อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์ ด้วยการปรับสภาพเชิงกล

Optimization of Organic Loading Rate in Biogas Production with Mechanical Pretreatment

ชาคริยา จันทร์ราชา[1] ภคมน ปินตานา[1] ชวโรจน์ ใจสิน[1] และรจพรรณ นิรัญศิลป์[1]

Chakriya Chanracha[1] Pakamon Pintana[1] Chawaroj Jaisin[1] and Rotjapun Nirunsin[1*]

[1] สาขาวิศวกรรมพลังงานทดแทน คณะวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

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

[1]Corresponding author: Tel.: 08-18056559. E-mail address: rotjapun@gmail.com

นวัตกรรมด้านพลังงาน (Energy innovation)

Received: 3 April 2023, *Revised:* 13 May 2023, *Accepted:* 18 May 2023, *Published online:* 30 April 2024

Abstract

This research aims to study the appropriate Organic Loading Rate (OLR) for biogas production with mechanical pretreatment from organic waste which is measured in a 1,000 Liter tank. A mechanical pretreatment was installed on the top of the biodigester tank which worked by adding surface area to the feedstock with 6 blades. This research also studied the OLR which was separated into 3 conditions with an OLR of 1.0 1.5 and 2.0 kg COD/m^3-day and a hydraulic retention time (HRT) of 20 days per condition. The result of this study showed that a mechanical pretreatment had a size reduction efficiency of 86.49% with a shredding efficiency of 4 L/min or 160 kg/h. The mechanical pretreatment could also increase the maximum amount of biogas production at an OLR of 2.0 kg COD/m^3-day with the highest biogas production rate of 789.30 L/day. The appropriate acid-base conditions had the average pH value at 7.07 throughout the entire period of the experiment. The efficiencies of COD, TS and VS removal were 88.64%, 89.05% and 88.36%, respectively, and the average methane ratio throughout the experiment period was 59.9%. The overall results of this study showed that studying the appropriate OLR led to effective biogas production and recycled the waste to maximize the benefits of the at most energy. The appropriate OLR also helped reduce the cumulative trash which might happen in the community.

Keywords: Organic loading rate, Mechanical pretreatment, Organic waste, Biogas

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) ที่เหมาะสม สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์ด้วยการปรับสภาพเชิงกล ในถังปฏิกิริยาขนาด 1,000 L ซึ่งได้ติดตั้งเครื่องปรับสภาพเชิงกลทางด้านบนของถังปฏิกิริยา ทำงานโดยการเพิ่มพื้นที่ผิวให้กับวัตถุดิบตั้งต้นด้วยใบมีดบดย่อยจำนวน 6 ใบมีด ทดลองศึกษาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ แบ่งเป็น 3 เงื่อนไข ได้แก่ OLR ที่ 1.0, 1.5 และ 2.0 kg COD/m^3-day เงื่อนไขละ 20 days ผลการศึกษาพบว่า กระบวนการปรับสภาพเชิงกลมีประสิทธิภาพการลดขนาดวัตถุดิบเท่ากับ 86.49% ด้วยอัตราการทำงานที่ 4 L/min หรือ 160 kg/h ระบบมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดที่เงื่อนไข OLR 2.0 kg COD/m^3-day ด้วยอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด 789.30 L/day มีสภาพความเป็นกรด–ด่างที่เหมาะสม โดยมีค่า pH เฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลองเท่ากับ 7.07 ประสิทธิภาพการกำจัด COD, TS และ VS เท่ากับ 88.64%, 89.05% และ 88.36% ตามลำดับ และสัดส่วนก๊าซมีเทนโดยเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการทดลองเท่ากับ 59.9% การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า การหาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม ส่งผลให้การทำงานระบบผลิตก๊าซชีวภาพเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังช่วยให้การนำของเสียมาใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ทางด้านพลังงานสูงสุดและยังช่วยกำจัดปริมาณขยะสะสมที่อาจเกิดขึ้นได้ค่อนข้างมากในชุมชนอีกด้วย

คำสำคัญ: อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์, การปรับสภาพเชิงกล, ขยะอินทรีย์ ก๊าซชีวภาพ

