



การหาปริมาณซัลไฟด์เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบผลิตแก๊สชีวภาพ

Analysis of Sulfide Content for the Enhancement of Biogas Production System

พัชรี อินธนู^{1*} และ ณัฐวรรณ สืบนันตา²

¹สาขาวิชานวัตกรรมเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

²สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

Patcharee Intanoo^{1*} and Nuttawan Suebnanta²

¹Department of Industrial Chemistry Innovation, Faculty of Science, Maejo University, Chiang Mai 50290

²Department of Industrial Chemistry and Textile Technology Faculty of Science, Maejo University,
Chiang Mai 50290

*Corresponding author: patchareeintanoo@gmail.com

Received: 28 August 2024/ Revised: 19 January 2024/ Accepted: 23 January 2024

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้มีการศึกษาปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยระบบตกตะกอนไร้อากาศไหลขึ้นชั้นตอนเดียว (single-stage upflow anaerobic sludge blanket, UASB) ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิก (37 องศาเซลเซียส) โดยไม่ควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง จากการศึกษพบว่าในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพนอกจากจะพบองค์ประกอบของแก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนแล้วยังพบองค์ประกอบของไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่พบมี 2 วัฏภาค คือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคแก๊สหรือแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวหรือซัลไฟด์ส่วนที่ละลาย (dissolved sulfide) ที่เกิดจากการละลายของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำ ปริมาณซัลไฟด์ส่วนที่ละลายและปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่พบอยู่ในช่วง 10-30 และ 120-180 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นปริมาณที่ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของแก๊สชีวภาพหากนำไปใช้งานด้านพลังงาน คือ องค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพจะไม่ส่งผลต่อค่าความร้อนของแก๊สชีวภาพ ในขณะที่ปริมาณซัลไฟด์ส่วนที่ละลายจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยการเกิดสารประกอบโลหะซัลไฟด์จากซัลไฟด์ไอออนที่แตกตัวจากซัลไฟด์ส่วนที่ละลายจนทำให้สารอาหารรองในระบบตกตะกอนกับซัลไฟด์ไอออนซึ่งจะเห็นได้จากสีที่ค่อย ๆ เข้มขึ้นของเศษอาหารที่ผ่านการหมักเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณสารอาหารรองในระบบลดลงอยู่ในระดับที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้สารอาหารรองสำหรับการสร้างน้ำย่อยหรือเอนไซม์ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพลดต่ำลงส่งผลให้ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ลดลง

คำสำคัญ: แก๊สชีวภาพ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ โลหะซัลไฟด์ เศษอาหาร ระบบตกตะกอนไร้อากาศไหลขึ้นชั้นตอนเดียว

Abstract

The research investigated the quantity of sulfide generated in the process of producing biogas as a guideline for developing a biogas production system from food waste using a single-stage upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor at mesophilic temperature (37 °C), without pH control. The study revealed that in the biogas production process, along with the identified gas components such as CH₄, CO₂, and H₂, hydrogen sulfide (H₂S) components were also found. These H₂S components existed in two forms: hydrogen sulfide in the gas phase and in the liquid phase known as dissolved hydrogen sulfide, which resulted from the dissolution of hydrogen sulfide gas in water. The quantities of dissolved sulfide and hydrogen sulfide gas were observed in the ranges of 10-30 and 120-180 mg/L, respectively. It was evident that the quantity of hydrogen sulfide gas did not significantly affect the characteristics of the biogas in term of reducing a heating value of biogas if it were to be utilized for energy. On the other hand, the quantity of dissolved sulfide impacted the efficiency of biogas production due to the formation of metal sulfide complexes from the dissolved sulfide ions. These complexes gradually intensified in color as the rate of organic substrate feeding increased. This phenomenon caused a reduction in the levels of micronutrients in the anaerobic system, resulting in insufficient supply for the microbial enzymes responsible for biogas production. Consequently, the biogas production efficiency decreased, as evidenced by the reduced yield of biogas.

Keywords: Biogas, hydrogen sulfide, metal sulfide, food waste, upflow anaerobic sludge blanket (UASB)

บทนำ

ในปัจจุบันปริมาณความต้องการการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรจนทำให้เกิดปัญหาด้านพลังงานทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น ราคาของน้ำมัน แก๊สธรรมชาติ แก๊สหุงต้มเพิ่มสูงขึ้น และแหล่งพลังงานสำรอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งพลังงานฟอสซิลมีปริมาณลดลง เป็นต้น จากปัญหาด้านพลังงานดังกล่าวจึงมีการคิดค้นแหล่งพลังงานใหม่ที่สามารถผลิตพลังงานได้เทียบเท่ากับแหล่งพลังงานฟอสซิลและมีความยั่งยืน หนึ่งในตัวเลือกที่น่าสนใจ คือ แก๊สชีวภาพ แก๊สชีวภาพเป็นแก๊สที่มีแก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักจึงทำให้แก๊สชีวภาพมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับแก๊สธรรมชาติ มากไปกว่านั้นการนำแก๊สชีวภาพมาใช้ประโยชน์ยังถือเป็นการลดปริมาณการปล่อยแก๊สเรือนกระจกชนิดแก๊สมีเทนออกสู่บรรยากาศ เนื่องจากแก๊สมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการหมักหมมของเสียอินทรีย์ในถังที่โล่งประกอบกับการกำจัดของเสียอินทรีย์ในประเทศไทยมักใช้วิธีการฝังกลบหรือนำของเสียอินทรีย์มากองรวมกันในถังที่โล่งจนเกิดการหมักหมมและปล่อยแก๊สมีเทนในปริมาณสูงออกสู่บรรยากาศโดยตรงจึงทำให้สาเหตุของภาวะโลกร้อนในปัจจุบันเกิดมาจากปริมาณแก๊สมีเทนในปริมาณสูงในบรรยากาศ [1] ดังนั้นหากนำแก๊สชีวภาพที่ได้จากการหมักหมมของเสียอินทรีย์มาใช้ประโยชน์แทนการปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยตรงจะช่วยลดปริมาณแก๊สเรือนกระจกได้ เช่น การใช้แก๊สชีวภาพ 1 กิโลกรัม ในการประกอบอาหารแทนแก๊สหุงต้ม 1 กิโลกรัม สามารถลดปริมาณการปล่อยแก๊สเรือนกระจกได้สูงถึงร้อยละ 54.00 [2] อีกทั้งในการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยการหมักของเสียอินทรีย์นอกจากจะเกิดแก๊สมีเทนแล้วยังเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งอาจถูกกำจัดออกจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยการปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ อย่างไรก็ตามปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพนั้นจัดอยู่ในระดับที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในภาคพลังงานและในภาคอุตสาหกรรม [3] ดังนั้นปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจึงไม่ส่งผลต่อการเกิดภาวะโลกร้อน



ในการติดตั้งระบบผลิตแก๊สชีวภาพมักติดตั้งภายใต้สภาวะไร้อากาศ (anaerobic fermentation) ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิก (37 องศาเซลเซียส) ซึ่ง ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิกถือเป็นอุณหภูมิที่นิยมมากในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใช้พลังงานน้อยจึงมีต้นทุนในการติดตั้งต่ำและยังมีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพใกล้เคียงกับสภาวะอื่น อีกทั้ง ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิกยังเป็นสภาวะแวดล้อมที่เป็นมิตรต่อเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิมีเทนอีกด้วย [4] การผลิตแก๊สชีวภาพจะอาศัยกลไกทางชีววิทยาผ่านปฏิกิริยาชีวเคมี และวัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพจัดอยู่ในกลุ่มของเสียอินทรีย์ที่ประกอบด้วยสารกลุ่มคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันที่สามารถย่อยสลายเพื่อเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้ง่ายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ [5]

ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจะขึ้นอยู่กับความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการเปลี่ยนวัตถุดิบเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สซึ่งสัมพันธ์กับการดำรงอยู่ได้ของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ กล่าวคือสภาวะของระบบต้องเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและมีปริมาณสารอาหารที่เพียงพอต่อการทำกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ โดยการควบคุมสภาวะให้มีความเหมาะสมต่อการดำรงอยู่ของเชื้อจุลินทรีย์สามารถดำเนินการได้ ในขณะที่การควบคุมปริมาณสารอาหารให้อยู่ในระดับที่เพียงพอนั้นทำได้ยาก เนื่องจากสารอาหารมักเกิดการสูญเสียระหว่างการดำเนินงานของระบบโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอาหารรองที่เชื้อจุลินทรีย์ต้องการในปริมาณน้อยและขาดไม่ได้แม้ว่าความต้องการของสารอาหารรองจะอยู่ในระดับหน่วยส่วนในพันล้านส่วน (ppb) [6] สารอาหารรองเป็นสารประกอบกลุ่มโลหะที่มีประจุสองบวก (M^{2+}) และวัตถุดิบจำพวกขยะอินทรีย์และน้ำเสียในอุตสาหกรรมมักมีสารอาหารรองในระดับที่สมดุลจึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณสารอาหารรองด้วยการเติมสารเคมีกลุ่มออกไซด์หรือกลุ่มคลอไรด์ของโลหะ อย่างไรก็ตามในระหว่างกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพมักพบปัญหาปริมาณสารอาหารรองที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่เกิดขึ้นพร้อมกับแก๊สมีเทนในปริมาณที่ส่งผลเสียต่อเชื้อจุลินทรีย์ (ความเข้มข้นประมาณ 1,000-20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) หรืออาจมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของซัลเฟตในสารอินทรีย์ประเภทโปรตีนในสภาวะความเป็นกรดต่ำ ($pH < 7$) แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบบางส่วนสามารถละลายได้น้ำเนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความสามารถในการละลายน้ำที่ดี (ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถละลายน้ำได้ 3.40×10^{-3} มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 100 มิลลิโมลาร์) เมื่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารอาหารรอง เช่น Fe^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+} , Mo^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{2+} และ Ni^{2+} เป็นต้น [7] จนเกิดเป็นสารประกอบโลหะซัลไฟด์ตกตะกอนบริเวณด้านล่างของถังปฏิกรณ์ส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถนำสารอาหารรองไปใช้ประโยชน์ในด้านการสร้างน้ำย่อยหรือเอนไซม์ได้เป็นสาเหตุให้ระบบผลิตแก๊สชีวภาพล้มเหลว เพื่อป้องกันความล้มเหลวของระบบผลิตแก๊สชีวภาพและลดการสูญเสียของสารอาหารรองสามารถดำเนินการได้ด้วยการเติมสารอินทรีย์ เรียกว่า สารคัลเลนท์ ลงไปในระบบซึ่งเป็นการป้องกันการเกิดซัลไฟด์ไอออน [8]

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเกิดซัลไฟด์และปริมาณซัลไฟด์ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยระบบตกตะกอนไร้อากาศไหลขึ้นชั้นตอนเดียว (Single-stage upflow anaerobic sludge blanket, UASB) ภายใต้สภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิเมโซฟิลิก (37 องศาเซลเซียส) และไม่ควบคุมค่าความเป็นกรดต่ำ (pH) เพื่อเป็นแนวทางในการลดและการป้องกันการเกิดซัลไฟด์ไอออนให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าระดับความเป็นพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์ตลอดจนเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

ตะกอนหัวเชื้อในการวิจัยนี้ได้มาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังของบริษัท ทรัพย์ทิพย์ จำกัด จังหวัดลพบุรี ตะกอนหัวเชื้อจะถูกนำมากำจัดเศษหินดินและทรายด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมครอน และเก็บที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้งาน ตะกอนหัวเชื้อที่ใช้ในการวิจัยนี้มีความเข้มข้นเริ่มต้น 70,880 มิลลิกรัมต่อลิตร



เศษอาหารในการวิจัยนี้ได้มาจากครัวอ่างทอง อาคารจุฬารักษ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ และเป็นเศษอาหารที่ประกอบด้วยเศษข้าว เศษพืชผัก และเศษเนื้อสัตว์ในอัตราส่วน 72.89 : 18.75 : 8.36 โดยน้ำหนักตามลำดับ จากการศึกษาส่วนประกอบของเศษอาหารจะเห็นว่าเศษอาหารที่ใช้จัดเป็นของเสียอินทรีย์ที่อยู่กลุ่มคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate-rich material) เศษอาหารจะถูกนำมาลดขนาดด้วยเครื่องป้อนอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเร็วรอบ 14,000 ต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และเก็บที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้งาน จากคุณลักษณะของเศษอาหารเริ่มต้นพบว่าเศษอาหารมีอัตราส่วนของค่าซีโอดี (chemical oxygen demand, COD) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen content, N) และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorous content, P) (COD:N:P) คือ 100 : 1.6 : 1.08 ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราส่วนระหว่าง COD:N:P ทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่าเศษอาหารที่ใช้ในการวิจัยนี้มีสารอาหารหลักประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (ตารางที่ 1) (อัตราส่วนระหว่าง COD:N:P ทางทฤษฎีของสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศคือ 100:1.0:0.2 [4])

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเศษอาหารที่ใช้ในงานวิจัยนี้

คุณสมบัติ	หน่วย	ค่า
ซีโอดี (COD)	มิลลิกรัมต่อลิตร	149,493
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen content)	มิลลิกรัมต่อลิตร	2,391.76
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorous content)	มิลลิกรัมต่อลิตร	1,620.00
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid, TS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	908,000
ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (Volatile solid, VS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	69,680
ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)	-	4.30
ปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมด (Total sulfide content)	มิลลิกรัมต่อลิตร	124
อัตราส่วน COD:N:P:S	-	100 : 1.6 : 1.08 : 0.00083

ระบบตกตะกอนไร้อากาศไหลขึ้นขึ้นตอนเดียวที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร ทำมาจากพลาสติกทึบแสงชนิดพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) เพื่อช่วยในการป้องกันแสง เนื่องจากไม่ต้องการแหล่งพลังงานแสงในกระบวนการผลิตและแสงถือเป็นปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ลดลง ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักตกตะกอนไหลขึ้นขึ้นตอนเดียวนั้นเศษอาหารจะป้อนเข้าสู่ระบบทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (หรือ COD loading rate) แตกต่างกันในช่วง 4.27-13.92 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ($\text{kg}/\text{m}^3\text{day}$) ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิก คือ 37 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิหมุนเวียนภายนอก (water jacket) และไม่ควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง โดยในแต่ละอัตราการป้อนสารอินทรีย์ระบบหมักจะทำงานจนถึงสภาวะคงตัว คือ สภาวะที่ค่าซีโอดีของเศษอาหารที่ผ่านกระบวนการหมักและอัตราการผลิตแก๊สคงที่ (ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป) จากนั้นจะนำเศษอาหารที่ผ่านการหมักมาวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อการวิเคราะห์ผลต่อไป

ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจะพบผลิตภัณฑ์ 2 ประเภท คือ ผลิตภัณฑ์แก๊สและผลิตภัณฑ์ของเหลว ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สที่ผลิตได้จะวิเคราะห์อัตราการผลิตในแต่ละวันด้วยเครื่องนับแก๊ส (gas counter) ที่อาศัยหลักการการแทนที่น้ำ ส่วนองค์ประกอบแก๊สจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีที่ประกอบด้วยคอลัมน์ 2 ชนิด คือ molecular sieve 5A (2.0 m×3.00 ID) และ Porapak Q (2.0 m×3.00 ID) โดยการพาแก๊สตัวอย่างเข้าสู่คอลัมน์ ณ สภาวะอุณหภูมิคงที่ (isothermal) จะอาศัยแก๊สอาร์กอนเป็นตัวพาและมีเครื่องตรวจวัดชนิดการนำความร้อน (thermal conductivity detector, TCD) เป็นตัวตรวจวัด สำหรับผลิตภัณฑ์ของเหลวจะวิเคราะห์ค่าซีโอดีด้วยวิธีไดโครเมตและเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (HACH, DR2700)

