

บทความวิจัย (Research Article)

ปัจจัยที่มีผลต่อการหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนจากกากมันสำปะหลังและน้ำเสีย

นพดล ยุบลชู¹, ภากร งามแสง¹ และ ไทยทัศน์ สุดสวนสี^{1,*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์

*ผู้ประสานงานบทความต้นฉบับ: thaithat.su@ksu.ac.th

(รับบทความ: 11 ธันวาคม 2567; แก้ไขบทความ: 29 ธันวาคม 2567; ตอรับบทความ: 30 ธันวาคม 2567)

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการหมักก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังและน้ำเสีย โดยดำเนินการทดลองด้วยอัตราส่วนของกากมันสำปะหลังต่อน้ำเสีย 5 แบบ ได้แก่ 1:1, 2:1, 3:1, 1:2 และ 1:3 ผลการวิเคราะห์ ANOVA แสดงให้เห็นว่าสัดส่วนดังกล่าวมีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยพบว่าอัตราส่วน 1:3 ให้ผลผลิตก๊าซสูงสุด โดยมีปริมาณการผลิตเฉลี่ย 8.81 ลิตรในวันที่ 13 ในขณะที่อัตราส่วน 1:2 มีปริมาณการผลิต 6.17 ลิตร ส่วนอัตราส่วน 1:1, 2:1 และ 3:1 มีปริมาณการผลิตต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ได้ทำการทดลองเพิ่มเติมในถังหมักขนาด 80 ลิตร ด้วยการใช้สัดส่วน 1:3 โดยศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบการกวน 45 และ 110 รอบต่อนาที พบว่าความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาทีช่วยเพิ่มการกระจายตัวของจุลินทรีย์และสารอาหารในถังหมัก ทำให้จุลินทรีย์สามารถเข้าถึงสารอาหารได้อย่างทั่วถึง และลดการสะสมของสารยับยั้ง เช่น กรดไขมันที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก ส่งผลให้การผลิตก๊าซเริ่มต้นในวันที่ 5 และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 13 โดยมีปริมาณสะสมสูงสุด 45.14 ลิตร ขณะที่ความเร็วรอบ 45 รอบต่อนาทีเริ่มผลิตก๊าซในวันที่ 7 และมีปริมาณสะสมสูงสุดเพียง 21.58 ลิตร ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอัตราส่วน 1:3 และความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาทีเหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังและน้ำเสีย ผลการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพในอนาคต

คำสำคัญ: การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ก๊าซชีวภาพ กากมันสำปะหลัง น้ำเสีย สัดส่วนที่เหมาะสม

การอ้างอิงบทความ: นพดล ยุบลชู, ภากร งามแสง และ ไทยทัศน์ สุดสวนสี, "ปัจจัยที่มีผลต่อการหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนจากกากมันสำปะหลังและน้ำเสีย," วารสารวิศวกรรมและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยกาฬสินธุ์, ปีที่ 2, ฉบับที่ 6, หน้า 50-65, 2567.

บทความวิจัย (Research Article)

Factors Affecting Anaerobic Biogas Digestion from Cassava Pulp and Wastewater

Noppadon Yubonchu¹, Phakorn Ngamsaeng¹ and Thaithat Sudsuansee^{1,*}

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University

* Corresponding Author: thaithat.su@ksu.ac.th

(Received: December 11, 2024; Revised: December 29, 2024; Accepted: December 30, 2024)

Abstract

This study aims to investigate the factors affecting biogas production from cassava pulp and wastewater. Experiments were conducted using five ratios of cassava pulp to wastewater: 1:1, 2:1, 3:1, 1:2, and 1:3. ANOVA analysis revealed that the ratios significantly influenced biogas production, with the 1:3 ratio yielding the highest gas output of 8.81 liters on day 13. In comparison, the 1:2 ratio produced 6.17 liters, while the other ratios (1:1, 2:1, and 3:1) resulted in significantly lower outputs. Further experiments using an 80-liter fermenter at the 1:3 ratio examined stirring speeds of 45 and 110 rpm. The results showed that 110 rpm improved microorganism and nutrient distribution in the fermenter, reducing the accumulation of inhibitory substances such as fatty acids. This led to biogas production starting on day 5 and increasing steadily to a maximum of 45.14 liters on day 13. In contrast, the 45 rpm stirring speed began biogas production on day 7, with a peak output of only 21.58 liters. These findings confirm that the 1:3 ratio and a stirring speed of 110 rpm are optimal for biogas production from cassava pulp and wastewater. This research can be applied to enhance biogas production efficiency in industrial settings.

Keywords: Anaerobic digestion, Biogas, Cassava pulp, Wastewater, Optimal ratio

Please cite this article as: N. Yubonchu, P. Ngamsaeng and T. Sudsuansee, "Factors Affecting Anaerobic Biogas Digestion from Cassava Pulp and Wastewater," *The Journal of Engineering and Industrial Technology, Kalasin University*, vol. 2, no. 6, pp. 50-65, 2024.

บทความวิจัย (Research Article)

1. บทนำ

ในปัจจุบัน กากมันสำปะหลังและน้ำเสียจากอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ เนื่องจากการกำจัดของเสียดังกล่าวด้วยวิธีดั้งเดิม เช่น การฝังกลบหรือการปล่อยน้ำเสียลงแหล่งน้ำ มักก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำและอากาศ การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังและน้ำเสียจึงเป็นทางเลือกที่ช่วยลดปัญหาดังกล่าว ไม่เพียงแต่ช่วยลดปริมาณของเสีย แต่ยังเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือทิ้ง โดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นพลังงานสะอาดในรูปแบบของก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกที่ยั่งยืนและมีประสิทธิภาพสูง

กระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์จากกากมันสำปะหลังและน้ำเสียเพื่อผลิตก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) กระบวนการนี้ยังช่วยลดปัญหามลพิษทางอากาศและกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์จากของเสีย ทั้งยังสามารถลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียและช่วยเสริมสร้างเศรษฐกิจหมุนเวียนในภาคอุตสาหกรรม

จากความท้าทายของการจัดการกากมันสำปะหลังและน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมัน การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นค้นหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน รวมถึงการหาสัดส่วนและเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้ ยังเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างกากมันสำปะหลังในรูปแบบต่างๆ และศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบของการกวนต่อปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลลัพธ์จากการวิจัยนี้จะเป็น

พื้นฐานสำคัญสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพและการจัดการของเสียในอุตสาหกรรมอย่างยั่งยืน

การศึกษานี้คาดว่าจะนำไปสู่การปรับปรุงกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพในภาคอุตสาหกรรม ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเพิ่มศักยภาพในการใช้พลังงานทดแทนในระดับชุมชนและประเทศ โดยมีเป้าหมายเพื่อสร้างแนวทางที่ยั่งยืนสำหรับการจัดการทรัพยากรและพลังงานในอนาคต