บทนำ

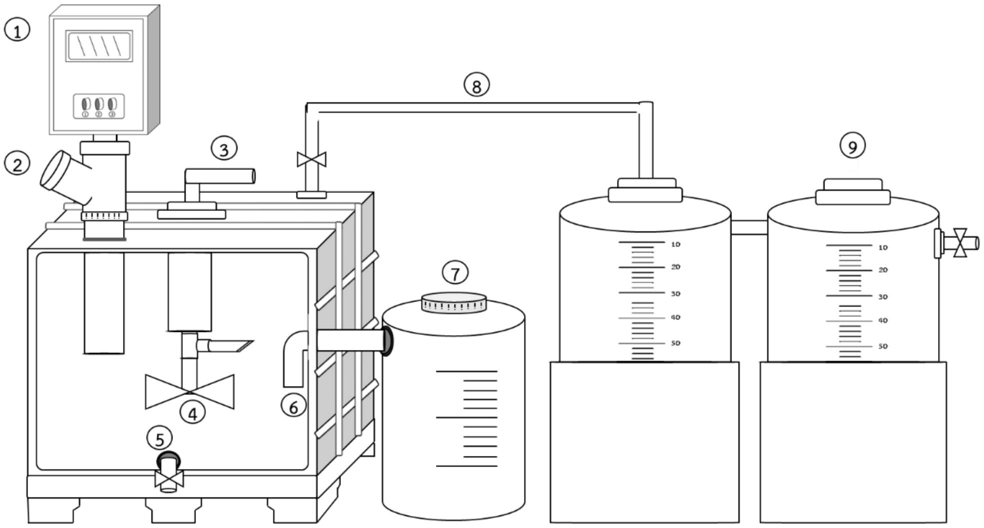
ปัจจุบันปัญหาสิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด จากทั่วทุกภูมิภาค อันเนื่องมาจากการเติบโตของสังคมเมืองและจำนวนประชากรที่ขยายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับการเกิดปริมาณการสะสมมากขึ้นของขยะมูลฝอยทั้งในภาคชุมชนไปจนถึงระดับประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องการบริหารจัดการด้านการคัดแยกขยะที่ไม่ถูกวิธี ส่งผลให้เกิดการเน่าเสียของขยะอินทรีย์ ซึ่งนอกจากจะทำให้การจัดการยากลำบากมากขึ้นแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อสภาวะโลกร้อนจากการปลดปล่อยก๊าซมีเทน (CH_4) ออกสู่ชั้นบรรยากาศ นอกจากนั้นยังเป็นแหล่งแพร่กระจายของเชื้อโรคอีกด้วย ทั้งนี้การเพิ่มขึ้นของปริมาณขยะอินทรีย์ส่วนใหญ่ในชุ่มชนเมือง ปัจจุบันมาจากอาหารประเภทบุฟเฟต์ (Buffet) หรือให้ลูกค้าบริการตักอาหารด้วยตนเองโดยไม่จำกัดปริมาณ จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปริมาณเศษอาหารเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากและยังประกอบไปด้วยอาหารจากหลากหลายประเภท จึงเป็นแหล่งที่มาของปัญหาการเน่าเสียของขยะอินทรีย์ที่ซึ่งทำให้เกิดการส่งกลิ่นเหม็นและยังเป็นแหล่งสร้างมลพิษสู่สิ่งแวดล้อม จากการย่อยสลายสารอินทรีย์และปลดปล่อยก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นการเพิ่มภาวะเรือนกระจกอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ [1] นอกจากนี้ยังมีรายงานจากกรมควบคุมมลพิษระบุไว้ว่า ในปี พ.ศ.2564 จากปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมด 24.98 million tons มีการกำจัดไม่ถูกต้องประมาณ 6.69 million tons ทั้งนี้ยังมีปริมาณขยะอินทรีย์ที่ปนเปื้อนกับขยะพลาสติกเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง [2] ซึ่งปริมาณขยะอินทรีย์คิดเป็นสัดส่วน 64% ของปริมาณขยะมูลฝอยทั้งหมดต่อคนต่อปีเท่ากับ 254 kg ทั้งนี้ตัวเลขดังกล่าวเป็นปริมาณขยะมูลฝอยที่จัดเก็บโดยเทศบาลเท่านั้น ยังไม่รวมขยะอาหารหรือปริมาณอาหารส่วนเกินของภาคธุรกิจที่มีการจ้างบริษัทเอกชนบริหารจัดการ [3] ซึ่งการสร้างองค์ความรู้เรื่องการคัดแยกขยะให้ถูกวิธีในชุมชน นอกจากจะช่วยลดปัญหาในหลายด้านที่เกิดจากขยะอินทรีย์แล้ว ยังสามารถนำขยะอินทรีย์ไปใช้ต่อยอด เพื่อประโยชน์ทางด้านพลังงานที่คุ้มค่าได้อีกด้วย [4] อย่างเช่นพลังงานจากก๊าซชีวภาพเป็นเทคโนโลยีพลังงานทดแทนอย่างหนึ่งที่นิยมและแพร่หลายเป็นอย่างมากในทั่วโลก เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมโดยตรง ซึ่งมาจากกระบวนการนำของเสียหรือขยะอินทรีย์กลับมาเข้าสู่กระบวนการบำบัดด้วยการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ โดยแหล่งวัตถุดิบ

สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถเกิดได้จากพืชพลังงาน แหล่งน้ำเสีย ฟาร์มปศุสัตว์ และขยะอินทรีย์ เป็นต้น ซึ่งขยะอินทรีย์เป็นวัตถุดิบที่มีความชื้นสูง จึงเป็นวัตถุดิบที่เหมาะกับการบำบัดด้วยกระบวนการแบบไร้อากาศ [5] โดยนอกจากจะช่วยในด้านกำจัดขยะในชุมชนแล้ว ยังช่วยให้เกิดการนำของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์ทางด้านพลังงานอีกด้วย ทั้งนี้การปรับสภาพวัตถุดิบตั้งต้นก่อนนำเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่ง ที่มีจุดประสงค์หลักเพื่อช่วยให้ระบบมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากการปรับสภาพวัตถุดิบ ส่งผลให้คุณสมบัติทางกายภาพ และคุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบเปลี่ยนแปลงไป [6] นอกจากนั้นยังพบว่าการปรับสภาพทางเชิงกลเป็นวิธีเบื้องต้นที่นิยมใช้ อันเนื่องมาจากการปรับลดขนาดวัตถุดิบหรือการบีบอัดเพื่อทำลายโครงสร้างเซลล์ เป็นเทคโนโลยีที่สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว โดยจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสให้กับวัตถุดิบ [7] ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพให้กับระบบได้สูงสุดถึง 25% โดยขนาดของวัตถุดิบในช่วง 0.5-1.0 mm สามารถช่วยให้ระบบเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8] ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพนอกจากจะช่วยบริหารการจัดการขยะภายในครัวเรือนและยังได้ใช้ประโยชน์จากพลังงานในรูปของก๊าซชีวภาพและยังได้ปุ๋ยชีวภาพที่สามารถนำไปใช้บำรุงดินได้ เป็นประโยชน์ในการรักษาสิ่งแวดล้อมและช่วยให้ระบบการกำจัดขยะมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งนอกจากจะส่งผลให้ระบบมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนสูงสุดแล้ว ยังช่วยให้เกิดการนำขยะอินทรีย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในด้านพลังงานอีกด้วย [9] และนอกจากนี้การเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพยังมีส่วนช่วยลดการเกิดมลภาวะทางสิ่งแวดล้อมภายในชุมชน เช่น มลภาวะของกลิ่น น้ำเสีย แมลงวัน และพาหะนำโรค เป็นต้น [10]

สำหรับงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) ที่เหมาะสมสำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเชิงกล จากขยะอินทรีย์ที่ได้จากครัวเรือนร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์มูลโค ด้วยถังปฏิกิริยาขนาด 1,000 L โดยติดตั้งเครื่องปรับสภาพเชิงกลไว้ในส่วนด้านบนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อช่วยลดขนาดวัตถุดิบตั้งต้นก่อนเข้าสู่ระบบ ดำเนินงานศึกษาเปรียบเทียบอัตราการภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน เพื่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดสำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเชิงกล โดยการคัดแยกขยะในชุมชนหรือครัวเรือนให้ถูกวิธี นอกจากจะช่วยลดปัญหาขยะอินทรีย์สะสมในชุมชนแล้ว ยังเป็นการนำของเสียกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ทางด้านพลังงานทดแทนและเป็นการลดค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานให้กับผู้ใช้งานได้อย่างยั่งยืนอีกด้วย

