

ศักยภาพและการใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส  
เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ

Potentiality and Utilization of Lignocellulosic Agricultural Wastes  
for Biogas Production

รัชพล พะวงศรีรัตน์\*

หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน E-mail: faasrpp@ku.ac.th

Ratchapol Pawongrat\*

Bioproduct Science Program, Department of Science, Faculty of Liberal Art and Science  
Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Thailand. E-mail: faasrpp@ku.ac.th

บทคัดย่อ

สืบเนื่องจากการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วทางด้านเศรษฐกิจและการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกนำไปสู่ความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น ปัจจุบันจึงต้องแสวงหาพลังงานทดแทนมากขึ้นซึ่งวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินเป็นองค์ประกอบหลัก จึงได้รับความสนใจนำมาประยุกต์เป็นแหล่งคาร์บอนเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ (Biogas) บทความนี้จึงนำเสนอศักยภาพและการใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสเพื่อผลิตเป็นแก๊สชีวภาพซึ่งได้จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ โดยเชื้อจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) ตลอดจนกระบวนการและปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด และยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตแก๊สชีวภาพอย่างยั่งยืนต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: วัสดุเศษเหลือทางการเกษตร ลิกโนเซลลูโลส แก๊สชีวภาพ

Abstract

The effects of economic growth and world population increment lead to increase energy demand. Currently, the alternative energy process should be sought. Lignocellulosic agricultural wastes containing cellulose, hemicellulose and lignin are interesting to apply as carbon sources for biogas production. Therefore, this article purposes to highlight the biogas production. In addition, these

abbreviations of organic matter digestion operated by anaerobic bacteria and its optimum production process are extremely useful to conduct the sustainable biogas production in the future.

**Keywords:** Agricultural wastes, Lignocellulose, Biogas

## 1. บทนำ

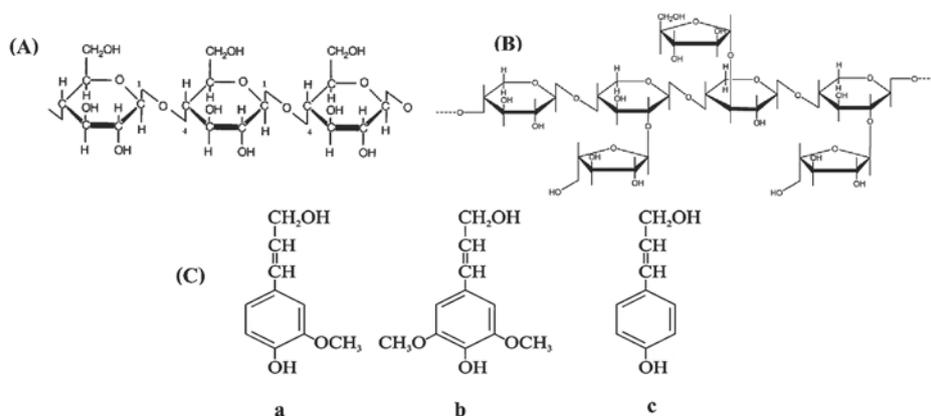
ในอดีตประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงต่างๆ เช่น น้ำมันและแก๊สธรรมชาติ อย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด และในปัจจุบันมีแนวโน้มความต้องการพลังงานเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้เชื้อเพลิงต่างๆ มีปริมาณลดน้อยลงทุกวัน สวนทางกับปริมาณ ราคาและความต้องการเชื้อเพลิงที่สามารถผลิตได้จากภายในประเทศ ดังนั้นการให้ความสนใจและสนับสนุนการหาแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อเป็นพลังงานทางเลือกรูปแบบใหม่มากขึ้น จะสามารถช่วยแก้ปัญหาวิกฤตการณ์ที่นับวันจะก่อตัวและทวีความรุนแรงมากขึ้นทั้งจากการขาดแคลนแหล่งพลังงานและผลกระทบเชิงลบของการใช้พลังงานที่มีต่อสิ่งแวดล้อม [1]

