

การศึกษาประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำทิ้งจากระบบบำบัด
แบบไร้อากาศร่วมกับของเสียกลีเซอรอล
Study on Efficiency and Possibility of Biogas Production from Anaerobic Digestion
Effluent with Glycerol Waste

กรกนก ศรีนวลสุข¹ พรวิมล เวชสิทธิ์¹ กำชัย นุ้ยธิตกุล^{1,2*} และ ชัยรัตน์ ศิริพัธนะ¹
Konkanok Srinunsuk^{1*}, Pornwimon Wadchasi¹ Kamchai Nuithitikul^{1,2*} and Chairat Siripattana¹

¹ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช 80160

² ศูนย์ความเป็นเลิศด้านชีวมวลและปาล์มน้ำมัน มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช 80160

¹ School of Engineering and Technology, Walailak University, Nakhon Si Thammarat 80160, Thailand.

² Biomass and Oil-Palm Center of Excellence, Walailak University, Nakhon Si Thammarat 80160, Thailand.

*Corresponding author, e-mail: kamchai.nu@wu.ac.th; kamchai_fius@yahoo.co.uk

(Received: Dec 2, 2021; Revised: Feb 27, 2022; Accepted: Jun 7, 2022)

บทคัดย่อ

ปัจจุบันน้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (POME) เป็นแหล่งผลิตก๊าซชีวภาพที่สำคัญของไทย แต่ POME มีปริมาณผันผวนมากตามฤดูกาล บางช่วงมีปริมาณน้อยและไม่สม่ำเสมอ ไม่เพียงพอต่อความต้องการ ดังนั้น โรงงานจึงต้องพยายามหาวัตถุดิบอื่นมาหมักร่วมเพื่อรักษาอัตราการผลิตให้เพียงพอต่อการใช้งานตลอดทั้งปี งานวิจัยนี้ จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาประสิทธิภาพและความเป็นไปได้ของการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (ADE) ซึ่งมีค่า COD ถึง 20,000 มิลลิกรัม/กรัม กลับเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพอีกครั้ง (อัตราส่วน POME/ADE 0-1.0) โดยนำมาหมักร่วมกับ ของเสียกลีเซอรอล (ร้อยละ 1, 3, 5 และ 7) พบว่า ที่อัตราส่วนของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศร่วมกับน้ำเสียจาก กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มที่ 80:20 และเติมของเสียกลีเซอรอลร้อยละ 3 ให้ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงที่สุด คือ ร้อยละ 62.09 ให้ผลได้มีเทน 271 มิลลิกรัมมีเทน/กรัมชีโอดี และมีค่า COD_{removal} ร้อยละ 80 จึงได้นำอัตราส่วนดังกล่าวเข้าสู่ การศึกษาด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมต่อเนื่อง (CSTR) ขนาด 10 ลิตร ที่ระยะเวลาพักเก็บ 25 วัน ให้ปริมาณมีเทนรายวัน 8,031 มิลลิกรัมมีเทน/วัน และปริมาณมีเทนสะสมภายในระยะเวลา 25 วัน 145,554 มิลลิกรัมมีเทนและคิดเป็นผลได้มีเทน รายวันเฉลี่ย 518 มิลลิกรัมมีเทน/กรัมวีเอส หรือ 299 มิลลิกรัมมีเทน/กรัมชีโอดี และยังพบว่าที่สภาวะดังกล่าวระบบ มีเสถียรภาพสูง ให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่สม่ำเสมอ สามารถปรับอัตราการผลิตให้เป็นไปตามความต้องการของโรงงาน ได้ง่าย นำไปใช้จริงในระดับอุตสาหกรรมโดยใช้ระบบเดิมที่มีอยู่

คำสำคัญ : น้ำทิ้งโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ก๊าซชีวภาพ ของเสียกลีเซอรอล น้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

Abstract

Currently, palm oil mill effluent (POME) is a main source of biogas in Thailand. However, POME supply has been fluctuating seasonally and sometimes become shortage. Hence, the industry has to search for new feedstock for co-digestion with POME to maintain the required production rate through the year. The research focuses on the study of the efficiency and feasibility of reusing the the anaerobic digestion effluent (ADE) which contain 20,000 mg/L of COD to co-digest with POME (ADE/POME between 0-1) and glycerol waste (GW 1, 3, 5 and 7% supplement). The results showed that the effluent from anaerobic digestion/palm oil mill effluent ratio of 80:20 with the addition of 3% glycerol gave the highest methane content in biogas. The highest methane content was 62.09% and the methane yield was 271 mL-CH₄/g-COD_{added}. The maximum COD removal at this condition was 80%. This condition was selected for further study in a 10-liter continuous stirred tank reactor (CSTR). At an HRT of 25 days, the average daily methane production was 8,031 mL-CH₄ /day and the cumulative methane production was 145,554



mL-CH₄. This was equivalent to the average daily methane yield of 518 mL-CH₄/g-VS_{added} or 299 mL-CH₄/g-COD_{added}. Moreover, it was found that the system was highly stable at this condition, providing steady biogas. It is also easy to adjust the production rate to achieve on-demand concept. Thus, it can be applied in the existing industrial plants without new design.

Keywords: Palm oil mill effluent, Biogas, Glycerol Waste, Anaerobic digestion effluent

