำมาเป็นแหล่งพลังงานชีวมวลชนิดแก๊สเนื่องจากขยะอาหารเป็นสารอินทรีย์กลุ่มคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate-rich material) ที่สามารถย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้ง่ายด้วยเชื้อจุลินทรีย์และใช้เวลาสั้น (Dandikas *et al*., 2017) อีกทั้งการใช้งานแก๊สชีวภาพยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำอีกด้วย (Ferdes *et al*., 2022; Jameel *et al*., 2024)

แก๊สชีวภาพเป็นพลังงานชีวมวลที่มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนประมาณร้อยละ 60 – 70 โดยปริมาตร (Qian *et al*., 2025; Jameel *et al*., 2024) จึงทำให้สมบัติของแก๊สชีวภาพมีความใกล้เคียงกับแก๊สธรรมชาติที่มาจากการขุดเจาะและสมบัติของแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้นั้นจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนขององค์ประกอบแก๊สมีเทน โดยทั่วไปแก๊สมีเทนสามารถผลิตได้หลายวิธี เช่น การแตกตัวด้วยความร้อนของแก๊สธรรมชาติ (Thermal cracking of natural gas) กระบวนการไฮโดรไลซิสของน้ำ (Hydrolysis of water) การเผาโดยไม่ใช้ออกซิเจนของสารชีวมวล (Pyrolysis or Gasification of Biomass) เป็นต้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวเป็นวิธีที่ต้องการพลังงานและต้นทุนการติดตั้งสูงรวมถึงมีความเสี่ยงต่ออันตรายที่อาจเกิดขึ้นขณะดำเนินงาน (Lak *et al.,* 2024) ดังนั้นแนวคิดการผลิตแก๊สมีเทนที่มีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและมีต้นทุนการผลิตต่ำจึงกำเนิดขึ้นนั่นคือ การผลิตผ่านกระบวนการหมักทางชีวเคมี (Biological fermentation process) ที่อาศัยจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในการหายใจเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ กระบวนการหมักทางชีวเคมีเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพแบ่งออกเป็น 2 ประเภท (Lu *et al.*, 2023) คือ กระบวนการหมักแบบใช้แสง (Photo-fermentation process) และกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง (Dark-fermentation process) โดยส่วนใหญ่การผลิตแก๊สชีวภาพมักเกิดผ่านกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงเนื่องจากใช้พลังงานต่ำและไม่ต้องการแหล่งพลังงานแสงในการผลิต (Bułkowska *et al.*, 2024)

กระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงประกอบด้วย 4 ขั้นตอนต่อเนื่องกันดังนี้ ขั้นตอนไฮโดรลิซิส (Hydrolysis) ขั้นตอนอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) ขั้นตอนอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) และขั้นตอนเมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis) ตามลำดับ (Wang *et al.*, 2023 & Jameel *et al*., 2024) ขั้นตอนไฮโดรลิซิสเป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เล็กลงกล่าวคือย่อยสลายสารกลุ่มคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันในของเสีย

อินทรีย์เป็นกลูโคส กรดอะมิโน และกรดไขมัน ตามลำดับ ส่วนขั้นตอนอะซิโดเจนเนซิสนั้นสารโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนด้วยเชื้อจุลินทรีย์ชนิดแอซิโดเจน (Acedogen) จากนั้นเชื้อจุลินทรีย์ชนิดแอซิโตเจน (Acetogen) จะทำหน้าที่เปลี่ยนกรดอินทรีย์เป็นกรดอะซิติกในขั้นตอนอะซิโตเจเนซิส และกรดอะซิติก แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกหมักและย่อยสลายต่อด้วยเชื้อจุลินทรีย์ชนิดเมทาโนเจน (Methanogen) จนกระทั่งเกิดเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สในขั้นตอนเมทาโนเจเนซิส (Anburajan *et al.*, 2023) จากขั้นตอนการผลิตแก๊สชีวภาพทั้ง 4 ขั้นตอน จะเห็นว่า การผลิตแก๊สชีวภาพให้มีสมบัติเทียบเท่าแก๊สธรรมชาตินั้นสามารถดำเนินการได้ด้วยการเพิ่มสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพ ซึ่งมักใช้แนวทางของการเพิ่มขั้นตอนการหมัก (Bakkaloglu *et al.*, 2024) เนื่องจากในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพผ่านการหมักจะเกิดกรดอินทรีย์เป็นผลิตภัณฑ์กลาง เมื่อกระบวนการดำเนินไปในระยะหนึ่งอัตราการย่อยสลายกรดอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนเป็นแก๊สจะลดลงส่งผลให้กรดอินทรีย์สะสมในระบบซึ่งการสะสมดังกล่าวทำให้สภาพแวดล้อมภายในระบบมีความเป็นกรดเพิ่มขึ้นจนไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพโดยรวม (Qian *et al.*, 2025) ดังนั้น การใช้ระบบหมักแบบหลายขั้นตอนจะช่วยลดความเป็นกรดจากการสะสมของกรดอินทรีย์ (Volatile fatty acid; VFA) ที่ไม่ถูกย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ลง (Saboohi *et al.*, 2025) โดยทั่วไปการดำเนินการหมักแบบหลายขั้นตอนนิยมใช้ถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นเพราะมีประสิทธิภาพการกำจัดซึ่งจะแสดงถึงประสิทธิภาพการย่อยสลาย (COD removal) และลดความเป็นพิษจากการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบ (Volatile fatty acids removal) รวมถึงถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสามารถรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูง (Shinde *et al.*, 2023) นอกจากการเพิ่มสัดส่วนของแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพด้วยการเพิ่มขั้นตอนการหมักแล้ว การย่อยสลายร่วมยังเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเพิ่มสัดส่วนของแก๊สมีเทนอีกด้วย (Khanthong *et al.*, 2023 & Vats *et al.*, 2019)

ในงานวิจัยนี้ต้องการลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมในระดับครัวเรือนด้วยการลดปริมาณขยะอาหารและเปลี่ยนขยะอาหารเป็นแหล่งพลังงานด้วยการนำไปผลิตแก๊สชีวภาพภายใต้กระบวนการหมักไร้อากาศโดยใช้ระบบหมักแบบสองขั้นตอนต่อเนื่องกันด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอน (Upflow anaerobic sludge blanket; UASB) ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน คือ 10.54 ถึง 26.40 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของขนาดถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และ 8.10 ถึง 21.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของขนาดถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร ณ สภาวะเมโซฟิลิก (คือ สภาวะที่มีการควบคุมอุณหภูมิระบบหมักให้คงที่ที่ 37 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิ) และไม่มีการควบคุมค่าความเป็นกรดด่างโดยจะติดตามค่าความเป็นกรดด่างของระบบหมักให้อยู่ในช่วง 4.50–7.50 ด้วยการป้อนเศษอาหารที่ผ่านการหมักจากถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตรเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร ในอัตราส่วน 1:1 (Recycle ratio คือ 1:1) สำหรับประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอนจะใช้ตัวแปรประสิทธิภาพการกำจัด (COD removal efficiency) ผลได้ของแก๊สมีเทน (Methane yields) และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนแบบจำเพาะเจาะจง (Specific methane production rates) ที่แสดงถึงความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย

## วิธีดำเนินการวิจัย

### 1. การเตรียมเศษอาหาร

เศษอาหารที่ใช้ในงานวิจัยนี้รวบรวมมาจากครัวพิกุล คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ เนื่องจากครัวพิกุลจำหน่ายอาหารประเภทข้าวราดแกงเท่านั้น หลังจากรวบรวมเศษอาหารให้เพียงพอต่อการผลิตแก๊สชีวภาพแล้วทำการคัดแยกส่วนที่กินไม่ได้ออกก่อน เช่น กระดูก ก้างปลา เปลือกไข่ กระดาษชำระ และน้ำแกงออก เมื่อคัดแยกส่วนที่กินไม่ได้และน้ำออกแล้วจะเติมน้ำลงไปในอัตราส่วน 1:1 เพื่อให้ง่ายต่อการลดขนาดเศษอาหารด้วยการบดเชิงกลที่ความเร็ว 14,000 รอบต่อนาที นาน 5 นาที เก็บเศษอาหารที่ลดขนาดแล้วที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้งาน เศษอาหารมีค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) 60,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้อัตราส่วนระหว่างค่าซีโอดีและไนโตรเจนและฟอสฟอรัส (COD:N:P) คือ 100: 3.90: 5.45 ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (C:N ratio) คือ 25.08 (ตารางที่ 1) โดยอัตราส่วนดังกล่าวมีค่ามากกว่าทฤษฎีแสดงให้เห็นว่าของเสียอินทรีย์ประเภทเศษอาหารมีสารอาหารหลักชนิดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพียงพอต่อการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารอาหารเพิ่มในเศษอาหารเริ่มต้น (สารอินทรีย์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพผ่านการหมักแบบไม่ใช้แสงภายใต้สภาวะไร้อากาศต้องมีอัตราส่วน COD:N:P และอัตราส่วน C:N เท่ากับ 100: 1.0: 0.4 และ 20-30 ตามลำดับ (Rajlakshmi *et al.*, 2023 & Hussain *et al.*,

2015) มากไปกว่านั้นเศษอาหารนี้มีปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia nitrogen) หรือ $NH_4^+$-N อยู่ในระดับต่ำกว่าระดับความเป็นพิษคือต่ำกว่า 5,500 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงไม่ส่งผลเสียต่อกระบวนการผลิตและการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ (Yan *et al.*, 2022)

