

ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียในกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา

The Biochemical Methane Potential from Washing Process Wastewater in Black Soldier Fly Larvae Breeding by Inca Peanut Meal

ปรียา กฤตธีรพุทธิ¹, กิตติกร สาสุจิตต์¹, ภกมน ปินตานา¹, ชยานนท์ สวัสดิ์ดินธนาท², วงศ์พันธ์ พรหมวงศ์³ และ รจพรณ นิรันดร์ศิลป์^{1,*}

¹วิศวกรรมพลังงานทดแทน, วิทยาลัยพลังงานทดแทน, มหาวิทยาลัยแม่โจ้ หนองหาร สันทราย เชียงใหม่ 50290

²วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย, มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ จีให้เล็ก แม่ริม เชียงใหม่ 50180

³คณะผลิตกรรมการเกษตร, มหาวิทยาลัยแม่โจ้ หนองหาร สันทราย เชียงใหม่ 50290

Preeya Kritthiraput¹, Kittikorn Sasujit¹, Pakamon Pintana¹, Chayanon Sawatdeenarunat², Wongphan Promwong³ and Rotjapun Nirunsin^{1,*}

¹Department of Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand

²Asian Development College for Community Economy and Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai, 50300, Thailand

³Department of Plant Protection, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand

*Corresponding Author E-mail: rotjapun@gmail.com

Received: Mar 03, 2023; Revised: Jul 06, 2023; Accepted: Aug 10, 2023

บทคัดย่อ

การแปรรูปหนอนแมลงวันลายเพื่อเป็นโปรตีนอาหารสัตว์คุณภาพสูงกำลังได้รับการสนับสนุนให้เป็นการแปรรูปในระดับอุตสาหกรรมของประเทศไทย แต่เนื่องจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายมีน้ำเสียที่ต้องได้รับการบำบัด ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบสูง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียในกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา กับหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร ในอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยกรรมของแข็งระเหย และควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงมีไซฟิกลิสต์ $35 \pm 2^\circ\text{C}$ โดยผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดคืออัตราส่วน 1:1 ระยะเวลาการหมัก 45 days มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนมากที่สุด โดยมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ $401.51 \pm 24.42 \text{ NmL/gVS}_{\text{add}}$ ที่สัดส่วนมีเทนสูงสุด 67.90% ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปของแข็งระเหยสูงที่สุดเท่ากับ 23.76% และประสิทธิภาพการกำจัด COD 68.51% ซึ่งแสดงให้เห็นศักยภาพของน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่สามารถเป็นวัตถุดิบในการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของพลังงานทดแทนด้วยการผลิตก๊าซชีวภาพและสามารถนำไปขยายผลในระดับอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน, น้ำเสีย, กากถั่วดาวอินคา, หนอนแมลงวันลาย

Abstract

The processing of Black Soldier Fly Larvae (BSFL) for high-quality animal feed protein is being promoted to transformation at the industry level in Thailand. This is due to the fact that the washing process of BSFL generates wastewater with high organic matter that must be treated. This research was interested in studying the potential of methane production from wastewater in the BSFL washing process that is fed by Inca meal and mixed with inoculum sludge from a swine biogas production system at different substrate and inoculum ratio of 3:1, 1:1 and 1:3 by gVS_{add}. The system also controlled the temperature within the mesophilic condition at $35 \pm 2^\circ\text{C}$. The result of this study shows that the optimum ratio which the most biochemical methane potential (BMP) was 1:1 on 45 days of fermentation period. This optimum ratio can also generate the cumulative methane gas production of $401.51 \pm 24.42 \text{ NmL/gVS}_{\text{add}}$ with the highest methane content of 67.90%. The VS removal was 23.76% and the COD removal was 68.51%, which shows the BSFL washing process wastewater can be a substrate for biogas production and further expanded to the industry level.

Keywords: Methane production potential, Wastewater, Inca peanut residue, *Hermitia illucens* L.

1. บทนำ

การส่งเสริมอุตสาหกรรมแปรรูปหนอนแมลงวันลายเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนอาหารสัตว์คุณภาพสูงกำลังเป็นที่นิยมทั่วโลก [1] รวมถึงประเทศไทย เนื่องจากหนอนแมลงวันลายเป็นแมลงที่มีสัดส่วนโปรตีนสูงถึง 20–40% วงจรชีวิตมีระยะสั้นเมื่อเทียบกับแมลงกินได้ชนิดอื่น ๆ สามารถเลี้ยงได้ในสภาพแวดล้อมทั่วไปของประเทศไทย โดยหนอนแมลงวันลายเกิดจากแมลงวันลาย (Black Soldier Fly, BSF) หรือ *Hermitia illucens* L. เมื่ออายุประมาณ 3 days จะเริ่มผสมพันธุ์และวางไข่ 400–900 ฟอง หลังจากนั้นประมาณ 3 days ไข่จะฟักตัวเป็นหนอนตัวอ่อน ซึ่งในช่วงระยะตัวหนอนของหนอนแมลงวันลายจะมีระยะเวลานาน 14–16 days ก่อนจะกลายเป็นดักแด้และเป็นแมลงตัวเต็มวัยต่อไป ดังนั้นระยะการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายให้ได้ผลผลิตจะใช้เวลาสั้นประมาณ 45 days [2] ปัจจุบันนิยมใช้เศษอาหาร เศษผลไม้ รวมถึงอาหารโปรตีนสูง เช่น กากถั่วเหลือง กากถั่วดาวอินคา เพื่อเป็นการเพิ่มสารอาหารแก่ตัวอ่อนหนอนและเพิ่มมูลค่าให้กับของเสียที่เกิดขึ้น โดยอาหารที่นิยมนำมาเลี้ยงหนอนแมลงวันลาย คือ กากถั่วดาว ซึ่งกากถั่วดาวอินคาเกิดขึ้นจากกระบวนการแปรรูปถั่วดาวอินคาที่มีของเสียปริมาณมาก แต่ยังมีคุณค่าทางอาหารที่สูง โดยถั่วดาวอินคา หรือ Sacha Inchi หรือ Inca Peanuts เป็นพืชตระกูลถั่วและเป็นตระกูลเดียวกับพืชยางพารา สนุ่นดำ และมันสำปะหลัง โดยมีชื่อทาง