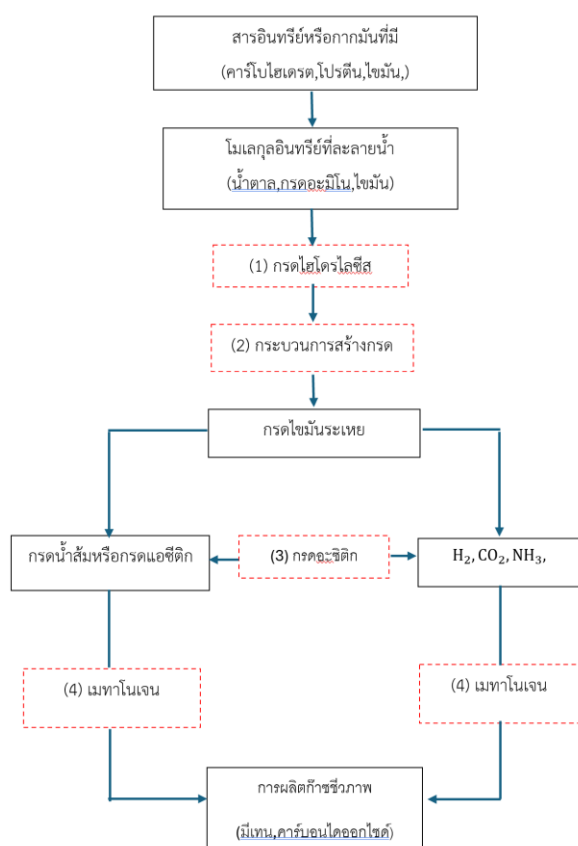
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังและน้ำเสียเป็นกระบวนการที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก ในด้านพลังงานทดแทนและการจัดการของเสียในอุตสาหกรรม กระบวนการนี้ใช้การหมักแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) ซึ่งจุลินทรีย์ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพที่ประกอบด้วยมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยก๊าซชีวภาพเหล่านี้สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานสะอาดและยั่งยืน ในบริบทของงานวิจัยที่นำเสนอนี้ การศึกษามุ่งเน้นไปที่การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังและน้ำเสีย ด้วยการปรับปรุงสัดส่วนและเงื่อนไขการหมัก เพื่อสนับสนุนเป้าหมายด้านพลังงานทดแทนในภาคอุตสาหกรรมและชุมชน

กากมันสำปะหลังซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง มีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับการหมักแบบไร้ออกซิเจน เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และเส้นใยที่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปแบบของก๊าซชีวภาพ น้ำเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตยังมีค่าซีโอดีสูง ทำให้เป็นแหล่ง

บทความวิจัย (Research Article)

พลังงานที่มีศักยภาพในการหมักร่วมกับกากมันสำปะหลัง งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น การศึกษาโดย Santos et al. [1] ได้แสดงให้เห็นว่า การใช้ของเสียเหล่านี้สามารถส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียนและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในประเทศกำลังพัฒนา



รูปที่ 1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจนจากรูปที่ 1 ซึ่งเป็นกระบวนการที่จุลินทรีย์เปลี่ยนสารอินทรีย์ให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพ กระบวนการเริ่มต้นจากสารอินทรีย์ที่ได้จากวัตถุดิบ เช่น กากมันสำปะหลัง ที่มีองค์ประกอบหลักเป็น

คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน สารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกเปลี่ยนเป็นโมเลกุลที่เล็กลงและละลายน้ำได้ เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และไขมัน ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส โดยจุลินทรีย์จะผลิตเอนไซม์เพื่อย่อยสลายโมเลกุลขนาดใหญ่ให้เล็กลง

ในขั้นตอนถัดไป กระบวนการสร้างกรดจะเปลี่ยนสารที่เกิดจากไฮโดรไลซิสให้กลายเป็นกรดไขมันระเหยง่าย เช่น กรดอะซิติก รวมถึงผลิตสารประกอบอื่น เช่น ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ จากนั้นกรดไขมันระเหยง่ายเหล่านี้จะถูกแปลงเป็นกรดอะซิติกและสารตั้งต้นอื่น ๆ ผ่านกระบวนการสร้างกรดอะซิติก ซึ่งเตรียมพร้อมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพในขั้นตอนสุดท้าย

ในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการ จุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างมีเทนจะเปลี่ยนกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักของก๊าซชีวภาพ กระบวนการทั้งหมดนี้ต้องดำเนินการในสภาพแวดล้อมที่ปราศจากออกซิเจนและมีการควบคุมสภาวะที่เหมาะสม เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่างและอุณหภูมิที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

กระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนมีขั้นตอนสำคัญที่ต้องพิจารณา ได้แก่ การไฮโดรไลซิส การเกิดกรดอินทรีย์ระเหยง่าย การสร้างกรดอะซิติก และการสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งแต่ละขั้นตอนต้องดำเนินการในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ระหว่าง 6.6–7.4 และอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วง 30–37 องศาเซลเซียส งานวิจัยโดย Kohmuean et al. [2] ระบุว่า สัดส่วน 1:1 ระหว่างกากมันสำปะหลังกับน้ำเสียให้ผลผลิตมีเทนสูงสุดในเวลาเพียง 6 วัน ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายของ

บทความวิจัย (Research Article)

งานวิจัยในครั้งนี้ที่ต้องการค้นหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ในบริบทของงานวิจัยนี้ นอกจากจะศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมแล้ว ยังมีการเปรียบเทียบระหว่างการใช้อากามันสำปะหลังชนิดแห้งและเปียก เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างในประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ การทดลองยังเน้นการศึกษาค่าผลของความเร็วยรอบการกวนในถังหมักต่อผลผลิตก๊าซ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของสารตั้งต้นและการทำงานของจุลินทรีย์ นอกจากนี้งานวิจัยของ Cruz et al. [3] พบว่าการเติมสารปรับสภาพ เช่น แคลเซียมจากเปลือกไข่ สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซได้ถึง 338% ข้อมูลนี้ก็ยังเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการหมักได้เช่นกัน

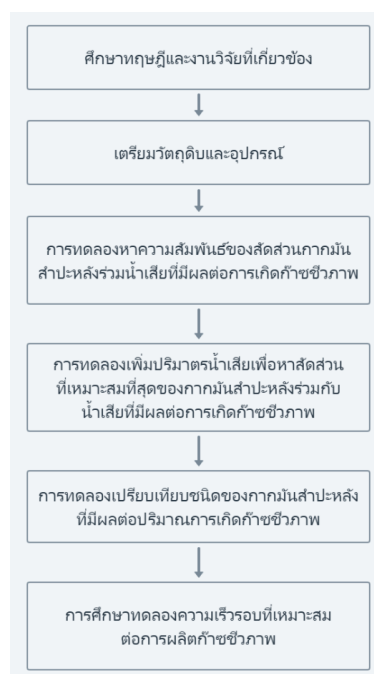
ในการศึกษาครั้งนี้ได้เน้นถึงความสำคัญของสภาวะการหมักร่วม โดยการนำกากมันสำปะหลังมาหมักร่วมกับน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง และปรับปรุงเงื่อนไขการหมัก เช่น ความเร็วยรอบการกวนและระยะเวลาในถังหมัก การศึกษาของ Sawyerr et al. [4] ชี้ให้เห็นว่าการหมักร่วมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการและเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาของงานวิจัยนี้ที่ต้องการสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนในอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพ

3. วิธีการดำเนินการศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการหมักก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังและน้ำเสียในสภาวะไร้ออกซิเจน กากมันสำปะหลังและน้ำเสียได้มาจากโรงงานแปรรูปแป้งมันสำปะหลังในพื้นที่อำเภอสมเด็จ จังหวัดกาฬสินธุ์ ก่อนกระบวนการหมัก กากมันสำปะหลังได้

ถูกเตรียมโดยการกำจัดสิ่งสกปรกและปรับระดับความชื้นเพื่อสร้างสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ น้ำเสียได้ถูกปรับสภาพล่วงหน้าเพื่อปรับสมดุลค่า pH และกำจัดอนุภาคขนาดใหญ่ที่อาจขัดขวางกระบวนการหมัก

ในการดำเนินการวิจัยสามารถแบ่งการดำเนินงานวิจัยเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภูมิขั้นตอนการดำเนินการ



รูปที่ 3 กากมันสำปะหลังจากโรงแป้งมัน

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 4 น้ำเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตกากมัน

3.1 การทดลองหาความสัมพันธ์ของสัดส่วนกากมัน สำหรับหลังร่วมน้ำเสียที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของสัดส่วนกากมันสำหรับหลังและน้ำเสียต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้อัตราส่วนของกากมันสำหรับหลังต่อน้ำเสียที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1:1, 2:1, 3:1, 1:2 และ 1:3 แนวทางการกำหนดอัตราส่วนนี้ได้แรงบันดาลใจจากงานวิจัยของ Kohmuean และคณะ ซึ่งใช้อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 2:1 ในการทดลองหมักและได้ผลลัพธ์ที่ดี ในการทดลองครั้งนี้ วัตถุดิบที่ใช้คือกากมันสำหรับหลังและน้ำเสียจากโรงงานแปรงมันสำหรับหลังในพื้นที่ ก่อนการทดลองวัตถุดิบได้รับการเตรียมโดยการกำจัดสิ่งสกปรกและปรับสมดุลค่า pH เพื่อให้เหมาะสมสำหรับกระบวนการหมัก

การทดลองดำเนินการในถังหมักขนาด 19 ลิตร จำนวน 5 ถัง โดยแต่ละถังได้รับการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ในปริมาณ 2 กิโลกรัม เพื่อช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาการหมัก หลังจากนั้นใส่กากมันสำหรับหลังและน้ำเสียในอัตราส่วนที่กำหนดไว้สำหรับแต่ละถัง ถังหมักได้รับการปิดผนึกเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากอากาศภายนอก การทดลองดำเนินไปเป็นระยะเวลา

10-20 วัน โดยในแต่ละวันมีการบันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละถัง

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบผลของสัดส่วนต่าง ๆ ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยวิธีการนี้ช่วยระบุว่าสัดส่วนใดมีผลต่อการผลิตก๊าซอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ การวิเคราะห์ยังช่วยให้สามารถกำหนดสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างแม่นยำ

3.2 การทดลองเพิ่มปริมาณน้ำเสียเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดของกากมันสำหรับหลังร่วมน้ำเสียที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

การทดลองนี้เน้นการเพิ่มปริมาณน้ำเสียโดยใช้อัตราส่วนของกากมันสำหรับหลังต่อน้ำเสีย ได้แก่ 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 เพื่อศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำเสียต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ การทดลองใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ในปริมาณเท่ากับหัวข้อ 3.1 และดำเนินการในถังหมักขนาด 19 ลิตร เช่นเดียวกัน โดยทำการวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละวันและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในแต่ละอัตราส่วนเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุด การทดลองหาผลของอัตราส่วนกากมันสำหรับหลังและน้ำเสียใช้กากมันสำหรับหลังจากโรงงานแปรงมันและน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตแปรงมันหัวเชื้อจุลินทรีย์จากบ่อหมักก๊าซชีวภาพถูกเติมลงในถังทดลองขนาด 19 ลิตร จำนวน 5 ถัง และผสมกากมันสำหรับหลังและน้ำเสียในสัดส่วนที่กำหนด ทำการทดลองเป็นเวลาประมาณ 10-20 วัน โดยเก็บผลการทดลองและวัดปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพในแต่ละวัน

บทความวิจัย (Research Article)

3.3 การทดลองการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพของการกวนผสมกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย ในถังหมักขนาด 80 ลิตร

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความเร็วรอบในการกวนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้อัตราส่วนกากมันสำปะหลังและน้ำเสียที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองก่อนหน้า นำมาทดลองในถังหมักไร้ออกซิเจนขนาด 80 ลิตร ซึ่งติดตั้งใบพัดกวนผสมและควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ การทดลองดำเนินการที่ความเร็วรอบ 45 และ 110 รอบต่อนาที เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของความเร็วรอบที่แตกต่างต่อการกระจายตัวของจุลินทรีย์และการเข้าถึงสารอาหารในถังหมัก โดยทำการทดลองในระยะเวลา 10-20 วัน และเก็บข้อมูลคุณภาพก๊าซชีวภาพทุกวัน

แนวทางการกำหนดความเร็วรอบในการทดลองนี้ได้รับแรงบันดาลใจจากงานวิจัยของ Aznury และคณะ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการควบคุมความเร็วรอบที่เหมาะสมช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยในการทดลองก่อนหน้านี้ของ Aznury พบว่าความเร็วรอบ 102 รอบต่อนาทีให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด ซึ่งสะท้อนถึงความสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างความเร็วรอบและปริมาณการผลิตก๊าซ การศึกษานี้จึงใช้ความเร็วรอบใกล้เคียงและขยายช่วงเพื่อสำรวจความเหมาะสมของความเร็วรอบในบริบทของวัตถุดิบที่ใช้

ชุดการทดลองหาอัตราความเร็วรอบ แบ่งเป็น 2 ส่วนคือ ถังหมักไร้ออกซิเจนแบบมีใบพัดกวนติดตั้งอยู่ในถังประกอบด้วยถังสแตนเลสขนาด 80 ลิตร ติดตั้งเครื่องอินเวอร์เตอร์โดยมีใบพัดกวนอยู่ด้านในตัวถัง ส่วนที่ 2 ประกอบด้วยถังพลาสติกขนาด 100 ลิตร

