



บทความวิจัย

## การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลโดยการเติมโลหะไอออน

ณัฐชา หิรัญจิตต์ และ พฤกษ์ อักกะรังสี\*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

รสสุคนธ์ จະวะนะ

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 4830 3154 อีเมล: nh.natcha35@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.09.006

รับเมื่อ 10 มิถุนายน 2564 แก้ไขเมื่อ 31 สิงหาคม 2564 ตอบรับเมื่อ 28 ตุลาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 21 กันยายน 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลโดยการเติมโลหะไอออน ได้แก่ เหล็ก นิกเกิล และสังกะสี จากการเดินระบบของถังปฏิกรณ์ชนิดกวนสมบูรณ์ขนาด 10 ลิตร ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 0.50–7.42 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันพบว่า ระบบที่ไม่เติมโลหะไอออน (R1) ระบบที่เติมโลหะไอออนในทุกวันที่มีการเดินระบบ (R2) ระบบที่เติมโลหะไอออนในการหมักย่อยครั้งแรกของทุกอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ เมื่อร้อยละของก๊าซมีเทนน้อยกว่า 50% หรือเมื่ออัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่าง (VFA/Alkalinity Ratio) มากกว่า 0.3 (R3) และระบบที่เติมโลหะไอออนในการหมักย่อยครั้งแรกของทุกอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์, เมื่อร้อยละของก๊าซมีเทนน้อยกว่า 50% หรือเมื่ออัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่าง (VFA/Alkalinity Ratio) มากกว่า 0.5 (R4) โดยมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ  $198.90 \pm 33.56$ ,  $165.90 \pm 12.19$ ,  $229.40 \pm 19.89$  และ  $195.44 \pm 24.98$  มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้า ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า R3 ให้ผลดีที่สุด โดยระบบสามารถรองรับอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ได้สูงสุด 4.94 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นร้อยละ 15.33 เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เติมโลหะไอออน

**คำสำคัญ:** ก๊าซชีวภาพ การเติมโลหะไอออน อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ น้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอล ถังปฏิกรณ์ชนิดกวนสมบูรณ์

การอ้างอิงบทความ: ณัฐชา หิรัญจิตต์, พฤกษ์ อักกะรังสี และ รสสุคนธ์ จະวะนะ, “การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลโดยการเติมโลหะไอออน,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 33, ฉบับที่ 4, หน้า 1–13, เลขที่บทความ 234-085148, ต.ค.-ธ.ค. 2566.



## Efficiency Increase of Biogas Production from Vinasse by Trace Element Addition

Natcha Hirunchit and Pruk Aggarangsi\*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

Rotsukon Jawana

Energy Research and development Institute – Nakhonping, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand

\* Corresponding Author, Tel. 09 4830 3154, E-mail: nh.natcha35@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.09.006

Received 10 June 2021; Revised 31 September 2021; Accepted 28 October 2021; Published online: 21 September 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

The objective of this study is to investigate the effects of Trace Elements (TE) addition to increase efficiency of biogas production from vinasse. Multiple experiments were conducted to obtain the optimal feeding dosage of TE, which mainly consisted of iron, nickel and zinc. Experiments were performed in 10-litre lab-scale continuous stirred tank reactors at the organic load rates of 0.50–7.42 kgCOD/m<sup>3</sup>•d. The experiments included a control group and experimental groups as follows: The control case without TE addition (R1); the experimental groups with TE addition daily during system operation (R2); intervention with TE addition at the first fermentation stage in each organic load rate when the methane percentage was lower than 50% or when the volatile fatty acid/alkalinity ratio was more than 0.3 (R3); and the intervention with TE addition at the first fermentation stage in each organic load rate; when the methane percentage was lower than 50% or when the volatile fatty acid/alkalinity ratio was greater than 0.5 (R4). Observed specific methane production was 198.90 ± 33.56, 165.90 ± 12.19, 229.40 ± 19.89 and 195.44 ± 24.98 mL/gVS<sub>added</sub>. The results showed that R3 yielded the maximum organic loading rate of 4.94 kgCOD/m<sup>3</sup>•d, with 15.33% enhanced methane production efficiency as compared with the no-treatment control group.

**Keywords:** Biogas, Trace Element Addition, Organic Load Rate, Vinasse, Continuous Stirred Tank Reactors

Please cite this article as: N. Hirunchit, P. Aggarangsi, and R. Jawana, "Efficiency increase of biogas production from vinasse by trace element addition," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 4, pp. 1–13, ID. 234-085148, Oct.-Dec. 2023 (in Thai).

## 1. บทนำ

สถานการณ์การลดลงของพลังงานทางเลือกจากธรรมชาติ ที่มีผลมาจากความต้องการใช้พลังงานของมนุษย์ในด้านอุปโภคและบริโภคเพิ่มสูงขึ้น ประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานคิดเป็นมูลค่า 862,797 ล้านบาท [1] จากสถิติการนำเข้าพลังงานของประเทศไทย ส่งผลให้พลังงานทดแทนเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาทดแทนพลังงานทางเลือกจากธรรมชาติ อาทิเช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานชีวมวล รวมถึงพลังงานจากก๊าซชีวภาพ โดยการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอล ซึ่งเป็นน้ำเสียจากกระบวนการผลิตสุราที่ในปัจจุบันมีกำลังการผลิตเพิ่มสูงขึ้น จากแนวโน้มการขยายตัวของอุตสาหกรรมสุรามีแนวโน้มเติบโตเท่ากับ 42 เปอร์เซ็นต์ [2] และประเทศไทยมีโรงงานกลั่นสุรากลั่นทั้งหมด 28 โรง [3] ส่งผลให้น้ำเสียที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทางอากาศและแหล่งน้ำธรรมชาติ จึงนำน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลมาผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากมีสารอินทรีย์ในปริมาณสูงอาจก่อให้เกิดมลพิษทางน้ำได้ แต่เนื่องด้วยการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียของอุตสาหกรรมเอทานอลยังมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ เพราะคุณสมบัติของน้ำเสียของอุตสาหกรรมเอทานอลก็มีปริมาณไนโตรเจนสูง ทำให้อัตราส่วนของอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน และมีปริมาณธาตุโลหะอื่นๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ไม่เพียงพอต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

หลักการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศโดยจุลินทรีย์ 4 กลุ่มหลัก คือ กลุ่มที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolytic Bacteria) ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์จากโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเชิงเดี่ยว โดยการปล่อยเอนไซม์ที่อยู่ภายนอกเซลล์ (Extra Cellular Enzyme) กลุ่มที่ผลิตกรดอินทรีย์ (Acidogenic Bacteria) เป็นกลุ่มจุลินทรีย์ที่ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลเชิงเดี่ยว โดยการดูดซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์และใช้เป็นแหล่งคาร์บอนของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดให้เป็นกรดระเหยง่าย กลุ่มที่เปลี่ยนกรดไขมันระเหยเป็นกรดอะซิติก (Acetogenic Bacteria) ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายให้เป็นกรดอะซิติก ซึ่งเป็นปฏิกิริยาสำคัญในการหมักย่อย เพื่อไม่ให้เกิดการสะสมของ

กรดไขมันระเหยมากเกินไปและอาจเกิดการยับยั้งปฏิกิริยาการผลิตก๊าซมีเทนได้ กลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenic Bacteria) ทำหน้าที่ย่อยสลายกรดอินทรีย์จนได้ก๊าซชีวภาพ โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้มีความคงทนต่อความเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ต่ำกว่าจุลินทรีย์สร้างกรด [4] ดังนั้นจุลินทรีย์เหล่านี้จึงมีบทบาทที่สำคัญต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ และหากในระบบก๊าซชีวภาพมีการทำงานของแต่ละกลุ่มจุลินทรีย์ที่เหมาะสม อาจส่งผลให้กระบวนการหมักย่อยในสภาวะไร้อากาศเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเพิ่มประสิทธิภาพการหมักย่อยของระบบผลิตก๊าซด้วยการเติมสารอาหารเสริม เช่น แร่ธาตุต่างๆ เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อประสิทธิภาพของจุลินทรีย์และเสถียรภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ [5]

จากปริมาณธาตุอาหารในน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลที่ค่อนข้างต่ำ จึงจำเป็นต้องเติมธาตุโลหะเพิ่มเติม โดยการเติมธาตุอาหารจำพวกโลหะหนักในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพตามค่ามาตรฐาน เช่น เหล็ก โคบอลต์ นิกเกิล สังกะสี โมลิบดีนัม แมงกานีส สังกะสี คอปเปอร์ แคดเมียม เป็นต้น เพื่อเป็นโคแฟกเตอร์ในกระบวนการสร้างก๊าซมีเทนของเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจน [6] จากงานวิจัย Oechsner และคณะ [7] ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการควบคุมความเข้มข้นของโลหะไอออน ได้ระบุช่วงความเข้มข้นของโลหะไอออนที่เหมาะสมในกระบวนการชีวภาพ ดังแสดงตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความเข้มข้นของโลหะไอออนที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

| โลหะไอออน       | ความเข้มข้นที่เหมาะสมกับการผลิตก๊าซชีวภาพ (mg/L) |
|-----------------|--------------------------------------------------|
| Iron (Fe)       | 700–5,000                                        |
| Nickel (Ni)     | 4–180                                            |
| Zinc (Zn)       | 30–630                                           |
| Cobalt (Co)     | 0.4–120                                          |
| Molybdenum (Mo) | 0.05–70                                          |
| Manganese (Mn)  | 5–1,500                                          |
| Copper (Cu)     | 10–160                                           |

จากงานวิจัยของ Jacke และคณะ [8] ศึกษาผลของการเติมโลหะไอออนต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่าพบว่า ถึงปฏิกิริยาที่มีการเติมโลหะธาตุโลหะช่วยลดค่ากรดไขมันระเหยสะสมภายในถังปฏิกรณ์ ส่งผลให้ระบบการผลิตก๊าซมีเทนมีความเสถียร สามารถผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 239.00 มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดี สัดส่วนก๊าซมีเทนสูงถึง 79.00 เปอร์เซ็นต์ และสามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate; OLR) ได้สูงสุดถึง 9.60 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน เมื่อเปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการเติมโลหะไอออน พบว่าระบบสามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้เพียง 5.90 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน

จากงานวิจัยของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน นครพิงค์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [9] ได้ทำการทดสอบคัดเลือกชนิดและปริมาณโลหะไอออนที่เหมาะสมต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยเลือกใช้โลหะไอออน 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 เหล็ก นิกเกิล และสังกะสี กลุ่มที่ 2 โคบอลต์ โมลิบดีนัม ทองแดง และแมงกานีส ส่วนกลุ่มที่ 3 เป็นการเติมโลหะไอออนทั้ง 7 ชนิด ซึ่งการเติมโลหะไอออนชนิดต่างๆ นั้น จะเติมที่ความเข้มข้นต่ำ (Low; L) กลาง (Medium; M) และสูง (High; H) และมีช่วงการแบ่งในการเติมโลหะไอออนเทียบกับค่าความเข้มข้นของโลหะไอออนที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากตารางที่ 1 พบว่าชุดการทดลอง 1L (ความเข้มข้นของโลหะไอออนต่ำ) ที่มีการเติมเหล็กที่ความเข้มข้นเท่ากับ 700 มิลลิกรัมต่อลิตร นิกเกิลที่ความเข้มข้น 4 มิลลิกรัมต่อลิตร และสังกะสีที่ความเข้มข้นเท่ากับ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และชุดการทดลอง 2L (ความเข้มข้นของโลหะไอออนต่ำ) มีการเติมโคบอลต์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร โมลิบดีนัมที่ความเข้มข้น 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร ทองแดงที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และแมงกานีสที่ความเข้มข้นเท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร จากการศึกษาของชุดการทดลอง 1L และชุดการทดลอง 2L พบว่าให้ผลผลิตมีเทนสูงที่สุดเท่ากับ  $155.62 \pm 1.40$  และ  $158.84 \pm 1.85$  มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้า โดยมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ )

จากงานวิจัย Nuttakorn [10] ได้ศึกษาผลของ

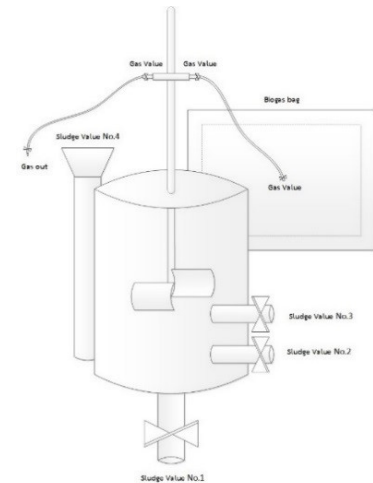
อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์และอัตราการเวียนน้ำต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลพบว่าเป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ค่อนข้างสูง และมีความเป็นกรด จึงต้องทำการปรับสภาพน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลด้วยการเจือจางน้ำประปาในอัตราส่วน 1 : 4 และ 1 : 8 (โดยปริมาตรต่อปริมาตร) พบว่า การเจือจางน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลที่อัตราส่วน 1 : 8 มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีเท่ากับ 40.58% และการเจือจางน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลในอัตราส่วน 1 : 4 มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีเท่ากับ 43.92%

จากงานวิจัยของ Withittaya [11] ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังด้วยการเติม Co, Mo, Cu และ Mn โดยมีศักยภาพการผลิตมีเทนเท่ากับ  $309.00 \pm 3.00$ ,  $286.00 \pm 2.00$  และ  $228.00 \pm 2.00$  มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้า ตามความเข้มข้นของโลหะไอออนต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ โดยมีสัดส่วนก๊าซมีเทน เห็นได้ว่าการทดลองของความเข้มข้นต่ำมีสัดส่วนก๊าซมีเทนสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 67.80 โดยปริมาตร ซึ่งเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 62.30 เป็น 67.80 โดยปริมาตร เมื่อเปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์ชุด Control ที่ไม่มีการเติมโลหะไอออน

งานวิจัยนี้ได้ตระหนักถึงความสำคัญของกลุ่มจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และธาตุอาหารเสริมที่สำคัญต่อจุลินทรีย์ จึงทำการศึกษารูปแบบการเติมโลหะไอออนที่เหมาะสมต่อการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอล เนื่องจากน้ำเสียมีความเข้มข้นของโลหะไอออนที่ไม่เพียงพอต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ จากงานวิจัย Oechsner และคณะ [7] ทำให้ทราบค่าความเข้มข้นของโลหะไอออนแต่ละชนิดที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อมาสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ [9] ได้ทำการศึกษาความเข้มข้นของโลหะไอออนต่ำ กลาง และสูงของโลหะไอออนชนิดต่างๆ พบว่า การเติมเหล็ก นิกเกิล และสังกะสี (ช่วงค่าต่ำ) หรือโคบอลต์ โมลิบดีนัม ทองแดง และแมงกานีส (ช่วงค่าต่ำ) ส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และจากงานวิจัยของ Moraes [12] พบว่า การเดินระบบ



รูปที่ 1 ถังปฏิกรณ์ชนิดกวนผสมขนาด 10 ลิตร



รูปที่ 2 ไดอะแกรมถังปฏิกรณ์ชนิดกวนผสม

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบต่อเนื่องที่เติมเหล็ก นิกเกิล สังกะสี สามารถช่วยรักษาเสถียรภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมปศุสัตว์ เมื่อมีการเพิ่มอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยจึงเลือกทำการเติมเหล็ก นิกเกิล และสังกะสี ในช่วงค่าความเข้มข้นของโลหะไอออนที่ต่ำ เนื่องจากต้องการลดค่าใช้จ่ายการเดินระบบสำหรับผู้ประกอบการ เพื่อศึกษารูปแบบการเติมโลหะไอออนที่เหมาะสมต่อไป

## 2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

### 2.1 ถังปฏิกรณ์ชีวภาพชนิดกวนผสม

ถังปฏิกรณ์ชีวภาพชนิดกวนผสม (Continuous Stirred Tank Reactor; CSTR) ทำด้วยสแตนเลส ขนาด 10 ลิตร และกำหนดปริมาตรใช้งานเท่ากับ 7 ลิตร มีการติดตั้งใบกวนหมุนด้วยความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที โดยแกนของใบกวนอยู่ในแนวตั้งและต่อเข้าถังปฏิกรณ์บริเวณกึ่งกลางของถังปฏิกรณ์ โดยใบกวนมีการทำงาน 10 นาที หยุด 30 นาที เพื่อให้แบคทีเรียและสารอินทรีย์ภายในถังผสมเข้ากันได้ อย่างทั่วถึง และมีท่อต่างๆ ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ตำแหน่งที่ 1 คือ ท่อเติมตะกอน อยู่บริเวณก้นของถังปฏิกรณ์ (ขนาด 1.5 นิ้ว) ตำแหน่งที่ 2 คือ ท่อน้ำออก อยู่บริเวณด้านล่างของถังปฏิกรณ์ (ขนาด 1 นิ้ว) ตำแหน่งที่ 3 คือ ท่อน้ำออก อยู่

บริเวณตรงกลางของถังปฏิกรณ์ (ขนาด 1 นิ้ว) ตำแหน่งที่ 4 คือ ท่อป้อนน้ำเสีย อยู่บริเวณด้านข้างของถังปฏิกรณ์ (ขนาด 1 นิ้ว) ส่วนด้านบนของถังปฏิกรณ์มีท่อระบายก๊าซไปยังถังเก็บก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 1 และ 2

### 2.2 การเตรียมน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลและเชื้อตั้งต้น

น้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลที่ใช้ในงานวิจัย นำมาจากบริษัท ธนภักดี จำกัด อำเภอสนทราย จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นน้ำเสียจากกระบวนการผลิตสุราที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิต โดยลักษณะสมบัติทางกายภาพของน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลมีสีน้ำตาลเข้ม และมีลักษณะสมบัติทางเคมีที่มีค่าซีโอดีประมาณ 120,000–160,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทั่วไปกระบวนการบำบัดน้ำเสียควรคำนึงถึงอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของระบบ เนื่องจากไนโตรเจนเป็นธาตุสำคัญในการสร้างเซลล์จุลินทรีย์ ซึ่งแอมโมเนียไนโตรเจนในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศนั้นเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ทำการเจือจางน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลด้วยน้ำประปาในอัตราส่วน 1 : 4 (โดยปริมาตรต่อปริมาตร) ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง เพื่อควบคุมปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนให้เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทน และมีค่า

