



## การผลิตแก๊สชีวภาพโดยระบบยูเอเอสปีจากน้ำเสียโรงงานแปรรูปสับปะรดร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์จากตะกอนเลนบ่อกึ่ง

ญาณิศา ละอองอุทัย และ วชิรา ดาวสุด\*

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 3810 2222 ต่อ 119 อีเมล: wachira@eng.buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.06.008

รับเมื่อ 15 กันยายน 2565 แก้ไขเมื่อ 22 พฤศจิกายน 2565 ตอรับเมื่อ 15 ธันวาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 19 มิถุนายน 2567

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมทางการเกษตรเป็นน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมากซึ่งเป็นปัญหาหลักของมลพิษทางสิ่งแวดล้อมหากมีการรั่วไหลสู่พื้นดินหรือแหล่งน้ำ งานวิจัยนี้จึงเสนอวิธีการลดปริมาณสารอินทรีย์และเปลี่ยนน้ำเสียเป็นพลังงานทดแทน ซึ่งได้ออกแบบและสร้างระบบการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียเป็นระบบยูเอเอสปี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket; UASB) โดยทำการทดลองเพื่อหาสภาวะในการผลิตที่เหมาะสมที่สุดและนำมาผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบยูเอเอสปีที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น จากผลการทดลองการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปสับปะรดพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุด คือ สภาวะที่มีการใช้วัสดุตรึงจุลินทรีย์ CAC (Cray/Activated Carbon) ร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์ที่มาจากตะกอนเลนบ่อกึ่ง ซึ่งให้ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้มากกว่าสภาวะที่ไม่มีการใช้วัสดุตรึงจุลินทรีย์ถึง 2.6 เท่า โดยระบบการผลิตแก๊สชีวภาพที่เสนอนี้สามารถผลิตแก๊สชีวภาพและบำบัดน้ำเสียได้พร้อมกัน ซึ่งสามารถลดค่าซีโอดีในน้ำเสียได้ อีกทั้งยังมีศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพได้อย่างน่าพอใจ โดยแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนประมาณ 24.74% ผลที่ได้จากงานวิจัยแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบยูเอเอสปีจากน้ำเสียของโรงงานแปรรูปสับปะรด

**คำสำคัญ:** ระบบยูเอเอสปี การตรึงจุลินทรีย์ แก๊สชีวภาพ ตะกอนเลนบ่อกึ่ง



## Biogas Production from Pineapple Industry Wastewater Using UASB with Microbial Immobilization from Shrimp Pond Sludge

Yanisa Laoong-u-thai and Wachira Daosud\*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chon Buri, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 0 3810 2222, E-mail: wachira@eng.buu.ac.th DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.06.008

Received 15 September 2022; Revised 22 November 2022; Accepted 15 December 2022; Published online: 19 June 2024

© 2024 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

Agricultural industrial wastewater contains high organic loading from a production process, which is the main problem of environmental pollution in case it leaks to an open landfill or water resources. This research aims to propose a method of reducing organic content and converting wastewater into renewable energy. The Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) system was designed and established for biogas production and biological wastewater treatment from the agricultural industry waste. A suitable condition for biogas production from pineapple industry wastewater was performed and investigated and then applied in the designed UASB system. The result showed that the fermentation condition for submerging CAC (Cray/Activated Carbon) with microbial immobilization from shrimp pond sludge enhanced biogas production to 2.6 times and treated wastewater at the same time. The designed system reduced the COD value of wastewater and also produced biogas in a satisfactory way with approximately 24.74% of methane. Therefore, the application of the designed UASB system reveals the possibility and promising way of biogas production from pineapple wastewater.

**Keywords:** UASB System, Microbial Immobilization, Biogas, Shrimp Pond Sludge

Please cite this article as: Y. Laoong-u-thai and W. Daosud, "Biogas production from pineapple industry wastewater using UASB with microbial immobilization from shrimp pond sludge," *The Journal of KMUTNB*, vol. 34, no. 4, pp. 1–13, ID. 244-036330, Oct.–Dec. 2024 (in Thai).

## 1. บทนำ

ในปัจจุบันความต้องการใช้เชื้อเพลิงและพลังงานมีจำนวนเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเพิ่มจำนวนประชากรที่มากขึ้นเรื่อย ๆ แต่ในขณะเดียวกันเชื้อเพลิงและพลังงานกลับมีปริมาณค่อนข้างจำกัด ดังนั้นจึงส่งผลให้เกิดการหาพลังงานมาใช้ทดแทน เทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) เริ่มมีบทบาทมากขึ้นในการบำบัดน้ำเสียซึ่งอาจมาจากขยะมูลฝอย โรงงานอุตสาหกรรมทางการเกษตร หรือฟาร์มสัตว์เลี้ยง เนื่องจากการบำบัดด้วยวิธีนี้ให้ผลพลอยได้เป็นแก๊สชีวภาพ (Biogas) [1], [2] โดยองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพจะมีแก๊สมีเทนประมาณ 65–70% แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 28–38% และแก๊สอื่น ๆ เช่น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และแก๊สไนโตรเจนเป็นต้น ประมาณ 2–3% ซึ่งแก๊สมีเทนเป็นแก๊สที่ให้ค่าพลังงานความร้อนสูง [2] ดังนั้นแก๊สชีวภาพจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนได้ อีกทั้งการจัดการของเสียและน้ำเสียด้วยเทคโนโลยีแก๊สชีวภาพยังสามารถช่วยลดปัญหามลพิษทางน้ำด้วยการบำบัดและลดสารปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ซึ่งเป็นการช่วยลดปัญหากลิ่นเหม็นและแมลง ทั้งยังทำลายแหล่งเพาะพันธุ์และป้องกันการแพร่กระจายของเชื้อโรค รวมถึงช่วยลดอัตราการเกิดภาวะเรือนกระจกจากการลดปริมาณการปล่อยแก๊สมีเทนสู่บรรยากาศได้อีกด้วย [3] ในเขตภาคตะวันออกเฉียงของประเทศไทยเป็นนิคมอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับสารอินทรีย์ จึงทำให้เกิดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนจากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก ซึ่งน้ำเสียเหล่านี้สามารถนำมาเป็นสารตั้งต้นเพื่อใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพทำให้เกิดพลังงานทดแทนที่ได้จากของเสีย จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำเสียอีกทางหนึ่งที่น่าสนใจ ระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียมีหลากหลายระบบที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยส่วนใหญ่จะเป็นระบบที่ใช้พื้นที่มากแต่ค่าใช้จ่ายถูก เช่น 1) ระบบบ่อไร้อากาศ (Anaerobic Ponds) เป็นระบบบ่อที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมมากที่สุดเนื่องจากค่าใช้จ่ายถูกสุด แต่มีข้อเสียคือ เกิดกลิ่นเหม็นรบกวน 2) ระบบบ่อไร้อากาศแบบคลุมบ่อ (Anaerobic Covered