และถังขนาด 80 ลิตร ต่อท่อ PVC เพื่อนำก๊าซชีวภาพที่เกิดจากถังหมักฯ นำก๊าซชีวภาพเข้าถังหมักขนาด 80 ลิตร ที่คว่ำอยู่ในถังหมักขนาด 100 ลิตร และเปิดเครื่องอินเวอร์เตอร์กวนผสมและหาความเร็วรอบและวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน โดยเปรียบเทียบค่าความเร็วรอบที่มีผลต่อการเกิดปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด ซึ่งดำเนินการหมักโดยตามขั้นตอนดังนี้

- 1) นำอัตราส่วนกากมันสำปะหลังและน้ำเสียที่เหมาะสมที่สุดที่ได้จากการทดลองก่อนหน้า
- 2) เปิดเครื่องอินเวอร์เตอร์ ปรับความเร็วรอบที่กำหนด
- 3) นำอัตราส่วนกากมันสำปะและน้ำเสียที่พักไว้ 1 วันเติมลงถังหมักหลังไร้ออกซิเจนแบบมีใบพัดกวนติดตั้งอยู่ในถัง
- 4) วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันโดยทำการตรวจวัดระดับความสูงของถังเก็บก๊าซชีวภาพและแปลงผลเป็นปริมาตรของก๊าซ จากนั้นทำการบันทึกผลในตารางบันทึกผลของแต่ละวัน

4. ผลการทดลอง และอภิปรายผล

ผู้ทำวิจัยได้ทำการทดลองหาประสิทธิภาพของการเกิดก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังและน้ำเสียด้วยการทดลองผสมในอัตราส่วนต่างๆ ทางผู้วิจัยตั้งสมมติฐานไว้ว่าการทดลองนี้จะช่วยในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดก๊าซชีวภาพได้ โดยหลังจากได้อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดแล้ว ทางผู้วิจัยได้ทำการทดลองหมักก๊าซชีวภาพโดยใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมในถังกวนขนาด 80 ลิตร 2 ถังโดยแต่ละถังมีการปรับความเร็วรอบต่างกันเพื่อทำการทดสอบหาความเร็วรอบที่

บทความวิจัย (Research Article)

เหมาะสมที่ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพได้สูงสุด ซึ่งการกวนของส่วนผสมทั้งสองนี้ทางผู้วิจัยตั้งสมมติฐานไว้ว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพได้ โดยหลังจากการหมักหมักแล้ว ทางผู้วิจัยได้ทำการวัดระดับถังเก็บก๊าซเพื่อชี้วัดถึงปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นพร้อมบันทึกผลการทดลอง

4.1. ผลของสัดส่วนของกากมันสำปะหลังร่วมกับน้ำเสียที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

งานวิจัยของ Kohmuean และคณะ [2] ได้ทำการทดลองหมักก๊าซชีวภาพโดยใช้กากมันสำปะหลังและผสมกับน้ำเสียโดยใช้อัตราส่วน 1:1, 1:2, และ 2:1 ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ผลลัพธ์ที่ดี ดังนั้นผู้ดำเนินโครงการจึงนำแนวทางของงานวิจัยนี้มาใช้ในการศึกษาโดยการศึกษาค้นคว้าผู้ดำเนินโครงการทำการทดลองในถังหมักจำนวน 5 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ถังหมักก๊าซชีวภาพจำนวน 5 ชุด

โดยแต่ละถังมีอัตราส่วนระหว่างกากมันสำปะหลังต่อน้ำเสียที่ 1:1, 2:1, 3:1, 1:2 และ 1:3 ตามลำดับ โดยในการทดลองครั้งนี้ผู้ดำเนินโครงการได้ใช้ถังหมักขนาด 19 ลิตร โดยทำการนำหัวเชื้อจำนวน 2

กิโลกรัมมาช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาของการหมักเร็วขึ้น โดยจะใส่ลงไปในทุกถังหลังจากนั้นจะทำการใส่กากมันสำปะหลังและน้ำเสียในอัตราส่วนที่กำหนดไว้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณและอัตราส่วน ระหว่างกากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย

ถังทดลอง	อัตราส่วน	กากมัน สำปะหลัง (กิโลกรัม)	น้ำเสีย (ลิตร)
1	1:1	7.00	7.00
2	2:1	9.33	4.57
3	3:1	10.50	3.50
4	1:2	4.67	9.33
5	1:3	3.50	10.50

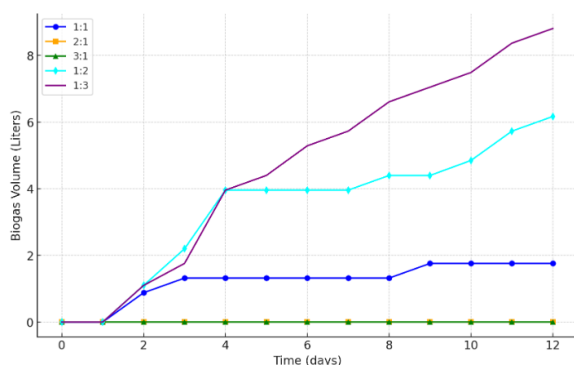
ผลการทดลองวัดปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละถังสามารถแสดงในตารางที่ 2 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักทั้ง 5 ชุดการทดลอง

วัน	ปริมาตรก๊าซชีวภาพ (ลิตร)				
	1:1	2:1	3:1	1:2	1:3
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0.88	0	0	1.10	1.10
4	1.32	0	0	2.20	1.76
5	1.32	0	0	3.96	3.96
6	1.32	0	0	3.96	4.40
7	1.32	0	0	3.96	5.29
8	1.32	0	0	3.96	5.73
9	1.32	0	0	4.40	6.61
10	1.76	0	0	4.40	7.05
11	1.76	0	0	4.85	7.49
12	1.76	0	0	5.73	8.37
13	1.76	0	0	6.17	8.81

นพดล ยุบลชู และคณะ, ปัจจัยที่มีผลต่อการหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน จากกากมันสำปะหลังและน้ำเสีย

บทความวิจัย (Research Article)



รูปที่ 6 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักตามอัตราส่วน 1:1, 2:1, 3:1, 1:2 และ 1:3

จากตารางที่ 2 และรูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันสำหรับถังหมักที่มีอัตราส่วนกากมันสำปะหลังต่อน้ำเสียต่างๆ ได้แก่ 1:1, 2:1, 3:1, 1:2 และ 1:3 โดยข้อมูลบ่งบอกถึงความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกันในแต่ละอัตราส่วน

