
การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากโหละพาที่เหลือทิ้งจากการกลั่นน้ำมันหอมระเหย
โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ซึ่งทำงานร่วมกับระบบวัดและแสดงผล
ด้วยเทคโนโลยี IOT

Study on Biogas Production from Essential Oil Distillation Waste Basil
by using the Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) combined with
IOT Monitoring System

*วรพจน์ งามชมภู และพัทธกมล สมบุตร

*Worapot Ngamchompoo and Pattakamol Somboot

สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

Department of Management Engineering, Faculty of Engineering, Rajabhat Maha Sarakham
University

*ผู้นิพนธ์หลัก: worapot_1@hotmail.com

*Corresponding author: worapot_1@hotmail.com

Received
16/03/2023

Reviewed
30/03/2023

Revised
28/03/2023

Accepted
29/04/2023

Abstract

The objective of this research is to study on biogas production from essential oil distillation waste basil by using the continuous stirred tank reactor (CSTR) combined with IOT monitoring system. The CSTR reactor design consisted of six main parts: 1) the mixing tank that its function was a material preparation tank to be used for biogas production, 2) the suction pump which serves the prepared material in the mixing tank up to the reactor tank 3) CSTR reactor which inside the tank is equipped with a stirrer to increase the efficiency of the biogas production process, 4) the biogas measurement and sampling system, 5) IOT monitoring system and 6) biogas tank. The CSTR digester test found that at the optimum OLR3 (9 kgVS/m³-day), produce the highest amount of biogas at 121.56 L/day (cumulative biogas of 2416 L), the biogas has a methane content of 15.89 – 51.45%.

Keyword: Essential Oil, Biogas, Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR), Internet of Thing

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากโหราพืชซึ่งเหลือทิ้งจากการกลั่นน้ำมันหอมระเหย โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ซึ่งทำงานร่วมกับระบบวัดและแสดงผลด้วยเทคโนโลยี IOT โดยระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ CSTR ที่พัฒนาขึ้น ประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ คือ 1) ถังผสมวัสดุ ทำหน้าที่เป็นถังเตรียมวัสดุที่จะใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ 2) ป้อนสุบจ่ายวัสดุ ทำหน้าที่สูบวัสดุที่ผ่านการเตรียมแล้วในถังผสม ขึ้นไปจ่ายให้กับถังปฏิกรณ์ 3) ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ซึ่งภายในถังมีการติดตั้งใบกวน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ 4) ระบบวัดและเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ 5) ระบบวัดและแสดงผลเทคโนโลยี IOT และ 6) ถังเก็บก๊าซชีวภาพ ผลการทดสอบระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ CSTR พบว่า ที่สภาวะอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ OLR3 ($9 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณสูงสุด คือ 121.56 L/day โดยคิดเป็นก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้แบบสะสม เท่ากับ 2416 L ซึ่งก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในสภาวะนี้มีสัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซมีเทน $15.89 - 51.45\%$

คำสำคัญ: น้ำมันหอมระเหย, ก๊าซชีวภาพ, ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR, เทคโนโลยี IOT

