

การผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัว โดยการหมักแบบกะและแบบกึ่งกะ Biogas Production from Co-Digestion of Pretreated Spent Grounds Coffee with Cow Dung (Manure) by Batch and Fed-Batch Fermentation

ประภา โส๊ะสลาม¹ ธัญญิณีธี เจริญธนภัสร์² และรัชพล พะวงศรีรัตน์^{3*}
Prapa Sohsalam¹ Thuntidee Charoenthanaphat² and Ratchapol Pawongrat^{3*}

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวด้วยกระบวนการหมักแบบกะและกึ่งกะ โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว 4 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก (คิดเป็นร้อยละ 10 ของปริมาณของแข็งทั้งหมด) ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 วัน จากผลการทดลองด้วยกระบวนการหมักแบบกะ พบว่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) มีผลต่อปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น โดยที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 24:1 (C:N 24:1) จะได้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุด คือ 44.50 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยง่าย ดังนั้นอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 24:1 จึงถูกนำมาศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยวิธีการหมักแบบกึ่งกะ โดยแบ่งเติมสารอินทรีย์เข้าระบบ คือ เติมทุก 2 วัน จำนวน 2 ครั้ง (แบบที่ 1) และเติมทุก 3 วัน จำนวน 2 ครั้ง (แบบที่ 2) เป็นเวลา 15 วัน จากผลการทดลองพบว่า แบบที่ 1 จะได้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุด คือ 38.00 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย มีปริมาณขององค์ประกอบที่เป็นแก๊สมีเทน (CH₄) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เท่ากับร้อยละ 20.12 และ 6.47 โดยปริมาตร ตามลำดับ

คำสำคัญ: แก๊สชีวภาพ กากกาแฟ มูลวัว การหมักแบบกะ การหมักแบบกึ่งกะ

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

² สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

³ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวผลิตภัณฑ์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

* Corresponding author e-mail: rafaelford@yahoo.com

DOI: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2023.v42i2.254904>

Received: 5 September 2022, Revised: 3 October 2022, Accepted: 17 October 2022

Abstract

This research aimed to investigate the biogas production from co-digestion of pretreated spent ground coffee and cow manure in batch and fed-batch fermentation processes at 35°C. The ratio of pretreated coffee grounds to cow manure was 4:1 representing 10% of the total solids solid material. The experimental results of the batch fermentation process were showed that the carbon-to-nitrogen ratio (C:N ratio) of coffee grounds with cow manure at 24:1 has maximum biogas yield of 44.50 milligram per gram volatile solids (mL/g-VS). Therefore, this optimum C:N ratio (24:1) was used for biogas production in a semi-batch fermentation process. However, when adding organic substances to the system every 2 days, which was 3 times for 15 days, the maximum biogas content was Type 1 (the maximum accumulated biogas was 38.00 mL/g-VS) and the amount of methane and carbon dioxide were 20.12% and 6.47%.

Keywords: Biogas, Spent grounds coffee, Cow dung, Batch fermentation, Fed-batch fermentation

บทนำ

สืบเนื่องจากการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจอย่างรวดเร็วและการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกนำไปสู่ความต้องการใช้ทรัพยากรทางด้านพลังงานเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงลดน้อยลงและราคาพลังงานปรับตัวสูงขึ้น ทำให้ต้องมีการพัฒนาหาแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนและไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อลดการพึ่งพาพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล และลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก (นัฐติและคณะ, 2566) แก๊สชีวภาพ (biogas) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ซึ่งแก๊สชีวภาพมีแก๊สมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบหลัก เป็นพลังงานสะอาดสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงหุงต้ม ผลิตไฟฟ้า หรือผลิตความร้อนได้ โดยแก๊สมีเทน 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทดแทนแก๊สหุงต้มได้ประมาณ 0.46 กิโลกรัม หรือผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 2.09 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2561) ส่งผลให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในครัวเรือนได้ การผลิตแก๊สชีวภาพสามารถทำได้หลายแหล่งวัตถุดิบแต่การผลิตแก๊สชีวภาพจากชีวมวล (biomass) ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่มีจำนวนมาก โดยเฉพาะประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) ซึ่งเป็นกลุ่มของชีวมวลที่มีองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด ชานอ้อย เป็นต้น (อรุณี, 2555) ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้การย่อยสลายของจุลินทรีย์เป็นไปได้ยาก จึงจำเป็นต้องมีการปรับสภาพ (pretreatment) โดยอาจใช้วิธีทางเคมี กายภาพ หรือชีวภาพ เพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ (Zheng *et al*, 2014) โดยชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพจะถูกนำมาหมักร่วมกับของเสียจากปศุสัตว์ เช่น มูลวัว เนื่องจากมีเชื้อจุลินทรีย์จำนวนมากที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ (Corro *et al*, 2013) การผลิตแก๊สชีวภาพนิยมใช้กระบวนการ