จากตารางพบว่าถังที่มีอัตราส่วน 1:3 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด โดยเริ่มมีการผลิตก๊าซตั้งแต่วันที่ 3 ซึ่งในวันนั้นปริมาณก๊าซชีวภาพอยู่ที่ 1.10 ลิตร และการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุก ๆ วัน จนถึงวันที่ 13 มีปริมาณก๊าซสูงสุดที่ 8.81 ลิตร การที่ถังหมักนี้มีการผลิตก๊าซอย่างต่อเนื่องและเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แสดงให้เห็นว่าการจัดการอัตราส่วนของกากมันสำปะหลังต่อน้ำในอัตราส่วน 1:3 เป็นสถานะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ จุลินทรีย์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากปริมาณน้ำที่มากพอช่วยเจือจางกรดไขมันที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมัก ทำให้จุลินทรีย์ทำงานได้ดีขึ้น และไม่เกิดการสะสมของสารยับยั้งที่อาจยับยั้งการหมัก

ในอัตราส่วน 1:2 มีการผลิตก๊าซชีวภาพในลักษณะที่ใกล้เคียงกับถังที่มีอัตราส่วน 1:3 เริ่มมีการผลิตก๊าซตั้งแต่วันที่ 3 และปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงวันที่ 13 ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพรวมอยู่ที่ 6.17 ลิตร แม้จะน้อยกว่าถัง 1:3 แต่ก็ยังแสดงให้เห็นถึงสถานะการหมักที่เหมาะสม การที่น้ำมีปริมาณมากพอในถังนี้ก็ช่วยให้จุลินทรีย์สามารถดำเนินกระบวนการหมักได้อย่างมีประสิทธิภาพเช่นกัน

ในอัตราส่วน 1:1 การผลิตก๊าซชีวภาพตั้งแต่วันที่ 3 และมีปริมาณก๊าซที่คงที่อยู่ที่ประมาณ 1.32-1.76 ลิตรหลังจากวันที่ 4 การที่ปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและมีแนวโน้มคงที่อาจแสดงถึงสถานะที่มีน้ำไม่เพียงพอที่จะส่งเสริมกระบวนการหมักให้ต่อเนื่องหรือมีประสิทธิภาพเท่ากับอัตราส่วน 1:2 และ 1:3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณของแข็งที่มากขึ้นอาจเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้กระบวนการหมักไม่สมบูรณ์

สำหรับถังที่มีอัตราส่วน 3:1 และ 2:1 นั้นมีการผลิตก๊าซน้อยมาก หรือในบางถังไม่มีการผลิตก๊าซเลย การที่ถังหมักเหล่านี้นี้ไม่สามารถผลิตก๊าซได้อย่างมีประสิทธิภาพอาจเกิดจากการที่มีปริมาณของแข็งมากเกินไป ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเข้าถึงสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง หรืออาจเกิดการสะสมของสารยับยั้งในกระบวนการหมัก ซึ่งยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ปริมาณน้ำที่น้อยเกินไปในถังเหล่านี้อาจทำให้เกิดการขาดความชื้นที่เพียงพอในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่มีส่วนสำคัญต่อการหมัก

จากการวิเคราะห์ข้อมูลพบว่าอัตราส่วนของน้ำต่อกากมันสำปะหลังที่สูง เช่น 1:3 และ 1:2 ส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพมีประสิทธิภาพมากกว่าอัตราส่วนที่มี

บทความวิจัย (Research Article)

ปริมาณของแข็งสูง (3:1, 2:1) หรืออัตราส่วนที่น้ำและของแข็งใกล้เคียงกัน (1:1)

การวิเคราะห์ ANOVA เพื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในการผลิตก๊าซชีวภาพจากอัตราส่วนกากมันสำปะหลังต่อน้ำเสียได้ การใช้ค่า F และค่า p-value ในการสรุปผลค่า F (F-statistic) ที่ได้จากการทดสอบเท่ากับ 8.49 ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนของความแปรปรวนระหว่างกลุ่มกับความแปรปรวนภายในกลุ่มที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ค่า F ที่สูงนี้แสดงให้เห็นว่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 3 ตารางการวิเคราะห์ ANOVA

Source of Variation	Sum of Squares (SS)	Degrees of Freedom (df)	Mean Square (MS)	F-Statistic	p-value
Between Groups	79.1255	2	39.5627	8.4911	0.00095
Within Groups	167.7333	36	4.6593		
Total	246.8588	38			

4.2 ผลการทดลองเพิ่มปริมาตรน้ำเสียเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของกากมันสำปะหลังร่วมกับน้ำเสียที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

การหาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างวัตถุดิบทั้งสอง เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของกระบวนการหมัก เนื่องจากอัตราส่วนที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดการสะสมของสารยับยั้งหรือขาดสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งจะลดการผลิตก๊าซชีวภาพ ในการทดลองนี้จึงมีการทดสอบอัตราส่วนของกากมันสำปะหลังและน้ำเสียในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยผลลัพธ์จากการทดลองจะช่วยชี้ให้เห็นถึงสถานะที่ส่งเสริมการทำงานของจุลินทรีย์ในการหมักอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

มีสาเหตุจากความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนการผสมกากมันสำปะหลังร่วมกับน้ำเสียในแต่ละกลุ่ม ส่วนค่า p-value ที่คำนวณได้เท่ากับ 0.00095 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์อย่างมีนัยสำคัญที่ 0.05 (5%) อย่างมาก หมายความว่าความแตกต่างที่พบในการทดลองนี้มีนัยสำคัญทางสถิติ โอกาสที่ความแตกต่างจะเกิดจากความบังเอิญมีเพียง 0.095% หรือมีความน่าจะเป็นต่ำมาก กล่าวคือ สามารถมั่นใจได้ว่าอัตราส่วนของกากมันสำปะหลังร่วมกับน้ำเสียที่แตกต่างกันมีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตขึ้นจริง ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลปริมาณและอัตราส่วนของกากมันสำปะหลังร่วมกับน้ำเสียในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, และ 1:5

ถังทดลอง	อัตราส่วน	กากมัน สำปะหลัง (กิโลกรัม)	น้ำเสีย (ลิตร)
1	1:1	7.50	7.50
2	1:2	5.00	10.00
3	1:3	3.75	11.25
4	1:4	3.00	12.00
5	1:5	2.50	12.50

จากตารางที่ 4 แสดงข้อมูลปริมาณและอัตราส่วนของกากมันสำปะหลังต่อน้ำเสียในการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีการแบ่งถังทดลองออกเป็น 5 ชุดตามอัตราส่วนของกากมันสำปะหลังและน้ำเสียที่

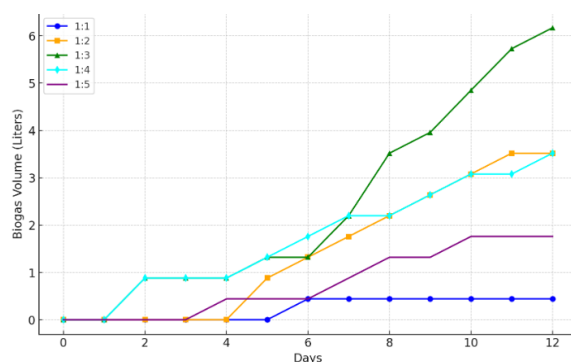
บทความวิจัย (Research Article)

