

ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะลายปาล์มเปล่าและการใช้ประโยชน์

Potential of Biogas Production from Palm Empty Fruit Bunches and Its Utilization

พิพัฒน์ จันทร์ประดิษฐ์^{1*} อธิราชย์ เรืองณรงค์² และ ปิยะรัตน์ บุญแสวง³

Pipat Junpadit^{1*}, Athirat Rerngnarong² and Piyarat Boonsawang³

Received: 1 March 2021, Revised: 25 June 2021, Accepted: 19 July 2021

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะลายปาล์มเปล่าซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือชนิดของแข็งย่อยยาก โดยนำทะลายปาล์มเปล่าหมักแบบของแข็งร่วมกับมูลสุกรวางบนชั้นตะแกรงบนสุดของถังปฏิกรณ์สามส่วนในสภาวะไร้อากาศ และทำการผันฝอยน้ำเสียโรงอาหารคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จากส่วนกลางของถัง 5 ลิตรต่อวัน พบว่า ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันสูงสุดหลังวันที่ 5 เท่ากับ 10.52-10.83 ลิตร มีองค์ประกอบก๊าซมีเทนร้อยละ 66.98-68.49 น้ำเสียที่ผ่านการผันฝอยจะไหลลงเข้าสู่ส่วนล่างของถัง เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ และเติมน้ำเสียใหม่เข้าไปแทนที่ วัสดุหมักสามารถนำกลับมาผลิตก๊าซชีวภาพซ้ำได้ มีองค์ประกอบธาตุอาหารผ่านเกณฑ์มาตรฐานสามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน ผสมกับดินปลูกผักกวางตุ้งในอัตราส่วน 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนักค่อน้ำหนัก และให้น้ำแบบน้ำหยดด้วยน้ำหมักชีวภาพเปรียบเทียบกับน้ำประปา เป็นเวลา 20 วัน พบว่า ผักกวางตุ้งในชุดการทดลองที่รดด้วยน้ำหมักชีวภาพ มีการเจริญมากกว่า โดยน้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้ง เท่ากับ 37.50 และ 2.04 กรัมต่อต้น ตามลำดับ น้ำเสียที่ผ่านการผันฝอยนำกลับมาใช้เป็นน้ำหมักชีวภาพปลูกผักกวางตุ้งโดยไม่ใช้ดินและเติมสารละลายธาตุอาหารที่ความเข้มข้นร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยปริมาตร เป็นเวลา 20 วัน พบว่า ชุดการทดลองที่เติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 25 ผักกวางตุ้งมีน้ำหนักเปียกและน้ำหนักแห้งสูงสุด เท่ากับ 54.90 และ 3.11 กรัมต่อต้น ตามลำดับ การผลิตก๊าซชีวภาพจากทะลายปาล์มเปล่าทำให้ไร้ของเสียปล่อยทิ้ง ถือเป็นแนวทางการจัดการวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรได้อย่างคุ้มค่าและยั่งยืน

คำสำคัญ: ทะลายปาล์มเปล่า, ก๊าซชีวภาพ, วัสดุปรับปรุงดิน, น้ำหมักชีวภาพ, ไร้ของเสีย

¹ คณะวิทยาศาสตร์การกีฬาและสุขภาพ มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ วิทยาเขตกระบี่ ตำบลกระบี่ใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดกระบี่ 81000

¹ Faculty of Sports and Health Science, Thailand National Sports University, Krabi Campus, Krabi Yai, Mueang, Krabi 81000, Thailand.

² อุทยานวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

² Prince of Songkla University Science Park, Prince of Songkla University, Thung Yai, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.

³ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

³ Faculty of Agro-Industry, Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): p.j-kow@hotmail.com

ABSTRACT

This research aimed to study the potential of biogas production from palm empty fruit bunches which were difficult to digest. The palm empty fruit bunches with swine manure on the steel sieve at the top part of the 3-section bioreactor were fermented in the anaerobic solid state. The wastewater in the middle part of the 3-section bioreactor was sprayed on fermented material 5 liters per day. It was found that the system produced the highest biogas of 10.52-10.83 liters per day with methane content of 66.98-68.49%. The sprayed wastewater gravimetrically flew to the bottom part of the 3-section bioreactor for utilization and the new wastewater was then sprayed on the top part of the 3-section bioreactor. Fermentation materials could be reused for biogas production with high nutrient contents which met the soil improvement material standard. Fermentation materials were mixed with soil 1 : 1 (w/w) for bok choy planting. Liquid bio-fertilizer was used for watering until 20 days and compared to tap water. It was found that bok choy planted with fermentation material and watered with liquid bio-fertilizer gave the higher wet and dry weights of 37.50 and 2.04 g per plant, respectively. Liquid bio-fertilizer from recycled sprayed wastewater was used for hydroponics plantation. Liquid bio-fertilizer was mixed with nutrient solution at a concentration of 0 25 50 75 and 100 % v/v and used for plantation for 20 days. It was found that bok choy watered with the liquid bio-fertilizer and 25% nutrient solution obtained the highest wet and dry weights of 54.90 and 3.11 g per plant, respectively. Therefore, the biogas production from palm empty fruit bunches could be considered as a zero waste guideline for the cost-effective and sustainable management of agricultural waste.

Key words: palm empty fruit bunches, biogas, soil improvement material, liquid bio-fertilizer, zero waste

บทนำ

อุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันโดยรวมมีแนวโน้มความต้องการสูงขึ้น ส่งผลให้มีการขยายพื้นที่เพาะปลูกทั่วประเทศอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552 มีพื้นที่เพาะปลูกมากกว่า 5.8 ล้านไร่ในปี พ.ศ. 2561 (Office of Agricultural Economics, 2018) และภาคใต้โดยเฉพาะจังหวัด กระบี่ สุราษฎร์ธานี และ ชุมพร มีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันและโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 86.4 ของพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันทั่วประเทศ อีกทั้งยุทธศาสตร์ชาติ แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก ของประเทศมีการมุ่งส่งเสริมและสนับสนุนการใช้

น้ำมันดีเซลหมุนเร็ว B10 (น้ำมันทางเลือก) เป็นน้ำมันดีเซลเกรดมาตรฐานของไทย ในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ก่อให้เกิดวัสดุเศษเหลือ อาทิเช่น ทะลายปาล์มเปล่า (Empty fruit bunches) ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยกลูแคนร้อยละ 42.85 ไซแลนร้อยละ 24.01 ลิกนินร้อยละ 11.70 เถ้าร้อยละ 0.52 และอื่นๆ ร้อยละ 20.92 (Rahman *et al.*, 2007) เป็นของแข็งย่อยยากเหลือทิ้งจำนวนมากกว่า 500 ตันต่อปี โดยมูลค่าการซื้อขายทะลายปาล์มเปล่าราคาคันละ 180 บาท มีการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น การใช้ทะลายปาล์มเปล่าเป็นวัสดุเพาะเห็ด เป็นต้น (Umar *et al.*, 2013) ทะลายปาล์มเปล่าเป็นวัสดุชีวมวลชนิด