บทนำ

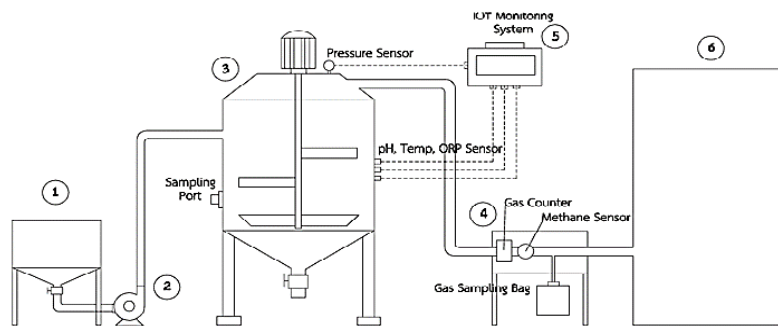
น้ำมันหอมระเหย (Essential Oil) คือน้ำมันที่สกัดได้ด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ จากส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ลำต้นตะไคร้ ใบโหรา พริกไทย และขิง เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติที่ระเหยได้ง่าย ไม่ละลายน้ำ มีกลิ่นหอม และมีคุณสมบัติทางเคมีที่เป็นเอกลักษณ์แตกต่างกันไปตามชนิดของพืช ปัจจุบันนิยมนำน้ำมันหอมระเหยมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างหลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมยาสมุนไพร อุตสาหกรรมเครื่องสำอางหรืออุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น กรรมวิธีการผลิตน้ำมันหอมระเหยในประเทศไทยส่วนใหญ่จะใช้ 3 วิธี คือ การสกัดด้วยสารละลาย การสกัดด้วยไอน้ำ และการสกัดด้วยสารเคมี โดยการสกัดด้วยไอน้ำ ปัจจุบันเป็นที่นิยมอย่างมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย ซึ่งระบบการกลั่นมีความซับซ้อนที่น้อยกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดด้วยวิธีอื่น ๆ โดยการสกัดน้ำมันหอมระเหยด้วยไอน้ำส่วนใหญ่จะใช้แก๊ส LPG เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ให้ความร้อนแก่น้ำ เพื่อผลิตไอน้ำที่ความดันบรรยากาศ ใช้ในกระบวนการกลั่น และเนื่องจากกระบวนการกลั่นน้ำมันหอมระเหยจะใช้เวลาค่อนข้างนานประมาณ 10 – 12 ชั่วโมง จึงทำให้ต้องใช้เชื้อเพลิง LPG ในปริมาณที่มากในการกลั่นแต่ละครั้ง ซึ่งทำให้ต้นทุนด้านพลังงานของอุตสาหกรรมนี้มีค่าใช้จ่ายที่สูง ดังนั้น การศึกษาเพื่อหาเทคโนโลยีที่เหมาะสมและมีศักยภาพในการลดการใช้เชื้อเพลิง LPG ในกระบวนการกลั่นนี้ได้ก็จะเป็อีกแนวทางหนึ่งที่จะสามารถลดต้นทุนการผลิตในด้านพลังงานลงได้ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ เป็นพลังงานทดแทนในกระบวนการกลั่นน้ำมันหอมระเหย เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากพบว่าภายหลังจากกระบวนการกลั่นน้ำมันหอมระเหย จะมีวัสดุเหลือทิ้งอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าว เป็นปัญหายากมากในการกำจัด โดยส่วนใหญ่ก็ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ แต่อย่างใด ดังนั้น แนวทางการนำเศษวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากการกลั่นน้ำมันหอมระเหย มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน LPG ในกระบวนการกลั่น จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจอย่างยิ่ง

ซึ่งนอกจากจะสามารถลดปริมาณการใช้เชื้อเพลิง LPG ในกระบวนการกลั่นน้ำมันหอมระเหยได้แล้ว ยังเป็นการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งอย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นการใช้ประโยชน์วัสดุได้อย่างคุ้มค่า อีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันยังขาดข้อมูลของการศึกษาในประเด็นดังกล่าว งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากโหรพาที่เหลือทิ้งจากการกลั่นน้ำมันหอมระเหย โดยใช้ถังปฏิกรณ์ แบบ CSTR ซึ่งถังปฏิกรณ์ชนิดนี้มีการติดตั้งใบกวน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการสัมผัสกันของจุลินทรีย์ และสารอาหารในถังปฏิกรณ์ เป็นผลให้มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดี จึงเหมาะที่จะใช้ กับวัสดุชีวมวลเป็นอย่างมาก (Boe and Angelidaki, 2009; Feng et al., 2018; Mamo et al., 2019; Liu et al., 2019; Afif and Linke, 2019) และในการศึกษานี้ได้ทำการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Internet of Thing (IoT) เพื่อช่วยเพิ่มความสะดวกในการวัดและแสดงค่าต่าง ๆ ในระบบ โดยช่วยเพิ่ม ประสิทธิภาพในการเชื่อมโยงข้อมูลได้อย่างรวดเร็วขึ้น ซึ่งข้อมูลผลการศึกษานี้ จะเป็นประโยชน์ อย่างมากต่อการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวนี้ ให้สามารถใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ต่อไป และสามารถใช้เป็น อีกแนวทางหนึ่งในการลดต้นทุนด้านพลังงานในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมันหอมระเหยต่อไป