วิทยาศาสตร์ คือ *Plukenetia volubilis* L. โดยทั่วไปสามารถนำกากถั่วรีโกลกล้ายเมล็ดอัลมอนต์ หรือนำมาแปรรูปเป็นน้ำมันสกัดเพื่อสุขภาพ [3] ซึ่งหลังจากการหีบสกัดน้ำมันดาวอินคา จะเกิดผลพลอยได้ คือ กากถั่วดาวอินคา ทั้งในส่วนของกากจากเปลือก และกากจากถั่วเมล็ดแห้งที่ผ่านการสกัดน้ำมัน โดยพบว่ากากถั่วดาวอินคาเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตน้ำมันสกัดยื่นต่อโรงงานต่อปีประมาณ 60 tons หรือ 70–80% ของเมล็ดถั่วดาวอินคาที่ใช้ในการแปรรูป ซึ่งยังคงมีโปรตีนมากกว่า 27% [4] โดยทั่วไปการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายเพื่อแปรรูปเป็นโปรตีนอาหารสัตว์สามารถจำแนกรูปแบบการเลี้ยงออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การเลี้ยงแบบแห้ง และการเลี้ยงแบบเปียก [2] ซึ่งการเลี้ยงแบบแห้ง คือ การเลี้ยงตัวอ่อนหนอนแมลงวันลายด้วยอาหารที่มีสัดส่วนของน้ำน้อยกว่า 80% w/w เช่น เศษอาหาร เศษผักหรือผลไม้ เป็นต้น เมื่อหนอนย่อยอาหารจนเข้าสู่ช่วงหนอนโตเต็มวัย จะได้กากปุยแห้งที่สามารถใช้ตะแกรงร่อนแยกตัวหนอนและนำไปแปรรูปในขั้นตอนต่อไป โดยในประเทศไทยนิยมเลี้ยงหนอนแมลงวันลายแบบแห้ง เนื่องจากช่วยบำบัดขยะอินทรีย์ในชุมชนได้ [5],[6] สำหรับการเลี้ยงแบบเปียก คือ การใช้อาหารเลี้ยงที่มีสัดส่วนของน้ำมากกว่า 80% w/w เช่น กากถั่วเหลือง หรือ กากถั่วดาวอินคา เป็นต้น จะนิยมเลี้ยงในระดับอุตสาหกรรม เนื่องจากสามารถควบคุมโภชนาการและคุณภาพของหนอนแมลงวันลายเพื่อส่งออกได้ตามมาตรฐาน

การผลิต [7] โดยเมื่อหนอนย่อยอาหารจนเข้าสู่ช่วงหนอนโตเต็มวัย ลักษณะของอาหารยังคงมีความชื้นอยู่มาก และมีตัวหนอนแทรกอยู่ในอาหาร เมื่อต้องการนำไปแปรรูปจำเป็นต้องผ่านกระบวนการล้างเศษกากอาหาร หรือ กากถั่วดาวอินคาที่ผ่านกระบวนการย่อยจากหนอนด้วยน้ำสะอาดก่อน [1],[2],[7],[8] จากการสำรวจผู้ประกอบการแห่งหนึ่งในจังหวัดเชียงใหม่พบว่า มีการเลี้ยงหนอนด้วยกากถั่วเหลืองหรือกากถั่วดาวอินคา และใช้น้ำสะอาดสำหรับการล้างหนอนตัวเต็มวัยที่ผสมอยู่ในอาหารเลี้ยงประมาณ 10–50 L ซึ่งทำให้เกิดน้ำเสียปริมาณมากและอาจมีปริมาณสารอินทรีย์สูงจากกากถั่วดาวอินคาหรือกากถั่วเหลืองที่ผสมอยู่ในน้ำเสีย รวมถึงของเสียในกระบวนการย่อยของหนอนแมลงวันลาย ซึ่งถ้าไม่ถูกกำจัดอย่างถูกวิธีจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ เช่น มลพิษทางสังคมและอากาศในรูปของกลิ่นเหม็น หรือ สารอินทรีย์ซึมลงสู่พื้นดินและแหล่งน้ำในบริเวณใกล้เคียง จึงควรมีวิธีการจัดการที่เหมาะสม โดยเฉพาะในระดับอุตสาหกรรม ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย ระบุว่า น้ำทิ้งที่สามารถปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติต้องมีค่าความต้องการออกซิเจนเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ทางเคมีในน้ำ หรือ COD (Chemical Oxygen Demand) ไม่เกิน 120 mg/L

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่า น้ำเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์สูงเหมาะสำหรับนำไปบำบัดด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งสามารถบำบัดสารอินทรีย์ให้เกิดเป็นพลังงานทดแทนในรูปของก๊าซชีวภาพได้ [9] ซึ่งน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายอาจมีสารอินทรีย์ประเภทโปรตีนสูงกว่าสารอาหารประเภทอื่น ๆ เนื่องจากกากถั่วดาวอินคาที่มีโปรตีนมากกว่า 27% ดังนั้นจึงศึกษา งานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดย Wang et al., (2019) [10] ทบทวนงานวิจัยเกี่ยวกับการจัดการน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปนมและถั่วเหลือง ผลการศึกษาระบุว่าน้ำเสียในกลุ่มของการแปรรูปถั่วเหลืองที่เกิดขึ้นประมาณ 1.5–10.0 L/kg จะมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงจากกระบวนการแปรรูป เช่น การล้าง การต้ม เป็นต้น ซึ่งน้ำเสียจะมีลักษณะเป็นกรดอ่อนอยู่ในช่วง 5.4–6.6 ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand; BOD) ประมาณ 4.10–6.80 g/L ค่า COD ประมาณ 7.50–12.00

