

ศักยภาพและอัตราการป้อนเศษอาหารต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ
ในระบบการหมักแบบ 2 ขั้นตอนร่วมกับการหมุนเวียนน้ำหมัก
FOOD WASTE POTENTIAL AND FEEDING RATES ON BIOGAS
PRODUCTION IN A TWO-STAGE DIGESTION
WITH EFFLUENT RECIRCULATION

พิมพกา โพธิ์ลังกา

Phimphaka Phothilangka

บทคัดย่อ

การศึกษาศักยภาพและอัตราการป้อนเศษอาหารในการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบหมักแบบ 2 ขั้นตอน โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลองดังนี้ การทดลองแรกเป็นการศึกษาศักยภาพทางชีวเคมีในการผลิตก๊าซมีเทน โดยการย่อยสลายเศษอาหารและกลูโคสภายใต้กระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน ผลปรากฏว่าเชื้อตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษามีความว่องไวสูง และเศษอาหารมีศักยภาพที่ดีในการผลิตก๊าซชีวภาพ เศษอาหารและกลูโคสผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้ 0.98 และ 5.82 m³/kgCOD โดยมีองค์ประกอบของมีเทน 55.4 และ 49.2 % ตามลำดับ การทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาอัตราการป้อนเศษอาหาร (0.25, 0.50, 1.0, 2.0 และ 3.0 kgCOD/m³.day) ต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้กระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน 2 ขั้นตอนร่วมกับการหมุนเวียนน้ำหมัก จากการทดลองพบว่าอัตราการป้อนเศษอาหารที่ 1.0 kgCOD/m³.day ร่วมกับการหมุนเวียนน้ำหมัก สามารถผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนเพิ่มขึ้นประมาณ 31.3 % เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มี การหมุนเวียนน้ำหมัก การป้อนเศษอาหารที่อัตราการป้อนเพิ่มขึ้นจาก 0.25 เป็น 0.50, 1.0 และ 2.0 kgCOD/m³.day ร่วมกับการหมุนเวียนน้ำหมัก ถึงแม้จะทำให้ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อหน่วย COD ลดลงเล็กน้อย แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นจาก 0.065 เป็น 0.123, 0.221 และ 0.408 m³ ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการป้อนเศษอาหารที่อัตรา สูงสุด 3.0 kgCOD/m³.day ทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมลดลงอย่างเฉียบพลันเหลือเพียง 0.019 m³ อัตราการป้อนที่สูงนี้มีผลทำให้ระบบการหมักย่อยสลายกรดอินทรีย์ไม่ทันเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง 52100

Faculty of Science, Lampang Rajabhat University, Muang District, Lampang Province 52100

corresponding author email: pphothilangka@gmail.com

Received: 9 April 2020; Revised: 4 May 2020; Accepted: 14 May 2020

ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid; VFA) ในปริมาณที่สูง pH ต่ำ (5.2) และอัตราส่วนที่สูงเกินไปของ VFA/alkalinity (=1.35) ที่วิเคราะห์ได้ในน้ำหมักมีผลต่อการยับยั้งแบคทีเรียในการผลิตก๊าซมีเทน

คำสำคัญ: เศษอาหาร อัตราการป้อน การหมักแบบไร้ออกซิเจน 2 ขั้นตอน การหมุนเวียนน้ำหมัก ก๊าซชีวภาพ

Abstract

Two experiments were conducted successfully to investigate food waste potential and feeding rates on biogas production. Anaerobic digestions of food waste and glucose were carried out in the first experiment to evaluate their biochemical methane production potential. Results indicated that the high biogas production yield was obtained with the presented microbial inoculum (seed) and the used food waste. The accumulated biogas yields produced from the food waste and glucose were 0.98 and 5.82 m³/kgCOD with 55.4 and 49.2% methane contents, respectively. Effects of food waste feeding rates (0.25, 0.50, 1.0, 2.0, and 3.0 kgCOD/m³.day) using a two-stage anaerobic digestion with effluent recirculation on biogas production were investigated in the second experiment. Results revealed that the 1.0 kgCOD/m³.day feeding rate with effluent recirculation increased biogas and methane yields approximately 31.3% higher as compared to that without recirculation. The increased rates from 0.25 to 0.50, 1.0, and 2.0 kgCOD/m³.day, though slightly decreased the biogas production rate (per COD unit), the accumulation of biogas yields were increased from 0.065 to 0.123, 0.221, and 0.408 m³, accordingly. However, the highest feeding rate of 3.0 kgCOD/m³.day with effluent recirculation dropped the accumulation biogas yield sharply to 0.019 m³. This high feeding rate would hinder the processes of acidogenic digestion and resulted in high concentration of VFA in the tested effluent. A low pH (5.2) and high ratio (1.35) of VFA/alkalinity as noted in the effluent would inhibit methanogens for methane production.

Keywords: Food waste, Feeding rates, Two-stage anaerobic digestion, Recirculation, biogas

บทนำ

เศษอาหารที่เหลือจากการบริโภคตามครัวเรือน และร้านอาหารทั่วไปในประเทศไทยส่วนใหญ่มักจะถูกนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์ หรือนำไปทิ้งเป็นขยะก่อให้เกิดปัญหาด้านมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จะมีก็เพียงบางแห่งเท่านั้นที่เป็นโรงอาหารขนาดใหญ่ (เช่น โรงอาหารมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และโรงอาหารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นต้น) ที่ได้มีการนำเศษอาหารดังกล่าวไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ

เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนในการหุงต้ม ซึ่งประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับศักยภาพของวัตถุดิบ และกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามประเภทของเศษอาหารจากโรงอาหารไทยในแต่ละพื้นที่ ส่วนใหญ่ไม่ต่างกันมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากอาหารไทยที่จำหน่ายทั่วไปมักจะคล้ายคลึงกัน เช่น ข้าวราดแกงชนิดต่าง ๆ ก๋วยเตี๋ยว ราดหน้า ผัดซีอิ้ว สุกี้ ผัดผักรวมต่าง ๆ เป็นต้น ส่วนกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร/ชีวมวลนั้น ปัจจุบันพบว่า ระบบการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (two-stage anaerobic digestion system) หรือเรียกสั้นๆว่าระบบการหมักแบบ 2 ขั้นตอน เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการย่อยสลายแบบขั้นตอนเดียว (Sinpaisansomboon et al., 2007; Lindner et al., 2016; Lukitawesa et al., 2018.)

