

## การผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยกระบวนการหมักแบบกวนต่อเนื่อง

### Biogas Production from Food Waste by using Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) System

จิทาภรณ์ ปัญญาเป็ง<sup>1\*</sup> และ พัชรี อินธนู<sup>2</sup>

Jitaporn Panyapeng<sup>1\*</sup> and Patcharee Intanoo<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> นักศึกษาปริญญาตรี หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

<sup>2</sup> อาจารย์ผู้สอน หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
63 หมู่ 4 ตำบลหนองหาร อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 50290

<sup>1\*</sup> Graduate student in Master of Science (Industrial Chemistry and Textile Technology) Faculty of Science, Maejo University, Nonghan,  
Sansai, Chiang-Mai, Thailand 50290

<sup>2</sup> Lecturer in Master of Science (Industrial Chemistry and Textile Technology Faculty of Science), Maejo University, Nonghan,  
Sansai, Chiang-Mai, Thailand 50290

\*Corresponding author, E mail: tle\_turn@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารเข้มข้นด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนอิสระและไม่มีการควบคุมความเป็นกรดต่างที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์แตกต่างกัน แก๊สชีวภาพที่ผลิตได้นั้นประกอบด้วยแก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าเป็นอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพซึ่งแสดงให้เห็นในรูปของประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนที่สูงที่สุด คือ ผลได้ของแก๊สมีเทนที่สูงที่สุด (14.52 ml CH<sub>4</sub>/g COD removed หรือ 1.13 ml CH<sub>4</sub>/g COD applied) และอัตราการผลิตแก๊สมีเทนจำเพาะเจาะจงที่สูงที่สุด (0.48 ml CH<sub>4</sub>/g MLVSS d หรือ 8.50 ml CH<sub>4</sub>/L d) คิดเป็นร้อยละ 68 สัมพันธ์กับประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มากที่สุด นอกจากนี้เชื้อจุลินทรีย์มีการใช้สารอาหาร (ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส) ในปริมาณที่มากที่สุดเพื่อการเจริญเติบโต

คำสำคัญ: แก๊สชีวภาพ ถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่อง การดำเนินงานที่อุณหภูมิปกติ เศษอาหาร

## Abstract

The objective of this study was to investigate biogas production from concentrated food waste by using 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/m<sup>3</sup>d, the system provided the highest biogas production performance in terms of the highest methane yield (14.52 ml CH<sub>4</sub>/g COD removed or 1.13 ml CH<sub>4</sub>/g COD applied) and the highest specific methane production rate (SMPR; 0.48 ml CH<sub>4</sub>/g MLVSS d or 8.50 ml CH<sub>4</sub>/L d), consistent with the maximum COD removal. Under mesophilic operation, the nitrogen and phosphate utilization by microbe were maximize at the optimum COD loading rate for methane production.

**Key words:** Biogas, continuous stirred tank reactor (CSTR), mesophilic operation, food waste

## 1. บทนำ

ในอดีตประเทศไทยมีแหล่งพลังงานอยู่เป็นจำนวนมากและพลังงานเหล่านี้ถือว่าเป็นสิ่งที่จำเป็นในการดำเนินชีวิต ปัจจุบันมนุษย์มีความต้องการใช้ประโยชน์จากพลังงานที่มาจากฟอสซิลเพิ่มมากขึ้น เช่น ถ่านหิน น้ำมันดิบ และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งแหล่งพลังงานฟอสซิลนี้เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป อีกทั้งยังก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2551) จึงทำให้เริ่มมีการคิดค้นแหล่งพลังงานอื่นที่สามารถใช้ได้อย่างต่อเนื่องขึ้นมาเพื่อทดแทน เช่น พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ และพลังงานชีวภาพ (ความรู้สู่ความเป็นเลิศทางวิทยาศาสตร์ คณิตศาสตร์และเทคโนโลยี, 2011) อย่างไรก็ตามพลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำนั้น เป็นพลังงานหมุนเวียนที่ไม่คงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศของประเทศนั้นๆ ดังนั้นพลังงานชีวภาพหรือแก๊สชีวภาพจึงเป็นทางเลือกที่สามารถแก้ปัญหาความต่อเนื่องของพลังงาน เนื่องจากพลังงานชีวภาพเป็นพลังงานที่ได้จากกระบวนการหมักของเสียจากครัวเรือน ของเหลือใช้ทางการเกษตรหรือน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมด้วย