g/L [11] องค์ประกอบไนโตรเจนประมาณ 370–440 mg/L ฟอสฟอรัส 81–92 mg/L สำหรับ Alves Araujo et al., (2017) [12] ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากกากถั่วเหลืองที่เหลือทิ้งในกระบวนการแปรรูปถั่วเหลืองโดยหมักกับหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพโรงงานแปรรูปอาหาร ในอัตราส่วนหัวเชื้อต่อวัตถุดิบ 2:1 โดยกรรมของแข็งระเหยง่าย ผลการศึกษาพบว่าตลอดระยะเวลาการหมัก 25 days สามารถผลิตก๊าซมีเทนที่ได้ 421.40 NmL/gVS_{add} และเมื่อคำนวณการผลิตพลังงานจากก๊าซชีวภาพที่ได้จะสามารถผลิตพลังงานในรูปของก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 19.0 KJ/s จากปัจจัยต่าง ๆ ข้างต้น สามารถบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการแปรรูปถั่วเหลืองได้ด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพ แต่ในขณะเดียวกันพบว่าผลการผลิตก๊าซชีวภาพของวัตถุดิบที่มีโปรตีนสูงจะส่งผลให้การเริ่มต้นการผลิตก๊าซชีวภาพใช้เวลานานขึ้น โดย Kim et al., (2020) [13] ได้ศึกษาอัตราความล่าช้า (Lag-phase) ของการผลิตก๊าซชีวภาพจาก 2 การทดลอง ได้แก่ การศึกษาจากวัตถุดิบโปรตีน 3 ชนิด ได้แก่ เวย์โอโซเลท เจลาติน และอัลบูมิน ร่วมกับหัวเชื้อมูลไก่ และการศึกษาอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ (Substrate and Inoculum Ratio; SIR) ตั้งแต่ 0.2–1.0 โดยปริมาณของแข็งระเหยง่าย ซึ่งผลการศึกษาพบว่าโปรตีนทั้ง 3 ชนิด มีระยะเวลาความล่าช้าประมาณ 12.78–16.44 days สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากที่สุด (เจลาติน) 801.11 mL/gVS_{add} ที่ก๊าซชีวภาพสะสม 1,031.01 mL/gVS_{add} และเมื่อนำไปศึกษาต่อใน SIR ที่ต่างกันพบว่า อัตราส่วน 0.8 และ 1.0 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากปริมาณกรดอินทรีย์เหมาะสมต่อปริมาณหัวเชื้อ [14] นอกจากนี้เมื่ออัตราการสร้างและอัตราการบริโภคกรดสัมพันธ์กัน โดยมีแนวโน้มจะทำให้อัตราความล่าช้าในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง นอกจากนี้ยังสามารถลดการสะสมของ NH₃-N ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโปรตีนสูงที่อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์เมทาโนเจนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้

โดยตัวอย่างการศึกษาเกี่ยวกับของเสียจากกระบวนการเลี้ยงหนอนแมลงวันลายมีการศึกษาของ Bulak et al., (2020) [15] ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียที่เกิดขึ้นหลังการเพาะเลี้ยงแมลงวันทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่

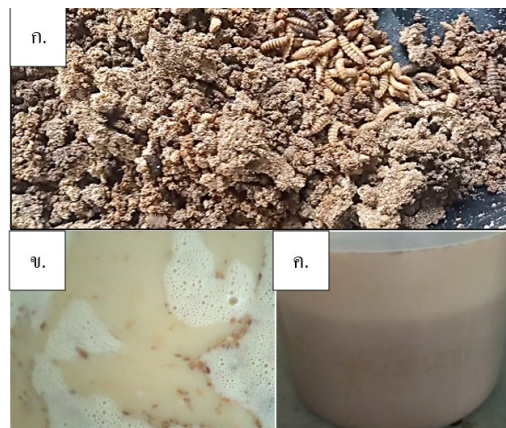
แมลงวันลาย หนอนนก (*Tenebrio Molitor*) และจิ้งหรีด (*Gryllus* spp.) โดยลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นเป็นของเสียที่เกิดจากการผสมกันระหว่างมูลของแมลงร่วมกับอาหารที่ใช้ในการเลี้ยง ซึ่งจะนำของเสียของแมลงทั้ง 3 ชนิด มาเปรียบเทียบผลการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อต่อวัตถุดิบเท่ากับ 2:1 [12],[16] โดยเติมวัตถุดิบที่ปริมาณของแข็งทั้งหมด 3.50 g เติมปริมาณเท่ากันทุกวัตถุดิบ ตลอดระยะเวลาการหมัก 21 days พบว่า ของเสียจากการเลี้ยงแมลงวันลายมีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 412.50 ± 5.10 mL/gVS_{add} มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 207.90 ± 21.50 mL/gVS_{add} โดยมีปริมาณมีเทนสูงสุด 53.23% v/v โดยจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีโปรตีนสูงสามารถนำไปบำบัดด้วยเทคโนโลยีการบำบัดแบบไร้อากาศและผลิตก๊าซชีวภาพได้ ดังนั้น น้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคาจึงมีความเป็นไปได้ที่จะเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพ โดยงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนจากน้ำเสียในกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคาพร้อมกับหัวเชื้อกากตะกอนระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรในระบบการหมักแบบกะเพื่อนำไปพัฒนาการใช้พลังงานทดแทนในการบำบัดน้ำเสียระดับวิสาหกิจชุมชนและระดับอุตสาหกรรมต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย (Materials and Methods)

2.1 การเตรียมวัตถุดิบน้ำเสียและหัวเชื้อ

ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา จะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากการจำลองการเลี้ยงตัวอ่อนหนอนแมลงวันลายจำนวน 1 kg ต่ออาหารเลี้ยง (กากถั่วดาวอินคา) 25 kg เมื่อหนอนโตเต็มวัยแสดงดังรูปที่ 1(ก) ซึ่งใช้ระยะเวลาประมาณ 20 days จะนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดในอัตราส่วนหนอนผสมกากถั่วดาวอินคา 1 kg ต่อน้ำล้าง 10 L ซึ่งจะได้น้ำเสียเป็นวัตถุดิบในการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกะลักษณะดังรูปที่ 1(ข) น้ำเสียมีลักษณะเป็นสีครีมขุ่นมีสาร

แขวนลอยผสมอยู่ในของเหลว และรูปที่ 1(ค)แสดงการแยกชั้นของน้ำเสียเมื่อตั้งทิ้งไว้ พบว่ามีตะกอนหนักมากกว่า 70% ของสัดส่วนทั้งหมด



รูปที่ 1 ลักษณะหนอนโตเต็มวัยและน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลาย (ก) ลักษณะหนอนโตเต็มวัยในอาหาร (ข) ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลาย และ (ค) การแยกชั้นของน้ำเสีย