Lagoons) ทัวไปเป็นบ่อดินที่มีการคลุมคลุมบ่อเพื่อเก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและนำไปใช้ประโยชน์ 3) ระบบ Anaerobic Baffle Reactor (ABR) เป็นบ่อยาวและมีแผ่นกั้นในแนวตั้งหลายแผ่นวางสลับกัน เพื่อบังคับทิศทางของไหลขึ้นลงสลับกันไป ระบบนี้สามารถใช้กับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง แต่มีขนาดใหญ่และต้องใช้พื้นที่มากในการเกษตรระบบ [4]–[6] ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบการผลิตแก๊สชีวภาพให้มีพื้นที่ลดลงโดยการออกเป็นระบบถังปฏิกรณ์ โดยระบบหนึ่งที่น่าสนใจใช้ในอุตสาหกรรม คือ ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket; UASB) เป็นระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียที่ใช้หลักการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์ ซึ่งน้ำเสียจะไหลผ่านชั้นตะกอนจุลินทรีย์ โดยไม่มีตัวกลางให้จุลินทรีย์เกาะ จากนั้นน้ำเสียถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน แล้วทำให้เกิดแก๊สชีวภาพ ระบบนี้เป็นระบบที่มีความน่าสนใจเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีชีวภาพแบบไร้ออกซิเจนที่ได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูง ใช้พื้นที่น้อยกว่าระบบบ่อไร้อากาศทั่ว ๆ ไป และมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบต่ำ สามารถรับภาระสารอินทรีย์ได้สูงกว่าระบบไม่ใช้อากาศแบบอื่น ๆ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งการผลิตแก๊สชีวภาพและบำบัดน้ำเสียพร้อมกัน รวมถึงไม่ทำให้เกิดปัญหาเรื่องการอุดตัน เนื่องจากตะกอนรวมกันเป็นเม็ด [3] นอกจากนี้ระบบถังปฏิกรณ์อื่น ๆ ที่พัฒนาโดยการเพิ่มระบบการกวนและระบบอื่น ๆ ที่ซับซ้อนขึ้น เช่น การตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการย่อยสลายแต่ที่ตามมาคือค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบสูง ตัวอย่าง เช่น ระบบถังกวนผสมแบบไม่ใช้อากาศ Completely Stirred Tank Reactor (CSTR) ระบบตรึงฟิล์มจุลินทรีย์ (Anaerobic Fixed Film; AFF) เป็นต้น [4]–[6]

แต่เนื่องจากการในการผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อให้ได้ผลผลิตจำนวนมาก จำเป็นต้องมีหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตและระบบที่เหมาะสมสำหรับการผลิตร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์ [7] ซึ่งได้เคยวิจัยและศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากของเสียตะกอนเลนบ่อกุ้งร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์บนวัสดุตรึง CAC (Clay/Activated Carbon) พบว่า ในตะกอนเลนดังกล่าวมีจุลินทรีย์ที่มีความสามารถ

ในการผลิตแก๊สชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยพบจุลินทรีย์ที่อยู่บนวัสดุตรึงที่สำคัญ ตัวอย่างคือ *Clostridium cellobio-parum*, *Tolomonas auensis*, *Microbacter mar-gulisiae*, *Methanobacterium aggregans* เป็นต้น [5]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์ที่ได้จากตะกอนเลนบ่อกึ่งซึ่งเป็นของเสียที่มีจุลินทรีย์ที่มีศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ [8] อีกทั้งเป็นของเสียที่เกิดขึ้นมากจากการเลี้ยงกุ้งในภาคตะวันออกของประเทศไทย [9] และทำการออกแบบรวมไปถึงสร้างเครื่องปฏิกรณ์และระบบในการผลิตแก๊สชีวภาพซึ่งเป็นระบบยูเอเอสบี (UASB) จากของเสียอินทรีย์ร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์ เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพจากระบบที่ออกแบบดังกล่าวในสภาวะที่เหมาะสมที่สุด

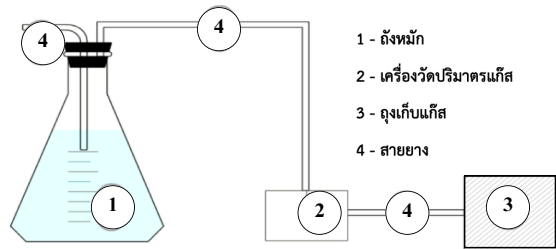
## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ

ขั้นตอนในการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพสามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนหลักดังนี้

#### 2.1.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำเสีย

ในการผลิตแก๊สชีวภาพจะใช้น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปสัปะรดเป็นสารตั้งต้นในการหมัก ซึ่งเก็บตัวอย่างจากบ่อน้ำเสียหลังกระบวนการผลิตแบบเปิด น้ำเสียดังกล่าวจะถูกนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนการหมักเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งเรียกว่าเป็นน้ำเสียขาเข้า โดยจะวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids; TS) ปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids; TDS) ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids; TSS) ปริมาณของแข็งระเหยทั้งหมด (Total Volatile Solids; TVS) ค่าความต้องการออกซิเจน BOD (Biochemical Oxygen Demand) หรือ COD (Chemical Oxygen Demand) ด้วยวิธีมาตรฐาน (Federation & Association, 2005) และค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนและไนโตรเจน (C/N Ratio) ด้วยวิธี Walkley-Black และ Total Kjeldahl Nitrogen (TKN) สำหรับคาร์บอนและไนโตรเจน ตามลำดับวิเคราะห์ที่ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1 ระบบเอเอสบีอาร์โดยใช้เครื่องวัดปริมาตรแก๊ส

เกษตรศาสตร์ ประเทศไทย) ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของน้ำเสียที่มีผลต่อปริมาณการเกิดแก๊สชีวภาพ [10]

#### 2.1.2 การหมักน้ำเสียร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์

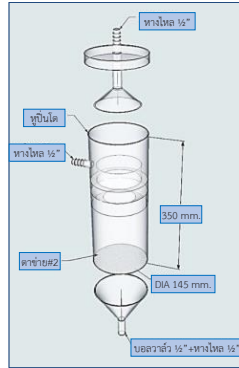
ในการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปสัปะรดจะถูกนำมาหมักเพื่อทดสอบการผลิตแก๊สชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการโดยระบบเอเอสบีอาร์ (Anaerobic Sequencing Batch Reactor) ดังรูปที่ 1

น้ำเสียถูกนำมาปรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ให้เท่ากับ 7 ก่อนเริ่มการหมัก จากนั้นทำการบรรจุน้ำเสียปริมาตร 500 มิลลิลิตร ลงในถังหมักขนาด 1 ลิตร โดยทำการศึกษาสภาวะการหมัก 3 สภาวะ คือ สภาวะแรกเป็นสภาวะที่ไม่เติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์ สภาวะที่สองจะเติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์คือ CAC ปริมาณ 5 กรัม และสภาวะที่สามจะเติมหัวเชื้อเริ่มต้นและวัสดุตรึงจุลินทรีย์โดยแช่ CAC 5 กรัม ในตะกอนเลนบ่อกึ่ง 30 มิลลิลิตรเป็นเวลา 1 วัน เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สชีวภาพในสภาวะที่มีหัวเชื้อเริ่มต้นในการหมักและมีวัสดุตรึงจุลินทรีย์ โดยในการหมักจะทำการป้อนน้ำเสียและดึงน้ำออกจากระบบด้วยปริมาตร 33 มิลลิลิตรต่อวันทั้ง 3 สภาวะ และบันทึกปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นทุกวัน ด้วยเครื่องวัดปริมาตรแก๊ส (Bubble Counter) (Thai Amp Electronic, Thailand)

