

ระบบถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนโดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์

ไทยทัศน์ สุดสวนสี^{1,*}, ศุภกิจ เคิกศิริ¹ และ วรรณรพ ชันธิรัตน์¹

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: thaithat.su@ksu.ac.th โทรศัพท์: 091-5166444

(รับบทความ 20 มกราคม 2566; แก้ไขบทความ: 12 กุมภาพันธ์ 2566; ตอรับบทความ: 16 กุมภาพันธ์ 2566)

บทคัดย่อ

ปัญหาขยะเป็นปัญหาที่สำคัญในประเทศไทยเนื่องจากมีปริมาณที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี การแก้ปัญหาหนึ่งที่จะช่วยลดปริมาณขยะลงได้คือการนำมาใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานทางเลือกได้แก่ก๊าซชีวภาพ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะชุมชนด้วยระบบถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนให้ความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ โดยได้ทำการทดลอง 2 การทดลองคือการทดลองหาความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซชีวภาพกับปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบในแต่ละวัน และการทดลองศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดมกับหมักในโรงเรือน ผลของการทดลอง หมักก๊าซชีวภาพตามปริมาณการป้อนขยะเศษอาหารที่แตกต่างกันปรากฏว่าเมื่อดำเนินระบบโดยใช้ปริมาณขยะเศษอาหาร 0.5, 1, 1.5 และ 2 kg/d มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเฉลี่ย 1.340, 1.592, 1.801 และ 1.927 L/d ตามลำดับ และเมื่อดำเนินระบบไปจนครบระยะเวลา 30 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดได้ 20.41, 23.57, 26.34 และ 28.33 L ตามลำดับ อีกส่วนเป็นการทดลองศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดมกับหมักในโรงเรือน ผลของการทดลองปรากฏว่าค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันของการหมักในโรงเรือนและพาราโบลาโดมอยู่ที่ 1.59 และ 1.72 L ตามลำดับ และมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในโรงเรือนและในพาราโบลาโดมอยู่ที่ 23.57 และ 25.58 L ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทดลองในพาราโบลาโดมให้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่สูงกว่าในโรงเรือน โดยที่การทดลองในพาราโบลาโดมสามารถทำให้เกิดปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันเพิ่มขึ้นมากกว่าทดลองในโรงเรือน คิดเป็น 8.17% และ ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยสะสมตลอดการทดลองเพิ่มขึ้น คิดเป็น 8.52%

คำสำคัญ: ก๊าซชีวภาพ ขยะเศษอาหาร พาราโบลาโดม พลังงานแสงอาทิตย์

การอ้างอิงบทความ: ไทยทัศน์ สุดสวนสี, ศุภกิจ เคิกศิริ และ วรรณรพ ชันธิรัตน์, "ระบบถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนโดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 1, ฉบับที่ 1, หน้า 10-22, 2566.

The Two-Stage Anaerobic Digestion System Using Solar Heat Energy

Thaithat Sudsuansee^{1,*}, Supakit Sergsiri² and Wanrop Khanthirat³

^{1,2,3} Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

* Corresponding Author: thaithat.su@ksu.ac.th, Tel: 091-5166444

(Received: January 20, 2023; Revised: February 12, 2023; Accepted: February 16, 2023)

Abstract

Garbage is a major problem in Thailand and the quantity is increasing every year. The way to help reduce waste is to convert it into alternative energy such as biogas. This research aims to study biogas production from municipal waste using a two-stage anaerobic digester system heated by solar energy. Two experiments were performed, the first to find the relationship between the amount of biogas and the amount of food waste fed into the system with volume of 0.5 kg, 1 kg, 1.5 kg and 2 kg per day. And a second experiment to compare the results of fermentation in parabolic dome and in greenhouses. The results of the experiment showed that, when the system was fed 0.5, 1, 1.5 and 2 kg of food waste per day, the average total biogas content were 1.340, 1.592, 1.801 and 1.927 liters per day, respectively. And when the system has been implemented until the 30-day period, the results show that the feeding amount of food waste 0.5, 1, 1.5 and 2 kg per day. It can produce the highest accumulated biogas at 20.41, 23.57, 26.34 and 28.33 liters respectively. Another study was conducted to compare the effect of fermentation in parabolic domes and in greenhouses. The results of the experiment showed that the average daily biogas content of fermentation in the greenhouse and parabolic domes was 1.59 and 1.72 liters, respectively, and the accumulated biogas content in the houses and in the parabolic domes was 23.57 and 25.58 liters, respectively. It can be seen that the experiments in the parabolic dome yielded higher biogas content than in greenhouses. In the parabolic dome, average daily biogas content was 8.17% higher than in the greenhouse experiment, and the average accumulated biogas content throughout the experiment was 8.52% higher than in the greenhouse experiment.

Keywords: Biogas Food waste Parabolic dome Solar energy

Please cite this article as: T. Sudsuansee, S. Sergsiri, and W. Khanthirat, "The Two-Stage Anaerobic Digestion System Using Solar Heat Energy," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, KSU*, vol. 1, no. 1, pp. 10-22, 2023.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธี anaerobic digestion เป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมที่สุดในการลดปริมาณขยะอินทรีย์ [1] ข้อดีของมันเป็นคือการหมักก๊าซที่มีประสิทธิภาพ ต้นทุนต่ำ และก่อให้เกิดมลภาวะน้อย การหมักก๊าซแบบ 2-stage anaerobic digestion เป็นการหมักที่มีความเสถียรของระบบ และได้ปริมาณก๊าซมีเทนในปริมาณสูง [2] เนื่องจากเป็นระบบที่สร้างสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมให้กับแบคทีเรียแต่ละประเภท ได้แก่ แบคทีเรียพวกสร้างกรด acidogenic bacteria กับแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทน methane forming bacteria จึงทำให้กระบวนการหมักสามารถควบคุมระบบได้ง่าย มีความเสถียร และมีต้นทุนต่ำ และได้ปริมาณก๊าซมีเทนสูง อย่างไรก็ตามอุณหภูมิเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการหมักก๊าซชีวภาพ จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่าหากมีการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมคือในช่วง thermophilic ($50 - 60^{\circ}\text{C}$) [3] จะทำให้เกิดประสิทธิภาพโดยรวมของระบบสูงกว่าการหมักในช่วง Mesophilic ($30-40^{\circ}\text{C}$) [4] อย่างไรก็ตามหากกำหนดอุณหภูมิที่สูงเกินความจำเป็นจะเกิดการสิ้นเปลืองพลังงาน การควบคุมที่ยาก และมีความเสี่ยงสูงที่ระบบอาจจะล้มเหลว [2] ประกอบกับสภาพอากาศโดยรวมของประเทศไทยแล้ว การหมักในช่วง mesophilic จะมีความเหมาะสมมากกว่าในช่วง thermophilic โดยจากงานวิจัยของ Schober et al. [5] พบว่าที่อุณหภูมิ 37°C จะให้ปริมาณก๊าซสูงกว่าอุณหภูมิต่างๆในช่วง mesophilic เดียวกัน โดยมีปริมาณก๊าซที่ได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิ 50°C ในช่วง thermophilic โดยสภาพอากาศของประเทศไทยเป็นประเทศที่มีแสงแดดตลอดทั้งปี ซึ่งเหมาะแก่การนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ดังนั้นการนำเอาพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ จึงเป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจ

เพราะการใช้ประโยชน์จากพลังงานจากแสงอาทิตย์ซึ่งเป็นพลังงานที่สะอาดและสามารถนำมาใช้ได้อย่างไม่มีหมด

โรงเรือนทรงพาราโบลาโดมเป็นเทคโนโลยีที่ถูกนำมาใช้ในการอบแห้งโดยใช้ความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ถูกพัฒนาขึ้นโดย Janjai et al. [6,7] และได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศไทย โดยส่วนใหญ่นำไปใช้ในกระบวนการอบแห้งอาหาร โครงสร้างมีลักษณะเป็นทรงพาราโบลา หลังคาถูกคลุมด้วยแผ่นโพลีคาร์บอเนต แสงอาทิตย์สามารถส่องผ่านเข้ามาภายในโดมได้ แต่รังสีความร้อนผ่านออกไปได้น้อย จึงทำให้เกิดผลเรือนกระจก (greenhouse effect) ภายในโดม และทำให้อุณหภูมิภายในสูงขึ้น และมีระบบควบคุมอุณหภูมิติดตั้งสำหรับกรณีความร้อนภายในโดมสูงเกินไป พัฒนาระบายความร้อนจะทำงานเพื่อรักษาระดับของอุณหภูมิ มีการทดลองอบแห้งกล้วยตากด้วยพาราโบลาโดม โดยสามารถอบแห้งกล้วยน้ำว่าสุกได้ครั้งละ $1,000\text{ kg}$ ด้วยขนาดของโดม เท่ากับ 7.5×20 ตารางเมตร และพาราโบลาโดมยังสามารถนำไปอบแห้งในผลิตภัณฑ์ต่างๆได้อีกหลายชนิด เช่น ผักและผลไม้อบแห้ง สมุนไพรและเครื่องเทศ ผลิตภัณฑ์จากข้าวและธัญพืช เมล็ดกาแฟ ใบชา [8] ดังผลการวิจัยเกี่ยวกับประสิทธิภาพของโรงเรือนทรงพาราโบลาโดมในงานวิจัยดังกล่าว การประยุกต์ใช้โรงเรือนทรงพาราโบลาโดมสำหรับใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมอุณหภูมิในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ ซึ่งข้อดีของการใช้โรงเรือนทรงพาราโบลาโดมมาช่วยในการหมักก๊าซชีวภาพคือ สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงของอุณหภูมิ Mesophilic เพราะโรงเรือนทรงพาราโบลาโดมมีคุณสมบัติช่วยเพิ่มอุณหภูมิภายในของระบบให้สูงขึ้นจากพลังงานแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านเข้ามาในโดม จึงทำให้ภายในโดมอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในตอนเช้าที่พระอาทิตย์ขึ้น ในกรณีที่อุณหภูมิเกิน 50°C พัฒนจะทำงานเพื่อระบายความร้อนออกจากโดม ทำ

บทความวิจัย (Research Article)

ให้สามารถรักษาระดับของอุณหภูมิไม่ให้สูงเกินค่าที่กำหนด อีกทั้งในตอนเย็นและตอนกลางคืน ความร้อนภายในโดมจะถูกชะลอไม่ให้สูญเสียออกไปจากระบบเร็ว จากผลของเรือนกระจก ส่งผลทำให้อุณหภูมิภายในระบบไม่ต่ำเกินไป และมีอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดทั้งวันอยู่ในเกณฑ์ที่สูงกว่าระบบที่ไม่ได้ใช้พาราโบลาโดมหรือระบบที่ติดตั้งอยู่ในอาคาร ซึ่งวิธีนี้เป็นการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการหมักโดยรวมของระบบ และสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนจากกระบวนการหมักได้ ดังนั้นการนำเอาเทคโนโลยีโรงเรือนแบบพาราโบลาโดมช่วยในกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ เนื่องจากวิธีการที่เสนอสามารถเป็นแนวทางหนึ่งในการจัดการทรัพยากรที่มีอยู่ให้เกิดประสิทธิภาพ เกิดประโยชน์ต่อชุมชน และสิ่งแวดล้อม

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณการป้อนขยะเศษอาหารเข้าระบบที่แตกต่างกันและศึกษาผลของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในระบบหมักก๊าซชีวภาพแบบสองขั้นตอนให้สูงขึ้นจากการประยุกต์ใช้ร่วมกับโรงเรือนทรงพาราโบลาโดม โดยการดำเนินงานวิจัยเป็นการทดสอบการหมักก๊าซชีวภาพโดยเปรียบเทียบผลระหว่างการผลิตในโรงเรือนทรงพาราโบลาโดมกับการหมักในโรงเรือนในอาคาร ทั้งนี้ผู้วิจัยคาดหวังว่างานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับชุมชนหรือในระดับครัวเรือนได้ในระยะต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการย่อยก๊าซชีวภาพ