สำหรับขั้นตอนการเตรียมหัวเชื้อจะนำกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบบ่อปิด (Covered Lagoon) ของฟาร์มสุกรในจังหวัดเชียงใหม่ แสดงลักษณะหัวเชื้อดังรูปที่ 2 ซึ่งก่อนการทดลองจะเก็บรักษาวัตถุดิบและหัวเชื้อภายใต้อุณหภูมิต่ำกว่า 4.0°C นำหัวเชื้อไปหมักในสภาวะไร้อากาศระยะเวลา 7 days หลังจากนั้นจึงกรองวัตถุดิบผ่านตะแกรงขนาดกว้างและยาวไม่เกิน 10 mm นำไปวิเคราะห์ฟาร์มมีเตอร์เริ่มต้น เพื่อเริ่มการทดลองตามเงื่อนไขการศึกษาก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน



รูปที่ 2 ลักษณะหัวเชื้อกากตะกอนระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร

2.2 วิธีการทดลอง

การทดลองเพื่อหาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา จะศึกษาโดยปรับใช้จากมาตรฐาน VDI 4630 [9],[17] โดยการศึกษาผลการผลิตก๊าซชีวภาพของอัตราส่วนที่แตกต่างกันระหว่างวัตถุดิบ น้ำเสียและหัวเชื้อกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ฟาร์มสุกร (Substrate and Inoculum Ratio; SIR) ทั้งหมด 3 อัตราส่วน ได้แก่ 3:1, 1:1 และ 1:3 gVS_{add} ทำการทดลอง ทั้งหมด 3 ซ้ำ บรรจุในขวดแก้วขนาด 1,000 mL โดยบรรจุ หัวเชื้อทุกขวดเท่ากับ 1.5% ของปริมาตรการหมัก 400 mL หรือเท่ากับ 119.65 gVS หลังจากนั้นจึงปรับค่าความเป็นกรดค่าให้อยู่ในช่วง 7.0 ± 0.1 ปิดผนึกด้วยจุกยาง ครอบฝาอะลูมิเนียมและอัดด้วยก๊าซไนโตรเจนเพื่อทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศ ซึ่งระหว่างการหมักจะมีชุดควบคุม (B) ที่ใส่หัวเชื้อเพียงอย่างเดียวจำนวน 2 ซ้ำ เพื่อนำไปลบออกจากปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของทั้งสามอัตราส่วน ทำให้ผลของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นศักยภาพที่เกิดจากวัตถุดิบเท่านั้น และการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจะควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงมีโซฟิลิกส์ ($35.0 \pm 2^{\circ}\text{C}$) โดยติดตั้งในอ่างน้ำที่มีเครื่องให้ความร้อนและใช้ปั๊มน้ำเพื่อช่วยในการกระจายความร้อนภายในอ่าง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชุดการทดลองศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากการล้างหนอนแมลงวันลาย

2.3 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพ

การวิเคราะห์ศักยภาพและลักษณะเบื้องต้นของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะวิเคราะห์พารามิเตอร์ตาม

วิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์น้ำเสีย APHA 2005 [18] อย่างน้อย 2 ซ้ำ โดยวิเคราะห์ COD ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid; TS) ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solid; VS) ค่าความเป็นกรดค่า (Potential of Hydrogen ion; pH) และอัตราส่วนปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid; VFA) ต่อสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity; Alk) หรือ VFA/Alk ซึ่ง การตรวจวัดค่าพารามิเตอร์จะทำการวัดทั้งหมด 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ 1 วิเคราะห์วัตถุดิบและหัวเชื้อ ช่วงที่ 2 และ 3 คือ วิเคราะห์ก่อนเข้าระบบและหลังออกจากระบบของทุกอัตราส่วน วัดปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันโดยใช้กระบอกนิตยาแบบแก้ว [19] โดยวัดเวลาเดียวกันทุกวันเพื่อความแม่นยำของข้อมูลจนอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมคงที่ โดยคำนวณผลผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas yield) และศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Bio-chemical Methane Potential; BMP) [20],[21] ในหน่วยของ NmL/gVS_{add} ที่อุณหภูมิมาตรฐาน 0°C ณ ความดันบรรยากาศ 1 atm ดังสมการที่ (1)

$$BMP = \%CH_4 \times V_{biogas,STP} / m_{substrate,VSadd} (1)$$

โดย $\%CH_4$ คือ ร้อยละของสัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ $V_{biogas,STP}$ คือ ปริมาตรก๊าซชีวภาพ ณ อุณหภูมิมาตรฐาน 0°C ที่ความดันบรรยากาศ 1 atm (NmL) $m_{substrate,VSadd}$ คือ มวลวัตถุดิบที่เติมเข้าระบบ (gVS_{add})

หลังจากนั้นจึงนำตัวอย่างของแต่ละอัตราส่วนไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ทางก๊าซชีวภาพหลังออกจากระบบต่อไปสำหรับการวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพจะวัดทุก ๆ 7 days โดยเครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบก๊าซ GFM 406 series (Gas Data, United Kingdom)

3. ผลและอภิปรายผลการทดลอง

3.1 ลักษณะของวัตถุดิบและหัวเชื้อ

ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายมีลักษณะเป็นของเหลวขุ่น แสดงดังรูปที่ 1 มีการแยกชั้นระหว่างกากหนอนนกก้น สารละลายสีเหลืองขุ่น และสารแขวนลอยบนผิวน้ำเสีย โดยลักษณะ

ทางเคมีกายภาพเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นศักยภาพการเป็นวัตถุดิบตั้งต้นของน้ำเสียต่อการผลิตก๊าซมีเทน โดยน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่ล้างด้วยกากถั่วดาวอินคา มีค่า COD เท่ากับ 58.43 ± 6.69 g/L มีปริมาณของแข็งระเหยง่าย 30.82 ± 1.31 g/L และลักษณะเป็นกรดอ่อนเท่ากับ 6.05 ± 0.02 แต่มีปริมาณอัตราส่วน VFA/Alk เท่ากับ 0.83 ± 0.13 ซึ่งสูงเกินมาตรฐาน [13],[22] การผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียดังกล่าวโดยปราศจากหัวเชื้ออาจส่งผลต่อเสถียรภาพของระบบระยะยาว จากปริมาณกรดอินทรีย์ที่มากเกินไปจนยับยั้งปฏิกิริยาการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมถึงใช้เวลาในการผลิตก๊าซชีวภาพการนำกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเป็นหัวเชื้อจึงนิยมนำมาใช้เพื่อกระตุ้นศักยภาพการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม [23] ซึ่งกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพภายในฟาร์มสัตว์โดยเฉพาะฟาร์มสุกร เป็นระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน เนื่องจากมีแบคทีเรียเมทาโนเจนอยู่ในมูลสุกรจำนวนมาก ซึ่งกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพภายในฟาร์มสัตว์โดยเฉพาะฟาร์มสุกร เป็นระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกรที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน เนื่องจากมีแบคทีเรียเมทาโนเจนอยู่ในมูลสุกรจำนวนมาก [24] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มสุกรเป็นหัวเชื้อเพื่อการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียในกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่ล้างด้วยกากถั่วดาวอินคา โดยกากตะกอนมูลสุกรที่นำมาใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นสารข้นเหลวสีดำข้น ดังรูปที่ 2 ค่า COD เท่ากับ 63.14 ± 15.62 g/L และ VS เท่ากับ 50.15 ± 3.02 g/L รวมถึงมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ในค่ามาตรฐาน ได้แก่ ค่าความเป็นกรดด่าง 7.17 ± 0.09 อยู่ในช่วงมาตรฐานและมีอัตราส่วน VFA/Alk เท่ากับ 0.41 ± 0.24 ซึ่งมาตรฐานอยู่ในช่วงไม่เกิน 0.40 [22] จึงเหมาะแก่การนำมาเป็นหัวเชื้อเพื่อเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากการล้างหนอนแมลงวันลายที่ล้างด้วยกากถั่วดาวอินคา