วิธีการวิจัย

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ CSTR ซึ่งทำงานร่วมกับระบบวัดและแสดงผลด้วยเทคโนโลยี Internet of Thing (IoT)

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่พัฒนาขึ้นประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ คือ 1) ถังผสมวัสดุ (หมายเลข 1) ทำหน้าที่เป็นถังเตรียมวัสดุที่จะใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ 2) บั๊มสูบจ่ายวัสดุ (หมายเลข 2) ซึ่งทำหน้าที่สูบวัสดุที่ผ่านการเตรียมแล้วในถังผสมขึ้นไปจ่ายให้กับถังปฏิกรณ์ 3) ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR (หมายเลข 3) ซึ่งมีขนาด 400 L โดยภายในถังมีการติดตั้งใบกวน เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ และมีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดค่าพารามิเตอร์การทำงานต่าง ๆ 4) ระบบวัด และเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ (หมายเลข 4) ซึ่งทำหน้าที่วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้และเก็บตัวอย่าง ก๊าซชีวภาพ เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบ 5) ระบบวัดและแสดงผลเทคโนโลยี IoT (หมายเลข 5) โดยระบบนี้ใช้เทคโนโลยีการสื่อสารข้อมูลแบบ IoT และ 6) ถังเก็บก๊าซชีวภาพ (หมายเลข 6) ซึ่ง ทำหน้าที่เก็บก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ จากถังปฏิกรณ์เพื่อนำไปใช้งาน ลักษณะของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ แบบ CSTR ซึ่งทำงานร่วมกับระบบวัดและแสดงผลด้วยเทคโนโลยี Internet of Thing (IoT) แสดง ได้ดัง Figure 1 ส่วนภาพถ่ายของระบบนี้แสดงได้ดัง Figure 2



หมายเลข 1 คือ ถังผสมวัสดุ หมายเลข 2 คือ ปั๊มสูบลำจ่ายวัสดุ หมายเลข 3 คือ ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR หมายเลข 4 คือ ระบบวัดและเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ หมายเลข 5 คือ ระบบวัดและแสดงผลเทคโนโลยี IOT หมายเลข 6 คือ ถังเก็บก๊าซชีวภาพ

Figure 1 CSTR-biogas production system combined with IOT measurement and monitoring system



Figure 2 photo of CSTR-biogas production system combined with IOT measurement and monitoring system

ระบบวัดและแสดงผลด้วยเทคโนโลยี Internet of Thing (IOT) ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่พัฒนาขึ้นนี้ ทำหน้าที่วัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ และแสดงผลการวัดแบบ Real Time และแสดงผลผ่านอุปกรณ์สื่อสารอื่น ๆ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ หรือโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น ซึ่งระบบวัดและแสดงผลนี้ ประกอบไปด้วย 1) หัววัดค่า 2) ชุดอุปกรณ์รับและส่งข้อมูล (เครื่อง PLC ทำงานร่วมกับชุดอุปกรณ์ V-Box) และ 3) เครื่องคอมพิวเตอร์ โดยแผนผังการทำงานของระบบวัดและแสดงผลด้วยเทคโนโลยี Internet of Thing (IOT) แสดงได้ดัง Figure 3