วิธีการวิจัย

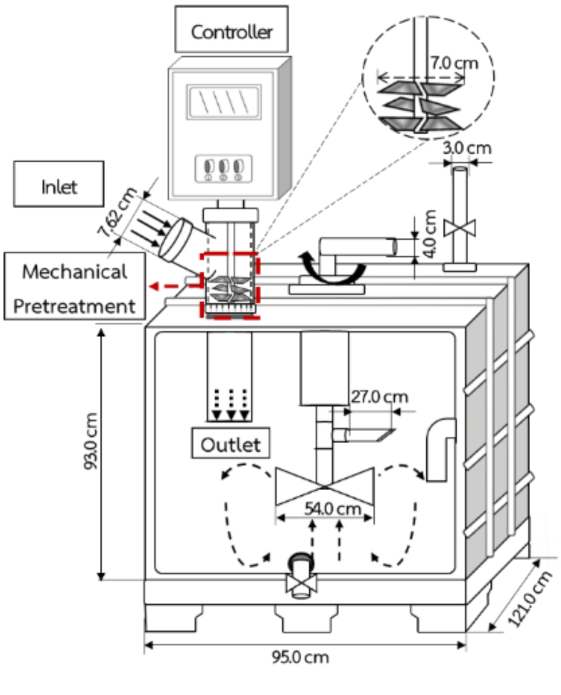
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ที่เหมาะสม สำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเชิงกล จากขยะอินทรีย์หมักร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์มูลโค ซึ่งได้จากชุมชนในพื้นที่อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ โดยในขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 เตรียมระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเชิงกล ขั้นตอนที่ 2 ทำการวิเคราะห์วัตถุดิบเบื้องต้นทางด้านกายภาพและเคมีก่อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และขั้นตอนที่ 3 ศึกษาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันสำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเชิงกล ซึ่งมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังหัวข้อต่อไปนี้



ภาพที่ 1 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเชิงกล

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเชิงกล

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเชิงกลแสดงดังภาพที่ 1 และ 2 โดยแสดงองค์ประกอบดังหมายเลข 1-9 ซึ่งดำเนินการทดลองโดยใช้ถังปฏิกิริยาชนิดพลาสติกพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene: HDPE) เป็นพลาสติกที่มีความหนาแน่นเป็นพิเศษ มีค่าความทนแรงกระแทก มีความคงทนต่อสภาวะแวดล้อม ซึ่งทนต่อสารเคมีที่มีความเป็นกรดหรือเบสสูง มีปริมาตรทั้งหมดเท่ากับ 1,000 L และในส่วนของการย่อยสลายสารอินทรีย์มีปริมาตร 800 L โดยผสานการกวนผสมในระบบดังหมายเลขที่ 3 คือ แกนกวนและหมายเลขที่ 4 คือ ใบพัดกวนผสม ด้วยหลักการกวนผสมในรูปแบบของเหลวไหลวนลงตามแกนเพลา (Axial Flow Pattern) ทำงานโดยการดึงวัตถุดิบที่ถูกเติมจากด้านบนทางด้านช่องเติมสารอินทรีย์ที่หมายเลข 2 ลงมาด้านล่างของถังปฏิกิริยา ช่วยเพิ่มการไหลวนของสสารภายในถังปฏิกิริยา ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้สำหรับการดึงเศษอาหารหรือสารแขวนลอยที่ลอยตัวอยู่ด้านบนของถังปฏิกิริยาให้เกิดการผสมระหว่างเศษอาหารกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นก๊าซชีวภาพที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังท่อนำก๊าซชีวภาพไปยังถังเก็บก๊าซชีวภาพ (หมายเลข 8-9)



ภาพที่ 2 องค์ประกอบเครื่องปรับสภาพเชิงกล

สำหรับหมายเลข 5-7 เป็นระบบสำหรับเก็บตัวอย่างกากตะกอนและน้ำล้น สำหรับเครื่องปรับสภาพด้วยแรงกล ประกอบไปด้วยชุดควบคุมหมายเลข 1 ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์ต้นแรงกำลัง ต่อกับแกนควบคุม และใบมีดตัดบด 3 ชั้น ซึ่งมีขนาดความกว้างของใบมีดเท่ากับ 2.0 cm ความยาวเท่ากับ 2.5 cm และความหนาใบมีดเท่ากับ 0.2 cm จำนวนทั้งหมด 6 ใบมีด โดยใบมีดมีขนาดความยาวรวมทั้งหมด 7.5 cm (น้ำหนักเฉพาะชุดใบมีดเท่ากับ 118 g) ซึ่งหลังจากการรวบรวมวัตถุดิบตั้งต้นนำมาคัดแยกสิ่งแปลกปลอมที่ไม่สามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ ออกเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการปรับสภาพเชิงกล ซึ่งวัตถุดิบจะถูกบดย่อยให้มีขนาดของอนุภาคเล็กลง เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

วิเคราะห์วัตถุดิบเบื้องต้นทางด้านกายภาพและทางด้านเคมี

ดำเนินการวิจัยโดยทดสอบองค์ประกอบของขยะอินทรีย์ที่รวบรวมได้จากเศษอาหารเหลือทิ้งในชุมชน โดยนำเอาวัตถุดิบตั้งต้นที่ได้เริ่มโดยการคัดแยกสิ่งแปลกปลอมที่ไม่สามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ได้ออก ก่อนนำเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพอย่างเช่น เศษไม้ เศษกระดูก เศษขยะพลาสติก เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 3 (ก.) ลักษณะของวัตถุดิบตั้งต้นก่อนการปรับสภาพ ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้เป็นขยะอินทรีย์ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนมาแล้วเบื้องต้น มีลักษณะเปื่อยเล็กน้อย ทั้งนี้องค์ประกอบของวัตถุดิบที่นำมาใช้ประกอบไปด้วย ข้าว เส้นบะหมี่ ไข่ เนื้อสัตว์ เนื้อสัตว์แปรรูป และพืชผักหลายชนิด โดยขนาดของวัตถุดิบมีขนาดใหญ่ ซึ่งมีความกว้างประมาณ 1.0-4.0 cm และมีความยาวอยู่ในช่วง 1.0-6.0 cm วัตถุดิบอาหารส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ อย่างเช่นสารชีวโมเลกุลประเภท ไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต จากนี้นำเข้าสู่ขั้นตอนการปรับสภาพเชิงกลและทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีต่อไป