การเกิดของก๊าซชีวภาพนี้เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือของเสียต่าง ๆ โดยอาศัยการทำงานของกลุ่มแบคทีเรียหลายชนิดต่อเนื่องกันในสภาพที่ไร้อากาศ ภายใต้อุณหภูมิที่เหมาะสม โดยที่สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียหลายชนิด เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือ ก๊าซมีเทนและก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซทั้งสองชนิดเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ

2.1.1 ปฏิกริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียสามารถแบ่งได้ 4 ขั้นตอน คือ

2.1.1.1 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์เกิดจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายชนิดสามารถสรุปได้ 4 ขั้นตอน ดังนี้

1) ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

การย่อยสลายสารอินทรีย์มีโครงสร้างซับซ้อนให้กลายเป็นสารอินทรีย์เชิงเดี่ยว เช่น การย่อยสลายแป้งให้อยู่ในรูปของน้ำตาล การย่อยสลายไขมันให้อยู่ในรูปของกรดไขมัน และการย่อยสลายโปรตีนให้อยู่ในรูปของกรดอะมิโน เป็นต้น ขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ภายนอกเซลล์แบคทีเรียโดยอาศัยเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาใช้ในการย่อยสลายดังกล่าว

2) การสร้างกรดไขมัน (Acidogenesis)

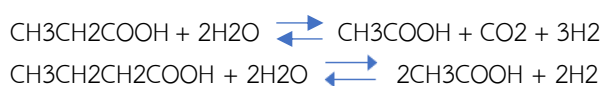
การย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงเดี่ยวให้กลายเป็นกรดระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) ผลผลิตของขั้นที่ 1 จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์ เพื่อไปใช้เป็นอาหารและถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย เช่นกรดอะซิติก กรดบิวไทริก กรดโพรไพโอนิก เป็นต้น และผลิตไฮโดรเจนกับคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วยกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็กและชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของซับสเตรต และความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น เช่น กรดไขมันชนิดยาวถูกย่อยสลายกลายเป็นอะซิติกและไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะที่ความดันของไฮโดรเจนมีค่าต่ำ แต่จะย่อยสลายกลายเป็นกรดบิวไทริกและกรดโพรไพโอนิกเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง น้ำตาลถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจนและ

บทความวิจัย (Research Article)

คาร์บอนไดออกไซด์โดยผ่านวิธี Embden-Meyerhof ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลต่ำ หากไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลสูง ผลผลิตที่ได้ คือ กรดอะซิติก กรดไพรูโวนิก กรดบิวไทริก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียที่มีบทบาทในการสร้างกรดไขมันระเหยคือกลุ่ม Clostridium ซึ่งมีเมตาบอลิซึมหลายแบบ จึงสามารถใช้สารอาหารทั้งที่เป็นพวกแป้งหรือโปรตีนได้ ผลปฏิกิริยาที่ได้มีหลายชนิด เช่น กรดบิวไทริก กรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไฮโดรเจน เอทานอล บิวทานอล อะซีโตน เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียในกลุ่ม Propionic bacterium ที่ผลิตกรดไพรูโวนิก และกรดอะซิติกจากกรดแลกติก

3) การสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (Acetogenesis)

การเปลี่ยนกรดระเหยง่ายให้กลายเป็นกรดอะซิติกหรือกลีโอะซิเตตซึ่งเป็นสารตั้งต้นหลักในการผลิตมีเทน แบคทีเรียอะซิโตจีนิค (แบคทีเรียสร้างอะซิเตต) มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนในการสร้างมีเทน แบคทีเรียสร้างมีเทนนั้นต้องการสารตั้งต้นเฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมทิลามีน (Methylamine) กรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมไม่อาจใช้เป็นข้อเสตรทในการผลิตมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียอะซิโตจีนิค (ที่ผลิตไฮโดรเจนได้ด้วย) มีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก และไฮโดรเจนภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศสำหรับการย่อยสลายกรดบิวไทริก และกรดไพรูโวนิก ตามลำดับ



ขั้นตอนที่ 3 นี้จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซิลสูง

4) การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

กรดอะซิติกและไฮโดรเจนจะถูกแบคทีเรียใช้สร้างก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน



2.1.2 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (two-stage anaerobic digestion)

ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน [2]

สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม (optimum condition) กับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกสร้างกรด และแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนมีความแตกต่างกัน เช่น แบคทีเรียพวกสร้างกรดเจริญได้ดีที่ pH ต่ำ และระยะเวลาเก็บกักน้อยซึ่งจะไปยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทน ทำให้จุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่มทำงานได้ไม่เต็มที่ ประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียวต่ำจึงได้มีการพัฒนาระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนขึ้น โดยวิธีการแยกกลุ่มจุลินทรีย์ทั้งสองออกจากกัน และจัดให้มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่มเพื่อให้จุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่มนั้นสามารถที่จะทำงานได้อย่างเต็มที่ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบ ทำให้ระบบสามารถทำงานได้ดียิ่งขึ้น [9] วิธีการที่ใช้ในการแยกกลุ่มจุลินทรีย์มีหลายวิธี เช่น การแยกด้วยเมมเบรน (membrane separation) การควบคุมจลศาสตร์ (kinetic control) และการควบคุม pH (pH control) แต่วิธีที่นิยมใช้คือการควบคุมจลศาสตร์รวมกับการควบคุม pH

บทความวิจัย (Research Article)

ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนประกอบด้วยถึงปฏิกิริยาสองถึงแยกจากกันโดยเรียงต่อกันแบบอนุกรม ถึงหนึ่งสำหรับการสร้างกรด ขณะที่อีกถึงหนึ่งสำหรับการสร้างก๊าซมีเทน โดยที่สภาพแวดล้อมในถังใบแรกจะมีสภาพที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกสร้างกรด ขณะที่ถังใบที่สองซึ่งรับผลผลิตมาจากถังใบแรก ออกแบบให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทน

กรดอินทรีย์ระเหยเป็นผลผลิตหลักของขั้นตอนแรก ดังนั้นการควบคุม pH ในขั้นตอนที่สองเป็นสิ่งจำเป็น เมื่อความสามารถของบัฟเฟอร์เกินขีดจำกัด การควบคุมในถังหมักก๊าซมีเทนอาจทำได้โดยการทำให้สารอินทรีย์ที่จะเข้าถังหมักเป็นกลางโดยการปรับ pH หรือให้มีการเวียนกลับของส่วนเกินที่ออกจากขั้นตอนที่สอง