ของแข็งที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงด้วยกระบวนการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศทั้งในรูปแบบการหมักแบบเปียกทั่วไปและการหมักแบบแห้ง (Suksong *et al.*, 2020; Tepsour *et al.*, 2019; Chaikitkaew *et al.*, 2015; O-Thong *et al.*, 2012) ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 55.0-60.9 ลูกบาศก์เมตรต่อตันทะเลสาปาล์มเปล่า (Suksong *et al.*, 2020; Chaikitkaew *et al.*, 2015)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ประโยชน์จากทะเลสาปาล์มเปล่า ด้วยเทคโนโลยีการกำจัดของเสียแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่น่าสนใจมาใช้ในการบำบัดของเสียอินทรีย์ที่ให้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ ก๊าซชีวภาพโดยทั่วไปเป็นก๊าซผสม ประกอบไปด้วยก๊าซมีเทน (CH_4) ร้อยละ 50-75 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ร้อยละ 25-50 และก๊าซอื่นๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซแอมโมเนีย เป็นต้น โดยมากจะมีปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 1 (Kougias and Angelidaki, 2018) ซึ่งก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในก๊าซชีวภาพทำให้จุดติดไฟได้ สามารถนำไปหุงต้มประกอบอาหาร นอกจากนี้ยังมีผลพลอยได้อื่นๆ เช่น กากของแข็งที่เหลือหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินปลูกพืช และของเหลวหลังจากผลิตก๊าซชีวภาพสามารถใช้เป็นน้ำหมักชีวภาพเพื่อการเพิ่มสารอาหารให้แก่พืชและช่วยลดการใช้ปุ๋ยเคมีซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ได้อีกด้วย (Baştürk and Koçar, 2020)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วิธีการทดลอง

1.1 การผลิตก๊าซชีวภาพ

1.1.1 อังปฏิกิริยาสามส่วนสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

อังปฏิกิริยาทำจากท่อพีวีซีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 เซนติเมตร จำนวน 3 ท่อน สูง 20 เซนติเมตร 1 ท่อน และสูง 15 เซนติเมตร 2 ท่อน เรียงต่อกันในแนวตั้งทรงสูง ที่มีความสูงรวมเท่ากับ 50 เซนติเมตร และปริมาตรรวมเท่ากับ 25 ลิตร วางอยู่บนขาตั้งยกสูงจากพื้น สามารถเลื่อนปรับระดับได้ อังปฏิกิริยาสามส่วนประกอบด้วยส่วนที่หนึ่งท่อนบนสุดสำหรับบรรจุวัสดุหมัก วางอยู่บนชั้นตะแกรงสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ ส่วนที่สองท่อนกลางบรรจุน้ำเสียใช้ในการฟ้นฟอยและหมุนเวียนน้ำเสียด้วยจักรยานปั๊มน้ำ เพื่อให้ความชื้นและสารอาหารแก่วัสดุหมัก ผ่านสีกบกระจายน้ำซึ่งติดอยู่ด้านในของฝาถังหมักและมีอีก 1 ช่องเป็นบอลลูนควบคุมการเปิดปิดเพื่อให้ก๊าซชีวภาพไหลออกและเก็บไว้ในถังเก็บก๊าซ ส่วนที่สามเป็นท่อท่อนล่างสุดสำหรับเก็บน้ำหมักชีวภาพ เพื่อการนำไปใช้ประโยชน์รดน้ำผักกวางตุ้งแบบน้ำหยด และการปลูกผักกวางตุ้งโดยไม่ใช้ดิน

1.1.2 การเตรียมวัสดุหมัก

วัสดุหมักที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ ทะเลสาปาล์มเปล่าที่ผ่านการบดฉีกตามกรรมวิธีการผลิตจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท ไทยทาโลว์แอนด์ออยล์ จำกัด จังหวัดสุราษฎร์ธานี นำมาผึ่งแดดให้แห้งสนิท ให้มีความชื้นต่ำกว่าร้อยละ 12 เป็นเวลา 2-3 วัน เก็บไว้ในที่อุณหภูมิห้อง วัสดุสุกรจากฟาร์มคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับใช้เป็นหัวเชื้อในการผลิตก๊าซชีวภาพ และน้ำเสียจากโรงอาหารของคณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เพื่อใช้เป็นแหล่งสารอาหารและให้ความชื้นแก่วัสดุหมักในการผลิตก๊าซชีวภาพ เก็บไว้ในภาชนะปิดและที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

1.1.3 การผลิตก๊าซชีวภาพจากทะเลลายปาล์มเปล่าหมักร่วมกับมูลสุกร และฟ่นฝอยน้ำเสียโรงอาหารบนวัสดุหมัก

การผลิตก๊าซชีวภาพจากทะเลลายปาล์มเปล่าในสภาวะไร้อากาศด้วยถังปฏิกรณ์สามส่วน เตรียมวัสดุหมักทะเลลายปาล์มเปล่าหมักร่วมกับมูลสุกรในอัตราส่วนร้อยละ 70:30 โดยปริมาตรต่อปริมาตร เพื่อให้มีศักยภาพในการผลิตพลังงานชีวภาพ (Bioenergy potential) สูงสุด (Rosas-Mendoza *et al.*, 2021) วางบนชั้นตะแกรงส่วนที่หนึ่งของถังปฏิกรณ์ แล้วปิดฝาให้สนิท จากนั้นป้อนน้ำเสียโรงอาหารที่เก็บไว้ในส่วนที่สองของถัง ฟ่นฝอยลงบนวัสดุหมักในส่วนที่หนึ่ง โดยฟ่นฝอยและหมุนเวียนน้ำเสียทุกวัน วันละ 3 ครั้ง ด้วยจักรยานปั่นน้ำ ครั้งละเวลา 15 นาที จนครบ 7 วัน ทำการเก็บก๊าซชีวภาพเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ จากนั้นจึงทำการถ่ายน้ำเสียหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพจากส่วนที่สองเก็บไว้ในส่วนที่สามของถังปฏิกรณ์ เพื่อนำไปทดสอบรดน้ำผักกวางตุ้งแบบน้ำหยด และการปลูกผักกวางตุ้งโดยไม่ใช้ดินต่อไป เมื่อสิ้นสุดการทดลองนำกากของแข็งที่เหลือหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพ และน้ำหมักชีวภาพ ทดสอบคุณลักษณะด้านปุ๋ยโดยวิเคราะห์ธาตุอาหารได้แก่ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแตสเซียม

1.2 การปลูกผักกวางตุ้ง

1.2.1 การเตรียมแปลงปลูกผักกวางตุ้ง แบบใช้ดินผสมกากของแข็งที่เหลือหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการรดน้ำหมักชีวภาพแบบน้ำหยด

เตรียมแปลงปลูกผักกวางตุ้งโดยวัดระยะในการปลูกระหว่างต้นและระหว่างแถว 10×10 เซนติเมตร ขุดดินให้ลึก 15-20 เซนติเมตร ตากดินทิ้งไว้เป็นเวลา 3-5 วัน แล้วนำกากของแข็งที่เหลือหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพคลุกเคล้ากับดินที่ตากทิ้งไว้ในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักพรวน

ย่อยหน้าดินให้ร่วนซุย เพาะเมล็ดผักกวางตุ้งในแต่ละหลุม หลุมละ 4-5 เมล็ด แล้วนำไปวางไว้ในที่ร่มเป็นเวลา 5 วัน

1.2.2 การเตรียมแปลงปลูกผักกวางตุ้งโดยไม่ใช้ดิน

เตรียมแปลงปลูกผักกวางตุ้งโดยการเพาะต้นกล้าจากเมล็ดผักกวางตุ้ง 4-5 เมล็ด หยอดลงในช่องรอยบากบนแผ่นฟองน้ำที่เปียกชุ่ม คลุมปิดด้วยผ้าสะอาดที่เปียกชื้น แล้วนำไปวางไว้ในที่ร่มเป็นเวลา 5 วัน ทำการเจือจางน้ำหมักชีวภาพกับสารละลายธาตุอาหารตามความเข้มข้นต่างๆ แล้วเทใส่กระบะไว้

1.2.3 การปลูกผักกวางตุ้งแบบใช้ดินผสมกากของแข็งที่เหลือหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการรดน้ำหมักชีวภาพแบบน้ำหยด

การทดสอบปลูกผักกวางตุ้งแบบใช้ดินผสมกากของแข็งที่เหลือหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการรดน้ำหมักชีวภาพแบบน้ำหยด โดยทำการคัดเลือกต้นกล้าผักกวางตุ้งที่สมบูรณ์ให้เหลือหลุมละ 1 ต้น แล้วทำการรดด้วยน้ำเสียหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพ (น้ำหมักชีวภาพ) ที่ต่อท่อน้ำออกจากส่วนที่สามของถังปฏิกรณ์ลงบนแปลงปลูกผักกวางตุ้ง โดยปลายท่อแต่ละเส้นจะมีบอลลูนลวดควบคุมการไหลให้ของเหลวไหลออกมาเป็นหยดน้ำ ลงบนผิวดินเป็นเวลา 1 ชั่วโมงต่อวัน ทำการเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (รดด้วยน้ำประปาแบบน้ำหยด) ระยะเวลาในการเพาะปลูกผักกวางตุ้ง 20 วัน แล้วนำผักกวางตุ้งวิเคราะห์น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง

1.2.4 การปลูกผักกวางตุ้งแบบไม่ใช้ดินด้วยน้ำหมักชีวภาพ

การทดสอบน้ำหมักชีวภาพจากส่วนที่สามของถังปฏิกรณ์ โดยทำการเติมลงไปกับสารละลายธาตุอาหารในกระบะพลาสติก ทำการศึกษาปริมาณสารละลายธาตุอาหารสูตร A (N:P:K เท่ากับ 15:15:15) และสูตร B (ปุ๋ยยูเรีย) ที่มีการเติมลงไปให้น้ำหมัก

ชีวภาพที่ความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร ร้อยละ 0 25 50 75 และ 100 โดยปริมาตรต่อปริมาตร ตามคำแนะนำของ Boonnoi *et al.* (2017) เปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่มีการเติมเฉพาะน้ำหมักชีวภาพ และชุดน้ำประปาที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 100 ที่ปริมาตรของเหลว 10 ลิตร คัดเลือกต้นกล้าผักกวางตุ้งที่สมบูรณ์ที่เตรียมไว้ให้เหลือช่องละ 1 ต้น ย้ายลงปลูกบนแผ่นโฟมที่ใช้เป็นวัสดุพองคั้น จากนั้นทำการปลูกผักกวางตุ้งบนวัสดุพองในสารละลายธาตุอาหารเตรียมไว้ และมีการให้อากาศด้วยเครื่องเติมอากาศเพื่อให้เกิดการหมุนเวียนของสารละลายธาตุอาหาร ระยะเวลาในการเพาะปลูกผักกวางตุ้ง 20 วัน แล้วนำผักกวางตุ้งวิเคราะห์น้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง

2. วิธีการวิเคราะห์

วิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุหมักแต่ละชนิด ได้แก่ ทะลายปาล์มเปล่า น้ำเสียโรงอาหาร และมูลสุกร พารามิเตอร์ เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง ซีโอดี ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย เถ้า ความชื้น (APHA *et al.*, 2017) และเซลลูโลส (Subkaree, 2007) วิเคราะห์หาปริมาณก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการแทนที่น้ำ (Markphan *et al.*, 2020) และวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี ทดสอบคุณลักษณะด้านปุ๋ยโดยวิเคราะห์ธาตุอาหาร ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแตสเซียม (AOAC, 1990)

วิเคราะห์ค่าทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) พร้อมทั้งคำนวณหาค่าความถี่ ร้อยละ และค่าเฉลี่ย โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics Version 23.