แตกต่างกัน ได้แก่ 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 ข้อมูลในตารางประกอบไปด้วยจำนวนหัวเชื้อที่ใช้ (1 กิโลกรัมต่อทุกถัง) ปริมาณกากมันสำปะหลัง (หน่วยเป็นกิโลกรัม) และปริมาณน้ำเสีย (หน่วยเป็นลิตร) ในแต่ละอัตราส่วน ตัวอย่างเช่น ถังที่มีอัตราส่วน 1:1 จะใช้กากมันสำปะหลัง 7.5 กิโลกรัมและน้ำเสีย 7.5 ลิตร ในขณะที่ถังที่มีสัดส่วน 1:5 จะใช้กากมันสำปะหลัง 2.5 กิโลกรัมและน้ำเสีย 12.5 ลิตร การจัดสัดส่วนที่แตกต่างกันนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อตรวจสอบว่าสัดส่วนใดจะให้ผลการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญในการหาค่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการหมัก

ตารางที่ 5 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของกากมันสำปะหลังร่วมกับน้ำเสีย ที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

วันที่	อัตราส่วน				
	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0.88	0.88	0
5	0	0	0.88	0.88	0
6	0	0.88	1.32	1.32	0.44
7	0.44	1.32	1.32	1.76	0.44
8	0.44	1.76	2.20	2.20	0.88
9	0.44	2.20	3.52	2.20	1.32
10	0.44	2.64	3.96	2.64	1.32
11	0.44	3.08	4.85	3.08	1.76
12	0.44	3.52	5.73	3.08	1.76
13	0.44	3.52	6.17	3.08	1.76

จากตารางที่ 5 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักกากมันสำปะหลังร่วมกับน้ำเสียในอัตราส่วนต่าง ๆ (1:1, 1:2, 1:3, 1:4, และ 1:5) โดยข้อมูลแบ่งตามวันที่ตั้งแต่วันที่ 1 ถึงวันที่ 13 ในช่วงสามวันแรก วันที่ 1-3 ทุกอัตราส่วนยังไม่มีการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่เริ่มมีการผลิตในวันที่ 4 โดยอัตราส่วน 1:3 และ 1:4 เริ่มผลิตได้ปริมาณ 0.88 ลิตร ขณะที่อัตราส่วนอื่น ๆ ยังคงไม่มีการผลิตต่อมาในวันที่ 6 อัตราส่วน 1:2 เริ่มผลิตก๊าซชีวภาพในปริมาณน้อยกว่าการผลิตของอัตราส่วน 1:3 ที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็น 1.32 ลิตร และมีแนวโน้มการผลิตเพิ่มขึ้นในทุกอัตราส่วน ยกเว้นอัตราส่วน 1:1 ที่เริ่มผลิตเพียงเล็กน้อยในวันที่ 7 โดยคงที่อยู่ที่ 0.44 ลิตรต่อเนื่องจนถึงวันที่ 13 ในช่วงวันที่ 7 ถึง 13 อัตราส่วน 1:3 มีการผลิตก๊าซมากที่สุด และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 6.17 ลิตร ในวันที่ 13 ส่วนอัตราส่วน 1:5 และ 1:4 มีการผลิตในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน โดย 1:4 มีปริมาณคงที่อยู่ที่ประมาณ 3.08 ลิตรตั้งแต่วันที่ 11 เป็นต้นไป ขณะที่ 1:5 มีปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้นอยู่ที่ 1.76 ลิตร



รูปที่ 7 แสดงการเกิดก๊าซชีวภาพของก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังร่วมกับน้ำเสียในอัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, และ 1:5

บทความวิจัย (Research Article)

จากกราฟในรูปที่ 7 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันจากการหมักกากมันสำปะหลังและน้ำเสียในอัตราต่าง ๆ ได้แก่ 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 โดยมีการทดลองนาน 13 วัน อัตราส่วน 1:3 มีการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุด เริ่มตั้งแต่วันที่ 4 และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงวันที่ 13 ซึ่งมีปริมาณสูงสุดที่ 6.17 ลิตร อัตราส่วน 1:2 เริ่มผลิตตั้งแต่วันที่ 6 และคงที่ที่ 3.52 ลิตร อัตราส่วน 1:5 เริ่มผลิตในวันที่ 6 และคงที่ที่ 1.76 ลิตร จนจบการทดลอง สำหรับอัตราส่วน 1:4 มีการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้นจนถึงวันที่ 11 และคงที่ที่ 3.08 ลิตร ในวันที่เหลือ อัตราส่วน 1:1 มีการผลิตก๊าซต่ำสุด เริ่มในวันที่ 7 ที่ปริมาณ 0.44 ลิตร และคงที่ไปตลอดการทดลอง

จากผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4 และกราฟในรูปที่ 7 สามารถวิเคราะห์ได้ว่าอัตราส่วนของกากมันสำปะหลังต่อน้ำเสีย มีผลอย่างมากต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพคืออัตราส่วน 1:3 ซึ่งสามารถผลิตก๊าซได้สูงสุดที่ 6.17 ลิตร ในวันที่ 13 จากการสังเกตพบว่าอัตราส่วนนี้ มีการผลิตก๊าซชีวภาพตั้งแต่วันที่ 4 และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการผสมในอัตราส่วนนี้ มีความสมดุลระหว่างสารอาหารและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ในการหมัก จุลินทรีย์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในสถานะที่มีน้ำเพียงพอสำหรับการเจริญงอกงามที่ยั่งยืนที่เกิดขึ้นจากการหมัก เช่น กรดไขมันอินทรีย์

อัตราส่วน 1:4 แม้ว่าจะมีการผลิตก๊าซอย่างต่อเนื่อง แต่ปริมาณการผลิตค่อนข้างน้อยกว่าอัตราส่วน 1:3 โดยคงอยู่ที่ 3.08 ลิตร ตั้งแต่วันที่ 11 จนถึงสิ้นสุดการทดลอง อาจเป็นเพราะปริมาณกาก

มันสำปะหลังที่น้อยเกินไปในอัตราส่วนนี้ ทำให้สารอาหารไม่เพียงพอสำหรับจุลินทรีย์ จึงทำให้การผลิตก๊าซชะลอตัวลงหลังจากช่วงเวลาหนึ่ง

อัตราส่วน 1:2 แม้ว่าจะเริ่มผลิตก๊าซในวันที่ 5 แต่การผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ที่ 3.52 ลิตร ตลอดช่วงเวลาทดลอง ไม่เพิ่มขึ้นเท่ากับอัตราส่วน 1:3 การผลิตที่น้อยนี้แสดงให้เห็นว่าในสถานะที่มีปริมาณกากมันสำปะหลังมากกว่า ปริมาณน้ำเสียที่มีอาจไม่เพียงพอที่จะสนับสนุนการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์ได้เต็มที่ ทำให้การผลิตก๊าซไม่เพิ่มขึ้นต่อเนื่อง