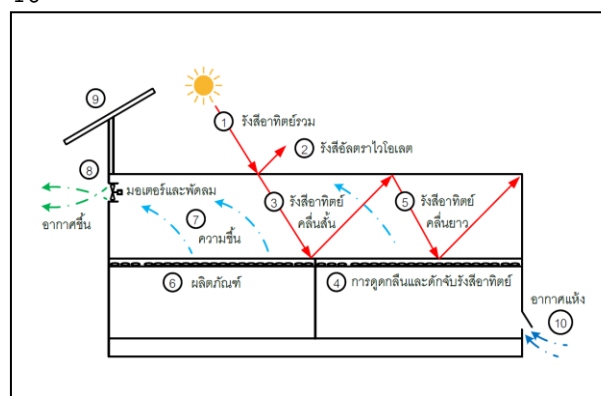
2.2 ระบบการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์เป็นวิธีอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจก (Solar greenhouse) ที่กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) [7,8] กระทรวงพลังงาน ให้การสนับสนุนการลงทุนติดตั้งใช้งานเป็นโรงอบแห้งที่ออกแบบรูปพาราโบลา สามารถใช้อบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานหลัก

2.2.1 หลักการทำงานของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์

โรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกอาศัยหลักการของปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ดังแสดงในรูปที่ 1 กล่าวคือรังสีอาทิตย์ที่ทะลุผ่านชั้นโอโซนเข้ามายังชั้นบรรยากาศโลก ในจุดที่ 1 ประกอบด้วยรังสีอาทิตย์หลากหลายความยาวคลื่น เมื่อเคลื่อนผ่านมายังบริเวณแผ่นกระจกหรือพลาสติกใส ที่ใช้สร้างหลังคาครอบโรงอบแห้ง จะเกิดการสะท้อนรังสี

อัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet, UV) ในจุดที่ 2 ออกไปแต่รังสีอาทิตย์คลื่นสั้น (Short wavelength) จะสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในโรงเรือนได้ในจุดที่ 3 เกิดการกระทบและดูดกลืน (Absorption and trapped) กับวัสดุต่าง ๆ ที่อยู่ภายในโรงอบแห้งในจุดที่ 4 ทำให้รังสีอาทิตย์คลื่นสั้นมีพลังงานลดลง กลายเป็นรังสีอาทิตย์คลื่นยาว (Long wavelength) และกลายเป็นรังสีความร้อนหรือรังสีอินฟราเรด (Infrared) นั้นเองซึ่งรังสีความร้อนดังกล่าวไม่สามารถเดินทางผ่านแผ่นกระจกหรือพลาสติกใส ออกมาสู่ภายนอกได้ในจุดที่ 5 ทำให้อากาศภายในเรือนกระจกร้อนขึ้น และถ่ายเทความร้อนไปยังผลิตภัณฑ์ในจุดที่ 6 ทำให้เกิดการระเหยของน้ำในตัวผลิตภัณฑ์ออกสู่อากาศในจุดที่ 7 อากาศขึ้นดังกล่าวจะไหลออกจากโรงอบแห้ง โดยมีพัดลมดูดอากาศช่วยในการระบายอากาศขึ้นในจุดที่ 8 ซึ่งโดยส่วนมากจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากระบบผลิตไฟฟ้าพลังงานแสงอาทิตย์หรือโซลาร์เซลล์ในจุดที่ 9 และอากาศที่มีอุณหภูมิและความชื้นต่ำจากภายนอกจะถูกดูดเข้าไปยังโรงอบแห้งแทนที่อากาศขึ้นในจุดที่ 10



รูปที่ 1 แผนภาพการทำงานของโรงอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ [10]

3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 ขั้นตอนการทดสอบเพื่อหาประสิทธิภาพ

บทความวิจัย (Research Article)

1) ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวบรวมองค์ความรู้เพื่อนำมาพัฒนาเป็นองค์ความรู้ที่สามารถนำไปใช้กับงานวิจัยนี้

2) ทำการออกแบบเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการและทำการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเครื่อง ในการออกแบบเครื่องต้นแบบ ผู้วิจัยมีแนวคิดนำระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบเรือนกระจกมาประยุกต์ใช้กับระบบถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอน ดังรูปที่ 2 หลักการทำงานของระบบเมื่อแสงจากดวงอาทิตย์แผ่รังสีเข้ามาที่ระบบให้ความร้อนพลังงานแสงอาทิตย์(พาราโบลาโดม)จะเกิดความร้อนสะสมอยู่ภายในระบบ ในขณะที่ระบบถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนที่อยู่ภายในโดม จะนำความร้อนผ่านถังหมักที่ทำจากโลหะนำความร้อนและทนกรดทนสารเคมี ทำให้ขยะที่อยู่ภายในถังได้รับความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งเป็นการช่วยในการเร่งปฏิกิริยาให้เกิดก๊าซมีเทนได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพดีขึ้น ลดเวลาในการหมักลง ได้ปริมาณก๊าซนำไปใช้งานมากขึ้น



รูปที่ 2 ระบบการผลิตถังหมักก๊าซชีวภาพไร้อากาศแบบสองขั้นตอนให้ความร้อนด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

3) ทำการสร้างเครื่องต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ

4) ทำการทดสอบค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

5) ในการทดลองผู้วิจัยออกแบบตารางผลการทดลองโดยกำหนดตัวแปรที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซมีเทน ได้แก่ อุณหภูมิของระบบ (operating temperature), ปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ (Loading), ระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมัก (Retention time)

6) จากนั้นทำการแปรผันค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องเพื่อหาจุดที่เหมาะสมที่จะได้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด

7) สรุปผลการทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ

3.2 แผนการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้จะทำการทดลอง 2 ขั้นตอน โดยการทดลองในแต่ละขั้นตอนการทดลองจะแบ่งแยกออกจากกันอย่างชัดเจน สำหรับในขั้นตอนที่ 1 เป็นการศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซชีวภาพกับปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบ และในขั้นตอนที่ 2 จะเป็นการทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดมกับหมักในพื้นที่โล่งโดยมีระยะเวลาการหมักอยู่ที่ 30 วัน