(ก.) ก่อนปรับสภาพ

(ข.) หลังปรับสภาพเชิงกล

ภาพที่ 3 วัตถุดิบขยะอินทรีย์ตั้งต้นจากครัวเรือน

ทดลองศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบปรับสภาพเชิงกล

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพทดลองในสภาวะไร้อากาศ ณ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม โดยเริ่มต้นระบบด้วยการจัดเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์จากมูลโคในชุมชน จากนั้นนำหัวเชื้อมูลโคผสมน้ำในอัตราส่วน 1:2 โดยปริมาตร ทำการเติมเข้าสู่ถังปฏิกิริยาและกวนผสมให้เข้ากัน จากนั้นพักระบบไว้เป็นระยะเวลา 7 days เพื่อให้ระบบมีการสร้างจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน จากนั้นรวบรวมวัตถุดิบมาคัดแยกสิ่งแปลกปลอมที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ออกก่อน เช่น เศษไม้ ขยะพลาสติก กระดูกสัตว์ เป็นต้น จากนั้นป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยผ่านเข้าสู่กระบวนการปรับสภาพเชิงกลเพื่อลดขนาดวัตถุดิบก่อนเข้าสู่ปฏิกิริยาการย่อยสลายของแบคทีเรียต่อไป ซึ่งรูปแบบการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง

(Semi-Continuous Fermentation) โดยเปรียบเทียบศักยภาพกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบด้วยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Roading Rate: OLR) ที่แตกต่างกัน 3 เงื่อนไข ได้แก่ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ด้วยค่า OLR เท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 kg COD/m^3-day โดยกำหนดให้เป็น R1, R2 และ R3 ตามลำดับ ทดลองระยะเวลาเงื่อนไขละ 20 days และกวนผสมวันละ 1 ครั้ง พร้อมกับการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จากนั้นเก็บตัวอย่างสำหรับนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบ ได้แก่ ค่าปริมาณสารอินทรีย์หรือค่า COD (Chemical Oxygen Demand), ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ปริมาณของแข็งรวม (Total Solids), ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ (Biogas Volume), ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (Biogas Composition) และปริมาณมีเทน (CH_4) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 วิเคราะห์องค์ประกอบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์	วัตถุประสงค์	หน่วย
COD (Chemical Oxygen Demand)	ปริมาณสารอินทรีย์	mg/L
pH Value	ความเป็นกรด-เบส	-
TS (Total Solid)	ปริมาณของแข็งรวม	mg/L
VS (Volatile Solid)	ปริมาณสารระเหยง่าย	mg/L
VFA (Volatile Fatty Acid)	การยับยั้งปฏิกิริยา	mg CH_3COOH/L
ALK (Alkalinity)	การต้านการยับยั้งปฏิกิริยา	mg $CaCO_3$/L
Biogas Volume	ปริมาณก๊าซชีวภาพ	L
Biogas Composition	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	%

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

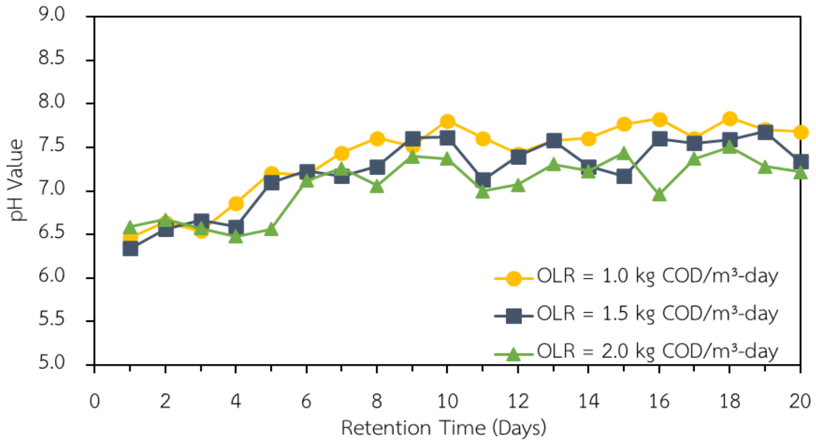
สำหรับผลการศึกษาและการรวบรวมข้อมูลในงานวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษขยะอินทรีย์ประเภทที่ผ่านการให้ความร้อนก่อนทิ้ง ร่วมกับการปรับสภาพเชิงกล โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย คือ ขยะอินทรีย์ ที่รวบรวมได้จากในพื้นที่อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ และหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ คือ มูลโค รวบรวมได้จากฟาร์มในชุมชน ทดลองด้วยกระบวนการแบบกึ่งต่อเนื่องในถังปฏิกิริยาขนาด 1,000 L ที่มีสัดส่วนของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในถังปฏิกิริยาเท่ากับ 800 L ซึ่งผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเบื้องต้นของวัตถุดิบก่อนและหลังการปรับสภาพเชิงกล และหัวเชื้อจุลินทรีย์จากมูลโค แสดงผลดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของวัตถุดิบ

คุณสมบัติ	วัตถุดิบในการดำเนินงานวิจัย		
	วัตถุดิบตั้งต้น	หัวเชื้อจุลินทรีย์	หน่วย
COD (Chemical Oxygen Demand)	110.93	62.50	g/L
pH value	4.92	7.14	-
TS (Total Solid)	53.0	62.0	g/L
VS (Volatile Solid)	50.0	54.0	g/L
VS/TS Ratio	0.94	0.64	-
Volatile Fatty Acid (VFA)	2,037.27	1,928.67	mg/L
Alkalinity (ALK)	3,824.50	3,941.50	mg/L
VFA/ALK	0.53	0.49	-
Density	729.0	486.0	kg/m^3

