

Research Article

การใช้ประโยชน์ของเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแป้งมัน สำปะหลังดัดแปร มาผลิตพลังงานทดแทนโดยระบบหมักไร้อากาศ แบบหนึ่งขั้นตอน

The application of wastes from modified tapioca starch plant to produce the renewable energy using one stage anaerobic digestion system

ปิยะวดี ศรีวิชัย^{1*} และ ชุมพร รอดสีดา²

Piyavadee Srivichai^{1*} and Chumaporn Rodsrida²

¹สาขาวิชานามัยสิ่งแวดล้อม คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

²สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

¹Program in Environmental Health, Faculty of Medicine, University of Phayao, Mueang, Phayao 56000, Thailand

²Program in Occupational Health and Safety, Faculty of Medicine, University of Phayao, Mueang, Phayao 56000, Thailand

*E-mail: u4108047@hotmail.com

Received: 24/03/2020; Revised: 21/04/2020; Accepted: 12/05/2020

บทคัดย่อ

ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแป้งมันสำปะหลังดัดแปรผลิตของเสียหลัก 2 ประเภท ประเภทแรกคือเศษตะกอนแป้งจากบ่อดักตะกอนเบื้องต้นและอีกประเภทคือตะกอนชีวภาพจากบ่อดักตะกอนเร่ง มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุหมักโดยระบบหมักไร้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ โดยผลการศึกษาพบว่าเศษตะกอนแป้งมีศักยภาพสูงในการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนสูงมากเท่ากับ 382 และ 225 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่เดิม (L/kg TVS_{added}) ตามลำดับ (ร้อยละมีเทนเท่ากับ 59) แต่อย่างไรก็ตามการหมักเศษตะกอนแป้งเพียงอย่างเดียวระบบเสี่ยงต่อการล้มเหลว เนื่องจากการสะสมตัวของกรดอินทรีย์ระเหยที่ทำให้พีเอชของระบบลดลงอย่างรุนแรง ซึ่งการนำเศษตะกอนแป้งมาหมักเพียงชนิดเดียว จึงจำเป็นต้องมีการปรับพีเอชระหว่างการหมักย่อย อีกทั้งควรมีการพิจารณาความคุ้มค่าและเหมาะสมเมื่อมีการเติมสารเคมีเพื่อปรับพีเอชในระบบหมักย่อย ในขณะที่การหมักร่วมของ

เศษตะกอนแป้งกับตะกอนชีวภาพที่อัตราส่วน 0.5:0.5 ช่วยปรับเสถียรภาพของระบบให้ดีขึ้น แต่ได้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนค่อนข้างต่ำกว่าเพียง 196 และ 127 L/kg TVS_{added} ตามลำดับ (ร้อยละมีเทนเท่ากับ 65) แสดงให้เห็นว่าการเติมตะกอนชีวภาพมีประโยชน์ในการปรับเสถียรภาพของระบบหมักย่อยให้ดีขึ้น ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนให้สูงขึ้นต่อไป

คำสำคัญ: แป้งมันสำปะหลังคัดแปร, ก๊าซชีวภาพ, เศษตะกอนแป้ง, ตะกอนชีวภาพ

Abstract

The wastewater treatment system of modified tapioca starch plant produces two major kinds of waste. One is where waste starch sludge (WSS) from a primary sedimentation pond and the other is waste activated sludge (WAS) from an activated sludge pond. They are suitable to use as substrates in anaerobic digestion for biogas production. The results of these studies found that biogas and methane production with WSS at 382 and 225 L/kg TVS_{added}, respectively (methane content of 59%), had high potential. However, the single WSS digestion risked to fail because of the volatile fatty acid accumulation, leading to the dramatic drop in pH. The single WSS digestion may need pH adjustment during the digestion process. Also, it must be considered in an economic feasibility and appropriateness when adding chemicals to adjust the pH in the digestion system. As the co-digestion of WSS:WAS at 0.5:0.5 improved the system stability, but it obtained lower biogas and methane production efficiencies of 196 and 127 L/kg TVS_{added}, respectively (methane content of 65%). These indicated that the addition of WAS had the advantage to enhance the stability of anaerobic digestion. Therefore, there should be further studied to increase the biogas and methane production efficiencies.

Keywords: modified tapioca starch, biogas, waste starch sludge, waste activated sludge

บทนำ

อุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังเป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทย ที่สร้างรายได้เป็นจำนวนมากให้กับประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งมันสำปะหลังคัดแปร ประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกรายใหญ่ที่สุดของโลก โดยในปี พ.ศ.2561 ทำการส่งออกสูงถึงประมาณปีละ 1.03 ล้านตันต่อปี คิดเป็นมูลค่าการส่งออก 24,335 ล้านบาท (Thai Tapioca Starch Association, 2018) โดยแป้งมันสำปะหลังคัดแปรถูกนำไปใช้ในหลายอุตสาหกรรม อาทิเช่น อาหาร กระดาษ สิ่งทอ กาว เป็นต้น เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษหลายอย่าง เช่น ช่วยปรับปรุงเรื่องของความเหนียว การละลายในน้ำเย็น การทนความร้อน และทนกรดและเป็นที่ยอมรับว่ากระบวนการผลิตจะมีน้ำเสียเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากประมาณ 10-20 ลูกบาศก์เมตรต่อตันแป้งที่ผลิต (Thailand Tapioca Starch, 2018) โดยส่วนใหญ่

น้ำเสียจะถูกส่งเข้าระบบบำบัดน้ำเสียของทางโรงงาน และระบบที่ได้รับความนิยมใช้สำหรับโรงงานที่ตั้งอยู่ในเขตชุมชน ซึ่งมีพื้นที่จำกัดคือ ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge wastewater treatment system) (Wang et al., 2006) จากระบบบำบัดน้ำเสียดังกล่าวจะก่อให้เกิดของเสียหลักๆ สองชนิดด้วยกันคือ เศษตะกอนแป้ง (Waste starch sludge) จากบ่อตกตะกอนเบื้องต้น และตะกอนชีวภาพ (Waste activated sludge) บ่อเติมอากาศของระบบตะกอนเร่ง

