



การผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารเข้มข้นในถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่อง Biogas Production from Concentrated Food Waste by Using Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR)

พัชรี อินธนู^{1*} และจิธาภรณ์ ปัญญาเป้ง¹

Received: November, 2016; Accepted: June, 2017

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารเข้มข้นด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่อง ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิก (37 องศาเซลเซียส) และไม่มี การควบคุมค่าความเป็นกรดด่างที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ประกอบด้วยแก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ระยะเวลาพักเก็บ = 3.15 วัน) เป็นอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปของประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนที่สูงที่สุด คือ ผลได้ของแก๊สมีเทนที่สูงที่สุดและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะเจาะจงที่สูงที่สุดเท่ากับ 14.52 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมชีโอติที่ถูกใช้ไป หรือ 1.13 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมชีโอติเริ่มต้น และ 0.48 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบต่อวัน หรือ 8.50 มิลลิลิตรมีเทนต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ ซึ่งสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มากที่สุด (COD Removal) คิดเป็นร้อยละ 38 และสารประเภทไขมันสามารถย่อยสลายได้ประมาณร้อยละ 79.25 ภายใต้สภาวะที่ศึกษา

คำสำคัญ : แก๊สชีวภาพ; อุณหภูมิเมโซฟิลิก; ถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่อง; เศษอาหารเข้มข้น

¹ Faculty of Science, Maejo University, Chiang Mai

* Corresponding Author E - mail Address: tle_turn@hotmail.com

Abstract

The objective of this study was to investigate biogas production from concentrated food waste by using anaerobic continuous stirred tank reactor (CSTR) under mesophilic operation without pH control at different chemical oxygen demand (COD) loading rates. The main components of biogas were methane and carbon dioxide. Under optimum COD loading rate of 8.71 kg/m³d (Hydraulic retention time, HRT = 3.15 day), the system provided the highest biogas production performance in terms of the highest methane yield (14.52 ml CH₄/g COD removed or 1.13 ml CH₄/g COD added) and the highest specific methane production rate (SMPR) (0.48 ml CH₄/g MLVSS d or 8.50 ml CH₄/L d) which was consistent with the maximum COD removal of 38, and 79.25 % of lipid could be break down under the studied condition.

Keywords: Biogas; Mesophilic Temperature; Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR); Concentrated Food Waste

บทนำ

ปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการใช้ประโยชน์จากพลังงานที่มาจากฟอสซิลเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น ถ่านหิน น้ำมันดิบ และแก๊สธรรมชาติ ซึ่งแหล่งพลังงานฟอสซิลนี้เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป อีกทั้งยังปล่อยแก๊สพิษซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดภาวะโลกร้อน [1] จึงทำให้เริ่มมีการคิดค้นแหล่งพลังงานอื่นที่สามารถนำมาทดแทนพลังงานฟอสซิล เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ และพลังงานชีวภาพ [2] อย่างไรก็ตามพลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานน้ำนั้น เป็นพลังงานหมุนเวียนที่ไม่คงที่ ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศและภูมิประเทศของบริเวณนั้น ๆ ดังนั้นพลังงานชีวภาพหรือแก๊สชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่สามารถแก้ปัญหาความต่อเนื่องของพลังงานเหล่านั้นได้ เนื่องจากพลังงานชีวภาพเป็นพลังงานที่ได้จากกระบวนการหมักของเสียจากครัวเรือน ของเหลือใช้ทางการเกษตรหรือน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ นอกจากนั้นแล้วพลังงานชีวภาพยังเป็นพลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่ปล่อยแก๊สพิษสู่บรรยากาศ ไม่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน และยังเป็นแก๊สที่เป็นประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม อีกทั้งเป็นการลดปริมาณของเสียในประเทศอีกด้วย

การผลิตแก๊สชีวภาพสามารถทำได้หลายกระบวนการ เช่น กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนของแก๊สธรรมชาติ การเผาที่อุณหภูมิสูงของชีวมวล (Biomass) เป็นต้น โดยกระบวนการที่กล่าวมานั้นล้วนเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูงในการดำเนินการและมีภาวะเสี่ยงต่อการระเบิดเนื่องมาจากการความดันและอุณหภูมิสูงในการดำเนินการ [3] - [5] จึงมีการคิดค้นกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่แก้ไขปัญหาดังกล่าว และยังเป็นทางเลือกต้นทุนในการผลิตนั่นคือ กระบวนการหมักทางชีวภาพ [6] Guangqing L., Ruihong Z., Hamed M.E., and Renjie D. [7] ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพ

ด้วยกระบวนการหมักจากเศษอาหารภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจนที่อุณหภูมิเมโซฟิลิก (37 องศาเซลเซียส) และเทอร์โมฟิลิก (55 องศาเซลเซียส) พบว่าอัตราการเกิดแก๊สชีวภาพที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส สูงกว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส คิดเป็นร้อยละ 59.10 เนื่องจากที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส แบคทีเรียชนิดสร้างมีเทน (Methanogens) สามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และแบคทีเรียชนิดสร้างมีเทนมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ กล่าวคือ การลดหรือการเพิ่มอุณหภูมิ 2 - 3 องศาเซลเซียส จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียชนิดสร้างมีเทน [8] Castrillon L., Fernandez-Nava Y., Ormaechea P., and Maranon E. [9] ผลิตแก๊สชีวภาพจาก มูลสัตว์ที่มีการเติมกลีเซอริน พบว่าแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้มีประสิทธิภาพสูงกว่าแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้จาก มูลสัตว์อย่างเดียว เนื่องจากการเติมกลีเซอรินส่งผลทำให้อัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเกิดกระบวนการหมักในโตรเจนในมูลสัตว์มักถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแอมโมเนียในโตรเจน หากปริมาณ แอมโมเนียในโตรเจนที่เกิดขึ้นมากกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร [10] จะทำให้ความเป็นกรดต่างของระบบสูงขึ้น (มากกว่า 8.00) ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และความสามารถในการ ด้านทานการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่างของระบบต่ำ

กระบวนการหมักทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่อาศัยปฏิกิริยาชีวเคมีโดยมีแบคทีเรียช่วยในการ ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ ซึ่งเป็นกระบวนการที่เหมาะสมกับของเสียประเภทเศษอาหารที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง กระบวนการหมักชีวภาพแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนต่อเนื่องกัน ดังนี้ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) อะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) อะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) และเมทาโนเจเนซิส (Methanogenesis) ตามลำดับ [11] ขั้นตอนไฮโดรไลซิส เป็นขั้นตอนที่สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ถูกย่อย เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กที่สามารถละลายน้ำได้ และสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กนี้จะแตกตัว เป็นกรดอินทรีย์ แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบแอลกอฮอล์ด้วยจุลินทรีย์ ชนิดสร้างกรด (Acidogens) ในขั้นตอนของอะซิโตเจเนซิส จากนั้นแบคทีเรียชนิดสร้างกรดแอซิติก (Acetogens) จะเปลี่ยนกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเป็นกรดแอซิติกในขั้นตอนของอะซิโตเจเนซิส กรดแอซิติก และแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากขั้นตอนอะซิโตเจเนซิสจะถูกหมักจนเกิดเป็นแก๊สมีเทนและ คาร์บอนไดออกไซด์ด้วยจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนในที่สุด [12] กระบวนการหมักทางชีวภาพสามารถ แบ่งได้ 2 ชนิด คือ กระบวนการหมักแบบใช้แสง (Photo Fermentation) และกระบวนการหมัก แบบไม่ใช้แสง (Dark Fermentation) [13] ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic System) [14] เนื่องจาก ปริมาณของอากาศมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงมีความนิยมมากกว่า กระบวนการหมักแบบใช้แสง เนื่องจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงสามารถผลิตแก๊สได้ในอัตราที่คงที่ มากไปกว่านั้นยังสามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลายรวมไปถึงน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมและเศษอาหาร อีกทั้งไม่ต้องการแสงเป็นแหล่งพลังงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากการหมักเศษอาหารเข้มข้นภายใต้สภาวะไร้อากาศด้วย ถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) ที่อุณหภูมิเมโซฟิลิก (37 องศาเซลเซียส) และไม่มี การควบคุมค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่อยู่ในช่วง 3.11 - 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1. การเตรียมสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเข้มข้น

เศษอาหารเข้มข้นที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้มาจากครัวบัณฑิต มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ จะผ่านการปั่นด้วยความเร็ว 14,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปทำการวิจัยเศษอาหารเข้มข้นนี้มีค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) 27,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และอัตราส่วนระหว่างค่าซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสคือ 100 : 1.48 : 1.50 ซึ่งมีค่ามากกว่าทฤษฎี (ตารางที่ 1) (อัตราส่วนระหว่างค่าซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 100 : 1 : 0.4 สำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศของกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ [15]) แสดงให้เห็นว่าเศษอาหารเข้มข้นที่ใช้นี้มีสารอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเศษอาหารที่ใช้ในงานวิจัยนี้

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่า
ซีโอดี (COD)	มิลลิกรัมต่อลิตร	27,000
ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen)	มิลลิกรัมต่อลิตร	400
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total Phosphorus)	มิลลิกรัมต่อลิตร	420
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	372,000
ของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solid, VS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	254,000
ค่าความเป็นกรดต่าง	-	7.70
ร้อยละของไขมัน	-	0.40
ซีโอดี : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส	-	100 : 1.48 : 1.50