หมักเพื่อแก๊สชีวภาพที่แตกต่างกัน แต่ที่น่าสนใจ คือ กระบวนการหมักแบบกะ เป็นการหมักที่มีการเติมอินทรีย์วัสดุในการหมักเพียงครั้งเดียว และแบบกึ่งกะเป็นการหมักที่มีการเติมอินทรีย์วัสดุตามสัดส่วนที่เหมาะสม เพื่อลดปัญหาการสะสมของสารอินทรีย์ที่มีผลต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ (กิตติยา และคณะ, 2559) นอกเหนือจากวัสดุชีวมวลที่ได้จากภาคเกษตรกรรมแล้ว ในปัจจุบันวัสดุที่เหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม เช่น กากกาแฟ ยังเป็นหนึ่งในแหล่งวัตถุดิบที่น่าสนใจ กาแฟถือว่าเป็นเครื่องดื่มที่ได้รับความนิยม ในประเทศไทยมีการบริโภคและนำเข้ากาแฟเพิ่มขึ้นจากปี พ.ศ. 2560 จำนวน 1,350 ตัน เป็น 1,415 ตัน ในปี พ.ศ. 2564 คิดเป็นร้อยละ 2.9 และมีแนวโน้มที่สูงขึ้นในอนาคต (International Coffee Organization, 2022) ซึ่งในกระบวนการผลิตกาแฟสำเร็จรูปนั้นจะมีกากกาแฟเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก คาดว่าในปี พ.ศ. 2565 จะมีกากกาแฟเหลือทิ้งประมาณ 290,000 ตันต่อปี (ณัฐพงศ์, 2562) นอกจากกากกาแฟจะเป็นชีวมวลทางอุตสาหกรรมที่เหลือทิ้งแล้วยังมีโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ได้ยาก การปรับสภาพจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับโครงสร้างทั้งทางเคมีและทางกายภาพส่งผลให้สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงได้ และยังสามารถใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ (นฤภัทร และพัชรี, 2558; จุฑาภรณ์ และนาวัน, 2560; รพีพรรณ, 2560; ณัฐพงศ์, 2562)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการศึกษาศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับการใช้มูลวัวด้วยกระบวนการหมักแบบกะและแบบกึ่งกะเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด นอกจากนี้การนำกากกาแฟมาใช้ประโยชน์สามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อม รวมถึงลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศผลิตเป็นพลังงานใช้ทดแทนเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ก่อให้เกิดความยั่งยืนและมั่นคงต่อไปในอนาคต

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างกากกาแฟและมูลวัว

เก็บตัวอย่างกากกาแฟ (จากร้านกาแฟไทยสไตล์ จังหวัดราชบุรี) นำไปตากผึ่งแดด เป็นเวลา 2-3 วัน แล้วนำมาบดเพื่อลดขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 1-2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างใส่ถุงพลาสติกปิดปากถุงให้สนิท ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยเครื่อง fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) ศึกษาโครงสร้างภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope: SEM) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio)

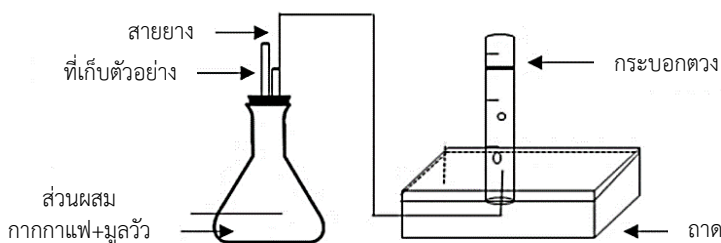
เก็บตัวอย่างมูลวัวแห้งจากโคเนื้อ (CD) (จากคณะสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม) นำไปตากแดด เป็นเวลา 2-3 วัน จากนั้นนำมาบดเพื่อลดขนาดโดยการร่อนผ่านตะแกรง ขนาด 1-2 มิลลิเมตร ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solid: TS) ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (volatile solids: VS) ศึกษาโครงสร้างภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน จากนั้นเก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิท เพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป

2. การปรับสภาพของกากกาแฟ

การปรับสภาพเพื่อเตรียมตัวอย่างกากกาแฟโดยวิธีทางเคมี ดัดแปลงมาจากวิธีการของ จุฑาภรณ์ และนาวัน (2560) โดยนำกากกาแฟจำนวน 1,000 กรัม แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2 โมลาร์ อัตราส่วน 1:10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นเวลา 32 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำ จนน้ำล้างมีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง (ความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7) แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน ศึกษาโครงสร้างภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยเครื่อง FT-IR จากนั้นเก็บกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ (pretreated coffee: PC) ไว้ในภาชนะที่ปิดสนิท เพื่อใช้ในขั้นตอนต่อไป

3. การศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกะ (batch fermentation)

การศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกะ ดัดแปลงวิธีการมาจากวิธีการของ Pilanee *et al.* (2011) โดยกำหนดอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่แตกต่างกันคือ 21:1 24:1 และ 27:1 ตามลำดับ ใช้อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว (PC:CD) เท่ากับ 4:1 โดยน้ำหนัก (คิดเป็นร้อยละ 10 ของปริมาตรทั้งหมด) เติมน้ำกลั่นปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 500 มิลลิลิตร ในชุดอุปกรณ์การผลิตแก๊สชีวภาพ (ภาพที่ 1) ทำการไล่อากาศในขวดรูปชมพู่โดยใช้แก๊สไนโตรเจน ปิดด้วยจุกยาง ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (35 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 15 วัน หรือจนกว่าปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นคงที่ ทำการบันทึกปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นโดยวิธีการแทนที่น้ำทุก ๆ 3 วัน วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นรายวัน ปริมาณแก๊สสะสม และคุณสมบัติทางกายภาพของวันแรกและวันสุดท้ายของการหมัก



ภาพที่ 1 ชุดอุปกรณ์การผลิตแก๊สชีวภาพ
ที่มา: ดัดแปลงจากกิตติยา และคณะ (2559)

4. การศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกึ่งกะ (fed-batch fermentation)

การผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟร่วมกับมูลวัวโดยใช้กระบวนการหมักแบบกึ่งกะ ทำการทดลองคล้ายกับการผลิตแก๊สชีวภาพโดยใช้กระบวนการหมักแบบกะ โดยกำหนดค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 24:1 มีการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เติมทุก 2 วัน จำนวน 2 ครั้ง และแบบที่ 2 เติมทุก 3 วัน จำนวน 2 ครั้ง โดยอัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว แบ่งเติมสารอินทรีย์เข้าระบบครั้งแรก 12:3 โดยน้ำหนัก และเติมครั้งละ 4:1 โดยน้ำหนัก เติมเข้าในระบบแบบที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ทำการบันทึกแก๊สที่เกิดขึ้นโดยวิธีการแทนที่น้ำทุกวัน วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นรายวัน ปริมาณแก๊สสะสม วิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (gas chromatography: GC) (ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 8A, Japan) ได้แก่ แก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และคุณลักษณะทางเคมีของวันแรกและวันสุดท้ายของการหมัก

5. การวิเคราะห์

การวิเคราะห์ทางองค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟที่ไม่ผ่านการปรับและผ่านการปรับสภาพและมูลวัว โดยดัดแปลงมาจากวิธีการของ Horwitz (1980) วิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยง่าย ปริมาณของแข็งแขวนลอย (suspended solids: SS) ค่าซีโอดี (chemical oxygen demand: COD) การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด โดยดัดแปลงจากวิธีการของมันสัน (2551) การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Walkley and Black (1934) การวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส ได้แก่ ปริมาณแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายนอกด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีโดยเครื่อง FT-IR โดยสแกนในช่วงความยาวคลื่น 4,000-600 เซนติเมตร⁻¹ เปรียบเทียบกับ Avicel (เซลลูโลสทางการค้า)

6. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ขั้นตอนในการวิจัยและผลการทดลองทำทั้งหมด 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (one-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาคุณลักษณะทางเคมีเบื้องต้นของกากกาแฟและมูลวัว

กากกาแฟเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณเซลลูโลสค่อนข้างต่ำแต่ปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูง เมื่อเทียบกับวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทอื่น ๆ โดยการปรับสภาพจะช่วยกำจัดลิกนินซึ่งมีสมบัติไปห่อหุ้มหรือเคลือบโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ลิกนินจึงเป็นเหมือนผนังป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงวัตถุดิบได้ง่ายขึ้น (รัชพล, 2558) จากผลการศึกษาวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ของกากกาแฟที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพและมูลวัว จากตารางที่ 1

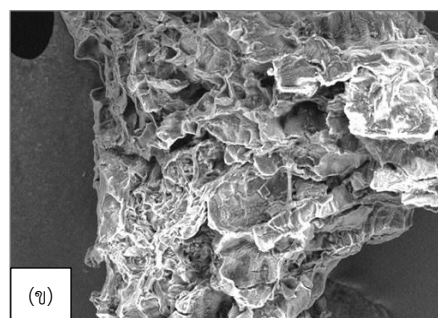
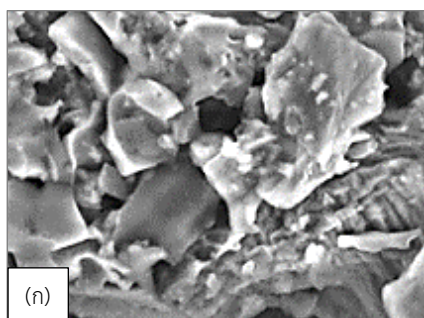
พบว่าเซลลูโลสมีการเพิ่มปริมาณขึ้นจากร้อยละ 3.50 เป็นร้อยละ 7.48 ส่วนลิกนินมีปริมาณลดลงจากร้อยละ 38.15 เป็นร้อยละ 17.37 นอกจากนี้องค์ประกอบอื่น ๆ ได้แก่ สารประกอบอนินทรีย์ เช่น เถ้า มีปริมาณลดลงจากร้อยละ 49.65 เป็นร้อยละ 20.50 แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพโดยสารละลายต่าง ส่งผลต่อโครงสร้างของตัวอย่างและองค์ประกอบทางเคมีโดยเฉพาะเซลลูโลสและลิกนิน สอดคล้องกับงานวิจัยของสิริวรรณ (2561) และน้ำหนักตัวอย่างที่เหลือหลังการปรับสภาพคิดเป็นร้อยละ 75.58 ส่วนมูลวัวมีปริมาณเซลลูโลสเท่ากับร้อยละ 2.16 ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของอุตสาหกรรมฐานชีวภาพ (2561) ที่กล่าวไว้ว่ามูลวัวส่วนใหญ่มีปริมาณเซลลูโลสอยู่ในช่วงร้อยละ 1.60-4.40

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพและมูลวัว

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	กากกาแฟ		มูลวัว
	ไม่ผ่านการปรับสภาพ	ผ่านการปรับสภาพ	
เซลลูโลส	3.50±0.08	7.48±0.24	2.16±0.04
เฮมิเซลลูโลส	29.48±0.44	33.87±0.27	30.01±0.05
ลิกนิน	38.15±0.45	17.37±0.15	15.92±0.15
อื่น ๆ (เถ้า)	49.65±0.21	20.50±0.42	51.90±0.10
น้ำหนักที่เหลือ	100.00±0.00	75.58±0.11	