บทนำ

ปาล์มน้ำมันถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีศักยภาพในการแข่งขันที่สูงมากที่สุดอย่างหนึ่งของโลก ประเทศไทยมีกำลังการผลิตน้ำมันปาล์มถึง 2.8 ล้านตัน/ปี จากทะลายน้ำมันปาล์มที่เป็นวัตถุดิบประมาณ 14 ล้านตัน/ปี มีวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการประมาณร้อยละ 78-82 ซึ่งทุกส่วนของปาล์มน้ำมัน (Sowcharoensuk, 2020) สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มได้ โดยส่วนใหญ่นำมาใช้เป็นชีวมวลในการผลิตความร้อนเพื่อใช้งานในโรงงานและผลิตไฟฟ้าเพื่อลดต้นทุนการผลิต ในบางกรณีสามารถขายต่อให้กับโรงไฟฟ้า นอกจากนี้ในระหว่างกระบวนการผลิตจะมีน้ำเสียเกิดขึ้นจากขั้นตอนต่าง ๆ ที่นำมารวมกันเรียกว่า น้ำเสียจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (Palm Oil Mill Effluent, POME) ตัวอย่างเช่น โรงงานที่สกัดน้ำมันปาล์มที่มีกำลังการผลิต 45 ตัน/ชั่วโมงของการสกัดผลปาล์มดิบ จะมีน้ำเสียจากกระบวนการผลิตประมาณวันละ 300-500 ลูกบาศก์เมตร (Pormtong, 2014) มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 3.4-5.2 ค่า COD อยู่ระหว่าง 15,000-140,000 มิลลิกรัม/ลิตร ค่า BOD อยู่ระหว่าง 30,000-40,000 มิลลิกรัม/ลิตร (Pormtong, 2014 ; Aziz *et al.*, 2020) จากข้อมูลประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ในพระราชกฤษฎีกาอนุญาต เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560 ได้กำหนดคุณลักษณะของน้ำเสียที่สามารถระบายทิ้งได้ ค่า COD ไม่เกิน 120 มิลลิกรัม/ลิตร และค่า BOD ไม่เกิน 20 มิลลิกรัม/ลิตร จึงมีความจำเป็นต้องมีการนำน้ำเสียดังกล่าว มาทำการบำบัดเพื่อให้ได้มาตรฐานที่กำหนดก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

ในประเทศไทย มาเลเซีย และอินโดนีเซีย ของเสียกลีเซอรอล (Glycerol Waste) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซลซึ่งผลิตได้จากน้ำมันปาล์มดิบแทบทั้งหมด ซึ่งมีราคาถูกมาก เพื่อพุงราคาปาล์มน้ำมันการแปรรูปให้เป็นกลีเซอรอลเกรดอุตสาหกรรมมีกระบวนการที่ซับซ้อนและมีต้นทุนสูง ในขณะที่ราคายกก็ลดลง (Kumar *et al.*, 2019) การนำของเสียกลีเซอรอลดิบ มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพก็เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ต้องการเพิ่มปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพตามความต้องการ เพราะของเสียกลีเซอรอลมี COD สูงมาก (1,400-1,900 กรัมซีโอดี/ลิตร แล้วแต่ความบริสุทธิ์) ดังจะเห็นได้ว่าในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีความพยายามที่จะเอาของเสียกลีเซอรอลมาหมักร่วมกับวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพหลายชนิดรวมไปถึง POME ซึ่งสามารถเพิ่มผลผลิตได้ก๊าซชีวภาพได้ 2 – 4 เท่าตัว โดยเติมกลีเซอรอลดิบ (Khairul Nizam *et al.*, 2021; Seekao *et al.*, 2021; Prasertsan *et al.*, 2021) อย่างไรก็ตามยังไม่มีมีการนำเอามาใช้ในทางอุตสาหกรรมกันอย่างจริงจัง เพราะยังไม่มีผลกระทบบ่อยอย่างเพียงพอทำให้โรงงานขาดความมั่นใจ อีกทั้งราคาของของเสียกลีเซอรอลยังสูงเกินกว่าที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหมักร่วมตามปกติ แต่เนื่องจากของเสียกลีเซอรอลสามารถเก็บไว้ได้นานเป็นปี และใช้ในปริมาณเพียงร้อยละ 3 ก็สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 2 เท่าตัว จึงสามารถนำใช้ได้ในเวลาที่ต้องการ (Seekao *et al.*, 2021) โดยไม่ต้องเปลี่ยนแปลงการออกแบบระบบเดิมที่มีอยู่

ในปัจจุบันได้มีแนวคิดที่จะนำน้ำเสียย่อยก๊าซชีวภาพ (Anaerobic Digestion Effluent, ADE) วนกลับเข้ามาในระบบใหม่ ทั้งนี้ก็เพื่อพยายามใช้ COD ที่ยังเหลืออยู่ประมาณ 10-20 กรัมซีโอดี/ลิตร รวมทั้งสารอาหารอื่น ๆ ที่จำเป็นสำหรับจุลินทรีย์ และช่วยเพิ่มรักษา pH และสัดส่วนระหว่าง VFA/Alkalinity ให้ต่ำ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและเสถียรภาพของระบบด้วย แต่ยังไม่มียางานผลการหมักร่วมระหว่าง POME ของเสียกลีเซอรอล และ ADE แต่อย่างใด ทั้งในแง่ของผลกระทบต่อผลได้ก๊าซชีวภาพ และเสถียรภาพของระบบ ทั้งในระดับระดับห้องปฏิบัติการและระดับต้นแบบ

ดังนั้นในบทความนี้ ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการหมักร่วมแบบไร้อากาศของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (ADE) จากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจาก POME โดยการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ กลับเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพอีกครั้ง เพื่อลดปริมาณ COD ที่สูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่กำหนดไว้ และเพื่อแก้ไขปัญหาวัยสุดท้ายหมักไม่เพียงพอต่อความต้องการของกระบวนการผลิต รวมไปถึงการช่วยรักษาระดับพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม แต่อย่างไรก็ตามปริมาณ COD ของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (ADE)