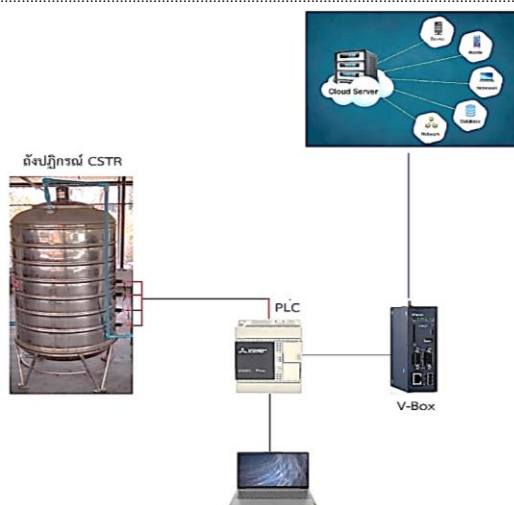


Figure 3 operation flow chart of IOT measurement and monitoring system

การทดสอบระบบ

การศึกษานี้ใช้ไบโโหมระพาที่ผ่านการกลั่นเอาน้ำมันหอมระเหยออกแล้ว เป็นวัสดุในการทดสอบ ส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานน้ำตาลวังขนาย อำเภอโกสุมพิสัย จังหวัดมหาสารคาม การทดสอบระบบจะเป็นการศึกษาถึงผลกระทบของค่าอัตราการเจริญเติบโต (OLR) ที่มีต่อปริมาณและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ และสมรรถนะของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (ค่า pH, ค่าอุณหภูมิของน้ำหมัก, ค่าความเข้มข้น COD, ค่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ VFA, ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน ORP) โดยทำการกำหนดอัตราการเจริญเติบโต 3 ระดับ คือ OLR1 ($5 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$) OLR2 ($7 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$) และ OLR3 ($9 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$) ตามลำดับ และดำเนินการเติมอัตราภาระอินทรีย์เข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพวันละ 1 ครั้ง ในเวลา 17.00 น. และตั้งระบบไบโกลวนผสมให้ทำงานวันละ 8 ครั้ง ครั้งละ 15 นาที โดยดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลา 35 วัน หลังจากเริ่ม Start Up ระบบ

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลกระทบของอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่มีต่อปริมาณและสัดส่วนก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

1. ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

จากการศึกษาโดยทำการทดสอบระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่พัฒนาขึ้น ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 3 สภาวะ คือ OLR1 เท่ากับ $5 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$ OLR2 เท่ากับ $7 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$ และ

OLR3 เท่ากับ $9 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$ ตามลำดับ โดยผลการเก็บข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้แบบรายวัน แสดงได้ดัง Figure 4 ส่วนปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้แบบสะสม แสดงได้ดัง Figure 5

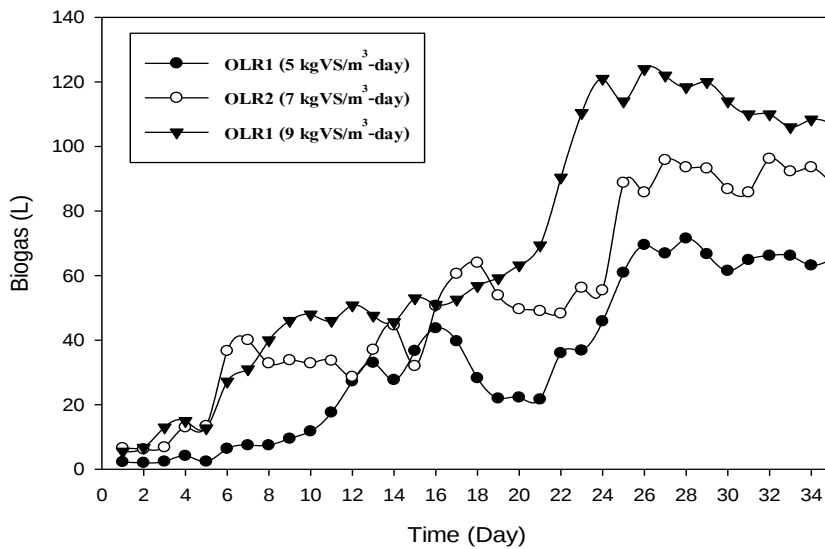


Figure 4 the daily biogas production volumes at organic loading rates (OLR) conditions