การหมักแบบ 2 ขั้นตอนเป็นระบบที่ประกอบด้วยขั้นตอนของการผลิตกรดอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพ (มีเทน) แยกกันอยู่คนละภาชนะ (ถัง) ดังนั้นกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ผลิตกรดและก๊าซมีเทนซึ่งต้องการสภาวะแวดล้อมเช่น pH ที่เหมาะสมแตกต่างกัน มีประสิทธิภาพมากขึ้นในการทำงาน นอกจากนั้นผลการวิจัยยังพบว่าระบบหมักแบบ 2 ขั้นตอน เมื่อใช้ร่วมกับการหมุนเวียนน้ำหมัก (effluent recirculation) ระหว่างถังทั้งสอง จะทำให้เสถียรภาพในการหมักและประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพดียิ่งขึ้น ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการผลิตจะขึ้นอยู่กับศักยภาพของวัตถุดิบและอัตราการป้อนวัตถุดิบร่วมกับ การหมุนเวียนน้ำหมัก (Zuo et al., 2013; Guiliano et al., 2014; Lukitawesa et al., 2018)

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับศักยภาพของเศษอาหารในการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบการหมักดังกล่าวข้างต้นในประเทศไทยมีน้อยมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการหมักแบบ 2 ขั้นตอน การวิจัยในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพของเศษอาหารจากโรงอาหารและอัตราการป้อนเศษอาหารดังกล่าว ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบการหมักแบบ 2 ขั้นตอน ร่วมกับการหมุนเวียนน้ำหมักระหว่างถังผลิตกรดอินทรีย์และถังผลิตก๊าซชีวภาพ

วิธีดำเนินการวิจัย

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการทดลอง

เศษอาหารที่ใช้ในการทดลอง

เศษอาหารที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้รวบรวมมาจากโรงอาหารภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี โดยทำการคัดแยกเอาส่วนที่จุลินทรีย์ย่อยสลายยากออก ได้แก่ กระดุก ก้างปลา และเศษพลาสติก เป็นต้น หลังจากนั้นนำเศษอาหารซึ่งมีน้ำแกงอยู่ด้วยมาบดด้วยเครื่องบด (ELECTROLUX: E7TB184SM) ให้มีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 0.1 cm โดยไม่เติมน้ำเพิ่ม และนำมาผสมคลุกเคล้ากัน นำเศษอาหารที่ผ่านการบดไปวิเคราะห์หาความชื้นและคุณสมบัติทางเคมีตามวิธีการมาตรฐานของ AWWA (American Public Health Association, 1995) ผลการวิเคราะห์ได้สรุปไว้ในตารางที่ 1 (Table 1)

Table 1 Important properties of the food waste used in the experiment (averaged from 3 replications)

Properties	Food waste
^{1/} Moisture (% w/w)	77.05
^{1/} Total Solid, TS (% w/w)	22.95
^{2/} Volatile Solid, VS (% w/w as TS)	92.60
^{2/} Ash (% w/w)	7.40
^{3/} Carbon (% w/w as VS)	50.85
^{4/} pH	3.50
^{5/} COD (g/L)	87.03

Remark ^{1/} Oven dried at 105 °C ^{2/} Heated at 550 °C ^{3/} Heated at 900 °C ^{4/} pH meter

^{5/} COD (Chemical Oxygen demand): Standard Methods: 5220C : COD by Closed Reflux, Titration

การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น

ทำการเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้น (seed) ที่ใช้ในการทดลอง โดยนำมูลโคสดมาผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:1 นำมาหมักในถังหมักขนาด 18 L มีปริมาตรใช้งาน 10 L ทำการปิดฝาถังหมักและใส่อากาศออกด้วยก๊าซไนโตรเจน หลังจากนั้นเติมเศษอาหารที่ผ่านการเตรียม 250 g สัปดาห์ละ 2 ครั้ง จนเกิดก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนไม่น้อยกว่า 45% โดยปริมาตร แล้วจึงนำเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นที่เตรียมได้ไปใช้ในการทดลอง

การออกแบบถังหมัก

ถังหมักที่ใช้ในการทดลองเป็นถังพลาสติกขนาด 18 L ปริมาตรใช้งาน 10 L ปิดฝาด้วยฝาพลาสติกซึ่งได้เจาะรูใส่ท่อ เพื่อใช้เป็นช่องสำหรับเติมวัตถุดิบ และด้านข้างของถังหมักในระดับเดียวกับปริมาตรใช้งานได้เจาะรูใส่ช่อง 90 องศา ให้ปลายด้านในถังจุ่มลงในน้ำหมักเพื่อให้หมักกลับออกมาเมื่อมีการเติมวัตถุดิบ ก๊าซที่ผลิตขึ้นจะระบายออกตามท่อระบายก๊าซที่ฝาด้านบนโดยท่อดังกล่าวจะมีวาล์วปิดเปิดและเชื่อมต่อกับหลอดแก้วรูปตัวยู ซึ่งเป็นอุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบต่าง ๆ ของก๊าซ และใช้เป็นตัวล้าเลียงก๊าซไปยังขวดวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ ส่วนประกอบต่าง ๆ ของถังหมักได้เขียนเป็นแผนภาพดังแสดงในภาพที่ 1 (Figure 1)

การวัดปริมาตรและการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

ทำการวัดปริมาตรของก๊าซชีวภาพโดยวิธีการแทนที่น้ำ ก๊าซที่เกิดขึ้นจะไหลไปตามท่อส่งและดันน้ำที่อยู่ในขวดวัดปริมาตรให้ล้นออกมา บันทึกปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในแต่ละวัน เก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพโดยการปิดวาล์วหัวท้ายหลอดแก้วรูปตัวยู ดังภาพที่ 1 (Figure 1) เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่น ๆ) ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography) ที่มีเครื่องตรวจวัดแบบ thermal conductivity detector (TCD)

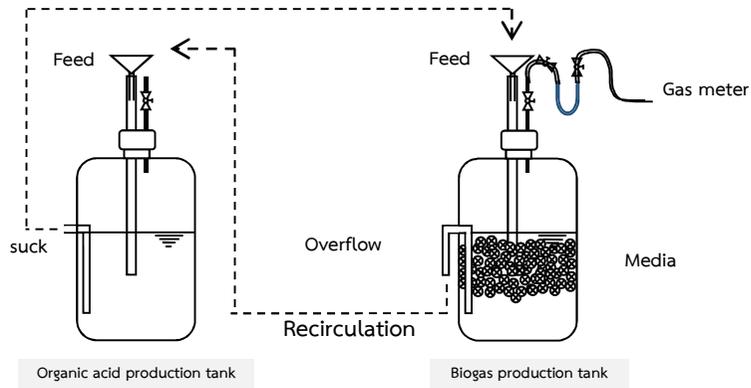


Figure 1 Composition of the two-stage anaerobic digestions and experimental diagram

วิธีการทดลอง

การทดลองศึกษาสภาพและอัตราการป้อนเศษอาหารต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบการหมักแบบ 2 ขั้นตอนร่วมกับการหมุนเวียนน้ำหมัก ประกอบด้วย 2 การทดลอง การทดลองแรกเป็นการศึกษาสภาพของเศษอาหารในการผลิตก๊าซมีเทน ก่อนที่จะได้นำเศษอาหารดังกล่าวไปใช้ในการทดลองที่ 2 ซึ่งเป็นการศึกษาอัตราการป้อนเศษอาหารต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้ระบบหมักแบบ 2 ขั้นตอนร่วมกับการหมุนเวียนน้ำหมัก โดยทำการทดลองที่มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ระหว่างมิถุนายน ถึง พฤศจิกายน 2561

การทดลองที่ 1 การศึกษาสภาพของเศษอาหารในการผลิตก๊าซมีเทน (biochemical methane potential, BMP)

การวิเคราะห์หาสภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (BMP) ได้ใช้วิธีการที่พัฒนามาจาก Owen et al. (1979) ซึ่งเป็นเทคนิคในการวัดความสามารถในการย่อยสลายทางชีวเคมี และความเป็นพิษของวัตถุดิบที่นำมาหมัก ภายใต้กระบวนการหมักแบบไร้อากาศในสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกวัดเป็นปริมาตรสะสมทั้งหมดต่อหน่วยวัตถุดิบทั้งหมดที่เติม การศึกษา BMP ในครั้งนี้ ได้กระทำในขวดเซรัมขนาด 100 mL โดยใช้มูลโคที่ผ่านการปรับสภาพแล้วเป็นเชื้อตั้งต้น (seed) แล้วเติมสารละลาย อาหาร (nutrient) ที่จำเป็น (Bartaz et al., 1990) ในอัตราส่วน 10:40 โดยปริมาตร วัตถุดิบ(เศษอาหาร)ที่ใช้ในการทดลองใช้ในอัตราส่วน 1:1 ต่อเชื้อตั้งต้นโดยน้ำหนักของแข็งระเหย (VS) โดยใช้กลูโคส เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบทดสอบความว่องไว (active) ในการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ การทดลองในครั้งนี้ประกอบด้วย 3 ตัวอย่าง ตัวอย่างละ 3 ชั่วโมงประกอบของแต่ละตัวอย่างและคุณสมบัติของวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 และ 3 (Table 2 and 3) ตามลำดับ

Table 2 Composition of the sample used in the BMP study

Sample	Composition
1	Nutrient 40 mL + seed 10 mL
2	Nutrient 40 mL + seed 10 mL + Glucose
3	Nutrient 40 mL + seed 10 mL + Food waste

Table 3 Important chemical properties of the microbial inoculum (seed) and food waste in the BMP study (averaged from 3 replications)

Sample	TS (%)	VS (%)	COD (g/L)
Seed	1.73	65.56	51.30
Glucose	99.73	95.37	12.72
Food waste	22.95	92.60	87.03

ขวดทดลองแต่ละขวดได้ปิดฝาด้วยจุกยาง แล้วไล่อากาศออกโดยใช้ก๊าซไนโตรเจน นำขวดทดลองเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง วัดปริมาตรและวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ 3 วันต่อครั้งในช่วงเดือนแรก หลังจากนั้นทำการวัดสัปดาห์ละครั้ง เมื่อค่าที่วัดได้ค่อนข้างคงที่

การทดลองที่ 2 การศึกษาอัตราการป้อนเศษอาหารต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