**ตารางที่ 1** สมบัติของสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารใช้ในงานวิจัยนี้

| คุณลักษณะ | หน่วย | ค่า |
|---|---|---|
| ค่าซีโอดี (COD) | มิลลิกรัมต่อลิตร | 60,000±95 |
| ปริมาณไนโตรเจน (Total nitrogen) | มิลลิกรัมต่อลิตร | 2,391.76±2.15 |
| Ammonium ($NH_4^+$-N) | มิลลิกรัมต่อลิตร | 98.33±7.64 |
| ปริมาณฟอสฟอรัส (Total phosphorous) | มิลลิกรัมต่อลิตร | 3,217.05±3.18 |
| ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total suspended solid; TSS) | มิลลิกรัมต่อลิตร | 226,380±152 |
| ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (Total volatile solid; TVS) | มิลลิกรัมต่อลิตร | 213,080±149 |
| ปริมาณไขมัน (Total fat) | % | 5.16±0.001 |
| ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) | - | 4.16±0.001 |
| ปริมาณกรดอินทรีย์ทั้งหมด (Total volatile fatty acid; VFA) | มิลลิกรัมต่อลิตร (as acetic acid) | 5,355.67±157.91 |
| ค่าอัลคาลินิตี้ (Alkalinity) | มิลลิกรัมต่อลิตร (as $CaCO_3$) | 2,166.67±152.75 |
| COD:N:P | - | 100 : 3.90 : 5.45 |
| C:N ratio | - | 25.08±0.003 |

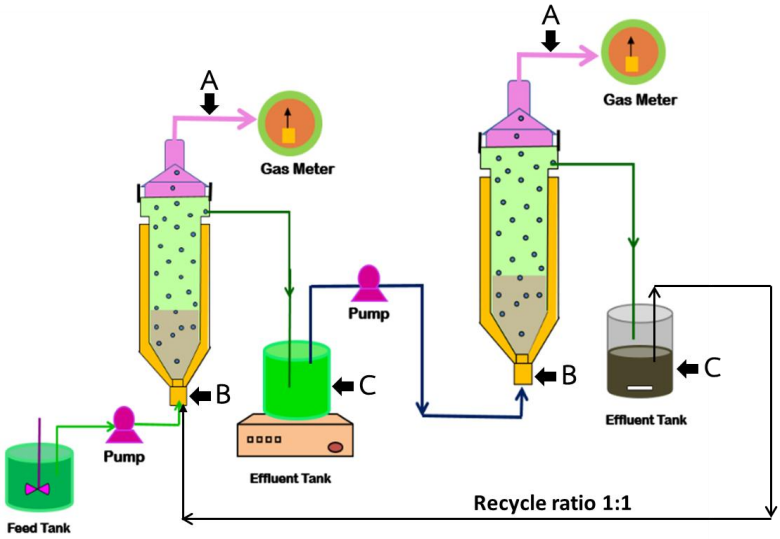
**2. การเตรียมตะกอนหัวเชื้อ**

ตะกอนหัวเชื้อที่ใช้เป็นแหล่งของเชื้อจุลินทรีย์ของงานวิจันนี้มาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังของบริษัททรัพย์ทิพย์ จำกัด จังหวัดลพบุรี ตะกอนหัวเชื้อที่ได้มีลักษณะเป็นตะกอนแบบเม็ด (Granular sludge) ตะกอนหัวเชื้อจะถูกนำมากำจัดเศษหิน ดิน และทรายออกด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 เมช จากนั้นเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้งาน สมบัติของตะกอนหัวเชื้อแสดงในรูปปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total suspended solid, TSS) และปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (Total volatile solid; TVS) โดยตะกอนหัวเชื้อเริ่มต้นมีค่า TSS และค่า TVS คือ 115,880 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 98,520 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าตะกอนหัวเชื้อนี้มีความเข้มข้นเริ่มต้น 98,520 มิลลิกรัมต่อลิตร และประกอบด้วยเชื้อจุลินทรีย์หลายชนิดเรียกว่า เชื้อจุลินทรีย์ผสม (Mixed culture) ที่อยู่ในกลุ่ม Facultative anaerobe คือ สามารถเติบโตได้ในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจนจึงทำให้ตะกอนหัวเชื้อนี้เป็นแหล่งของเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะต่อการนำไปใช้เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารที่จัดอยู่ในกลุ่มของเสียอินทรีย์ (Organic waste) โดยไม่ต้องควบคุมระบบของกระบวนการผลิตให้อยู่ในสภาวะปลอดเชื้อได้

**3. การติดตั้งถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอน (Two-stage Upflow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)**

ถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอนของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ 2 ถังที่มีปริมาตรทำงาน 5 ลิตร และ 16 ลิตร (ภาพที่ 1) โดยถังปฏิกรณ์ทำมาจากพลาสติกชนิดพอลิเอทิลีนชนิดทึบแสง (Polyethylene; PE) เพื่อช่วยป้องกันแสง เนื่องจากไม่ต้องการแหล่งพลังงานแสงในการผลิตและแสงถือเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ที่ลดลง การทำงานของถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอนจะเริ่มจากการป้อนเศษอาหารเข้าทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร ณ อัตราการไหลหนึ่ง ๆ ที่ระยะเวลาสารอินทรีย์ที่อยู่ในระบบหมัก (HRT) แตกต่างกันอย่างต่อเนื่อง (ตารางที่ 2) จากนั้นเศษอาหารที่ผ่านการย่อยสลายหรือผ่านการหมักจากถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร จะล้นออกทางด้านบนและจะถูกป้อนเข้าทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร ที่อัตราการไหลหนึ่ง ๆ ณ ระยะเวลาสารอินทรีย์ที่อยู่ในระบบหมักแตกต่างกันอย่างต่อเนื่องเช่นกัน (ตารางที่ 2) ระบบหมักจะไม่ควบคุมค่าความเป็นกรดด่างและจะดำเนินจนถึงสภาวะคงตัวเป็นระยะเวลา 4-6 สัปดาห์ (Steady state) ก่อนนำเศษอาหารที่ผ่านการหมักมาวิเคราะห์สมบัติต่าง ๆ (สภาวะคงตัวคือ สภาวะที่ค่าซีโอดีของเศษอาหารที่ผ่านการหมักและอัตราการเกิดแก๊สคงที่หรือมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป)

สำหรับการเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์นั้นจะแบ่งออกเป็นตัวอย่างแก๊ส (Gas product) และตัวอย่างของเหลว (Liquid product) โดยตัวอย่างแก๊ส ณ ตำแหน่ง A จะถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สที่ผลิตได้ ส่วนตัวอย่างของเหลวแสดงถึงเศษอาหารที่อยู่ในระบบหมักและเศษอาหารที่ผ่านการหมัก เศษอาหารที่อยู่ในระบบหมักคือเศษอาหารที่อยู่บริเวณด้านล่างของถังปฏิกรณ์ ณ ตำแหน่ง B จะถูกนำไปวิเคราะห์ปริมาณเศษอาหารที่สะสมในระบบ (Accumulated of food waste) และความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ (Bacteria concentration) ดังแสดงในภาพที่ 1 ในขณะที่เศษอาหารที่ผ่านการหมักเป็นเศษอาหารที่ล้นออกทางด้านบนของถังปฏิกรณ์ ณ ตำแหน่ง C (ภาพที่ 1) จะถูกนำไปวิเคราะห์ค่าซีโอดี (COD) ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ปริมาณกรดอินทรีย์ทั้งหมด (Total volatile fatty acid, VFA) องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ (VFA composition) ปริมาณไนโตรเจน (Total nitrogen) ปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจน ($NH_4^+$-N) ปริมาณฟอสฟอรัส (Total phosphorous)




**ภาพที่ 1** ภาพจำลองถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอน (ที่มา: ผู้วิจัย)

**ตารางที่ 2** ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่คำนวณจากขนาดของถังปฏิกรณ์แต่ละถังและขนาดถังปฏิกรณ์รวม

| ปริมาตรถังปฏิกรณ์ (ลิตร) | ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Kg/$m^3$d) | อัตราการป้อนx$10^{-5}$ ($m^3$/h) | เวลาของสารอินทรีย์ที่อยู่ในระบบ (HRT) (วัน) |
|---|---|---|---|
| 5 | 10.54 | 3.66 | 5.69 |
| | 15.72 | 5.46 | 3.81 |
| | 21.07 | 7.29 | 2.85 |
| | 26.40 | 9.17 | 2.27 |
| 16 | 8.10 | 12.54 | 7.41 |
| | 13.50 | 22.88 | 4.40 |
| | 18.90 | 36.34 | 3.17 |
| | 21.60 | 26.25 | 2.77 |
| 21 (ปริมาตรถังปฏิกรณ์รวม) | 1.54 | 2.25 | 23.92 |
| | 2.30 | 3.35 | 16.03 |
| | 3.09 | 4.51 | 12.00 |
| | 3.51 | 5.12 | 9.55 |