2. การเตรียมตะกอนหัวเชื้อ

ตะกอนหัวเชื้อที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้มาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังของบริษัท อุบลไบโอเอทานอล จำกัด จังหวัดอุบลราชธานี ประเทศไทย ตะกอนหัวเชื้อจะถูกคัดขนาด (250 ไมครอน) และกำจัดอนุภาคของแข็งหรือเศษหินออกก่อนนำมาใช้งาน และจะเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้งานความเข้มข้นของตะกอนหัวเชื้อเริ่มต้นมีค่า 48,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

3. การติดตั้งระบบหมักแบบซีเอสทีอาร์

ถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) ที่ใช้ในการวิจัยนี้ ทำด้วยท่อพลาสติกชนิดพีวีซีมีความจุ 4 ลิตร เพื่อช่วยในการป้องกันแสง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ความสามารถของแบคทีเรียลดลง และมีการติดตั้งเครื่องกวนแม่เหล็กความเร็ว 450 รอบต่อนาที ที่ถังปฏิกรณ์เพื่อให้ระบบอยู่ในรูปของสารแขวนลอย เศษอาหารเข้มข้นป้อนเข้าสู่ระบบหมักทางด้านบนของถังปฏิกรณ์ที่อัตราการป้อนแตกต่างกัน (ตารางที่ 2) โดยไม่มีการควบคุมค่าความเป็นกรดต่างที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ต่าง ๆ ระบบหมักจะทำงานจนถึงสภาวะคงตัว (ประมาณ 3 สัปดาห์) ก่อนที่จะนำเศษอาหาร

เข้มข้นที่ผ่านกระบวนการหมักมาวิเคราะห์หาค่าต่าง ๆ (สภาวะคงตัว คือ สภาวะที่ค่าซีโอดีของเศษอาหารที่ผ่านการหมักและอัตราการเกิดแก๊สมีค่าคงที่หรือไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป)

ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ในการหาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน)	ระยะเวลากักเก็บ (HRT) (วัน)
3.11	8.89
8.71	3.15
13.18	2.08
19.22	1.39

4. การวิเคราะห์

อัตราการเกิดแก๊สที่ผลิตได้ถูกบันทึกโดยใช้เครื่องวัดแก๊ส (Gas Counter) ส่วนองค์ประกอบของแก๊สจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC, Auto System GC, Perkin-Elmer) ที่มีเครื่องตรวจวัดชนิด Thermal Conductivity (TCD) โดยชนิดของคอลัมน์และสภาวะที่ใช้ได้รายงานไว้ในงานวิจัยก่อนหน้า [16] - [17] ค่าซีโอดีของเศษอาหารเข้มข้นก่อนและหลังหมักวิเคราะห์ด้วยวิธีโคโครเมต [16] โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (HACH, DR 2700) องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นเป็นการนำเศษอาหารเข้มข้นที่ผ่านการหมักมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC, Aminex HPX-87H column) [18] ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในระบบหมัก (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids, MLVSS) และความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบหมัก (Effluent Volatile Suspended Solids, Effluent VSS) จะถูกวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน [19] การวิเคราะห์สารประกอบประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของเศษอาหารเข้มข้นเริ่มต้นหาได้จากกระบวนการย่อยด้วย TNT Persulfate และกระบวนการ Molybdo Vanadate ด้วย Acid Persulfate Digestion (Hach Company) ตามลำดับ [16] และติดตามค่าความเป็นกรดต่างของเศษอาหารที่ผ่านกระบวนการหมักด้วยเครื่องวัดความเป็นกรดต่าง

ผลการทดลอง

1. ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และอัตราการเกิดแก๊สชีวภาพ

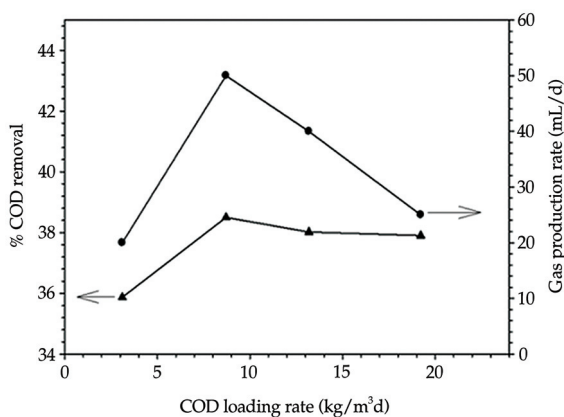
รูปที่ 1 (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD Removal) และอัตราการเกิดแก๊สชีวภาพ (Gas Production Rate) กับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (COD Loading Rate) เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 3.11 - 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และอัตราการเกิดแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้น จากนั้นมีค่าลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์มีค่ามากกว่า 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มากที่สุด (ร้อยละ 38) และอัตราการเกิดแก๊สมีค่าสูงที่สุด (50 มิลลิลิตรต่อวัน) พบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