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. คุณลักษณะของวัสดุหมักสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

คุณลักษณะน้ำเสียของโรงอาหารที่ใช้ในการฟ้นผอยบนวัสดุหมักเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่า น้ำเสียนี้อาจมีความเป็นกรด-ด่างเป็นกลาง (pH 7.10) ปริมาณซีโอดี เท่ากับ 3 กรัมต่อลิตร ซึ่งสารต่างๆ ในน้ำเสียส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ เมื่อวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่าย (VFA) พบว่า สารอินทรีย์ส่วนหนึ่งจะถูกจุลินทรีย์ตามธรรมชาติย่อยสลายและเปลี่ยนเป็น VFA เท่ากับ 0.31 กรัมต่อลิตร เช่น กรดแอซิดิก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก และกรดชนิดอื่นๆ ปริมาณของแข็งทั้งหมดของแข็งระเหยง่าย และของแข็งแขวนลอย ในน้ำเสียโดยเฉลี่ยน้อยกว่า 0.5 กรัมต่อลิตร แสดงว่าตะกอนในน้ำเสียนี้อาจมีปริมาณน้อยและไม่ค่อยมีความสกปรก เมื่อพิจารณาลักษณะของน้ำปรากฏว่ามีลักษณะขุ่นเล็กน้อย น้ำเสียจากโรงอาหารมีสารอินทรีย์ในรูปของ VFA ที่สามารถนำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ แต่ยังมีไม่เพียงพอ จึงมีการเติมทะลายปาล์มเปล่าเป็นวัสดุหมักร่วมกับมูลสุกรเพื่อให้มีสารอินทรีย์สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นการเพิ่มศักยภาพและความเป็นไปได้ในการใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนมากขึ้น (Hagos *et al.*, 2017) โดยองค์ประกอบทางเคมีของทะลายปาล์มเปล่า พบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 6.49 ความชื้นและเซลลูโลส เท่ากับร้อยละ 8.72 และ 41.31 ตามลำดับ และองค์ประกอบทางเคมีของมูลสุกร พบว่า มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.84 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของแข็งระเหยง่าย และเถ้า เท่ากับ 23.97 19.54 และ 4.63 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของวัสดุหมักสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบ	ทะลายปาล์มเปล่า	มูลสุกร	น้ำเสียโรงอาหาร
ความชื้น (ร้อยละ)	8.72	-	-
ออกซิเจนที่ละลาย (ร้อยละ)	-	-	77.19
กรด-ด่าง	6.49	6.84	7.10
เซลลูโลส (ร้อยละ)	41.31	-	-
ซีโอดี (กรัมต่อลิตร)	-	-	3.00
กรดไขมันระเหยง่าย (กรัมต่อลิตร)	-	-	0.31
ของแข็งทั้งหมด (กรัมต่อลิตร)	-	23.97	0.48
ของแข็งระเหยง่าย (กรัมต่อลิตร)	-	19.54	0.21
ของแข็งแขวนลอย (กรัมต่อลิตร)	-	17.20	0.05
ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (กรัมต่อลิตร)	-	15.72	0.01
เถ้า (กรัมต่อลิตร)	-	4.63	0.25

หมายเหตุ: - ไม่ได้ดำเนินการวิเคราะห์

2. การผลิตก๊าซชีวภาพจากทะลายปาล์มเปล่าหมักร่วมกับมูลสุกร และฟ่นฝอยน้ำเสียโรงอาหารบนวัสดุหมัก

จากการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะลายปาล์มเปล่าหมักร่วมกับมูลสุกร และฟ่นฝอยน้ำเสียโรงอาหาร เป็นแหล่งของสารอาหารและให้ความความชื้นบนวัสดุหมัก พบว่าในช่วง 3 วันแรกหลังจากทำการเดินระบบ การผลิตก๊าซชีวภาพมีปริมาณค่อนข้างน้อย (เฉลี่ย 2.4 ลิตรต่อวัน) ยกเว้นวันที่ 1 มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ 4.8 ลิตรต่อวัน เนื่องจากจุลินทรีย์ในมูลสุกรสามารถย่อยสลายสารอาหารที่มีอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งเป็นวัสดุที่ย่อยสลายง่ายกว่าเมื่อเทียบกับทะลายปาล์มเปล่าซึ่งเป็นวัสดุหมักชนิดของแข็งย่อยยาก ที่มีองค์ประกอบ เช่น เซลลูโลส ลิกโนเซลลูโลส เป็นต้น (Khan and Ahring, 2019) องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 37.42 ก๊าซมีเทนร้อยละ 3.69 และก๊าซชนิดอื่นร้อยละ 58.89 พบว่าร้อยละของก๊าซมีเทนยังมีปริมาณน้อย เพราะในช่วงวันแรกๆ จุลินทรีย์ที่ผลิตกรดจะมีการย่อยสลาย

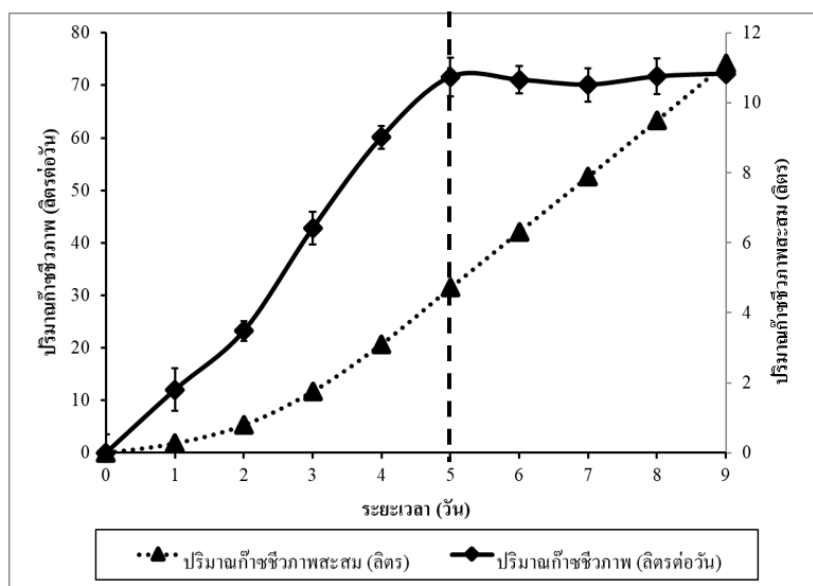
สารอินทรีย์จากวัสดุหมักในสภาวะไร้อากาศ และเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหยง่าย เช่น กรดแอซิดิก หลังจากนั้นจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนจะย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่าย เพื่อใช้ในการเจริญและผลิตก๊าซมีเทนจึงมีปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง (Wainaina *et al.*, 2019) เนื่องจากการผลิตก๊าซมีเทน จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนสามารถใช้ทั้งกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid: VFA) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารตั้งต้นได้ (Chaiprapat, 2018) ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากการเดินระบบในวันที่ 3 (ตารางที่ 2) พบว่ามีค่าสูงสุดและคงที่หลังจากวันที่ 5 โดยผลิตก๊าซชีวภาพ 10.52-10.83 ลิตรต่อวัน มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ ร้อยละ 66.98-68.49 ดังตารางที่ 2 และภาพที่ 1 - 2 ดังนั้นในการเดินระบบและการเปลี่ยนถ่ายน้ำเสีย จะทำการเปลี่ยนถ่ายทุกๆ วันที่ 5 ของการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จากส่วนที่สองเพื่อนำไปเก็บพักไว้ในส่วนที่สามของถัง แล้วทำการถ่ายน้ำเสียชุดใหม่ลงไปแทนที่น้ำเสียชุดเดิมที่บรรจุไว้ในส่วนที่สองของถัง