การทดลองใช้ระบบการหมักแบบ 2 ขั้นตอน ร่วมกับการหมุนเวียนน้ำหมัก ดังได้อธิบายเป็นแผนภาพการทดลองแต่ต้น ภาพที่ 1 (Figure 1) เศษอาหารในรูปสารละลาย (22.95 %TS) ถูกเติมลงในถังผลิตกรดอินทรีย์ กรดอินทรีย์ที่ผลิตได้ถูกนำไปสู่ถังผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งมีเชื้อตั้งต้นที่ได้รับการปรับสภาพแล้ว ภายในถังผลิตก๊าซชีวภาพจะมีตัวกลางให้เชื้อจุลินทรีย์เกาะเพื่อป้องกันการถูกชะล้างออกไป (wash out) น้ำหมักที่ล้นออกมาจากถังผลิตก๊าซชีวภาพ (หลังจากเติมกรดอินทรีย์) จะถูกหมุนเวียนกลับไปเติมเข้าถังผลิตกรดอินทรีย์ในปริมาณที่เท่ากัน

การศึกษ้อัตราการป้อนเศษอาหารต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วย 6 ชุดการทดลอง (Treatment; T1-T6) มี ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ โดยชุดทดลอง T1 เป็นชุดทดลองควบคุม ซึ่งไม่มีการหมุนเวียนน้ำหมักไว้เป็นข้อมูล โดยมีการป้อนเศษอาหารในอัตรา 1 kgCOD/m³.day ส่วนชุดทดลอง T2-T6 มีการหมุนเวียนน้ำหมักและป้อนเศษอาหารในอัตรา 0.25, 0.50, 1.00, 2.00 และ 3.00 kgCOD/m³.day ตามลำดับ ค่า COD เริ่มต้น (initial) และเวลาในการกักเก็บ (hydraulic retention time, HRT) ในแต่ละชุดการทดลองได้สรุปไว้ในตารางที่ 4 (Table 4) การป้อนเศษอาหารได้กระทำอย่างต่อเนื่องทุกวันเป็นเวลา 30 วัน บันทึกข้อมูลและเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบตั้งแต่เริ่มหมักจนครบ 60 วัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองได้เก็บตัวอย่างน้ำหมักเพื่อนำไปวิเคราะห์หา pH, volatile fatty acid (VFA), alkalinity และ COD

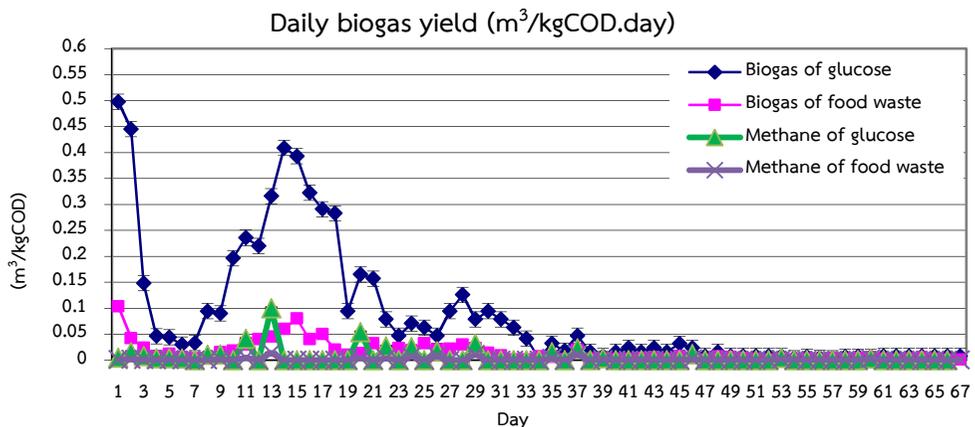
Table 4 Food waste feeding rates, initial COD and hydraulic retention time in each treatment utilized in the study (averaged from 3 replications)

Treatment	Food waste feeding rate (kgCOD/m ³ .day)	Initial COD (g/L)	Hydraulic retention time (day)
T1	1.00 (no recirculation)	83.32	25.00
T2	0.25 (recirculation)	104.51	125.41
T3	0.50 (recirculation)	98.97	59.38
T4	1.00 (recirculation)	82.23	24.67
T5	2.00 (recirculation)	74.48	11.17
T6	3.00 (recirculation)	62.45	6.25

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการทดลองที่ 1 ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของเศษอาหารและกลูโคส

จากการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของเศษอาหารและกลูโคสที่ใช้ในการทดลองเป็นเวลา 67 วัน พบว่าในระยะ 30 วันแรกของการหมัก อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันของเศษอาหารอยู่ในช่วง 0.00-0.08 m³/kgCOD.day ในขณะที่กลูโคสซึ่งใช้เป็นตัวแทนทดสอบความม่วงไวของเชื้อตั้งต้นผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.00-0.40 m³/kgCOD.day หลังจากนั้นอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของทั้ง 2 ตัวอย่าง มีปริมาณที่น้อยมากและค่อนข้างคงที่ตั้งแต่วันที่ 49 ถึงสิ้นสุดกระบวนการหมัก เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการหมักถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายไปจนใกล้หมด อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อวันของตัวอย่างเศษอาหารและกลูโคสได้แสดงไว้ในภาพที่ 2 (Figure 2)