กระบวนการทางชีวภาพ นอกจากนั้นแล้วพลังงานชีวภาพยังเป็นพลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ไม่ปล่อยก๊าซพิษสู่บรรยากาศ ไม่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน และยังเป็น แก๊ส ที่เป็น ประโยชน์ มาก ใน ด้าน อุตสาหกรรม อีกทั้งเป็นการลดปริมาณของเสียในประเทศอีกด้วย

การผลิตแก๊สชีวภาพสามารถทำได้หลายกระบวนการ เช่น กระบวนการแตกตัวของแก๊สธรรมชาติด้วยความร้อน การเผาชีวมวล(Biomass) ที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น โดยกระบวนการที่กล่าวมานั้นล้วนเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานสูงในการดำเนินการและมีความเสี่ยงต่อการระเบิดเนื่องจากระบบต้องทำงานที่ความดันและอุณหภูมิ (Mizuno et al., 2000. และ Kapdan et al., 2006. และ Mohan et al., 2007.) จึงมีการคิดค้นกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการหมักทางชีวภาพเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวและยังเป็นการลดต้นทุนในการผลิต (Han SK et al., 2004)

กระบวนการหมักทางชีวภาพเป็นปฏิกิริยาชีวเคมีที่แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนอิสระซึ่งเป็นกระบวนการที่เหมาะสม

นำมาใช้กับของเสียประเภทเศษอาหารที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง กระบวนการหมักชีวภาพแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอนแบบต่อเนื่องกันดังนี้ Hydrolysis Acidogenesis Acetogenesis และ Methanogenesis ตามลำดับ (นายฤกษ์ฤทธิ์ เคนหาราช, 2548) ขั้นตอน Hydrolysis เป็นขั้นตอนที่สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่จะถูกย่อยให้เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน โมเลกุลเล็กที่สามารถละลายน้ำได้ และสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กนี้จะแตกตัวเป็นกรดอินทรีย์ แก๊สไฮโดรเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และสารประกอบแอลกอฮอล์ด้วยเชื้อจุลินทรีย์ชนิด Acidogens ในขั้นตอนของ Acidogenesis หลังจากนั้นเชื้อแบคทีเรียชนิด Acetogens จะเปลี่ยนกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเป็นกรดอะซิติกในขั้นตอนของ Acetogenesis หลังจากนั้นกรดอะซิติก แก๊สไฮโดรเจนจะถูกหมักต่อจนเกิดเป็นแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยเชื้อจุลินทรีย์ชนิด Methanogens ในที่สุด (Abbasi et al., 1991) กระบวนการหมักทางชีวภาพสามารถแบ่งได้ 2 ชนิดคือ กระบวนการหมักแบบใช้แสง (Photo fermentation) และกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง (Dark fermentation) (ขนิษฐา หมูโสภิญ, 2553) ภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจนอิสระ (Anaerobic system) (สิริรัตน์ สุวณิชเจริญ, 2548) เนื่องจากปริมาณของออกซิเจนมีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงมีความนิยมมากกว่ากระบวนการหมักแบบใช้แสงเนื่องจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงสามารถผลิตแก๊สได้ในอัตราที่คงที่ มากไปกว่านั้นยังสามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลายรวมไปถึงน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมและเศษอาหาร อีกทั้งไม่ต้องการแสงเป็นแหล่งพลังงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากการหมักเศษอาหารภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจนด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred tank

reactor, CSTR) ที่อุณหภูมิปกติ และไม่มีการควบคุมความเป็นกรดต่าง ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่อยู่ในช่วง 3.11 ถึง 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

## 2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารเข้มข้นด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง และไม่มีออกซิเจนอิสระด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิปกติโดยไม่มีการควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง

## 3. วิธีดำเนินการวิจัย

### 3.1 การเตรียมเศษอาหาร

เศษอาหารที่นำมาใช้ในการทดลองนี้ได้มาจากครัวบัณฑิต มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ เศษอาหารที่ได้จะผ่านการปั่นด้วยความเร็ว 14,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 15 นาทีและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสก่อนนำไปทำการศึกษา เศษอาหารที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) 27,000 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างค่าซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสคือ 100: 1.48 : 1.50 ซึ่งมีค่ามากกว่าทฤษฎี (ตารางที่ 1) (อัตราส่วนระหว่างค่าซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัสเท่ากับ 100:1:0.4 สำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยการหมักแบบไม่ใช้แสงภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอิสระของกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ (Thammanoon et al., 2010) แสดงให้เห็นว่าเศษอาหารที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสารอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเศษอาหารที่ใช้ในงานวิจัยนี้