ดำเนินการหมักน้ำเสียทั้ง 3 สภาวะเป็นเวลา 15 วัน และเก็บตัวอย่างน้ำขาออกทุกวันตลอดระยะเวลาของการหมักเพื่อวิเคราะห์ค่าซีไอดี รวมถึงวิเคราะห์ปริมาณของแข็ง (Solids) หลังจากการหมักเสร็จสิ้นแล้ว

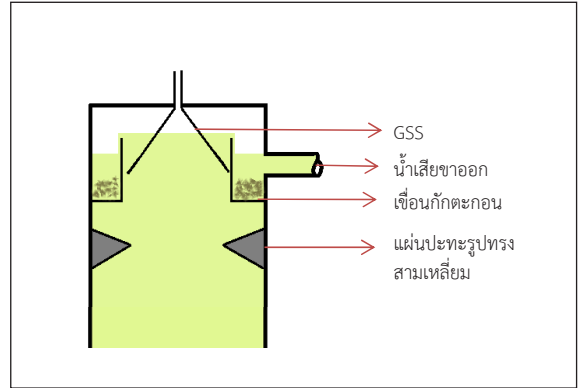


(ก)



(ข)

รูปที่ 2 ถังหมักแบบยูเอเอสพี (ก) ถึงที่ประกอบสมบูรณ์ และ (ข) องค์ประกอบถังหมักแบบยูเอเอสพี



รูปที่ 3 ส่วน GSS เชื้อนกกักตะกอนและแผ่นปะทะของถังหมักแบบยูเอเอสพี

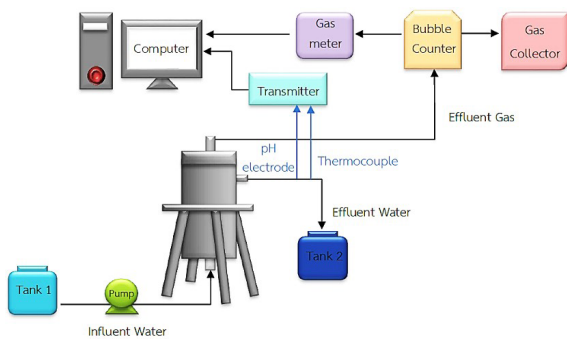
## 2.2. การออกแบบถังหมักระบบยูเอเอสพีร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์

การออกแบบถังหมักระบบยูเอเอสพีเพื่อหมักแก๊สชีวภาพจากของเสียอินทรีย์ร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์ ได้ทำการออกแบบถังหมักระบบยูเอเอสพีให้มีลักษณะเป็นถังปิดรูปทรงกระบอกทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L ซึ่งมีคุณสมบัติทนการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำได้ดี มีปริมาตรที่ใช้ในการหมัก 4.65 ลิตร ความสูงและเส้นผ่าศูนย์กลางของของถังเท่ากับ 35 และ 14.50 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 (ก) และ (ข) ถังหมักถูกออกแบบให้มีขาตั้งเพื่อยกส่วนตัวถังให้สูงขึ้น ทำให้ป้อนน้ำเสียเข้าทางด้านล่างของถังหมักได้สะดวก ในส่วนของช่องขาเข้าของน้ำเสีย มีการติดตั้งวาล์วเปิด/ปิด เพื่อให้สามารถควบคุมอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียได้ ในส่วนของ Gas-Solid Separator (GSS) ของถังซึ่งเป็นส่วนที่ทำหน้าที่แยกแก๊สชีวภาพออกจากของผสมระหว่างแก๊สชีวภาพ น้ำ และมีตะกอนจุลินทรีย์ ออกแบบให้ติดกับฝาถังเพื่อง่ายต่อการถอดล้าง โดยให้ส่วนบนของ GSS เป็นฝาลังที่สามารถเปิดและปิดได้ด้วยหูปิดเพื่อช่วยให้ปิดได้แน่นมากขึ้น โดย GSS ที่ทำหน้าที่แยกแก๊สขึ้นไปยังภาชนะบรรจุนั้นมีลักษณะคล้ายกรวยที่ห้ามุม 40 องศา ดังรูปที่ 2 (ข)

จากรูปที่ 3 เพื่อให้แก๊สลอยขึ้นสู่ GSS ได้ จึงออกแบบให้มีแผ่นปะทะที่มีรูปทรงสามเหลี่ยมยื่นออกมาจากผนังด้าน

ในของถัง โดยอาศัยหลักการที่น้ำสามารถไหลเลี้ยวไปมาได้ ในขณะที่แก๊สมีการลอยตัวจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนเป็นเส้นตรงเท่านั้น ยกเว้นมีสิ่งกีดขวางหรือแผ่นปะทะใด ๆ มาเปลี่ยนทิศทางการลอยตัวขึ้น หลังจากผ่านพื้นสิ่งกีดขวางนั้นแล้วก็จะลอยตัวเป็นเส้นตรงดั้งเดิม จึงติดตั้งแผ่นปะทะที่มีลักษณะทรงสามเหลี่ยมยื่นออกมาเพื่อขวางทิศทางไหล ทำให้น้ำและแก๊สมาปะทะแล้วเบี่ยงเบนการไหลของน้ำและแก๊สออกจากกัน หากปิดฝาเข้ากับตัวถัง ตำแหน่งของ GSS จะอยู่ระหว่างเชื้อน้ำล้นกับผนังสามเหลี่ยมพอดี และมีส่วนที่เป็นเชื้อนกกักตะกอนก่อนที่น้ำจะออกจากถังหมักเพื่อไม่ให้ตะกอนไหลออกไปกับน้ำและยังมีส่วนช่วยให้ตะกอนจุลินทรีย์ตกลงสู่ชั้นตะกอนด้านล่างทำให้ตะกอนจุลินทรีย์ในถังหมักหลุดออกไปกับน้ำที่ระบายออกน้อยลง ด้านล่างของถังติดตั้งตะแกรงไว้เพื่อช่วยในการกั้นตะกอนให้ลอยตัวอยู่เป็นชั้นตะกอนไม่ให้จมลงสู่ก้นถัง

โดยทั่วไป ก้นถังหมักแบบยูเอเอสพีจะมีลักษณะแบนราบ จึงทำให้เกิดปัญหาเดดโซน (Dead Zone) [11] จึงออกแบบก้นถังให้มีลักษณะเป็นกรวยสามเหลี่ยมซึ่งนอกเหนือจากจะเป็นการป้องกันการเกิดเดดโซนแล้วยังเป็นการช่วยให้การไหลเป็นไปได้อย่างขึ้นอีกด้วย อีกทั้งส่วนตัวถังยังถูกออกแบบให้สามารถแยกส่วนออกจากขาตั้งได้เพื่อความสะดวกในการทำทำความสะอาดถังหมักและการเก็บรักษา



รูปที่ 4 ชุดทดลองการหมักแก๊สชีวภาพด้วยระบบยูเอเอสบี ร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์

### 2.3 การผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบยูเอเอสบี ร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์

ในการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบยูเอเอสบี ร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์ที่ได้สร้างและออกแบบไว้จะดำเนินการหมักแบบไหลต่อเนื่อง โดยทำการติดตั้งรูปแบบของชุดการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4