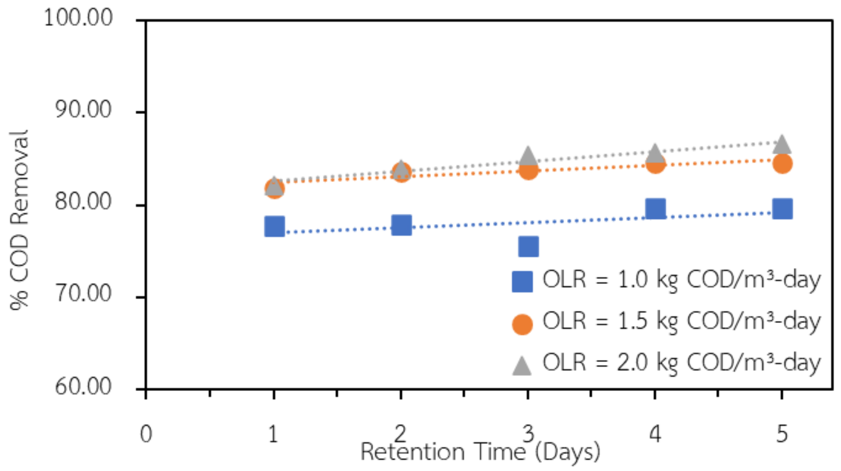
จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบขยะอินทรีย์ที่ผ่านการปรับสภาพเชิงกลแล้ว มีค่า COD เท่ากับ 110.93 g/L ซึ่งมีความเข้มข้นสูงสอดคล้องกับค่าความเป็นกรด–ด่าง ที่มีค่า pH เท่ากับ 4.92 ซึ่งวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการทำอาหารมาแล้ว จึงทำให้มีค่า pH ต่ำ หรือมีความเป็นกรดอ่อน ๆ [11] ซึ่งเกิดจากวัตถุดิบที่รวบรวมนั้นเกิดกระบวนการหมักเบื้องต้นแล้ว จึงทำให้มีอัตราการผลิตกรดอะซิติก (Acetic Acid) และกรดบิวทีริก (Butyric Acid) ที่เพิ่มสูงขึ้นของจุลินทรีย์ องค์ประกอบเหล่านี้มีส่วนสำคัญต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการสร้างกรด ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศ [12] ทั้งนี้พบว่าการนำวัตถุดิบผ่านการปรับสภาพเชิงกล อาจส่งผลให้พารามิเตอร์ทางเคมีของวัตถุดิบเปลี่ยนไป [13] วัตถุดิบมีปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่ายที่ค่า TS และ VS เท่ากับ 53.0 g/L และ 50.0 g/L ตามลำดับ ซึ่งมีสัดส่วนของ VS/TS Ratio เท่ากับ 0.94 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่อยู่ในเกณฑ์เหมาะสมสำหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยอัตราส่วนของ VS/TS Ratio อยู่ในช่วง 0.69-0.95 จะส่งผลให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ [14] เห็นได้ว่าวัตถุดิบตั้งต้นที่ผ่านการปรับสภาพ นอกจากจะส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพเปลี่ยนไปแล้ว ยังพบการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีอีกด้วย [12] ทั้งนี้ยังเป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้จุลินทรีย์เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) [15]

จากการปรับสภาพเชิงกลของวัตถุดิบตั้งต้น ก่อนนำเข้าสู่ระบบมีความกว้างอยู่ในช่วง 1.0–4.0 cm และมีความยาวอยู่ในช่วง 1.0–6.0 cm หลังจากการนำวัตถุดิบตั้งต้นผ่านกระบวนการปรับสภาพเชิงกลเรียบร้อยแล้ว สามารถลดขนาดวัตถุดิบให้มีขนาดอนุภาคเล็กลงอยู่ในช่วง 0.1-1.0 cm ทั้งนี้การลดขนาดของขยะอินทรีย์โดยการออกแบบเครื่องปรับสภาพที่ช่วยลดขนาดวัตถุดิบที่เหมาะสมควรมีขนาดของวัตถุดิบหลังการปรับสภาพเชิงกลอยู่ในช่วง 1.0 cm บ่งบอกถึงทำงานและการลดขนาดวัตถุดิบของเครื่องปรับสภาพเชิงกลที่มีประสิทธิภาพ [16] แสดงลักษณะดังภาพที่ 3 (ข.) ของขยะอินทรีย์หลังผ่านการปรับสภาพเชิงกลจากการดำเนินงานวิจัย โดยวัตถุดิบขยะอินทรีย์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบไปด้วยสารชีวโมเลกุลประเภท ไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญสำหรับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ซึ่งช่วยกระตุ้นจุลินทรีย์ให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วขึ้นในลักษณะของโครงสร้างโมเลกุลที่เล็กลง เช่น กรดไขมัน กรดอมิโน กลูโคส เป็นต้น [15] การปรับสภาพเชิงกลก่อนการนำวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ช่วยให้เกิดการผสมเป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenous) และเพิ่มพื้นที่ผิว ที่ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ [17] และสำหรับผลจากการทดสอบศักยภาพการทำงานของเครื่องปรับสภาพเชิงกลที่ออกแบบจากงานวิจัยนี้ โดยจากการวิเคราะห์มวลของวัตถุดิบขยะอินทรีย์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยเครื่องปรับสภาพเชิงกลพบว่า จากการทำงานลดขนาดวัตถุดิบขยะอินทรีย์ที่ได้จากชุมชน สามารถลดขนาดอนุภาคของวัตถุดิบให้มีขนาดอยู่ในช่วงความกว้างเท่ากับ 0.1-1.0 cm และมีความยาวอยู่ในช่วง 0.1-1.0 cm แสดงให้เห็นว่าระบบปรับสภาพเชิงกล มีประสิทธิภาพการลดขนาดวัตถุดิบ ซึ่งการลดขนาดวัตถุดิบให้มีขนาด 1.0 cm หรือ 10.0 mm ถือว่าเพียงพอต่อการนำไปป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ [8] ซึ่งนอกจากจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์แล้ว ยังช่วยลดต้นทุนทางพลังงานที่มากเกินความจำเป็นอีกด้วย สำหรับการลดขนาดวัตถุดิบด้วยเชิงกล ซึ่งผลการศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการปรับสภาพเชิงกล จากการวิเคราะห์ตัวอย่างวัตถุดิบที่ได้จากการปรับส ภาพเชิงกลในปริมาณ 200 g พบว่ามีประสิทธิภาพการลดขนาดเท่ากับ 86.49% ด้วยอัตราการทำงานเท่ากับ 160 kg/h หรือที่อัตราการป้อน 4.0 L/min โดยช่วงของอัตราการทำงานอยู่ในรอบการทำงานที่เหมาะสมกับเครื่องบดย่อยขนาดเล็ก ซึ่งถ้าเพิ่มอัตราการทำงานที่สูงขึ้น โดยไม่สัมพันธ์กับรอบการทำงานของมอเตอร์ จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องบดย่อยลดลง [17] รวมไปถึงประสิทธิภาพการลดขนาดจะลดลงไปด้วยเช่นกัน ทั้งนี้การลดขนาดอนุภาคของวัตถุดิบยังมีส่วนสำคัญสำหรับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากจะช่วยเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซมีเทนและก๊าซชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด [7]