แก๊สชีวภาพ (Biogas) เป็นแก๊สที่เกิดจากมูลสัตว์หรือสารอินทรีย์ต่างๆ ถูกย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) โดยสามารถผลิตได้จากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรที่กำลังได้รับความสนใจ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมทำให้มีผลพลอยได้จากการทำเกษตรกรรมหลังการเก็บเกี่ยวเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ในกลุ่มของชีวมวลอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบหลัก คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน พบมากในผนังเซลล์ของพืช ได้แก่ ฟางข้าว ชังข้าวโพด ชานอ้อย เป็นต้น [2] แต่ปัญหาในการผลิตแก๊สชีวภาพจากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสโดยส่วนใหญ่ คือ วัสดุประเภทนี้มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อนยากแก่การย่อยสลายของจุลินทรีย์ เช่น ลิกนิน จึงจำเป็นต้องมีกระบวนการปรับสภาพ (Pretreatment) เพื่อลดขนาดโมเลกุลและกำจัดส่วนประกอบที่จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยได้ออกไป สำหรับขั้นตอนการปรับสภาพสามารถทำได้หลายวิธี โดยอาจใช้วิธีการทางเคมี เช่น การใช้กรด หรือ ด่าง ทางกายภาพ เช่น การบด การใช้ไอน้ำแรงดันสูง หรือวิธีการทางชีวภาพ เช่น การใช้เอนไซม์เซลลูเลส หรืออย่างใดอย่างหนึ่งร่วมกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ รวมทั้งชนิดของวัสดุที่ใช้ด้วย [3] ด้วยคุณสมบัติเบื้องต้นและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสดังที่กล่าวมาทำให้นักวิจัยให้ความสนใจในการนำวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสไปใช้ประโยชน์นั้นเพื่อผลิตพลังงานทดแทน เช่น การผลิตเอทานอล การผลิตแก๊สชีวภาพ การผลิตพลาสติกชีวภาพ เป็นต้น [4], [5]

ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอภาพรวม และปัจจัยที่เกี่ยวข้องของกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากวัสดุเหลือเศษเหลือทางการเกษตรชนิดต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส อีกทั้งยังเป็นอีกแนวทางในการใช้ประโยชน์จากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรได้อีกด้วย

## 2. วัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose materials)

ลิกโนเซลลูโลสมีองค์ประกอบที่เป็นโครงสร้าง 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน (รูปที่ 1) ซึ่งมีปริมาณที่แตกต่างกันในพืชแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับ เนื้อเยื่อ อายุ สภาพแวดล้อมในการเจริญสภาพทางสรีรวิทยา รวมทั้งวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ [6] โดยทั่วไปเซลลูโลสในผนังเซลล์พืชอยู่ในรูปลิกโนเซลลูโลสร่วมกับเฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในสัดส่วนที่ต่างกัน [7] วัสดุเศษเหลือทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส จะประกอบด้วยเซลลูโลสปริมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 20-30 เปอร์เซ็นต์ และลิกนิน 15-30 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้ง ดังแสดงไว้ในในตารางที่ 1



รูปที่ 1 สูตรโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (A) เฮมิเซลลูโลส (B) และลิกนิน (C) โดยลิกนิน มีโครงสร้างที่ประกอบด้วย a. trans-coniferyl alcohol; b. trans-p-sinapyl alcohol และ c. tran-p-coumaryl alcohol [6], [8], [9]

ตารางที่ 1 ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินที่พบในวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส (ดัดแปลงมาจาก [10])

วัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
ไม้เนื้อแข็ง	40-55	24-40	18-25
ไม้เนื้ออ่อน	45-50	25-35	25-35
เปลือกถั่ว	25-30	25-30	30-40
ซังข้าวโพด	45	35	15
หญ้า	25-40	35-50	10-30
ฟางข้าว	30	50	15

### 3. กระบวนการปรับสภาพวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส

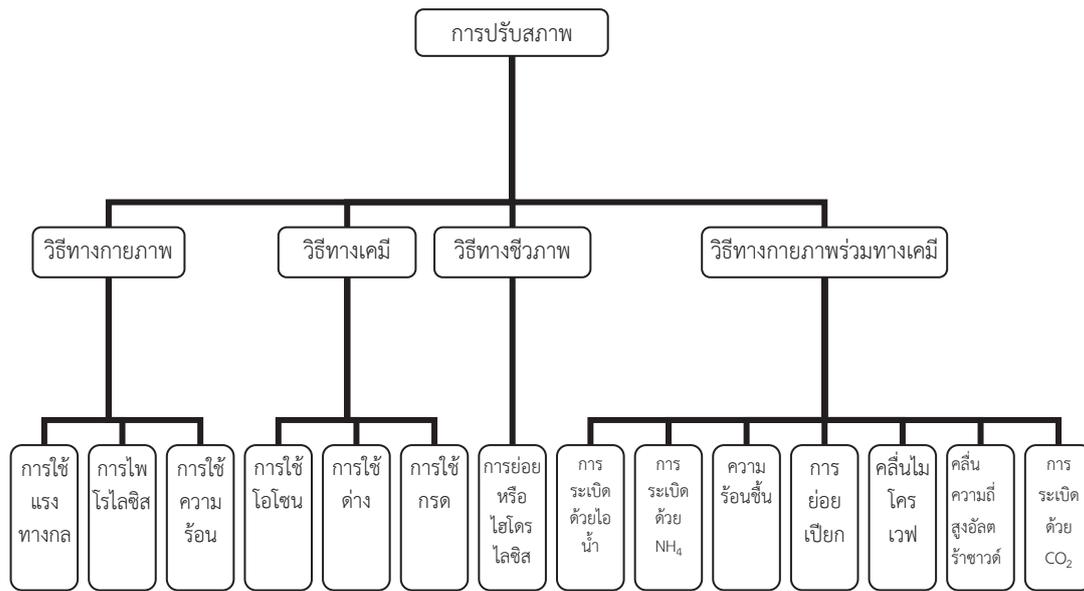
กระบวนการปรับสภาพ (Pretreatment) เป็นกระบวนการกำจัดสารประกอบจำพวกลิกนินที่ห่อหุ้มเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสออกจากวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส เนื่องจากสารประกอบเหล่านี้ถ้าไม่ทำการกำจัดออกจะทำให้กระบวนการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ยาก หรืออาจทำให้เกิดสารอนุพันธ์ที่มีผลต่อกระบวนการผลิตได้ ซึ่งวิธีการปรับสภาพแบ่งออกเป็น 4 วิธี (รูปที่ 2) [5], [11] ดังตัวอย่างงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้วัสดุเศษเหลือทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสในตารางที่ 2 โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ (Physical pretreatment) เป็นการทำให้เส้นใยเซลลูโลสแตกออกและลดขนาดวัตถุดิบเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น เช่น การบด การไฟโรไลซิสและการใช้ความร้อน เป็นต้น

2. การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี (Chemical pretreatment) เป็นการใช้สารละลายกรดเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส เพราะเฮมิเซลลูโลสสามารถย่อยสลายในสารละลายกรดได้ดีกว่าเซลลูโลส หรืออาจใช้สารละลายเบสร่วมด้วย เพื่อเพิ่มปริมาณการละลายของเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน นอกจากนี้มีรายงานว่าสามารถใช้โอโซน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายทางเคมีได้ด้วย เป็นต้น

3. การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี-ฟิสิกส์ (Physic-Chemical pretreatment) เป็นการใช้วิธีทางกายภาพร่วมกับการใช้สารเคมี เช่น การใช้สารละลายเบสเจือจางร่วมกับการใช้ความร้อนภายใต้ความดันสูงในการปรับสภาพ ซึ่งประสิทธิภาพการย่อยสลายนั้น ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายเบสและความร้อนที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สำหรับสารละลายเบสที่นิยมใช้กันมากที่สุด คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) สารชนิดนี้สามารถกำจัดลิกนินได้ดี เนื่องจาก NaOH เป็นเบสแก่ แต่บางครั้งไม่ได้กำจัดลิกนินออกไปเพียงอย่างเดียว เพราะอาจทำลายเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสบางส่วนออกไปด้วย ดังนั้นการใช้ NaOH จึงควรรหาสภาวะที่เหมาะสมของอุณหภูมิและเวลากับพีชชนิดนั้นๆ เพื่อให้ผลผลิตที่ได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

4. การปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biological pretreatment) เป็นการเปลี่ยนโครงสร้างที่ซับซ้อนของเซลลูโลสให้อยู่ในรูปโซ่ตรง และลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส ซึ่งวิธีการนี้นิยมใช้เอนไซม์และจุลินทรีย์ในการย่อยสลาย



รูปที่ 2 กระบวนการปรับสภาพ (pretreatment) วัสดุเศษเหลือทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส [5]

ตารางที่ 2 ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการนำวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสไปใช้ประโยชน์เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ

วัตถุดิบ	การปรับสภาพ	ผลผลิต	แหล่งอ้างอิง
ฟางข้าวสาลี	คลื่นไมโครเวฟและการระเบิดด้วยไอน้ำ	358 mL/g VS*	[12]
ฟางข้าวบาร์เลย์	คลื่นไมโครเวฟ	308 mL/g VS	[13]
	การให้ความร้อนชื้น	0.28 m <sup>3</sup> /kg VS	[14]
	การใช้ด่าง	625 mL/g VS	[15]
	การใช้กรด และด่าง	0.380 m <sup>3</sup> /kg VS	[16]
	ชานอ้อย	การระเบิดด้วยไอน้ำ	216 mL/g VS
เศษไม้	การใช้ตัวทำละลายอินทรีย์	0.23-0.34 CH <sub>4</sub> /kg VS	[18]
ข้าวโพด ข้าวฟ่าง	การใช้ด่าง	271 L CH <sub>4</sub> /kg VS	[19]
ฟางข้าว	การใช้ตัวทำละลายอินทรีย์	0.422 CH <sub>4</sub> m <sup>3</sup> /kg VS	[20]

\*VS = ของแข็งระเหยได้ (Volatile solid)