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของหัวเชื้อและวัตถุดิบ

Parameter	Inoculum	Wastewater
COD (g/L)	63.14 ± 15.62	58.43 ± 6.69
TS (g/L)	75.47 ± 4.99	39.37 ± 1.52
VS (g/L)	50.15 ± 3.02	30.82 ± 1.31
VS/TS	0.66 ± 0.01	0.78 ± 0.00
pH	7.17 ± 0.09	6.05 ± 0.02
VFA/Alk	0.41 ± 0.24	0.83 ± 0.13

3.2 ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียของแต่ละอัตราส่วน

ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของน้ำเสียที่ผ่านระบบการบำบัดแบบไร้อากาศสามารถบ่งบอกในรูปของร้อยละประสิทธิภาพการกำจัด COD ($COD_{removal}$) ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด ($TS_{removal}$) และร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยง่าย ($VS_{removal}$) แสดงดังตารางที่ 2 โดยจากการทดลองพบว่าอัตราส่วนที่มีหัวเชื้อมากจะมีศักยภาพการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้มากที่สุด เนื่องจากในหัวเชื้อมีองค์ประกอบของแบคทีเรียเมทาโนเจนที่ช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์อยู่ [25] โดยอัตราส่วน 1:3, 1:1 และ 3:1 ดังกล่าวมีศักยภาพ $COD_{removal}$ เท่ากับ 77.78%, 68.51% และ 43.15% ตามลำดับ สำหรับศักยภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปของของแข็ง ซึ่ง $TS_{removal}$ และ $VS_{removal}$ อัตราส่วนที่มีศักยภาพมากที่สุด คือ 1:1, 1:3 และ 3:1 ตามลำดับ โดย $TS_{removal}$ เท่ากับ 14.49%, 7.79% และ 7.15% และ $VS_{removal}$ เท่ากับ 23.76%, 17.41% และ 12.57% ตามลำดับ เนื่องจากจุลินทรีย์เมทาโนเจนสามารถย่อยสลายเซลลูโลสซึ่งเป็นเส้นใยของแข็งช้ากว่าสารอาหารประเภทอื่น ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการหมักนานขึ้นเพื่อการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดอย่างมีประสิทธิภาพ [26] นอกจากนี้ยังเป็นผลจากการสะสมของกรดอินทรีย์ทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์ ทำให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่ำ โดยการบ่งชี้การทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนเบื้องต้นสามารถสังเกตได้จากค่า pH และอัตราส่วน VFA/Alk ดังตารางที่ 2 แสดงการ

เปลี่ยนแปลงไปของแต่ละอัตราส่วนในช่วงเข้าระบบและออกระบบ โดยเมื่อทำการหมักทั้งหมด 3 อัตราส่วน พบว่าค่าเริ่มต้นเกินมาตรฐาน แต่เมื่อผ่านกระบวนการหมักแบบไร้อากาศครบ 45 days ผลการวิเคราะห์ pH และ VFA/Alk ของอัตราส่วน 1:1 และ 1:3 มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยมีค่า pH เท่ากับ 8.04 ± 0.04 และ 7.87 ± 0.11 และมีค่า VFA/Alk เท่ากับ 0.09 ± 0.05 และ 0.19 ± 0.04 ตามลำดับ เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวมีอัตราส่วนของน้ำเสียจากกระ

บวนการล้างนอนแมลงวันลายที่มีปริมาณของแข็งและองค์ประกอบของโปรตีนน้อยกว่าอัตราส่วน 3:1 ซึ่งการมีปริมาณของแข็งและโปรตีนในระบบมากทำให้ภายในระบบเกิดแอมโมเนียและการสะสมของกรดอินทรีย์ทำให้หัวเชื้อไม่สามารถย่อยสลายได้ทันจนกระทั่งเกิดการยับยั้งการเติบโตและการทำงานของแบคทีเรียเมทาโนเจน [22],[26],[27] ในขณะที่อัตราส่วนอื่น ๆ สามารถผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนได้อย่างต่อเนื่อง

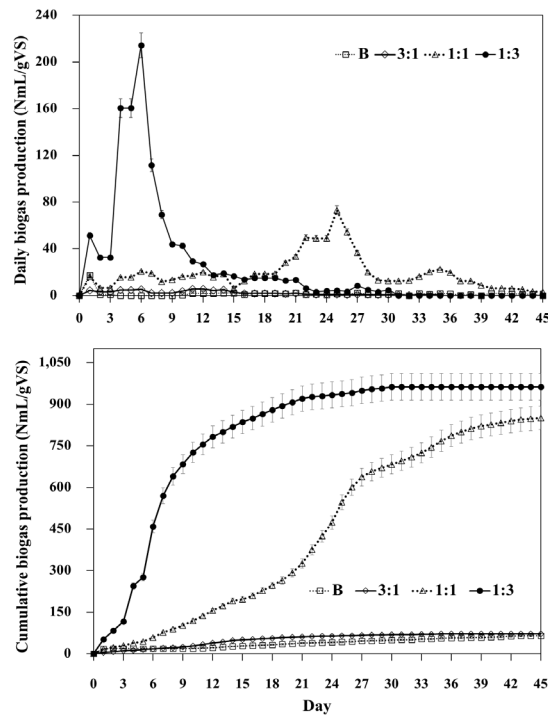
ตารางที่ 2 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซมีเทน และประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์