ซีไออยู่ในช่วง 25,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เชื้อตั้งต้นที่ใช้ในงานวิจัย นำมาจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบยูเอเอสบี (UASB) ของบริษัท ธนภักดี จำกัด อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งจะทำให้การเก็บเชื้อจากท่อระบายกากตะกอนบริเวณส่วนกลางของถัง UASB เพื่อให้ได้ประชากรเชื้อส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่ม Methanogens มาใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบ

## 2.3 การคัดเลือกความเข้มข้นของโลหะไอออน

ในการคัดเลือกความเข้มข้นของโลหะไอออน ได้ทำการตรวจวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของโลหะจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอล ได้แก่ เหล็ก นิกเกิล สังกะสี โคบอลต์ โมลิบดีนัม แมงกานีส และทองแดง ดังตารางที่ 2 เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการพิจารณา และคัดเลือกชนิดของโลหะไอออนที่จะนำมาเติมในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยนำมาเปรียบเทียบกับช่วงค่ามาตรฐานของความเข้มข้นของโลหะไอออนที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจน

ตารางที่ 2 ค่าความเข้มข้นของโลหะไอออนในน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอล

| โลหะไอออน       | ความเข้มข้นของโลหะไอออนในน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเอทานอล (mg/L) |
|-----------------|----------------------------------------------------------------|
| Iron (Fe)       | 64.9                                                           |
| Nickel (Ni)     | 0.37                                                           |
| Zinc (Zn)       | 2.18                                                           |
| Cobalt (Co)     | 0.24                                                           |
| Molybdenum (Mo) | 0.11                                                           |
| Manganese (Mn)  | 12.46                                                          |
| Copper (Cu)     | 0.31                                                           |

จากตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของโลหะไอออนในน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอล เช่น เหล็ก นิกเกิล และสังกะสี มีความเข้มข้นของโลหะไอออนไม่เพียงพอ จึงได้ทำการเติมโลหะไอออนทั้ง 3 ชนิดนี้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอล เพื่อเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีความเสถียรมากยิ่งขึ้น โดยสามารถคำนวณค่าความเข้มข้น

ของโลหะไอออนที่ต้องเติมในน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลได้จากค่าความเข้มข้นของโลหะไอออนที่เหมาะสม (ค่าต่ำ) หักลบกับค่าความเข้มข้นของโลหะไอออนในน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอล ซึ่งสามารถคำนวณดังสมการที่ (1)

$$\text{ความเข้มข้นของโลหะไอออนที่ต้องเติม} = A - B \quad (1)$$

โดยที่  $A$  คือ ค่าความเข้มข้นของโลหะไอออนที่เหมาะสม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$B$  คือ ค่าความเข้มข้นของโลหะไอออนในน้ำเสียจากโรงงานผลิตสุรา (มิลลิกรัมต่อลิตร)

## 2.4 วิธีการทดลอง

การศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลด้วยการเติมโลหะไอออนเพื่อหารูปแบบการเติมโลหะไอออนที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณก๊าซชีวภาพและผลผลิตมีเทน ซึ่งแบ่งการทดลองออกเป็น 4 การทดลอง แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 รายละเอียดการทดลอง

| การทดลอง           | รายละเอียด                                                                                                                                                                                              |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| การทดลองที่ 1 (R1) | - ไม่มีการเติมโลหะไอออน                                                                                                                                                                                 |
| การทดลองที่ 2 (R2) | - เติมโลหะไอออนทุกวันที่มีการเดินระบบ                                                                                                                                                                   |
| การทดลองที่ 3 (R3) | - เติมโลหะไอออนเมื่อมีการเปลี่ยน Organic Loading Rate<br>- เติมโลหะไอออนเมื่อร้อยละของก๊าซมีเทนน้อยกว่า 50% หรือ เมื่ออัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่าง (VFA/Alkalinity Ratio) มากกว่า 0.3 |
| การทดลองที่ 4 (R4) | - เติมโลหะไอออนเมื่อมีการเปลี่ยน Organic Loading Rate<br>- เติมโลหะไอออนเมื่อร้อยละของก๊าซมีเทนน้อยกว่า 50% หรือ เมื่ออัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่าง (VFA/Alkalinity Ratio) มากกว่า 0.5 |



ในการเดินระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอล ได้แบ่งการเดินระบบการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดออกเป็น 9 ช่วง โดยเริ่มต้นเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องทุกวันที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) เท่ากับ 0.50 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จากนั้นปรับเพิ่ม OLR ครั้งละ 1.25 เท่า จนถึงค่า OLR เท่ากับ 0.98 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จากนั้นทำการปรับเพิ่ม OLR ครั้งละ 1.5 เท่า จนถึงค่า OLR เท่ากับ 7.42 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยในแต่ละการทดลองทำการเดินระบบจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ โดยพิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้แต่ละวันที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (RSD) ไม่เกิน 10% ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความแตกต่างโดย One-way ANOVA และ Tukey ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เพื่อหารูปแบบการเติมโลหะไอออนที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอล

ตารางที่ 4 ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์และระยะเวลาพักเก็บที่ใช้ในการเดินระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ

| ช่วงลำดับการเดินระบบ | ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (kgCOD/m <sup>3</sup> ·d) | อัตราการไหล (L/Day) | ระยะเวลาพักเก็บของเหลว (Day) |
|----------------------|-------------------------------------------------|---------------------|------------------------------|
| 1                    | 0.50                                            | 0.140               | 50                           |
| 2                    | 0.63                                            | 0.175               | 40                           |
| 3                    | 0.78                                            | 0.219               | 32                           |
| 4                    | 0.98                                            | 0.273               | 26                           |
| 5                    | 1.47                                            | 0.410               | 17                           |
| 6                    | 2.20                                            | 0.615               | 11                           |
| 7                    | 3.30                                            | 0.923               | 8                            |
| 8                    | 4.94                                            | 1.384               | 5                            |
| 9                    | 7.42                                            | 2.076               | 3                            |