การหมักแก๊สชีวภาพด้วยระบบนี้จะกำหนดให้ระยะเวลาการกักเก็บของเหลวในถังหมัก (Hydraulic Retention Time; HRT) เป็นเวลา 15 วัน ดังนั้นจะมีอัตราการป้อนเข้าของน้ำเสียเท่ากับ 310 มิลลิลิตรต่อวัน ระยะเวลาในการหมักทั้งสิ้น 23 วัน เพื่อให้แน่ใจว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) ทำการหมักที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ น้ำเสียเข้าถังหมักถูกปรับค่า pH ให้มีค่าเริ่มต้นก่อนการหมักเท่ากับ 7 และจะถูกปั๊มเข้าทางด้านล่างของถังหมักโดยใช้ปั๊มที่กำหนดอัตราการไหล 310 มิลลิลิตรต่อวัน ซึ่งภายในถังหมักจะมีสารตรึงจุลินทรีย์ชนิด CAC ที่ถูกตรึงจุลินทรีย์จากตะกอนเลนบ่อกึ่งเรียบริ่อยแล้วบรรจุอยู่ [5]

ภายในถังหมักจะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทำให้เกิดเซลล์ของจุลินทรีย์และแก๊สต่าง ๆ ซึ่งแก๊สที่เกิดขึ้นจะเกาะอยู่ตามผิวของตะกอนจุลินทรีย์ การลอยขึ้นของตะกอนจุลินทรีย์ที่มีแก๊สเกาะจะกระทบกับตะกอนแรงที่กั้นไว้บริเวณก้นถังหมัก ซึ่งจะช่วยให้แก๊สหลุดจากน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์จะลอยขึ้นสู่ส่วนที่เก็บแก๊ส น้ำเสีย

จะไหลออกจากถังหมักที่ทางออก ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ตกลงมาแล้วจมตัวลงสู่ส่วนที่เป็นถังหมักอีกครั้งหนึ่ง โดยอาศัยแรงโน้มถ่วง ระหว่างการหมักทำการวัดอุณหภูมิและค่า pH ทุก ๆ 1 นาที โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลและแท่งอิเล็กโทรดสำหรับวัดค่า pH ตามลำดับ จากนั้นข้อมูลค่าอุณหภูมิและค่า pH จะถูกบันทึกโดยระบบคอมพิวเตอร์ผ่านตัวแปลงข้อมูล (Transmitter) จากข้อมูลอะนาล็อกเป็นข้อมูลดิจิทัล (National Instruments, Thailand) ส่วนปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกวัดโดยเครื่องวัดปริมาณแก๊ส (Bubble Counter and Gas Meter) ทุก ๆ 1 นาที และแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกเก็บไว้ในถุงเก็บแก๊ส (Gas Collector) (SKC, United State) เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography) ต่อไป ซึ่งรูปแบบของชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4

### 3. ผลการทดลอง

ผลการทดลองในการหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพและผลการหมักแก๊สชีวภาพด้วยระบบยูเอเอสบี ร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์จากตะกอนเลนบ่อกึ่งสามารถแสดงผลและอภิปรายเป็นลำดับได้ดังนี้

#### 3.1 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักน้ำเสียของโรงงานสับปะรดในสภาวะต่างกัน

น้ำเสียที่เก็บจากบ่อน้ำเสียของโรงงานแปรรูปสับปะรดมีค่า pH ประมาณ 4 จะถูกนำมาปรับค่า pH ให้ได้ค่าเท่ากับ 7 ด้วยการเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นถูกนำไปเข้ากระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ โดย

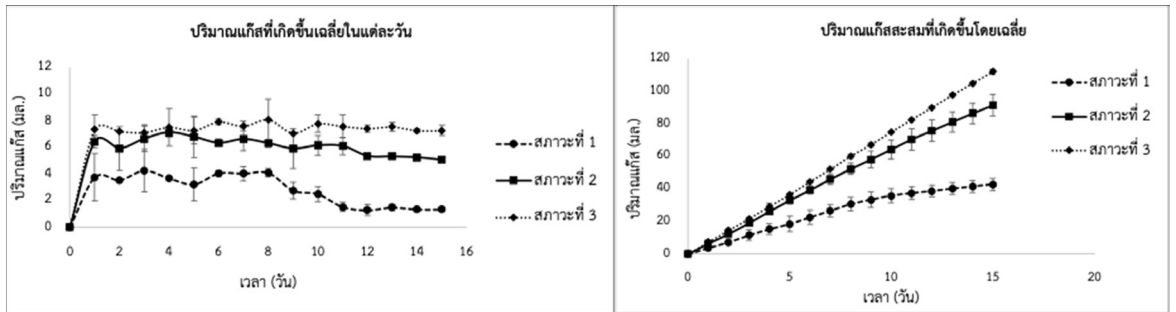
สภาวะต่าง ๆ ที่ทำการทดลองจะมียังประกอบของสารตั้งต้นดังนี้

สภาวะที่ 1 : น้ำเสียที่มีการปรับค่า pH เรียบร้อยแล้ว ซึ่งไม่มีการเติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์

สภาวะที่ 2 : น้ำเสียที่มีการปรับค่า pH เรียบร้อยแล้ว และเติม CAC ปริมาณ 5 กรัมเพื่อเป็นวัสดุตรึงจุลินทรีย์

สภาวะที่ 3 : น้ำเสียที่มีการปรับค่า pH เรียบร้อยแล้ว





(ก) ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นเฉลี่ยในแต่ละวัน

(ข) ปริมาณแก๊สสะสมที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ย

รูปที่ 5 ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการผลิตในระบบเอเอสปีอาร์ (ก) ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นเฉลี่ยในแต่ละวัน และ (ข) ปริมาณแก๊สสะสมที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ย (สภาวะที่ 1 : น้ำเสียที่ไม่มีการเติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์ สภาวะที่ 2 : น้ำเสียที่มีวัสดุตรึงจุลินทรีย์ สภาวะที่ 3 : น้ำเสียที่มีวัสดุตรึงจุลินทรีย์และหัวเชื้อเริ่มต้น)

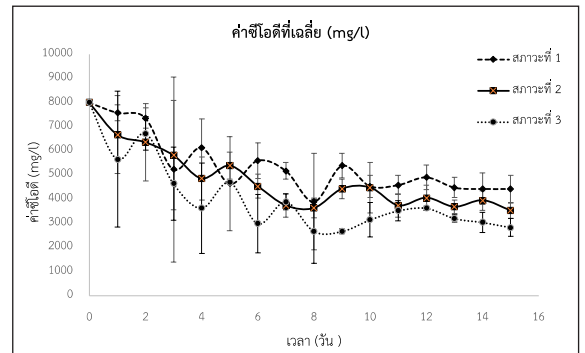
และเติม CAC 5 กรัม เพื่อเป็นวัสดุตรึงจุลินทรีย์โดยใช้ตะกอนเลนบ่อกึ่ง 30 มิลลิกรัมเป็นหัวเชื้อเริ่มต้นที่ตรงกับ CAC

โดยทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยของปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5 (ก) และปริมาณแก๊สสะสมดังรูปที่ 5 (ข) จากการทดลองหมักแก๊สชีวภาพเป็นเวลา 15 วัน พบว่า สภาวะที่ 1 ที่ไม่มีการเติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์สามารถผลิต แก๊สชีวภาพได้เฉลี่ย 42.71 มิลลิลิตร สภาวะที่ 2 ที่มีการเติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ทั้งหมดได้เฉลี่ย 91.28 มิลลิลิตรและสภาวะที่ 3 ที่มีการเติมหัวเชื้อเริ่มต้นร่วมกับวัสดุตรึงจุลินทรีย์สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้เฉลี่ย 111.94 มิลลิลิตร