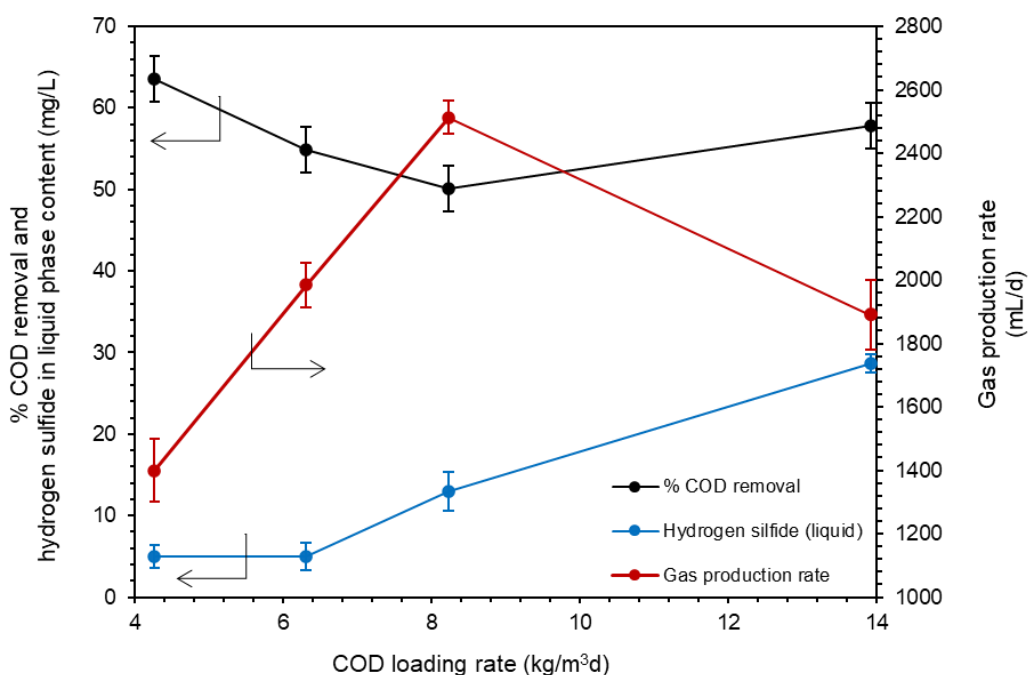


ส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (total volatile fatty acid) และองค์ประกอบจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC, Aminex HPX-87H column) โดยมีตัวตรวจวัดชนิดดัชนีหักเหของแสง (Refractive Index detector) ซึ่งอาศัยการวัดค่าทางเคมีไฟฟ้าของสารที่จะถูกแยกออกจากคอลัมน์ [9] ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorous) ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ (mixed liquor volatile suspended solids, MLVSS) และความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้าง (effluent volatile suspended solids, Effluent VSS) จะวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานที่อาศัยความแตกต่างของน้ำหนักก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ระบุในงานวิจัยก่อนหน้านี้ [4] ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมด (total sulfides) และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำหรือซัลไฟด์ส่วนที่ละลาย (dissolved sulfides) ในเศษอาหารเริ่มต้นและเศษอาหารที่ผ่านการหมักจะใช้วิธีไอโอดเมตริก (iodometric titration method)

ผลการวิจัย

1. ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (% COD removal) ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวหรือซัลไฟด์ส่วนที่ละลายและอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ (biogas production rate)

ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์มีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ศึกษาซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ (ภาพที่ 1) และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่มากกว่า 8.23 kg/m³day คือ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.92 kg/m³day อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวหรือซัลไฟด์ส่วนที่ละลาย (ภาพที่ 1) โดยไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวสามารถแตกตัวให้ซัลไฟด์ไอออน (S²⁻) ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการสูญเสียของสารอาหารรองในระบบ โดยจะส่งผลเสียโดยตรงต่อประสิทธิภาพการปล่อยเอนไซม์ของเชื้อจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ลดลง จากประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ พบว่าเศษอาหารสามารถย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิก [10] จึงแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์แตกต่างกันมากไปกว่านั้นอัตราการผลิตแก๊สสูงสุดพบ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 8.23 kg/m³day (ภาพที่ 1)

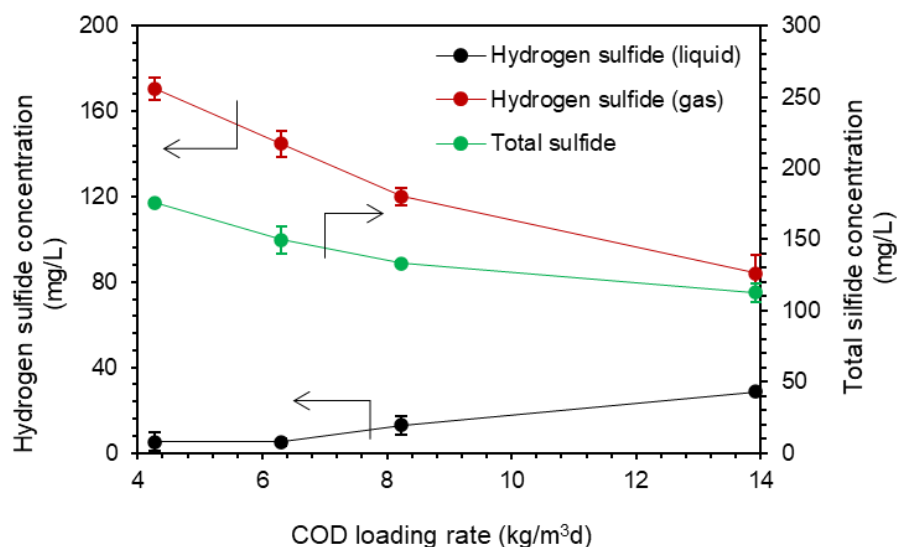


ภาพที่ 1 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวหรือซัลไฟด์ส่วนที่ละลายและอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์แตกต่างกันที่อุณหภูมิเมโซฟิลิกและไม่ควบคุมความเป็นกรดต่าง

2. ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวหรือซัลไฟด์ส่วนที่ละลาย (dissolved sulfide) ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมด (total sulfides)

แก๊สชีวภาพที่ผลิตผ่านกระบวนการหมักไร้อากาศด้วยกลไกทางชีวเคมีส่วนใหญ่จะพบองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก ซึ่งอาจมีแก๊สอื่น เช่น แก๊สไฮโดรเจน แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจนในปริมาณเล็กน้อย นอกจากแก๊สที่ได้กล่าวมาข้างต้นในแก๊สชีวภาพแล้ว ยังพบองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งพบในระดับพีพีเอ็ม (part per million; ppm) และมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของเชื้อจุลินทรีย์เป็นอย่างมาก โดยในงานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมดและปริมาณซัลไฟด์ส่วนที่ละลายหรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวซึ่งแสดงถึงปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำ จากการศึกษากการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยระบบหมักไร้อากาศไหลขึ้นชั้นตอนเดียวนี้ พบว่ามีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นและปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่พบมากกว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลว

ภาพที่ 2 แสดงปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน พบว่าแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีปริมาณลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.34-13.92 $\text{kg/m}^3\text{day}$ ในขณะที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวมีปริมาณเพิ่มขึ้นตลอดช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ศึกษา (ภาพที่ 2) ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่พบในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 120-180 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งถือเป็นระดับความเข้มข้นต่ำพอที่จะไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนของแก๊สชีวภาพเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานจากการเผาไหม้แก๊สชีวภาพอย่างสมบูรณ์ [11] กล่าวคือปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในช่วงความเข้มข้น 120-180 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่ทำให้ค่าความร้อน (heating value) ของแก๊สชีวภาพลดลง อย่างไรก็ตามปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในช่วงดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อการกัดกร่อนอุปกรณ์โลหะเนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีฤทธิ์ของการกัดกร่อน [12] ส่วนปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวนั้นจะพบในช่วงความเข้มข้น 10-30 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งถือเป็นปริมาณที่ส่งผลเสียโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถนำสารอาหารรองไปใช้ประโยชน์ได้เพราะสารอาหารรองไม่ได้อยู่ในรูปของสารแขวนลอยหรือสารประกอบที่ละลายน้ำได้ (water soluble complex) แต่ตกตะกอนอยู่ในรูปของโลหะซัลไฟด์ (MS) จากซัลไฟด์ไอออนส่งผลให้ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงสุดที่ 13.92 $\text{kg/m}^3\text{day}$ มีอัตราการเกิดแก๊สต่ำที่สุด (ภาพที่ 1) สัมพันธ์กับปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวสูงสุดและสีของเศษอาหารที่เข้มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเศษอาหารที่ผ่านการหมัก ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ระหว่าง 4.24-8.23 $\text{kg/m}^3\text{day}$ (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 2 ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวหรือซัลไฟด์ที่ละลาย ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมดในระบบหมัก ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์แตกต่างกันที่อุณหภูมิเมโซฟิลิกและไม่ควบคุมความเป็นกรดต่าง