SIR		3:01	1:01	1:03
Cumulative biogas (mL)		$1,256.85 \pm 26.25$	$5,251.17 \pm 43.55$	$2,595.17 \pm 18.98$
BMP (NmL _{CH₄} /gVS _{add})		22.21 ± 9.55	401.51 ± 24.42	372.26 ± 6.31
CH ₄ (%)		35.9	67.9	47.9
COD (g/L)	Initial	50.20 ± 5.92	68.63 ± 9.51	36.47 ± 1.18
	Final	28.53 ± 14.07	22.97 ± 3.04	8.10 ± 3.44
TS (g/L)	Initial	34.26 ± 1.41	29.44 ± 1.41	19.42 ± 3.07
	Final	31.66 ± 2.62	25.17 ± 2.24	19.91 ± 1.51
VS (g/L)	Initial	29.40 ± 1.08	23.53 ± 1.76	14.49 ± 2.20
	Final	25.70 ± 1.00	17.94 ± 1.37	11.97 ± 2.30
VFA/ Alk	Initial	1.75 ± 0.03	1.49 ± 0	1.10 ± 0.02
	Final	3.01 ± 0.24	0.09 ± 0.05	0.19 ± 0.04
pH	Initial	7.40 ± 0.02	7.65 ± 0.02	7.60 ± 0
	Final	5.84 ± 0.02	8.04 ± 0.04	7.87 ± 0.11

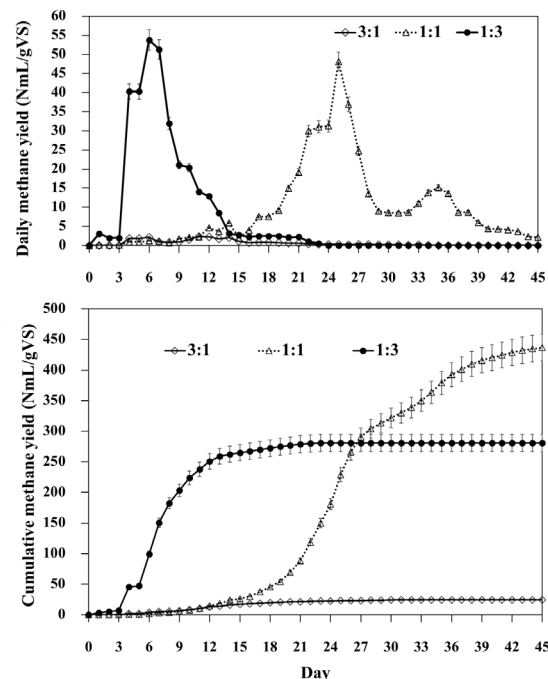
3.3 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน

การผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนจากน้ำเสียกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคา โดยใช้หัวเชื้อจากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร แสดงผลการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันและสะสมในอัตราส่วน 3:1, 1:1 และ 1:3 ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน 1:3 สามารถเริ่มต้นการผลิตก๊าซชีวภาพได้เร็วที่สุด ตั้งแต่วันที่ 2 ถึงวันที่ 5 ของการหมักซึ่งสามารถผลิต

ก๊าซชีวภาพ 51.41 NmL/gVS_{add} และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เป็น 214.28 NmL/gVS_{add} สามารถผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 47.90% โดยมีเทนรายวันช่วงที่สูงที่สุดเท่ากับ 203.43 NmL/gVS_{add} และก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 224.83 NmL/gVS_{add} แต่หลังจากวันที่ 6 การผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนลดลงอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5 เนื่องจากอัตราส่วนสารอาหารที่ได้รับจากน้ำเสียไม่เพียงพอต่อหัวเชื้อที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน [14],[28]



รูปที่ 4 การผลิตก๊าซชีวภาพรายวันและการผลิตก๊าซชีวภาพสะสม



รูปที่ 5 การผลิตก๊าซมีเทนรายวันและการผลิตก๊าซมีเทนสะสม

สำหรับอัตราส่วน 3:1 มีสัดส่วนของวัตถุดิบน้ำเสียมากกว่าหัวเชื้อ โดยน้ำเสียจากกระบวนการล้างหนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคาที่มีสัดส่วนโปรตีน

มากถึง 49.79% ส่งผลให้น้ำเสียมีโปรตีนสูง [3] จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องระบุว่าน้ำเสียที่มีลักษณะโปรตีนสูง เมื่อเข้าสู่กระบวนการไฮโดรไลซิสจะเกิดย่อยสลายโปรตีนและไขมันเป็นกรดอะมิโนและกรดไขมัน หลังจากนั้นจะถูกแบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กเป็นกรดอะซิดิก ซึ่งจะเกิดกรดอินทรีย์ปริมาณมากและเกิดการสะสมกรดอินทรีย์ในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยถ้ามีปริมาณ VFA มากเกิน 2,000 mg/L [29] จะเกิดการยับยั้งการเกิดมีเทน เมื่อวิเคราะห์ VFA ของสารขึ้นเหลวที่ออกจากระบบการหมักแบบกะของอัตราส่วน 3:1 พบว่ามีปริมาณความเข้มข้น VFA/Alk มากถึง 3.01 ± 0.24 ซึ่งเกินมาตรฐาน ทำให้ในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพมีสัดส่วนมีเทนต่ำกว่าองค์ประกอบของก๊าซอื่น ๆ เช่น CO_2 หรือ $\text{NH}_3\text{-N}$ เป็นต้น โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันเฉลี่ย 2.17 NmL/gVS_{add} มีเทนสะสมเท่ากับ 24.74 NmL/gVS_{add} ที่สัดส่วนมีเทนสูงสุด 35.90% ในช่วง 10 วันแรก หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจำเป็นต้องใช้เวลามากกว่า 45 days หรือมีกระบวนการปรับสภาพก่อนหรือระหว่างการหมักด้วยค่าหรือปรับอัตราส่วนระหว่างวัตถุดิบกับหัวเชื้อให้เหมาะสม [30] จากการทดลองพบว่าอัตราส่วน 1:1 คืออัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วน 3:1 และ 1:3 โดยการผลิตก๊าซชีวภาพของอัตราส่วน 1:3 ที่มีสัดส่วนน้ำเสียหรืออาหารเลี้ยงจุลินทรีย์น้อยทำให้เกิดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้เร็ว [13] แต่เนื่องจากมีสารอาหารน้อยกว่าความต้องการของจุลินทรีย์ทำให้กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนค่อย ๆ ต่ำลง แต่อัตราส่วนที่มีน้ำเสียมากขึ้นจำเป็นต้องใช้เวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งน้ำเสียที่มีโปรตีนสูงจะใช้เวลาในการปรับสภาพระหว่างจุลินทรีย์กับอาหารนานกว่าอัตราส่วนที่มีสารอาหารน้อย [13] โดยการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันค่อย ๆ เพิ่มขึ้นและเกิดการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีที่สุดในวันที่ 25 ของอัตราส่วน 1:1 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดในวันที่ 19 โดยการผลผลิตก๊าซชีวภาพรายวัน 73.05 NmL/gVS_{add} และมีผลผลิตของมีเทนสะสม ในช่วง 10 วันแรก เพิ่มขึ้นต่อวัน 1 NmL/gVS_{add} ที่สัดส่วนมีเทน 5.90–41.10% หลังจากนั้นเพิ่มขึ้น 10 NmL/gVS_{add} ภายใน 3 days และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีสัดส่วนมีเทนสูงสุด 67.90% โดยมีมีเทนสะสม