2. องค์ประกอบของแก๊สและประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทน

องค์ประกอบหลักของแก๊สที่ผลิตได้ในการศึกษานี้ คือแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยไม่พบแก๊สไฮโดรเจนในระบบปริมาณของแก๊สมีเทน (Methane Content) และอัตราการเกิดแก๊สมีเทน (Methane Production Rate) เพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 3.11 - 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน หลังจากนั้นเริ่มมีค่าลดลงเมื่ออัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้นจาก 8.71 - 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (รูปที่ 1 (ข)) ปริมาณของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนมีค่ามากที่สุดที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มากที่สุด

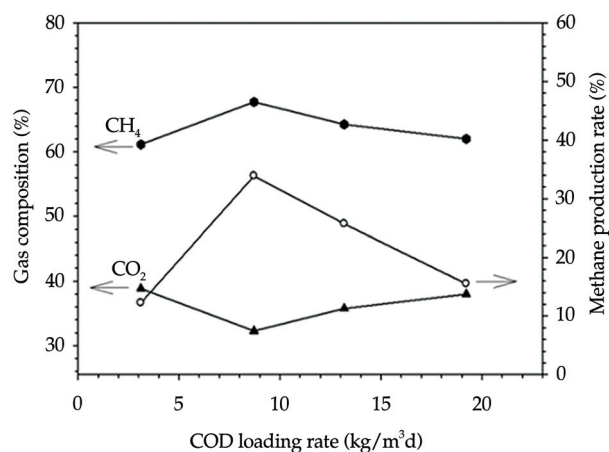
3. ผลได้ของแก๊สมีเทน (Methane Yield) และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่จำเพาะเจาะจง (Specific Methane Production Rate, SMPR)

ผลได้ของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่จำเพาะแสดงในรูปที่ 1 (ค) และ 1 (ง) พบว่าผลได้ของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่จำเพาะเจาะจงเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น และจะลดลงที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่มากกว่า 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ค่าผลได้ของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่จำเพาะเจาะจงที่มากที่สุด (14.52 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมชีโอดีที่ถูกใช้ไปหรือ 1.13 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมชีโอดีเริ่มต้น และ 0.48 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบต่อวัน หรือ 8.50 มิลลิลิตรมีเทนต่อลิตรต่อวัน ตามลำดับ) พบที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่ 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่สูงที่สุด (50 มิลลิลิตรต่อวัน)

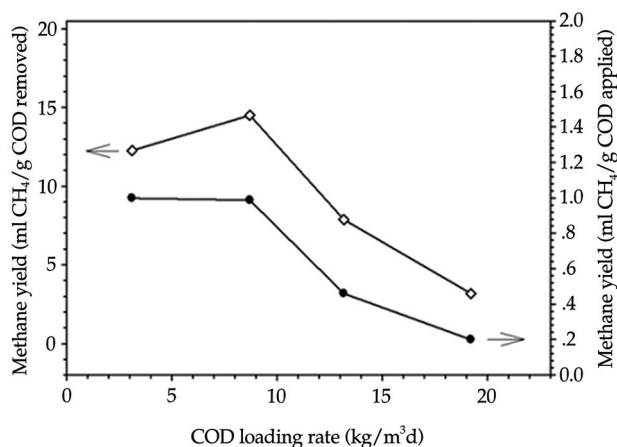


(ก) ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และอัตราการเกิดแก๊สชีวภาพ

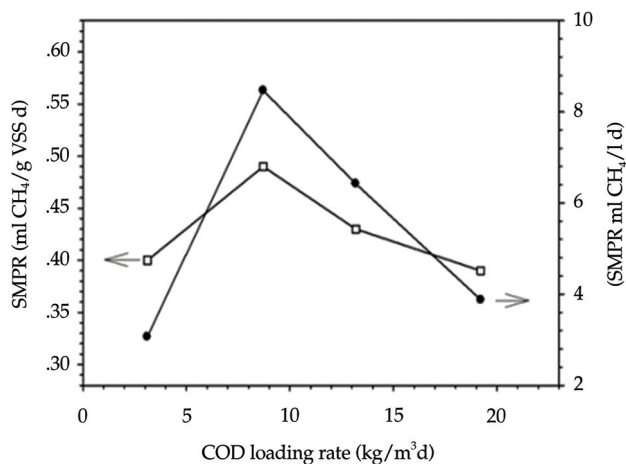
รูปที่ 1 ผลกระทบของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์



(ข) องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพและประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส



(ค) ผลได้ของแก๊สมีเทน (Methane Yield)



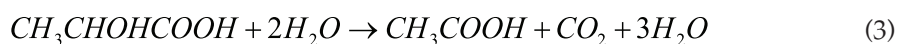
(ง) อัตราการเกิดแก๊สมีเทนอย่างจำเพาะเจาะจง (Specific Methane Production Rate, SMPR)