**Figure 2** Daily biogas yield of the digested food waste and glucose

จากการวิเคราะห์สัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการหมักตัวอย่างเศษอาหาร และกลูโคส ดังภาพที่ 3 (Figure 3) พบว่าในช่วง 15 วันแรกของการหมัก ทั้งเศษอาหารและกลูโคสได้ผลิตคาร์บอนไดออกไซด์ในสัดส่วนที่มากกว่าก๊าซมีเทน โดยที่กลูโคสผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังกล่าวได้มากกว่าเมื่อเทียบกับที่ได้จากการหมักเศษอาหาร สัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 24-26% และ 17-21% จากการหมักกลูโคสและเศษอาหารตามลำดับ หลังจากนั้นสัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้จากทั้ง 2 ตัวอย่างลดลงเล็กน้อยและค่อนข้างคงที่ประมาณ 19 - 20% ในเวลาเดียวกันสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบการหมักเกิดความสมดุลระหว่างจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ผลิตกรดอินทรีย์และกลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทน องค์ประกอบของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากตัวอย่างเศษอาหารและกลูโคสสูงสุดที่ประมาณ 55.4% และ 49.2% ตามลำดับ ดังภาพที่ 3 (Figure 3) ผลจากการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่า กลูโคสเป็นวัตถุดิบที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่าย อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงกว่าการหมักเศษอาหาร จากปฏิกิริยาการย่อยสลายที่รวดเร็วของกลูโคสนี้แสดงให้เห็นว่า เชื้อตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองมีความว่องไวสูง

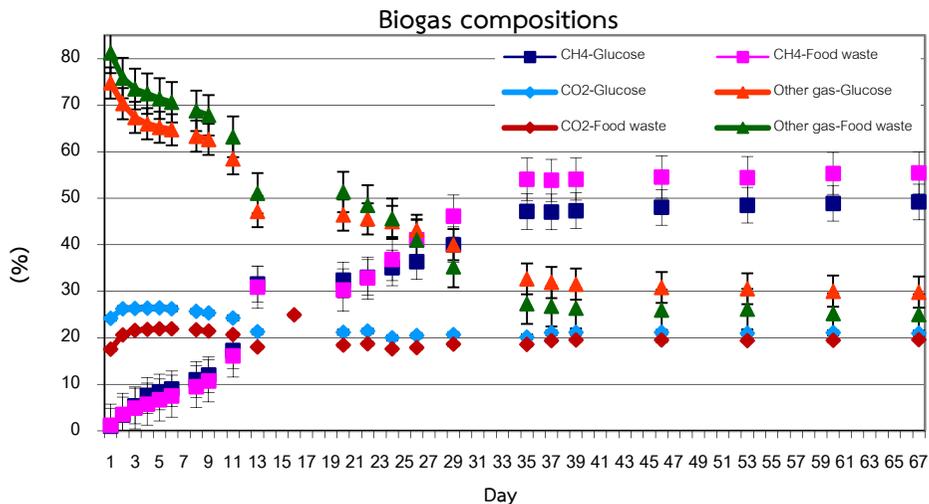


Figure 3 Daily biogas compositions of the digested food waste and glucose

เมื่อพิจารณาศักยภาพของเศษอาหารในการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลจากการทดลองพบว่าเศษอาหารที่ใช้ในการศึกษามีศักยภาพที่สูง สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้ถึง $0.984 \text{ m}^3/\text{kgCOD}$ มีเทนสะสม $0.545 \text{ m}^3/\text{kgCOD}$ ประสิทธิภาพการย่อยสลายในรูป COD 97% ดังภาพที่ 4 และ 5 (Figure 4 and 5) องค์ประกอบของก๊าซที่ผลิตได้ ประกอบด้วยมีเทน 55.4% คาร์บอนไดออกไซด์ 19.6% และอื่น ๆ อีก 25.0% และจากการวิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่างของตัวอย่างหลังการทดลอง ดังตารางที่ 6 (Table 6) ผลปรากฏว่า pH อยู่ในช่วง 7.3-8.0 ค่า alkalinity อยู่ระหว่าง $5.23\text{-}5.78 \text{ gCaCO}_3/\text{L}$ แสดง

ให้เห็นว่าระบบการหมักมีความเป็นบัฟเฟอร์สูงเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Angelidaki & Sanders, 2004; Mccarty, 1964) จึงมั่นใจได้ว่าระบบจะไม่ถูกยับยั้งการย่อยสลายอันเนื่องจาก pH หรือความเป็นพิษอันเนื่องจากการสะสมของ VFA

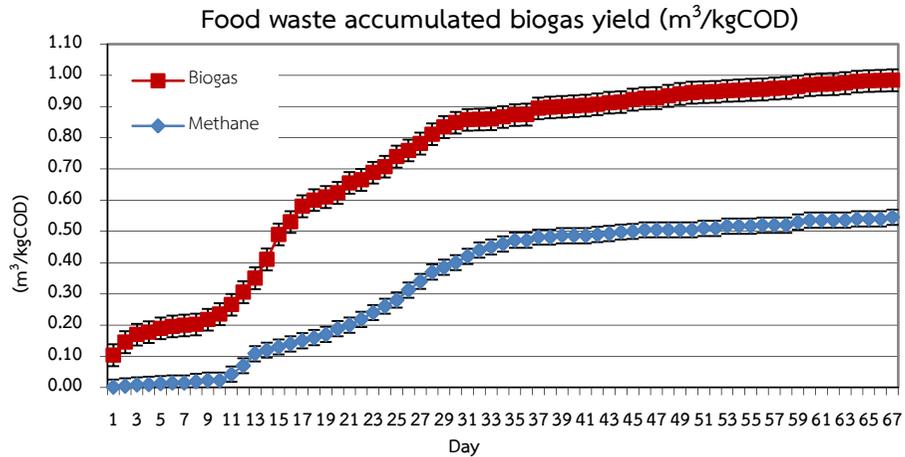


Figure 4 Accumulated biogas yield of the digested food waste

Table 5 Biogas and methane production potential of the food waste and glucose (mean ± S.D.)

Sample	Accumulated yield (m³/kgCOD)		Digestion efficiency (% as COD feed)
	Methane	Biogas	
Seed	$1.7 \times 10^{-5} \pm 5 \times 10^{-7}$	$2.7 \times 10^{-4} \pm 1.2 \times 10^{-5}$	-
Glucose	2.86±0.34	5.82±0.12	98.3±0.60
Food waste	0.545±0.47	0.984±0.05	97.1±0.55

Table 6 Biogas compositions of the digested samples and conductivity/ alkalinity of the effluents at the end of the experiment (mean ± S.D.)