คุณลักษณะ	หน่วย	ค่า
COD	mg/L	27,000
Total Nitrogen	mg/L	400
Total Phosphorus	mg/L	420
TS (Total Solids)	mg/L	372,000
pH	-	7.70
% Fat	-	0.40
COD : N : P	-	100 : 1.48 : 1.50

### 3.2 การเตรียมตะกอนหัวเชื้อ

ตะกอนหัวเชื้อที่ใช้ในการศึกษานี้ได้มาจากกระบวนการน้ำเสียของโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังของบริษัท อูบลไปโอเอทานอล จำกัด จังหวัดอุบลราชธานี ประเทศไทย ตะกอนหัวเชื้อจะถูกคัดขนาดและกำจัดอนุภาคของแข็งหรือเศษหินออกไปก่อนนำมาใช้งาน ตะกอนหัวเชื้อจะเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียสก่อนนำไปใช้งาน ความเข้มข้นของตะกอนหัวเชื้อเริ่มต้นมีค่า 48,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 3.3 การติดตั้งระบบหมักแบบซีเอสทีอาร์

ถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) ที่ใช้ในการศึกษานี้ทำด้วยท่อพลาสติกชนิดพีวีซีมีความจุ 4 ลิตร หรือ 0.004 ลูกบาศก์เมตร เพื่อช่วยในการป้องกันแสง โดยแสงเป็นปัจจัยที่ทำให้ความสามารถของเชื้อแบคทีเรียลดลงมากกว่านั้นที่ถังปฏิกรณ์มีการติดตั้งเครื่องกวนแม่เหล็กความเร็ว 450 รอบต่อนาที เพื่อให้ระบบอยู่ในรูปของสารแขวนลอย (รูปที่ 1) เศษอาหารจะป้อนเข้าสู่ระบบหมักทางด้านบนของถังปฏิกรณ์ที่อัตราการป้อนและระยะเวลาสารอินทรีย์ที่อยู่ในระบบ (HRT) แตกต่างกัน (ตารางที่ 2) โดยค่า HRT สามารถ

คำนวณได้จากอัตราส่วนระหว่างปริมาณใช้งานของถังปฏิกรณ์ (0.004 ลูกบาศก์เมตร) กับอัตราการไหลของสารอินทรีย์ (ลูกบาศก์เมตรต่อวัน) โดยไม่มีการควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่างๆ ระบบหมักจะทำงานจนถึงสภาวะคงตัว (ประมาณ 3 สัปดาห์) ก่อนที่จะนำเศษอาหารที่ผ่านกระบวนการหมักมาวิเคราะห์หาค่าต่างๆ สภาวะคงตัวคือสภาวะที่ค่าซีโอดีของเศษอาหารที่ผ่านการหมักและอัตราการเกิดแก๊สมีค่าคงที่หรือไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป

ตารางที่ 2 สภาวะที่ใช้ในการหาอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสม

อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (kg/m <sup>3</sup> d)	อัตราการไหลของสารอินทรีย์ (m <sup>3</sup> /d)	เวลาของสารอินทรีย์ที่อยู่ในระบบ (HRT) (d)
3.11	0.00045	8.89
8.71	0.0013	3.15
13.18	0.0019	2.08
19.22	0.0028	1.39



รูปที่ 1 ระบบหมักแก๊สชีวภาพด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR)