ปฏิกรณ์ สำหรับใช้ในการฟ้นฝอยบนวัสดุหมักใน รอบถัดไป โดยพบว่าวัสดุหมักที่ใช้ในการผลิตก๊าซ ชีวภาพสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำ (Reuse) ได้จำนวน 4 ครั้ง โดยสังเกตได้จากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ลดลง จากนั้นจึงทำการรื้อระบบ เพื่อเปลี่ยนวัสดุหมักชุด ใหม่ลงไปในแทนที่วัสดุหมักชุดเดิม ซึ่งวัสดุหมักที่ผ่าน การใช้ซ้ำเป็นกากของแข็งที่เหลือหลังจากการผลิต ก๊าซชีวภาพ สามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินนำไป ปลุกผักได้ เนื่องจากผ่านเกณฑ์มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ ของกรมวิชาการเกษตร (Department of Agriculture, 2014) และปุ๋ยหมักของสินค้าเกษตรและอาหาร แห่งชาติ: ปุ๋ยหมัก (มกอช. 9503) (National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standard, 2005) โดยมีองค์ประกอบของธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแตสเซียม ร้อยละ 1.72 0.92 และ

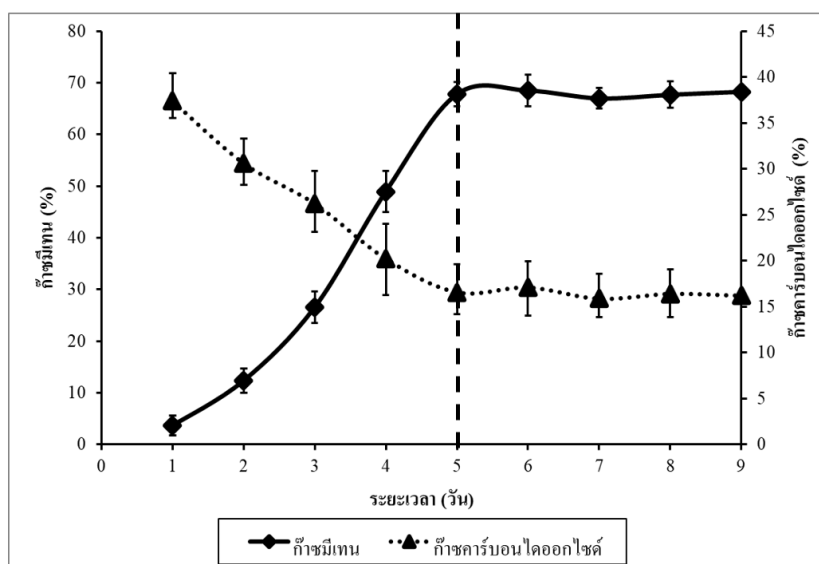
0.54 ตามลำดับ และน้ำหมักชีวภาพหลังจากการผลิต ก๊าซชีวภาพ มีองค์ประกอบของธาตุอาหาร ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโปแตสเซียม ร้อยละ 0.11 0.16 และ 0.15 ตามลำดับ แม้ไม่ผ่านเกณฑ์ มาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์น้ำของกรมวิชาการเกษตร (Department of Agriculture, 2014) แต่มีความเป็นไปได้ในการใช้เป็นน้ำหมักชีวภาพเพื่อนำไปรดน้ำผัก แบบน้ำหยด และนำไปปลูกผักกวางตุ้งโดยไม่ใช้ดิน ดังตารางที่ 3 และเมื่อวิเคราะห์คุณลักษณะน้ำเสีย หลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่าปริมาณซีโอดี (3.98 กรัม/ลิตร) ยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ซึ่ง มีค่าไม่เกิน 0.4 กรัม/ลิตร (Pollution Control Department, 2005) ดังตารางที่ 4 จึงนำน้ำหมัก ชีวภาพหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ ในการทดลองปลูกผักกวางตุ้งต่อไป

ตารางที่ 2 การผลิตก๊าซชีวภาพจากทะลายปาล์มเปล่าหมักร่วมกับมูลสุกร

วันที่	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตร)	ก๊าซมีเทน (ร้อยละ)	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ)
0	-	-	-	-
1	1.80±0.52	1.80	3.69±3.03	37.42±2.98
2	3.48±0.61	5.28	12.36±1.89	30.63±3.04
3	6.41±0.28	11.69	26.57±2.37	26.23±2.69
4	9.02±0.47	20.71	48.96±3.12	20.23±3.52
5	10.74±0.33	31.44	67.81±3.94	16.58±3.77
6	10.66±0.56	42.10	68.49±2.36	17.11±3.06
7	10.52±0.39	52.61	66.98±3.05	15.87±2.80
8	10.75±0.48	63.36	67.69±1.99	16.41±2.74
9	10.83±0.51	74.19	68.26±2.58	16.20±2.63



ภาพที่ 1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ (ลิตรต่อวัน) และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ลิตร)



ภาพที่ 2 องค์ประกอบของก๊าซมีเทน (ร้อยละ) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ)

ตารางที่ 3 ผลพลอยได้หลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพ

ธาตุอาหาร	วัสดุปรับปรุงดิน (กากของแข็ง)	ค่ามาตรฐานปุ๋ย*	น้ำหมักชีวภาพ (ของเหลว)	ค่ามาตรฐาน น้ำหมักชีวภาพ**
ไนโตรเจน	ร้อยละ 1.72	> ร้อยละ 1.0	ร้อยละ 0.11	> ร้อยละ 0.5
ฟอสฟอรัสในรูป P_2O_5	ร้อยละ 0.92	> ร้อยละ 0.5	ร้อยละ 0.16	> ร้อยละ 0.5
โปแตสเซียมในรูป K_2O	ร้อยละ 0.54	> ร้อยละ 0.5	ร้อยละ 0.15	> ร้อยละ 0.5

ที่มา: *National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standard (2005), Department of Agriculture (2014)