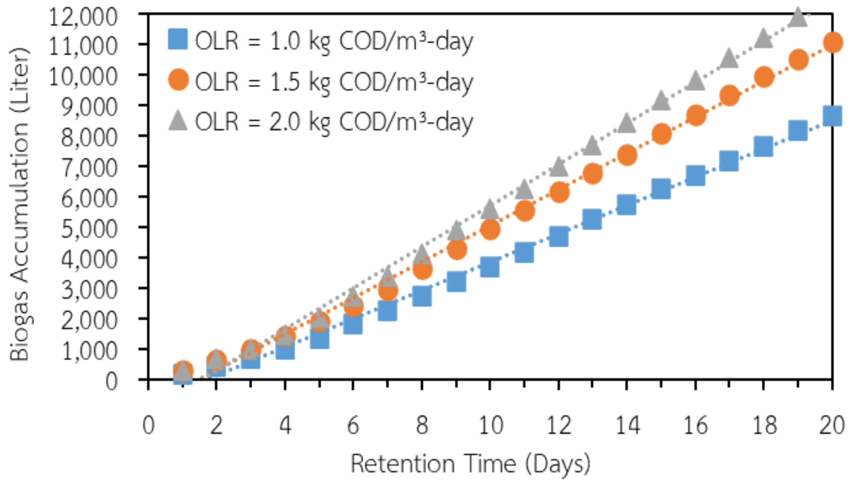
ภาพที่ 5 ค่าความเป็นกรด–ด่าง (pH) ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเชิงกล

การศึกษาการดำเนินงานวิจัยระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์ด้วยการปรับสภาพเชิงกล จากภาพที่ 5 แสดงการตรวจวัดค่า pH จากน้ำตัวอย่างที่ท่อน้ำล้น โดยที่ค่า pH ของวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับเงื่อนไขการทดลอง R1, R2 และ R3 หรือที่ค่า OLR เท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 kg COD/m^3-day มีค่า pH อยู่ในช่วง 6.47–7.84, 6.34–7.68 และ 6.48–7.51 ตามลำดับ ตลอดระยะเวลาการทดลองตามเงื่อนไขภายใน HRT 20 days โดยมีค่าเฉลี่ยของค่า pH สำหรับวัตถุดิบตั้งต้นที่ผ่านการปรับสภาพเชิงกลเรียบร้อยแล้ว ซึ่งก่อนเติมเข้าสู่ระบบสำหรับเงื่อนไข R1, R2 และ R3 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.40, 7.22 และ 7.07 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในช่วง 1 ถึง 4 วันแรก ค่า pH ในระบบมีความเป็นกรดสูง เนื่องจากมีปริมาณของกรดอะซิติกเพิ่มสูงขึ้น [19] ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ให้อยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย โดยถ้าในระบบมีค่า pH ต่ำกว่า 6.2 จะทำให้จุลินทรีย์สร้างมีเทนหยุดการเจริญเติบโตได้ แต่ถ้าระบบมีค่าความเป็นด่างมากเกินไป จะส่งผลให้ระบบเกิดความเข้มข้นของแอมโมเนียมากขึ้นและเป็นพิษต่อจุลินทรีย์สร้างมีเทน ซึ่งทำให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพล้มเหลวได้ [20] จากผลการศึกษาค่า pH ของทุกเงื่อนไขพบว่า เงื่อนไข R1 หรือ OLR ที่ 1.0 kg COD/m^3-day มีค่าของความเป็นด่างสูงมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงให้เห็นว่าการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบน้อยเกินไป ซึ่งไม่สอดคล้องกับปริมาตรของถังปฏิกิริยา จึงเกิดการเสียสมดุลระหว่างจุลินทรีย์หัวเชื้อกับวัตถุดิบสารอินทรีย์ [21] ซึ่งส่งผลให้ระบบอาจผลิตก๊าซชีวภาพได้น้อยลงหรืออาจเกิดความล้มเหลวต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้ อันเนื่องมาจากระบบสะสมสภาพความเป็นด่างมากเกินไป [20] จากผลการศึกษายังพบว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเชิงกลสามารถรองรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูง โดยที่ค่า OLR เท่ากับ 2.0 kg COD/m^3-day พบว่ามีสภาวะความเป็นกรด–ด่างที่เหมาะสม ซึ่งมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยเท่ากับ 7.07 โดยค่า pH ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมควรมีค่า pH เท่ากับ 7.00 [9] เนื่องจากส่งผลดีต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ



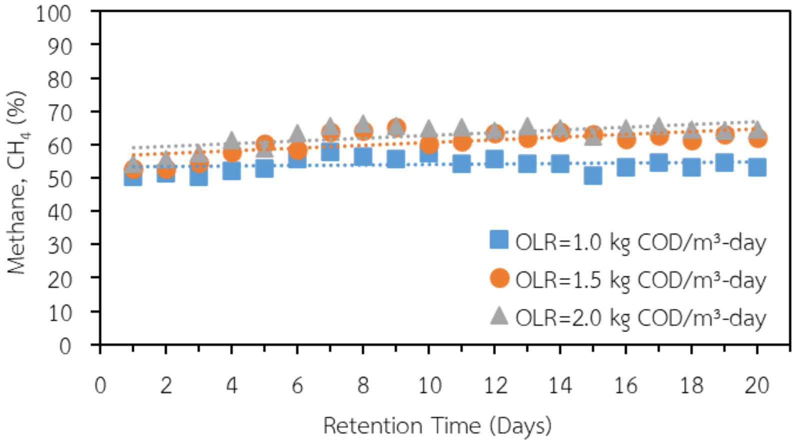
ภาพที่ 6 ปริมาณการกำจัด COD ของระบบ

ผลจากการวิเคราะห์ปริมาณออกซิเจนที่จำเป็นต้องใช้ สำหรับการย่อยสลายทางเคมีของสารอินทรีย์ภายในถังปฏิกิริยา โดยที่มีปริมาณ COD ของวัตถุดิบขาเข้าอยู่ในช่วง 110.67 g/L จากภาพที่ 6 แสดงปริมาณการกำจัดค่า COD จากระบบทั้ง 3 เงื่อนไข ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้พบว่า เงื่อนไข R3 หรือ OLR ที่ 2.0 kg COD/m^3-day มีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยของประสิทธิภาพการกำจัด COD อยู่ที่ 83.19% ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุดเท่ากับ 88.64% รองลงมาได้แก่ R2 และ R1 มีปริมาณการกำจัด COD โดยเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 81.05% และ 75.89% ของปริมาณสารอินทรีย์ที่กำจัดได้ ตามลำดับ ซึ่งการปรับสภาพมีผลต่อโครงสร้างของวัตถุดิบที่เปลี่ยนไป การที่ขนาดของวัตถุดิบลดลง จะช่วยให้กระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ [22] นอกจากจะช่วยให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างต่อเนื่องแล้ว ยังทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงตามไปด้วย [9] ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงอัตราการภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ เนื่องด้วยถ้าระบบมีอัตราการป้อน COD ต่อวัน ที่มากเกินหรือน้อยเกินความเหมาะสมกับปริมาตรของถังปฏิกิริยา และปริมาณจุลินทรีย์ในระบบ เช่นนั้นจะส่งผลให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพการกำจัด COD ที่ลดลงอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ [23]



ภาพที่ 7 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมตลอดระยะเวลาการทดลอง

จากภาพที่ 7 ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้พบว่า เงื่อนไขที่ R1, R2 และ R3 หรือค่า OLR เท่ากับ 1.0 1.5 และ 2.0 kg COD/m^3-day ตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัยเงื่อนไขละ 20 days สรุปได้ว่า ระบบมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 8.64 11.12 และ 12.52 m^3 ตามลำดับ ซึ่งแสดงศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมของระบบทุกเงื่อนไข พบว่าเงื่อนไขที่ OLR 2.0 kg COD/m^3 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมต่อเนื่องสูงสุด ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพในครัวเรือนที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งวัตถุดิบขยะอินทรีย์จากเศษอาหาร มีสารประกอบที่มาจากแหล่งอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตสูง จึงสามารถช่วยให้ระบบมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด ส่งผลให้ระบบมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยวัตถุดิบที่มีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตเจือปนในปริมาณสูง สามารถเร่งอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5] นอกจากนี้การปรับสภาพทางเชิงกลส่งผลให้ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบลดลงแล้ว เป็นส่วนหนึ่งที่ช่วยให้เกิดอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์เป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้เกิดอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และนอกจากนั้นยังมีส่วนช่วยให้เกิดอัตราการสร้างมีเทนของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นอีกด้วย [24]



ภาพที่ 8 ปริมาณร้อยละก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบ

องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดจากวัตถุดิบประเภทขยะอินทรีย์ จะมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนเท่ากับ 50-70% [25] โดยจากการดำเนินงานวิจัยเปรียบเทียบอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ที่วัตถุดิบผ่านกระบวนการปรับสภาพเชิงกล จากภาพที่ 6 แสดงปริมาณของก๊าซมีเทนในรูปแบบร้อยละ โดยจากผลงานวิจัยที่ได้จากเงื่อนไขการทดลองที่ค่า OLR เท่ากับ 1.0 1.5 และ 2.0 kg COD/m^3-day ซึ่งมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 52.0, 58.7 และ 59.9% ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าองค์ประกอบก๊าซมีเทนสำหรับค่า OLR เท่ากับ 1.5 และ 2.0 kg COD/m^3-day มีค่าใกล้เคียงกัน โดยการย่อยสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ อย่างไขมัน โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต ให้มีขนาดโครงสร้างโมเลกุลเล็กลงสามารถละลายน้ำได้ เช่น กรดไขมัน กรดอะมิโน กลูโคส เป็นต้น ส่งผลให้จุลินทรีย์นำไปใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนได้มีประสิทธิภาพได้ดียิ่งขึ้น [26] และเศษอาหารที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เป็นสารอินทรีย์ที่มีสารประกอบคาร์โบไฮเดรตสูง มีผลโดยตรงต่อปริมาณการเกิดก๊าซ เนื่องจากแบคทีเรียทำการย่อยสลาย และใช้ประโยชน์ได้มากที่สุด [5] ทั้งนี้ยังพบว่า การปรับสภาพวัตถุดิบด้วยกระบวนการเชิงกลที่ได้ขนาดวัตถุดิบที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากจะช่วยเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของจุลินทรีย์แล้ว ยังมีส่วนช่วยเพิ่มอัตราการเกิดก๊าซมีเทนและช่วยให้ก๊าซชีวภาพมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเพิ่มสูงขึ้นอีกด้วย [8]

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยการปรับสภาพเชิงกล โดยใช้ถังปฏิกิริยาปริมาตรรวมทั้งหมด 1,000 L ทดลองภายใต้สภาวะไร้อากาศ ณ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม รูปแบบของการป้อนสารอินทรีย์เป็นประเภทกึ่งต่อเนื่อง วัตถุดิบตั้งต้นที่ใช้ คือ ขยะอินทรีย์จากครัวเรือนและหัวเชื้อจุลินทรีย์มูลโค ผลการศึกษาสรุปได้ว่า ระบบปรับสภาพเชิงกลสามารถลดขนาดของวัตถุดิบให้มีขนาดอยู่ในช่วง 0.1–1.0 cm มีประสิทธิภาพการลดขนาดวัตถุดิบเท่ากับ 86.49% ด้วยอัตราการทำงาน 160 kg/h หรือ 4.0 L/min และจากการทดลองเปรียบเทียบปริมาณการเติมวัตถุดิบที่เหมาะสม พบว่าเงื่อนไขที่มีค่า OLR เท่ากับ 2.0 kg COD/m^3-day มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด เนื่องจากมีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 0.79 m^3 และมีประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุดเท่ากับ 88.64% และสามารถกำจัดปริมาณ TS และ VS ได้สูงสุดถึง 89.05% และ 88.36% ของปริมาณของแข็งและของแข็งระเหยที่กำจัดได้ทั้งหมด ทั้งนี้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเชิงกลสามารถรองรับค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูง เนื่องมาจากเป็นระบบการป้อนสารอินทรีย์เป็นแบบต่อเนื่อง มีการกวนผสมร่วมด้วยในระบบ และปรับสภาพวัตถุดิบด้วยเชิงกลก่อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งการปรับสภาพเชิงกลเป็นวิธีการปรับสภาพเบื้องต้นที่สามารถดำเนินการได้อย่างรวดเร็วและมีขั้นตอนการทำงานที่ไม่ซับซ้อน สามารถใช้ได้ทั้งในระดับครัวเรือนและยังประยุกต์ใช้ได้ไปจนถึงระดับอุตสาหกรรม ทั้งนี้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพเชิงกล นอกจากจะช่วยกำจัดปริมาณขยะสะสมที่อาจเกิดขึ้นได้ค่อนข้างมากในชุมชนแล้ว ยังช่วยให้เกิดการนำขยะอินทรีย์มาใช้ประโยชน์ด้านพลังงานทดแทนในครัวเรือนในรูปแบบของก๊าซหุงต้มได้อย่างยั่งยืนอีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ ที่ให้ทุนสนับสนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจาก “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2561” และขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา “ทุนพัฒนาเส้นทางอาชีพนักวิจัยและนวัตกรรม ประเภททุนพัฒนาบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2563” จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ทุนสนับสนุนสำหรับการดำเนินงานวิจัย ซึ่งช่วยให้งานวิจัยดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] IRENA. (2017). **“Biogas for domestic cooking: Technology brief”**. International Renewable Energy Agency: Abu Dhabi.