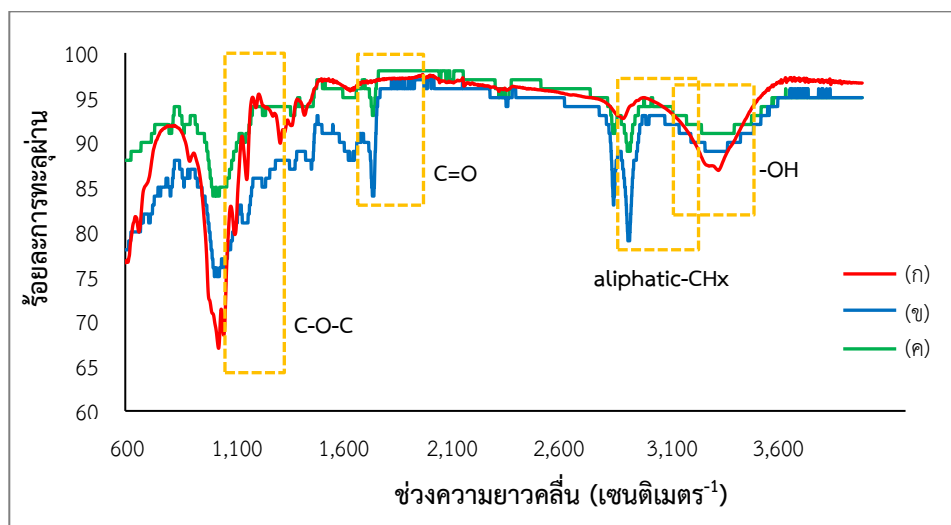
หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะโครงสร้างภายนอกบริเวณพื้นที่ผิวของกากกาแฟโดยกล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เปรียบเทียบระหว่างกากกาแฟที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ภาพที่ 2 ก) และกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ (ภาพที่ 2 ข) พบว่ากากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพมีพื้นที่ผิวสัมผัสและรูพรุนขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้เพิ่มโอกาสในการย่อยสลายของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของรัชพล (2558) กล่าวว่า การปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) จะมีความเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการกำจัดส่วนที่ไม่เป็นระเบียบของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสออกไป เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ



ภาพที่ 2 ลักษณะโครงสร้างภายนอกบริเวณพื้นที่ผิวของกากกาแฟที่กำลังขยาย 1,000 เท่า ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ก) และที่ผ่านการปรับสภาพ (ข)

จากผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของกากกาแฟด้วยเครื่อง FT-IR โดยศึกษาโครงสร้างทางเคมีของสารประกอบอินทรีย์ด้วยการดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรด เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 3 พบว่าลักษณะของพีคที่ปรากฏจำแนกออกได้ 3 ช่วงหลัก ๆ ตามหมู่ฟังก์ชันที่เป็นส่วนประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยช่วงเลขคลื่น 2,922-2,923 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของ aliphatic-CHx ซึ่งเป็นโครงสร้างของเซลลูโลส ช่วงเลขคลื่น 1,638-1,743 เซนติเมตร⁻¹ แสดงหมู่ C=O แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส และช่วงความยาวคลื่น 1,010-1,029 เซนติเมตร⁻¹ แสดงการสั่นของหมู่ C-O-C ใน aryl-alkyl ether ของลิกนิน เมื่อพิจารณาความเปลี่ยนแปลงระหว่าง FT-IR spectrum ของกากกาแฟที่ไม่ผ่านการปรับสภาพกับกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และ Avicel พบว่าเมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำให้มีปริมาณของลิกนินลดลง ส่วนปริมาณของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของสิริวรรณ (2561) ที่พบว่าสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลต่อโครงสร้างทางเคมีของลิกนินทำให้สัดส่วนปริมาณเซลลูโลสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การนำตัวอย่างประเภทลิกโนเซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีศักยภาพมากขึ้น



ภาพที่ 3 FT-IR spectrum ของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ Avicel (เซลลูโลสทางการค้า) (ก) กากกาแฟที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ข) และกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ (ค)

นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีเบื้องต้นของกากกาแฟที่ไม่ผ่านการปรับสภาพและผ่านการปรับสภาพและมูลวัว (ตารางที่ 2) พบว่าในส่วนของกากกาแฟมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงจาก 9.25 เป็น 7.80 สำหรับปริมาณของแข็งทั้งหมดมีปริมาณลดลงจาก 866.67 มิลลิตรต่อกรัม เป็น 765.48 มิลลิตรต่อกรัม และปริมาณของแข็งระเหยง่ายมีปริมาณเพิ่มขึ้นจาก 489.72 มิลลิตรต่อกรัม เป็น 550.46 มิลลิตรต่อกรัม จะเห็นได้ว่าการปรับสภาพนั้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณลักษณะเบื้องต้นทางเคมีของกากกาแฟ เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไปทำให้สารอินทรีย์บางส่วนในกากกาแฟลดลง แต่สามารถเพิ่มองค์ประกอบของปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพและการปรับสภาพยังส่งผลต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ให้ง่ายมากขึ้น ทำให้ขั้นตอนการผลิตแก๊สเกิดขึ้นได้มากขึ้นเช่นกัน (กิตติยา และคณะ, 2559) ในขณะที่มูลวัวมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 64.19 มิลลิตรต่อกรัม และปริมาณของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 13.33 มิลลิตรต่อกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของจุฬารักษ์ และนาวัน (2560) มีปริมาณของแข็งทั้งหมดและปริมาณของแข็งระเหยง่ายมีค่าน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากมูลวัวที่ใช้เป็นมูลวัวแห้งที่ผ่านการย่อยสลายมาแล้วทำให้ปริมาณของสารอินทรีย์ในมูลที่ใช้อาจจะแตกต่างจากมูลวัวสด และการสุ่มตัวอย่างมาจากแหล่งที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 2 คุณลักษณะทางเคมีเบื้องต้นของกากกาแฟที่ไม่ผ่านและผ่านการปรับสภาพและมูลวัว