Sample	% CH ₄	% CO ₂	% Air	pH	Alkalinity (gCaCO ₃ /L)
Seed	12.2±0.40	4.1±0.18	83.7±0.55	8.0±0.11	5.31±0.42
Glucose	49.2±0.47	21.0±0.17	29.8±0.40	7.4±0.20	5.26±0.35
Food waste	55.4±0.34	19.6±0.12	25.0±0.45	7.3±0.27	5.78±0.39

ผลการทดลองที่ 2 อัตราการป้อนเศษอาหารต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลของอัตราการป้อนเศษอาหารในแต่ละชุดการทดลองต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบการหมักแบบ 2 ขั้นตอนได้แสดงไว้ในตารางที่ 7 (Table 7) จากการศึกษาพบว่า ชุดการทดลองที่ 1 (T1) ซึ่งมีอัตราการป้อนเศษอาหาร $1 \text{ kgCOD/m}^3\cdot\text{day}$ แต่ไม่มีการหมุนเวียนน้ำหมัก ผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนได้ 0.56 และ $0.32 \text{ m}^3/\text{kgCOD}\cdot\text{day}$ ตามลำดับ ในขณะที่ชุดการทดลองที่ 4 (T4) ซึ่งมีการป้อนเศษอาหารในอัตราที่เท่ากัน แต่มีอัตราการหมุนเวียนน้ำหมัก สามารถผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนได้ 0.74 และ $0.42 \text{ m}^3/\text{kgCOD}\cdot\text{day}$ ตามลำดับ คิดเป็นปริมาณที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นประมาณ 31.3% เมื่อเทียบกับ T1 ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับรายงานของ Stabnikova et al. (2008) ที่พบว่าการหมักเศษอาหารในระบบหมักแบบ 2 ขั้นตอน การหมุนเวียนน้ำหมักทำให้ผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 40% เมื่อเทียบกับการทดลองที่ไม่มีการหมุนเวียนน้ำหมัก เป็นที่น่าสังเกตว่าอัตราการป้อนเศษอาหารที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, และ $3.0 \text{ kgCOD/m}^3\cdot\text{day}$ (T1-T6) ที่ระยะเวลาพักเก็บ 125.41, 59.38, 24.67, 11.17, และ 6.25 วัน ตารางที่ 4 (Table 4) ร่วมกับการหมุนเวียนน้ำหมัก ทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อหน่วย kgCOD ลดลงเป็น 0.87, 0.82, 0.74, 0.68 และ $0.07 \text{ m}^3/\text{kgCOD}\cdot\text{day}$ ตามลำดับ รวมทั้งประสิทธิภาพการย่อยสลายในรูป COD ก็ลดลงเช่นกันจาก 96.7 เป็น 94.8, 86.6, 83.4 และ 4.25% ตามลำดับ ตารางที่ 7 (Table 7) ทั้งนี้สาเหตุเนื่องมาจากระยะเวลาพักเก็บที่น้อยลง จึงทำให้จุลินทรีย์มีเวลาในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ได้น้อยลงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามอัตราการป้อนเศษอาหารที่เพิ่มขึ้นร่วมกับการหมุนเวียนน้ำหมักในชุดการทดลอง T2-T5 ดังกล่าวนี้อาจมีผลทำให้ปริมาณในการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเพิ่มขึ้นจาก 0.065 เป็น 0.123, 0.221 และ 0.408 m^3 ตามลำดับ สำหรับชุดการทดลอง T6 ซึ่งมีอัตราการป้อนที่สูงถึง $3.0 \text{ kgCOD/m}^3\cdot\text{day}$ และมีเวลาพักเก็บเพียง 6.25 วัน ถึงแม้จะมีการหมุนเวียนน้ำหมักแต่ผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้เพียง 0.019 m^3 แสดงให้เห็นว่าระบบการหมักไม่สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพได้ทัน ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์จนกระทั่งระบบการหมักล้มเหลว อันเนื่องมาจากการป้อนเศษอาหารด้วยอัตราบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูงเกินไป และระยะเวลาพักเก็บสั้นลง (Schmidt et al., 2003; Orhoro et al., 2018) อย่างไรก็ตามขนาดของถังหมักเป็นปัจจัยสำคัญอันหนึ่ง การเพิ่มขนาดของถังหมักจะทำให้ระยะเวลาที่สารอินทรีย์อยู่ในระบบมีมากขึ้น (HRT เพิ่มขึ้น) ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นอาจจะมีค่าสูงกว่า 0.019 m^3 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันของแต่ละชุดการทดลองได้แสดงไว้ในภาพที่ 5 (Figure 5) สำหรับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้ตั้งแต่ 0-60 วัน ในแต่ละชุดการทดลองได้แสดงไว้ในภาพที่ 6 (Figure 6)

Table 7 Effects of food waste feeding rate on biogas production in each treatment (mean \pm S.D.)