รูปที่ 1 ผลกระทบของอัตราการบรรทุกทุกสารอินทรีย์ (ต่อ)

4. ปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (Total Volatile Fatty Acid, VFA) และองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ (Organic Acid)

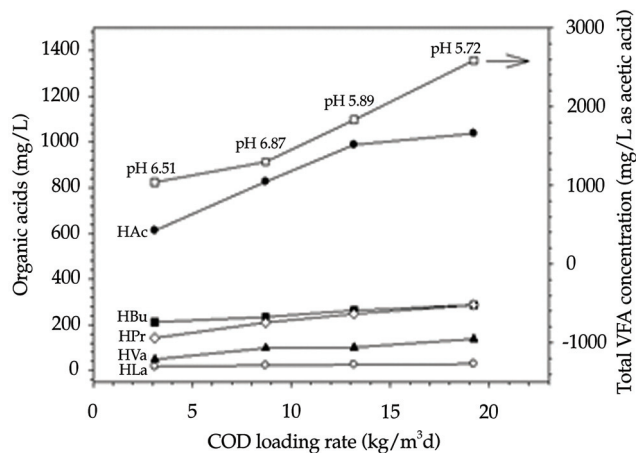
ปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 3.11 - 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีความเข้มข้นมากที่สุดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (รูปที่ 2) ในขณะที่ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนในเทอมของผลได้ของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่จำเพาะเจาะจงลดลงสอดคล้องกับประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ต่ำที่สุด (รูปที่ 1) ส่วนค่าความเป็นกรดต่างของระบบเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จาก 3.11 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เป็น 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เนื่องจากกรดที่เกิดขึ้นถูกเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้อย่างสมบูรณ์

องค์ประกอบหลักของกรดอินทรีย์ที่ผลิตได้ คือ กรดแอซิดิก (HAc) กรดโพรพิโอนิก (HPr) กรดบิวทีริก (HBu) กรดแลกติก (HLa) และกรดวาเลอริก (HVa) จากรูปที่ 2 พบว่าความเข้มข้นของกรดทุกชนิดเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของกรดทุกชนิดมีค่ามากที่สุดที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุดที่ 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ภายใต้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมที่ 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดเท่ากับ 1,300 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อคิดเทียบเป็นกรดแอซิดิก โดยความเข้มข้นของกรดแอซิดิกมีค่าสูงที่สุด (1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งเกิดมาจากการสลายตัวของกรดโพรพิโอนิก กรดบิวทีริก และกรดแลกติก ดังสมการที่ (1) - (3) [12] จึงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสูงที่สุด ตามลำดับ ดังสมการที่ (4) - (5) [12]

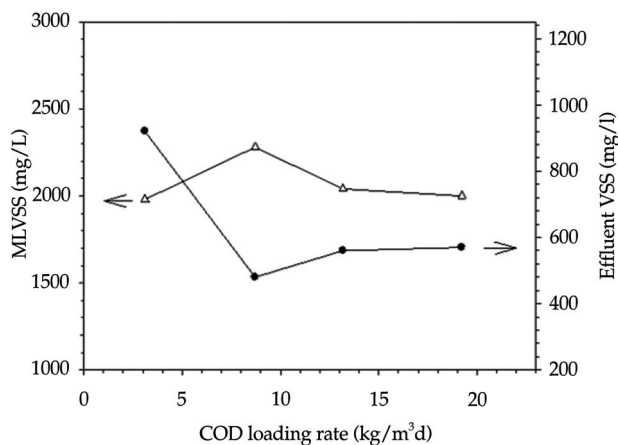


5. ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในระบบ (MLVSS) และความเข้มข้นจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบ (Effluent VSS)

ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบและความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบ แสดงในรูปที่ 3 จากรูปจะเห็นว่าค่าความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบเพิ่มขึ้นในช่วงอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ระหว่าง 3.11 - 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และจะลดลงในช่วงอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 8.71 - 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ส่วนความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับผลของความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ



รูปที่ 2 ผลกระทบของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ และองค์ประกอบของกรดอินทรีย์



รูปที่ 3 ผลกระทบของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ (MLVSS) และความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบ (Effluent VSS)

อภิปรายผลการทดลอง

1. ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ

จากผลการวิจัยของประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเข้มข้น แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราภาระป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 3.11 - 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ปริมาณของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะเพิ่มมากขึ้นและเป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับเชื้อแบคทีเรีย ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเข้มข้นเหล่านี้ นอกจากนี้ยังพบว่าสารอินทรีย์ประเภท

เศษอาหารเข้มข้นที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถย่อยสลายได้ง่ายภายใต้กระบวนการหมักแบบไม่มีออกซิเจนอิสระที่อุณหภูมิปกติด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่อง