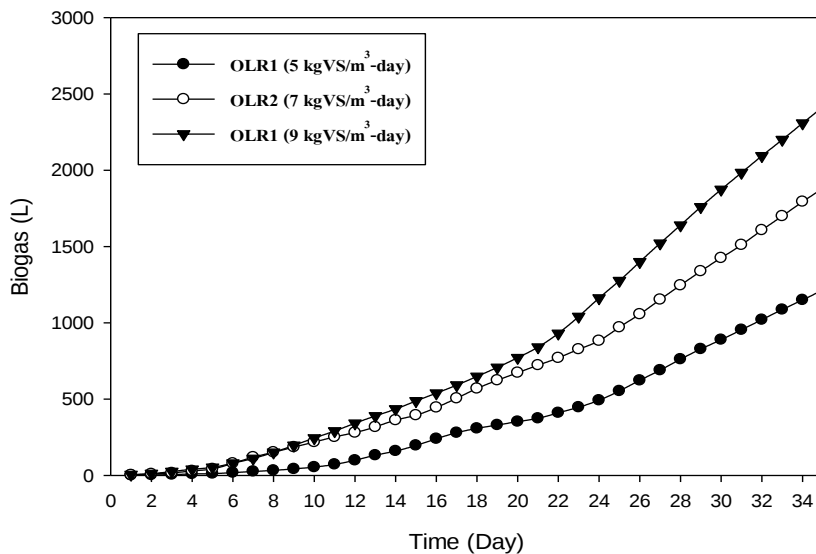


Figure 5 the cumulative biogas production volumes at organic loading rates (OLR) conditions

จากผลการเก็บข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในแต่ละวัน ซึ่งแสดงใน Figure 4 จะเห็นได้ว่า การผลิตก๊าซชีวภาพที่สภาวะอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ OLR1 (5 kgVS/m³-day) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณ 2.01-71.50 L/day และที่สภาวะอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ OLR2 (7 kgVS/m³-day) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณ 6.32-95.81 L/day ส่วนที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ OLR3 (9 kgVS/m³-day) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณ 5.51-121.56 L/day จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ในทุก ๆ สภาวะการทำงานที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ ช่วงเริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาผลิตมีเทน แบคทีเรียที่ผลิตมีเทนยังเพิ่มจำนวนได้ไม่มาก และยังปรับสภาพเข้ากับสารอินทรีย์ที่เข้ามาในระบบได้ไม่ดี ซึ่งเห็นได้จากช่วงแรกๆ นั้น ปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นน้อย แต่หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป จำนวนแบคทีเรียจะมากขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้แบบสะสมดังแสดงข้อมูลใน Figure 5 แสดงให้เห็นว่า ที่สภาวะอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ OLR3 (9 kgVS/m³-day) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้สูงที่สุด คือ 2416 L รองลงมาคือที่สภาวะอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ OLR2 (7 kgVS/m³-day) ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้ 1882 L และที่สภาวะอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ OLR1 (5 kgVS/m³-day) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้ 1215 L ตามลำดับ

2. องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

เมื่อทำการเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ ที่สภาวะการทำงานที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ระดับต่าง ๆ ซึ่งเก็บข้อมูลทุกวันเป็นระยะเวลา 35 วัน โดยนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาสัดส่วนองค์ประกอบหลักๆ ของก๊าซชีวภาพโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ก๊าซ Gas Chromatography (Detector 250°C, Oven 145°C, Flow Rate 25 ml/min, Argon Gas Carrier, ใช้ปริมาตรฉีด 0.5 ml) ผลการวิเคราะห์สัดส่วนองค์ประกอบหลัก ๆ ของก๊าซชีวภาพ แสดงได้ดัง Table 1

Table 1 composition of biogas at organic loading rates (OLR) conditions

อัตราการระบรทุก สารอินทรีย์	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (%)		
	CH ₄	CO ₂	N ₂
OLR1 (5 kgVS/m ³ -day)	6.44 – 15.89	10.77 – 14.79	12.26 – 17.90
OLR2 (7 kgVS/m ³ -day)	10.71 – 32.22	13.36 – 22.15	10.11 – 13.05
OLR3 (9 kgVS/m ³ -day)	15.89 – 51.45	40.03 – 63.06	46.20 – 69.05