### 3.4 วิธีการวิเคราะห์

ปริมาณของแก๊สที่ผลิตได้ถูกบันทึกโดยใช้เครื่องวัดแก๊ส (Gas Counter) ส่วนองค์ประกอบของแก๊สจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (GC, Auto System GC, Perkin-Elmer) ที่มีเครื่องตรวจวัดชนิด Thermal conductivity (TCD) โดยชนิดของคอลัมน์และสภาวะที่ใช้ได้รายงานไว้ในงานวิจัยก่อนหน้า (Patcharee et al., 2012. และ Pawinee et al., 2011) ค่าซี โอ ดี ของเศษอาหาร ก่อน และ หลัง กระบวนการหมักวิเคราะห์ด้วยวิธีไดโครเมต (Patcharee et al., 2012) โดยใช้เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (HACH, DR 2700) องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นเป็นการนำเศษอาหารที่ผ่านกระบวนการหมักมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC, Aminex HPX-87H column) [Sureewan et al., 2014] ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบหมัก (Mixed Liquor Volatile Suspended Solids (MLVSS)) และความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบหมัก (Effluent Volatile Suspended Solids (Effluent VSS)) จะดำเนินการตามวิธีมาตรฐาน (Eaton et al., 2005) การวิเคราะห์สารประกอบประเภท ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของเศษอาหารเริ่มต้นและเศษอาหารที่ผ่านกระบวนการหมักหาได้จากกระบวนการย่อยด้วย TNT persulfate และกระบวนการ Molybdo vanadate ด้วย Acid persulfate digestion (Hach Company) ตามลำดับ (Patcharee et al., 2012.) มากไปกว่านั้นมีการติดตามค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของเศษอาหารที่ผ่านกระบวนการหมักด้วยเครื่องวัดความเป็นกรดต่าง

## 4. ผลการวิจัย

### 4.1 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และอัตราการเกิดแก๊สชีวภาพ

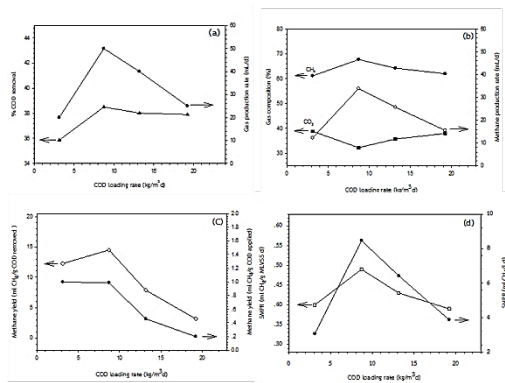
รูปที่ 2a แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD removal) และอัตราการเกิดแก๊สชีวภาพ (Gas production rate) กับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ เมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 3.11 ถึง 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และอัตราการเกิดแก๊สมีค่าเพิ่มขึ้นจากนั้นมีค่าลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์มีค่ามากกว่า 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มากที่สุด (38.50 %) และอัตราการเกิดแก๊สมีค่าสูงที่สุด (50 mL/d) พบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

### 4.2 องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพและประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทน

องค์ประกอบของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 3.11 ถึง 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน หลังจากนั้นเริ่มมีค่าลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มสูงขึ้นจาก 8.71 ถึง 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (รูปที่ 2b) องค์ประกอบของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนมีค่ามากที่สุดคือร้อยละ 68 และ 35 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน

ผลของผลได้ของแก๊สมีเทน (Methane yield) และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่จำเพาะเจาะจง (Specific Methane Production Rate) แสดงในรูปที่ 2c-d จากรูปผลได้ของแก๊สมีเทน และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่จำเพาะเจาะจงเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น และจะลดลงที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่มากกว่า 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ค่า

ผลได้ของแก๊สมีเทนที่สูงที่สุด (14.2 ml CH<sub>4</sub>/g COD removed หรือ 1.13 ml CH<sub>4</sub>/g COD applied) และ อัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่จำเพาะเจาะจงที่มากที่สุด (0.48 ml CH<sub>4</sub>/g MLVSS d หรือ 8.50 ml CH<sub>4</sub>/L d) พบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน



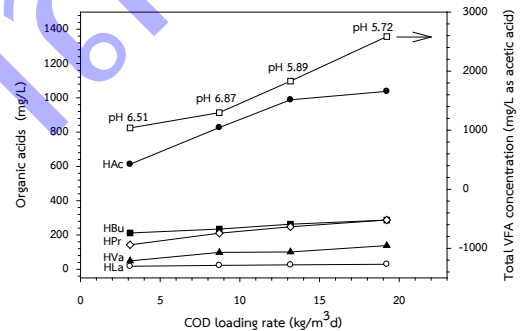
**รูปที่ 2** ผลกระทบของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่อ (a) ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และอัตราการเกิดแก๊สชีวภาพ (b) องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพและประสิทธิภาพการผลิตแก๊ส (c) ผลได้ของแก๊สมีเทนและ (d) อัตราการเกิดแก๊สมีเทนอย่างจำเพาะเจาะจง

#### 4.3 ปริมาณของกรดอินทรีย์ทั้งหมด (Total volatile fatty acid, VFA) และองค์ประกอบของกรดอินทรีย์

ปริมาณของกรดอินทรีย์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น จาก 3.11 ถึง 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีค่ามากที่สุดที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (รูปที่ 3) ในขณะที่ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนในเทอมของผลได้ของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่จำเพาะเจาะจงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ต่ำที่สุด (รูปที่ 2a)