การทดลองตอนที่ 1 การศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซชีวภาพกับปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบในแต่ละวัน โดยมีปริมาณ 0.5, 1, 1.5 และ 2 kg/d

การทดลองตอนที่ 2 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดมกับหมักในพื้นที่โล่งโดยมีระยะเวลาการหมักอยู่ที่ 30 วัน

3.3 วิธีการทดลอง

การทดลองตอนที่ 1 การศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซชีวภาพกับปริมาณขยะ

บทความวิจัย (Research Article)

เศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบในแต่ละวัน โดยมีปริมาณ 0.5, 1, 1.5 และ 2 kg/d

ช่วงที่ 1 การเริ่มเดินระบบ

1) การเริ่มต้นดำเนินระบบในการทดลองขั้นตอนนี้ ใช้การเริ่มต้นเติมมูลหมูลงในถังผลิตก๊าซ 20 kg ผสมกับน้ำ 40 L แล้วปิดฝาถังทิ้งไว้ให้เกิดการหมักเป็นเวลาประมาณ 3 วัน

2) หลังจากดำเนินการครบ 3 วัน แล้วจึงเริ่มเติมมูลหมู 20 kg ลงในถังผลิตกรด และขยะอินทรีย์ 15 kg จากนั้นเติมน้ำจนได้ปริมาตร 100 L ปิดฝาถังแล้วทิ้งไว้จนเกิดการผลิตกรด ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1 วัน จากนั้นจะเริ่มเดินระบบในช่วงที่ 2 คือการเติมขยะอินทรีย์ในแต่ละวัน

ช่วงที่ 2 การเติมเศษอาหารในแต่ละวัน

1) การจัดเตรียมขยะอินทรีย์โดยการคัดแยกสิ่งแปลกปลอมที่ไม่สามารถย่อยสลายได้หรือย่อยสลายได้ยาก ส่วนเศษอาหารเมื่อแยกสิ่งปลอมปนออกไปแล้วจะทำการสับให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้่ายต่อการย่อยสลายก่อนนำไปเติมลงในถังผลิตกรด จากนั้นทำการชั่งขยะที่เตรียมแล้วมา 0.5, 1, 1.5 และ 2 kg ผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1:1 เพื่อปรับอัตราส่วนปริมาณของแข็งให้ได้ประมาณ 10 % หรือให้เนื้อขยะกับน้ำมีสัดส่วนเท่า ๆ กัน

2) เติมขยะอินทรีย์ในถังผลิตกรด หลังจากระบบมีการหมักเพื่อผลิตกรดในถังผลิตกรดแล้วเริ่มเติมขยะอินทรีย์ที่ผ่านการคัดแยกและเตรียมแล้วเข้าไปในถังผลิตกรด จากนั้นทำการกวนผสมเศษอาหารภายในถังผลิตกรดเพื่อให้เศษอาหารที่เติมลงไปใหม่ผสมกันกับเศษอาหารเดิม โดยใช้การกวน

3) ปล่อยน้ำหมักขยะอินทรีย์จากถังผลิตกรดไปยังถังผลิตก๊าซ หลังจากกวนผสมเศษอาหารในถังผลิตกรดให้เข้ากันแล้ว ก็ระบายน้ำหมักจากถังผลิตกรดไปยังถังผลิตก๊าซ โดยการเปิดวาล์วซึ่งน้ำหมักจะไหลไปยังถังผลิตก๊าซ

4) การหมุนเวียนคลุกเคล้าตะกอนในถังผลิตก๊าซ (โดยใช้อุปกรณ์การกวน) ปล่อยให้เครื่องกวนทำงานประมาณ 10 นาทีเพื่อให้ขยะอินทรีย์มีโอกาสสัมผัสกับจุลินทรีย์มากขึ้น

5) การระบายน้ำหมักออกจากถังผลิตก๊าซ เมื่อระบายน้ำหมักจากถังผลิตกรดเข้าสู่ถังผลิตก๊าซแล้วก็ทำการปล่อยน้ำหมักออกจากถังผลิตก๊าซเพื่อรักษาระดับน้ำภายในถังผลิตก๊าซให้เท่าเดิม

การทดลองตอนที่ 2 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดมกับหมักในพื้นที่โล่งโดยมีระยะเวลาการหมักอยู่ที่ 30 วัน

ดำเนินการคัดเลือกปริมาณขยะเศษอาหารที่ได้จากการทดลองที่ 1 มาทำการทดลองหมักก๊าซชีวภาพในสถานะที่แตกต่างกัน

สถานะที่ 1 เป็นการหมักในโรงเรือน อุณหภูมิเฉลี่ยในการหมักในแต่ละวันจะอยู่ประมาณ 26 – 32 °C

สถานะที่ 2 เป็นการหมักในพาราโบลาโดม ซึ่งอุณหภูมิเฉลี่ยในการหมักในแต่ละวันจะอยู่ประมาณ 37 – 42 °C

โดยขั้นตอนของการหมักของทั้งสองสถานะจะเหมือนกัน และมีปริมาณของขยะเศษอาหารที่ป้อนในแต่ละวันเท่ากัน หลังจากทำการหมักตามระยะเวลาแล้ว จึงนำผลมาเปรียบเทียบปริมาณของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้เพื่อนำมาวิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

4. ผลการดำเนินงาน

4.1 การศึกษาเพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่เกิดขึ้น (total gas production)

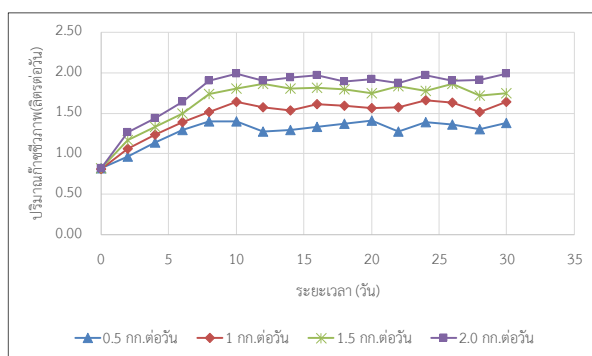
ในรูปที่ 3 แสดงถึงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยมีปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบในแต่ละวัน 0.5, 1, 1.5 และ 2 กก.ต่อวัน (kg/d) ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดได้จากการแทนที่น้ำ โดยวัดปริมาตรน้ำที่ถูกแทนที่ในแต่ละวัน คิดเป็นค่าเฉลี่ยของก๊าซ