หมายเหตุ : ทำการเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 35 วัน

จากผลการวิเคราะห์ใน Table 1 พบว่า ที่สภาวะอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ OLR1 ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ มีสัดส่วนของก๊าซมีเทน (CH_4) สูงสุดเท่ากับ 15.89% และมีสัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) สูงสุดเท่ากับ 14.79% และ 17.90% ตามลำดับ ส่วนที่สภาวะอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ OLR2 ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ มีสัดส่วนของก๊าซมีเทน (CH_4) สูงสุดเท่ากับ 32.22% และมีสัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) สูงสุดเท่ากับ 22.15% และ 13.05% ตามลำดับ ขณะที่ ที่สภาวะอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ OLR3 ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ มีสัดส่วนของก๊าซมีเทน (CH_4) สูงสุดเท่ากับ 51.45% และมีสัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซไนโตรเจน (N_2) เท่ากับ 63.06% และ 69.05% ตามลำดับ โดยจากการศึกษานี้ ชี้ให้เห็นว่า ที่สภาวะอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ OLR3 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงที่สุด คือ 51.45%

ผลกระทบของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่มีต่อสมรรถนะกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลการศึกษาในส่วนนี้ เป็นการศึกษาผลกระทบของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่มีต่อสมรรถนะกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยศึกษาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 3 สภาวะ คือ OLR1 ($5 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$) OLR2 ($7 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$) และ OLR3 ($9 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$) ตามลำดับ และพิจารณาสมรรถนะกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ค่าอุณหภูมิของน้ำหมัก ค่าความเข้มข้น COD ค่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ (VFA) และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP) โดยทำการเก็บข้อมูลผลการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของน้ำหมักในถังปฏิกรณ์เป็นระยะเวลา 35 วัน ผลการศึกษาแสดงได้ดัง Table 2

Table 2 effect of organic loading rates (OLR) on biogas production performance

อัตราภาระบรรทุก สารอินทรีย์	ค่าความ เป็นกรด ต่าง (pH)	อุณหภูมิของ น้ำหมัก ($^{\circ}\text{C}$)	ค่าความ เข้มข้น COD (mg/L)	ค่าความ เข้มข้นของ กรดอินทรีย์ VFA (mg/L)	ค่าความต่าง ศักย์ ออกซิเดชัน รีดักชัน ORP (mV)
OLR1 ($5 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$)	6.0-7.0	25.10 -29.20	7-7.6	1,424- 1,613	-351 ถึง -380
OLR2 ($7 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$)	6.1-7.6	26.30 -30.40	8-8.6	1,326- 1,476	-340 ถึง -371
OLR3 ($9 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$)	6.0-7.3	25.40 -27.50	9-9.6	1,118- 1,529	-348 ถึง -376

หมายเหตุ : ทำการเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 35 วัน

1. ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) เป็นตัวแปรหนึ่งที่สำคัญที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ งานวิจัยของ Cioabla et al. (2012) รายงานว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบการหมักย่อยไร้อากาศควรอยู่ในช่วงระหว่าง 6.6 ถึง 7.6 ถ้าค่าพีเอชต่ำกว่า 6.6 หรือสูงกว่า 7.6 จะยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียผลิตมีเทน ลดลงอย่างรวดเร็ว จากผลการศึกษาใน Table 2 พบว่า ในทุก ๆ สภาวะอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ศึกษา ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ในช่วงที่แบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนสามารถเจริญเติบโตได้ดี โดยที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ OLR1 (5 kgVS/m³-day) มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ระหว่าง 6.0-7.0 โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.13 ส่วนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ OLR2 (7 kgVS/m³-day) มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ระหว่าง 6.1-7.6 โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.26 ขณะที่ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ OLR3 (9 kgVS/m³-day) มีค่าความเป็นกรดต่าง (pH) อยู่ระหว่าง 6.0-7.3 โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.44