### 3.2 คุณสมบัติทางเคมีชีวภาพของน้ำเสียก่อนและหลังการหมัก

#### 3.2.1 ค่าซีโอดี (COD)

ในทดลองจะเก็บตัวอย่างน้ำเสียทุกวัน เพื่อนำไปหาค่าซีโอดีของน้ำเสีย โดยน้ำเสียมีค่าซีโอดีเริ่มต้นก่อนการหมักเท่ากับ 8,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และจากการทดลองพบว่าค่าซีโอดีของน้ำเสียจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลาของการหมัก และเริ่มมีค่าคงที่ในวันที่ 10 ของการทดลอง โดยค่าเฉลี่ยแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งพบว่า วันสุดท้ายของการทดลองในสภาวะที่ 3 ที่เติมหัวเชื้อเริ่มต้นร่วมกับวัสดุตรึงจุลินทรีย์จะมีค่าซีโอดีน้อยที่สุดคือ 2,827 ± 370 มิลลิกรัมต่อลิตร รองลงมา

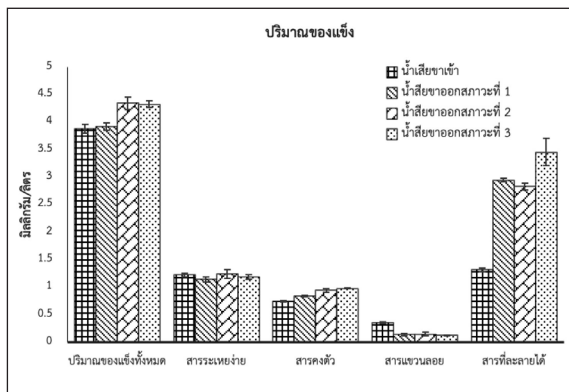


รูปที่ 6 ค่าซีโอดีเฉลี่ยในการผลิตแก๊สในระบบเอเอสปีอาร์ (สภาวะที่ 1 น้ำเสียที่ไม่มีการเติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์ สภาวะที่ 2 น้ำเสียที่มีวัสดุตรึงจุลินทรีย์ และสภาวะที่ 3 น้ำเสียที่มีวัสดุตรึงจุลินทรีย์และหัวเชื้อเริ่มต้น)

เป็นสภาวะที่ 2 ที่เติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์ คือ  $3,520 \pm 320$  มิลลิกรัมต่อลิตร และสภาวะที่ 1 ที่ไม่เติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์คือ  $4,427 \pm 562$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ โดยสภาวะที่เติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์และหัวเชื้อเริ่มต้นจากตะกอนเลนบ่อกึ่งสามารถลดค่าซีโอดีของน้ำเสียจากโรงงานสับปะรดได้มากที่สุด

#### 3.2.2 ปริมาณของแข็ง (Solids)

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งในน้ำเสียนั้นทำโดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียขาออกหลังจากระบบเสร็จสิ้นการหมัก โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids; TS) ของแข็งระเหยง่าย (Total Volatile



**รูปที่ 7** ปริมาณของแข็งเฉลี่ยของน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียขาออกในระบบเอเอสบิโอแอร์ (สภาวะที่ 1 : น้ำเสียที่ไม่มีการเติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์ สภาวะที่ 2 : น้ำเสียที่มีวัสดุตรึงจุลินทรีย์ และสภาวะที่ 3 : น้ำเสียที่มีวัสดุตรึงจุลินทรีย์และหัวเชื้อเริ่มต้น)

Solids; TVS) ของแข็งคงตัว (Total Fixed Solids; TFS) ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid; SS) และของแข็งที่ละลายได้ (Total Dissolved Solids; TDS) ของน้ำเสียขาเข้าและน้ำเสียขาออกทั้ง 3 สภาวะ แสดงผลได้ดังรูปที่ 7

จากรูปที่ 7 พบว่า น้ำเสียก่อนการทดลองและหลังการทดลองในสภาวะที่ 1 มีปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ใกล้เคียงกัน คือ  $3.88 \pm 0.08$  และ  $3.91 \pm 0.07$  มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนการทดลองสภาวะที่ 2 และ 3 มีปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น คือ  $4.34 \pm 0.11$  และ  $4.32 \pm 0.06$  มิลลิกรัมต่อลิตร ในส่วนของแข็งระเหยง่าย (TVS) พบว่า น้ำเสียก่อนหมักและหลังจากการหมักของทั้งสามสภาวะการทดลองมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1.22 \pm 0.04$   $1.14 \pm 0.05$   $1.23 \pm 0.08$  และ  $1.18 \pm 0.04$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

กรณีของปริมาณของแข็งคงตัว (TFS) พบว่า น้ำเสียหลังการทดลองทั้ง 3 สภาวะ มีปริมาณสารคงตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำเสียก่อนการหมัก ( $0.74 \pm 0.02$  มิลลิกรัมต่อลิตร) โดยสภาวะที่ 1 มีปริมาณสารคงตัวน้อยที่สุด ( $0.83 \pm 0.02$  มิลลิกรัมต่อลิตร) ถัดมา คือ สภาวะที่ 2 และ 3 ( $0.94 \pm 0.03$  และ  $0.97 \pm 0.01$  มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ และของแข็ง

แขวนลอย (SS) น้ำเสียก่อนการหมักมีค่าสูงที่สุด คือ  $0.35 \pm 0.02$  มิลลิกรัมต่อลิตร และในสามสภาวะหลังการหมักมีปริมาณลดลงและมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน คือ  $0.13 \pm 0.02$   $0.14 \pm 0.04$  และ  $0.12 \pm 0.01$  มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ในส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (TDS) พบว่า น้ำเสียหลังการหมักมีปริมาณสารที่ละลายได้เพิ่มขึ้นทั้ง 3 สภาวะ อย่างเห็นได้ชัด โดยน้ำเสียก่อนการหมักมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ เท่ากับ  $1.31 \pm 0.03$  มิลลิกรัมต่อลิตร และสภาวะที่ 1 และ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน คือ  $2.94 \pm 0.04$  และ  $2.83 \pm 0.06$  มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่สภาวะที่ 3 ที่เติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์ร่วมกับหัวเชื้อเริ่มต้นมีปริมาณของแข็งละลายได้ เท่ากับ  $3.45 \pm 0.25$  มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่ามากที่สุด

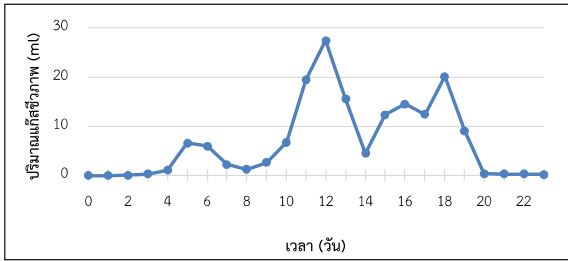
### 3.2.3 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio)

จากการวิเคราะห์ค่า C/N Ratio ของกากตะกอนน้ำเสียที่ผ่านการตากแห้งจากโรงงานแปรรูปสับปะรดได้ค่าเท่ากับ 9.63 ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่าค่า C/N Ratio ที่เหมาะสมกับการผลิตแก๊สชีวภาพซึ่งควรอยู่ระหว่าง 24–26 และพบว่า ที่ค่า C/N Ratio ต่ำ ๆ คือ ประมาณ 10 จะมีการเกิดแก๊สชีวภาพน้อยที่สุด ซึ่งอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีการเกิดแก๊สชีวภาพมากที่สุด คือ 24 [12]