ลักษณะทางเคมี	กากกาแฟ		มูลวัว
	ไม่ผ่าน การปรับสภาพ	ผ่าน การปรับสภาพ	
ความเป็นกรด-ด่าง	9.25±0.28	7.80±0.12	8.25±0.15
ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (มิลลิตรต่อกรัม)	489.72±1.37	550.46±1.26	13.33±1.18
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (มิลลิตรต่อกรัม)	866.67±1.82	765.48±3.02	64.19±1.06

หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

2. ผลการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกะ

จากการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัว พบว่าในระยะเวลา 3 วันแรก ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นรายวันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยอัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัวที่อัตราส่วน 24:1 ให้ปริมาณแก๊สชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 44.50 มิลลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย ซึ่งอาจอยู่ในช่วงของอะซิโดจีเนซิส (acidogenesis) และเริ่มลดลงเนื่องจากเข้าสู่ช่วงเมทาโนจีเนซิส (methanogenesis) ชุดควบคุมช่วงวันที่ 6 มีแนวโน้มการผลิตที่เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าการหมักร่วมกันของกากกาแฟร่วมกับมูลวัวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ เมื่อเทียบกับการใช้มูลวัวเพียงอย่างเดียวและกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพเนื่องจากมีการผสมมูลวัวที่ทำหน้าที่เหมือนเป็นแหล่งจุลินทรีย์ และอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 24:1 ดีที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kim *et al.* (2017) ส่งผลให้ขั้นตอนการผลิตเมทาโนจีเนซิสเกิดได้อย่างรวดเร็ว

ตารางที่ 3 ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุดของของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่แตกต่างกันในการหมักแบบกะ เป็นระยะเวลา 15 วัน

อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (โดยน้ำหนัก)	ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสม (มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย)
กากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ (21:1)	28.08±2.58 ^d
กากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ (24:1)	35.10±2.31 ^c
กากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพ (27:1)	28.75±0.43 ^d
มูลวัว (21:1)	35.50±1.19 ^c
อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว (21:1)	36.00±0.29 ^c
อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว (24:1)	44.50±1.53 ^a
อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว (27:1)	39.50±1.32 ^b

หมายเหตุ: - a b และ c เป็นค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

- ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

จากตารางที่ 3 แสดงปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมระหว่างชุดควบคุม (แบบกะ) และอัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัว ที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่แตกต่างกัน โดย อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพต่อมูลวัวที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 24:1 ให้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 44.50 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมแต่ละอัตราส่วน จากรายงานการวิจัยของ Kim *et al.* (2017) กล่าวว่าค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของกากกาแฟที่เท่ากับ 23:1 เป็นค่าที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ และเป็นช่วงที่เหมาะสม คือ อยู่ในช่วงของ 20-30 (Yen and Brune, 2007) ถ้าค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงมากแบคทีเรียในกลุ่มเมทาโนเจน (methanogen) จะใช้ไนโตรเจนหมดอย่างรวดเร็วส่งผลให้การผลิตแก๊สต่ำ ในทางกลับกัน ถ้าค่าอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำมาก ๆ จะทำให้ไนโตรเจนมีมากเกินไปและไปเกาะกันเป็นแอมโมเนีย ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 8.50 และเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่ผลิตมีเทนได้

การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีในวันแรกและวันสุดท้ายของการผลิตแก๊สชีวภาพ จากตารางที่ 4 พบว่าแต่ละอัตราส่วนมีปริมาณสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายในวันแรกของระบบจะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของเวสราซและคณะ (2558) ที่กล่าวว่าการหมักแบบกะเป็นการหมักที่มีการเติมวัสดุในการหมักเพียงครั้งเดียว ดังนั้นเมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณสารอินทรีย์ (ค่าปริมาณของแข็งระเหยง่าย) จะลดลง เพราะจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างต่อเนื่อง โดยผลการทดลองมีการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 7.95-17.50 การกำจัดปริมาณของแข็งระเหยง่ายอยู่ในช่วงร้อยละ 16.84-48.50 ส่วนช่วงอุณหภูมิในการศึกษา พบว่าอยู่ในช่วง 32-35 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 6-7 สอดคล้องกับกิตติยา และคณะ (2559) เพราะเมทาโนเจนทนต่ออุณหภูมิที่ต่ำหรือสูงมากเกินไป โดยการทำงานของระบบนี้จะอยู่ในช่วงเมโซฟิลิก (mesophilic period) (ประมาณ 20-45 องศาเซลเซียส) และค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวภาพนั้นควรจะอยู่ในช่วง 6.8-7.2

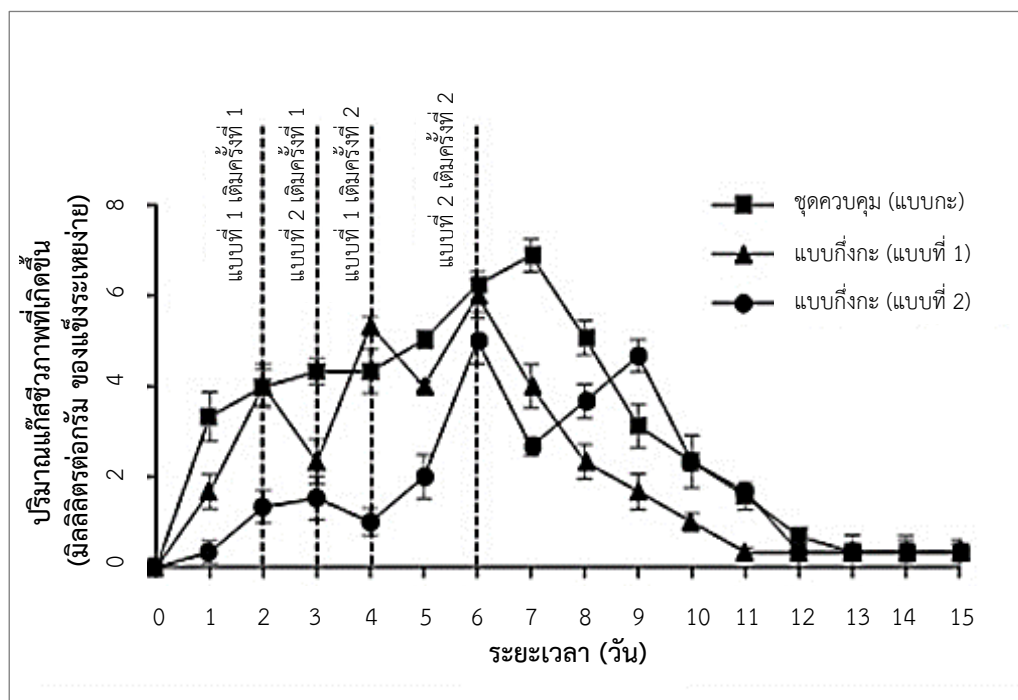
ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีในวันแรกและวันสุดท้ายของการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกะ ในอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่แตกต่างกันใน วันที่ 0 และวันที่ 15

อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (โดยน้ำหนัก)	ลักษณะทางเคมี (มิลลิกรัมต่อกรัม)	วันที่ 0	วันที่ 15	ร้อยละการกำจัด
มูลวัว (21:1)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	526.18±0.01	484.37±1.59	7.95
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	330.17±1.59	274.57±0.78	16.84
มูลวัว (24:1)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	564.46±0.87	513.49±0.89	9.03
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	327.15±0.01	255.17±0.36	22.00
มูลวัว (27:1)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	550.78±1.69	500.22±1.89	9.18
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	362.46±2.89	286.27±2.69	21.02
มูลวัว (21:1)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	300.13±0.36	275.89±1.98	8.08
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	60.48±1.89	46.47±5.69	23.16
อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่าน	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	600.14±1.91	548.48±4.32	8.61
การปรับสภาพต่อมูลวัว (21:1)	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	331.47±0.89	248.47±1.58	25.04
อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่าน	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	663.27±0.01	547.2±2.69	17.50
การปรับสภาพต่อมูลวัว (24:1)	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	434.58±1.58	223.79±1.01	48.50
อัตราส่วนกากกาแฟที่ผ่าน	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	598.38±0.96	545.35±0.89	8.86
การปรับสภาพต่อมูลวัว (27:1)	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	343.45±0.23	249.18±1.55	27.45

หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD)

3. ผลการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกึ่งกะ

จากการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวในกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ โดยใช้อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมจากการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกะเท่ากับ 24:1 ทำการศึกษารูปแบบการเติมสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ การหมักแบบกึ่งกะ แบบที่ 1 เติมน้ำวันที่ 2 และ 4 และแบบที่ 2 เติมน้ำวันที่ 3 และ 6 จากภาพที่ 4 พบว่าการผลิตแก๊สทั้งสองแบบจะเกิดปริมาณแก๊สชีวภาพดีในช่วง 7 วันแรก จากนั้นจะเริ่มลดลงและคงที่ตั้งแต่วันที่ 12 โดยทั้งสองแบบจะมีปริมาณแก๊สชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากทุกครั้งหลังจากที่มีการแบ่งเติมสารอินทรีย์ลงไปในระบบซึ่งทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เรื่อย ๆ และแปรสภาพเป็นแก๊สมีเทนได้ในขณะที่การเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักเพียงครั้งเดียว (แบบกะ) ทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์และแปรสภาพเป็นแก๊สมีเทนได้ดีในช่วงแรก นอกจากนี้สารอาหารมีจำกัดต่อความต้องการของจุลินทรีย์ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพที่ลดลง โดยพบว่า แบบที่ 1 สามารถผลิตแก๊สได้ดีกว่าจึงส่งผลให้ผลิตแก๊สชีวภาพได้ดีกว่า



ภาพที่ 4 ปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกึ่งกะที่อัตราส่วนการเติมสารอินทรีย์ ๆ เป็นระยะเวลา 15 วัน

ปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพสะสมที่ได้เมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุม (แบบกะ) และการหมักแบบกึ่งกะ (แบบที่ 1 และแบบที่ 2) พบว่าชุดควบคุม (แบบกะ) มีปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมเท่ากับ 47.65 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่การหมักแบบกึ่งกะ แบบที่ 1 มีแนวโน้มการผลิตแก๊สชีวภาพสะสมได้ดีกว่า แบบที่ 2 ซึ่งมีปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมเท่ากับ 38.00 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย และ 27.67 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น พบว่าชุดควบคุม (แบบกะ) และการหมักกึ่งกะ แบบที่ 1 ให้ปริมาณแก๊สมีเทนไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับร้อยละ 18.40 และ 20.12 โดยปริมาตร ตามลำดับ ส่วนปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าชุดควบคุม (แบบกะ) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับร้อยละ 22.80 โดยปริมาตร ดังตารางที่ 5 ซึ่งจากการทดลอง พบว่าปริมาณของแก๊สมีเทนที่ได้มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตามทฤษฎี (ร้อยละ 50-70) ซึ่งอาจจะมียังปัจจัยมาจากหลายสาเหตุ เช่น แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นอาจจะยังมีส่วนของความชื้นค่อนข้างสูง จึงควรเพิ่มขั้นตอนในการกำจัดความชื้นเพื่อให้มีสัดส่วนของแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น เช่น การใช้ตัวดูดความชื้น (Mamun and Tori, 2017) นอกจากนี้อาจเกิดจากระบบการหมักที่เป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์ มีการรบกวนระบบเนื่องจากขั้นตอนการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ การที่วัสดุหมักอัดตัวกันแน่นมีผลต่อการการกวนผสมส่งผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยตรงทำให้ได้แก๊สมีเทนค่อนข้างต่ำ (รัชพล, 2558)