ปริมาณของเศษตะกอนแป้งที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของเทคโนโลยี และการบริหารจัดการของแต่ละโรงงาน ซึ่งโดยทั่วไปจะมีปริมาณแป้งที่สูญเสียในรูปของเศษตะกอนแป้งอยู่ที่ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ของแป้งที่ผลิตได้ (Yono et al., 2018) ซึ่งถ้าคิดจากปริมาณผลิตรวมประมาณ 1.5 ล้านตันต่อปี (National Food Institute, 2011) จะมีปริมาณสูงถึงปีละ 150,000 ตัน ซึ่งการจัดการโดยส่วนใหญ่ถูกขายในราคาถูก (The Thai Tapioca Products Factory Association, 2017) ให้กับพ่อค้าในพื้นที่เพื่อนำไปใช้ในการผลิตอาหารสัตว์ ซึ่งไม่มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ มีปัญหาพื้นที่ที่จัดเก็บ และกลิ่นเหม็นรบกวนระหว่างรอการเก็บขน โดยเฉพาะในฤดูฝน การนำเศษตะกอนแป้งมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจเนื่องจากทำในระบบปิด ช่วยแก้ปัญหาเรื่องกลิ่น และสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนให้กับทางโรงงานได้ แต่อย่างไรก็ตามจากคุณสมบัติของเศษตะกอนแป้งที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่สูง และมีองค์ประกอบหลักเป็นแป้ง ที่ย่อยได้ค่อนข้างง่าย อาจส่งผลให้ระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพล้มเหลวได้เนื่องจาก การสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยปริมาณมากที่จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจากการย่อยของแป้ง ส่งผลให้พีเอชของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพและล้มเหลวได้ นอกจากนี้จากการที่เมทาโนเจนที่ค่อนข้างไวต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช ทำให้หยุดสร้างก๊าซมีเทน และตายในที่สุด (Nijaguma, 2006) มีหลายงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าการย่อยวัสดุที่มีแป้งเป็นองค์ประกอบหลักสูงระบบจะมีความเสี่ยงดังกล่าว (Chen et al., 2015) ด้วยเหตุนี้การหมักร่วมกับวัสดุอื่นๆ จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสม ซึ่งพบว่าของเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียอีกชนิดหนึ่งคือ ตะกอนชีวภาพจากบ่อเติมอากาศ มีความเหมาะสมในการนำมาทดลองหมักร่วม เนื่องจากมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ค่อนข้างต่ำโดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 6-9 (Liu et al., 2016) ซึ่งน่าจะเป็นประโยชน์ช่วยในการแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น เนื่องจากตะกอนชีวภาพส่วนใหญ่ประกอบด้วยเซลล์ของแบคทีเรียเป็นหลัก (Tomasik, 2017) ซึ่งย่อยสลายได้ยากกว่าแป้ง รวมถึงการนำมาหมักร่วมจะช่วยปรับสมดุลของปริมาณธาตุอาหารให้ดีขึ้นกว่าการหมักเศษแป้งเพียงอย่างเดียวที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่สูงมาก อีกทั้งตะกอนชีวภาพที่เกิดมีปริมาณสูงถึงประมาณ 0.8 กิโลกรัมแห้งต่อกิโลกรัมบีโอดีที่ถูกกำจัด (Gray, 2017) โดยงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังส่วนใหญ่ เป็นการศึกษาในอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังดิบ ที่ใช้เปลือกหั่ว กากที่เหลือจากการสกัดแป้ง หรือน้ำเสียจากกระบวนการผลิต (Kullavanijaya & Thongduang, 2012; Ben & Michael, 2018; Izah, 2019) มาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งยังขาดการศึกษาในของเสียจากโรงงานระบบบำบัดน้ำเสีย

งานวิจัยนี้จึงสนใจในการนำของเสียจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานแปรงมันสำปะหลังดัดแปรคือ เศษตะกอนแป้ง และตะกอนชีวภาพ มาทำการหมักร่วมโดยระบบหมักไร้อากาศแบบหนึ่งขั้นตอน เพื่อหาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมถึงวิเคราะห์ประสิทธิภาพ และเสถียรภาพของระบบหมักร่วมว่ามีความเหมาะสมในการนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตพลังงานทดแทนหรือไม่ต่อไป

วิธีการทดลอง

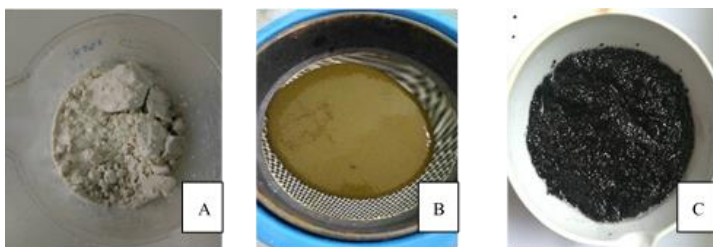
1. วัสดุหมักและหัวเชื้อที่ใช้ในการทดลอง

1.1 เศษตะกอนแป้ง (Waste starch sludge: WSS) เก็บมาจากบ่อดักตะกอนเบื้องต้นที่รองรับน้ำเสียจากการล้างกระบวนการผลิตและถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ใส่ถุงพลาสติกและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (°C) ไว้จนกว่าจะใช้ทดลอง โดยปกติเศษตะกอนแป้งจะถูกส่งไปรีดน้ำออก และขายเพื่อนำไปผลิตอาหารสัตว์

1.2 ตะกอนชีวภาพจากระบบตะกอนเร่ง (Waste activated biosludge: WAS) ทำการเก็บจากบ่อเติมอากาศของระบบตะกอนเร่งแบบเอสบีอาร์ (Sequence batch reacto: SBR) ภายหลังจากมีการสูบน้ำใสออก โดยนำมาผ่านการกรองด้วยตะแกรงขนาด 30 mesh และเก็บใส่ถุงพลาสติกและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อเตรียมไว้ใช้ในการทดลอง