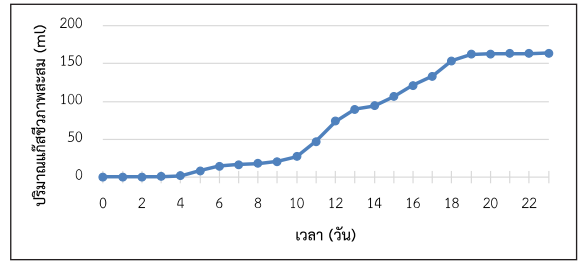
### 3.3 ผลการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบยูเอเอสบีพร้อมกับการตรึงจุลินทรีย์

จากการทดลองหมักแก๊สชีวภาพด้วยระบบยูเอเอสบีพร้อมกับการตรึงจุลินทรีย์ตามสภาวะที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะสังเกตได้ว่า ในช่วงแรกของการหมักเกิดแก๊สชีวภาพในปริมาณน้อยและเริ่มเพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 6 จากนั้นเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 12 ซึ่งได้แก๊สปริมาตร 27.43 มิลลิลิตร เริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) ในวันที่ 20 และไม่เกิดแก๊สขึ้นจนถึงวันที่ 23 ดังแสดงในรูปที่ 8 และแสดงปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากการหมักได้ดังรูปที่ 9 โดยปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมดตลอดระยะเวลาของการหมักรวมทั้งสิ้น 163.88 มิลลิลิตร โดยเกิดแก๊สมีเทนขึ้นเพียง 24.74% เท่านั้น ดังองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ในตารางที่ 1





รูปที่ 8 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักต่อวันด้วยระบบยูเอเอสปีรวมกับการตรึงจุลินทรีย์



รูปที่ 9 ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากการหมักด้วยระบบยูเอเอสปีรวมกับการตรึงจุลินทรีย์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ได้จากการหมักในระบบยูเอเอสปีรวมกับการตรึงจุลินทรีย์

องค์ประกอบแก๊สชีวภาพ	ปริมาณ (%v/v)
มีเทน ( $\text{CH}_4$ )	24.74
ไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ )	0.00
ไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ )	49.06
คาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ )	26.20

#### 4. อภิปรายผลและสรุป

จากผลการทดลองการหมักน้ำเสียของโรงงานสับปะรดในสภาวะต่างกัันดังแสดงในรูปที่ 5 (ก) และ 5 (ข) พบว่าสภาวะที่ 1 ที่ไม่มีการเติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้เฉลี่ย 42.71 มิลลิลิตร ซึ่งมีปริมาณแก๊สในแต่ละวันและแก๊สสะสมน้อยที่สุด ส่วนสภาวะที่ 2 ที่มีการเติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์ สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ทั้งหมดเฉลี่ย 91.28 มิลลิลิตร มากกว่าสภาวะที่ไม่เติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Suyun [13] และ Liu [14] ที่พบว่า การตรึงจุลินทรีย์โดยใช้ถ่านกัมมันต์จะช่วยเพิ่มผลผลิตแก๊สชีวภาพ เพราะถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวมาก เป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ และทำให้จุลินทรีย์เพิ่มจำนวนได้มากขึ้น โดยวัสดุตรึงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ CAC ซึ่งมีถ่านกัมมันต์เป็นองค์ประกอบ และสภาวะที่ 3 ที่มีการเติมหัวเชื้อเริ่มต้นร่วมกับวัสดุตรึงจุลินทรีย์สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้มากที่สุด ผลิตได้เฉลี่ย 111.94 มิลลิลิตร ดังรูปที่ 5 (ข) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์และหัวเชื้อเริ่มต้นช่วยเพิ่มผลผลิตแก๊สชีวภาพจากการเพิ่มพื้นที่ยึดเกาะและเพิ่มจำนวน

จุลินทรีย์ที่ไม่ชอบออกซิเจน โดยส่วนใหญ่คือกลุ่มจุลินทรีย์ผลิตมีเทน (Methanogens) โดยงานวิจัยที่ผ่านมา [8] พบจุลินทรีย์กลุ่มนี้สูงในตะกอนเลนบ่อกึ่ง ซึ่งส่งผลให้มีการผลิตมีเทนที่สูงขึ้นมากกว่าสภาวะที่ไม่มีการเติมหัวเชื้อเริ่มต้น

ในส่วนของค่าซีโอดีพบว่า จากผลการทดลองค่าซีโอดีแสดงดังรูปที่ 6 จะค่อย ๆ ลดลง และเริ่มมีค่าคงที่ในวันที่ 10 ของการทดลองซึ่งพบว่า สัมพันธ์กับปริมาณแก๊สที่เริ่มคงที่ในวันที่ 10 ของการทดลองเช่นกัน ดังแสดงดังรูปที่ 5 โดยพบว่า ปริมาณแก๊สมีค่าเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ค่าซีโอดีมีค่าลดลงซึ่งเป็นไปตามงานวิจัยที่พบว่า การลดลงของค่าซีโอดีส่งผลให้ประสิทธิภาพในการเกิดแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น เนื่องจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตแก๊สชีวภาพทั้งหมดภายในระบบ [15] ทั้งนี้จากการทดลองสามารถลดค่าซีโอดีได้เพียงบางส่วน โดยสภาวะที่ไม่มีการเติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์ สภาวะที่เติมวัสดุตรึงจุลินทรีย์ และสภาวะที่เติมหัวเชื้อเริ่มต้นร่วมกับวัสดุตรึงจุลินทรีย์ สามารถลดค่าซีโอดี ได้ 44.67% 56% และ 64.67% ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นขั้นแรกของการบำบัดน้ำเสียที่ลดค่าซีโอดี 30–60% โดยค่าซีโอดีของน้ำเสียหลังการทดลองยังไม่ผ่านกำหนดค่ามาตรฐานน้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (พ.ศ. 2559) ที่กำหนดให้มีค่า COD ไม่เกิน 120 (สำหรับโรงงานในนิคมอุตสาหกรรม 750) มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นหากต้องการลดค่าซีโอดีให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน สามารถใช้ระยะเวลาในการหมักที่นานขึ้นได้ ดังเช่น งานวิจัยของสฤทธ และคณะ [16] ได้ทำการศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนเลือดสัตว์โดยใช้

ระบบแอนแอโรบิคคอนแทค ใช้เวลาในการย่อยสลาย 65 วัน ที่สามารถลดปริมาณ COD ให้อยู่ในระดับที่ผ่านมาตรฐานได้ คือ 97.2 และ 226.6 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมี COD เริ่มต้นอยู่ที่ 500 และ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ COD ของน้ำขาเข้าเป็น 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า น้ำขาออกเมื่อผ่านไป 65 วัน มี COD อยู่ที่ 1,495.1 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งยังเกินมาตรฐาน อาจเป็นเพราะปริมาณ COD เริ่มต้นที่สูงมีผลทำให้อัตราการย่อยสลายที่ช้าลง อันเนื่องมาจากสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมัก เช่น สารไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid; VFA) สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ทำให้อัตราการย่อยสลายต่ำตามไปด้วย [16], [17]