**Department of Agriculture (2014)

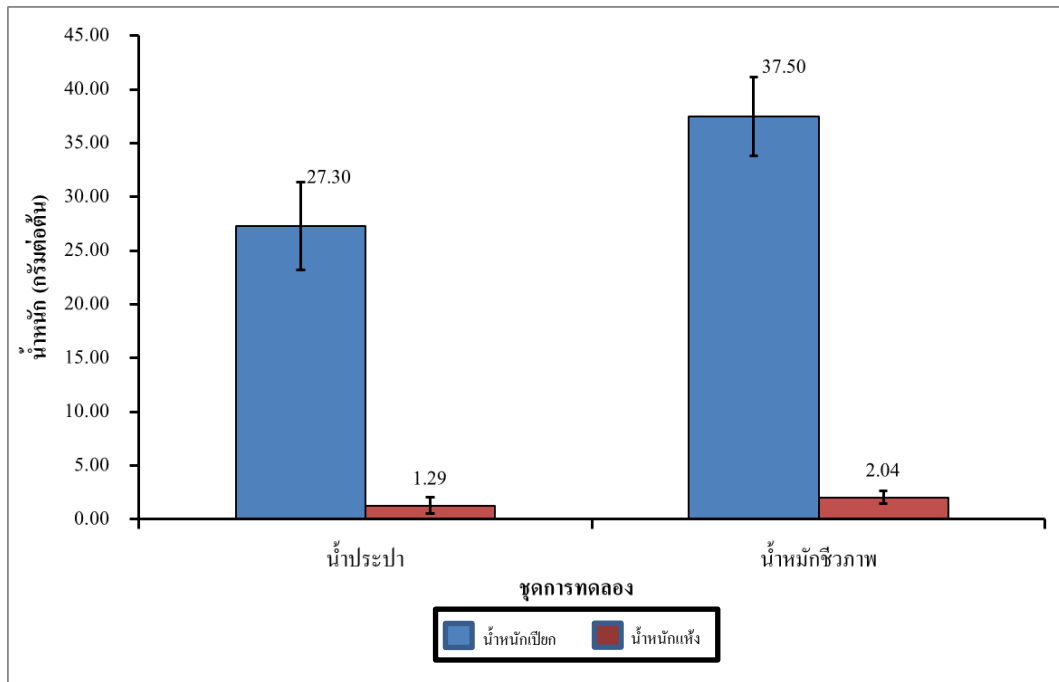
ตารางที่ 4 คุณลักษณะน้ำเสียหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์	น้ำเสียหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพ
สี	น้ำตาลอ่อน
พีเอช	6.50
ซีโอดี (กรัมต่อลิตร)	3.98

3. การปลูกผักกวางตุ้งแบบใช้ดินผสมกากของแข็งที่เหลือหลังการผลิตก๊าซชีวภาพ และรดด้วยน้ำหมักชีวภาพแบบน้ำหยด

จากการทดสอบการนำกากของแข็งที่เหลือหลังการผลิตก๊าซชีวภาพผสมกับดินเพื่อปลูกผักกวางตุ้งในแต่ละหลุม จากนั้นรดด้วยน้ำหมักชีวภาพเปรียบเทียบกับมารรดด้วยน้ำประปา (ชุดควบคุม) โดยมีการให้น้ำแบบน้ำหยดทุกวัน วันละ 1 ชั่วโมง พบว่า ชุดการทดลองที่มีการใช้วัสดุปรับปรุงดินและให้น้ำผักกวางตุ้งด้วยน้ำหมักชีวภาพแบบน้ำหยด ทำให้ต้นผักกวางตุ้งเจริญได้ดีกว่าชุดควบคุม โดยมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งเท่ากับ 37.5 ± 0.82 และ 2.04 ± 0.03 กรัมต่อต้น ตามลำดับ (ภาพที่ 3) เนื่องจากกากของแข็งที่เหลือหลังการผลิตก๊าซชีวภาพมีธาตุอาหารไนโตรเจนสูง คิดเป็นร้อยละ 60-

80 ทั้งนี้ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ส่วนใหญ่แล้วองค์ประกอบคาร์บอนจะถูกใช้ไป ขณะที่ไนโตรเจนมีการใช้ไปน้อยมาก จึงยังคงเหลืออยู่ในปริมาณมาก และเป็นรูปแบบที่พืชนำไปใช้ประโยชน์ได้สูงสุด (Chaiprapat, 2018) และเมื่อนำน้ำหมักชีวภาพมาประยุกต์ในการปลูกพืช สามารถทำได้ในพืชหลายชนิด เช่น ยางพาราเมื่อรดด้วยน้ำหมักชีวภาพ ทำให้น้ำยางพารามีความเข้มข้นของน้ำยาง (Dry rubber content) เพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2 กิโลกรัมต่อไร่ต่อวัน และให้ผลผลิตน้ำยางเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 2.5 เท่า (Chaiprapat, 2018) เป็นต้น เมื่อนำไปประยุกต์กับการปลูกพืชชนิดอื่นๆ จะเป็นการลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมี ถือเป็นการลดรายจ่าย และเป็นการทำเกษตรปลอดภัยอย่างยั่งยืน (Chaiprapat, 2018)



ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบน้ำหนักผักกวางตุ้งที่รดด้วยน้ำหมักชีวภาพและน้ำประปา แบบน้ำหยด อายุ 20 วัน

4. การปลูกผักกวางตุ้งแบบไม่ใช้ดินด้วยน้ำหมักชีวภาพ

จากการทดสอบปลูกผักกวางตุ้งโดยไม่ใช้ดิน ทำการเปรียบเทียบชุดการทดลองที่มีการเติมเฉพาะน้ำหมักชีวภาพ ชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหารเพิ่มเติมที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 50 และ 75 ในน้ำหมักชีวภาพ และชุดน้ำประปาที่เติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 100 พบว่า ชุดการทดลองที่เติมเฉพาะน้ำหมักชีวภาพ ต้นกล้าผักกวางตุ้งส่วนใหญ่มีอาการขาดธาตุอาหารอย่างรุนแรง ใบมีสีเหลือง และตายหลังจากเลี้ยงในน้ำหมักชีวภาพเป็นเวลา 10 วัน แต่ในชุดการทดลองอื่นๆ ไม่พบอาการใบเหลือง และยังพบว่าในชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 25 ในน้ำหมักชีวภาพ ทำให้ผักกวางตุ้งมีการเจริญสูงสุด มากกว่าชุดการทดลองอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (ตารางที่ 5 และ 6) โดยมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของผักกวางตุ้ง เท่ากับ 54.9 ± 0.84