434.58 NmL/gVS_{add} ดังนั้นเมื่อหมักวัตถุดิบและหัวเชื้อในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้เกิดศักยภาพสูงสุดต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ [14],[28] แต่ในอัตราส่วน 3:1 พบว่ามีสัดส่วนสารอาหารมาก เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ซึ่งอัตราส่วน VFA/ALK และปริมาณกรดอินทรีย์มีค่าเกินมาตรฐานบ่งบอกถึงการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ในระยะเวลา 45 days ดังนั้นอัตราส่วน 1:1 จึงเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม สามารถนำไปศึกษาต่อในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ใหญ่ขึ้น หรือศึกษาลักษณะการเติมแบบกึ่งต่อเนื่องเพื่อนำไปใช้จริงในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

4. สรุป

การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากกระบวนการล้างนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคาที่มีค่า COD และปริมาณของแข็งระเหยง่ายเท่ากับ 58.43 ± 6.69 g/L และ 30.82 ± 1.31 g/L ตามลำดับ พบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพโดยหมักกับหัวเชื้อจากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรในอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อโดยปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ดีที่สุดเท่ากับ 1:1, 1:3 และ 3:1 ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วน 1:1 มีศักยภาพ TS_{removal} และ VS_{removal} สูงที่สุดเท่ากับ 14.49% และ 23.76% ตามลำดับ มีศักยภาพการย่อยสลายค่า COD 68.51% เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น ๆ โดยอัตราส่วน 3:1 มีสัดส่วนสารอาหารมากเกินไปทำให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพล้มเหลว และสำหรับอัตราส่วน 1:3 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้แต่มีสัดส่วนก๊าซมีเทน ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน และศักยภาพการกำจัดสารอินทรีย์ต่ำกว่าอัตราส่วน 1:1 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนตลอดระยะเวลาการหมัก 45 days โดยมีเทนสะสม 401.51 ± 24.42 NmL/gVS_{add} ที่สัดส่วนมีเทนสูงสุด 67.90% แสดงให้เห็นว่าน้ำเสียจากกระบวนการเลี้ยงนอนแมลงวันลายที่เลี้ยงด้วยกากถั่วดาวอินคาสามารถนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำไปศึกษาต่อในลักษณะการเติมแบบกึ่งต่อเนื่องหรือศึกษารูปแบบถังหมักที่เหมาะสมกับน้ำเสียดังกล่าวในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนงานวิจัยภายใต้โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาลัยพลังงานทดแทน ทุนศึกษย์ก้นกุฏิ บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยแม่โจ้ และขอขอบคุณอาจารย์และผู้ที่เกี่ยวข้องที่ให้การสนับสนุนความรู้ อุปกรณ์ และให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Castro-Lopez, L. Santiago-Lopez, B. Vallejo-Cordoba, A. F. Gonzalez-Cordova, A. M. Liceaga, H. S. Garcia and A. Hernandez-Mendoza, "An insight to fermented edible insects: A global perspective and prospective," *Food Research International*, vol. 137, 2020, Art. no. 109750, doi: 10.1016/j.foodres.2020.109750.
- [2] B. M. A. Dortmans, S. Diener, B. M. Verstappen and C. Zurbrugg, "Waste Treatment by BSF," in *Black Soldier Fly Biowaste Processing - A Step-by-Step Guide*, Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 2017, ch. 2, pp. 6–20.
- [3] C. Sirima, Y. Vichamance and K. Nisanarth, "Value Added of Sacha Inchi by Using Nut Meal and Leaf to Produce Valuable Products," Burapha University, ChonBuri, Thailand, Final Rep., 2017.
- [4] S. Nareerat, K. Anurak, T. Pattaraporn and K. Wannapom, "Sacha inchi meal as a novel plant protein source in common carp diet (*Cyprinus carpio*)," *Khon Kaen Agriculture Journal*, vol. 42, no. 2, pp. 442–451, 2021, doi: 10.14456/kaj.2021.38.
- [5] J. Teerapong, S. Prapaipun, M. Sonthaya, S. Aekkaphob and B. Phanupong, "A raise of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae feed by waste treatment for use as alternative protein source in animal feed," Rajamangala University of Technology