มีค่าประมาณ 15,000-25,000 มิลลิกรัม/ลิตร (Lok *et al.*, 2020) และแหล่งคาร์บอนที่เหลืออยู่นั้นค่อนข้างย่อยยาก หรืออาจจะไม่ย่อยสลายในสภาพของการหมักปกติ ทำให้ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพน้อย ผู้วิจัยจึงต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการเติมของเสียกลีเซอรอลในความเข้มข้นที่แตกต่างกัน (ร้อยละ 1, 3, 5 และ 7) ซึ่งของเสียกลีเซอรอลจะเป็นแหล่งคาร์บอนที่มี COD สูงมาก จึงต้องเติมลงไปปริมาณไม่เกินร้อยละ 10 เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะที่สมดุลและสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพได้ตามความต้องการ (Sawasdee *et al.*, 2019) โดยจะทำการศึกษาศักยภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งในกระบวนการทดลองแบบแบทช์ (Batch Process) ที่ศึกษาโดยการใส่วัสดุหมักเพียงแค่ครั้งเดียวและทำให้อยู่ในสภาวะแบบไร้อากาศ และนำผลที่ดีที่สุดมาทดสอบเสถียรภาพโดยการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous Process) ด้วยถังปฏิกรณ์ชนิดกวนผสมต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาศักยภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพและอัตราส่วนที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการหมักร่วมจากของเสียอุตสาหกรรม (น้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ, น้ำเสียจากระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม และของเสีย กลีเซอรอล) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยกระบวนการหมักแบบแบทช์ (Batch Process) และทดสอบเสถียรภาพของระบบโดยใช้ระบบแบบต่อเนื่องในถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพและลดปัญหาขาดแคลน POME ในบางฤดูกาล อีกทั้งช่วยลดมลพิษที่จะถูกปล่อยออกสู่ธรรมชาติ และเพื่อใช้เป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยให้ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพในโรงงานฯ สามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา

1.1 น้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion Effluent, ADE) และน้ำเสียจากระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม (Palm Oil Mill Effluent, POME) นำมาจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท พระแสง กรีนพาวเวอร์ จำกัด จังหวัดสุราษฎร์ธานี ทำการเก็บตัวอย่างของเสียที่อุณหภูมิ 0-4 องศาเซลเซียส เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงทางเคมีให้น้อยที่สุด ก่อนทำการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจะต้องทำการวิเคราะห์ตามวิธีของ APHA(2012) หาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยวิธี Electrometric method (pH meter รุ่น Hanna HI2002), Chemical Oxygen Demand (COD) ด้วย Close Reflux Titrimetric, ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids; TS) ด้วยวิธี Dried at 103-105 องศาเซลเซียส, ปริมาณของแข็งระเหย (Volatile solid; VS) ด้วยวิธี Dried at 550 องศาเซลเซียส, ค่าความเป็นด่าง (alkalinity; Alk) ด้วยวิธี Titrimetric method และ ปริมาณ กรดไขมันระเหยได้ (Volatile fatty acids; VFA) ด้วยวิธี Titrimetric method

1.2 เชื้อตั้งต้นสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ นำมาจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับอุตสาหกรรม นำมาจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม บริษัท พระแสง กรีนพาวเวอร์ จำกัด ซึ่งเป็นระบบบ่อหมักรางลูกผสม (Hybrid Channel Digester) เก็บรักษาไว้ในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน เพื่อให้เชื้อได้ใช้อาหารที่ย่อยได้ที่สภาวะ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะที่จะหมักแบบแบทช์ต่อไป และวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบก่อนนำไปใช้ศึกษา (pH, COD, TS, VS, Alk, VFA) ตามวิธีการในข้อ 1.1

1.3 ของเสียกลีเซอรอล (Glycerol waste) ซึ่งเป็นของเสียจากระบวนการผลิตไบโอดีเซล นำมาจากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จังหวัดสงขลา โดยตัวอย่างจะถูกนำมาเก็บไว้ในห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิห้อง เพราะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางเคมีน้อยมาก และวิเคราะห์ค่าองค์ประกอบก่อนนำไปใช้ศึกษา (pH, COD, TS, VS, Alk, VFA) ตามวิธีการในข้อ 1.1

2. การศึกษาศักยภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักแบบแบทช์ (Batch Process)

ในการหมักแบบแบทช์ใช้ขวดแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร ที่ปริมาตรศึกษา 300 มิลลิลิตร โดยกำหนดอัตราส่วนของสารหมักรวมและเชื้อตั้งต้นสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 20:80 ของปริมาตรศึกษา (Bernard *et al.*, 2001; Leurnurnkab, 2014) และมีการทดสอบซ้ำเพื่อยืนยันผลจำนวน 3 ซ้ำ มีการเติมวัสดุหมักเพียงแค่ครั้งเดียว จากนั้นทำการปิดขวดหมักด้วยจุกยางและฟาลูมิเนียมเพื่อให้ระบบเข้าสู่กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ทำการทดสอบเป็นระยะเวลา 30 วัน

ในระหว่างการศึกษาจะทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นด้วยชุดวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ และเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพด้วยหลอดสูญญากาศ เพื่อส่งวิเคราะห์ปริมาณของก๊าซมีเทน ด้วยเทคนิค Gas Chromatography (Irving, 1981) ด้วยเครื่องมือ Gas Chromatography (GC) รุ่น HP6890

การทดลองนี้ประกอบไปด้วย 6 ชุดการทดลองที่ใช้อัตราส่วนผสมระหว่างน้ำเสียที่ย่อยก๊าซชีวภาพ (ADE) และ POME ที่ต่างกัน (ADE:POME เป็นร้อยละ 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80, 0:100 ตามลำดับ) ในแต่ละชุดการทดลองประกอบไปด้วย 5 การทดลองย่อยที่มีการเติมของเสียลิเชอรอล ร้อยละ 0, 1, 3, 5, และ 7 โดยน้ำหนักของปริมาณของน้ำเสียผสม (ADE + POME)

3. การศึกษาศักยภาพศักยภาพและเสถียรภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพในกระบวนการแบบต่อเนื่อง (Continuous Process)

ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous Process) จะทำการศึกษาโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) (Kress P *et al.*, 2018) ขนาด 10 ลิตร ปริมาตรการศึกษา 7.5 ลิตร ในการทดสอบจะทำการควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการหมักให้อยู่ในช่วง 40 ± 2 °C คัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมจากการทดลองในกระบวนการแบบแบทช์ ซึ่งชุดการทดสอบที่เหมาะสมสำหรับการศึกษากิจกรรมหมักแบบต่อเนื่องคือการทดลองในชุดที่ 2 (ADE:POME ร้อยละ 20:80) โดยมีการกำหนดระยะเวลาเก็บกากที่ 25 วัน (Nualsri C *et al.*, 2016) เก็บตัวอย่างวัตถุดิบที่ออกจากกระบวนการหมัก (outlet) เพื่อวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าสภาพความเป็นด่าง (Alk) และค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ทุก ๆ 2 วัน รวมทั้งทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันด้วยชุดนับปริมาณก๊าซ (Biogas Counter) และเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพทุกวันเพื่อวิเคราะห์ปริมาณมีเทนของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง Gas Chromatograph