ทั้งเศษตะกอนแป้ง และตะกอนชีวภาพนำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตแปรงมันสำปะหลังดัดแปรที่ตั้งอยู่ในจังหวัดระยอง

1.3 หัวเชื้อที่ใช้ในการทดลอง (Inoculum) นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอสบี (Up flow anaerobic sludge blanket: UASB) ของโรงงานผลิตเครื่องดื่มน้ำ ในจังหวัดนนทบุรี ทำการเตรียมความเข้มข้นของหัวเชื้อเท่ากับ 2.5% ของของแข็งระเหย (Total volatile solids: TVS) วัสดุหมักและหัวเชื้อที่ใช้ในการทดลองมีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติดังนี้ คือ ความชื้น พีเอช (pH) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon to nitrogen ratio: C/N) และเปอร์เซ็นต์ของของแข็งระเหย (%TVS)



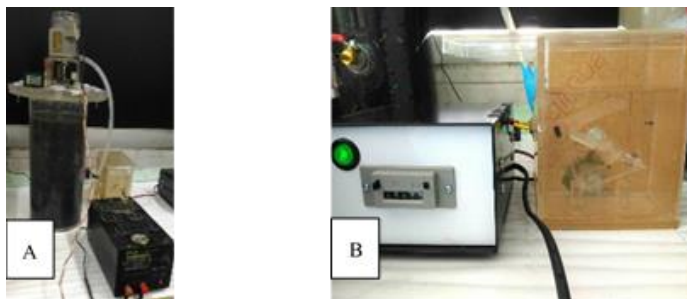
รูปที่ 1. วัสดุหมักและหัวเชื้อที่ A) WSS B) WAS C) Inoculum

2. ระบบหมักไร้อากาศแบบหนึ่งขั้นตอนโดยถังปฏิกรณ์กวนผสมแบบต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor: CSTR)

ถังที่ใช้ในการหมักเป็นถังกลมขนาด 6 ลิตร ดังรูปที่ 2A ซึ่งมีปริมาตรในการหมักเท่ากับ 5 ลิตร ปริมาตรของวัสดุหมักต่อหัวเชื้อ เท่ากับ 60:40 โดยปริมาตร (3 ลิตร:2 ลิตร) และกำหนดความเข้มข้นของวัสดุหมัก และหัวเชื้อที่ใช้ในการหมัก เท่ากับ 1%TVS และ 2.5%TVS ตามลำดับ กำหนดอัตราส่วนของวัสดุหมักสองชนิดคือ เศษตะกอนแป้งต่อตะกอนชีวภาพ WSS:WAS เท่ากับ 1:0 (เศษตะกอนแป้งอย่างเดียว), 0.7:0.3, 0.5:0.5, 0.3:0.7 และ 0:1 (ตะกอนชีวภาพอย่างเดียว) ทำการหมักที่อุณหภูมิห้องระหว่าง 25-30°C โดยมีการกวนผสมด้วยอัตรา 15 นาทีต่อชั่วโมง ทำการหมักเป็นเวลา 15 วัน โดยทำการเก็บตัวอย่างจากจุดเก็บตัวอย่างที่อยู่บริเวณกึ่งกลางถังเพื่อวิเคราะห์ พีเอช ความเข้มข้นกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acids: VFA) ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity: ALK) และมีการวัดอุณหภูมิภายในถัง และปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันด้วย Gas counter (รูปที่ 2B) รวมถึงมีการเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพเพื่อวิเคราะห์หาค่าร้อยละของมีเทนโดยต่อท่อด้านบนเข้ากับถุงเก็บก๊าซ (Tedlar bag) ขนาด 2 ลิตร และทำการวิเคราะห์ค่าร้อยละมีเทนด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี วิเคราะห์ทั้งหมดทำตามวิธี Standard methods for the examination of water and wastewater (American Public Health Association, 2017) รายละเอียดในการวิเคราะห์แต่ละพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1. วิธีการวิเคราะห์ในแต่ละพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
ความชื้น	- Dried 103-105°C (Standard 2540B)
พีเอช (pH)	- pH meter (Mettler Toledo, Seven Easy, Switzerland)
ของแข็งระเหย (TVS)	- Dried 550°C (Standard 2540E)
อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)	- Total organic analyzer และ Kjeldahl method
กรดอินทรีย์ระเหย (VFA)	- Titration method (Standard 5560B)
ความเป็นด่าง (ALK)	- Titration method (Standard 2320B)
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ	- Gas counter
ร้อยละของก๊าซมีเทน	- Gass Chromatography (Model Shimadzu GC-2014, Shimadzu Corp., Japan) with thermal conductivity detector - Molecular sieve packed column (MS-5A, stainless steel, Outside diameter 3 mm. Inside diameter 2.1 mm, Length 2 m.(Restek Corp., USA), Temperature of injector, column and detector at 150, 80, and 200°C, respectively, Argon as carrier gas with flow rate 30 ml/m



รูปที่ 2. ระบบหมัก ไร้อากาศแบบหนึ่งขั้นตอน A) ถัง CSTR B) Gas counter

3. การคำนวณประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหย

$$\text{ประสิทธิภาพการในผลิตก๊าซชีวภาพ (L/kg TVS}_{\text{added}}) = \frac{\text{Cumulative Biogas}}{\text{TVS}_{\text{added}}} \quad (1)$$

โดย

Cumulative Biogas คือ ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่สามารถผลิตได้สะสม (L)

TVS_{added} คือ น้ำหนักของแข็งระเหยที่เดิมเข้าสู่ถังหมัก ไร้อากาศ (kg)

$$\text{ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหย (\%)} = \frac{(\text{TVS}_{\text{initial}} - \text{TVS}_{\text{final}})}{\text{TVS}_{\text{initial}}} \times 100 \quad (2)$$

โดย

TVS_{initial} คือ ความเข้มข้นของแข็งระเหยเริ่มต้นการหมักย่อย ไร้อากาศ (mg/l)