ในขณะที่อัตราส่วน 1:1 และ 1:5 มีการผลิตก๊าซน้อยที่สุด โดยผลิตได้เพียง 0.44 และ 1.76 ลิตร และไม่เพิ่มขึ้นอีกจนถึงสิ้นสุดการทดลอง การผลิตก๊าซที่น้อยนี้ น่าจะเกิดจากการที่ปริมาณน้ำเสียไม่เพียงพอในการเจริญงอกงามที่ยั่งยืนในอัตราส่วน 1:1 หรือในกรณีของอัตราส่วน 1:5 มีปริมาณน้ำมากเกินไป ทำให้สารอาหารเจือจางจนไม่สามารถสนับสนุนการทำงานของจุลินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้น สรุปได้ว่าอัตราส่วน 1:3 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพในการทดลอง เนื่องจากอัตราส่วนของน้ำเสียและกากมันสำปะหลังมีความสมดุลที่ช่วยสนับสนุนการทำงานของจุลินทรีย์ในการหมักอย่างเต็มที่ ขณะที่อัตราส่วนอื่น ๆ ไม่แสดงประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซได้มากเท่ากับอัตราส่วนนี้

4.3 การเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพของการกวนผสม กากมันสำปะหลังกับน้ำเสีย ในถังหมักขนาด 80 ลิตร

ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของความเร็วยกในการกวนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพเป็น

บทความวิจัย (Research Article)

สิ่งสำคัญ เนื่องจากความเร็วรอบมีผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของจุลินทรีย์และการเข้าถึงสารอาหารในถังหมัก



รูปที่ 8 ถังหมักขนาด 80 ลิตร ทั้ง 2 ถัง

งานวิจัยของ Aznury [5] และคณะแสดงให้เห็นว่าการควบคุมความเร็วรอบที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างมาก โดยในการทดลองใช้ความเร็วรอบ 102 รอบต่อนาที ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดที่ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ที่สำคัญระหว่างความเร็วรอบกับปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ

ดังนั้น การทดลองในหัวข้อนี้จึงออกแบบมาเพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของการใช้ความเร็วรอบต่ำ (45 รอบต่อนาที) และความเร็วรอบสูง (110 รอบต่อนาที) ต่อปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพในถังหมักขนาด 80 ลิตร ดังรูปที่ 8 ซึ่งการบันทึกปริมาณก๊าซจะถูกบันทึกทุกวันเป็นระยะเวลา 13 วัน ผลการทดลองจะแสดงในตารางที่ 5 เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพระหว่างถังที่ใช้ความเร็วรอบต่างกัน การทดลองนี้ใช้ถังหมัก 2 ถัง โดยแต่ละถังหมักถูกตั้งให้มี

ความเร็วรอบต่างกันตามที่กล่าวไว้ การวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกบันทึกทุกวันเป็นระยะเวลา 13 วัน ผลการทดลองจะแสดงดังนี้

ตารางที่ 6 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักระหว่างถังหมักที่ใช้ความเร็วรอบ 45 รอบต่อนาที กับถังหมักที่ใช้ความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาที

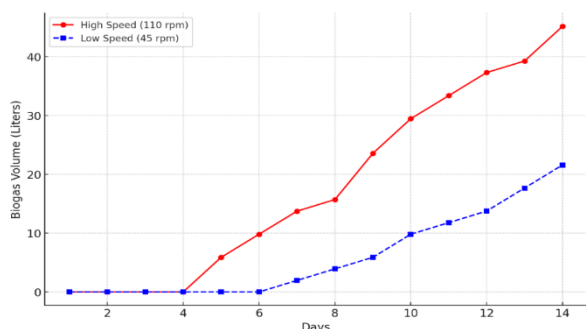
วันที่	ความเร็วรอบ 45 รอบต่อนาที (ลิตร)	ความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาที (ลิตร)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	5.88
6	0	9.81
7	1.96	13.73
8	3.92	15.7
9	5.88	23.55
10	9.81	29.44
11	11.77	33.36
12	13.75	37.29
12	17.66	39.25
13	21.58	45.14

จากตารางที่ 6 แสดงผลการทดลองที่เปรียบเทียบความเร็วรอบในการกวน ส่วนผสมกากมันสำปะหลังและน้ำเสียต่อปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพในถังหมักขนาด 80 ลิตร โดยใช้ความเร็วรอบต่ำ 45 รอบต่อนาทีและความเร็วรอบสูง 110 รอบต่อนาที ในถังที่ใช้ความเร็วรอบสูง เริ่มมีการผลิตก๊าซชีวภาพในวันที่ 5 โดยผลิตได้ 5.88 ลิตร และปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 13 ซึ่งมีปริมาณก๊าซสูงสุดที่ 45.14

บทความวิจัย (Research Article)

ลิตร ในขณะที่ถังที่ใช้ความเร็วรอบต่ำเริ่มผลิตก๊าซในวันที่ 7 โดยปริมาณการผลิตเพียง 1.96 ลิตร และเพิ่มขึ้นช้ากว่า โดยในวันที่ 13 มีปริมาณก๊าซสูงสุดเพียง 21.58 ลิตร

รูปที่ 9 แสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างถังหมักทั้งสอง แสดงให้เห็นว่าความเร็วรอบสูงช่วยให้ปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นรวดเร็วกว่าความเร็วรอบต่ำ การกวนที่เร็วขึ้นช่วยให้จุลินทรีย์และสารอาหารกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ทำให้กระบวนการหมักเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 9 กราฟแสดงปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักระหว่างถังหมักที่ใช้ความเร็วรอบ 45 รอบต่อนาที กับถังหมักที่ใช้ความเร็วรอบ 110 รอบต่อนาที

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความเร็วรอบในการกวนส่วนผสมของกากมันสำปะหลังและน้ำเสียมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ การใช้ความเร็วรอบสูง (110 รอบต่อนาที) ในถังหมักแสดงให้เห็นว่ามีการผลิตก๊าซที่เริ่มต้นเร็วกว่าและปริมาณการผลิตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตลอดการทดลอง ซึ่งปริมาณสูงสุดที่ได้จากการใช้ความเร็วรอบสูงคือ 45.14 ลิตรในวันที่ 13 ในทางตรงกันข้าม ถังหมักที่ใช้ความเร็วรอบต่ำ (45

รอบต่อนาที) แสดงผลลัพธ์ที่ช้ากว่า โดยเริ่มผลิตก๊าซในวันที่ 7 และปริมาณก๊าซสูงสุดในวันที่ 13 เพียง 21.58 ลิตร ซึ่งน้อยกว่าถังที่ใช้ความเร็วรอบสูงถึงเกือบครึ่งหนึ่ง