ตารางที่ 5 ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพในวันที่มีปริมาณแก๊สเกิดขึ้นสูงสุดของกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกึ่งกะ ที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 24:1 เป็นระยะเวลา 15 วัน

การผลิต แก๊สชีวภาพ	ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสม (มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย)	ร้อยละโดยปริมาตร	
		แก๊สมีเทน	แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
ชุดควบคุม (แบบกะ)	47.65±12.33 ^a	18.40±1.13 ^a	22.80±2.30 ^a
แบบกึ่งกะ แบบที่ 1	38.00±9.30 ^b	20.12±0.94 ^a	6.47±0.71 ^b
แบบกึ่งกะ แบบที่ 2	27.67±6.82 ^c	9.75±0.51 ^b	4.10±0.47 ^b

หมายเหตุ: - a b และ c เป็นค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$)

- ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

ผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีในวันแรกและวันสุดท้ายของการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกึ่งกะที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 24:1 พบว่าชุดควบคุม (แบบกะ) และแบบกึ่งกะ แบบที่ 1 และแบบที่ 2 ในวันสุดท้ายมีปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายที่ลดลงจากวันแรก ซึ่งบ่งชี้ถึงความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของเชื้อจุลินทรีย์ โดยการหมักแบบกึ่งกะมีร้อยละการกำจัดของ ปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วง 12.97-20.70 และร้อยละการกำจัดปริมาณของแข็งระเหยง่าย อยู่ในช่วง 41.97-53.12 ซึ่งแบบที่ 1 มีร้อยละการกำจัดมากที่สุด ดังตารางที่ 6 และอุณหภูมิตลอดระยะเวลาการผลิตแก๊สชีวภาพเฉลี่ยอยู่ที่ 34 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงมีชีพิลิคเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 5.0-6.0

ตารางที่ 6 ผลการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางเคมีในวันแรกและวันสุดท้ายของการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟร่วมกับมูลวัวโดยการหมักแบบกึ่งกะ ที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 24:1

การผลิต แก๊สชีวภาพ	ลักษณะทางเคมี (มิลลิลิตรต่อกรัม)	วันที่ 0	วันที่ 15	ร้อยละ การกำจัด
ชุดควบคุม (แบบกะ)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	779.17±1.25	647.53±0.69	16.89
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	434.58±7.95	238.19±1.77	46.34
แบบกึ่งกะ แบบที่ 1	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	589.15±1.98	677.2±0.85	20.70
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	434.52±0.58	203.71±5.41	53.12
แบบกึ่งกะแบบที่ 2	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	559.82±2.01	487.2±1.85	12.97
	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	454.58±0.92	263.79±0.01	41.97

หมายเหตุ: - ข้อมูลแสดงค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

การอภิปรายผลการวิจัย

การศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับการใช้มูลวัวด้วย กระบวนหมักแบบกะและแบบกึ่งกะ พบว่ากากกาแฟเป็นชีวมวลทางอุตสาหกรรมเหลือทิ้งที่มี โครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ได้ยาก จากผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าการปรับ สภาพช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการนำไปใช้ประโยชน์ทั้งทางเคมีและทางกายภาพส่งผลให้สามารถ นำไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นเชื้อเพลิงและวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ (รพีพรรณ, 2560; ญรัฐพงศ์, 2562) แต่ทั้งนี้ในส่วนของการการผลิตแก๊สชีวภาพ พบว่าปริมาณของแก๊สมีเทนที่ได้มีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับทฤษฎี (ร้อยละ 50-70) ซึ่งอาจจะมีปัจจัยมาจากหลายสาเหตุ เช่น แก๊สชีวภาพที่ เกิดขึ้นอาจจะยังมีสัดส่วนของความชื้นค่อนข้างสูง จึงควรเพิ่มขั้นตอนในการกำจัดความชื้นเพื่อให้มี สัดส่วนของแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น เช่น การใช้ตัวดูดความชื้น (Mamun and Tori, 2017) อีกทั้งอาจเกิดจากระบบการหมักที่ยังไม่สมบูรณ์ เนื่องจากขั้นตอนการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ การอัดตัวกันของวัสดุ หมักส่งผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ทำให้ได้แก๊สมีเทนค่อนข้างต่ำ (รัชพล, 2558)