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

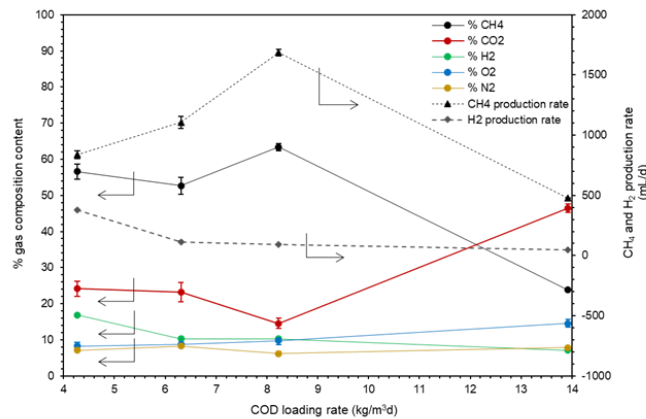
ภาพที่ 3 ลักษณะทางกายภาพด้านสีของ (ก) เศษอาหารเริ่มต้นและเศษอาหารที่ผ่านการหมัก ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ (ข) $4.27 \text{ kg/m}^3\text{day}$ (ค) $6.31 \text{ kg/m}^3\text{day}$ (ง) $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ และ (จ) $13.92 \text{ kg/m}^3\text{day}$

3. องค์ประกอบแก๊สที่ผลิตได้ (gas composition) อัตราการผลิตแก๊สชนิดแก๊สมีเทน (methane and hydrogen production rate) ผลได้ของแก๊สชนิดแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรเจน (methane and hydrogen yield) และอัตราการผลิตแก๊สชนิดแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรเจนแบบจำเพาะ (specific methane and hydrogen production rate, SGPR)

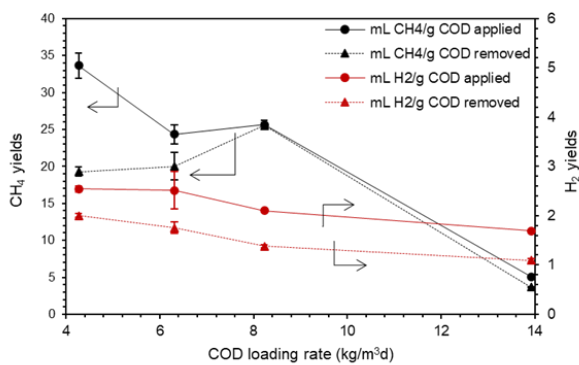
องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ในการวิจัยแสดงดังภาพที่ 4 (ก) ซึ่งพบว่าองค์ประกอบหลักของแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ คือ แก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยพบแก๊สไฮโดรเจน แก๊สออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจนในปริมาณเล็กน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 20 โดยปริมาตร) ปริมาณแก๊สมีเทนและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.27 - $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ และมีค่าลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์มากกว่า $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ คือ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ $13.92 \text{ kg/m}^3\text{day}$ ปริมาณแก๊สมีเทนและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนมากที่สุดพบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ ในขณะที่ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและอัตราการผลิตแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มลดลงตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ ปริมาณแก๊สมีเทนที่พบในแก๊สชีวภาพมากกว่าแก๊สไฮโดรเจนคิดเป็นร้อยละโดยเฉลี่ย 75 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นผลมาจากการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่อุณหภูมิเมโซฟิลิกและไม่ควบคุมความเป็นกรดต่าง จึงทำให้เมื่อระบบดำเนินไประบบจะเริ่มเข้าสู่สภาวะเหมาะสม คือ สภาวะที่ความเป็นกรดลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สโดยปราศจากการสะสมในระบบทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 6.04 เป็น 6.57 (โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป) ค่า pH 6.57 ถือเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิตมีเทนในงานวิจัยนี้และสัมพันธ์กับองค์ประกอบของแก๊สที่ผลิตได้ส่วนใหญ่ คือ แก๊สมีเทน อย่างไรก็ตาม ณ สภาวะความเป็นกรดที่ 6.57 เชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิตไฮโดรเจนไม่สามารถดำรงอยู่ได้ส่งผลให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (ภาพที่ 4 (ก)) สำหรับประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สจะแสดงในรูปผลได้ของแก๊สและอัตราการผลิตแก๊สแบบจำเพาะ ผลได้ของแก๊สแสดงถึงประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยเชื้อจุลินทรีย์เพื่อเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สในขณะอัตราการผลิตแก๊สแบบจำเพาะแสดงถึงความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส

ผลได้ของแก๊สมีเทนสามารถแสดงได้สองหน่วย คือ $\text{mL CH}_4/\text{g COD}_{\text{applied}}$ และ $\text{mL CH}_4/\text{g COD}_{\text{removed}}$ เช่นเดียวกับอัตราการเกิดแก๊สแบบจำเพาะที่สามารถแสดงได้สองหน่วย คือ $\text{mL CH}_4/\text{L d}$ และ $\text{mL CH}_4/\text{g MLVSS d}$ ซึ่งทั้งสองหน่วยให้ผลที่แตกต่างกันดังนี้ ผลได้ของแก๊สมีเทนหน่วย $\text{mL CH}_4/\text{g COD}_{\text{removed}}$ (ภาพที่ 4 (ข)) มีแนวโน้มเช่นเดียวกับอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะในหน่วย $\text{mL CH}_4/\text{L d}$ (ภาพที่ 4 (ค)) กล่าวคือ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.23 - $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ และมีค่าสูงสุดที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ สอดคล้องกับอัตราการเกิดแก๊สมีเทนและปริมาณแก๊สมีเทนสูงสุด (ภาพที่ 4(ก)) ในขณะที่ผลได้ของแก๊สมีเทนหน่วย $\text{mL CH}_4/\text{g COD}_{\text{applied}}$ และอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะหน่วย $\text{mL CH}_4/\text{g MLVSS d}$ มีแนวโน้มที่แตกต่างกันออกไปดังแสดงในภาพที่ 4 (ข) – (ค) คือ ผลได้ของแก๊สมีเทนหน่วยของ $\text{mL CH}_4/\text{g COD}_{\text{applied}}$ มากที่สุดและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะหน่วย $\text{mL CH}_4/\text{g MLVSS d}$ สูงสุด พบที่

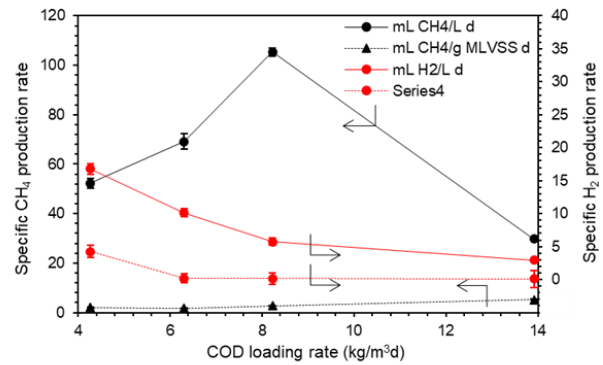
อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.32 และ 13.92 kg/m³day ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นของการดำเนินงานของระบบ เชื้อจุลินทรีย์ยังต้องการระยะเวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะ แวดล้อมจึงทำให้การทำกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ไม่เต็มประสิทธิภาพเท่าที่ควร ในทำนองเดียวกันที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงสุดระบบอยู่ในสภาวะความเป็นกรดมากขึ้นจากการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายจนเชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถดำรงอยู่ได้และตายในที่สุด สำหรับผลได้ของแก๊สไฮโดรเจนและอัตราการผลิตแก๊สไฮโดรเจนแบบจำเพาะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทน (ภาพที่ 4 (ข) – (ค)) ซึ่งเกิดจากสภาวะของความเป็นกรดต่างของระบบไม่เหมาะต่อการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิตไฮโดรเจน กล่าวคือความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมต่อการดำรงอยู่ของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิตไฮโดรเจนอยู่ที่ค่า pH เท่ากับ 5.5 [4]