[2] Pollution Control Department. (2021). **“In 2021, Solid Waste will Decrease, While Infectious Waste and Hazardous Waste will Increase”**. Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment.

[3] TDRI. (2019). **“Research on Food Waste Management Methods Suitable for Thailand”**. Thailand Development Research Institute.

[4] Srisuwannaket, T., and Liumpetch, C. (2019). **“Tackling Thailand's food-waste crisis”**. Thailand Development Research Institute (TDRI).

[5] 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 (3), 116-122.

[6] Montgomery, F.R.L., and Bochmann, G. (2014). **“Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production”**. British: IEA Bioenergy Publishers.

[7] Sebola, M., Tesfagiorgis, H., and Muzenda, E. (2015). “Effect of particle size on anaerobic digestion of different feedstocks”. **South African Journal of Chemical Engineering**. 20 (3), 11-26.

[8] Józef S., et al. (2018). “Effect of Mechanical Pre-Treatment of the Agricultural Substrates on Yield of Biogas and Kinetics of Anaerobic Digestion”. **Sustainability**. 10 (10), 3669.

[9] Pongsak, S., Piasai, C., Porndon, T., Boontian, N., and Padri, M. (2020). “Organic Loading Rate for Maximum Biogas Production from Dairy Cattle Manure Wastewater at Suranaree University of Technology”. **KKU Research Journal (Graduate Studies)**. 20 (3), 74-85.

[10] Chaiprapat, S., and Boonsawang, P. (2017). **“Biogas Production from Banana Waste using High Solid Digestion System for Banana Drying Process”**. Prince of Songkla University, Hat Yai Campus

[11] Panyadee, S. (2013). “Biogas production from anaerobic co-digestion of food waste and Phyllanthus emblica residues”. **Thai Environmental Engineering Journal**. 27 (1-2), 33-42.

[12] Kittipongpattana, K., Kanchanasuta, S., and Polprasert, S. (2018). “Enhancement of Utilization of Decanter Cake and Crude Glycerol in Biogas Co-fermentation”. **Phranakhon Rajabhat Research Journal (Science and Technology)**. 13 (2), 16-33.

[13] Intanoo, P., and Tankam, J. (2017). “Anaerobic Digestion of Concentrated Food Waste in Biogas Production System”. **RMUTP Research Journal**, 11 (1), 92-101.

[14] Aditi, D., et al. (2018). “Thermophilic anaerobic digestion: enhanced and sustainable methane production from co-digestion of food and lignocellulosic wastes”. **Energy**. 11, 2058, 1-13.

[15] Laikaew, N., Kuster, A. T., Junggoth, R., Pitaksanurat, S., and Claus, R. (2017). “The Effectiveness of Pancreatin Enzyme in Biogas Fermentation from Household Waste”. **The National and International Graduate Research Conference**. 1094-1103.

[16] Sucipto, A., et al. (2020). “Design and fabrication of multipurpose organic chopper machine”. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**. 725, 012021.

[17] FNA, Saragih, et al, (2019). “The effectiveness of anaerobic digestion process by thermal pre-treatment on food waste as a substrate”. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. 251, 012014.

[18] Khandke G. (2015). **“Design and Development of Kitchen Waste Shredder for Compost Production”**. Master of Technology University of Agricultural Sciences, Bengaluru.

[19] Piasai, C., Boontian, N., Yingchon, U., Phorndon, T., and Padr, M. (2018). “Optimum Conditions to Produce Acetic Acid from Various Excess Sludge for Using in Biological Phosphorus Removal Processes”. **Thai Science and Technology Journal (TSTJ)**. 28 (2), 274-293.

[20] Akunna C. Joseph. (2019). **“Anaerobic Waste–Wastewater Treatment and Biogas Plants”**. A Practical Handbook. Taylor and Francis Group, LLC Publishers

[21] Sutarut, P., Chobbun, S., Witthajitsomboon, N., Deachana, A. (2017). **“The Development of Biogas Generating Tank from Organic Waste”**. Faculty of Science and Technology, Songkhla Rajabhat University.

[22] Sungkasudi, P., Rachdawong, P., and Nuengjamnong, C. (2016). "Physical Pretreatment of Water Hyacinth for Biogas Production". **Thai Environmental Engineering Journal**. 30 (2), 9-18.

[23] Kessara S., Twarath S., and Sumaeth C., (2018). "The Effect of Temperature on the Methanogenic Activity in Relation to Micronutrient Availability". **Energies**. 11, 1057.

[24] Mitraka, G.-C., Kontogiannopoulos, K.N., Batsioula, M., Banias, G.F., Zouboulis, A.I., Kougias, P.G. (2022). "A Comprehensive Review on Pretreatment Methods for Enhanced Biogas Production from Sewage Sludge". **Energies**. 15, 6536.

[25] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2017). **"Thailand Alternative Energy Situation 2017"**. Alternative Energy and Efficiency Information Center: Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy.

[26] Bumrerpong, P., Penchai, P., and Ongwandee, M. (2013). "Effect of Organic Loading Rate on Methane Production and Methane Production Inhibitors in Food Waste using a Two-stage Digester". **Journal of Science and Technology Mahasarakham University**. 33 (1), 8-12.