- Suvarnabhumi, Phranakhon Si Ayutthaya, Thailand, Final Rep., 2020.
- [6] National Science and Technology Development Agency, “Animal technology,” in *Knowledge Media Book ready-to-use Technology for Agriculture and Community*. 2019, ch.3, pp. 77–81.
- [7] K. Preeya, S. Kittikorn, P. Pakamon, S. Chayanon, P. Wongphan and N. Rotjapun, “Biogas Production Potential from Black Soldier Fly Larvae Washing Process Wastewater,” in *The 34th Annual Meeting of the Thai Society for Biotechnology and International Conference*, Bangkok, Thailand, Nov. 24–25, 2022, pp. 12.
- [8] R. T. Gahukar, “Edible Insects Farming: Efficiency and Impact on Family Livelihood, Food Security, and Environment Compared With Livestock and Crops,” in *Insects as Sustainable Food Ingredients*, A. T. Dossey, J. A. Morales-Ramos and M. G. Rojas, Eds., Cambridge, MA, USA: Academic Press, 2016, ch. 4, pp. 85–111.
- [9] R. M. Jingura and R. Kamusoko, “Methods for determination of biomethane potential of feedstocks: a review,” *Biofuel Research Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 573–586, 2017, doi: 10.18331/brj2017.4.2.3.
- [10] Y. Wang and L. Serventi, “Sustainability of dairy and soy processing: A review on wastewater recycling,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 237, 2019, Art. no. 117821, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117821.
- [11] X. Chen, W. Zhou, G. Li, Q. Song, M. Ismail, Y. Wang, L. Ren and C. Cheng, “Anaerobic biodegradation of soybean-process wastewater: Operation strategy and sludge bed characteristics of a high-performance Spiral Symmetric Stream Anaerobic Bioreactor,” *Water Research*, vol. 197, 2021, Art. no. 117095, doi: 10.1016/j.watres.2021.117095.
- [12] V. K. Alves Araujo, S. de Almeida, S. B. de Oliveira, W. P. Calixto, G. P. Furriel and D. P. Barbosa, “Anaerobic digestion using residue of soybean processing: Biogas production and it is potential to generate energy,” presented at the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, Czech Republic, May 17–19, 2017, pp. 1–4.
- [13] M.-J. Kim and S.-H. Kim, “Conditions of lag-phase reduction during anaerobic digestion of protein for high-efficiency biogas production,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 143, 2020, Art. no. 105813 doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105813.
- [14] Y. Zhou, Z. Zhang, T. Nakamoto, Y. Li, Y. Yang, M. Utsumi and N. Sugiura, “Influence of substrate-to-inoculum ratio on the batch anaerobic digestion of bean curd refuse-okara under mesophilic conditions,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 7, pp. 3251–3256, 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2011.04.002.
- [15] P. Bulak, K. Proc, M. Pawłowska, A. Kasprzycka, W. Berus and A. Bieganski, “Biogas generation from insects breeding post production wastes,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 244, 2020, Art. no. 118777, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118777.
- [16] C. Lalander, Å. Nordberg, and B. Vinnerås, “A comparison in product-value potential in four treatment strategies for food waste and faeces - assessing composting, fly larvae composting and anaerobic digestion,” *GCB Bioenergy*, vol. 10, no. 2, pp. 84–91, 2018, doi: 10.1111/gcbb.12470.
- [17] *Fermentation of organic materials-characterisation of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests*, VDI 4630, VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V., Düsseldorf, Germany, 2006.
- [18] *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, American Public Health Association, Washington, DC, USA:, 2005, pp. 2-33–5.21.

- [19] C. H. Pham, J. M. Triolo, T. T. T. Cu, L. Pedersen, and S. G. Sommer, "Validation and Recommendation of Methods to Measure Biogas Production Potential of Animal Manure," *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, vol. 26, no. 6, pp. 864–873, 2013, doi: 10.5713/ajas.2012.12623.
- [20] A. Hussain and S. K. Dubey, "Specific methanogenic activity test for anaerobic degradation of influents," *Applied Water Science*, vol. 7, pp. 535–542, 2017, doi: 10.1007/s13201-015-0305-z.
- [21] J. Filer, H. H. Ding and S. Chang, "Biochemical Methane Potential (BMP) Assay Method for Anaerobic Digestion Research," *Water*, vol. 11, no. 5, 2019, Art. no. 921, doi: 10.3390/w11050921
- [22] P. Latifi, M. Karrabi and S. Danesh, "Anaerobic co-digestion of poultry slaughterhouse wastes with sewage sludge in batch-mode bioreactors (effect of inoculum-substrate ratio and total solids)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 107, pp. 288–296, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.03.015.
- [23] R. Karki, W. Chuenchart, K. C. Surendra, S. Shrestha, L. Raskin, S. Sung, A. Hashimoto and S. Kumar Khanal, "Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives," *Bioresource Technology*, vol. 330, 2021, Art. no. 125001, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125001.
- [24] M. Barret, N. Gagnon, E. Topp, L. Masse, D. I. Masse and G. Talbot, "Physico-chemical characteristics and methanogen communities in swine and dairy manure storage tanks: spatio-temporal variations and impact on methanogenic activity," *Water Research*, vol. 47, no. 2, pp. 737–746, 2013, doi: 10.1016/j.watres.2012.10.047.
- [25] Y. Song, S. Meng, G. Chen, B. Yan, Y. Zhang, J. Tao, Y. Li and J. Li, "Co-digestion of garden waste, food waste, and tofu residue: Effects of mixing ratio on methane production and microbial community structure," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 5, 2021, Art. no. 105901, doi: 10.1016/j.jece.2021.105901.
- [26] F. Liotta, G. d'Antonio, G. Esposito, M. Fabbicino, E. D. van Hullebusch, P. N. Lens, F. Pirozzi and L. Pontoni, "Effect of total solids content on methane and volatile fatty acid production in anaerobic digestion of food waste," *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, vol. 32, no. 10, pp. 947–953, 2014, doi: 10.1177/0734242X14550740.
- [27] A. A. Pilarska, K. Pilarski, A. Wolna-Maruwka, P. Boniecki and M. Zaborowicz, "Use of Confectionery Waste in Biogas Production by the Anaerobic Digestion Process," *Molecules*, vol. 24, no. 1, 2018, Art. no. 37, doi: 10.3390/molecules24010037.
- [28] Y. M. Yoon, S. H. Kim, K. S. Shin, and C. H. Kim, "Effects of substrate to inoculum ratio on the biochemical methane potential of piggery slaughterhouse wastes," *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, vol. 27, no. 4, pp. 600–607, 2014, doi: 10.5713/ajas.2013.13537.
- [29] F. Yunus and T. L. Simangunsong, "Anaerobic Digestion of Industrial Tempeh Wastewater with Sludge from Cow Manure Biogas Digester as Inoculum: Effect of F/M Ratio on the Methane Production," *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, vol. 11, no. 3, 2021, pp. 1007–1013, doi: 10.5713/ajas.2013.13537
- [30] S. Pilli, A. K. Pandey, A. Katiyar, K. Pandey, and R. D. Tyagi, "Pre-treatment technologies to enhance anaerobic digestion," in *Sustainable Sewage Sludge Management and Resource Efficiency*, London, UK: IntechOpen Ltd., 2020, ch. 2, pp. 23.