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาค่าประกอบของของเสียที่นำมาใช้ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลการศึกษาค่าประกอบของวัสดุหมักรวมแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเสียลิเชอรอลเป็นด่างมีค่า 9.37 น้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศมีค่าเป็นกลางค่อนข้างน้อยมีค่า 7.51 และน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มอยู่ในช่วงของความเป็นกรดมีค่า 4.31 หากเรานำวัสดุหมักเหล่านี้มาเข้าสู่กระบวนการหมักรวมในอัตราส่วนที่เหมาะสมซึ่งอยู่ในช่วง 6.8-7.2 (Sohgratok, 2013) จะสามารถสร้างความสมดุลให้กับระบบที่จะเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนในปริมาณที่สมดุล และเมื่อพิจารณาถึงค่า COD ของวัสดุหมักพบว่า น้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศมีค่าประมาณ 20,000 มิลลิกรัม/ลิตร หากนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศเพียงอย่างเดียวมาเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะส่งผลให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพน้อย ซึ่งสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพได้โดยการหมักรวม จากการวิเคราะห์องค์ประกอบยังพบว่าของเสียลิเชอรอลมีค่า COD สูงถึง 1,760,000 มิลลิกรัม/ลิตร เชื้อเริ่มต้นและน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม มีค่าอยู่ที่ 92,000 และ 76,000 ตามลำดับ ส่วนค่า C/N นั้นได้เอามาจากงานที่ใกล้เคียงกัน และใช้วัตถุดิบมาจากแหล่งเดียวกัน จะเห็นว่า ADE มีค่า C/N อยู่ในช่วง 3-4.5 ซึ่งต่ำ ส่วน POME มีอัตราส่วน C/N อยู่ในช่วง 18-24 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ซ้อนทับ 20-30 ซึ่งเหมาะสมที่สุดสำหรับจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพ (Wang *et al.*, 2012) ส่วน GW นั้นมีอัตราส่วน C/N สูงมาก อยู่ในช่วง 900-1,000 การนำมา GW เพียงปริมาณเล็กน้อยเป็นวัสดุหมักร่วมกับ ADE ก็สามารถปรับ C/N ประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพ และช่วยปรับความสมดุลให้กับระบบได้ (Prasert *et al.*, 2021; Pormtong, 2014)

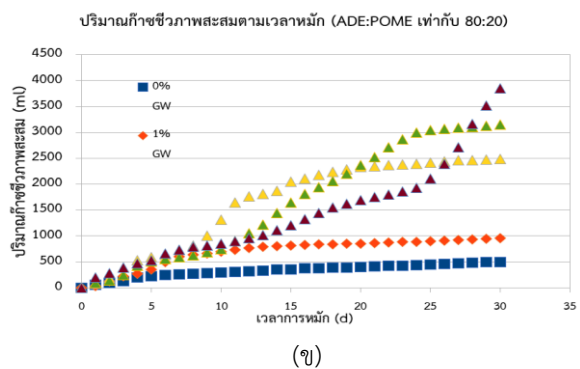
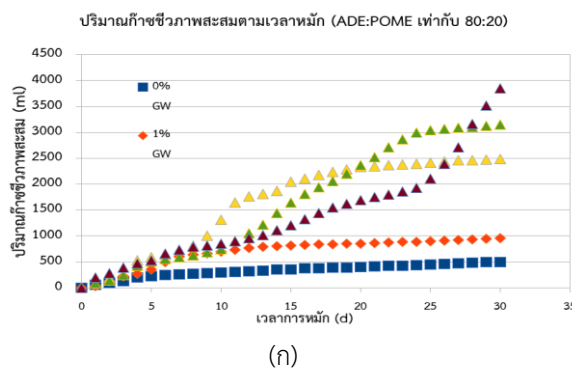
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

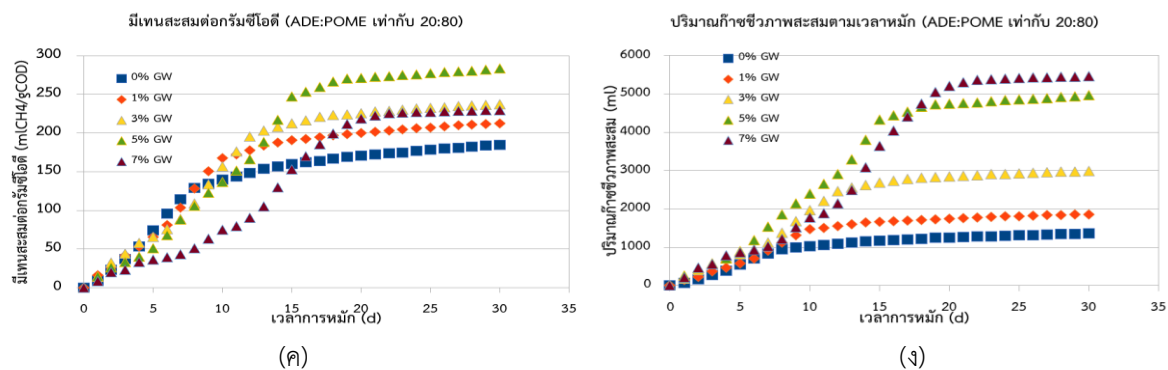
Parameter	Material			
	Anaerobic digestion effluent (ADE)	POME	Glycerol waste (GW)	Sludge
pH	7.51	4.31	9.37	7.6
COD (mg/l)	20,000	76,000	1,760,000	92,000
TS (mg/l)	6,499	31,480	-	55,220
VS (mg/l)	1,233	20,830	768,588	34,016
VFA (mg/l)	3,000	4,575	-	1,080
ALK (mg/l asCaCO ₃)	2,670	1,890	-	-
C/N ratio	3-4.5	18-24	900-1000	-