TVS_{final} คือ ความเข้มข้นของแข็งระเหยสิ้นสุดการหมักย่อย ไร้อากาศ (mg/l)

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. ลักษณะสมบัติของวัสดุหมัก

จากผลการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของวัสดุหมักและหัวเชื้อที่ใช้ในการหมัก ดังตารางที่ 2 พบว่า เศษตะกอนแป้งมีค่าพีเอช 4.48 ซึ่งมีความเป็นกรดสูง และมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ค่อนข้างสูงมาก เท่ากับ

242 โดยจากการศึกษาของ Promthong et al., (2006) พบว่าโดยทั่วไปองค์ประกอบหลักของแป้งโดยทั่วไปจะมีองค์ประกอบหลักเป็น อะไมโลเพกตินสูงถึง 83 เปอร์เซ็นต์ ที่ย่อยได้ค่อนข้างง่ายและรวดเร็ว ซึ่งจากองค์ประกอบและคุณสมบัติ เศษตะกอนแป้งจึงไม่มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการหมักย่อยเพียงชนิดเดียว โดยเศษตะกอนแป้งจะถูกย่อยได้โดยง่ายและรวดเร็วเป็นกรดอินทรีย์ระเหย ทำให้มีการสะสมระบบโดยที่เมทาโนเจนไม่สามารถนำไปใช้ในการผลิตมีเทนได้ทัน จากการสะสมดังกล่าวส่งผลให้พีเอชของระบบลดลงอาจส่งผลให้ระบบขาดเสถียรภาพ และล้มเหลวในที่สุดเนื่องจากเมทาโนเจนค่อนข้างไวต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช เกิดการหยุดสร้าง และตายในที่สุดเมื่อพิจารณาลักษณะสมบัติของตะกอนชีวภาพ พบว่าพีเอชเป็นกรดเพียงเล็กน้อย เท่ากับ 6.50 เหมาะสำหรับระบบการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งช่วยให้การปรับพีเอชให้มีความเหมาะสมมากขึ้นจากการนำมาหมักร่วมกับเศษตะกอนแป้งที่มีความเป็นกรด และองค์ประกอบหลักส่วนใหญ่ที่เป็นเซลล์ของแบคทีเรียที่มีโครงสร้างค่อนข้างซับซ้อนย่อยได้ยากกว่าเศษตะกอนแป้ง จะทำให้อัตราการย่อยวัสดุหมักกลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยเกิดขึ้นช้าลง ทำให้เมทาโนเจนสามารถนำกรดอินทรีย์ระเหยไปใช้ได้ทัน ระบบจึงมีสมดุล เนื่องจากการไม่มีการสะสมจนเกิดปัญหาข้างต้น อีกทั้งอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ค่อนข้างต่ำเพียง 4.27 จึงจะเป็นประโยชน์ช่วยในการปรับปริมาณสารอาหารให้เหมาะสม สำหรับการหมักย่อยแบบไร้อากาศมากขึ้นดีกว่าการหมักย่อยโดยใช้วัสดุหมักเป็นเศษตะกอนแป้ง หรือตะกอนชีวภาพ เพียงอย่างเดียว ซึ่งมีค่าสูง และต่ำเกินไป ตามลำดับ

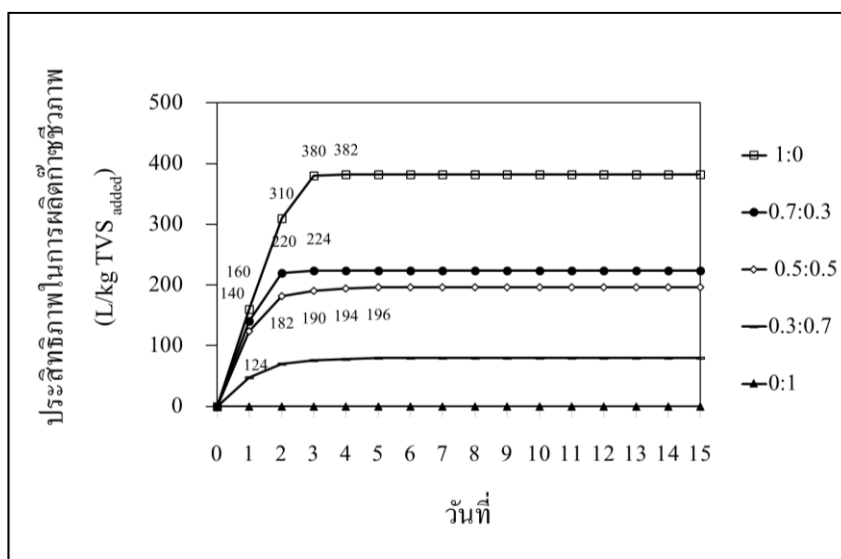
ตารางที่ 2. ลักษณะสมบัติของ WSS และ WAS

พารามิเตอร์	WSS	WAS
ความชื้น (%)	39.09±0.62	92.44±1.01
pH	4.48±0.01	6.50±0.03
TVS (%)	31.26±0.03	5.92±0.04
อัตราส่วน C/N	242	4.27

2. ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทน

ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพในแต่ละอัตราส่วนการหมักย่อย พบว่าอัตราส่วนที่ใช้แป้งเพียงอย่างเดียว อัตราส่วนเท่ากับ 1:0 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดเท่ากับ 382 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยเริ่มต้น (L/kg TVS_{added}) ภายในวันที่ 4 ของการหมัก รองลงมาเป็นอัตราส่วนที่มีการหมักร่วมระหว่างเศษตะกอนแป้งและตะกอนชีวภาพ ที่อัตราส่วน 0.7:0.3 และ 1:1 มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 224 และ 196 L/kg TVS_{added} ตามลำดับ ในขณะที่อัตราส่วนที่มีการใช้ตะกอนชีวภาพเพียงอย่างเดียวพบไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นจาก