Treatment	Biogas yield (m ³ /kgCOD)	Methane content (%)	Methane yield (m ³ /kgCOD)	Accumulated biogas yield (m ³)	Digestion efficiency (% as COD feed)
T1	0.56 \pm 0.02	57 \pm 0.06	0.32 \pm 0.01	0.168 \pm 0.003	84.2 \pm 0.35
T2	0.87 \pm 0.05	58 \pm 0.05	0.51 \pm 0.01	0.065 \pm 0.005	96.7 \pm 0.42
T3	0.82 \pm 0.05	58 \pm 0.07	0.48 \pm 0.008	0.123 \pm 0.004	94.8 \pm 0.48
T4	0.74 \pm 0.06	57 \pm 0.04	0.42 \pm 0.006	0.221 \pm 0.006	86.6 \pm 0.65
T5	0.68 \pm 0.05	57 \pm 0.06	0.39 \pm 0.01	0.408 \pm 0.005	83.4 \pm 0.72
T6	0.07 \pm 0.006	0.27 \pm 0.01	-	0.019 \pm 0.003	42.5 \pm 0.36

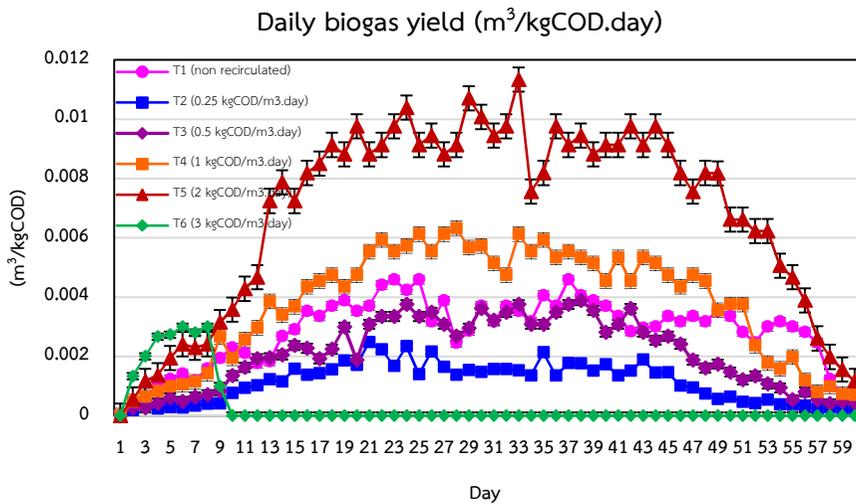


Figure 5 Daily biogas yield of the digested food waste in each treatment

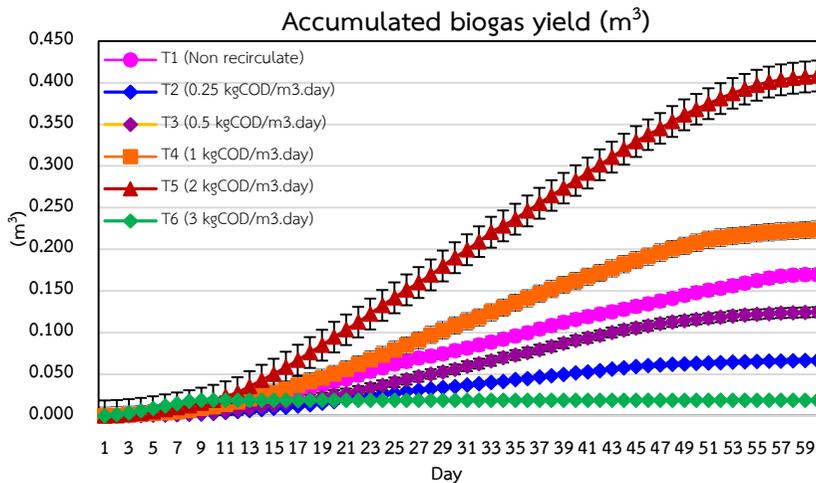


Figure 6 Accumulated biogas yield of the digested food waste in each treatment

ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบการหมักแบบ 2 ขั้นตอน นอกจากจะขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนเศษอาหารแล้ว ยังขึ้นอยู่กับการหมุนเวียนน้ำหมักระหว่างถังผลิตกรดอินทรีย์และถังผลิตก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้เพื่อรักษาเสถียรภาพและสภาพสภาวะที่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่ง pH ของน้ำหมักต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์ Algelidaki & Sanders (2004) พบว่า ถ้าในน้ำหมักมี volatile fatty acid (VFA) สะสมอยู่ในปริมาณมาก pH ต่ำกว่า 5.5 ทำให้การเจริญเติบโตและกิจกรรมของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน methanogenesis หยุดชะงัก pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียดังกล่าวควรอยู่ในช่วง 7-8 โดยอัตราส่วนของ VFA/alkalinity น้อยกว่า 0.4 (Mccarty, 1964) จากการวิเคราะห์สภาพความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำหมักเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ดังตารางที่ 8 (Table 8) พบว่า ยกเว้นชุดการทดลองที่ 6 (T6) ทุกชุดการทดลอง (T1-T5) มีค่า pH อยู่ระหว่าง 7.46 ถึง 7.74 และอัตราส่วนของ VFA/alkalinity อยู่ในช่วง 0.19 ถึง 0.28 ดังนั้นระบบการหมักของชุดการทดลองทั้งหมดดังกล่าวจึงมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ในกรณีของชุดการทดลองที่ 6 (T6) ซึ่งมีอัตราการป้อนเศษอาหารสูง (3.00 kgCOD/m³.day) จากการวิเคราะห์น้ำหมักพบว่ามี pH 5.2 และในระบบมีการสะสมของ VFA ในปริมาณที่สูง (3.89 g/L) มีผลทำให้อัตราส่วนของ VFA/alkalinity เท่ากับ 1.35 ซึ่งสูงเกินไปไม่เหมาะสมต่อการทำงานของ methanogens จนทำให้ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพล้มเหลวในที่สุด

Table 8 Acidity and alkalinity of the effluents in each treatment at the end of the experiment (mean±S.D.)