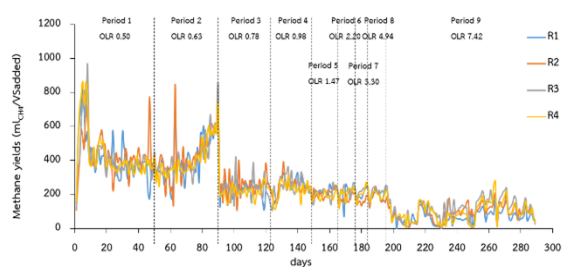
## 2.5 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

การติดตามและการเก็บข้อมูลการเดินระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลด้วยการเติม

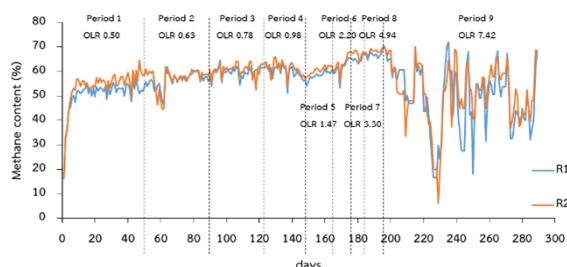
โลหะไอออน ได้ทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพด้วยมิเตอร์วัดปริมาณก๊าซชีวภาพ พร้อมทั้งตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H<sub>2</sub>S) และก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ด้วยเครื่องวิเคราะห์ Gas Analyzer รุ่น GFM406 รวมถึงทำการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย ได้แก่ ค่าพีเอช (pH) โดยใช้วิธีการวัดโดยตรงด้วยเครื่องวัดพีเอชยี่ห้อ Horiba LAQUA twin Compact pH Meter-pH11 และทำการตรวจวัดค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) และปริมาณกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acids; VFA) ด้วยวิธีการไตเตรท นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการเดินระบบการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยความถี่ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 การติดตามและการเก็บข้อมูลการเดินระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ

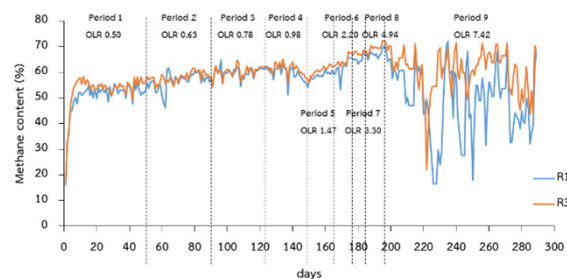
| ตัวแปรที่ตรวจวัด               | จุดตรวจวัด           | ความถี่ในการตรวจวัด |
|--------------------------------|----------------------|---------------------|
| Biogas Yield                   | จุดเก็บก๊าซ          | ทุกวัน              |
| Biogas Composition             | จุดเก็บก๊าซ          | ทุกวัน              |
| Alkalinity                     | น้ำเข้าและออกจากระบบ | 3 ครั้งต่อสัปดาห์   |
| Volatile Fatty Acids           | น้ำเข้าและออกจากระบบ | 3 ครั้งต่อสัปดาห์   |
| pH                             | น้ำเข้าและออกจากระบบ | ทุกวัน              |
| Total Solids; TS               | น้ำเข้าและออกจากระบบ | 3 ครั้งต่อสัปดาห์   |
| Total Suspended Solids; TSS    | น้ำเข้าและออกจากระบบ | 3 ครั้งต่อสัปดาห์   |
| Volatile Solids; VS            | น้ำเข้าและออกจากระบบ | 3 ครั้งต่อสัปดาห์   |
| Volatile Suspended Solids; VSS | น้ำเข้าและออกจากระบบ | 3 ครั้งต่อสัปดาห์   |
| Chemical Oxygen Demand; COD    | น้ำเข้าและออกจากระบบ | 3 ครั้งต่อสัปดาห์   |



รูปที่ 3 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของ R1 (Control), R2, R3 และ R4



รูปที่ 4 สัดส่วนของก๊าซมีเทนเปรียบเทียบระหว่าง R1 (Control) และ R2



รูปที่ 5 สัดส่วนของก๊าซมีเทนเปรียบเทียบระหว่าง R1 (Control) และ R3

### 3. ผลการทดลอง

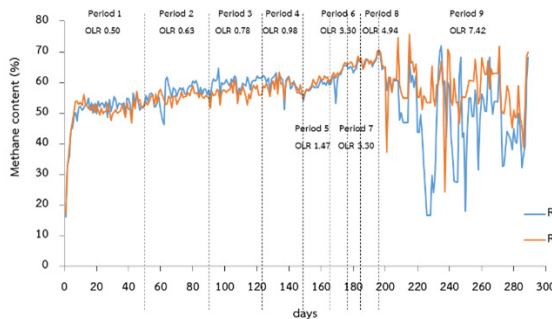
#### 3.1 การพิจารณาพารามิเตอร์ของการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากการเดินระบบที่ OLR 0.50–7.42 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ได้ติดตามผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน และองค์ประกอบก๊าซมีเทนของระบบ เพื่อนำมาประเมินศักยภาพของการผลิตก๊าซมีเทน (รูปที่ 3) พบว่า R3 และ R1 ในช่วงที่ 3–8 มีค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p > 0.05$ ) โดยในช่วงที่ 8 ของ R3 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ  $229.40 \pm 19.89$  มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้า รองลงมา คือ R1 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ  $198.90 \pm 33.56$  มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้า และ R4 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ  $195.44 \pm 24.98$  มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้า และลำดับสุดท้ายคือ R2 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ  $165.90 \pm 12.19$  มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้า โดยถึงปฏิกรณ์ R3 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ  $229.40 \pm 19.89$  มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้า ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Moraes และคณะ [12] ได้ทำการเติมโลหะไอออน ได้แก่ เหล็ก นิกเกิล และสังกะสีพบว่า ระบบการผลิตก๊าซชีวภาพมีความเสถียรมากขึ้น ส่งผลให้ระบบมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ  $267.40 \pm 4.50$  มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Withittaya [11] ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังด้วยการเติม Co, Mo, Cu และ Mn โดยมีศักยภาพการผลิตมีเทนเพิ่มขึ้น