ปริมาณของแข็งจากผลการทดลองพบว่า ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ในน้ำเสียก่อนการทดลองและหลังการทดลองทุกสภาวะเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากวัสดุตรึงจุลินทรีย์ที่แตกหัก หรือเริ่มมีการย่อยสลายจากกิจกรรมของจุลินทรีย์บางชนิดในน้ำเสีย ในส่วนของแข็งระเหยง่าย (TVS) พบว่าน้ำเสียก่อนหมักและหลังจากการหมักของทั้งสามสภาวะการทดลองมีปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ปริมาณของแข็งคงตัว (TFS) พบว่า น้ำเสียหลังการทดลองทั้ง 3 สภาวะมีปริมาณสารคงตัวเพิ่มมากขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำเสียก่อนการหมัก ซึ่งอาจเกิดจากสารตรึงจุลินทรีย์ที่ใช้ คือ CAC ที่เป็นผงอัดก้อนเกิดการแตก ส่งผลให้ปริมาณสารคงตัวในน้ำเสียเพิ่มมากขึ้น มีแนวโน้มตรงข้ามกับของแข็งแขวนลอย (SS) ที่น้ำเสียก่อนการหมักมีค่าสูงที่สุด อาจเป็นเพราะในกระบวนการหมักมีการย่อยสลายสารแขวนลอยดังกล่าวให้กลายเป็นสารตัวกลางในการผลิตแก๊สชีวภาพ และในส่วนของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (TDS) พบว่า น้ำเสียหลังการหมักมีปริมาณสารที่ละลายได้เพิ่มขึ้นทั้ง 3 สภาวะอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากของแข็งที่ละลายได้บางส่วนหนึ่งมาจากเซลล์ของจุลินทรีย์ โดยในสภาวะที่ 3 มีความเป็นไปได้ว่ามีปริมาณจุลินทรีย์อยู่มากที่สุดซึ่งมาจากหัวเชื้อจากตะกอนเลนบ่อกึ่งและรวมกับเชื้อที่มีอยู่แล้วในน้ำเสีย ทำให้มีปริมาณของสารดังกล่าวมากที่สุดนั่นเอง

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) ของกาก

ตะกอนน้ำเสียผ่านการตากแห้งจากโรงงานแปรรูปสับปะรดพบว่า ค่า C/N Ratio ที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่า C/N Ratio ที่เหมาะสมกับการผลิตแก๊สชีวภาพ คือ ควรอยู่ในช่วง 24-26 ซึ่งในงานวิจัยนี้น้ำสับปะรดมีค่า C/N Ratio อยู่ที่ 9.63 และเป็นไปตามที่ Sialve และคณะ [18] พบว่า ถ้าหากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำมาก ๆ จะทำให้ไนโตรเจนในระบบมากเกินไปและมีการปล่อยไนโตรเจน โดยไนโตรเจนที่ปล่อยอยู่ในรูปแอมโมเนียและแอมโมเนียมไอออน และมีการปล่อยกรดไขมันระเหยได้เข้าสู่ระบบ ซึ่งแอมโมเนียจะไปเพิ่มค่า pH ถ้าหากค่า pH สูงถึง 8.5 จะมีผลยับยั้งการทำงานและมีพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์ในระบบการผลิตแก๊สชีวภาพ ส่งผลให้ผลิตแก๊สชีวภาพได้น้อยลง [12] ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่า pH เริ่มต้นของน้ำเสียพบว่า มีค่าประมาณ 4 เป็นค่าที่ต่ำมาก ซึ่งอาจมีผลต่อหัวเชื้อที่เดิมลงไป ดังนั้นจึงมีการปรับ pH เริ่มต้นให้เท่ากับ 7 ก่อนเริ่มทำการทดลองของทั้ง 3 สภาวะ ซึ่งเป็นช่วง pH ที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ (pH 6.8-7.4) [19] และได้มีการตรวจติดตามตลอดทั้งกระบวนการผลิตในระบบยูเอเอสบี จากผลการทดลองพบว่า ค่า pH มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการหมักน้อยมาก มีค่าประมาณ 7 (ไม่ได้แสดงผล) โดยกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพโดยทั่วไปในช่วงแรกของกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) และอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) ค่า pH จะมีการลดต่ำลงจากผลผลิตกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้น แต่จากผลการทดลองนี้ค่า pH ในช่วงแรกไม่ได้ลดลงอาจเนื่องมาจาก การที่ C/N Ratio ของน้ำเสียจากโรงงานสับปะรดที่ต่ำ นั้นหมายความว่ามีความมีส่วนสารตั้งต้นที่มีไนโตรเจนที่สูง อาจไปยับยั้งกระบวนการสร้างกรดในระบบ [12] ซึ่งอาจส่งผลทำให้ได้แก๊สชีวภาพที่ต่ำลง เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Widyarani และคณะ [20] ที่ใช้น้ำเสียจากโรงงานผลิตเต้าหู้ เมื่อป้อนน้ำเสียด้วย pH เริ่มต้นที่ 3.7 และ 7 พบว่า ที่ pH เริ่มต้นต่ำสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงกว่า จากปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักใน 3 สภาวะและจากค่า C/N Ratio ของกากตะกอนน้ำเสียจากโรงงาน สภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ควรใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบยูเอเอสบี ร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์ที่ออกแบบ ควรเป็นสภาวะที่มีการใช้หัวเชื้อจากตะกอนเลน

บ่อกึ่งมาร่วมในการผลิตแก๊สชีวภาพด้วย ซึ่งจะทำให้ผลิตแก๊สชีวภาพได้มากขึ้นกว่าสถานะที่ไม่มีการเติมหัวเชื้อดังกล่าว

จากการทดลองผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบยูเอเอสบี ร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์ ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นทั้งหมดตลอดระยะเวลาของการหมักรวมทั้งสิ้น 163.88 มิลลิลิตร โดยเกิดแก๊สมีเทนขึ้นเพียง 24.74% เท่านั้น นั่นอาจเป็นสาเหตุมาจากอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนในน้ำเสียจากโรงงานสับปะรดมีค่าที่ต่ำ ดังได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ถึงแม้จะมีการเติมหัวเชื้อเริ่มต้นเข้ามาในระบบ แต่ในระหว่างดำเนินการหมักหัวเชื้อดังกล่าวอาจจะมีการหลุดออกไปจากระบบได้เพราะเป็นระบบแบบไหลต่อเนื่อง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาวิธีการป้องกันการหลุดรอดของเชื้อในระบบในลักษณะอื่น ๆ เข้ามาช่วยเพื่อให้สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ในปริมาณที่สูงขึ้นต่อไป