หมายเหตุ - หมายถึง ไม่ได้วิเคราะห์

2. การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักร่วมด้วยการทดลองแบบแบทช์ (Batch Process)

ตัวอย่างแนวโน้มการสะสมของก๊าซชีวภาพและมีเทนในระหว่างการหมักแบบแบทช์ ที่อัตราส่วนระหว่าง ADE:POME เป็น 80:20 และ 20:80 แสดงดังภาพที่ 1 ซึ่งมีแนวโน้มคล้ายกับการทดลองที่สัดส่วนการผสมอื่น ๆ ถึงแม้ว่าปริมาณก๊าซที่ผลิตได้จะมีระดับที่ต่างกัน จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มการเติม GW ให้มากขึ้นจากร้อยละ 1 ขึ้นไปจนถึงร้อยละ 3 ในช่วง 5 วันแรกอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะสูงขึ้นเมื่อเทียบกับที่ไม่มีการเติม GW (ภาพที่ 1(ก)) แต่การเพิ่ม GW ให้มากขึ้นไปอีกเป็นร้อยละ 5-7 ไม่ได้ช่วยให้อัตราการผลิตสูงขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า GW เป็นแหล่งคาร์บอนที่จุลินทรีย์ใช้ได้ง่ายที่สุด เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นจะมีการสะสมของกรดไขมันอิสระ และมีการสะสมของ 1,3-Propanediol ทำให้เกิดการยับยั้งจุลินทรีย์ชะลอการผลิต VFA และมีเทน (Viana *et al.*, 2012) ซึ่งการยับยั้งดังกล่าวได้ส่งผลต่อไปจนถึง 25 วันในกรณีที่ ADP:POME เป็น 80:20 และประมาณ 15 วัน ในกรณีที่ ADP:POME เป็น 20:80 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า POME สามารถลดผลกระทบจากการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์อันเนื่องมาจากการย่อย GW ที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงต้น การใช้ POME ในการหมักร่วมจะช่วยเสถียรภาพของระบบดีขึ้น แสดงดังภาพที่ 2 (ก-ง)

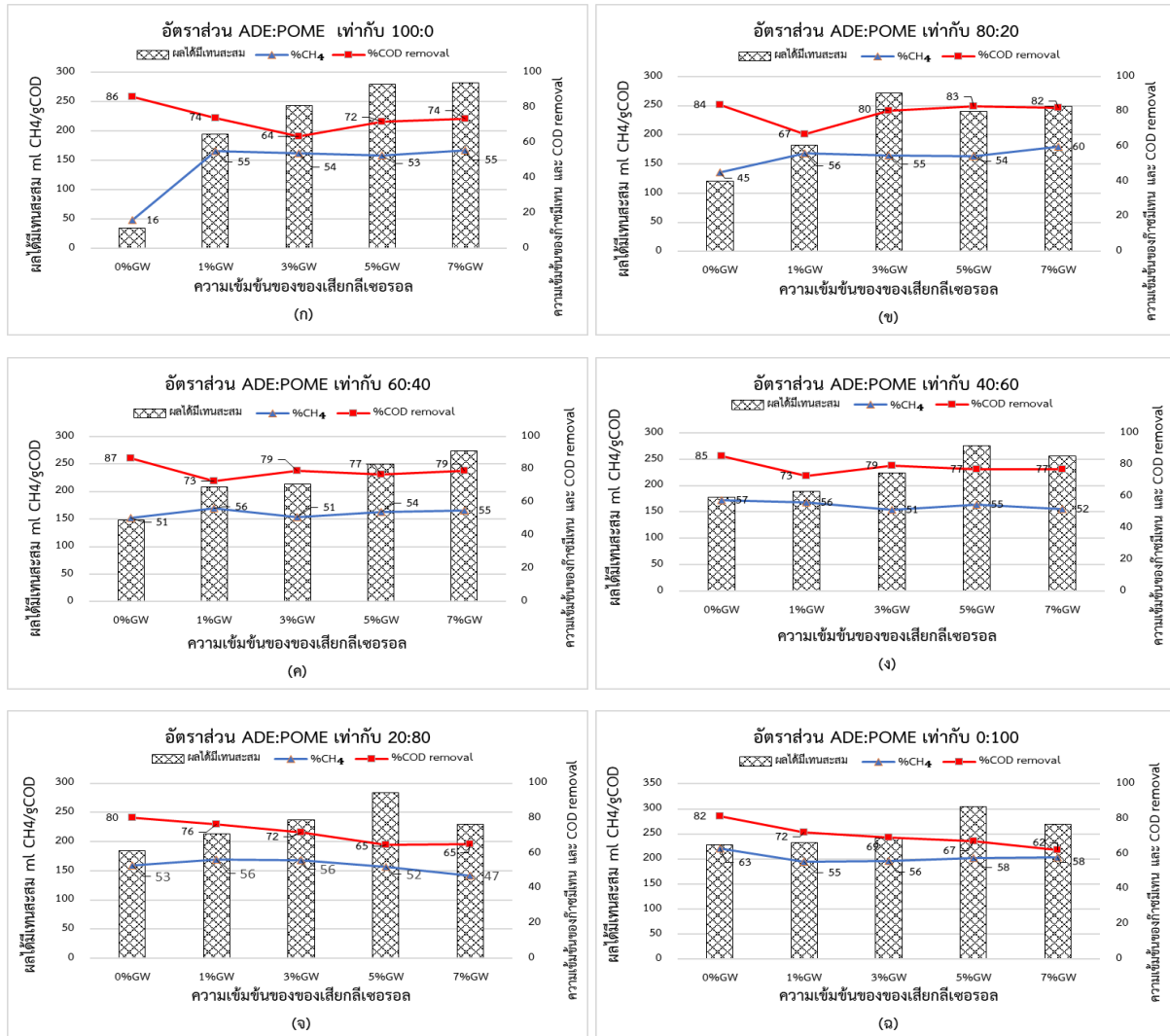




ภาพที่ 1 ตัวอย่างลักษณะแนวโน้มของ (ก,ค) การเพิ่มขึ้นของก๊าซชีวภาพสะสม (ข,ง) การเพิ่มขึ้นของมีเทนต่อกรัมชีโอดีตามระยะเวลาการหมัก สำหรับอัตราส่วน ADE:POME เท่ากับ 80:20 และ 20:80 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์จากผลการทดลองศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักร่วมด้วยการทดลองแบบแบทช์