จาก  $229.40 \pm 19.89$  เป็น  $309.00 \pm 3.00$  มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้า หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 34.70 จะเห็นได้ว่าผลผลิตมีเทนมีค่าสูงกว่าการทดลองครั้งนี้ อาจเนื่องมาจากน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดี เนื่องจากค่า VFA/alkalinity ไม่เกิน 0.1 ซึ่งถือว่าเหมาะสมต่อการย่อยสลาย จึงส่งผลให้ร้อยละการเพิ่มขึ้นของศักยภาพการผลิตมีเทนที่มากกว่า

เมื่อพิจารณาสัดส่วนของก๊าซมีเทนของระบบ พบว่า R1, R2, R3 และ R4 มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนร้อยละ  $67.68 \pm 2.13$ ,  $68.82 \pm 1.11$ ,  $70.56 \pm 1.51$  และ  $68.30 \pm 2.05$  ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4, 5 และ 6 ซึ่งจะเห็นได้ว่า R3 ที่มีการเติมโลหะไอออนในการหมักย่อยครั้งแรกของทุกการบรรทุกสารอินทรีย์, เมื่อร้อยละของก๊าซมีเทนน้อยกว่าร้อยละ 50 หรือเมื่ออัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่าง (VFA/Alkalinity Ratio) มากกว่า 0.3 มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงสุด จึงส่งผลให้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการทดลองอื่น ดังนั้นจึงเป็นรูปแบบการเติมโลหะ



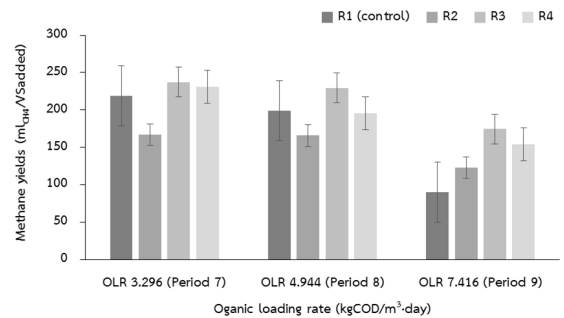


รูปที่ 6 สัดส่วนของก๊าซมีเทนเปรียบเทียบระหว่าง R1 (Control) และ R4

ไอออนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอล

### 3.2 การพิจารณารูปแบบการเติมโลหะไอออนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

จากการเดินระบบที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ไม่เกิน 3.30 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันพบว่า รูปแบบการเติมโลหะไอออนส่งผลกระทบต่ออัตราการผลิตก๊าซมีเทน จากนั้นได้ปรับเพิ่มอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 3.30, 4.94 และ 7.42 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยเติมโลหะไอออนดังแสดงในตารางที่ 6 เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่พบว่า R3 และ R2 มีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) ดังแสดงในรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าการเติมโลหะไอออนทุกวันที่มีการเดินระบบส่งผลให้ระบบมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่ำสุดเท่ากับ 165.90 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้า ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 4.94 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยการเติมโลหะไอออนในการหมักย่อยครั้งแรกของทุกการบรรทุกสารอินทรีย์ เมื่อร้อยละของก๊าซมีเทนน้อยกว่า 50% หรือเมื่ออัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่าง (VFA/Alkalinity Ratio) มากกว่า 0.3 มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 229.40 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้า ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 4.94 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เมื่อเพิ่ม



รูปที่ 7 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของ R1, R2, R3 และ R4 ที่ OLR เท่ากับ 3.30, 4.94 และ 7.42 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

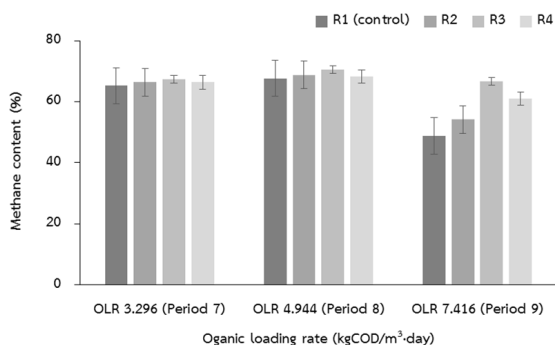
อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ให้เท่ากับ 7.42 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าทุกรูปแบบการเติมโลหะไอออนดังตารางที่ 6 ไม่สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบได้ จึงส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนลดลงอย่างเห็นได้ชัด

ตารางที่ 6 ปริมาณโลหะไอออนที่เติมในระบบ

| ปริมาณการเติมโลหะไอออน (mL/day)                  |      |      |      |
|--------------------------------------------------|------|------|------|
| การบรรทุกสารอินทรีย์ (kgCOD/m <sup>3</sup> ·day) | Fe   | Ni   | Zn   |
| 3.30                                             | 1.95 | 0.33 | 0.28 |
| 4.94                                             | 2.93 | 0.50 | 0.41 |
| 7.42                                             | 4.40 | 0.75 | 0.62 |

หมายเหตุ: เตรียมสารละลาย Fe, Ni และ Zn ที่ความเข้มข้น 300, 10 และ 100 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

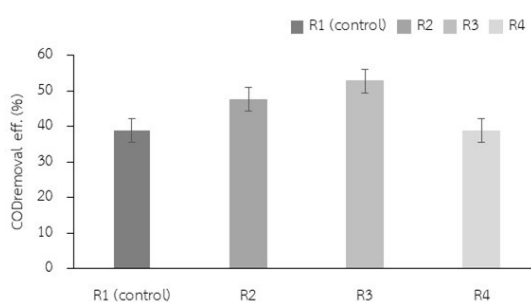
เมื่อพิจารณาสัดส่วนก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพของ R2, R3 และ R4 ซึ่งมีการเติมเหล็ก นิกเกิล และสังกะสี เท่ากับ 635.10, 3.63 และ 27.82 มิลลิลิตรต่อลิตร ตามลำดับ ในรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าสัดส่วนก๊าซมีเทน ส่งผลให้ระบบมีสัดส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์ชีวภาพ R1 ที่ไม่มีการเติมโลหะไอออน โดยในช่วงที่ 8 ของการเดินระบบที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 4.94 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เมื่อมีการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าถึงปฏิกรณ์ R1, R2, R3 และ R4 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และทุกรูปแบบการเติม