**4. การบันทึกผลและการวิเคราะห์ผล**

การวิเคราะห์ผลจะแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะดังนี้ การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สและการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว โดยการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊สนั้นดำเนินการโดยการติดตามปริมาตรแก๊สที่ผลิตได้ (Gas production rate) จากเครื่องนับแก๊ส (Gas counter) ที่ใช้หลักการของการแทนที่น้ำ ส่วนองค์ประกอบของแก๊สที่ผลิตได้จะวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทรกราฟี (GC-2014, Shimadzu, Japan) ที่มีเครื่องตรวจวัดชนิด Thermal conductivity (TCD) โดยชนิดของคอลัมน์และสภาวะที่ใช้ได้รายงานไว้ในงานวิจัยก่อนหน้า (Srisuwanno *et al*., 2023) สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพของงานวิจัยนี้จะแสดงในรูปของผลได้ของแก๊สมีเทน (Methane yield) และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนแบบจำเพาะเจาะจง (Specific methane production rate, SMPR) ส่วนผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวคือ เศษอาหารที่ผ่านการหมัก ณ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันถูกนำไปวิเคราะห์หาปริมาณกรดอินทรีย์ทั้งหมดและองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ด้วยเครื่องโครมาโทรกราฟีสมรรถนะสูง (HPLC; Shimadzu, LC-20A, Japan) ที่ใช้ตัวตรวจวัดชนิด Refractive index detector (RID; Shimadzu, RID-20A, Japan) และคอลัมน์ชนิด Aminex HPX-87H (Bio-Rad Laboratories, USA) (Srisuwanno *et al*., 2023) นอกจากนี้ เศษอาหารที่ผ่านการหมักยังถูกนำไปวิเคราะห์ค่าซีโอดีเพื่อใช้เป็นตัวแปรในการหาประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD removal) ด้วยวิธีไดโครเมตและเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (HACH, DR 2700) รวมถึงวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนที่เหลืออยู่ในระบบ (Total nitrogen removal) โดยการย่อยด้วย TNT Persulfate และปริมาณฟอสฟอรัสที่เหลืออยู่ในระบบ (Total phosphorous removal) โดยอาศัยกระบวนการ Molybdo Vanadate ด้วย Acid Persulfate Digestion (Hach Company) (Srisuwanno *et al*., 2023) ส่วนความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบหมักและปริมาณเศษอาหารที่สะสมในระบบจะวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน (Eaton *et al*., 2005) โดยใช้ตู้อบลมร้อนและเตาเผาอุณหภูมิสูง (Carborite20-902179; Parsons Lane) สำหรับค่าความเป็นกรดด่าง (pH) วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดความเป็นกรดด่าง และองค์ประกอบของไขมันที่พบในสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเริ่มต้นและที่ผ่านการหมักทำการวิเคราะห์ด้วยการสกัดด้วยใช้ตัวทำละลายชนิดไดคลอโรมีเทนในอัตราส่วนสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหาร 1.00 กรัม ต่อสารละลายไดคลอโรมีเทน 20.00 มิลลิลิตร

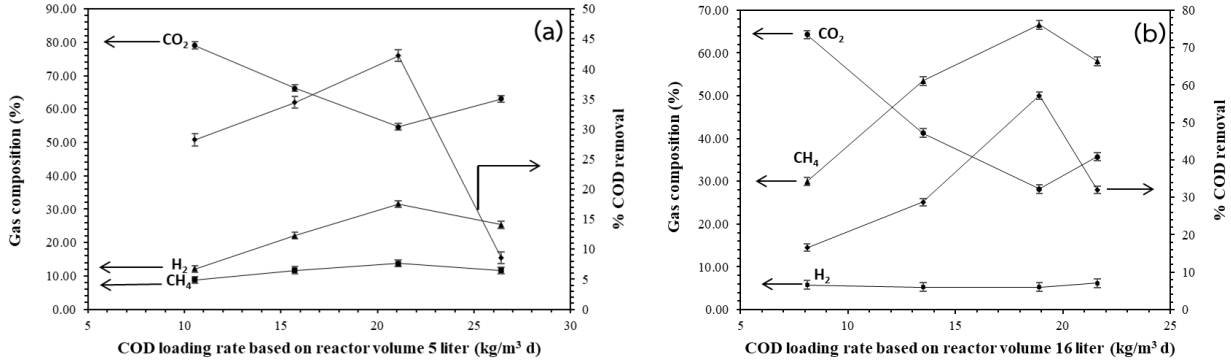
**ผลการวิจัย**

**1. ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD removal) และองค์ประกอบแก๊ส (Gas composition)**

ภาพที่ 2 แสดงถึงผลของประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และอัตราการเกิดแก๊สที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ทั้งหมด 4 ช่วงคือ ช่วง 10.54 ถึง 26.40 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และในช่วง 8.10 ถึง 21.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร (ตารางที่ 2) จากภาพที่ 2 พบว่า ภายใต้สภาวะภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (COD loading rate) 3 ช่วงแรกของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และ 16 ลิตร คือ ตั้งแต่ 10.54 ถึง 21.07 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และ 8.10 ถึง 18.90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าซีโอดีขาออก ($COD_{out}$) ที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่าซีโอดีขาเข้า ($COD_{in}$) ของแต่ละภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (ตารางที่ 3) อย่างไรก็ตามที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มากกว่า 21.07 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร (คือที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 26.40 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน) และที่มากกว่า 18.90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร (คือที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 21.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน) ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลงสัมพันธ์กับค่าซีโอดีขาออก ($COD_{out}$) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับและค่าซีโอดีขาออกของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ก่อนหน้า (ตารางที่ 3) อีกทั้งประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่พบในปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร สูงกว่าประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่พบในถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร

สำหรับองค์ประกอบหลักของแก๊สที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้คือ แก๊สมีเทน ($CH_4$) แก๊สไฮโดรเจน ($H_2$) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบแก๊สที่เกิดขึ้นจะเห็นว่าแก๊สมีเทนที่ผลิตได้ในถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร มีปริมาณมากกว่าถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร ซึ่งแตกต่างจากสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนที่มีปริมาณน้อยกว่าถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร (ภาพที่ 2) และแนวโน้มของสัดส่วนแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรเจนของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 และ 16 ลิตร ให้ผลเช่นเดียวกับประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์คือมีค่าเพิ่มขึ้นใน 3 ช่วงแรกของภาระบรรทุกสารอินทรีย์และมีค่าลดลงที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุด (ภาพที่ 2) โดยสัดส่วนของแก๊สมีเทนที่มากที่สุด (คือ ร้อยละ 13.71 และ 66.59 โดยปริมาตร คิดเป็นอัตรา

การเกิดแก๊สมีเทน 3.21 และ 26.01 มิลลิลิตรต่อวัน) จะพบที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 21.07 และ 18.90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 และ 16 ลิตร ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มากที่สุด (ร้อยละ 42.32 และ 57.21 ของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 และ 16 ลิตร ตามลำดับ) สำหรับองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่พบในถังปฏิกรณ์ขนาด 5 และ 16 ลิตร มีแนวโน้มตรงกันข้ามกับสัดส่วนของแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรเจน (ภาพที่ 2)




**ภาพที่ 2** ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD removal) และสัดส่วนของแต่ละองค์ประกอบแก๊ส (Gas composition) ที่พบใน (a) ถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และใน (b) ถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร เมื่อระบบทำงานที่สภาวะเมโซฟิลิกโดยไม่มีการควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง

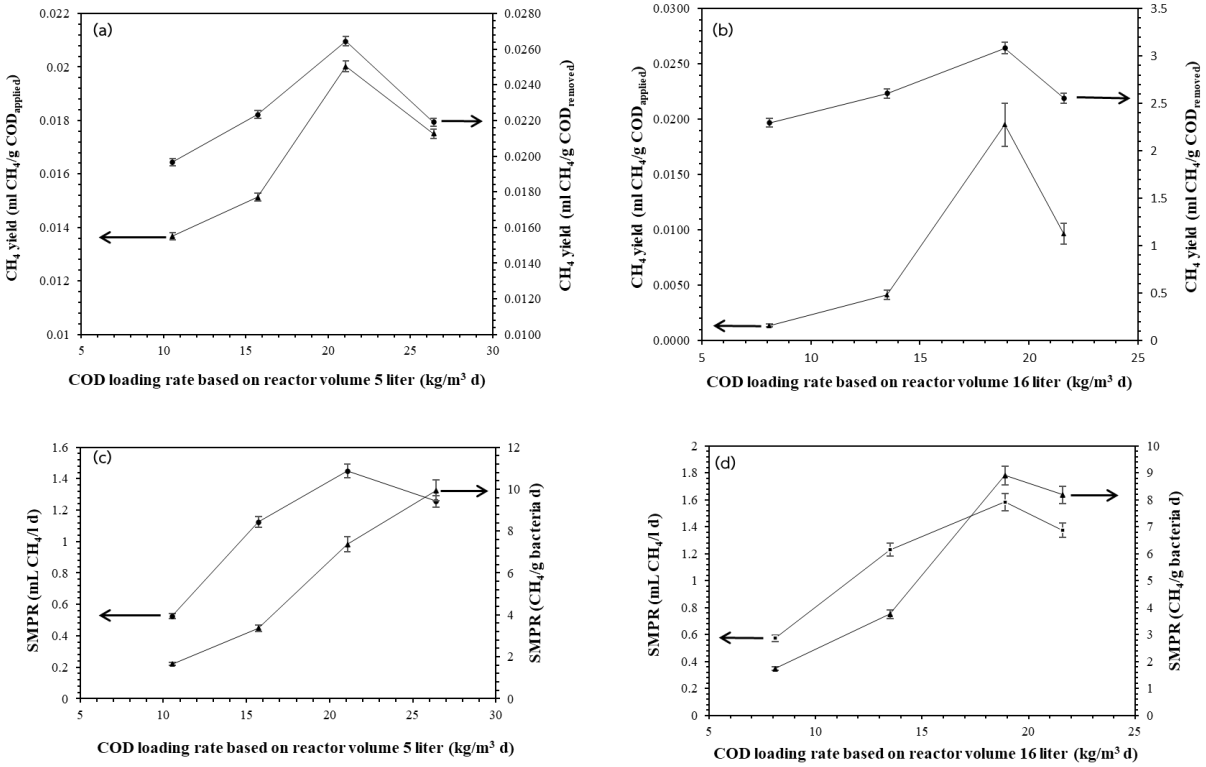
**ตารางที่ 3** ค่าซีโอดี อัตราการผลิตแก๊ส และค่าความเป็นกรดด่างของแต่ละสภาวะภาระบรรทุกสารอินทรีย์