ดังนั้นจากการวิเคราะห์ผลการทดลองข้างต้น ในการผลิตแก๊สชีวภาพจากน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ปนเปื้อนจำนวนมาก เช่น น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปสับปะรด ซึ่งใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพในงานวิจัยนี้ สามารถทำให้เกิดพลังงานทดแทนที่ได้จากของเสีย ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับน้ำเสียอีกทางหนึ่งที่น่าสนใจ ทั้งยังช่วยลดปัญหามลพิษทางน้ำ ด้วยการบำบัดและลดสารปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้อีกด้วย แต่ในการผลิตแก๊สชีวภาพให้ได้ปริมาณสูงนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย โดยปัจจัยหนึ่งที่สำคัญ คือ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตและระบบที่เหมาะสมสำหรับการผลิต ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยได้ทำการทดลองใน 3 สภาวะ คือ สภาวะที่ใช้ น้ำเสียจากโรงงานเป็นสารตั้งต้นในการหมักอย่างเดียว สภาวะที่ใช้ น้ำเสียร่วมกับวัสดุตรึงจุลินทรีย์ และสภาวะที่ใช้ น้ำเสียร่วมกับวัสดุตรึงจุลินทรีย์ที่ใช้หัวเชื้อเริ่มต้นจากตะกอนเลนบ่อกึ่ง จากผลการทดลองพบว่า สภาวะที่ผลิตแก๊สชีวภาพได้ปริมาณมากที่สุด คือ สภาวะที่ใช้ น้ำเสียร่วมกับวัสดุตรึงจุลินทรีย์ที่ใช้หัวเชื้อเริ่มต้นจากตะกอนเลนบ่อกึ่ง และยังสามารถลดค่าซีโอดีได้ในระดับขั้นแรกของการบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นจึงเลือกใช้สภาวะนี้ในการหมักเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพจากระบบที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้น

เพื่อให้เหมาะสมกับการหมักแก๊สชีวภาพในลักษณะนี้

โดยระบบที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้นเป็นระบบแบบยูเอเอสบี ร่วมกับการตรึงจุลินทรีย์ที่มีการไหลเข้าและออกของสารอย่างต่อเนื่อง จากผลของผลิตแก๊สชีวภาพด้วยสภาวะที่ใช้ น้ำเสียจากโรงงานแปรรูปสับปะรดร่วมกับวัสดุตรึงจุลินทรีย์และหัวเชื้อเริ่มต้นจากตะกอนเลนบ่อกึ่งพบว่า ระบบที่ออกแบบนี้มีศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพได้อย่างน่าพอใจ โดยองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพมีแก๊สมีเทนประมาณ 24.74% ในการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สชีวภาพจากระบบนี้สามารถทำได้ โดยเพิ่มวิธีการป้องกันการหลุดรอดของเชื้อในระบบระหว่างดำเนินการหมักแก๊สชีวภาพและเพิ่มขั้นตอนการเตรียมน้ำเสียให้มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่สูงขึ้น

## 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดีจากทุนอุดหนุนการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 สัญญาเลขที่ 220/2561 และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

## เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Xu, Y. Li, X. Ge, L. Yang, and Y. Li, "Anaerobic digestion of food waste – Challenges and opportunities," *Bioresource Technology*, vol. 247, pp. 1047–1058, 2018.
- [2] A. Nielfa, R. Cano, and M. Fdz-Polanco, "Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge," *Biotechnology Reports*, vol. 5, pp. 14–21, 2015.
- [3] I. Angelidaki, D. Karakashev, D. J. Batstone, C. M. Plugge, and A. J. M. Stams, "Biomethanation and its potential," *Methods in Enzymology*, vol. 494, pp. 327–351, 2011.



- [4] A. Nopparat. (2015). Biogas production technology. Excellent Center of Waste Utilization and Management. King Mongkut's University of Technology Thonburi. Bangkok, Thailand [Online] (in Thai). Available: [http://reg3.diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2015/02/KMforIDW\\_ADtech.pdf](http://reg3.diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2015/02/KMforIDW_ADtech.pdf)
- [5] L. Nimtrakul and S. Kanchanawong. (2022). What is the UASB process, what are its components, advantages and limitations. PAPOP. Bangkok, Thailand [Online] (in Thai). Available: <https://papop.com/กระบวนการ-uasb-คืออะไร/>
- [6] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2022). Industrial Biogas Production. Ministry of Energy. Bangkok, Thailand. [Online] (in Thai). Available: <https://webkc.dede.go.th/testmax/node/190>
- [7] M. F. Jamaluddin, N. Zainol, and N. S. A. Mohd Sharif, "Troubleshooting on biogas production by using factorial analysis in sewage treatment plant (STP)," in *Innovative Manufacturing, Mechatronics & Materials Forum 2020, 2021*, pp. 1755–1762.
- [8] K. Khanthong, C. W. Purnomo, W. Daosud, and Y. Laoong-u-thai, "Microbial diversity of marine shrimp pond sediment and its variability due to the effect of immobilized media in biohydrogen and biohythane production," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 106166, 2021.
- [9] C. E. Boyd, A. A. McNevin, R. P. Davis, R. Godumala, and A. B. C. Mohan, "Production methods and resource use at *Litopenaeus vannamei* and *Penaeus monodon* farms in India compared with previous findings from Thailand and Vietnam," *Journal of the World Aquaculture Society*, vol. 49, no. 3, pp. 551–569, 2018.
- [10] M. Lesteur, V. Bellon-Maurel, C. Gonzalez, E. Latrille, J. M. Roger, G. Junqua, and J. P. Steyer, "Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review," *Process Biochemistry*, vol. 45, no. 4, pp. 431–440, 2010.
- [11] J. Xue, S. Schiano, W. Zhong, L. Chen, and C.-Y. Wu, "Determination of the flow/no-flow transition from a flat bottom hopper," *Powder Technology*, vol. 358, pp. 55–61, 2019.
- [12] I. J. Dioha, C. H. Ikeme, T. Nafi'u, N. I. Soba and M. B. S. Yusuf, "Effect of carbon to nitrogen ratio on biogas production," *International Research Journal of Natural Sciences*, vol. 1, no. 3, pp. 1–10, 2013.
- [13] S. Xu, C. He, L. Luo, F. Lü, P. He, and L. Cui, "Comparing activated carbon of different particle sizes on enhancing methane generation in upflow anaerobic digester," *Bioresource technology*, vol. 196, pp. 606–612, 2015.
- [14] Y. Liu, C. Lin, H. Jia, X. Yong, X. Xie, X. Wu, J. Zhou, and P. Wei, "Effects of amino-modified biofilm carriers on biogas production in the anaerobic digestion of corn straw," *Environmental Technology*, vol. 41, no. 21, pp. 2806–2816, 2020.
- [15] T. Bunbang, W. Kasetsongkram, and R. Nirunsin, "The study of biogas production from treatment waste water of thai rice vermicelli process by effective microorganism (EM)," in *12th Conference on Energy Network of Thailand, 2015*, pp. 740–747 (in Thai).
- [16] S. Winitchai, W. Wirojanagud, S. Sinsupan, and A. Yimtae, "Anaerobic contact process for

- treating synthetic slaughterhouse wastewater,” *KKU Research Journal*, vol. 2, pp. 1–11, 2002 (in Thai).
- [17] T. Cheunbarn, S. Cheunbarn, M. Srikanlayanukul, R. Kawaree, and N. Khampa, “Appropriate ratio of swine waste and napier grass silage by fermented lactobacillus pantarump 107 for methane production,” Maejo University, Chiang Mai, Thailand, 2017 (in Thai).
- [18] B. Sialve, N. Bernet, and O. Bernard, “Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable,” *Biotechnology Advances*, vol. 27, no. 4, pp. 409–416, 2009.
- [19] C. Mao, Y. Feng, X. Wang, and G. Ren, “Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 540–555, 2015.
- [20] Widyarani, Y. Victor, L. Sriwuryandari, E. A. Priantoro, T. Sembiring, and N. Sintawardani, “Influence of pH on biogas production in a batch anaerobic process of tofu wastewater,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, pp. 012014.