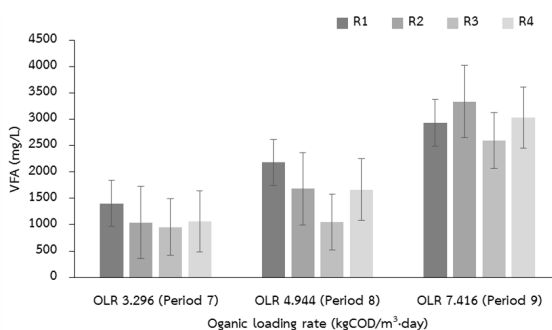
**รูปที่ 8** สัดส่วนก๊าซมีเทนของ R1, R2, R3 และ R4 ที่ OLR เท่ากับ 3.30, 4.94 และ 7.42 กิโลกรัมชีโอติต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

โลหะมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงที่สุด โดยสัดส่วนมีเทนมีค่าเท่ากับ 67.68, 68.82, 70.56 และ 68.30 เปอร์เซ็นต์ สำหรับถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ R1, R2, R3 และ R4 ตามลำดับ และพบว่า สัดส่วนมีเทนของถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ R3 มีค่าสูงสุด และมี สัดส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 67.68 เป็น 70.56 หรือ เพิ่มขึ้นร้อยละ 4.26 ซึ่งมีค่าน้อยกว่างานวิจัยของ Withittaya [11] ที่มีสัดส่วนก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 62.30 เป็น 67.80 หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.64 แสดงให้เห็นได้ว่าการเติมโลหะไอออนสามารถช่วยให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดี ตลอดจนเพิ่มแอกทิวิตี ส่งผลให้การย่อยสลายเกิดขึ้นได้ดี

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอติของถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ R1, R2 และ R4 มีค่าเท่ากับ 38.90, 47.70 และ 38.90 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยถึงปฏิกรณ์ชีวภาพ R3 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอติสูงสุดเท่ากับ 52.80 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Nuttakorn [10] ที่ศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานเอทานอลในประเทศไทย ที่ใช้ถึงปฏิกรณ์ชนิดกวนผสมและเดินระบบที่ OLR ตั้งแต่ 2.70 ถึง 5.00 กิโลกรัมชีโอติต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดชีโอติตั้งแต่ร้อยละ 49.00 ถึง 59.00 จะเห็นได้ว่ารูปแบบการเติมโลหะไอออนมีความเหมาะสมและไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอติของระบบแต่อย่างใด



**รูปที่ 9** ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอติที่ OLR เท่ากับ 4.94 กิโลกรัมชีโอติต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน



**รูปที่ 10** ปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมภายในของ R1, R2, R3 และ R4 ที่ OLR เท่ากับ 3.30, 4.94 และ 7.42 กิโลกรัมชีโอติต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอติของ R3 ที่ OLR เท่ากับ 4.94 กิโลกรัมชีโอติต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอติสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมที่ OLR เท่ากับ 4.94 มีค่าต่ำที่สุดเท่ากับ 1,077.00 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อมีการเติมโลหะไอออนทุกวัน ที่มีการเดินระบบพบว่า ระบบเกิดการสะสมปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดเท่ากับ 1,780.00 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่า VFA/Alk Ratio มีค่าเท่ากับ 0.45 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เกินค่าเหมาะสมต่อจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนสามารถทำงานได้ดี ต้องมีค่าไม่เกิน 0.4 จึงส่งผลให้จุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนถูกยับยั้งการเจริญเติบโต ซึ่งมีผลให้ระบบมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่ลดลงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 10

เมื่อพิจารณาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 7.42 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่า R1 และ R3 มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการป้อนน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลปริมาณมากขึ้น ประกอบกับในน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลมีปริมาณโลหะไอออนอยู่แล้ว จึงทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหย เมื่อทำให้การเติมโลหะไอออนเข้าไปจึงไม่ทำให้ส่งผลต่อระบบอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการเติมโลหะไอออนต้องคำนึงถึงปริมาณของโลหะไอออนที่เติมเข้าสู่ระบบ หากในระบบมีส่วนประกอบของโลหะไอออนมากเกินไป จะส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโตและการผลิตก๊าซชีวภาพของจุลินทรีย์ได้ โดยจากการศึกษาของงานวิจัยของ Yu และคณะ [13] ศึกษาการปรับปรุงระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งด้วยการเติมโลหะไอออน โดยทำการเติมโลหะไอออน ดังนี้ เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ ทองแดง และสังกะสี ซึ่งกำหนดความเข้มข้นของโลหะไอออนที่เติมเท่ากับ 0.02, 2 และ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อเติมโลหะไอออนที่ความเข้มข้นสูงที่สุดเท่ากับ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งระบบเกิดการยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทน เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Irvan [14] ศึกษาผลของการเติมเหล็กไอออนต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม โดยทำการศึกษาค่าความเข้มข้นของเหล็กไอออนในช่วง 236–450 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า ที่ความเข้มข้นของเหล็กไอออนเท่ากับ 330 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งและของแข็งระเหย และสัดส่วนก๊าซมีเทนมีค่ามากที่สุดเท่ากับร้อยละ 69 และเมื่อความเข้มข้นเหล็กไอออนมีค่าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบ และสัดส่วนก๊าซมีเทนมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลของการทดลองนี้ แสดงให้เห็นได้ว่าการเติมโลหะไอออนทุกวันที่มีการเดินระบบ (R2) พบว่า ระบบเกิดการสะสมปริมาณกรดไขมันระเหย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโลหะไอออนที่ทำการเติมเข้าสู่ระบบเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทน จึงแสดงให้เห็นว่าการเติมโลหะไอออนมีความจำเป็นต่อเชื้อจุลินทรีย์ หากเติมในปริมาณมากเกินไป อาจส่งผลให้เกิดการสะสมโลหะไอออน จนทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนได้