Treatment	pH	Alkalinity (gCaCO ₃ /L)	VFA (g/L)	COD (g/L)	VFA/Alkalinity
T1	7.72±0.04	7.64±0.07	2.13±0.07	13.16±0.08	0.28
T2	7.74±0.06	8.17±0.09	1.54±0.04	3.45±0.07	0.19
T3	7.74±0.03	8.35±0.07	1.60±0.06	5.15±0.05	0.19
T4	7.72±0.05	7.83±0.06	1.62±0.05	11.02±0.06	0.21
T5	7.46±0.05	5.36±0.06	1.67±0.04	12.36±0.08	0.31
T6	5.2±0.03	2.89±0.04	3.89±0.06	35.91±0.34	1.35

สรุปผลการวิจัย

ผลจากการศึกษาพบว่าเศษอาหารเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อนำเศษอาหารไปหมักโดยใช้กระบวนการหมักแบบ 2 ขั้นตอน ร่วมกับการหมุนเวียนน้ำหมักระหว่างถังผลิตกรดอินทรีย์และถังผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่าการหมุนเวียนน้ำหมักที่อัตราการป้อนเศษอาหาร 1.0 kgCOD/m³.day สามารถผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนเพิ่มขึ้นประมาณ 31.3 % เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีมีการหมุนเวียนน้ำหมัก การป้อนเศษอาหารที่อัตรา 0.25, 0.50, 1.0 และ 2.0 kgCOD/m³.day ร่วมกับการหมุนเวียนน้ำหมัก ถึงแม้จะทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อหน่วย kgCOD ลดลงเล็กน้อย แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่

ผลิตได้เพิ่มขึ้นมาก ตามลำดับเป็น 0.065, 0.123, 0.221 และ 0.408 m³ อย่างไรก็ตามอัตราการบ่อนเศษอาหารสูงสุดที่ใช้ในการทดลองคือ 3.0 kgCOD/m³.day ถึงแม้จะมีการหมุนเวียนน้ำหมักแต่การผลิตก๊าซชีวภาพสะสมลดลงมากได้เพียง 0.019 m³ ทั้งนี้เนื่องจากระบบการหมักย่อยสลายกรดอินทรีย์ไม่ทันทำให้เกิดการสะสม VFA ในปริมาณที่มาก pH ต่ำ สภาพความเป็นกรด-ด่าง (VFA/alkalinity) ไม่เหมาะสมต่อกิจกรรมของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน

ผลจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานประยุกต์ใช้ในการพิจารณาออกแบบระบบการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดใหญ่ เพื่อใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารในปริมาณที่สูงได้ ซึ่งจะทำให้ระบบมีขนาดที่เหมาะสมเล็กลง ลดต้นทุนการก่อสร้าง และเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง และการช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกในการทำวิจัยจากผู้ประกอบการร้านอาหารโรงแรมมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ตลอดจนตัวแทนเกษตรกรจากตำบลอวแก้ว อำเภอห้างฉัตร จังหวัดลำปาง

เอกสารอ้างอิง

- American Public Health Association. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. United States: American Water Works Association. Water Environment Federation; 1995.
- Angelidaki I, Sanders W. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2004; 3: 117-129.
- Aslanzadeh S, Rajendran K, Jeyhanipour A. et al. The effect of effluent recirculation in a semi-continuous two-stage anaerobic digestion system. *Energies*. 2013; 6: 2966-2981.
- Barlaz MA, Ham RK, Schaefer DM. Methane production from municipal refuse: a review of enhancement techniques and microbial dynamics. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 1990; 19: 557-584.
- Giuliano A, Zanetti L, Micolucci F. et al. Thermophilic two-phase anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of municipal solid waste for bio-hythane production: effect of recirculation sludge on process stability and microbiology over a long-term pilot-scale experience. *Water Science & Technology*. 2014; 69(11): 2200-2209.
- Gottardo M, Micolucci F, Bolzonella D. et al. Pilot scale fermentation coupled with anaerobic digestion of food waste - Effect of dynamic digestate recirculation. *Renew. Energy*. 2017; 114: 455-463.
- Lindner J, Zielonka S, Oechsner H. et al. Is the continuous two-stage anaerobic digestion process well suited for all substrates?, *Bioresource Technology*. 2016; 200: 470-476.

- Lukitawes, Wikandari R, Millati R. et al. Effect of effluent recirculation on biogas production using two-stage anaerobic digestion of citrus waste. *Molecules*. 2018; 23(12): Published online 2018 Dec 19. doi:10.3390/molecules 23123380.
- McCarty LP. Anaerobic Waste Treatment Fundamental. Part 1,-chemistry and microbiology. Part 2, Environmental requirement and control. Part 3, Toxic materials and their control. *Public Works*. 1964; 9: 107-111.
- Orhorhoro KE, Ebunilo OP, Sadjere EG. Effect of Organic Loading Rate (OLR) on Biogas Yield Using a Single and Three-Stages Continuous Anaerobic Digestion Reactors. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018; 39: 147-155.
- Owen FW, Stuckey C, Healy JJB et al. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Resource*. 1979; 13(6): 485-492.
- Sinpaisansomboon N, Intanon P, Rakwichian W. et al. Development of Two-Stage Anaerobic Digesters for Biogas Production from Biodegradable Waste of Phitsanulok Municipal, Thailand. *International Journal of Renewable Energy*. 2007; 2(2): 63-71.
- Schmidt T, Pröter J, Scholwin F. et al. Anaerobic digestion of grain stillage at high organic loading rates in three different reactor systems. *Biomass and Bioenergy*, 2003; 55: 285-290.
- Stabnikova O, Liu X, Wang J. Anaerobic digestion of food waste in a hybrid anaerobic solid-liquid system with leachate recirculation in an acidogenic reactor. *Biochemical Engineering Journal*. 2008; 41(2): 198-201.
- Zuo Z, Wu S, Zhang W. et al. Effects of organic loading rate and effluent recirculation on the performance of two-stage anaerobic digestion of vegetable waste. *Bioresource Technology*. 2013; 146: 556-561.