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4 (ก) องค์ประกอบของแก๊สที่ผลิตได้ อัตราการผลิตแก๊สชนิดแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรเจน (ข) ผลได้ของแก๊สชนิดแก๊สมีเทนและแก๊สชนิดแก๊สไฮโดรเจน และ (ค) อัตราการผลิตแก๊สชนิดแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรเจนแบบจำเพาะ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์แตกต่างกันที่อุณหภูมิเมโซฟิลิกและไม่ควบคุมความเป็นกรดต่าง

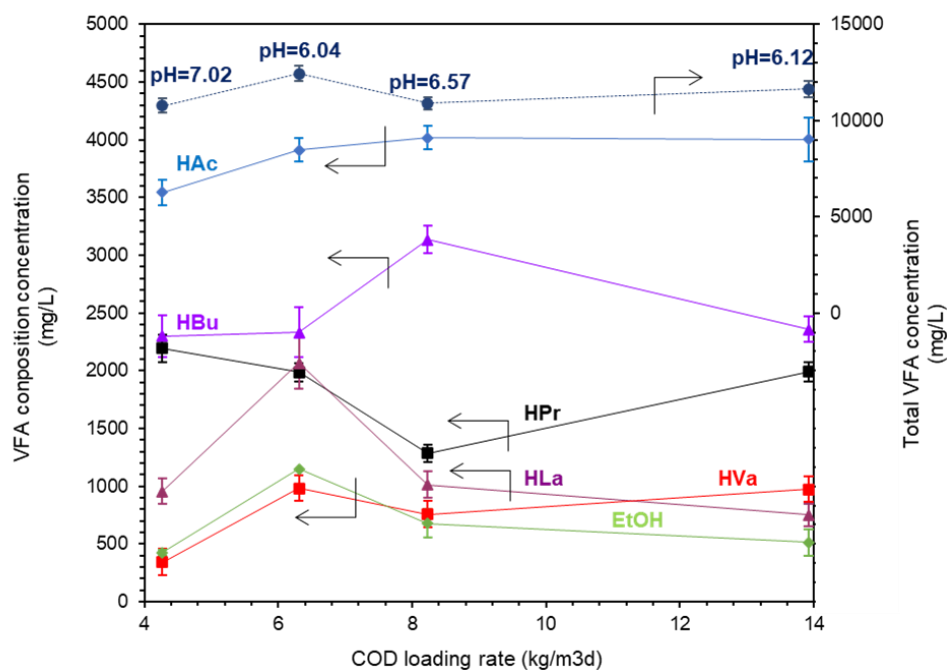
4. ปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (total volatile fatty acid, VFA) และองค์ประกอบ (VFA composition)

ปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแสดงในภาพที่ 5 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.23 เป็น 6.31 kg/m³day ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนที่ลดลงในรูปของอัตราการผลิตแก๊สมีเทน ผลได้ของแก๊สมีเทน อัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะลดลงในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.23-6.31 kg/m³day (ภาพที่ 4) และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่มากกว่า 6.31 kg/m³day ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดมีค่าลดลงในขณะที่ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนมีแนวโน้ม



เพิ่มขึ้นเช่นกัน (ภาพที่ 4) ในทางตรงกันข้ามประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนมีแนวโน้มลดลงอีกครั้งเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์มากกว่า $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ สัมพันธ์กับปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 5)

สำหรับองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายที่พบ ได้แก่ กรดอะซิติก (acetic acid, HAc) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid, HPr) กรดบิวทีริก (butyric acid, HBU) กรดวาเลริก (valeric acid, HVa) และกรดแลคติก (lactic acid, HLa) ตลอดจนยังพบสารประกอบแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอล (ethanol, EtOH) ในกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นด้วย ปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิดรวมถึงเอทานอลมีแนวโน้มเช่นเดียวกับปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (ภาพที่ 5) โดยกรดไขมันระเหยง่ายชนิดอะซิติกจะพบในปริมาณมากที่สุด มากไปกว่านั้นยังพบระดับความเป็นพิษของกรดไขมันระเหยง่ายต่อประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ของงานวิจัยนี้ คือ ระดับของกรดไขมันระเหยง่ายที่ $11,000$ มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดที่มากขึ้นแสดงถึงโอกาสของกรดไขมันระเหยง่ายที่ไม่ถูกเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเชื้อจุลินทรีย์สูงจนถูกสะสมในระบบ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากระยะเวลาที่สารอินทรีย์อยู่ในระบบสั้นเกินไปจนทำให้เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ทันหรือปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ลดลง

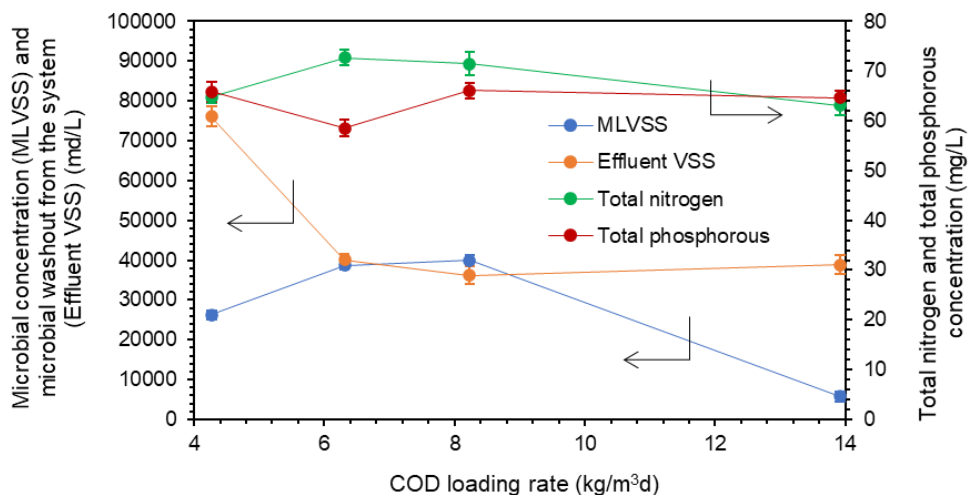


ภาพที่ 5 ปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่าย ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์แตกต่างกันที่อุณหภูมิเมโซฟิลิกและไม่ควบคุมความเป็นกรดต่ำ

5. ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ (MLVSS) ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบ (effluent VSS) ความเข้มข้นของไนโตรเจน (total nitrogen concentration) และความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (total phosphorous concentration)

ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบและความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบแสดงในภาพที่ 6 จากภาพที่ 6 จะเห็นว่าเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.27 เป็น $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นในรูปของอัตราการผลิตแก๊สมีเทน ปริมาณแก๊สมีเทน ผลได้ของแก๊สมีเทน และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนแบบจำเพาะ (ภาพที่ 4) ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบมีค่ามากขึ้น แสดงให้เห็นว่าตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นคือ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ $4.27 \text{ kg/m}^3\text{day}$ จนถึงช่วงกลาง คือ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ $6.31\text{-}8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ เชื้อจุลินทรีย์สามารถดำเนินกิจกรรมได้ เช่น การปล่อยเอนไซม์ การเติบโต เป็นต้น จึงทำให้การทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ค่อยๆ

มีประสิทธิภาพมากขึ้นและมีปริมาณเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการใช้ประโยชน์ของสารอาหารหลักชนิดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของเชื้อจุลินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้นในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.27-8.23 kg/m³day (ภาพที่ 6) เป็นผลให้การผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นด้วยในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ระหว่าง 4.23-8.23 kg/m³day (ภาพที่ 4) ส่วนความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ และยังพบว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่สามารถทำงานได้ (inactive bacteria) หรือเชื้อจุลินทรีย์ที่ตายแล้วเท่านั้นที่จะถูกชะล้างออกจากระบบด้วยการลอยขึ้นและล้นออกเมื่อปริมาณทำงานมากกว่า 16 ลิตร [4] ซึ่งอาจเกิดมาจากเชื้อจุลินทรีย์หยุดการเติบโตที่มีสาเหตุมาจากปริมาณสารอาหารมีไม่เพียงพอเนื่องจากมีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวมากเกินไปจนเป็นแหล่งของซัลไฟด์ไอออน (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 6 ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบ การใช้ไนโตรเจนและการใช้ฟอสฟอรัสของเชื้อจุลินทรีย์ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์แตกต่างกันที่อุณหภูมิเมโซฟิลิกและไม่ควบคุมความเป็นกรดต่าง