ระบบหมัก ดังแสดงในรูปที่ 3 อาจเนื่องมาจากอัตราส่วน C/N ของวัสดุหมักที่ค่อนข้างต่ำมากเท่ากับ 4.27 ซึ่งห่างจากอัตราส่วนที่แนะนำว่าเหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ ที่เท่ากับ 20-30 (Dioha et al., 2013) จากองค์ประกอบหลักของก๊าซมีเทนเป็นคาร์บอนและไฮโดรเจน โดยในอัตราส่วน C/N ที่ต่ำมาก อาจทำให้ขาดแหล่งคาร์บอนในการผลิตก๊าซมีเทน ขณะที่อัตราส่วนการหมักรวม 1:0, 0.7:0.3 และ 0.5:0.5 มีอัตราส่วน C/N เท่ากับ 242, 79 และ 42 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าระดับที่แนะนำ แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน C/N ที่สูงระบบก็ยังคงสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยอัตราส่วน C/N ที่สูงเนื่องจากขาดไนโตรเจน แต่มีผลทางลบต่อการสร้างพลังงาน และโปรตีนซึ่งเป็นโครงสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์ (Deublein & Steinhaue, 2011) โดยระบบยังผลิตก๊าซชีวภาพได้



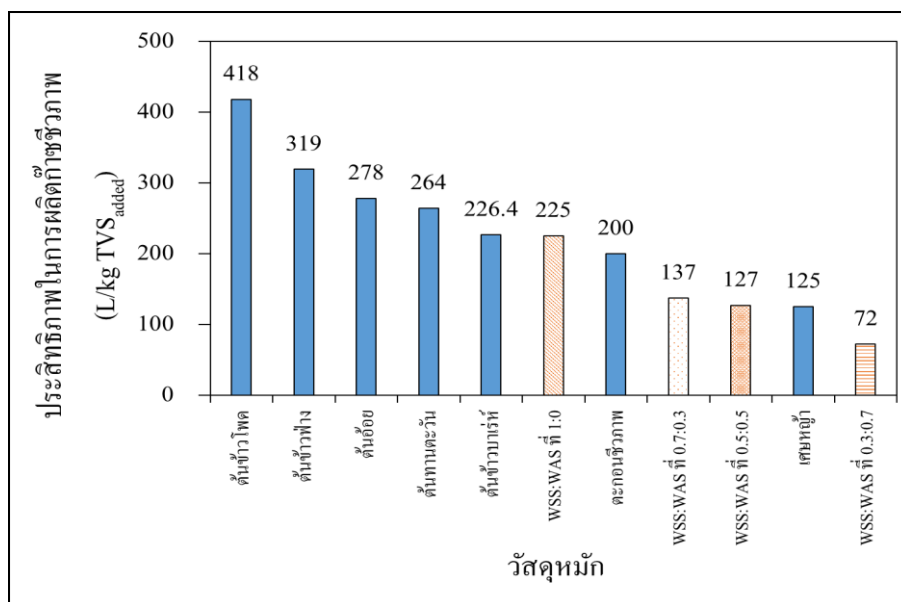
รูปที่ 3. ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของการหมักร่วมของ WSS:WAS ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์ร้อยละของก๊าซมีเทน ดังตารางที่ 3 ของทุกอัตราส่วนการหมัก พบว่า ค่อนข้างสูงมีความเหมาะสม และคุ้มค่าในการนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน ซึ่งแนะนำว่าองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ควรมีก๊าซมีเทนไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 (Ahmmad & Haque, 2014) เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนจากชีวมวลอื่นๆ (รูปที่ 4) จากการทบทวนวรรณกรรมของ (Cesaro & Belgiomo, 2015) โดยมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ระหว่าง 80-418 L/kg TVS_{added} โดยอัตราส่วน 1:0 มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน 225 L/kg TVS_{added} ใกล้เคียงกับ ดินข้าวบาเร่ (226.4 L/kg TVS_{added}) ดินฮ้อย (278 L/kg TVS_{added}) ดินทานตะวัน (231-297 L/kg TVS_{added}) ส่วนอัตราส่วน 0.7:0.3 และ 0.5:0.5 มีประสิทธิภาพใน

การผลิตก๊าซมีเทน 137 และ 127 L/kg TVS_{added} ตามลำดับ ใกล้เคียงกับ เศษหญ้า (125 L/kg TVS_{added}) ซึ่งพบว่าทั้งสามอัตราส่วนมีประสิทธิภาพปานกลาง โดยน้อยกว่าชีวมวลที่มีประสิทธิภาพสูง อาทิเช่น ต้นข้าวโพด (418 L/kg TVS_{added}) ต้นข้าวฟ่าง (286–319 L/kg TVS_{added}) อีกทั้งพบว่าทั้งสองอัตราส่วนประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนใกล้เคียงกับการศึกษาของ (Karlsson et al., 2011) ซึ่งนำตะกอนชีวภาพจากระบบตะกอนเร่งของโรงงานกระดาษ 6 แห่ง ของสวีเดน โดยทำการทดลองในขวดทดลองบีเอ็มพี มีประสิทธิภาพระหว่าง 100-200 L/kg TVS_{added} โดยจากประสิทธิภาพที่ได้ควรมีการศึกษาเพื่อปรับปรุงเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนต่อไป

ตารางที่ 3. ร้อยละของมีเทนและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน

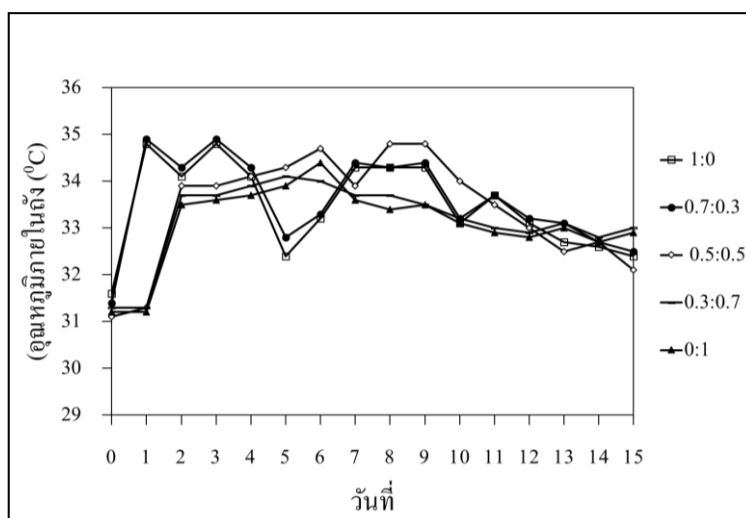
อัตราส่วนการหมักร่วมของ	ร้อยละของมีเทน	ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน
WSS:WAS	(%)	(L/kg TVS _{added})
1:0	59	225
0.7:0.3	61	137
0.5:0.5	65	127
0.3:0.7	58	72



รูปที่ 4. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนกับวัสดุหมักชนิดอื่น

3. สภาพการทำงานและเสถียรภาพของระบบ CSTR

อุณหภูมิภายในถัง CSTR ของแต่ละอัตราส่วนการหมัก แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 30-35°C ซึ่งอุณหภูมิภายในถังจะมีการเพิ่มอย่างรวดเร็วภายในวันที่ 1-3 ของการหมัก ในอัตราส่วนการหมัก 1:0 และ 0.7:0.3 มีอุณหภูมิสูงสุดเท่ากับ 34.80°C และ 34.92°C ในวันที่ 1 และ 3 ของการหมัก และพบว่าอัตราส่วนการหมัก 0.5:0.5 มีอุณหภูมิสูงจนถึงวันที่ 6 ของการหมักแสดงให้เห็นว่าระบบยังมีการหมักย่อยและผลิตก๊าซเกิดขึ้น ในขณะที่อัตราส่วน 0:1 ที่มีแต่ตะกอนชีวภาพ จะมีอุณหภูมิเพิ่มน้อยกว่าอัตราส่วนอื่น ซึ่งอัตราส่วนนี้ไม่มีการผลิตก๊าซชีวภาพ เกิดขึ้นอุณหภูมิที่สูงขึ้นจึงต่ำกว่าอัตราส่วนอื่น และการย่อยแบบไม่ใช้ออกาศเกิดไม่ถึงกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน อาจอยู่แค่กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เท่านั้น เนื่องจากเมื่อพิจารณาค่าพีเอชยังค่อนข้างคงที่ และอัตราส่วน VFA/ALK ก่อนข้างต่ำ

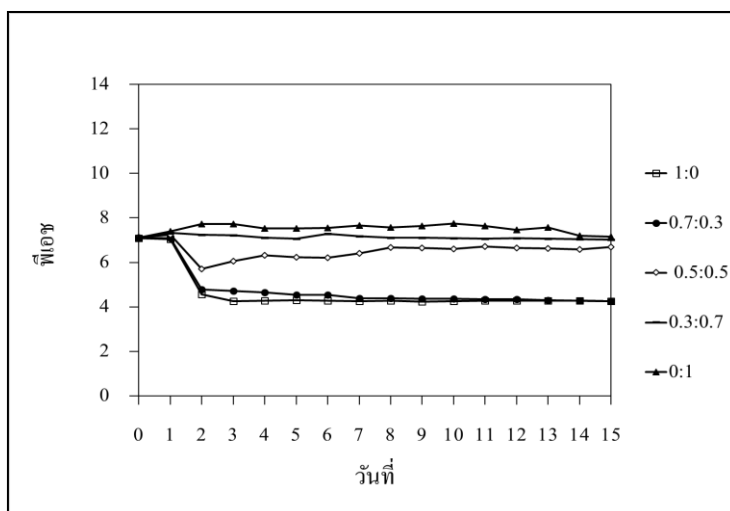


รูปที่ 5. อุณหภูมิภายในถัง CSTR ของการหมักร่วมของ WSS:WAS ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

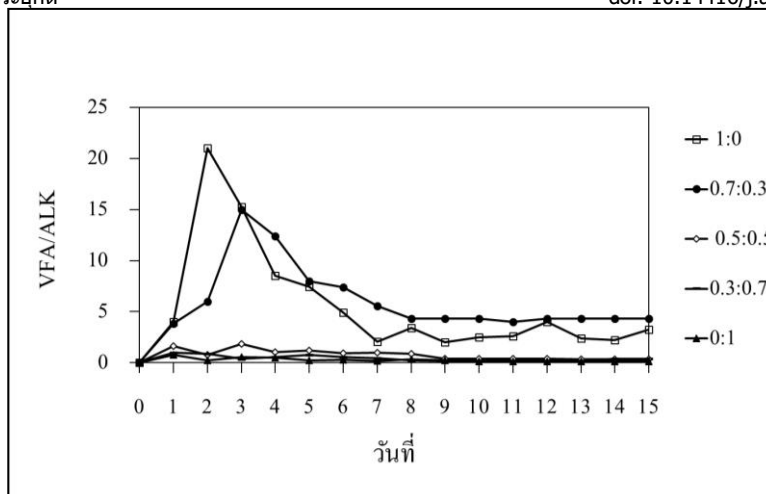
เมื่อพิจารณาสภาพการทำงาน of ระบบหมักย่อย พบว่าทั้งสามอัตราส่วนการหมัก (1:0, 0.7:0.3 และ 0.5:0.5) ค่าพีเอชภายในถัง CSTR ลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 3 วันของการหมักย่อย โดยในวันที่ 2 ของการหมักลดลงมากที่สุด ซึ่งลดลงจนต่ำกว่าระดับที่เหมาะสมสำหรับการย่อยแบบไม่ใช้ออกาศสภาวะมีโซฟิลิก (pH ระหว่าง 6.5-8.0) (Seadi et al., 2008) โดยเฉพาะอัตราส่วน 1:0 ที่มีการเติมเศษตะกอนแป้งเพียงอย่างเดียว มีค่าพีเอชต่ำมากอยู่ระหว่าง 4.25-4.56 อาจเนื่องมาจากเศษตะกอนแป้งที่ย่อยง่ายทำให้มีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหย ดังแสดงในรูปที่ 6 สอดคล้องกับอัตราส่วนของ VFA/ALK ซึ่งพบว่ามีค่าสูงถึง 21 ในวันที่ 2 ของการหมัก และหลังจากนั้นจึงลดลง