| ปริมาตรถังปฏิกรณ์ (ลิตร) | ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ($kg/m^3d$) | ค่าซีโอดี ($kg/m^3$) | | ประสิทธิภาพการย่อยสลาย (%) | อัตราการเกิดแก๊ส (ml/d) | | ค่าความเป็นกรดด่าง |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ขาเข้า | ขาออก | | มีเทน | ไฮโดรเจน | |
| 5 | 10.54 | 60.00 | 43.07 | 28.22 | 2.79 | 3.82 | 4.27 |
| | 15.72 | 60.00 | 39.33 | 34.45 | 3.00 | 5.65 | 4.43 |
| | 21.07 | 60.00 | 34.67 | 42.21 | 3.26 | 7.51 | 4.80 |
| | 26.40 | 60.00 | 54.86 | 8.56 | 2.78 | 6.02 | 4.19 |
| 16 | 8.10 | 43.07 | 35.94 | 16.56 | 9.32 | 1.80 | 5.32 |
| | 13.50 | 39.33 | 28.04 | 28.71 | 19.45 | 1.92 | 6.18 |
| | 18.90 | 34.67 | 14.84 | 57.21 | 26.01 | 2.05 | 7.11 |
| | 21.60 | 54.86 | 37.29 | 32.03 | 21.12 | 2.25 | 5.43 |

**2. ผลได้ของแก๊สมีเทน (Methane yield) และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนแบบจำเพาะเจาะจง (Specific methane production rate, SMPR)**

ผลได้ของแก๊สมีเทนแสดงถึงคุณลักษณะเบื้องต้นของสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ ในขณะที่อัตราการเกิดแก๊สมีเทนแบบจำเพาะเจาะจงนั้นจะแสดงถึงความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส จากภาพที่ 3 พบว่าผลได้ของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนแบบจำเพาะเจาะจงของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 และ 16 ลิตร มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นใน 3 ช่วงแรกและมีค่าลดลงที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูงที่สุดคือ 26.40 และ 21.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 และ 16 ลิตร ตามลำดับ ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับผลของประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และองค์ประกอบแก๊ส ผลได้ของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนแบบจำเพาะเจาะจงที่มากที่สุดพบที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 21.07 และ 18.90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 และ 16 ลิตร ตามลำดับ สัมพันธ์กับอัตราการเกิดแก๊สมีเทนและประสิทธิภาพการย่อยสลาย

สารอินทรีย์ที่มากที่สุด (ภาพที่ 2) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 21.07 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตรและภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 18.90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอนภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกที่มีการติดตามค่าความเป็นกรดด่างให้อยู่ในช่วง 4.50–7.50 ของงานวิจัยนี้



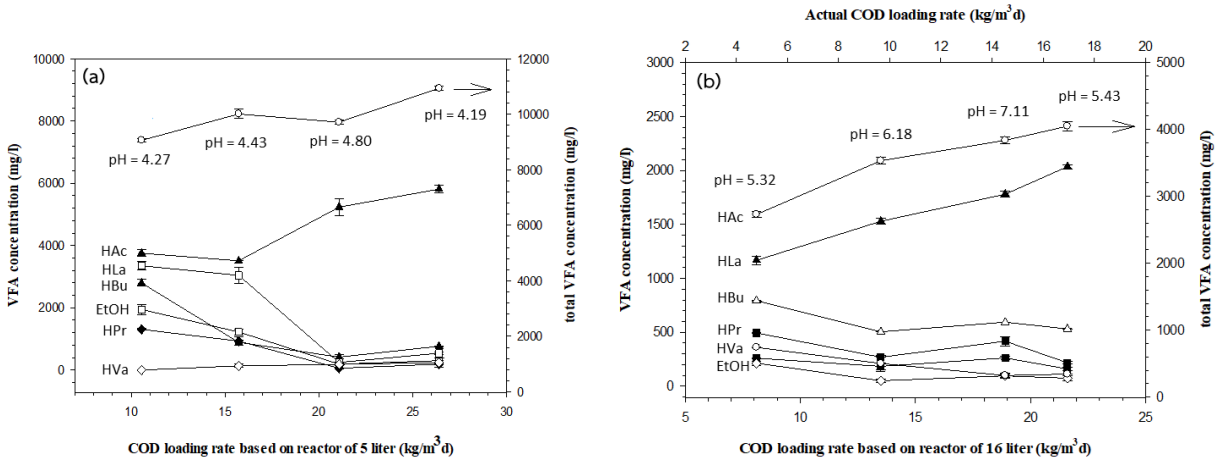

**ภาพที่ 3** ผลได้ของแก๊สมีเทน (Methane yield) ที่พบใน (a) ถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และใน (b) ถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนแบบจำเพาะเจาะจง (Specific methane production rate, SMPR) ที่พบใน (c) ถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และใน (d) ถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร เมื่อระบบทำงานที่สภาวะเมโซฟิลิกโดยไม่มีการควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง

**3. ปริมาณกรดอินทรีย์ทั้งหมด (Total volatile fatty acid, VFA) และองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ (VFA composition)**

ปริมาณกรดอินทรีย์ทั้งหมดและองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ที่พบในถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และขนาด 16 ลิตร แสดงดังภาพที่ 4 ปริมาณกรดอินทรีย์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตลอดทั้ง 4 ช่วงของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น และปริมาณกรดอินทรีย์ทั้งหมดที่พบในถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร สูงกว่าที่พบในถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร ส่งผลให้ค่าความเป็นกรดด่างของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร ต่ำกว่าและส่งเสริมการเกิดการผลิตแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงกว่าถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร (ภาพที่ 2) ในขณะที่ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร ในรูปของอัตราการเกิดแก๊สมีเทน ผลได้ของแก๊สมีเทน และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนแบบจำเพาะเจาะจงสูงกว่าของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร อย่างมีนัยสำคัญ (ภาพที่ 2-3) จากภาพที่ 4 พบว่า ปริมาณกรดอินทรีย์ทั้งหมดที่มากที่สุดคือ 11,000 และ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะพบที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุดคือ 26.40 และ 21.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 และ 16 ลิตร ตามลำดับ และที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุดนี้ระบบมีประสิทธิภาพการผลิตที่ลดลงอย่างชัดเจนรวมถึงการลดลงของประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (% COD loading rate) (ภาพที่ 2) สำหรับองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ที่พบในกรดอินทรีย์ทั้งหมดที่เกิดขึ้น ได้แก่ กรดอะซิติก (HAc) กรดโพรพิโอนิก (HPr) กรดบิวทิริก (HBu) กรดวาเลริก (HVa) กรดแลคติก (HLa) และเอทานอล (EtOH) และในงานวิจัยนี้พบปริมาณของกรดอะซิติก

มากที่สุดซึ่งจะสัมพันธ์กับการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนผ่านกระบวนการอะซิโตคลาสสิก (Acetoclastic) (Qian *et al.*, 2025) (ภาพที่ 3) สำหรับองค์ประกอบของเอทานอลที่เกิดขึ้นจะแสดงถึงการเกิดแก๊สไฮโดรเจน (สมการที่ 1) โดยเอทานอลที่พบในปริมาณมากบ่งบอกถึงการเกิดแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณมากซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตรที่สูงกว่าถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร (ภาพที่ 2) (Qian *et al.*, 2025)

$$C_6H_{12}O_6 + H_2O \longrightarrow \underset{\text{เอทานอล}}{C_2H_5OH} + CH_3COOH + 2H_2 + 2CO_2 \quad (1)$$