และ 3.11 ± 0.04 กรัมต่อต้น ตามลำดับ (ภาพที่ 4) อีกทั้งเมื่อคำนึงถึงการเติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 25 ของปริมาณธาตุอาหารที่แนะนำ สามารถลดค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีในการเตรียมสารละลายธาตุอาหาร โดยต้นทุนของการเตรียมสารละลายธาตุอาหารต่อ 1 กระบะ เท่ากับ 4.50 บาท ในน้ำประปา 10 ลิตร ทำให้ต้นทุนต่อ 1 กระบะลดลงมีค่าเท่ากับ 0.59 บาท ในน้ำหมักชีวภาพ 10 ลิตร ซึ่งสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายได้ถึง 3.91 บาท ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Chaiprapat (2018) ว่า การนำน้ำหมักชีวภาพไปใช้ประยุกต์กับการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคเป็นการลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมี เช่น แห่นที่ปลูกด้วยน้ำหมักชีวภาพจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ สามารถใช้น้ำหมักชีวภาพเป็นแหล่งสารอาหารหลัก (ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส) และเจริญได้เป็นเวลากว่า 16 วัน โดยไม่ต้องมีการเติมสารเคมีเพิ่มเติม (Chaiprapat *et al.*, 2005) เป็นต้น ถือเป็นการลดรายจ่ายให้แก่เกษตรกร

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ ANOVA เปรียบเทียบความแตกต่างของน้ำหนักเปียกของผักกวางตุ้งจากการปลูกแบบไม่ใช้ดินด้วยน้ำหมักชีวภาพ อายุ 20 วัน กับชุดที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหารเพิ่มเติมความเข้มข้นร้อยละ 25 50 และ 75 และ ผักกวางตุ้งที่ปลูกในน้ำประปาเติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 100

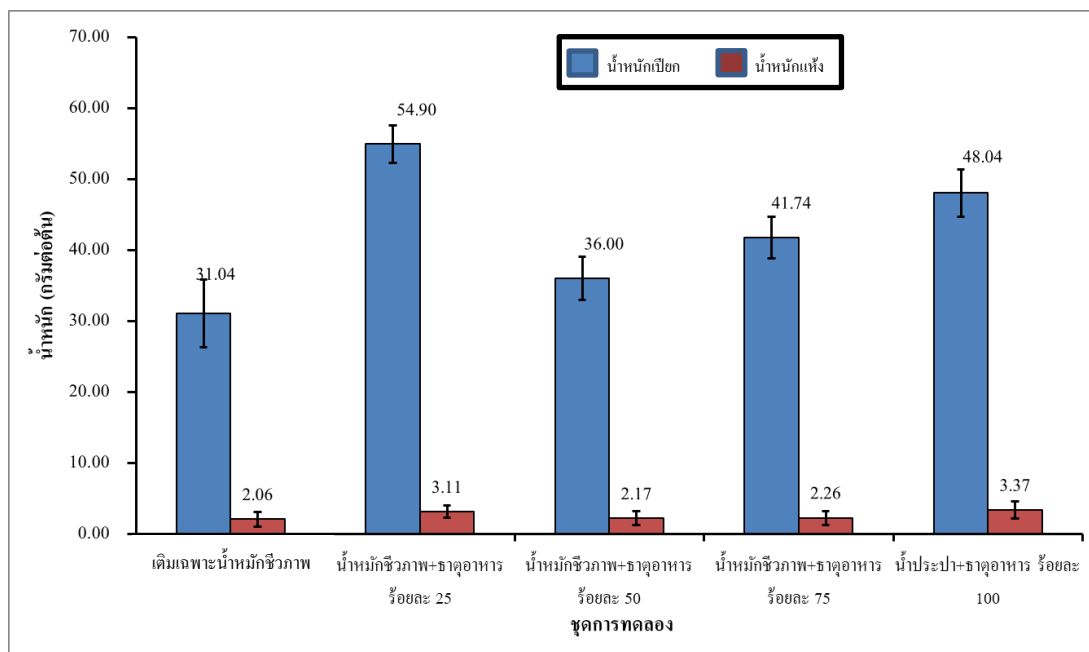
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	3586.738	4	896.684	1774.006	0.000*
Within Groups	22.746	45	0.505		
Total	3609.483	49			

*มีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ ANOVA เปรียบเทียบความแตกต่างของน้ำหนักแห้งของผักกวางตุ้งจากการปลูกแบบไม่ใช้ดินด้วยน้ำหมักชีวภาพ อายุ 20 วัน กับชุดที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหารเพิ่มเติมความเข้มข้นร้อยละ 25 50 และ 75 และ ผักกวางตุ้งที่ปลูกในน้ำประปาเติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 100

	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	14.468	4	3.617	3701.819	0.000*
Within Groups	.044	45	0.001		
Total	14.512	49			

*มีระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05



ภาพที่ 4 เปรียบเทียบน้ำหนักผักกวางตุ้งจากการปลูกแบบไม่ใช้ดินด้วยน้ำหมักชีวภาพ (น้ำเสียที่ผ่านการผลิตก๊าซชีวภาพ) อายุ 20 วัน กับชุดที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหารเพิ่มเติมความเข้มข้นร้อยละ 25 50 และ 75 และ ผักกวางตุ้งที่ปลูกในน้ำประปาเติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 100

สรุป

1. จากการผลิตก๊าซชีวภาพจากทะลายปาล์ม เปล่าหมักร่วมกับมูลสุกร และฟ่นฝอยน้ำเสียโรงอาหารบนวัสดุหมักด้วยปุ๋ยหมักสามส่วน พบว่า หลังวันที่ 5 มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนสูงสุด ร้อยละ 66.98-68.49 และมีปริมาตรก๊าซชีวภาพมากที่สุด เท่ากับ 10.52-10.83 ลิตรต่อวัน เมื่อเดินระบบถึงวันที่ 5 จะทำการป้อนน้ำเสียชุดใหม่เข้าไปแทนที่ และเก็บน้ำเสียหลักจากผลิตก๊าซชีวภาพใช้เป็นน้ำหมักชีวภาพ วัสดุหมักสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ 4 ครั้ง นอกจากนี้กากของแข็งเหลือทิ้งใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน มีองค์ประกอบของธาตุอาหาร เช่น ไนโตรเจน (ร้อยละ 1.72%) ฟอสฟอรัส (ร้อยละ 0.92) และ โพแทสเซียม (ร้อยละ 0.54) สามารถใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินได้ และน้ำเสียหลักจากการผลิตก๊าซชีวภาพยังสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ซ้ำ จนได้น้ำหมักชีวภาพและลดการใช้น้ำประปาในการให้น้ำผักกวางตุ้งแบบน้ำหยดได้

2. จากการปลูกผักกวางตุ้งแบบใช้ดินผสมกากของแข็งที่เหลือหลังการผลิตก๊าซชีวภาพ และรดด้วยน้ำหมักชีวภาพแบบน้ำหยด พบว่า ชุดการทดลองที่มีการให้น้ำด้วยน้ำหมักชีวภาพ แบบน้ำหยด ผักกวางตุ้งมีการเจริญมากกว่าชุดการทดลองที่มีการให้น้ำประปาแบบน้ำหยด (ชุดควบคุม) ซึ่งมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของผักกวางตุ้ง เท่ากับ 37.5 และ 2.04 กรัมต่อต้น ตามลำดับ