สรุปผลการวิจัย

การปรับสภาพกากกาแฟก่อนการผลิตแก๊สชีวภาพจะช่วยเพิ่มศักยภาพของวัตถุดิบในการ นำไปใช้ผลิตแก๊ส เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทั้งทางเคมีและทางกายภาพ ส่งผลให้การ ทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ง่ายมากขึ้น ส่วนในการผลิตแก๊สชีวภาพพบว่าในสภาวะการหมักแบบกะ ที่อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 24:1 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยเมื่อนำไปผลิตแก๊ส ชีวภาพ พบว่าในสภาวะการหมักแบบกะจะให้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 44.50 มิลลิลิตร ต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย มีปริมาณแก๊สมีเทนร้อยละ 18.40 และปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ร้อยละ 22.80 ส่วนในสภาวะการหมักแบบกึ่งกะ โดยการเติมสารอินทรีย์ทุก 2 วัน เป็นเวลา 2 ครั้ง (แบบที่ 1) ได้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 38.00 มิลลิลิตรต่อกรัม ของแข็งระเหยง่าย มีปริมาณแก๊สมีเทนร้อยละ 20.12 และปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 6.47 จากผลการศึกษา แสดงให้เห็นว่ากากกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวมีศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพ โดย สามารถใช้ได้ทั้งวิธีการหมักแบบกะและแบบกึ่งกะ ทั้งนี้หากมีการศึกษาเพิ่มเติมก็สามารถเป็นอีก แนวทางหนึ่งในการใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบที่สามารถนำไปต่อยอดเป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงจาก พอสซิลต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัยจากหลักสูตรวิทยาศาสตรชีวภาพ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2561). *คู่มือฝึกอบรมภาคปฏิบัติ ด้านพลังงานทดแทน การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัตถุดิบต่าง ๆ*. อุบลราชธานี: มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.
- กิตติยา ป้อมเงิน ประภา ไช้สละม และรัชพล พะวงศรีรัตน์. (2559). การผลิตแก๊สชีวภาพจากผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการนึ่งร่วมกับมูลวัวโดยกระบวนการหมักแบบกะ. *วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์*, 8(3), 129-139.
- จุฑาภรณ์ ชนธการ และนาวัน พุดน้อย. (2560). การหมักร่วมของกากกาแฟและเปลือกเมล็ดกาแฟที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลโคเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ. ใน *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13 (วิทยาลัยพลังงานทดแทน)* (หน้า 112-119). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ณัฐพงศ์ ตันติวัฒน์พันธ์. (2562). กากกาแฟ จากแก้วกาแฟสู่แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนสำหรับผลิตภัณฑ์ชีวภาพ. *วารสารสิ่งแวดล้อม*, 23(1), 1-8.
- นฤภัทร ตั้งมันคงวรกุล และพัชรี ปรีดาสุริยะชัย. (2558). การศึกษากากกาแฟและกากขามาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิงอัดแท่ง. *วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ*, 7(13), 15-26.
- นัฐภูมิ เพ็ชรชาติ พิมพ์ชนก ธาตรีวิจิตร หนึ่งหทัย ธราพร ศราวุฒิ ชูโลก และนวรรณ์ สีตะพงษ์. (2566). สมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวลอัดแท่งและถ่านชีวมวลอัดแท่งจากเปลือกกระท้อนและเปลือกมังคุด. *วารสารวิชา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 42(1), 39-49, doi: <https://doi.org/10.65217/wichchajinstru.2023.v42i1.254379>.
- มันสิน ตันทุลเวศม์. (2551). *คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ*. (พิมพ์ครั้งที่ 5). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- รพีพรรณ กองตม. (2560). กากกาแฟ: มูลค่าเพิ่มและการใช้ประโยชน์. ใน *การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 5* (หน้า 342-350). ราชบุรี: มหาวิทยาลัยราชภัฏหมู่บ้านจอมบึง.
- รัชพล พะวงศรีรัตน์. (2558). ศักยภาพและการใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ. *วารสารวิชาการปทุมวัน*, 5(14), 67-78.
- เวสาร์ช สุนทรชัยบูรณ์ ธัญวิทย์ พลายงาม และรัชพล พะวงศรีรัตน์. (2558). การปรับสภาพขุยมะพร้าวเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนร่วมกับมูลวัว. *วารสารวิชาการและวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร*, 9(2), 19-31.
- สิริวรรณ ลิขสิริธรรม. (2561). สมบัติของเส้นใยใบสับปะรดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี. *กรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 7(7), 25-31.
- อรุณี ศุภสินสาธิต. (2555). พลังงานจากชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสสูง. *วารสารสิ่งแวดล้อม*, 17(2), 36-43.
- อุตสาหกรรมฐานชีวภาพ. (2561). บทที่ 33 รายละเอียดข้อมูลสารเคมีชีวภาพประเภทลิกนิน (lignin). ใน *รายงานการศึกษาระดับสมบูรณ์ โครงการเพิ่มศักยภาพฐานข้อมูลพื้นฐานอุตสาหกรรมชีวภาพ* (หน้า 1-16). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

- Corro, G., Paniagua, L., Pal, U., Bañuelos, F. and Rosas, M. (2013). Generation of biogas from coffee-pulp and cow dung co-digestion: Infrared studies of post combustion emissions. *Energy Conversion and Management*, 74, 471-481, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.017>.
- Horwitz, W. (1980). *Official methods of analysis of the association of official analytical chemists*. (13th ed). Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists.
- International Coffee Organization. (2022). *World coffee consumption*. Retrieved 9 June 2022, from: <https://www.ico.org/Market-Report-21-22-e.asp>.
- Kim, J., Kim, H. and Lee, C. (2017). Ulva biomass as a co-substrate for stable anaerobic digestion of spent coffee grounds in continuous mode. *Bioresource Technology*, 241, 1182-1190, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.012>.
- Mamun, M.R.A. and Tori, S. (2017). Enhancement of methane concentration by removing contaminants from biogas mixtures using combined method of absorption and adsorption. *International Journal of Chemical Engineering*, 17, doi: <https://doi.org/10.1155/2017/7906859>.
- Pilane, V., Waraporn, A., Wuttinunt, K. and Sarima, S. (2011). The potential of coconut husk utilization for bioethanol production. *Kasetsart Journal : Natural Science*, 45(1), 159-164.
- Walkley, A. and Black, I.A. (1934). An examination of degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-37.
- Yen, H.W. and Brune, D. (2007). Anaerobic co-digestion of algae sludge and waste paper to produce methane. *Bioresource Technology*, 98(1), 130-134, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.010>.
- Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F. and Li, Y. (2014). Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Progress in Energy and Combustion Science*, 42, 35-53, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.01.001>.