จากการศึกษาพบว่าปริมาณของกรดอินทรีย์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อน

สารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 3.11 ถึง 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีค่ามากที่สุด (2,600 mg/l as acetic acid) ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จากรูปที่ 3 พบว่าความเข้มข้นของกรดทุกชนิดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของกรดทุกชนิดมีค่ามากที่สุดที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงสุดที่ 19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ภายใต้อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมที่ 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ทั้งหมดเท่ากับ 1,297.39 mg/l as acetic acid โดยความเข้มข้นของกรดแอสติกมีค่าสูงที่สุด (826.41 มิลลิกรัมต่อลิตร)

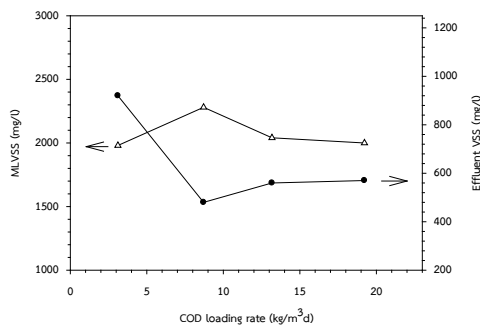


**รูปที่ 3** ผลกระทบของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่อกรดอินทรีย์ทั้งหมดที่เกิดขึ้นในระบบ

#### 4.4 ความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียในอยู่ระบบ (MLVSS) และความเข้มข้นเชื้อแบคทีเรียที่ถูกชะล้างออกจากระบบ (Effluent VSS)

ความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียที่อยู่ในระบบ (Mixed liquor volatile suspended solid, MLVSS) และความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียที่ถูกชะล้างออกจากระบบหมัก (Effluent volatile suspended solid, Effluent, VSS) แสดงในรูปที่ 4 จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียที่อยู่ในระบบเพิ่มขึ้นจาก 1,990 เป็น 2,300 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงอัตรา

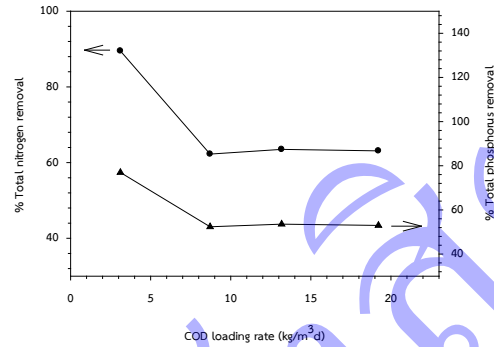
การป้อนสารอินทรีย์ระหว่าง 3.11-8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และจะลดลงจาก 2,300 เป็น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 8.71-19.22 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน



**รูปที่ 4** ผลกระทบของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่อความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียในอยู่ระบบ (MLVSS) และความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียที่ถูกชะล้างออกจากระบบ (Effluent VSS)

#### 4.5 สารอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย จากการศึกษาพบว่าปริมาณของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เชื้อแบคทีเรียใช้สำหรับการดำรงชีวิตระหว่างการผลิตนั้น มีค่าลดลงและคงที่เมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์มากกว่า 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณของแบคทีเรียในระบบ กล่าวคือ ปริมาณของเชื้อแบคทีเรียในระบบเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้การนำสารอาหารไปใช้มากขึ้นด้วย (ใช้สารอาหารในรูปของสารประกอบไนโตรเจนและฟอสฟอรัสคิดเป็นร้อยละ 62 และ 42 ตามลำดับ) (รูปที่ 5)

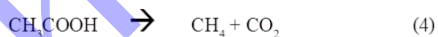
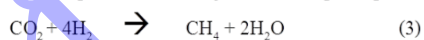


**รูปที่ 5** ผลกระทบของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่อสารอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