3. จากการปลูกผักกวางตุ้งแบบไม่ใช้ดินด้วยน้ำหมักชีวภาพ พบว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมสารละลายธาตุอาหารร้อยละ 25 ของปริมาณธาตุอาหารในน้ำหมักชีวภาพ ผักกวางตุ้งมีการเจริญสูงสุดมากกว่าชุดการทดลองอื่นๆ โดยมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของผักกวางตุ้ง เท่ากับ 54.9 และ 3.11 กรัมต่อต้น ตามลำดับ แต่หากใช้เฉพาะน้ำหมักชีวภาพ (ไม่มีการเติมสารละลายธาตุอาหาร) พบว่า

ต้นกล้าผักกวางตุ้งส่วนใหญ่จะตาย และเมื่อคำนึงถึงการเติมสารละลายธาตุอาหารที่ ร้อยละ 25 ในน้ำหมักชีวภาพ ปริมาตร 10 ลิตร สามารถลดค่าใช้จ่ายในการใช้สารเคมีเตรียมสารละลายธาตุอาหาร เท่ากับ 3.91 บาท

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัทจัดการและพัฒนาทรัพยากรน้ำภาคตะวันออก จำกัด (มหาชน) สำหรับการสนับสนุนในการทำการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- AOAC. 1990. **Official Method of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists.** 15th ed. The Association of Official Analytical Chemists Ins., Texas.
- APHA, AWWA and WEF. 2017. **Standard methods for the examination of water and wastewater.** 23rd ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington DC.
- Baştabak, B. and Koçar, G. 2020. A review of the biogas digestate in agricultural framework. **Journal of Material Cycles and Waste Management** 22: 1318-1327.
- Boonnoi, N., Nuntagij, I. and Koohakan, P. 2017. Growth and Yield of Chinese Kale Grown in Dynamic Root Floating Technique (DRFT) by Reused Nutrient Solution. **International Journal of Agricultural Technology** 13(7.1): 1469-1477.
- Chaikitkaew, S., Kongjan, P. and O-Thong, S. 2015. Biogas Production from Biomass Residues

- of Palm Oil Mill by Solid State Anaerobic Digestion. 2015 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging Economies. **Energy Procedia** 79: 838-844.
- Chaiprapat, S. 2018. **Applied Biogas Technology for Waste Treatment, Energy Production and Bioresource Recycling**. 2nd ed. Prince of Songkla University, Songkhla. (in Thai)
- Chaiprapat, S., Cheng, J.J., Classen, J.J. and Liehr, S.K. 2005. Role of Internal Nutrient Storage in Duckweed Growth for Swine Wastewater Treatment. **American Society of Agricultural Engineers** 48(6): 2247-2258.
- Department of Agriculture. 2014. **Biological Fertilizer Act B.E. 2557 (2014)**. Department of Agriculture, Bangkok. (in Thai)
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C. and Lu, X. 2017. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 76: 1485-1496.
- Khan, M.U. and Ahring, B.K. 2019. Lignin degradation under anaerobic digestion: Influence of lignin modifications -A review. **Biomass and Bioenergy** 128: 105325.
- Kougias, P.G. and Angelidaki, I. 2018. Biogas and its opportunities-A review. **Frontiers of Environmental Science & Engineering** 12(3): 14.
- Markphan, W., Tipruk, U., Sansee, T., Kaewdam, S. and Suksong, W. 2020. Biogas Production from Food Waste by Anaerobic Digestion. **Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University** 22(2): 116-122.
- National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standard. 2005. **Thai Agricultural Commodity and Food Standard (ACFS) 9503-2005, Compost**. National Bureau of Agricultural Commodity and Food Standard, Bangkok. (in Thai)
- Office of Agricultural Economics. 2018. **Statistic of Palm Oil**. Office of Agricultural Economics, the Ministry of Agriculture and Cooperatives. Available Source: <http://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/oilpalm%2061.pdf>, May 25, 2020. (in Thai)
- O-Thong, S., Boe, K. and Angelidaki, I. 2012. Thermophilic Anaerobic Co-digestion of Oil Palm Empty Fruit Bunches with Palm Oil Mill Effluent for Efficient Biogas Production. **Applied Energy Journal** 93: 648-654.
- Pollution Control Department. 2005. **Notification of the Ministry of Natural Resources and Environment: Setting up Standard Control of Releasing Wastewater from Swine Pollution Sources**. Pollution Control Department, Bangkok. (in Thai)
- Rahman, S.H.A., Choudhury, J.P., Ahmad, A.L. and Kamaruddin, A.H. 2007. Optimization studies on acid hydrolysis of oil palm empty fruit bunch fiber for production of xylose. **Bioresource Technology** 98: 554-559.
- Rosas-Mendoza, E.S., Alvarado-Vallejo, A., Vallejo-Cantú, N.A., Snell-Castro, R., Martínez-Hernández, S. and Alvarado-Lassman, A. 2021. Batch and Semi-Continuous Anaerobic

- Digestion of Industrial Solid Citrus Waste for the Production of Bioenergy. **Processes** 9: 648.
- Subkaree, Y. 2007. Optimal Condition for Ethanol Production from Palm Pressed Fiber Using Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF). Master of Science (Biotechnology), Prince of Songkla University. (in Thai)
- Suksong, W., Tukanghan, W., Promnuan, K., Kongjan, P., Reungsang, A., Insam, H. and O-Thong, S. 2020. Biogas production from palm oil mill effluent and empty fruit bunches by coupled liquid and solid-state anaerobic digestion. **Bioresource Technology** 296: 1-11.
- Tepsour, M., Usmanbaha, N., Rattanaya, T., Jariyaboon, R., O-Thong, S., Prasertsan, P. and Kongjan, P. 2019. Biogas Production from Oil Palm Empty Fruit Bunches and Palm Oil Decanter Cake using Solid-State Anaerobic co-Digestion. **Energies** 12: 4368.
- Umar, M.S., Jennings, P. and Urme, T. 2013. Strengthening the palm oil biomass renewable energy industry in Malaysia. **Renewable Energy Journal** 60: 107-115.
- Wainaina, S., Lukitawesa, Awasthi, M.K. and Taherzadeh, M.J. 2019. Bioengineering of anaerobic digestion for volatile fatty acids, hydrogen or methane production: A critical review. **Bioengineered** 10(1): 437-458.