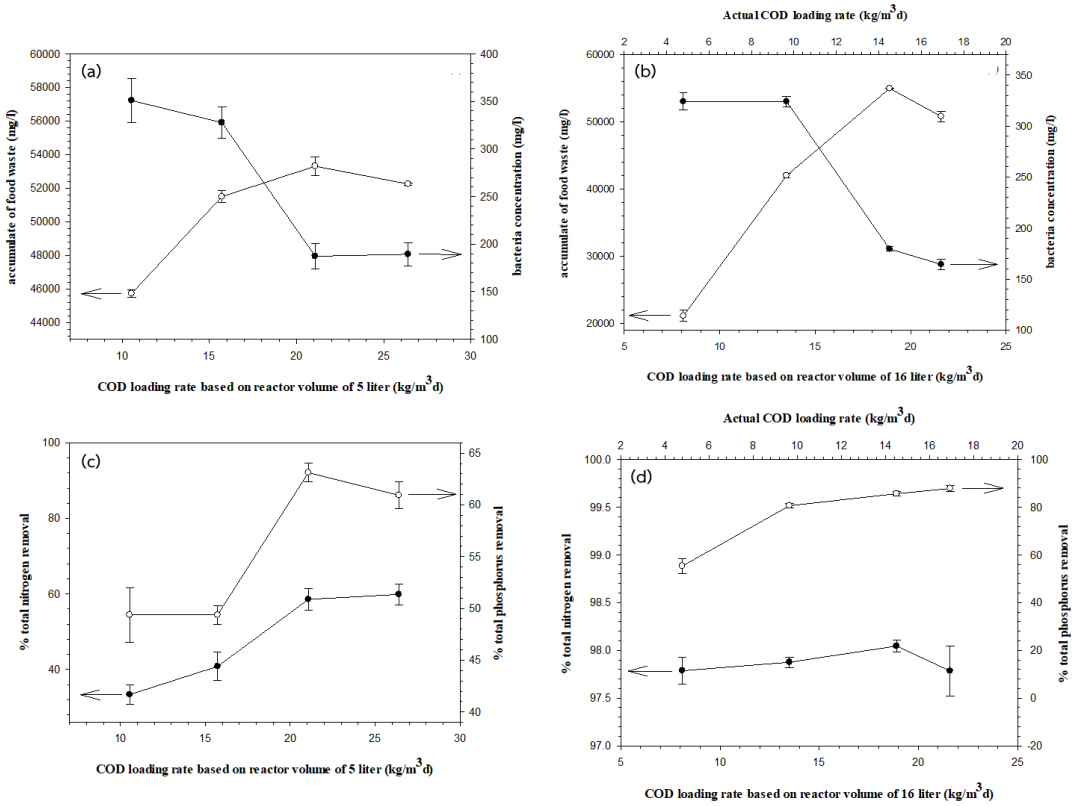

**ภาพที่ 4** ปริมาณกรดอินทรีย์ทั้งหมด (Total volatile fatty acid , VFA) และองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ (VFA composition) ที่พบใน (a) ถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และใน (b) ถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร เมื่อระบบทำงานที่สภาวะเมโซฟิลิกโดยไม่มีการควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง

**4. ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ (Bacteria concentration) และปริมาณเศษอาหารที่สะสมในระบบ (Accumulated of food waste)**

ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบและปริมาณเศษอาหารที่สะสมในระบบแสดงดังภาพที่ 5a-b จากภาพที่ 5a-b พบว่า เมื่อภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 10.54 ถึง 21.07 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ภาพที่ 5a) และจาก 8.10 ถึง 19.80 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ภาพที่ 5b) ปริมาณเศษอาหารที่สะสมอยู่ในระบบเพิ่มสูงขึ้นในขณะที่ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามในช่วงภาระบรรทุกสารอินทรีย์ดังกล่าวการผลิตแก๊สชีวภาพมีประสิทธิภาพดีขึ้น (ภาพที่ 2-3)

**5. ระบบรวม (Overall performance)**

ระบบรวมคือการพิจารณาระบบหมักแบบสองขั้นตอนที่มีถังปฏิกรณ์สองใบ (คือ ถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตรและ 16 ลิตร) เป็นระบบหมักแบบขั้นตอนเดียวที่มีถังปฏิกรณ์หนึ่งใบ (คือ ถังปฏิกรณ์ขนาด 21 ลิตร) โดยระบบรวมจะมีการป้อนเศษอาหารเข้าทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และถูกระบายออกทางด้านบนของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร จากการพิจารณาระบบรวมแล้วพบว่า ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมคือ 3.09 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรของถังปฏิกรณ์รวม (คือ 21 ลิตร) ต่อวัน ระบบสามารถผลิตแก๊สชีวภาพที่มีองค์ประกอบของแก๊สเชื้อเพลิง คือ แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนในอัตราส่วน 1:6




**ภาพที่ 5** ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์และปริมาณเศษอาหารที่สะสมในระบบที่พบใน (a) ถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และใน (b) ถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร และปริมาณการใช้ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของเชื้อจุลินทรีย์ของ (c) ถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และของ (d) ถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร เมื่อระบบทำงานที่สภาวะเมโซฟิลิกโดยไม่มีการควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง

**อภิปรายผลการวิจัย**

การผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอนภายใต้ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ทั้งหมด 4 ช่วงของงานวิจัยนี้พบว่า เมื่อเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์ใน 3 ช่วงแรกของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 และ 16 ลิตร ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจะเพิ่มขึ้นแสดงในรูปของผลได้ของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนแบบจำเพาะเจาะจงที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 3) รวมถึงสัดส่วนของเกิดแก๊สมีเทนที่มากขึ้น (ภาพที่ 2) ซึ่งสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD removal) ที่สูงขึ้น (ภาพที่ 2) อย่างไรก็ตามที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มากเกินไปคือ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูงที่สุดที่ 26.40 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และที่ 21.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญสอดคล้องกับประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ลดลง (ภาพที่ 2-3) (Qian *et al.*, 2025) การเพิ่มภาระบรรทุกสารอินทรีย์เป็นการเพิ่มปริมาณเศษอาหารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ดังนั้น ในช่วงภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำ (คือ 3 ช่วงแรก) เป็นภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มีเศษอาหารป้อนเข้าสู่ระบบในปริมาณที่เพียงพอต่อเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายเพื่อการเติบโต อีกทั้งยังเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสารโมเลกุลใหญ่จำพวกคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันในเศษอาหารให้เป็นสารโมเลกุลเล็กจำพวกน้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันที่จะถูกเปลี่ยนเป็นสารตัวกลาง (Intermediate product) อย่างต่อเนื่องคือ กรดอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็ก และกรดอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กนี้จะถูกเชื้อจุลินทรีย์ย่อยสลายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สต่อไป (Wang *et al.*, 2023 & Chorukova *et al.*, 2020) ในทางตรงกันข้ามที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มากเกินไปเศษอาหารที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีปริมาณมากเกินจนเชื้อจุลินทรีย์ย่อยสลายได้ไม่หมดและเกิดการตกจมบริเวณด้านล่างของถังปฏิกรณ์ทำให้โอกาสของการสัมผัสกันระหว่างเชื้อจุลินทรีย์กับเศษอาหารลดต่ำลง ส่งผลให้อัตราการย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ถูกยับยั้ง (Intanoo & Tankam, 2017) สำหรับเศษอาหารที่ถูกย่อยสลายไปเป็นกรดอินทรีย์แล้วนั้นอาจพบว่ามีกรดอินทรีย์บางส่วนไม่ถูกเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส ซึ่งมีสาเหตุมาจากประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์เพื่อย่อยกรด

ลดต่ำลง (Jariyaboon *et al.*, 2015) จนกรดถูกสะสมในระบบและเกิดเป็นภาวะกรดที่ไม่เหมาะสมและเป็นพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์ชนิดไม่สร้างสปอร์ (Non spore-forming bacteria) (Zhang *et al.*, 2022 & Seneesrisakul *et al.*, 2024) โดยในงานวิจัยนี้พบภาวะกรดดังกล่าวที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มากที่สุด (Shock-load treatment) คือ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 26.40 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของขนาดถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และ 21.60 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของขนาดถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร ภาวะกรด ณ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มากที่สุดนี้ระบบมีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ต่ำที่สุด (ภาพที่ 4) ดังนั้นค่าความเป็นกรดด่างของระบบที่ต่ำที่สุดจึงแสดงถึงปริมาณกรดอินทรีย์ที่มากที่สุด ณ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูงที่สุดคือ 11,000 และ 4,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจัดเป็นระดับของปริมาณกรดอินทรีย์ที่เป็นพิษที่จะไปยับยั้งการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดไม่สร้างสปอร์ไม่ให้สามารถดำรงอยู่ได้ (Seneesrisakul *et al.*, 2024) เป็นผลให้ประสิทธิภาพการย่อยกรดของเชื้อจุลินทรีย์ลดลงและนำไปสู่ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพลดลงด้วยนั่นเอง สำหรับองค์ประกอบแก๊สที่ผลิตได้ในถังปฏิกรณ์ขนาด 5 และ 16 ลิตรจะเห็นว่าพบทั้งแก๊สเทนและแก๊สไฮโดรเจน โดยถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร ให้สัดส่วนของแก๊สมีเทนต่ำกว่าถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร คิดเป็นร้อยละโดยเฉลี่ย 82.24 โดยปริมาตร เนื่องจากประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ที่มีหน้าที่ย่อยกรดนั้นเป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่สามารถสร้างสปอร์ (Nonspore-forming bacteria) และมีความไวต่อค่าความเป็นกรดด่างสูง ดังนั้นเมื่อค่าความเป็นกรดด่างของระบบอยู่ในภาวะความเป็นกรดสูงจะส่งผลโดยตรงต่อการย่อยสลายกรดเพื่อเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทนที่ไม่สมบูรณ์เป็นสาเหตุให้การผลิตแก๊สมีเทนต่ำ ซึ่งตรงกันข้ามกับเชื้อจุลินทรีย์ชนิดสร้างไฮโดรเจน (Hydrogen-producing bacteria) ที่จัดอยู่ในกลุ่มเชื้อจุลินทรีย์สร้างสปอร์ (Spore-forming bacteria) และสามารถทนสภาวะที่มีความเป็นกรดสูงได้ จึงทำให้พบแก๊สไฮโดรเจนในถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร ในปริมาณมากกว่าถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร (ภาพที่ 2) เพราะภาวะของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร อยู่ในภาวะความเป็นกรดสูงซึ่งเชื้อจุลินทรีย์ชนิดสร้างไฮโดรเจนสามารถสร้างเกราะ (Shell) ที่จะใช้ปกป้องเซลล์ภายในจากภาวะที่เป็นอันตรายต่อเซลล์เพื่อดำรงอยู่และจะเติบโตเป็นเซลล์ที่มีชีวิตตามปกติได้เมื่ออยู่ในภาวะที่เหมาะสมต่อและทำหน้าที่เปลี่ยนกรดและเอทานอลเป็นแก๊สไฮโดรเจนนั่นเอง (ค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อการเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดสร้างไฮโดรเจนคือ ช่วง 4.00-5.00 (Moussa *et al.*, 2022)