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารภายใต้สภาวะปราศจากออกซิเจนอิสระด้วยกระบวนการหมักขั้นตอนเดียวโดยใช้ระบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้น ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิกโดยไม่มีการควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง จะเห็นว่าเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.23 เป็น 8.23 kg/m³day ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์มีการเปลี่ยนแปลงพร้อมกับอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้จะมีแก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักและปริมาณของแก๊สมีเทนที่พบยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนสารอินทรีย์จาก 4.23 เป็น 8.23 kg/m³day อีกด้วย (ภาพที่ 4 (ก)) จากการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์แสดงให้เห็นว่าเชื้อจุลินทรีย์สามารถปล่อยเอนไซม์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในเศษอาหารเพื่อเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้ แม้ว่าในช่วงเริ่มต้น คือ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 4.27 kg/m³day จะมีอัตราการย่อยสลายช้า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากระยะเวลาที่เชื้อจุลินทรีย์ต้องการในการปรับตัวเพื่อเติบโตไม่เหมาะสมจึงทำให้มีอัตราการผลิตแก๊สมีเทนต่ำ (ภาพที่ 4 (ก)) อย่างไรก็ตามหลังจากช่วงเริ่มต้น คือ ช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.27-8.23 kg/m³day อัตราการผลิตแก๊สมีเทนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณสารอินทรีย์หรือปริมาณเศษอาหารที่ป้อนเข้าสู่ระบบรวมถึงระยะเวลาที่สารอินทรีย์อยู่ในระบบเพียงพอและเหมาะสมต่อเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายโดยปราศจากการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย ในทางตรงกันข้ามหากปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบมากเกินไป คือ ป้อนด้วยอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่มากกว่า 8.23 kg/m³day จะทำให้อัตราการผลิตแก๊สในรูปของปริมาณแก๊ส



มีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนลดลง เนื่องจากเมื่อเศษอาหารถูกป้อนเข้าสู่ระบบแล้วจะถูกเปลี่ยนให้เป็นกรดไขมันระเหยง่ายก่อนที่จะถูกเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สตามกระบวนการทางชีวเคมี (biological process) และกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นหากเกิดในปริมาณที่มากเกินไปจะเกิดการสะสมในระบบจนทำให้ระบบไม่สามารถต้านทานสภาวะความเป็นกรดสูงจากกรดไขมันระเหยง่ายที่สะสมได้และก่อให้เกิดระดับที่เป็นพิษ (toxicity level) ต่อเชื้อจุลินทรีย์ คือ ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในระดับความเข้มข้น 11,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยการไปยับยั้งการเติบโตเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ลดลงแสดงในรูปอัตราการผลิตแก๊สที่ลดลงและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในระบบต่ำลง (ภาพที่ 6) [4, 13, 14] จากผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยระบบตกตะกอนไร้อากาศไหลขึ้นชั้นตอนเดียว คือ สภาวะที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถดำรงอยู่ได้และมีอัตราการเติบโตสูงสุด ซึ่งสภาวะดังกล่าวในงานวิจัยนี้จะเป็นสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดต่างที่ 6.57 และพบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.23 kg/m³day

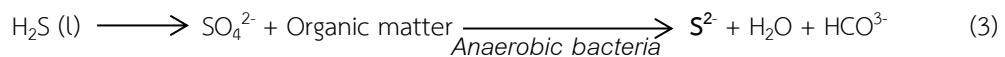
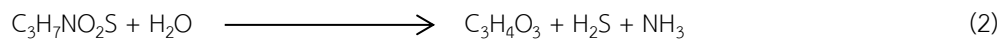
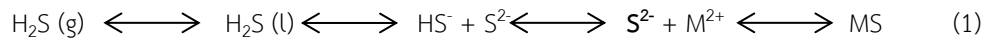
สภาวะที่เหมาะสม (optimum condition) คือ สภาวะที่แสดงถึงประสิทธิภาพการผลิตแก๊สสูงสุดในรูปของผลได้ของแก๊สมีเทนและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะที่สูงสุด อย่างไรก็ตามผลได้ของแก๊สมีเทนและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะนั้นสามารถแสดงได้สองหน่วยดังในภาพที่ 4 (ข) – (ค) และพบว่าผลได้ของแก๊สมีเทนหน่วย ml CH₄/g COD_{removed} สูงสุดและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะหน่วย ml CH₄/L d ที่มากที่สุดพบ ณ สภาวะเหมาะสม คือ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.23 kg/m³day ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสูงสุดและปริมาณแก๊สมีเทนสูงสุด (ภาพที่ 4 (ก)) มากไปกว่านั้นยังมีความสอดคล้องกับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบสูงสุดด้วย (ภาพที่ 6) ในขณะที่ผลได้ของแก๊สมีเทนหน่วย ml CH₄/g COD_{applied} ที่สูงสุดและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะหน่วย ml CH₄/g MLVSS d ที่สูงที่สุดพบ ณ สภาวะที่แตกต่างกันออกไปดังในภาพที่ 4 (ข) และภาพที่ 4 (ค) ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงต้นของการดำเนินไปของระบบ คือ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์เริ่มต้นที่ 4.23 kg/m³day เชื้อจุลินทรีย์มีการเติบโตอยู่ในช่วงระยะพัก (lag phase) โดยจะมีการปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมใหม่จึงต้องใช้เวลาในการปรับตัว ในช่วงระยะพักนี้เชื้อจุลินทรีย์ยังไม่ได้มีการเพิ่มจำนวนและไม่เกิดการแบ่งเซลล์ แต่เซลล์จะเตรียมพร้อมสำหรับการเติบโตต่อไป จึงเป็นผลให้สารอินทรีย์ที่ป้อนเข้ามายังไม่เกิดการย่อยสลายหรืออาจเกิดการย่อยสลายไปบางส่วนด้วยอัตราที่ช้าและไม่สมบูรณ์ จนทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (% COD removal) ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 4.23 kg/m³day นั้นสูงสุด (ภาพที่ 1) เป็นสาเหตุให้ผลได้ของแก๊สมีเทนในหน่วย ml CH₄/g COD_{applied} มีค่าสูงที่สุดนั่นเอง (ภาพที่ 4 (ข)) สำหรับอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะในหน่วย ml CH₄/g MLVSS d ที่มากที่สุดนั้นพบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงสุด คือ 13.92 kg/m³day นั้นเกิดจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ (MLVSS) ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่สูงสุดนี้มีปริมาณต่ำที่สุด (ภาพที่ 6) ซึ่งมีสาเหตุมาจาก ณ สภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะแวดล้อมที่เป็นพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์ในการดำรงอยู่จึงส่งผลเสียโดยตรงต่ออัตราการแบ่งเซลล์เพื่อการเจริญที่ลดต่ำลงของเชื้อจุลินทรีย์ นั่นคือสภาวะความเป็นกรดต่างที่ 6.12 ตลอดจนเศษอาหารที่ใช้ในงานวิจัยนี้จัดเป็นของเสียอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตจึงมีอัตราการย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ (hydrolysis rate) ที่ดีกว่าเศษอาหารประเภทโปรตีนและประเภทไขมันตามลำดับ ดังนั้นกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นรวมถึงองค์ประกอบของแก๊สมีเทนที่ได้ส่วนใหญ่มาจากการย่อยสลายสารกลุ่มคาร์โบไฮเดรตในเศษอาหารเป็นหลัก