ชุดการทดลอง	%GW	pH		ALK (mg/L asCaCO ₃)		VFA (mg/L asCH ₃ COOH)		VFA/ALK		COD (mg/L)		%removal
		Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	Before	After	
ADE 100%	0	7.31	8.20	2,670	3,265	247	180	0.09	0.05	20,000	2,800	86
	1	8.32	7.20	2,120	4,030	5,205	386	2.46	0.08	37,227	9,600	74
	3	8.42	7.21	2,260	4,690	5,070	345	2.24	0.07	70,679	25,600	64
	5	8.65	7.38	2,470	4,490	4,905	330	1.99	0.07	102,857	28,800	72
	7	8.74	7.36	2,730	5,490	4,230	255	1.55	0.05	133,831	35,200	74
ADE 80% + POME 20%	0	7.22	8.10	2,545	3,015	187	157	0.06	0.06	31,200	5,040	84
	1	8.20	7.10	1,970	3,930	5,205	338	2.64	0.09	48,316	16,000	67
	3	8.32	7.25	2,240	4,270	4,905	308	2.19	0.08	81,553	16,000	80
	5	8.55	7.00	2,460	4,670	4,950	330	1.86	0.07	113,523	19,200	83
	7	8.61	7.40	2,670	6,510	4,305	368	1.61	0.06	144,299	25,600	82
ADE 60% + POME 40%	0	7.12	8.55	2,410	3,310	202	112	0.05	0.06	42,400	5,600	87
	1	8.20	7.20	2,070	4,730	4,515	228	2.18	0.06	59,405	16,000	73
	3	8.22	7.00	2,470	4,650	4,845	338	1.96	0.07	92,427	19,200	79
	5	8.34	7.20	2,630	5,450	4,920	320	1.97	0.05	124,190	28,800	77
	7	8.38	7.10	2,730	5,540	4,995	345	1.83	0.06	154,766	32,000	79
ADE 40% + POME 60%	0	7.11	8.35	2,240	3,230	198	108	0.05	0.06	53,600	7,840	85
	1	7.40	7.00	820	4,820	1,845	375	2.25	0.08	70,495	19,200	73
	3	7.50	7.10	930	4,910	1,935	330	2.08	0.07	103,300	21,600	79
	5	7.54	7.10	1,060	5,730	2,220	413	2.10	0.07	134,857	31,200	77
	7	7.84	7.21	1,190	5,330	2,355	533	1.98	0.09	165,233	72,800	77
ADE 20% + POME 80%	0	7.00	8.44	2,030	3,385	2,030	82	0.04	0.05	64,800	12,880	80
	1	7.24	7.00	810	4,780	810	413	2.28	0.08	81,584	19,200	76
	3	7.35	7.14	910	4,880	910	532	2.15	0.11	114,174	32,000	72
	5	7.55	7.11	960	4,840	960	345	2.14	0.07	145,523	51,200	65
	7	7.78	7.12	1,030	5,310	1,030	315	2.08	0.06	175,700	60,800	65
POME 100%	0	6.8	8.51	1,820	3,500	307	181	0.04	0.05	76,000	14,000	82
	1	7.34	7.10	910	4,910	1,890	375	2.08	0.08	92,673	25,600	72
	3	7.44	7.30	1,030	5,080	1,950	426	1.89	0.08	125,048	38,400	69
	5	7.54	7.40	1,180	5,850	2,055	488	1.74	0.08	156,190	51,200	67
	7	7.69	7.45	1,270	7,220	2,145	489	1.68	0.07	186,168	70,400	62



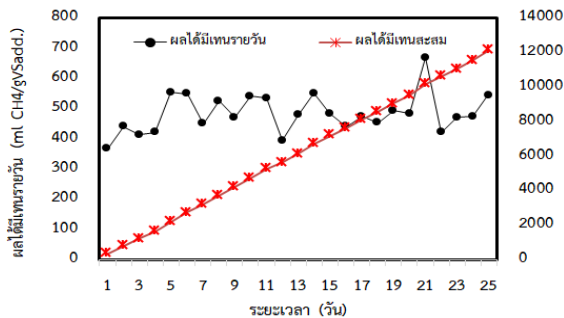
ภาพที่ 2 แสดงผลของการเติม GW ร้อยละ 0, 1, 3, 5, 7 ต่อผลได้มีเทน (methane yield) ซีโอดีที่ลดลง (%COD removal) และความเข้มข้นของมีเทนเมื่อใช้อัตราส่วนการผสมระหว่าง ADE และ POME เมื่อ (ก) 100:0 (ข) 80:20 (ค) 60:40 (ง) 40:60 (จ) 20:80 และ (ฉ) 0:100

3. การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบการทดลองแบบต่อเนื่อง (Continuous Process)

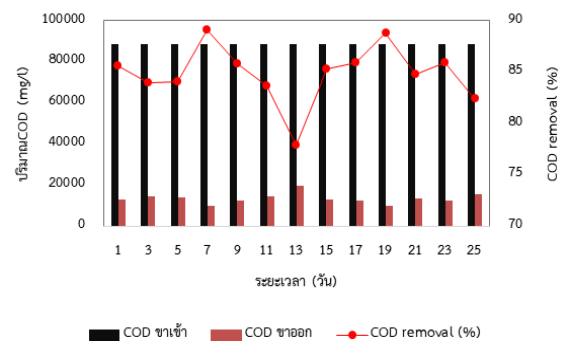
จากการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตก๊าซชีวภาพจาก ADE ร่วมกับ POME และเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการเติม GW ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในระบบแบบแบทช์ จึงได้คัดเลือกอัตราส่วนของการหมักร่วมระหว่าง ADE:POME เป็น 80:20 ที่เติมของเสียกลีเซอรอลร้อยละ 3 มาทำการศึกษการผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมต่อเนื่องขนาด 10 ลิตร ที่ระยะเวลาพักเก็บ 25 วัน จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 145,554 มิลลิลิตรมีเทน และมีปริมาณก๊าซมีเทนรายวันเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4,423 – 8,031 มิลลิลิตรมีเทน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 3 เมื่อพิจารณาถึงผลได้มีเทนในแต่ละวัน พบว่ามีค่า 368 – 668 มิลลิลิตรมีเทน/กรัมวีเอส (เฉลี่ยประมาณ 518 มิลลิลิตรมีเทน/กรัมวีเอส หรือ 299 มิลลิลิตรมีเทน/กรัมซีโอดี) และค่าประสิทธิภาพของการบำบัดน้ำเสียในรูปของค่า COD ในช่วง ร้อยละ 78 – 89 แสดงดังภาพที่ 4 จะเห็นว่าทั้งผลได้และ สามารถลด COD ได้มากกว่าในระบบแบทช์ ทั้งนี้เนื่องจากเนื่องจากการมีกระบวนการที่ดีกว่าแบบแบทช์