#### 5. การอภิปรายผล

จากการศึกษากระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบกวนต่อเนื่องภายใต้สภาวะไม่ใช้แสงและไม่มีออกซิเจนอิสระของเศษอาหารที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน โดยระบบหมักแบบกวนต่อเนื่องในแต่ละอัตราการป้อนสารอินทรีย์จะใช้เวลามากทั้งหมด 15 วัน แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น จาก 3.11 ถึง 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ทำให้ปริมาณของสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบมากขึ้นซึ่งเป็นปริมาณที่พอเหมาะสำหรับเชื้อแบคทีเรียในการย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านี้ มากไปกว่านั้นสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเข้มข้นที่ใช้ในการศึกษานี้สามารถย่อยสลายได้ง่ายภายใต้การหมักแบบไม่มีออกซิเจนอิสระที่อุณหภูมิปกติ ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มากที่สุด (38.50 %) พบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน สัมพันธ์กับอัตราการเกิดแก๊สสูงสุด (50 mL/d) อัตราการเกิดแก๊สมีเทนสูงสุด ผลได้ของการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุด และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนที่จำเพาะเจาะจงสูงสุด (รูปที่ 2)

การเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบของแก๊สมีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนเป็นผลมาจากปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าระบบเพิ่มขึ้นซึ่งเพียงพอต่อเชื้อแบคทีเรียในการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส หากมีอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่มากกว่า 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการเกิดแก๊สมีเทนจะลดลงเนื่องจากระบบมีการผลิตกรดอินทรีย์ในปริมาณที่มากเกินไป จากความเป็นพิษของกรดอินทรีย์ที่สะสมในระบบหมักจึงทำให้ค่าความเป็นกรดต่างลดลงและส่งผลให้ความสามารถของเชื้อแบคทีเรียในระบบลดลงด้วยซึ่งในระบบที่ทำการศึกษานี้มีระดับความเป็นพิษของกรดอินทรีย์ประมาณ 1,300 มิลลิกรัมต่อลิตร องค์ประกอบหลักของกรดอินทรีย์ที่ผลิตได้คือ กรดแอสติก (HAc), กรดโพรพิอิก (HPr), กรดบิวทีริก (HBu), กรดแลคติก (HLa) และกรดวาเลอริก (HVa) จะเห็นว่าความเข้มข้นของกรดแอสติกมีค่าสูงที่สุดโดยเกิดมาจากการสลายตัวของกรดโพรพิอิก และกรดบิวทีริก ดังสมการ 1 และ 2 [Abbasi et al., 1991] จึงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสูงที่สุดตามลำดับดังสมการ 3 และ 4 [Abbasi et al., 1991]



อัตราการป้อนสารอินทรีย์ช่วง 3.11-8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน เชื้อแบคทีเรียสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ เนื่องจากค่าความเป็นกรดต่างของระบบนั้นอยู่ที่ 6.51-6.87 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (Kvesitadze et al., 2012) ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาณสารอาหารประเภท

ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สูงสุด (รูปที่ 5) ในทางตรงกันข้ามช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่มากกว่า 8.71 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ปริมาณของกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงทำให้ค่าความเป็นกรดต่างลดลง (รูปที่ 3) และส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนลดลง (รูปที่ 2b) ดังนั้นจะเห็นว่าปริมาณของกรดที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทำให้เกิดการสะสมในระบบและส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วง 5.89-5.72 ซึ่งเป็นสภาวะที่ไปยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย (Chandra et al., 2012) สำหรับผลของค่าความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียที่ถูกชะล้างออกจากระบบ (Effluent VSS) จะบ่งบอกถึงปริมาณของเชื้อที่ตายแล้วและมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับผลของความเข้มข้นของเชื้อแบคทีเรียในอยู่ระบบ (MLVSS)

## 6. บทสรุป

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารเข้มข้นด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงและไม่มีออกซิเจนอิสระด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่องที่อุณหภูมิปกติและไม่มีควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง พบว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพที่สูงที่สุดซึ่งแสดงในแง่ของปริมาณแก๊สมีเทนที่มากที่สุด (67.72 %) ผลได้ของแก๊สมีเทนที่มากที่สุด (14.52 mL CH<sub>4</sub>/g COD removed) อัตราการเกิดแก๊สมีเทนอย่างเฉพาะเจาะจงที่มากที่สุด (0.48 ml CH<sub>4</sub>/g MLVSS d) และประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มากที่สุด (38.50 %) อยู่ที่สภาวะของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมที่ 8.17 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยเชื้อจุลินทรีย์มีการใช้สารอาหารประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นหลักในการเจริญเติบโต