2. องค์ประกอบของแก๊สและประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทน

การเพิ่มขึ้นของปริมาณของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนเป็นผลมาจากปริมาณสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเข้มข้นที่ป้อนเข้าระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งเพียงพอต่อแบคทีเรียในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเข้มข้นนี้เป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส อย่างไรก็ตามที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่มากกว่า 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนลดลงเนื่องจากระบบมีการผลิตกรดอินทรีย์ในปริมาณที่มากเกินไป และส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรดต่างลดลง ซึ่งอาจทำให้สภาวะของระบบนั้นไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย สำหรับปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้มีแนวโน้มตรงกันข้ามกับปริมาณของแก๊สมีเทน

3. ผลได้ของแก๊สมีเทน (Methane Yield) และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่จำเพาะเจาะจง (Specific Methane Production Rate, SMPR)

จากผลกระทบของอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ต่อผลได้ของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่จำเพาะเจาะจงแสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเข้มข้นเพิ่มขึ้น ปริมาณสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเข้มข้นในระบบจะเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ความสามารถของแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์มีมากขึ้น ตามลำดับ ในทางตรงกันข้ามที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่มากเกินไป (13.18 - 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน) จะทำให้ความสามารถของแบคทีเรียลดลง เนื่องจากความเป็นพิษของกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในปริมาณมาก และไม่สามารถย่อยสลายได้ จึงสะสมอยู่ในระบบ ดังนั้น ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เป็นอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สมีเทนด้วยระบบหมักในถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องที่อุณหภูมิเมโซฟิลิก (37 องศาเซลเซียส) และที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมนี้ปริมาณไขมันที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งในเศษอาหารเข้มข้นมีค่าต่ำที่สุด (ร้อยละ 0.083) ซึ่งมีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 79.25 จึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนดีขึ้น เนื่องจากสถานะออกซิเดชัน (Oxidation State) ของสารประกอบไขมันต่ำกว่าสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ในขณะที่การจัดเก็บพลังงาน (Energy Storage) ของสารประกอบไขมันสูงกว่า [20]

4. ปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (Total Volatile Fatty Acid, VFA) และองค์ประกอบของกรดอินทรีย์ (Organic Acid)

จากที่ได้กล่าวถึงผลการวิจัยของประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเข้มข้น พบว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทน ผลได้ของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่จำเพาะเจาะจงที่ลดลงที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์สูงเกินไป คือ ช่วง 13.11 - 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เป็นผลมาจากระบบมีความเป็นพิษของกรดอินทรีย์ที่เหลือและสะสมอยู่ในระบบจึงทำให้ระดับความเป็นพิษเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น จนไปยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย [21] ซึ่งในระบบที่ทำการศึกษานี้มีระดับความเป็นพิษจากกรดอินทรีย์ประมาณ 1,300 มิลลิกรัมต่อลิตร

ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพที่ทำการศึกษานี้พบว่า มีปริมาณของกรดแอซิก (HAc) สูงที่สุดในขณะที่ปริมาณแลกติก (HLA) ต่ำที่สุด สามารถสรุปได้ว่ากรดแอซิกได้มาจากการแตกตัวของกรดแลกติก

ดังแสดงในสมการที่ (3) [21] มากไปกว่านั้นการผลิตแก๊สชีวภาพ (แก๊สมีเทน) สามารถเกิดผ่านกระบวนการ 2 กระบวนการ คือ อะซิโตคลาสสิก (Acetoclastic) (ดังสมการที่ (5)) และปฏิกิริยาไฮโดรจีโนโทรฟิก (Hydrogenotrophic) (ดังสมการที่ (4)) [21] โดยทั่วไปแก๊สมีเทนมักเกิดผ่านกระบวนการอะซิโตคลาสสิก เนื่องจากในทฤษฎีของเทอร์โมไดนามิกส์ตามกฎข้อที่สองนั้นกระบวนการอะซิโตคลาสสิก มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระมาตรฐาน (Gibbs Free Energy, ΔG°) น้อยกว่าศูนย์ ($\Delta G^\circ = -31.0 \text{ kJ/mol}$) [22] ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองในทิศทางไปข้างหน้า ดังแสดงในสมการที่ (6) [22] ดังนั้นแก๊สมีเทนที่ผลิตได้กระบวนการหมักในถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องนี้ส่วนใหญ่ได้มาจากการแตกตัวของกรดแอซิดิก



5. ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในระบบ (MLVSS) และความเข้มข้นจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจาก ระบบ (Effluent VSS)

จากการศึกษาความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในระบบพบว่า ช่วงอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ ระหว่าง 3.11 - 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จุลินทรีย์มีการเพิ่มจำนวน นั่นคือ จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตและสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาวะค่าความเป็นกรดต่างระหว่าง 6.51 - 6.87 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ [19] จึงส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น (รูปที่ 1) แต่ในช่วงอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 8.71 - 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะเห็นได้ว่า ปริมาณของกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (รูปที่ 2) จึงส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรดต่างลดลง และประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนลดลงด้วยเช่นกัน (รูปที่ 1) ดังนั้นปริมาณของกรดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นั้น เกิดมาจากกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบมีปริมาณมากเกินไปจนทำให้อัตราการย่อยสลาย กรดอินทรีย์เป็นผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยจุลินทรีย์ลดลง เป็นสาเหตุทำให้กรดอินทรีย์เกิดการสะสมในระบบ และทำให้ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 5.89 - 5.72 ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงอยู่ของ จุลินทรีย์ คือ ไปยับยั้งการเจริญเติบโต [23] นอกจากนั้นจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบบ่งบอกถึง ปริมาณของจุลินทรีย์ที่ไม่สามารถทำงานได้ (Inactive Microorganisms) แล้วเท่านั้น

สารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสถือว่าเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของ แบคทีเรีย และปริมาณของสารอาหารประเภทไนโตรเจน มักแสดงออกมาในรูปของอัตราส่วนระหว่าง คาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) ซึ่งอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนของเศษอาหารเข้มข้น เริ่มต้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่า 67.5 ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนทางทฤษฎี (อัตราส่วน คาร์บอนต่อไนโตรเจนของสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีค่าระหว่าง 20 - 40 [24]) แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเข้มข้นที่ใช้ในการวิจัยนี้ มีองค์ประกอบของโปรตีนต่ำ จึงทำให้ความเป็นพิษที่เกิดจากการเปลี่ยนสารประกอบไนโตรเจนเป็นสารประกอบ ไนโตรเจนอนินทรีย์ (Inorganic Nitrogen) คือ แอมโมเนียไนโตรเจน [25] ต่ำ และค่าความเป็นกรดต่าง ในระบบมีค่าต่ำกว่า 8.00

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเข้มข้นด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงและไม่มีออกซิเจนอิสระด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องที่อุณหภูมิเมโซฟิลิก (37 องศาเซลเซียส) และไม่มีมีการควบคุมค่าความเป็นกรด่าง พบว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพที่สูงที่สุด ซึ่งแสดงในแง่ของปริมาณแก๊สมีเทนที่มากที่สุด (ร้อยละ 67) ผลได้ของแก๊สมีเทนที่มากที่สุด (14.52 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมชีโอติที่ถูกใช้) อัตราการเกิดแก๊สมีเทนจำเพาะเจาะจงที่มากที่สุด (0.48 มิลลิลิตรมีเทนต่อกรัมจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบต่อวัน) และประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มากที่สุด (ร้อยละ 38) อยู่ทีสภาวะของอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมที่ 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยแบบคี่เรียมีการใช้สารอาหารหลักประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในการเจริญเติบโต

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนา มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (2559A11162007) ครวับัณฑิต มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ สำหรับสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเข้มข้น บริษัท อุบลไบโอเอทานอล จำกัด จังหวัดอุบลราชธานี ประเทศไทย สำหรับตะกอนหัวเชื้อมากไปกว่านั้น ขอขอบคุณหลักสูตรเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้อำนวยความสะดวกสำหรับสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย และวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับเครื่องมือในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

References

- [1] Ministry of Energy. (2008). Department of Alternative Energy Department and Efficiency. Access (30 August 2016). Available (<http://webkc.dede.go.th/testmax/>)
- [2] The Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology (IPST). (2011). Science Math and Technology. Access (30 August 2016). Available (<http://www.scimath.org/>)
- [3] Osamu M., Richard D., Freda R. H., Dennis L. H., and Tatsuya N. (2000). Enhancement of Hydrogen Production from Glucose by Nitrogen Gas Sparging. *Bioresource Technology*. Vol. 73. No. 1. pp. 59-65
- [4] Ilgi Karapinar K., and Fikret K. (2006). Bio-Hydrogen Production from Waste Materials. *Enzyme and Microbial Technology*. Vol. 38. Issue 5. pp. 569-582
- [5] Venkata Mohan S., Lalit Babu V., and Sarma P.N. (2007). Anaerobic Biohydrogen Production from Dairy Wastewater Treatment in Sequencing Batch Reactor (AnSBR): Effects of Organic Loading Rate. *Enzyme and Microbial Technology*. Vol. 41. No. 4. pp. 506-515