โดยหลังจากวันที่ 4 ที่หยุดผลิตก๊าซชีวภาพอัตราส่วนของ VFA/ALK ก็ยังคงสูงเป็นอย่างมาก อยู่ระหว่าง 2.08-4.0 ห่างจากอัตราส่วนที่แนะนำเป็นอย่างมากเช่นกัน (VFA/ALK เหมาะสมไม่ควรเกิน 0.4) (Bakili, 2014) เช่นเดียวกันกับอัตราส่วนการหมัก 0.7:0.3 ที่พบว่าค่าพีเอชภายในถัง CSTR ลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 3 วันของการหมัก และอัตราส่วนของ VFA/ALK ที่สูงถึง 15 โดยหลังจากที่ระบบหยุดผลิตก๊าซชีวภาพแล้ว ระบบยังคงมีค่าพีเอชที่ต่ำกว่า 4.5 และอัตราส่วน VFA/ALK ที่สูงเท่ากับ 4

ในขณะที่อัตราส่วนการหมัก 0.5:0.5 พบว่าหลังจากวันที่ 5 ที่ระบบหยุดผลิตก๊าซชีวภาพ มีค่าพีเอชกลับมาค่อนข้างเป็นกลาง อยู่ระหว่าง 6.21-6.70 และอัตราส่วน VFA/ALK ของระบบเท่ากับ 0.38 ในวันที่ 12 ของการหมัก ดังรูปที่ 7 จากผลการวิเคราะห์พีเอชและอัตราส่วน VFA/ALK แสดงให้เห็นว่าทั้งสองอัตราส่วน 1:0 และ 0.7:0.3 มีความไม่มีเสถียรภาพเกิดขึ้น โดยเป็นอัตราส่วนที่มีการเติมแอมโมเนียมากกว่าตะกอนชีวภาพ มีความเสี่ยงต่อการล้มเหลวมากกว่าอัตราส่วน 0.5:0.5 ดังนั้นการนำเศษตะกอนแอมโมเนียมาใช้เป็นวัสดุหลักในการผลิตก๊าซชีวภาพควรมีการปรับพีเอชระหว่างการหมัก และพบว่าการเติมตะกอนชีวภาพเพื่อหมักร่วมช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพดีขึ้น ซึ่งถ้ามีการเติมสารเคมีเพื่อใช้ในการปรับพีเอช จะใช้ปริมาณน้อยกว่าอัตราส่วนที่ใช้แอมโมเนียอย่างเดียว



รูปที่ 6. ค่าพีเอชภายในถัง CSTR ของการหมักร่วมของ WSS:WAS ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

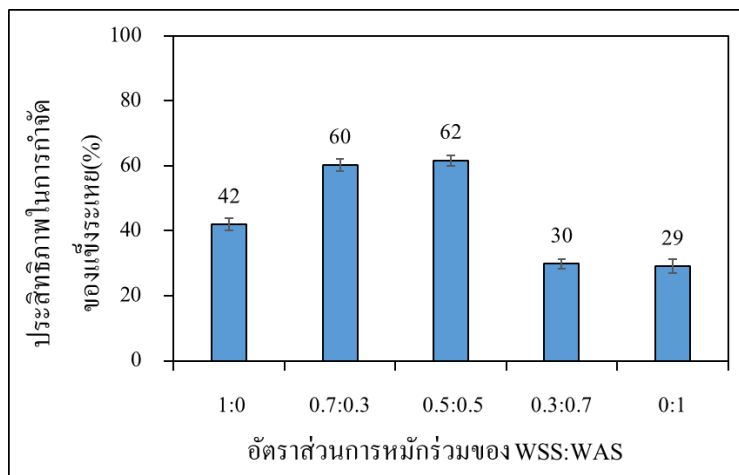


รูปที่ 7. อัตราส่วนของ VFA/ALK ภายในถัง CSTR ของการหมักร่วมของ WSS:WAS ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

4. ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยของระบบ CSTR

รูปที่ 8 แสดงประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหย (Total volatile solid removal efficiency) พบว่าอัตราส่วน 0.5:0.5 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงสุด เท่ากับ 62 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือที่อัตราส่วน 0.7:0.3 และ 1:0 เท่ากับ 60 และ 42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งตรงกันข้ามกับประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน จากผลดังกล่าวพบว่าของแข็งระเหยที่ถูกกำจัดจากอัตราส่วน 1:0 มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีกว่าอัตราส่วน 0.7:0.3 และ 0.5:0.5 โดยเมื่อกำหนดประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่อน้ำหนักของของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด ($L/kg TVS_{removed}$) สำหรับอัตราส่วน 1:0 0.7:0.3 และ 0.5:0.5 ได้เท่ากับ 545, 228 และ 205 $L/kg TVS_{removed}$ ตามลำดับ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดว่าอัตราส่วน 1:0 มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงเท่ากับ 2.67 เท่า ของอัตราส่วน 0.5:0.5 เนื่องจากเศษตะกอนแบ่งเป็นตัวหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน แต่อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสภาวะการทำงานของระบบหมักก็ พบว่ามีความเสถียรค่อนข้างต่ำ ระบบเสี่ยงต่อการล้มเหลว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสภาวะการทำงานของระบบก่อน โดยอาจมีการปรับพีเอชระหว่างการหมักย่อย ในขณะที่การนำการหมักร่วมระหว่างเศษตะกอนแบ่งกับตะกอนชีวภาพที่ 0.5:0.5 ไปใช้นั้น พบว่าระบบมีเสถียรภาพดีขึ้นแต่ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพยังต่ำอยู่ จึงควรมีการศึกษาเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซให้สูงขึ้น อาทิเช่น การปรับอุณหภูมิในการหมักย่อย การกวนผสม การปรับสภาพ (pretreatment) วัสดุหมักเบื้องต้นด้วยวิธีต่างๆ เป็นต้น