จากผลการศึกษาที่พบว่าถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่สูงกว่าถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร คิดเป็นร้อยละ 26.74 และ 71.43 ตามลำดับนั้น เป็นผลมาจากภาวะของระบบหรือค่าความเป็นกรดด่างของระบบหมักซึ่งในถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตรจะมีภาวะความเป็นกรดต่ำกว่า ค่าความเป็นกรดด่างจะมีอิทธิพลต่อการเติบโตและประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ โดยค่าความเป็นกรดด่างที่ต่ำกว่า 6.00 (เรียกว่าภาวะกรด หรือ Acidic system) แสดงถึงภาวะที่เริ่มเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบทำให้การผลิตแก๊สมีเทนลดต่ำลงในขณะที่การผลิตแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในรูป 2a ของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตรที่มีค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วง 4.00-5.00 (Moussa *et al.*, 2022) ส่วนค่าความเป็นกรดด่างในช่วง 6.80-7.50 (Neutral system) เป็นภาวะที่เชื้อจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนที่จัดอยู่ในกลุ่มไม่สร้างสปอร์สามารถดำรงอยู่เพื่อเปลี่ยนกรดอะซิติกและแก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สมีเทนได้ค่อนข้างสมบูรณ์ อีกทั้งยังสามารถอธิบายได้ว่า การผลิตแก๊สมีเทนของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร ส่วนใหญ่เกิดผ่านกระบวนการอะซิโตคลาสสิก (Acetoclastic) เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร มาจากสารอินทรีย์ที่ผ่านการหมักมาแล้วจากถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร ซึ่งสารอินทรีย์ที่ผ่านการหมักดังกล่าวส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กโครงสร้างไม่ซับซ้อนจำพวกกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก กรดแลคติก และกรดวาเลลิก ซึ่งย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ได้ง่ายกว่าสารโมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างซับซ้อนจึงทำให้การผลิตแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายกรดอินทรีย์มีประสิทธิภาพสูงกว่าการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่นั่นเอง (Meng *et al.*, 2015) ส่วนการผลิตแก๊สมีเทนของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร นั้นอาจเกิดผ่านกระบวนการไฮโดรจิโนโทรปิก (Hydrogenotrophic) (Mani *et al.*, 2016) เพราะในถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร พบองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณมากกว่าถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร คิดเป็นร้อยละ 65.13 โดยปริมาตร (อัตราการเกิดแก๊สไฮโดรเจนของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร โดยเฉลี่ยคือ 5.75 มิลลิลิตรต่อวัน) (ภาพที่ 2) และยังพบว่า ในถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตรมีปริมาณกรดอินทรีย์สูงกว่า (ภาพที่ 4) แสดงให้เห็นว่ากรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร ไม่ได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สทั้งหมดและยังเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร เมื่อสารที่ผ่านการหมักจากถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร ถูกป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร แล้วจะเห็นได้ว่าค่าความเป็นกรดด่างของระบบเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มขึ้นของค่าความเป็นกรดด่างบ่งบอกถึงการลดภาวะความเป็นกรดลงและระบบจะเริ่มเข้าสู่ภาวะกลาง (Neutral system) จนทำให้เชื้อจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนเริ่มเติบโตขึ้นเพื่อทำหน้าที่

ย่อยกรดเป็นแก๊สต่อไป จากองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ทั้งหมดที่พบคือ กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก กรดแลคติก และกรดวาเลลิก จะเห็นว่ากรดอะซิติกพบในปริมาณมากที่สุดซึ่งสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Qian *et al*. (2025) และ Ferdes *et al.* (2022) ที่แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากของเสียอินทรีย์นั้นจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของกรดอะซิติกที่พบในกรดอินทรีย์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบกล่าวคือ ระบบที่พบองค์ประกอบของกรดอะซิติกในปริมาณมากส่งผลทำให้ระบบนั้นมีศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพผ่านกระบวนการอะซิโตคลาสสิก (Acetoclastic methanogenic pathway) สูง (Intanoo *et al.* (2016)

จากคุณลักษณะของเศษอาหารจะเห็นว่าเศษอาหารที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่กลุ่มคาร์โบไฮเดรต กลุ่มโปรตีน และกลุ่มไขมัน โดยมีปริมาณสารอินทรีย์กลุ่มคาร์โบไฮเดรตสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 81.05 โดยน้ำหนัก และสารอินทรีย์กลุ่มคาร์โบไฮเดรตมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยเชื้อจุลินทรีย์ (Hydrolysis rate) ได้ดีกว่าสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีนและสารอินทรีย์กลุ่มไขมัน ตามลำดับ (Qian *et al.*, 2025) ส่งผลให้แก๊สมีเทนที่ผลิตได้ในงานวิจัยส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์กลุ่มคาร์โบไฮเดรตในเศษอาหารและไม่พบองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ($H_2S$) ในแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ (องค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีน) ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอนของงานวิจัยนี้คือที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 21.07 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และ 18.90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร หรือที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 3.09 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์รวมเมื่อคิดเทียบกับขนาดถังปฏิกรณ์รวม 21 ลิตร ส่วนการลดลงของประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพในรูปของสัดส่วนแก๊สมีเทน ผลที่ได้ของแก๊สมีเทน และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนแบบจำเพาะเจาะจงที่ลดลง ณ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุด (ภาพที่ 2-3) มีสาเหตุมาจากการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนที่ลดลงเนื่องจากการย่อยสลายกรดให้เป็นแก๊สไม่สมบูรณ์ทำให้กรดเกิดการสะสมจนทำให้ระบบตกอยู่ในภาวะความเป็นกรด (Acid crash) คือ ภาวะที่ระบบเสียสมดุลและการผลิตมีเทนเริ่มลดลงอย่างรุนแรง โดยภาวะความเป็นกรดของระบบที่ศึกษานี้จะแสดงในรูปค่าความเป็นกรดด่าง 4.19 ของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และ 5.43 ของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร (ภาพที่ 3-4) ซึ่งค่าความเป็นกรดด่างดังกล่าวส่งผลเสียต่อสภาพแวดล้อมที่อยู่อาศัยของเชื้อจุลินทรีย์โดยเฉพาะเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มไม่สร้างสปอร์ คือ เชื้อจุลินทรีย์ที่เมื่อเติบโตขึ้นแล้วจะไม่สามารถทนต่อสภาวะที่รุนแรงได้ เช่น สภาวะที่ความเป็นกรดสูงและสภาวะที่มีความร้อนสูง เป็นต้น (Dalkılıc & Ugurlu, 2015) และภาวะความเป็นกรดของระบบที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่มาจากกรดชนิดที่แตกตัวได้ยากหรือไม่สามารถแตกตัวได้ (Association acid) สอดคล้องกับองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ที่พบส่วนใหญ่เป็นกรดอ่อนที่แตกตัวยากและมีค่าคงที่การแตกตัวต่ำ เช่น ค่าคงที่การแตกตัวของกรดอะซิติก ($K_a$) คือ $1.8x10^{-5}$ เป็นต้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าสภาวะความเป็นกรดของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร จะสูงกว่าสภาวะความเป็นกรดของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร (ภาพที่ 4) แต่ระบบหมักของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร ยังคงดำเนินต่อไปคือเชื้อจุลินทรีย์ยังคงย่อยสลายสารอินทรีย์และเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้นั้นสามารถอธิบายได้ว่าการผลิตแก๊สมีเทนของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้ (สมการที่ 2) ในขณะที่การผลิตแก๊สมีเทนของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร เกิดจากการแตกตัวของกรดอะซิติกดังแสดงในสมการที่ 3 โดยกรดอะซิติกที่ได้มานั้นเกิดจากการแตกตัวของกรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก กรดวาเลลิก และกรดแลคติกดังแสดงในสมการ 4-7

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \quad \Delta G^\circ = -135\ KJ \quad (2)$$
แก๊สไฮโดรเจน — แก๊สมีเทน