- [6] Sun-kee H., and Hang-sik S. (2004). Biohydrogen Production by Anaerobic Fermentation of Food Waste. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 29. pp. 569-577
- [7] Guangqing L., Ruihong Z., Hamed M.E., and Renjie D. (2009). Effect of Feed to Inoculum Ratios on Biogas Yields of Food and Green Wastes. *Bioresource Technology*. Vol. 100. pp. 5103-5108
- [8] Suchada T., Sarunyou W., Verawat C., Malinee L., Annop N., Somkiet T., and Pawinee C. (2013). Enhancement of Biogas Production from Swine Manure by a Lignocellulolytic Microbial Consortium. *Bioresource Technology*. Vol. 144. pp. 579-586. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.07.013.
- [9] Castrillon L., Fernandez-Nava Y., Ormaechea P., and Maranon E. (2013). Methane Production from Cattle Manure Supplemented with Crude Glycerin from the Biodiesel Industry in CSTR and IBR. *Bioresource Technology*. Vol. 127. pp. 312-317
- [10] Giorgos M. (2015). Improved Anaerobic Digestion Performance and Biogas Production from Poultry Litter After Lowering its Nitrogen Content. *Bioresource Technology*. Vol. 196. pp. 726-730
- [11] Reukrit K. (2005). Planning Strategic and Energy Policy and Planning Office, Energy Policy and Planning Office. Access (30 August 2016). Available (<http://gphone.prd.go.th/dp.php?MID=22&DID=176>)
- [12] Tasneem A., Tauseef S.M., and Abbasi S.A. (2012). Anaerobic Digestion for Global Warming Control and Energy Generation-An Overview. *Renewable and Sustainable Energy*. Vol. 16. Issue 5. pp. 3228-3242
- [13] Khanitta M. (2010). Hydrogen Production. *Journal of Academic Services Center Faculty of Technology Khonkaen University*. Vol. 18. No. 3-4. pp.15-20 (in Thai)
- [14] Sirirat S., and Pramroj C. (2005). Biological Wastewater Treatment. Occupational Health and Environment Department of Health Science Sukhothai Thammathirat Open University. Access (30 August 2016). Available (http://www.stou.ac.th/Schools/Shs/booklet/6_2548/OccHealth.htm)
- [15] Thammanoon S., Suchawadee C., Pramoch R., and Sumaeth C. (2010). Hydrogen Production from Cassava Wastewater Using an Aerobic Sequencing Batch Reactor: Effects of Operational Parameters, COD: N Ratio, and Organic Acid Composition. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 35. pp. 4092-4102
- [16] Patcharee I., Pramoch R., Weerachart N., Bandhit T., Jittipan C., and Sumaeth C. (2012). Hydrogen Production from Alcohol Wastewater by an Anaerobic Sequencing Batch Reactor Under Thermophilic Operation: Nitrogen and Phosphorous Uptakes and Transformation. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 37. pp. 11104-11112

- [17] Pawinee S., Pramoch R., Malinee L., and Sumaeth C. (2010). Hydrogen Production from Alcohol Distillery Wastewater Containing High Potassium and Sulfate Using an Anaerobic Sequencing Batch Reactor. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 36. pp. 12810-12821
- [18] Sittijunda S. (2014). Biogas Production from Co-Digestion of Hydrolysate of Microwave Assisted Sulfuric Acid Pretreated Napier Grass and Slaughterhouse Wastewater. *KKU Research Journal*. Vol. 20. pp. 323-336 (in Thai)
- [19] Eaton A.D., Clesceri L.S., Rice E.W., and Greenberg A.E. (2005). American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) & Water Environment Federation (WEF): Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Washington DC.
- [20] Shaobo L., and Armando G.M. (2015). Anaerobic Digestion of Pre-Fermented Potato Peel Wastes for Methane Production. *Waste Management*. Vol. 46. pp. 197-200
- [21] Mani S., Sundaram J., and Das K.C. (2016). Process Simulation and Modelling: Anaerobic Digestion of Complex Organic Matter. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 93. pp. 158-167
- [22] Jingqing Y., Dong L., Yongming S., Guohui W., Zhenhong Y., Feng Z., and Yai W. (2013). Improved Biogas Production from Rice Straw by Co-Digestion with Kitchen Waste and Pig Manure. *Waste Management*. Vol. 33. pp. 2653-2658
- [23] Kvesitadze G., Sadunishvili T., Dudauri T., Zakariashvili N., Partskhaladze G., Ugrehelidze V., Tsiklauri G., Metreveli B., and Jobava M. (2012). Two-Stage Anaerobic Process for Bio-Hydrogen and Bio-Methane Combined Production from Biodegradable Solid Wastes. *Energy*. Vol. 37. pp. 94-102
- [24] Astals S., Ariso M., Gali A., and Mata-Alvarez J. (2011). Co-Digestion of Pig Manure and Glycerine: Experimental and Modelling Study. *Journal of Environmental Management*. Vol. 92. pp. 1091-1096
- [25] Chavalit R. and Panlekha M. (2016). Comparative Assessment of Prototype Digestion Configuration for Biogas Recovery from Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Rain Tree Leaf Feedstock. *International Biodeterioration and Biodegradation*. Vol. 113. pp. 367-374