การกวนที่ความเร็วรอบสูงส่งผลให้จุลินทรีย์ในถังหมักสามารถเข้าถึงสารอาหารได้ดีกว่า เนื่องจากการกระจายตัวของส่วนผสมมีความสม่ำเสมอมากขึ้น ส่งผลให้การหมักเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพมากกว่า ในกระบวนการหมัก การกระจายตัวที่ดีของสารอาหารและจุลินทรีย์มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสำหรับการทำปฏิกิริยา และทำให้สารอาหารที่มีอยู่สามารถถูกจุลินทรีย์ใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ การเพิ่มความเร็วรอบในการกวนช่วยลดปัญหาการตกตะกอนของกากมันสำปะหลัง และป้องกันไม่ให้เกิดการหมักที่ไม่สมบูรณ์ในส่วนต่าง ๆ ของถัง

นอกจากนี้ การกวนด้วยความเร็วสูงยังช่วยเพิ่มการถ่ายเทออกซิเจนในช่วงต้นของการหมัก ซึ่งอาจช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระยะแรกของการผลิตก๊าซ และส่งผลให้การหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนเกิดขึ้นได้เร็วขึ้นหลังจากหมักออกซิเจน การทดลองนี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความเร็วรอบสูงในการกวนเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลดีต่อกระบวนการหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าการใช้ความเร็วรอบสูง (110 รอบต่อนาที) มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังมากกว่าการใช้ความเร็วรอบต่ำ (45 รอบต่อนาที) อย่างชัดเจน ซึ่งนับว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ควรพิจารณาในการออกแบบและควบคุมการทำงานของถังหมักในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

บทความวิจัย (Research Article)

5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนจากกากมันสำปะหลังร่วมกับน้ำเสีย โดยมุ่งเน้นการค้นหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดของวัตถุดิบ และผลกระทบของชนิดกากมันสำปะหลังและความเร็วรอบในการกวนที่มีต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วน 1:3 ระหว่างกากมันสำปะหลังและน้ำเสียเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งมีปริมาณการผลิตสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วนอื่น นอกจากนี้ ความเร็วรอบการกวนที่ 110 รอบต่อนาที ส่งผลให้การผลิตก๊าซเริ่มต้นเร็วขึ้นและมีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบ 45 รอบต่อนาที โดยมีปริมาณ 45.14 ลิตร และ 21.58 ลิตร ตามลำดับ

จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าการควบคุมอัตราส่วนวัตถุดิบ ชนิดของกากมันสำปะหลัง และความเร็วรอบในการกวนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานทางเลือกจากก๊าซชีวภาพ

การทดลองเพิ่มเติมในอนาคตควรพิจารณาอัตราส่วนของกากมันสำปะหลังและน้ำเสียที่หลากหลายมากขึ้น เช่น อัตราส่วนที่ต่ำกว่า 1:3 หรือสูงกว่า 1:5 เพื่อค้นหาอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การศึกษาควรวิเคราะห์ปัจจัยอื่นที่อาจมีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เช่น อุณหภูมิ ค่า pH และชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ นอกจากนี้ การทดลองกับแหล่งน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ ที่มีคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันจะช่วยให้ทราบถึงศักยภาพของแหล่งน้ำเสียอื่นๆ

ในการผลิตก๊าซชีวภาพ การศึกษาระยะเวลาการหมักที่เหมาะสมควรถูกพิจารณาเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดเวลาในการหมัก การวิเคราะห์ความเร็วรอบการกวนในระดับที่มากกว่านี้ เช่น 75 รอบต่อนาที อาจช่วยให้ทราบถึงความสัมพันธ์ที่ชัดเจนระหว่างความเร็วรอบและปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ เพื่อความยั่งยืน การศึกษาควรหาวัตถุดิบที่มีราคาถูกหรือสามารถจัดหาได้ในปริมาณมากเพื่อลดต้นทุนการผลิต และควรพัฒนารูปแบบการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมและชุมชนอย่างมีประสิทธิภาพ

การศึกษานี้มีข้อจำกัดด้านสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิและความชื้น ซึ่งอาจส่งผลต่อความแม่นยำของผลการทดลอง นอกจากนี้ ระยะเวลาการทดลองที่จำกัดอาจส่งผลให้การหาปัจจัยที่เหมาะสมทำได้ไม่ครอบคลุมทุกตัวแปร และชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยอาจไม่สามารถสรุปผลไปยังวัตถุดิบจากแหล่งอื่นที่มีคุณสมบัติต่างกันได้โดยตรง การพัฒนาการทดลองในอนาคตควรมุ่งเน้นการควบคุมปัจจัยแวดล้อมและการขยายขอบเขตของชนิดวัตถุดิบที่ศึกษาเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมและแม่นยำยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. M. P. Santos, A. L. S. Castro, K. R. Salomon, T. S. O. Souza, and D. Vich, "Global research trends on anaerobic digestion and biogas production from cassava wastewater: A bibliometric analysis," J. Chem. Technol. Biotechnol., vol. 96, no. 11, pp. 3035–3050, Nov. 2021, doi: 10.1002/jctb.6976.

บทความวิจัย (Research Article)

- [2] P. Kohmuean, N. Boonrod, and A. Wongkoblap, "Biogas production from cassava waste: effect of concentration," in *Proc. Int. Conf. Mater. Sci. Eng.*, vol. 778, May 2020, pp. 1–9, doi: 10.1088/1757-899X/778/1/012115.
- [3] I. A. Cruz, L. R. S. Andrade, A. A. Jesus, B. Vasconcelos, R. Bharagava, M. Bilal, R. T. Figueiredo, and R. L. Souza, "Potential of eggshell waste derived calcium for sustainable production of biogas from cassava wastewater," *SSRN Electron. J.*, Aug. 2022, doi: 10.2139/ssrn.4163678.
- [4] N. Sawyerr, C. Trois, and T. Workneh, "Optimization of biogas yield through co-digestion of cassava biomass and vegetable & fruits waste at mesophilic temperatures," *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 915–926, Jun. 2019, doi: 10.20508/ijrer.v9i2.9151.g7665.
- [5] E. M. Aznury, M. T. Endang, and I. Yudanto, "The influence of stirring speed on biogas production from cow dung using an anaerobic batch digester," *MATEC Web of Conferences*, vol. 268, p. 06001, 2019, doi: 10.1051/matecconf/201926806001.
- [6] Y. S. Ahou, J. B. B. Angeli, S. Awad, L. Baba-Moussa, and Y. Andrés, "Lab-scale anaerobic digestion of cassava peels: The first step of energy recovery from cassava waste and water hyacinth," *Environ. Technol.*, vol. 41, no. 22, pp. 2916–2926, Oct. 2019, doi: 10.1080/09593330.2019.1670266.
- [7] C. G. Achi, A. Hassanein, and S. Lansing, "Enhanced biogas production of cassava wastewater using zeolite and biochar additives and manure co-digestion," *Energies*, vol. 13, no. 2, pp. 491–508, Jan. 2020, doi: 10.3390/en13020491.