บทความวิจัย (Research Article)

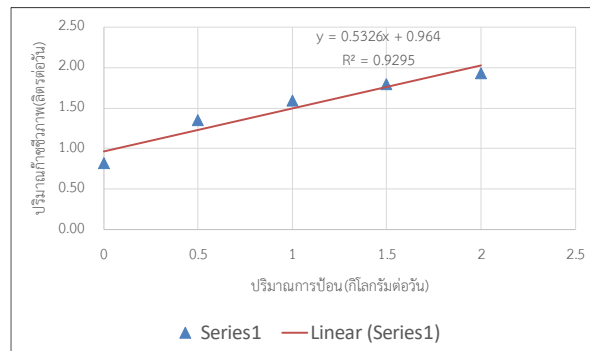
ชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันภายใต้สภาวะการทดลอง (room condition) พบว่า เมื่อดำเนินระบบโดยใช้ปริมาณขยะเศษอาหาร 0.5 kg/d มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเฉลี่ย 1.340 L/d เมื่อดำเนินระบบโดยใช้ปริมาณขยะเศษอาหาร 1 kg/d มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเฉลี่ย 1.592 L/d เมื่อดำเนินระบบโดยใช้ปริมาณขยะเศษอาหาร 1.5 kg/d มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเฉลี่ย 1.801 L/d เมื่อดำเนินระบบโดยใช้ปริมาณขยะเศษอาหาร 2 kg/d มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเฉลี่ย 1.927 L/d แสดงดังตารางที่ 1 และในรูปที่ 4 เมื่อนำปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตลอดการทดลองมาเขียนความสัมพันธ์กับปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบต่อวัน พบว่า ได้สมการความสัมพันธ์ คือ $y = 0.5326x + 0.964$

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยความสัมพันธ์ของปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบต่อวัน กับ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

ปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบต่อวัน	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (L/d)
0.5 kg/d	1.340
1 kg/d	1.592
1.5 kg/d	1.801
2 kg/d	1.927



รูปที่ 3 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นตลอดการทดลอง



รูปที่ 4 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันที่ปริมาณการป้อน 0.5, 1, 1.5, 2 kg/d

ผลการวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพสะสมในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่องแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมตลอดการทดลอง (ระยะเวลาทดลอง 30 วัน)

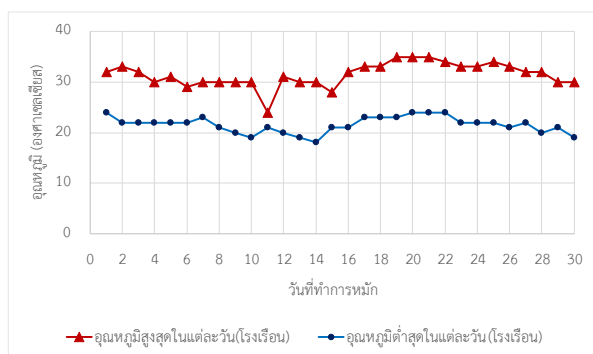
ปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนต่อวัน	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (l)
0.5 kg/d	20.41
1 kg/d	23.57
1.5 kg/d	26.34
2 kg/d	28.33

4.2 การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดม

4.2.1 การศึกษาอุณหภูมิในระบบ

สภาพอากาศทั่วไปในช่วงการทดลองในเดือนพฤศจิกายน เป็นช่วงฤดูหนาว ทำให้ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีอากาศเย็นทั่วไปเกือบตลอดเดือน ซึ่งผู้วิจัยทำการทดลองที่บริเวณพื้นที่บริหารจัดการขยะและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์ อำเภอมือง จังหวัดกาฬสินธุ์ โดยในรูปที่ 5 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของโรงเรือน โดยกราฟแสดงช่วงของอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละวัน

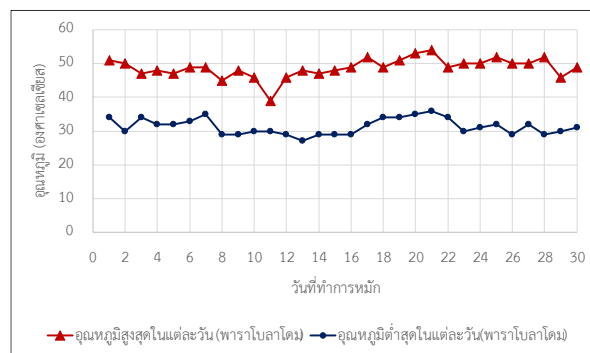
บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 5 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของโรงเรียน

ในกรณีทำการทดลองในพาราโบลาโดม ผู้วิจัยได้ทำการวัดอุณหภูมิในพาราโบลาโดมและบันทึกผล โดยผลที่ได้แสดงในรูปที่ 6 แสดงช่วงอุณหภูมิสูงสุด และต่ำสุดในแต่ละวัน และเมื่อนำมาเปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิระหว่างในโรงเรียนกับในพาราโบลาโดม ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยในโรงเรียนมีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 31.47°C และมีอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 21.57°C และในพาราโบลาโดมมีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 48.8°C และมีอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยอยู่ที่ 31.33°C ซึ่งผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 17.33°C และผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุดอยู่ที่ 9.76°C จะสังเกตเห็นว่าผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดมีค่ามากกว่าผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุด ทั้งนี้เนื่องจากในตอนกลางวันพาราโบลาโดมมีความสามารถสร้างความร้อนที่ได้จากพลังงานแสงอาทิตย์ได้มาก ส่งผลให้ในตอนกลางวันอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดของพาราโบลาโดมจึงขึ้นไปได้ถึง 48.8°C แต่ในทางตรงกันข้าม ในตอนกลางคืนไม่มีแสงอาทิตย์พาราโบลาโดมจึงไม่สามารถสร้างความร้อนจากแสงอาทิตย์ได้ จึงอาศัยการกักเก็บพลังงานความร้อนที่อยู่ในโดมไว้ได้ส่วนหนึ่ง ทำให้ในตอนกลางคืนผลต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยจึงแตกต่างกันน้อยกว่าในตอนกลางวัน จึงสรุปได้ว่าเมื่อระบบที่ใช้หมักด้วยพาราโบลาโดมจะทำให้อุณหภูมิภายในระบบ มีอุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นคิดเป็น