เมื่อพิจารณาแนวโน้มของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดตลอดช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ศึกษาแล้วพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.31-8.23 kg/m³day (ภาพที่ 5) ในขณะที่ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 4) ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแก๊สมีเทนที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้เกิดผ่านกระบวนการอะซิโดคลาสติกมากกว่ากระบวนการรีดักชันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [11] โดยยืนยันได้จากชนิดและปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายชนิดกรดอะซิติกที่พบในปริมาณมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรดไขมันระเหยง่ายชนิดอื่น (ภาพที่ 5) ซึ่งกรดอะซิติกที่เกิดขึ้นมาจากการแตกตัวของไขมันระเหยง่ายชนิดกรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก กรดวาเลอริก และกรดแลคติก [4] และกรดอะซิติกนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สโดยไม่หลงเหลือในระบบหรือเหลือในปริมาณน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพที่ดีขึ้นจะสอดคล้องกับกรดอะซิติกที่เกิดขึ้นในปริมาณมากและเกิดการสะสมใน

ระบบต่ำ [12] โดยทั่วไปการผลิตแก๊สมีเทนจะเกิดผ่านกลไกการเปลี่ยนรูปกรดอะซิติกคิดเป็นร้อยละ 70 โดยปริมาตรของแก๊สมีเทนที่ผลิตจากกระบวนการอะซิโดคลาสติกและกระบวนการรีดักชันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์รวมกัน ดังนั้นสถานะของการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยระบบหมักไร้อากาศไหลขึ้นขั้นตอนเดียวที่มีการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดอยู่ในระดับต่ำกว่าระดับที่เป็นพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์ในงานวิจัยนี้ คือ สถานะที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ และมีความเป็นกรดต่ำกว่า 6.57 [13] (ภาพที่ 5) สัมพันธ์กับการนำสารอาหารหลักชนิดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ด้านการเติบโตโดยแสดงในรูปปริมาณการใช้สารอาหารหลักชนิดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.23 เป็น $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ (ภาพที่ 6) กล่าวคือเชื้อจุลินทรีย์มีการดูดซึมสารอาหารเข้าสู่เซลล์จนเกิดการเพิ่มจำนวนเซลล์เป็น 2 เท่า สำหรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่มากกว่า $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ ปริมาณการใช้สารอาหารหลักชนิดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของเชื้อจุลินทรีย์คงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากซึ่งเป็นผลมาจากการสะสมของเสียและสารพิษจากกระบวนการหมักบอลลิม นั้นคือกรดไขมันระเหยง่าย จึงทำให้การเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในช่วงระยะเซลล์ตาย (death phase) ที่เชื้อจุลินทรีย์จะมีการตายอย่างรวดเร็ว สัมพันธ์กับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบมากที่สุด (ภาพที่ 6)

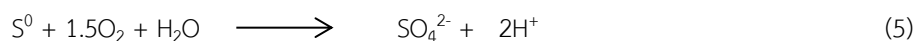
สำหรับการศึกษาปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมดของการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยระบบหมักไร้อากาศไหลขึ้นขั้นตอนเดียวนั้นจะพบไฮโดรเจนซัลไฟด์ 2 ภูมิภาค คือ ภูมิภาคของเหลวและภูมิภาคแก๊ส โดยไฮโดรเจนซัลไฟด์ในภูมิภาคของเหลวมาจากการละลายของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำ ซึ่งมักส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์จนก่อให้เกิดผลกระทบต่อการผลิตแก๊สชีวภาพในที่สุด เนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ในภูมิภาคของเหลวสามารถแตกตัวให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออน (HS^-) และซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) โดยซัลไฟด์ไอออนที่ได้มักจะไปทำปฏิกิริยากับสารอาหารรองที่เชื้อจุลินทรีย์ต้องการในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้เพื่อใช้ในการสร้างน้ำย่อยชนิดต่างๆ จนเกิดเป็นสารประกอบโลหะซัลไฟด์ (สมการที่ (1)) และในระบบผลิตแก๊สชีวภาพส่วนใหญ่มักพบปัญหาการสูญหายของสารอาหารรองบางชนิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซัลไฟด์ไอออนและสารอาหารรองจนทำให้ปริมาณสารอาหารรองลดลงอยู่ในระดับที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ เพราะซัลไฟด์ไอออนนอกจากจะเกิดจากการแตกตัวของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำดังสมการที่ (1) แล้วยังเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีนที่มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ในรูปของซัลเฟตได้อีกด้วย (สมการที่ (2) – (3)) [14] หากสารอินทรีย์ประกอบด้วยสารกลุ่มโปรตีนในปริมาณสูง โอกาสในการเกิดการแข่งขันกันระหว่างเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิตมีเทนและเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิตไฮโดรเจนซัลไฟด์ (sulfate reducing bacteria, SRB) เพื่อแย่งชิงสารอินทรีย์ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการก็จะมีมากขึ้นด้วย และอาจเป็นผลให้อัตราการผลิตแก๊สมีเทนมีแนวโน้มที่ลดลงซึ่งเศษอาหารที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยสารกลุ่มโปรตีนคิดเป็นร้อยละ 16.25 โดยน้ำหนัก ซึ่งถือเป็นปริมาณที่ต่ำต่อการรีดิวซ์ซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ไอออน เนื่องจากปริมาณซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้นในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ระหว่าง 4.24 – $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ ทำให้อัตราการผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากระดับความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนที่พบไม่มากพอที่จะส่งผลต่อการสูญหายของสารอาหารรอง ดังนั้นปริมาณสารกลุ่มโปรตีนในเศษอาหารจึงไม่ส่งผลต่อปริมาณซัลเฟตและปริมาณซัลไฟด์ไอออน จากการศึกษากระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารของงานวิจัยนี้ยังพบการเกิดสารประกอบโลหะซัลไฟด์ตกตะกอนในระบบ ซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนสีของเศษอาหารที่ผ่านการหมัก คือ เศษอาหารมีสีเข้มขึ้นจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีน้ำตาลจนถึงสีน้ำตาลเข้มเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 3) ส่วนแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่พบในแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ไม่ส่งผลต่อสมบัติของแก๊สชีวภาพในด้านความเป็นเชื้อเพลิง แต่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีของแก๊สชีวภาพ คือ มีค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นประมาณ 1.12 เท่า ซึ่งส่งผลด้านการกัดกร่อนชิ้นส่วนของอุปกรณ์ขณะใช้งานได้

สมการที่ (1) – (3) แสดงถึงแหล่งของการเกิดซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการสูญเสียของสารอาหารรองในรูปของโลหะซัลไฟด์ (MS) โดยซัลไฟด์ไอออนในสมการที่ (1) เกิดจากการแตกตัวของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำ (หรือ dissolved sulfide) ในขณะที่ซัลไฟด์ไอออนของสมการที่ (3) ได้มาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีนคือ $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2\text{S}$ และให้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสมการที่ (2)