2. อุณหภูมิของน้ำหมัก

สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน อุณหภูมิการทำงาน of แบคทีเรีย จะอยู่ในช่วงเมโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิก โดยในช่วงเทอร์โมฟิลิก การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน จะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้รวดเร็วกว่าช่วงเมโซฟิลิก ทั้งในแง่ของการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยสามารถทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าช่วงเมโซฟิลิกประมาณ 20-50% นอกจากนี้ การย่อยสลายภายในช่วงอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก สามารถเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ซึ่งเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการเกิดปฏิกิริยารวมของสารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ที่มีองค์ประกอบเป็นของแข็งสูง (Adney et al., 1991) จากผลการศึกษาใน Table 2 พบว่า ที่สภาวะอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ OLR1 OLR2 และ OLR3 อุณหภูมิในระบบมีค่าอยู่ระหว่าง 25.10 -29.20°C (เฉลี่ย 26.76°C), 26.30 -30.40°C (เฉลี่ย 27.49°C) และ 25.40 -27.50°C (เฉลี่ย 26.03°C) ตามลำดับ โดยจะเห็นว่า อุณหภูมิส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 25-30°C ซึ่งอยู่ภายในช่วงอุณหภูมิที่เรียกว่าช่วงเมโซฟิลิก จึงทำให้ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของแบคทีเรียภายในถังปฏิกรณ์

3. ค่าความเข้มข้น COD

ค่าความเข้มข้น COD คือ ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการเพื่อใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในระบบให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยอาศัยหลักการที่ว่า สารอินทรีย์เกือบทั้งหมด สามารถที่จะถูกออกซิไดส์โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรงภายใต้สภาวะที่เป็นกรด จากผลการเก็บข้อมูลค่าความเข้มข้น COD ของน้ำหมัก ที่สภาวะอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ ดังแสดงใน Table 2 พบว่า อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ OLR1 มีค่าความเข้มข้น COD อยู่ระหว่าง 7-7.6 mg/L โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.26 mg/L ส่วนอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ OLR2 มีค่าความเข้มข้น COD อยู่ระหว่าง 8-8.6 mg/L โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.26 mg/L ขณะที่

ที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ OLR3 มีค่าความเข้มข้น COD อยู่ระหว่าง 9-9.6 mg/L โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.26 mg/L

4. ค่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ (VFA)

ค่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ (VFA) เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากต่อการทำงานของแบคทีเรีย ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยค่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ควรมีค่าไม่เกิน 2,000 mg/L (สำนักงานวิจัยและค้นคว้าพลังงาน, 2556) จากผลการทดลองใน Table 2 พบว่าที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ OLR1 มีค่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ (VFA) อยู่ระหว่าง 1,424-1,613 mg/L โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1,503 mg/L ส่วนที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ OLR2 มีค่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ (VFA) อยู่ระหว่าง 1,326-1,476 mg/L โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1373 mg/L ขณะที่ ที่อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ OLR3 มีค่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ (VFA) อยู่ระหว่าง 1,118-1,529 mg/L โดยคิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1244 mg/L โดยจากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า ค่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ (VFA) ของทั้งสภาวะอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ OLR1 อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ OLR2 และอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ OLR3 มีค่าไม่เกินค่ามาตรฐาน (2,000 mg/L) ซึ่งส่งเสริมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบ

5. ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP)

ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (Oxidation reduction potential; ORP) เป็นการวัดค่าไอออนในน้ำหมัก ที่สะท้อนความสามารถของโมเลกุลในการออกซิไดซ์ โดยค่า ORP ถูกวัดเป็นแรงดันไฟฟ้า แสดงค่าเป็นตัวเลขบวกและลบในหน่วยมิลลิโวลต์ (mV) ซึ่งจะถูกวัดเพื่อกำหนดค่าศักย์ออกซิไดซ์ของตัวอย่างน้ำหมัก ซึ่งบ่งชี้ว่าอาจมีการปนเปื้อน จากผลการศึกษาใน Table 2 พบว่าที่สภาวะอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ OLR1 OLR2 OLR3 ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันในน้ำหมักในระบบ มีค่าใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง -340 ถึง -380 mV ตามลำดับ Gerardi (2003) รายงานว่า ตามปกติแล้ว ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP) ที่เหมาะสมกับแบคทีเรียในกลุ่มสร้างมีเทน ในระบบหมักย่อยแบบไร้อากาศไม่ควรเกินค่า -400 mV ดังนั้น ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน ที่สภาวะอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ทุกสภาวะที่ศึกษา จึงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเดินระบบ

สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่พัฒนาขึ้น โดยใช้โพรพาที่ผ่านการกลั่นเอาน้ำมันหอมระเหยออกแล้ว เป็นวัสดุหมัก โดยศึกษาผลกระทบของอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่มีต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่า ที่สภาวะอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ OLR3 (9 kgVS/m³-day) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณสูงสุด คือ 121.56 L/day โดยคิดเป็นก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้แบบสะสม เท่ากับ 2416 L ซึ่งก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในสภาวะนี้มีสัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซมีเทน

15.89 – 51.45% รองลงมาคือที่สภาวะอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ OLR2 ($7 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$) ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณสูงสุด คือ 95.81 L/day คิดเป็นก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้แบบสะสม เท่ากับ 1882 L ซึ่งก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในสภาวะนี้มีสัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซมีเทน $10.71 - 32.22\%$ ขณะที่ ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ OLR1 ($5 \text{ kgVS/m}^3\text{-day}$) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ ปริมาณสูงสุด คือ 71.50 L/day คิดเป็นก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้แบบสะสม เท่ากับ 1215 L โดยก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีสัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซมีเทน $6.44 - 15.89\%$ ผลการศึกษาสมรรถนะของ กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่า ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ค่าอุณหภูมิของน้ำหมัก ค่าความเข้มข้น COD ค่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ (VFA) และค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP) อยู่ใน เกณฑ์ที่ส่งเสริมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาการขยายขนาดของระบบกลั่นน้ำมันหอมระเหยที่พัฒนาขึ้นนี้ เพื่อให้ใช้กับ อุตสาหกรรมขนาดใหญ่ขึ้นได้
2. ควรมีการพัฒนากระบวนการกลั่นน้ำมันหอมระเหยให้เป็นระบบการทำงานแบบต่อเนื่อง โดย จะทำให้ไม่ต้องหยุดระบบบ่อยครั้ง ซึ่งจะช่วยให้ประหยัดพลังงานและเพิ่มผลผลิตได้
3. ควรมีการศึกษาทดลองเดินระบบกลั่นน้ำมันหอมระเหยในระยะยาวมากขึ้น เช่น 300-400 ชั่วโมง เพื่อเก็บข้อมูลการทำงานของระบบ ซึ่งใช้สำหรับพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดี ยิ่งขึ้นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ ทางคณะผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริม วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2565

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สำหรับเครื่องมือและคำแนะนำในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่สนับสนุนในส่วนของอุปกรณ์และเครื่องมือในการดำเนินการวิจัย

สุดท้ายคณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ที่สนับสนุนทั้งอาคาร สถานที่ และการดำเนินการต่าง ๆ จนโครงการสำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ ที่วางไว้

References

- Afif, R. A., & Linke, B. (2019). Biogas production from three-phase olive mill solid waste in lab-scale continuously stirred tank reactor. *Energy*, 171, 1046-1052.
- Adney, W. S., Rivard, C. J., Shiang, M. & ME, H. (1991). Anaerobic digestion of lignocellulosic biomass and wastes - Cellulases and related enzymes. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 30(2), 165-183.
- Boe, K., & Angelidaki, I. (2009). Serial CSTR digester configuration for improving biogas production from manure. *Water research*, 43, 166-172.
- Cioabla, A. E., Ionel, I., Dumitrel, G. A., & Popescu, F. (2012). Comparative study on factors affecting anaerobic digestion of agricultural vegetal residues. *Biotechnology for Biofuels*, 5(39), 1-9.
- Feng, L., Ward, A. J., Guixé, P. G., Moset, V., & Moller, H.B. (2018). Flexible biogas production by pulse feeding maize silage or briquetted meadow grass into continuous stirred tank reactors. *Biosystems Engineering*, 174, 239-248.
- Gerardi, M. H. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters*. Handbook, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Liu, Y., Wachemoa, A. C., Yuan, H., & Li, X. (2019). Anaerobic digestion performance and microbial community structure of corn stover in three-stage continuously stirred tank reactors. *Bioresource Technology*, 287, 1-10.
- Mamo, T. Z., Dutta, A., & Jabasingh, S. A. (2019). Start-up of a pilot scale anaerobic reactor for the biogas production from the pineapple processing industries of Belgium. *Renewable Energy*, 134, 241-246.