55.06% และมีอุณหภูมิต่ำสุดเฉลี่ยเพิ่มขึ้นคิดเป็น 45.25%



รูปที่ 6 อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของพาราโบลาโดม

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบอุณหภูมิระหว่างในโรงเรียนกับพาราโบลาโดม

การทดลองใน	อุณหภูมิ สูงสุด เฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	อุณหภูมิ ต่ำสุด เฉลี่ย ($^{\circ}\text{C}$)	ผลต่าง ของช่วง อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)
โรงเรียน	31.47	21.57	9.9
พาราโบลาโดม	48.80	31.33	17.47
ผลต่างอุณหภูมิ	17.33	9.76	

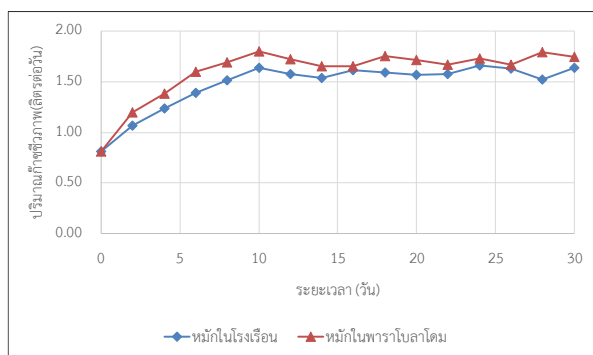
4.2.2 การศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยทำการทดลองหมักก๊าซชีวภาพในสถานที่แตกต่างกันระหว่างในโรงเรียนกับในพาราโบลาโดม โดยมีระยะเวลาในการหมัก 30 วัน และมีอัตราการป้อนขยะเศษอาหารเท่ากัน คือ วันละ 1 kg ผลการทดลองสามารถแสดงดังรูปที่ 7 โดยในช่วงเริ่มต้นจนถึงวันที่ 8 ระบบมีปริมาณก๊าซที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณจุลินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งที่เกิดการเสถียร คือหลังจากวันที่ 8 ไปแล้วระบบจะมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพค่อนข้างคงที่ โดยค่าปริมาณก๊าซชีวภาพ

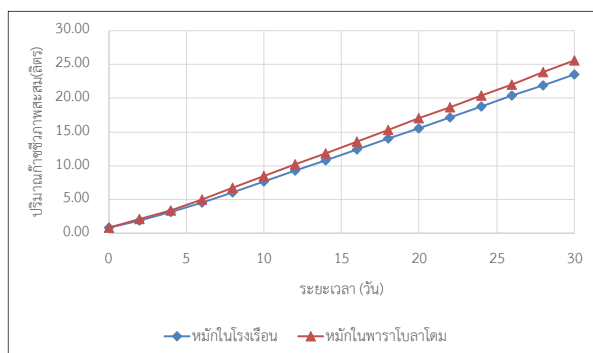
บทความวิจัย (Research Article)

เฉลี่ยต่อวันของการหมักในโรงเรือนอยู่ที่ 1.59 L และค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันของการหมักในพาราโบลาโดมอยู่ที่ 1.72 L

ในรูปที่ 8 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่สะสมตลอดการทดลองเป็นระยะเวลา 30 วัน เปรียบเทียบระหว่างทดลองในโรงเรือนกับในพาราโบลาโดม ผลปรากฏว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในโรงเรือนอยู่ที่ 23.57 L และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในพาราโบลาโดมอยู่ที่ 25.58 L ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทดลองในพาราโบลาโดมให้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่สูงกว่าในโรงเรือน ทั้งนี้เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยในพาราโบลาโดมมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าในโรงเรือน ทำให้มีการเร่งการทำปฏิกิริยาของแบคทีเรียกับขยะเศษอาหารและทำให้เกิดก๊าซชีวภาพที่เร็วขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณที่สูงขึ้น โดยในตารางที่ 4 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของการทดลองนี้



รูปที่ 7 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ในแต่ละวัน



รูปที่ 8 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมตลอดการทดลอง

จากผลการทดลองเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยที่ทดลองหมักในโรงเรือนกับในพาราโบลาโดมปรากฏว่าปริมาณก๊าซที่ได้จากพาราโบลาโดมเพิ่มมากขึ้นจากโรงเรือนจากผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น โดยหากคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วปรากฏว่าการทดลองในพาราโบลาโดมสามารถทำให้เกิดปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันเพิ่มขึ้นมากกว่าทดลองในโรงเรือน คิดเป็น 8.17% และ ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยสะสมตลอดการทดลองเพิ่มขึ้น คิดเป็น 8.52%

ตารางที่ 4 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวัน

การทดลองใน	ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวัน (L)	ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยสะสมตลอดการทดลอง (L)
โรงเรือน	1.59	23.57
พาราโบลาโดม	1.72	25.58
ผลต่าง	0.13	2.01

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลอง 2 การทดลองคือการทดลองหาความสัมพันธ์ของปริมาณก๊าซชีวภาพกับปริมาณขยะเศษอาหารที่ป้อนเข้าระบบในแต่ละวัน โดยมีปริมาณ 0.5, 1, 1.5 และ 2 kg/d และการทดลองศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดมกับหมักในโรงเรือน ผลของการทดลองปรากฏว่าเมื่อดำเนินระบบโดยใช้ปริมาณขยะเศษอาหาร 0.5, 1, 1.5 และ 2 kg/d มีปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดเฉลี่ย 1.340, 1.592, 1.801 และ 1.927 L/d ตามลำดับ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณขยะที่ป้อนเข้าในแต่ละวัน โดยมีความสัมพันธ์เท่ากับ $y = 0.5326x +$

บทความวิจัย (Research Article)