#### 4. อภิปรายผลและสรุป

การเดินระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลโดยไม่มีการเติมโลหะไอออน ให้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ  $198.90 \pm 33.56$  มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้า มีสัดส่วนก๊าซมีเทนร้อยละ  $67.68 \pm 2.13$  และมีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมอยู่ในช่วง 2,178.13–2,931.52 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอล ควรเติมธาตุอาหาร เช่น เหล็ก, นิกเกิล และสังกะสี เมื่อมีการเปลี่ยน OLR และทำการเติมโลหะไอออนเมื่อร้อยละของก๊าซมีเทนน้อยกว่า 50% หรืออัตราส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยต่อค่าความเป็นด่าง (VFA/Alkalinity Ratio) มากกว่า 0.3 ส่งผลให้ระบบมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ  $229.40 \pm 19.89$  มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยที่ป้อนเข้า สัดส่วนก๊าซมีเทนร้อยละ  $70.56 \pm 1.50$  และมีปริมาณกรดไขมันระเหยสะสมอยู่ในช่วง 1,049.00–2,598.00 มิลลิกรัมต่อลิตร จะเห็นได้ว่าการเติมโลหะไอออน สามารถกระตุ้นการเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนให้มีผลผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตามหากระบบเกิดการสะสมของธาตุอาหารมากเกินไปความต้องการของจุลินทรีย์กลุ่มเมทาโนเจนอาจทำให้ระบบเกิดสารยับยั้งและสารพิษ (Inhibiting Compounds) ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ และช่วงเวลาการเติมโลหะไอออนส่งผลต่อผลผลิตก๊าซมีเทน และสัดส่วนของก๊าซมีเทน เนื่องจากโลหะไอออนชนิดต่างๆ เป็นธาตุอาหารที่สามารถกระตุ้นการเติบโตของจุลินทรีย์ได้ และหากต้องการนำผลการทดลองที่ได้ไปใช้ในการเดินระบบ ควรพิจารณาถึงความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ด้วย เพื่อความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานจริง

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่สนับสนุนสถานที่ในการวิจัย ขอขอบคุณกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่สนับสนุนงบประมาณในการวิจัย และขอขอบคุณบริษัท ธนภักดิ์ จำกัด



ที่สนับสนุนน้ำเสียอุตสาหกรรมเอทานอลที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency. (2020, December 18). *Energy Situation of Thailand January – December 2017*. [Online]. (in Thai). Available: [https://www.dede.go.th/ewtadmin/ewt/dede\\_web/download/state\\_61/frontpagejan\\_nov60.pdf](https://www.dede.go.th/ewtadmin/ewt/dede_web/download/state_61/frontpagejan_nov60.pdf)
- [2] Y. Wanna (2019, May). Industry Outlook 2019-2021: Beverage Industry. Bank of Ayudhya Public Company Limited., Thailand. [Online]. (in Thai). Available: <https://www.krungsri.com/en/research/industry/industry-outlook/Food-Beverage/Beverage/IO/io-beverage-20-th>
- [3] The Excise Department. (2014, June). List of persons permitted to make liquor under the Liquor Act B.E. 1950. The Excise Department., Thailand. [Online]. (in Thai). Available: <https://www.excise.go.th/cs/groups/public/documents/document/mjaw/mdc1/~edisp/webportal16200075520.pdf>.
- [4] N. Nararatchporn and S. Vanatpornratt, "Biogas production from wastewater treatment technology," *The Journal of Industrial Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 74–85, 2018 (in Thai).
- [5] R. K. Thauer, "Biochemistry of methanogenesis: A tribute to Marjory Stephenson," *Microbiology*, vol. 144, no. 9, pp. 2377–2406 (1998).
- [6] K. Ponlakrit, *Biogasification from Rice Straw*. Bangkok: Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, 2014 (in Thai).
- [7] H. Oechsner, A. Lemmer, D. Ramhold, E. Mathies, E. Mayrhuber and D. Preissler, "Method for producing biogas in controlled concentrations of trace elements," U.S. Patent US20100304457 A1, Dem. 2, 2008.
- [8] L. Janke, A. Leite, M. Nikolausz, T. Schmidt, J. Liebetrau, M. Nelles, and W. Stinner, "Biogas production from sugarcane waste: assessment on kinetic challenges for process designing," *International Journal of Molecular Sciences*. vol. 16, pp. 20685–20703, 2016.
- [9] Energy Research and Development Institute – Nakhonping, "development of a finished product "ERDI Bag" to control and efficiency increasement of biogas production," Chiang Mai University, Chiang Mai, 2020 (in Thai).
- [10] T. Nuttakorn, P. Patiroop, and A. Pruk, "Effects of organic loading rates and recirculation rates on The COD removal efficiency and biogas production rate from distillery slop by lab-scale Anaerobic Baffled Reactors (ABR)," presented at the 2nd National and International Conference, The College of Asian Scholars, Khon Kaen, 2014 (in Thai).
- [11] R. Withittaya, G. Nuttagarn, and A. Pruk, "Development of methane production from starch industry wastewater by addition of ion metal," *Thai Science and Technology Journal (TSTJ)*, vol. 28, no. 4, pp. 705–716, 2020 (in Thai).
- [12] B. S. Moraes, J. M. Triolo, V. P. Lecona, M. Zaiat, and S. G. Sommer, "Biogas production within the bioethanol production chain: use of co-substrates for anaerobic digestion of sugar beet vinasse," *Bioresource technology*, vol. 190, pp. 227–234, 2015.
- [13] D. Yu, J. Liu, Q. Sui and Y. Wei, "Biogas-pH



automation control strategy for optimizing organic loading rate of anaerobic membrane bioreactor treating high COD wastewater,” *Bioresource Technology*, vol. 203, pp. 62–70, 2016.

[14] I. Matseh, “The effect of Fe concentration on the quality and quantity of biogas produced from fermentation of palm oil mill effluent” *International Journal of Science and Engineering*, vol. 3 no. 2, pp. 35–38, 2012.