สำหรับค่าดัชนีความมีเสถียรภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งพิจารณาจากค่าความเป็นด่าง (ALK), กรดไขมันระเหยง่าย (VFA) และอัตราส่วน VFA/ALK ซึ่งการผลการทดลอง พบว่ามีค่า ALK อยู่ในช่วง 4,650-6,350 มิลลิกรัม/ลิตร,

VFA 400-840 มิลลิกรัม/ลิตร และมีอัตราส่วน VFA/ALK อยู่ในช่วง 0.06-0.17 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่า 0.4 ซึ่งเป็นค่าวิกฤตมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีเสถียรภาพดีมากตลอดระยะเวลาผลิตแบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 3 ผลได้มีเทนรายวันและผลได้มีเทนสะสมของระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมต่อเนื่อง



ภาพที่ 4 ปริมาณ COD และร้อยละของ COD_{removal} ของระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมต่อเนื่อง

อภิปรายผลการวิจัย

ผลการศึกษาคู่ประกอบของวัสดุหมักร่วม พบว่า ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของวัสดุหมักร่วมอยู่ในช่วง 4.31-9.37 หากเรานำวัสดุหมักเหล่านี้มาเข้าสู่กระบวนการหมักร่วมในอัตราส่วนที่เหมาะสมซึ่งอยู่ในช่วง 6.8-7.2 (Sohgratok, 2013) จะสามารถสร้างความสมดุลให้กับระบบที่จะเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนในปริมาณที่สมดุล และเมื่อพิจารณาถึงค่า COD ของวัสดุหมักพบว่า น้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศมีค่าประมาณ 20,000 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งสามารถให้ผลผลิตมีเทนน้อย สามารถเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพได้โดยการหมักร่วมกับของเสียกลีเซอรอลและน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม (Prasert *et al.*, 2021 ; Pormtong, 2014)

ในแง่ของประสิทธิภาพในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นมีเทนในระหว่างการหมัก โดยใช้ปริมาณมีเทนที่ผลิตขึ้นมาต่อกรัมของซีโอไซด์เป็นตัวชี้วัด ก็จะพบว่า การเติมการเติม GW น้อยกว่าร้อยละ 3 จะทำให้ประสิทธิภาพจะมีแนวโน้มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่ม GW สูงเกินร้อยละ 3 จะมีผลทำให้มีค่าลดลงตลอดระยะเวลาการหมัก การผลิตก๊าซต่อหน่วยซีโอไซด์จะลดลง (ภาพที่ 1(ข,ง))

ภาพที่ 2 แสดงผลของการเติม GW ที่ระดับต่างกัน ในการหมักร่วมระหว่าง ADE และ POME ที่อัตราส่วนต่าง ๆ จะเห็นว่าในกรณีที่ไม่มี POME เลย (ภาพที่ 1(ก)) หากไม่มีการเติม GW การผลิตมีเทนจะมีประสิทธิภาพต่ำมาก ถึงแม้ว่าซีโอไซด์จะลดลงไปถึงร้อยละ 86 ทั้งนี้เป็นเพราะก๊าซชีวภาพมีความเข้มข้นของมีเทนเพียงร้อยละ 15 เป็นผลมาจาก C/N มีค่าต่ำเกินไป (C/N อยู่ในช่วง 3-4.5) ไม่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทน ก๊าซที่ผลิตออกมาเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าร้อยละ 80 ซึ่งแสดงว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนั้นเกิดขึ้นนอกเหนือจากการผลิตก๊าซมีเทนตามปกติ แต่เมื่อเติม GW ลงไปเพียงร้อยละ 1 ก็สามารถเพิ่มความเข้มข้นของมีเทนในก๊าซให้เป็นร้อยละ 55 ซึ่งถือว่าเป็นความเข้มข้นของมีเทนตามปกติ จึงอธิบายได้ว่า การเติม GW เพียงร้อยละ 1 ก็เพียงพอที่จะเพิ่ม C/N ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการผลิตมีเทน ในทำนองเดียวกันจะเห็นว่าถ้าอัตราส่วน ADE:POME ต่ำกว่า 60:40 ความเข้มข้นของมีเทนก็จะเริ่มเข้าสู่ระดับปกติ (> ร้อยละ 50) ดังจะเห็นได้ในภาพที่ 2 (ค, ง, จ, ฉ) ซึ่งเป็นผลของการปรับ C/N ให้ดีขึ้นเช่นกัน แต่เนื่องจากว่า POME มีค่าซีโอไซด์และ C/N ที่ต่ำกว่า GW อย่างมาก การใช้ POME เพื่อปรับค่า C/N ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตมีเทนนั้นต้องใช้ POME มากกว่าหลายเท่า (> 40 เท่า)

จากผลการทดลองทั้ง 6 ชุด ดังแสดงในภาพที่ 2 (ก-ฉ) และในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า ทุกอัตราส่วนสามารถนำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้จริง ยกเว้นในกรณีที่เติม มากกว่าร้อยละ 5 ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตลดลง ซีโอไซด์ที่เหลืออยู่ที่สูงกว่า 25,000 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งสูงเกินไปที่จะนำมาใช้ในทางปฏิบัติ แต่เมื่อพิจารณาถึงความต้องการน้ำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ กลับเข้าสู่ระบบเพื่อหาแนวทางแก้ไขปัญหาน้ำเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์ม ไม่เพียงพอต่อการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ อัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะนำมาแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ดีที่สุดคือ ADE:POME เป็น 80:20 ที่มีการเติมของเสียกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ให้ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุด คือ ร้อยละ 62.09