ในการป้องกันและการลดการสูญเสียสารอาหารรองในระบบถือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถดำเนินการได้โดยการควบคุมปริมาณซัลไฟด์ไอออนให้อยู่ในระดับที่เป็นมิตรต่อเชื้อจุลินทรีย์ด้วยการเติมออกซิเจนหรืออากาศในปริมาณจำกัด (microaeration) [15] และการใช้สารคีเลชั่น (chelation technique) โดยการเติมออกซิเจนหรืออากาศในปริมาณจำกัดนั้น ปริมาณออกซิเจนหรืออากาศต้องอยู่ในระดับที่เชื้อจุลินทรีย์กลุ่มออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด (สมการที่ (4) – (6)) [15] ดังนั้นหากเติมในปริมาณที่มากเกินไปจนหลงเหลืออยู่ในระบบจะส่งผลต่อเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิตมีเทน เนื่องจากเชื่อกันว่าเป็นจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่สร้างสปอร์ (non-spore forming bacteria) จึงไม่อาศัยออกซิเจนในการหายใจ ดังนั้นการลดปริมาณซัลไฟด์ไอออนด้วยการเติมออกซิเจนหรืออากาศในปริมาณน้อยจะส่งผลให้มีปริมาณซัลไฟด์ไอออนอยู่ในระดับต่ำหรืออาจไม่มีซัลไฟด์ไอออนเกิดขึ้นในระบบ จึงถือเป็นวิธีที่สามารถลดการสูญเสียสารอาหารรองในรูปการเกิดสารประกอบโลหะซัลไฟด์ได้ และสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดน้อยลงเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นในช่วง 4.23-8.23 kg/m³day เนื่องจากภายใต้สภาวะดังกล่าวพบองค์ประกอบของแก๊สออกซิเจนประมาณร้อยละ 8-9 โดยปริมาตร ซึ่งถือเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อเชื้อจุลินทรีย์ในการออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เป็นธาตุซัลเฟอร์จึงไม่หลงเหลืออยู่ในระบบ ในขณะที่ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 13.92 kg/m³day พบแก๊สออกซิเจนในปริมาณมาก คือ ร้อยละ 14.55 โดยปริมาตร (ภาพที่ 4 (ก)) จากปริมาณแก๊สออกซิเจนที่พบในระบบทำให้สภาวะในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ระหว่าง 4.23-8.23 kg/m³day ทำให้ระบบอยู่ในสภาวะ microaeration จึงทำให้ปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับต่ำกว่า ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 13.92 kg/m³day อีกทั้งสีของเศษอาหารที่ผ่านการหมักในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.23-8.23 kg/m³day อ่อนกว่าเศษอาหารที่ผ่านการหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.92 kg/m³day แต่เข้มกว่าสีของเศษอาหารเริ่มต้น จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบผลิตแก๊สชีวภาพในงานวิจัยนี้เกิดสารประกอบโลหะซัลไฟด์ในปริมาณมากขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.23-13.92 kg/m³day ในขณะที่ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลง ซึ่งแสดงถึงการละลายของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ลดต่ำลงจึงทำให้โอกาสในการเกิดสารประกอบโลหะซัลไฟด์ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ศึกษาลดลงตามลำดับ เป็นผลให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 70-80 จากการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 40-50 (ภาพที่ 2 และภาพที่ 4)

สมการที่ (4) – (6) แสดงถึงการเติมออกซิเจนหรืออากาศในปริมาณจำกัด เพื่อลดและ/หรือป้องกันการเกิดซัลไฟด์ไอออนโดยการเปลี่ยนซัลไฟด์ไอออนให้อยู่ในรูปกำมะถัน (S⁰)



การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยเทคนิคซีเลชั่นนั้นจะอาศัยสารคีเลชั่นที่มีหน้าที่ตรึงสารอาหารรองที่เป็นประจุสองบวกไม่ให้เกิดการสูญเสียไปจากระบบและยังช่วยลดการเกิดสารประกอบโลหะซัลไฟด์ [16] โดยสารคีเลชั่นจะเป็นสารเคมีกลุ่มที่มีฤทธิ์เป็นกรดที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนกับไอออนบวกของสารอาหารรองเพื่อทำให้อาหารอาหารรองละลายน้ำได้มากขึ้น (water soluble complex) ตัวอย่างของสารคีเลชั่นที่นิยมใช้ เช่น กรดเอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซิติก (ethylene diamine tetraacetic acid; EDTA) และกรดกลูตามิกไดอะซิเตต (glutamic acid diacetate; GLDA)

เป็นต้น เทคนิคคัลเลชันเป็นเทคนิคที่อาศัยการเกิดสารประกอบโคออร์ดิเนชันที่ประกอบด้วยลิแกนด์ประเภทโพลีเดนที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้มากกว่า 2 อิเล็กตรอนในโมเลกุลเดียวกันของสารคีเลนต์ จากงานวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยเทคนิคคัลเลชัน ณ สภาวะที่เหมาะสม ด้วยการเติมสารคีเลนต์ชนิดกรดไดคาร์บอกซิลิกตามิกความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไปในระบบ พบว่าหลังการเติมกรดไดคาร์บอกซิลิกตามิกลงไปส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นคิดเป็นร้อยละ 2.00 ในขณะที่ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงคิดเป็นร้อยละ 34.65 และ 10.00 ตามลำดับมากไปกว่านั้นการใช้เทคนิคคัลเลชันสามารถป้องกันการตกตะกอนโลหะซัลไฟด์ได้ [17]

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนงบประมาณการวิจัยและอุปกรณ์ ตลอดจนเครื่องมือสำหรับการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

1. Andersson J, Helander-Claesson J, Olsson J. Study on reduced process temperature for energy optimisation in mesophilic digestion: A lab to full-scale study. *Appl Energy* 2020;271:115108.
2. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. คู่มือความปลอดภัยในการผลิตและการใช้พลังงานก๊าซชีวภาพ [อินเทอร์เน็ต]. 2557 [เข้าถึงเมื่อ 18 พ.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib15372.pdf>
3. Zhong C, Liu Y, Xu X, Yang B, Amer M, Zhang P, Huang G. Paddy-upland rotation with Chinese milk vetch retention reduced the global warming potential and greenhouse gas emissions intensity of double rice cropping system. *Environ Pollut* 2021;276:116696.
4. Intanoo P, Chaimongkol P, Chavadej S. Hydrogen and methane production from cassava wastewater using two-stage upflow anaerobic sludge blanket reactors (UASB) with an emphasis on maximum hydrogen production. *Int J Hydrog Energy* 2016;41(14):6107-14.
5. Ratanatamskul C, Manpetch P. Comparative assessment of prototype digester configuration for biogas recovery from anaerobic co-digestion of food waste and rain tree leaf as feedstock. *Int Biodeterior Biodegradation* 2016;113:367-74.
6. Menon A, Wang J-Y, Giannis A. Optimization of micronutrient supplement for enhancing biogas production from food waste in two-phase thermophilic anaerobic digestion. *Waste Manag* 2017;59:465-75.
7. Ilangovan K, Noyola A. Availability of micronutrients during anaerobic digestion of molasses stillage using an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Environ Technol* 1993;14(8):795-9.
8. Thanh PM, Ketheesan B, Yan Z, Stuckey D. Trace metal speciation and bioavailability in anaerobic digestion: A review. *Biotechnol Adv* 2016;34(2):122-36.
9. Seneesrisakul K, Sutabutr T, Chavadej S. The effect of temperature on the methanogenic activity in relation to micronutrient availability. *Energies* 2018;11(5):1057.
10. Chandra R, Vijay VK, Subbarao PMV, Khura K. Production of methane from anaerobic digestion of jatropha and pongamia oil cakes. *Appl Energy* 2012;93:148-59.



11. Khan IU, Othman MHD, Hashim H, Matsuura T, Ismail AF, DashtArzhandi M, et al. Rezaei-DashtArzhandi M, Azelee IW. Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilization and storage. *Energy Convers Manag* 2017;150:277-94.
12. Nhut HH, Thanh VLT, Le LT. Removal of H₂S in biogas using biotrickling filter: Recent development. *Process Saf Environ Prot* 2020;144:297-309.
13. วรณพร วัฒนสุนทร, วิษณุ สี่โหนด, เฉลิมชัย เรืองชัยนาค, ปัญญา สัจจกมล, อรทัย ขวาลภาฤทธิ์, สุภางค์ จุฬาลักษณ์นกุล, วรวิทย์ จุฬาลักษณ์นกุล. การลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบผลิตก๊าซด้วยกระบวนการทางชีวภาพ. *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว.* 2557;30(2):187-202.
14. พชรินทร์ ราโช, บุญชัย วิจิตรเสถียร. การเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเพื่อบำบัดตะกอนส่วนเกินจากระบบตะกอนเร่งด้วยกระบวนการหมุนเวียนค่าความเป็นด่าง. *รายงานการวิจัย สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2558 สัญญาเลขที่ SUT7-715-55-12-47.*
15. Chen Q, Wu W, Qi D, Ding Y, Z Zhao. Review on microaeration-based anaerobic digestion: State of the art, challenges, and prospectives. *Sci Total Environ* 2020;710:136388.
16. Jiraprasertwong A, Seneesrisakul K, Pornmai K, Chavadej S. High methanogenic activity of a three-stage UASB in relation to the granular sludge formation. *Sci Total Environ* 2020;724:138145.
17. ยสุภณีจ เอี่ยมจินดา. การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำกากส่าที่มีปริมาณของโพแทสเซียมและซัลเฟตสูงโดยการเจือจางและควบคุมปริมาณของธาตุอาหารเสริม. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีปิโตรเคมี, วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ; 2562.*