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2 \quad \Delta G^\circ = -31\ KJ \quad (3)$$
กรดอะซิติก

$$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + 3H_2 + CO_2 \quad \Delta G^\circ = 76.2\ KJ \quad (4)$$
กรดโพรพิโอนิก

$$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 2H_2 \quad \Delta G^\circ = 48.4\ KJ \quad (5)$$
กรดบิวทิริก

$$CH_3(CH_2)_3COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + 2H_2 + CH_3CH_2COOH \quad \Delta G^\circ = -48.0\ KJ \quad (6)$$
กรดวาเลลิก

$$CH_3CH_2OCOOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2O \quad \Delta G^\circ = -4.2\ KJ \quad (7)$$
กรดแลคติก

ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพที่เพิ่มสูงขึ้นตามภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นของงานวิจัยนี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับปัจจัยของปริมาณเศษอาหารที่เพียงพอต่อเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายและชนิดของสารอินทรีย์แล้วยังขึ้นอยู่กับปริมาณและการทำงานเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบด้วย โดยปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในระบบมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ใน 3 ช่วงแรกคือ 10.54 ถึง 21.07 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร (ภาพที่ 5a) และ 8.10 ถึง 18.90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร (ภาพที่ 5b) ในขณะที่ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น ณ ช่วงภาระบรรทุกสารอินทรีย์ดังกล่าว แสดงให้เห็นว่าภาวะความเป็นกรดด่างในช่วงภาระบรรทุกสารอินทรีย์ดังกล่าวถือเป็นภาวะที่เป็นมิตรต่อการเติบโตและการดำรงอยู่ของเชื้อจุลินทรีย์ (Mani *et al.*, 2016) เป็นผลทำให้การผลิตแก๊สชีวภาพยังคงเกิดขึ้นแม้จะเกิดในปริมาณน้อยก็ตาม (ภาพที่ 2-3) ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณการใช้สารอาหารหลักชนิดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพื่อการเติบโตที่เพิ่มขึ้นตลอด 3 ช่วงแรกของการเพิ่มขึ้นของภาระบรรทุกสารอินทรีย์ดังแสดงในภาพที่ 5c-d ดังในงานวิจัยของ Hussain *et al.* (2015) ที่บ่งบอกถึงเชื้อจุลินทรีย์ต้องการสารอาหารหลักในรูปของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพื่อการเติบโตและรักษาค่าความเป็นกรดด่างของระบบให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม รวมถึงยังเป็นส่วนสำคัญในการสร้างพลังงานให้กับเชื้อจุลินทรีย์เพื่อเพิ่มจำนวนประชากรอีกด้วย จากการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอนยังพบอีกว่าปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนตลอดช่วงภาระบรรทุกสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 1,010-1,288 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าระดับความเป็นพิษคือ 5,500 มิลลิกรัมต่อลิตร (Yan *et al.*, 2022) จึงทำให้ระดับความเป็นพิษที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์มาจากภาวะความเป็นกรดของระบบ เมื่อพิจารณาระบบผลิตแก๊สชีวภาพเป็นระบบรวมแล้วจะเห็นว่าแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนในอัตราส่วน 1:6 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่มากกว่าแก๊สชีวภาพที่ผลิตจากน้ำเสียของกระบวนการผลิตยางธรรมชาติ (Skim latex serum) ด้วยระบบยูเอเอสบีแบบสองขั้นตอน ณ อุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก (55 องศาเซลเซียส) (อัตราส่วนของแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนคือ 1:1.5) (Jariyaboon *et al.*, 2015) เนื่องจากการใช้สารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเป็นสารป้อนเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ เมื่อเวลาผ่านไปเศษอาหารจะถูกย่อยสลายไปเป็นสารตัวกลางคือ กรดอินทรีย์ และกรดอินทรีย์บางส่วนอาจไม่ถูกย่อยสลายจนเกิดการสะสมในระบบซึ่งการสะสมของกรดอินทรีย์จากการย่อยสลายเศษอาหารจะพบในปริมาณต่ำกว่ากรดอินทรีย์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ประเภทน้ำเสียของกระบวนการผลิตยางธรรมชาติคิดเป็นร้อยละ 39.00 สำหรับองค์ประกอบของแก๊สมีเทนในแก๊สเชื้อเพลิงที่ผลิตได้นั้นส่วนใหญ่เกิดผ่านกระบวนการอะซิโตคลาสิกคิดเป็นร้อยละ 70 โดยปริมาตร และกระบวนการไฮโดรจิโนโทรปิกคิดเป็นร้อยละ 30 โดยปริมาตร

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพของงานวิจัยนี้เกิดมาจากการดำเนินการหมักแบบสองขั้นตอนคือสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ในเศษอาหารจะถูกย่อยให้กลายเป็นโมเลกุลเล็ก (คือ สารอินทรีย์กลุ่มคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันถูกย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์) ในถังปฏิกรณ์ใบที่ 1 (คือถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร) ซึ่งสารโมเลกุลเล็กนี้ เชื้อจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายต่อเพื่อให้ได้แก๊สมีเทนได้ง่ายในระยะเวลาสั้นในถังปฏิกรณ์ใบที่ 2 (คือ ถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร) นั่นเอง นอกจากการดำเนินการหมักสองขั้นตอนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนแล้ว การดำเนินการหมักสองขั้นตอนยังช่วยลดความเป็นพิษที่เกิดจากการสะสมของกรดในระบบได้อีกด้วย และสภาวะที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอน ณ สภาวะเมโซฟิลิกคือ ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3.09 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์รวม เมื่อคิดเทียบกับขนาดถังปฏิกรณ์รวมคือ 21 ลิตร ในแต่ละภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอนจะมีกากตะกอนเกิดขึ้น ซึ่งมีวิธีการจัดการด้วยการรวบรวมกากตะกอนที่ได้และเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เมื่อระบบหมักเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพดำเนินเสร็จสมบูรณ์กากตะกอนดังกล่าวจะถูกนำมากำจัดความชื้นด้วยการตากภายใต้แสงแดดเป็นเวลา 1 สัปดาห์ (ขณะตากแห้งต้องมีการพลิกหรือกลับกากตะกอน) จากนั้นนำมาร่อนผ่านตะแกรงเพื่อให้มีลักษณะเป็นเม็ดขนาดเท่ากันและนำไปใช้ประโยชน์ด้านการเกษตร (คือ ปุ๋ยหมัก)

จากผลการวิจัยที่ได้จากการศึกษานี้จะแสดงให้เห็นถึงแนวทางการจัดการของเสียอินทรีย์เพื่อพัฒนาให้เป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ทั้งในระดับภาคครัวเรือนและในระดับภาคอุตสาหกรรม โดยในระดับภาคอุตสาหกรรมนั้นการจัดการของเสียประเภทน้ำเสียในกระบวนการผลิตด้วยการนำไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพจะมีศักยภาพสูงสุดเพราะนอกจากจะช่วยลดต้นทุนด้านการใช้พลังงานลงแล้วยังช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากการใช้พลังงานฟอสซิลลงอีกด้วย การผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียของโรงงานผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลด้วยระบบหมักสองขั้นตอนมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ระบบหมักขั้นตอนเดียวคิดเป็นร้อยละอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพที่เพิ่มมากขึ้นโดยเฉลี่ย 36.96 โดย

ปริมาตร (อัตราผลิตแก๊สชีวภาพจากระบบหมักสองขั้นตอนโดยเฉลี่ยประมาณ 37,030 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน) (Industrial Safety Technology Promotion Division, 2024) นอกจากนี้การใช้ถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้น (Upflow anaerobic sludge blanket; UASB) ในขั้นตอนที่สองของระบบหมักยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (% COD removal) คิดเป็นร้อยละ 9.65 ซึ่งจะสอดคล้องกับอัตราการผลิตแก๊สมีเทนที่เพิ่มมากขึ้นร้อยละ 36.95 (อัตราการผลิตแก๊สมีเทนด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นที่สภาวะมาตรฐานคือ 18,514.82 ลูกบาศก์เมตร ($CH_4$) ต่อวัน) (Industrial Safety Technology Promotion Division, 2024) จากการใช้ระบบหมักแบบสองขั้นตอนพร้อมกับการใช้ถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นเป็นขั้นตอนที่สองจะส่งผลทำให้ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น 1.14 เท่า เทียบเท่ากับการลดการใช้น้ำมันดิบ 1,866.97 ตันต่อปี (Industrial Safety Technology Promotion Division, 2024)

**สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ**

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอนภายใต้สภาวะเมโซฟิลิกโดยไม่มีการควบคุมค่าความเป็นกรดด่าง ณ ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันของถังปฏิกรณ์ขนาด 5 ลิตร และ 16 ลิตรพบว่า ที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สมีเทนด้วยถังปฏิกรณ์ไร้ออกซิเจนแบบไหลขึ้นสองขั้นตอนคือ 18.90 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร โดยระบบมีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุดในรูปของอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสูงสุด 26.01 มิลลิลิตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร ผลได้ของแก๊สมีเทนสูงสุด (คือ 0.114 มิลลิลิตร ($CH_4$) ต่อกิโลกรัมซีโอดีขาเข้า หรือ 2.38 มิลลิลิตร ($CH_4$) ต่อกิโลกรัมซีโอดีขาเข้า) และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนแบบจำเพาะสูงสุด 1.58 มิลลิลิตร ($CH_4$) ต่อลิตรต่อวัน (หรือ 4.19 มิลลิลิตร ($CH_4$) ต่อกรัมแบคทีเรียต่อวัน) สอดคล้องกับอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มากที่สุดคือ ร้อยละ 57.21 (% COD removal)

ในการดำเนินงานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะว่าควรมีการศึกษาถึงชนิดของเศษอาหาร (ได้แก่ เศษอาหารกลุ่มโปรตีน (Protein-rich material) และกลุ่มไขมัน (Fatty-rich material)) ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยอาจมีการแบ่งเป็นระยะจากระดับห้องปฏิบัติการเข้าสู่กระบวนการขยายขนาด (Scale-up) จนถึงระดับโรงงานต้นแบบ (Pilot plant) เพื่อให้เห็นถึงศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพตลอดจนการเพิ่มศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากของเสียอินทรีย์ในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรมใหเกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ คือ การใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อให้ได้มาซึ่งผลลัพธ์ที่ดีที่สุด นอกจากนี้งานวิจัยนี้ควรมีการถ่ายทอดเทคโนโลยีและองค์ความรู้การผลิตแก๊สชีวภาพจากของเสียในครัวเรือนให้แก่ชาวบ้านในชุมชนและกลุ่มวิสาหกิจเพื่อเป็นแนวทางในการลดขยะอินทรีย์ เนื่องจากขยะอินทรีย์ที่พบของแต่ละครัวเรือนต่อวันอยู่ในระดับมาก เช่น เศษอาหาร เศษผัก เปลือกผลไม้ เป็นต้น ซึ่งขยะอินทรีย์เหล่านี้หากไม่มีการจัดการที่ดีและเป็นระบบอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากการผลิตแก๊สชีวภาพจากของเสียในครัวเรือนจะช่วยลดปริมาณขยะได้แล้วยังช่วยลดค่าใช้จ่ายจากการใช้พลังงานฟอสซิลในระดับครัวเรือนได้อีกด้วย

**กิตติกรรมประกาศ**

งานวิจัยนี้ได้รับความร่วมมือจากครัวพิกุล มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่สำหรับเศษอาหาร และบริษัททรัพย์ทิพย์จำกัด จังหวัดลพบุรี สำหรับตะกอนหัวเชื้อ และขอขอบคุณประธานหลักสูตรนวัตกรรมเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้อำนวยความสะดวกสำหรับสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย และวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเครื่องมือในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

**เอกสารอ้างอิง**

Anburajan, P., Cayetano, R. D., Prohim, Y. M., Thau, N. T., Kim, S., Kim, H., *et al*. (2023). Role of quorum sensing and quorum quenching in anaerobic digestion: A scoping review. *Environmental Research*, *239*, 117413.

Bakkaloglu, S. & Hawkes, A. (2024). A comparative study of biogas and biomethane with natural gas and hydrogen alternatives. *Energy & Environmental Science, 17*, 1482–1496.

Bułkowska, K., Dubis, B., Pokój, T. & Jankowski, K. J. (2024). Enhancing biohydrogen production: A comparative analysis of utilization of Jerusalem artichoke and bakery waste by dark fermentation. *Renewable Energy*, *235*, 121292.

Chorukova, E. & Simeonov, I. (2020). Mathematical modeling of the anaerobic digestion in two-stage system with production of hydrogen and methane including three intermediate products. *International Journal of Hydrogen Energy, 45,* 11550–11558.

Dalkılıc, K. & Ugurlu, A. (2015). Biogas production from chicken manure at different organic loading rates in a mesophilic-thermopilic two stage anaerobic system. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *120*(3), 315-322.

Dandikas, V., Heuwinkel, H. & Lichti, F. (2017). Correlation between hydrolysis rate constant and chemical composition of energy crops. *Renewable Energy, 118*, 34-42.

Eaton, A. D., Clesceri, L. S. & Rice, E. W. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. *Science of The Total Environment*, *142*, 227-228.

Electricity Generating Authority of Thailand: EGAT. (2025). *Food waste* [Online]. Retrieved January 17, 2025, from: https://www.egat.co.th/home/ghg-emissions-05/. (in Thai)

Ferdes, M., Zăbavă, B. S., Paraschiv, G., Ionescu, M., Dincă, M. N. & Moiceanu, G. (2022). Food waste management for biogas production in the context of sustainable development. *Energies, 15*, 6268.

Hussain, A., Kumar, P. & Mehrotra. I. (2015). Nitrogen and phosphorus requirement in anaerobic process: A review. *Environmental Engineering and Management Journal*, *14*, 769-780.

Industrial Safety Technology Promotion Division (2024). *Handbook for the improvement of biogas production efficiency in industrial sector case study: ethanol industry* (Revised edition). Department of industrial works. (in Thai)

Intanoo, P. & Tankam, J. (2017). Anaerobic digestion of concentrated food waste in biogas production system. *RMUTP Research Journal, 11*(1), 92-101. (in Thai)

Jameel, M. K., Mustafa, M. A., Ahmed, H. S., Mohammed, A. J., Ghazye, H., Shakir, M. N., *et al.* (2024). Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review. *Results in Chemistry, 7*, 101549.

Jariyaboon, R., O-Thong, S. & Kongjan, P. (2015). Bio-hydrogen and bio-methane potentials of skim latex serum in batch thermophilic two-stage anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, *198*, 198-206.

Khanthong, K., Kadam, R., Kim, T. & Park, J. (2023). Synergetic effects of anaerobic co-digestion of food waste and algae on biogas production. *Bioresource Technology, 382*, 129208.

Lak, S. Z., Haghighatjoo, F. & Rahimpour, M. R. (2024). Renewable Energy and Thermochemical Conversion (Pyrolysis, Gasification). Encyclopedia of Renewable Energy, *Sustainability and the Environment*, *3*, 789-800.

Lu, C., Wang, G., Zhang, Q., Yang, X., Yu, J., Liu, T. *et al*. (2023). Comparison of biorefinery characteristics: Photo-fermentation biohydrogen, dark fermentation biohydrogen, biomethane, and bioethanol production. *Applied Energy*, *347*, 121463.

Mani, S., Sundaram, J. & Das, K. C. (2016). Process simulation and modeling: Anaerobic digestion of complex organic matter. *Biomass and Bioenergy*, *93*, 158-167.

Moussa, R. N., Moussa, N. & Dionisi, D. (2022). Hydrogen production from biomass and organic waste using dark fermentation: an analysis of literature data on the effect of operating parameters on process performance. *Processes, 10,* 156.

Pradeshwaran, V., Sundaramoorthy, V. & Saravanakumar, A. (2024). A comprehensive review on biogas production from food waste: Exploring cutting-edge technologies and innovations. *Biomass and Bioenergy*, *188*, 107336.

Qian, S., Chen, L., Xu, S., Zeng, C., Lian, X., Xia, Z. & Zou, J. (2025). Research on methane-rich biogas production technology by anaerobic digestion under carbon neutrality: A review. *Sustainability, 17*, 1425.

Rajlakshmi, J. D. A., Dutta, S., Sherpa, K. C., Jayaswal, K., Saravanabhupathy, S., Mohanty, K. T., *et al.* (2023). Chapter 7 - Co-digestion processes of waste: Status and perspective. *Bio-Based Materials and Waste for Energy Generation and Resource Management, 5*, 207-241.

Saboohi, A. & Hosseini, S. E. (2025). Advancements in biogas production: Process optimization and innovative plant operations. *Clean Energy, 9*, 52–65.

Saiphet, A. & Kunta, K. (2023). Municipal food waste management and its greenhouse gas emission in Thailand: a case study of 8 municipalities. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management, 79,* 60–74.

Seneesrisakul, K., Ariyamethee, P., Kunta, K., Pornmai, K., Boonayamanop, T., Abe, M., *et al.* (2024). Improvement of biogas productivity from distillery wastewater by partial potassium reduction pretreatment using two-step microfiltration and nanofiltration. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*, 110205.

Shinde, R., Hackula, A., O'Shea, R., Barth, S., Murphy, J. D. & Wall, D. M. (2023). Demand-driven biogas production from upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors to balance the power grid. *Bioresource Technology, 385,* 129364.

Srisuwanno, W., Pornmai, K., Seneesrisakul, K., Jiraprasertwong, A., Leethochawalit, M., Rangsunvijit, P., *et al.* (2023). High biogas evolution of distillery wastewater under potassium toxicity in a three-stage upflow anaerobic sludge blanket. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*, 110205.

Vats, N., Khan, A. A. & Ahmad, K. (2019). Observation of biogas production by sugarcane bagasse and food waste in different composition combinations. *Energy, 185,* 1100–1105.

Vgreenku. (2025). *Food waste management* [Online]. Retrieved January 17, 2025, from: https://vgreenku.com/knowledge/food-waste-management-article-2/. (in Thai)

Wang, L., Li, Y., Yi, X., Yang, F., Wang, D. & Han, H. (2023). Dissimilatory manganese reduction facilitates synergistic cooperation of hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis via promoting microbial interaction during anaerobic digestion of waste activated sludge. *Environmental Research*, *218*, 114992.

Yan, Y., Yan, M., Ravenni, G., Angelidaki, I., Fu, D. & Fotidis, I. A. (2022). Biochar enhanced bioaugmentation provides long-term tolerance under increasing ammonia toxicity in continuous biogas reactors. Renewable Energy, *195*, 590-597.

Zhang, Y., Liu, F., Liu, H., Zhang, W. & Li, J. (2022). Exogenous N-hexanoyl-L-homoserine lactone assists in upflow anaerobic sludge blanket recovery from acetate accumulation via aceticlastic methanogens enrichment. *Bioresource Technology*, *346*, 126600.