ให้ผลได้มีเทน 271 มิลลิลิตรมีเทน/กรัมชีโอติ และมีค่า COD_{removal} ร้อยละ 80 ซึ่งยืนยันได้ด้วยผลการทดลองในระบบแบบต่อเนื่องระบบมีเสถียรภาพดีมากตลอดระยะเวลาผลิต

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ น้ำเสียจากระบบการสกัดน้ำมันปาล์ม ของเสียกลีเซอรอล พบว่า การนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศกลับเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพอีกครั้งยังมีความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ แต่เนื่องด้วยองค์ประกอบภายในมีค่าของเสียน้อยลง การนำน้ำเสียจากระบบการผลิตน้ำมันปาล์มและของเสียกลีเซอรอลเติมเข้าสู่ระบบ จะช่วยปรับให้ระบบสมดุล ส่งผลให้สามารถเพิ่มผลผลิตมีเทนได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมเพื่อตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ของการศึกษาพบว่า อัตราส่วนของน้ำทิ้งจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ และน้ำเสียจากการสกัดน้ำมันปาล์มที่ 80:20 และการเติมของเสียกลีเซอรอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 สามารถตอบสนองความต้องการและความเป็นไปได้ของการนำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนเพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนวัสดุหมักในก๊าซผลิตก๊าซชีวภาพในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต โดยที่อัตราส่วนดังกล่าวสามารถให้ผลได้มีเทนเท่ากับ 271 มิลลิลิตรมีเทน/กรัมชีโอติ และมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนร้อยละ 62.09

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการศึกษาสำหรับผู้มีศักยภาพเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีการศึกษา 2559 จากมหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ (สัญญาเลขที่ 10/2559) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการ วิจัย (สกว.) (สัญญาทุนเลขที่ RRI_PHD6110044)

เอกสารอ้างอิง

- Aziz, M. M. A., Kassim, K. A., Shokravi, Z., Jakarni, F. M., Lieu, H. Y., Zaini, N., Shokravi, H. (2020). Two-stage cultivation strategy for simultaneous increases in growth rate and lipid content of microalgae: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109621.
- Bernard, O., Hadj-Sadok, Z., Dochain, D., Genovesi, A., & Steyer, J.-P. (2001). Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process. *Biotechnology and Bioengineering*, 75(4), 424-438.
- Irving, G. C. J. (1981). Gas Chromatography of inositols as their hexakis-O-acetyl derivatives. *Journal of Chromatography A*, 205(2), 460-463.
- Khairul Nizam, J.M., Niza, S.A., Norzita, N., Fakhrollah, A.M., Ab Muis Zarina, Asli Umi Aisah, Anaerobic Co-Digestion of Food Waste with Crude Glycerol for Biogas Production, *Chem. Eng. Trans.* 83 (2021) 577-582.
- Kress, P., Nägele, H.-J., Oechsner, H., & Ruile, S. (2018). Effect of agitation time on nutrient distribution in full-scale CSTR biogas digesters. *Bioresource Technology*, 247, 1-6.
- Kumar, L.R., Yellapu, S.K., Tyagi, R.D., Zhang, X. (2019). A review on variation in crude glycerol composition, bio-valorization of crude and purified glycerol as carbon source for lipid production, *Bioresource Technology*, 293, 122155.
- Leurnurnkab, S. (2014). Biogas Production from Distillery Dastewater of Community Refined Liquors Plant by Co-Digestion. Master's Thesis. Thaksin University. (in Thai)
- Lok, X., Chan, Y. J., & Foo, D. C. Y. (2020). Simulation and optimisation of full-scale palm oil mill effluent (POME) treatment plant with biogas production. *Journal of Water Process Engineering*, 38, 101558.
- Nualsri, C., Kongjan, P., & Reungsang, A. (2016). Direct integration of CSTR-UASB reactors for two-stage hydrogen and methane production from sugarcane syrup. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(40), 17884-17895.



- Panpong, K. (2018). Biogas Production by Anaerobic Co-Digestion Process between Community Distillery Slop with Glycerol Waste, Naresuan Univ. J. Sci. Technol. 26 (2018) 5060.
- Prasertsan, P., Leamdum, C., Chantong S., Mamimin, C., Kongjan, P., & O-Thong, S. (2021). Enhanced biogas production by co-digestion of crude glycerol and ethanol with palm oil mill effluent and microbial community analysis. *Biomass and Bioenergy*, 148, 103037.
- Pormtong, D. (2014). *Biogas Production from Palm Oil Plant Wastewater Using ASBR Anaerobic Sequencing Batch Reactor System*. Master's Thesis. Burapha University. (in Thai)
- Sawasdee, V., Haosagul, S., & Pisutpaisal, N. (2019). Co-digestion of waste glycerol and glucose to enhance biogas production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44
- Seekao, N., Sangsri, S., Rakmak, N., Dechapanya, W., Siripatana, C. (2021). Co-digestion of palm oil mill effluent with chicken manure and crude glycerol: biochemical methane potential by monod kinetics., *Heliyon*, 7, e06204.
- Sohgratok, N. (2556). Biogas Production from Decanter Cake of Palm Oil Mill with Wastewater from Frozen Seafood Industry. Master's Thesis. Prince of Songkla University. (in Thai)
- Sowcharoensuk, C. (2020). Business/industrial trends 2020-2022: Palm oil industry (in Thai). Krungsri Research. [https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/agriculture/sugar-\(1\)/IO/io-oil-palm-20-th](https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/agriculture/sugar-(1)/IO/io-oil-palm-20-th).
- Viana, M.B., Freitas, A.V., Leitão, R.C., Pinto, G.A.S., Santaella, S.T. (2012). Anaerobic digestion of crude glycerol: a review, *Environmental Technology Review*, 1, 81–92.