รูปที่ 8. ประสิทธิภาพในการกำจัดของแ่งระเหย ของการหมักร่วมของ WSS:WAS ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน

สรุปผลการทดลอง

เศษตะกอนแ่งจากโรงงานแ่งมันสำปะหลังดัดแปรเป็นของเสียที่มีศักยภาพสูงในการผลิตก๊าซมีเทน แต่การนำใช้ในระบบหมักไร้อากาศเพียงชนิดเดียว พบว่ามีปัญหาเรื่องของการเดินระบบขาดเสถียรภาพมีการสะสมตัวของกรดอินทรีย์ระเหยส่งผลให้พีเอชของระบบลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ระบบหยุดการผลิตก๊าซชีวภาพและล้นเหลวได้ ซึ่งการนำมาหมักร่วมกับตะกอนชีวภาพด้วยอัตราส่วน 0.5:0.5 ช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพของระบบดีขึ้น แต่ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนยังค่อนข้างต่ำมากเมื่อเทียบกับการหมักเศษตะกอนแ่งเพียงอย่างเดียว ซึ่งควรมีการศึกษาหาวิธีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคุณศิริชัย สุวรรณละมัยที่คอยช่วยเหลือ และสนับสนุนให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และคณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยาที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

Ahmmad, R.M. & Haque, S. (2014). Providing electricity by digester types on biogas productions from municipal solid waste in Dhaka city, Bangladesh. *International Journal of Energy, Information and Communications*, 5(3), 13-22.

- American Public Health Association. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. (23rd ed). Washington DC: American Public Health Association (APHA).
- Bakili, S.S. (2014). Anaerobic Digestion of Banana Winery Effluent for Biogas Production. *International Journal of Environmental Protection and Policy*, 2(5), 168-173.
- Ben, M.G. & Michael, E.I. (2018). Biogas Production from Farm Waste (Cassava Peels and SwineDung): Co-Digestion and Prospect on Economic Growth. *Research & Reviews: Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 6(2), 58-63.
- Cesaro, A. & Belgiorno, V. (2015). Combined Biogas and Bioethanol Production: Opportunities and Challenges for Industrial Application. *Energies*, 8(8), 8121-8144.
- Chen, S., Zhang, J. & Wang, X. (2015). Effects of alkalinity sources on the stability of anaerobic digestion from food waste. *Waste Management Research*, 33(11), 1033-1040.
- Deublein, D. & Steinhauser, A. (2011). *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction* (2th ed.). Germany: John Wiley & Sons.
- Dioha, I.J., Ikeme, C.H., Nafi'u, T., Soba, N.I. & Yusuf M.B.S. (2013). Effect of carbon to nitrogen ratio on biogas production. *International Research Journal of Natural Sciences*, 1(3), 1-10.
- Gray, N.F. (2017). *Water Science and Technology. An Introduction* (4th ed.). Taylor & Francis Incorporated.
- Karlsson, A., Truong, X.B., Gustavsson, J., Svensson, B.H., Nilsson, F. & Ejlerthsson J. (2011). Anaerobic treatment of activated sludge from Swedish pulp and paper mills--biogas production potential and limitations. *Environmental Technology*, 32(13-14), 1559-1571.
- Kullavanijaya, P. & Thongduang, P. (2012). Enhanced Biogas Production in Anaerobic Digestion of Cassava Wastewater Through Supplementation of Biodiesel Waste as Co-Substrate. *International Journal of Renewable Energy Research*, 2(3), 510-515.
- Liu, C., Li, H. & Zhang, Y. (2016). Improve biogas production from low-organic-content sludge through high-solids anaerobic co-digestion with food waste. *Bioresource Technology*, 219, 252-260.
- Izah, S.C. (2019). *Cassava Mill Effluents Recycling through Bioenergy Production: A Review*. Nigeria: Niger Delta University.
- Nijaguna, B.T. (2006). *Biogas Technology*. new Delhi, India: K.K Gupta for New Age International (P) Ltd.

- Promthong, S., Kanto, U., Tirawattanawanich C., Tongyai, S., Isariyodom, S. & Markvichitr K. (2006). *Comparison of nutrient compositions and carbohydrate fractions of corn, cassava chip and cassava pellet ingredients*. Animals. In Proceedings of the 44th Kasetsart University Annual Conference, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Seadi, T A., Rutz, D., Prassl, H., Köttner, M., Finsterwalder, T., Volk, S. et al. (2008). *BiogasHandbook (T. A. Seadi Ed)*, University of Southern Denmark Esbjerg, Denmark.
- Thai Tapioca Starch Association. (2018). *Export Tapioca Products*. Retrieved March 3, 2020, from http://www.thaitapiocastarch.org/en/information/statistics/export_tapioca_products. (in Thai)
- Thailand Tapioca Starch. (2018). *Pollution/Waste and Environmental Management for Cassava Starch Industry*. Retrieved March 2, 2020, from <http://www.thailandtapiocastarch.net/technology-detail/10/3/>. (in Thai)
- The Thai Tapioca Products Factory Association. (2017). *The price of tapioca by-Product in Thailand*. Retrieved March 1, 2020, from <http://thaitapioca.org/>. (in Thai)
- Tomasik, B. (2017). *Microorganisms created by wastewater-treatment systems*. Retrieved March 5, 2020, from https://reducing-suffering.org/microorganisms-wastewater-treatment/#Microorganism_composition.
- Wang, L.K., Hung, Y.T., Lo, H.H., Yapijakis, C. (2006). *Waste treatment in the food processing industry* (1st ed.). New York: Taylor & Francis.
- Yono, B., Primaloka, A.D., Ardhanari, L., Matin, H.H.A., Sumardiono, S. (2018). Study of Biogas Production from Cassava Industrial Waste by Anaerobic Process. *MATEC Web of Conferences*. 1-6.