0.964 และเมื่อดำเนินระบบไปจนครบระยะเวลา 30 วัน ผลปรากฏว่าที่ปริมาณการป้อนขยะเศษอาหาร 0.5, 1, 1.5 และ 2 kg/d สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดได้ 20.41, 23.57, 26.34 และ 28.33 L ตามลำดับ

สำหรับการทดลองศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลของการหมักอยู่ในพาราโบลาโดมกับหมักในโรงเรือน ผลของการทดลองปรากฏว่าในช่วงเริ่มต้นจนถึงวันที่ 8 ระบบมีปริมาณก๊าซที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณจุลินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้นจนถึงระดับหนึ่งที่สภาวะเกิดการเสถียร คือหลังจากวันที่ 8 ไปแล้วระบบจะมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพค่อนข้างคงที่ โดยค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันของการหมักในโรงเรือนอยู่ที่ 1.59 L และค่าปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันของการหมักในพาราโบลาโดมอยู่ที่ 1.72 L และมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในโรงเรือนอยู่ที่ 23.57 L และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในพาราโบลาโดมอยู่ที่ 25.58 L ซึ่งจะเห็นได้ว่าการทดลองในพาราโบลาโดมให้ค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่สูงกว่าในโรงเรือน ทั้งนี้เนื่องจากผลของอุณหภูมิที่แตกต่างกัน โดยในพาราโบลาโดมมีอุณหภูมิเฉลี่ยสูงกว่าในโรงเรือน ทำให้มีการเร่งการทำปฏิกิริยาของแบคทีเรียกับขยะเศษอาหารและทำให้เกิดก๊าซชีวภาพที่เร็วขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณที่สูงขึ้นโดยที่การทดลองในพาราโบลาโดมสามารถทำให้เกิดปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยต่อวันเพิ่มขึ้นมากกว่าทดลองในโรงเรือน คิดเป็น 8.17% และ ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยสะสมตลอดการทดลองเพิ่มขึ้น คิดเป็น 8.52%

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการดำเนินการทดลองผู้วิจัยได้พบปัญหาและอุปสรรคในการทดลองเนื่องจากในตอนเริ่มต้นระบบยังไม่มีจุลินทรีย์ที่ใช้หมักขยะเศษอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อจุลินทรีย์ให้มีปริมาณมากพอที่จะสามารถเริ่มต้นระบบได้ ผู้วิจัยจึง

แนะนำให้ใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ในการดำเนินการเริ่มต้นระบบสำหรับนำไปใช้งานในชุมชน อีกประการหนึ่งคือการนำก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักไปใช้งาน ควรใช้อุปกรณ์สำหรับอัดก๊าซเข้าถังบรรจุก๊าซก่อนแล้วค่อยนำไปใช้งาน ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซที่อยู่ในถังเก็บก๊าซเป็นก๊าซที่มีแรงดันต่ำ และยังไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ดังนั้นหากใช้อุปกรณ์อัดก๊าซเข้าถังบรรจุก๊าซแล้ว ก็จะเป็นการสะดวกแก่การนำไปใช้งานในครัวเรือนต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] วรชมล ลีลาพิทักษ์, "การศึกษาการจัดการระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักไร้อากาศจากขยะมูลฝอยชุมชนแบบเปียกและแห้ง: กรณีศึกษาเทศบาลนครราชสีรา และเทศบาลตำบลสูงเนิน จังหวัดนครราชสีมา," วิทยานิพนธ์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, กรุงเทพฯ, 2563.
- [2] อรวรรณ วัฒนยมนาพร, "การหมักร่วมของขยะเศษอาหารกับกากตะกอนน้ำเสียชุมชนโดยใช้ถังหมักไร้อากาศแบบสองขั้นตอนสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ," วิทยานิพนธ์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, 2553.
- [3] M. Kim, Y. H. Ahn and R. E. Speece, "Comparative process stability and efficiency of anaerobic digester: mesophilic vs. thermophilic," *Water Research*, vol. 38, pp. 3645-3650, 2002.
- [4] J. H. Ahn and C. F. Forster, "The effect of temperature variations on the performance of mesophilic and thermophilic anaerobic filters treating a simulated papermill wastewater," *Process Biochemistry*, vol. 37, pp. 589-594, 2002.
- [5] G. Schober, J. Schafer, U. Schmid-Staiger and W. Trosch, "One and two-stage digestion of solid organic waste," *Water*

บทความวิจัย (Research Article)

- Research*, vol. 33, no. 3, pp. 854-860, 1999.
- [6] S. Janjai and B. K. Bala, "Solar drying technology," *Food Engineering Reviews*, vol. 4, pp. 16-54, 2012.
- [7] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.), *คู่มือโครงการสนับสนุนการลงทุนติดตั้งใช้งานระบบอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์*, พิมพ์ครั้งที่ 1, นครปฐม: บริษัท เพชรเกษมพรินติ้ง กรู๊ป จำกัด, 2562.
- [8] S. Janjai, P. Intawee, J. Kaewkiewa, C. Sritus and V. Khamvongsa, "A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People's Democratic Republic," *Renewable Energy*, vol. 36, pp. 1053-1062, 2011.
- [9] O. Ince, "Performance of a two-phase anaerobic digestion system when treating dairy wastewater," *Water Research*, vol. 32, no. 9, pp. 2707-2713, 1998.
- [10] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 5th Edition. McGraw-Hill Higher Education, New York, 2014.
- [11] H. Bouallagui, R. B. Cheikh, L. Marouani and M. Hamdi, "Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester," *Bioresource Technology*, pp. 1-5, 2002.
- [12] D. Deublein and A. Steinhauser, *Biogas from Waste and Renewable Resources*, Weinheim: Wiley-VCH, 2011.
- [13] M. H. Gerardi, *The Microbiology of Anaerobic Digesters*, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [14] D. Kondusamy and A. S. Kalamdhad, "Pre-treatment and anaerobic digestion of food," *Journal of Environmental Chemical*, vol. 2, pp. 1821-1830, 2014.
- [15] C. Zheng, H. Su and T. T. Baeyens, "Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production," *Renewable Sustain Energy Review*, vol. 38, pp. 383-392, 2014.
- [16] K. Karim, R. Hoffman, K. K. Thomas and M. H. Al-Dahhan, "Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing," *Water Research*, vol. 39, no. 15, pp. 3597-3606, 2005.