## 7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณแหล่งทุนหลักจาก  
สำนักบริหาร โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษา  
(สกอ.) (2559A11162007) และมหาวิทยาลัยแม่โจ้  
(MUA-59-003) ครัวบั้น ทิต มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
จังหวัดเชียงใหม่สำหรับเสบอาหาร บริษัท อูบลไปโอ  
เอทานอล จำกัด จังหวัดอุบลราชธานี ประเทศไทย  
สำหรับตะกอนหัวเชื้อ มากไปกว่านั้นขอขอบคุณ  
หลักสูตรเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะ  
วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้อำนวยความสะดวก  
สะดวกสำหรับสถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย และ  
วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัยสำหรับเครื่องมือในการวิเคราะห์ตัวอย่าง

## 8. เอกสารอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน  
(2551) กระทรวงพลังงาน  
ขนิษฐา หมูโสภิญ. (2553) ไบโอดีเซลจาก พลังงาน  
ทางเลือกใหม่ วารสารศูนย์บริการวิชาการ  
คณะเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยขอนแก่น  
คลังความรู้สู่ความเป็นเลิศทางวิทยาศาสตร์  
คณิตศาสตร์และเทคโนโลยี (2011) สถาบัน  
ส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และ  
เทคโนโลยี (สสวท)  
นายฤกษ์ฤทธิ เคนหาราช (2548) ส่วนยุทธศาสตร์  
นโยบายและแผนพลังงาน สำนักนโยบาย  
และแผนพลังงาน  
สิริรัตน์ สุวณิชย์เจริญ, ปราโมชย์ เชื้อชาชาญ (2548)  
ระบบน้ำบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ มุมวิชาการ  
ด้านอาชีวอนามัยและสิ่งแวดล้อม สาขา  
วิทยาศาสตร์สุขภาพ  
Abbasi S.A., Nipayey., P.C., and Panholzer, M.B.  
(1991). Biogas production from the aquatic

weed pistia (*Pistia stratiotes*). *J. Bioresour  
Technol.* 37 (01):211-214.

Chandra, R., Takeuch, I.H., Hasegawa, T. (2012).  
Methane production from lignocellulosic  
agricultural crop waste: a review in content  
to second generation of biofuel production.  
*Renew. Sust. Energy Rev.* 16: 1462–1476.

Eaton, A.D., Clesceri, L.S., Rice, E.W., Greenberg,  
A.E. (2005). Standard methods for the  
examination of water and wastewater.  
Washington, DC: American Public Health  
Association (APHA), American Water  
Works Association (AWWA) & Water  
Environment Federation (WEF).

Han SK., Shin HS. (2004). Biohydrogen production  
by anaerobic fermentation of food waste.  
*Int. J. Hydrogen Energy.* 29:569-577.

Kapdan IK. , Kargi F. ( 2006) Bio-Hydrogen  
production from waste materials. *J. Enzym  
Microb Technol* 38:569-582.

Kvesitadze, G. , Sadunishvili, T. , Dudauri, T. ,  
Zakariashvili, N. , Partskhaladze, G. ,  
Ugrekheldidze, V., Tsiklauri, G., Metreveli,  
B., Jobava, M. (2012). Two-stage anaerobic  
process for bio-hydrogen and bio-methane  
combined production from biodegradable  
solid wastes. *Energy* 37: 94–102.

Mizuno O., Dinsdale R., Hawkes DL., Noike T.  
(2000) Enhancement of Hydrogen  
production from glucose by nitrogen gas  
sparging. *J. Bioresour Technol.* 73:59-65.

Patcharee I. (2012) et al. Hydrogen production from  
alcohol wastewater by an anaerobic

sequencing batch reactor under thermophilic operation: Nitrogen and phosphorous uptakes and transformation. *Int. J. Hydrogen Energ.* 37( 15): 11104-11112.

Pawinee S. , Pramoch R. , Malinee L. , Sumaeth C. (2011) Hydrogen production from alcohol distillery wastewater containing high potassium and sulfate using an anaerobic sequencing batch reactor. *J. Int Hydrogen Energ.* 36:12810-12821.

Sureewan Sittijunda et al. (2014). Biogas production from co-digestion of hydrolysate of microwave assisted sulfuric acid pretreated napier grass and slaughterhouse wastewater. *Research in Biotechnology, Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University.*

Thammanoon S. , Chatsiriwatana S. , Rangsunvigit P. , Chavadej S. ( 2010) . Hydrogen production from cassava wastewater using an aerobic sequencing batch reactor: effects of operational parameters, COD: N ratio, and organic acid composition. *Int. J. Hydrogen Energy.* 35:4092-4102.