#### 4. แก๊สชีวภาพ (Biogas)

แก๊สชีวภาพคือแก๊สที่เกิดจากมูลสัตว์หรือสารอินทรีย์ต่างๆ ถูกย่อยสลายโดยเชื้อจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) มีองค์ประกอบดังนี้ แก๊สมีเทน (Methane) ประมาณร้อยละ 50-70 แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide) ประมาณร้อยละ 30-40 และแก๊สอื่นๆ บ้างเล็กน้อย เช่น ไฮโดรเจน

ไบโอรีเจเนอราทีฟ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (ตารางที่ 3) ซึ่งเทคโนโลยีในการผลิตแก๊สชีวภาพจะมุ่งเน้นให้เกิดแก๊สมีเทนสูงสุด ทั้งนี้เพราะแก๊สมีเทนมีคุณสมบัติติดไฟได้ จึงสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนเชื้อเพลิงต่างๆ เช่น การหุงต้ม เชื้อเพลิงรถยนต์ และเชื้อเพลิงอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด [21]

ตารางที่ 3 องค์ประกอบและคุณสมบัติทั่วไปของแก๊สชีวภาพ [22-24]

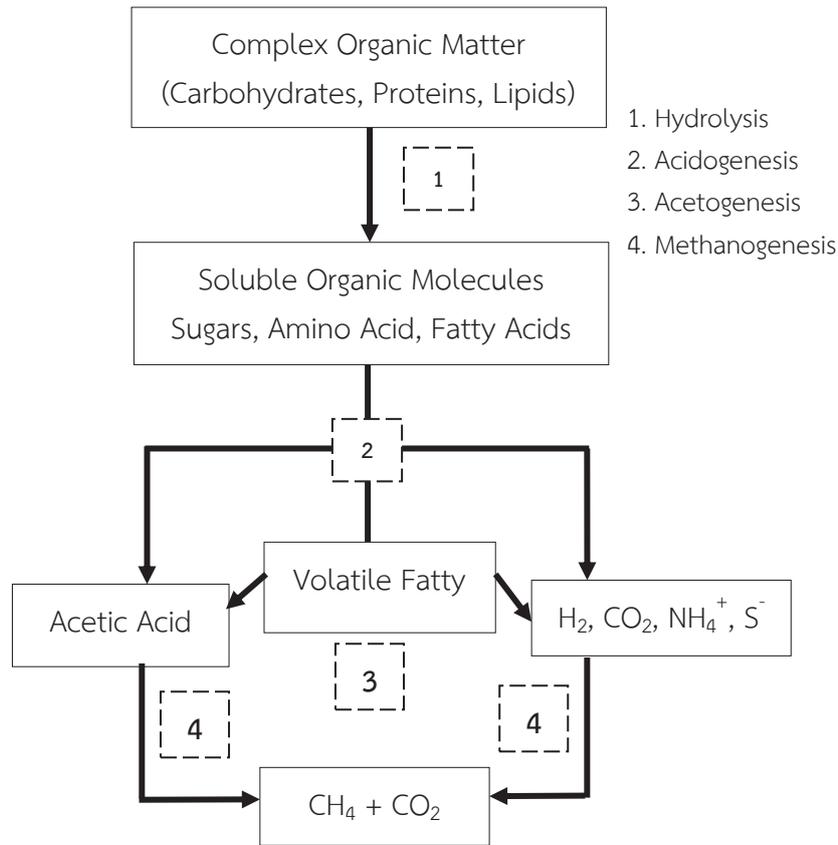
องค์ประกอบ	ปริมาณ (%)	คุณสมบัติของแก๊สชีวภาพ	คุณลักษณะ
CH <sub>4</sub>	50–70	ค่าความร้อน	21 MJ/m <sup>3</sup> (CH <sub>4</sub> 60%)
CO <sub>2</sub>	25–40	ความเร็วเปลวไฟ	25 cm/s
N <sub>2</sub>	0.5–0.3	อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศ	650 °C
H <sub>2</sub>	0.5–1.5	อุณหภูมิจุดติดไฟของมีเทน	600 °C
CO	0.5–1.5	ค่าความจุความร้อน (Cp)	1.6 kJ/m <sup>3</sup> °C
H <sub>2</sub> S	0.01–0.05	ความหนาแน่น (P)	1.15 kg/m <sup>3</sup>

## 5. กระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ

กระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพเกิดในสภาวะที่ไร้อากาศซึ่งอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศหรือไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic bacteria) กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาชีวเคมีประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก (รูปที่ 3) คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ปฏิกิริยาอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) ปฏิกิริยาอะซิโดเจเนซิส (Acetogenesis) และปฏิกิริยาเมทาโนเจเนซิส (methanogenesis) ดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1** ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นปฏิกิริยาที่เปลี่ยนสารอินทรีย์ที่ซับซ้อนเช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันให้อยู่ในรูปที่ไม่ซับซ้อนและละลายได้เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน และกลีเซอรอล เพื่อให้ง่ายต่อการลำเลียงเข้าสู่เยื่อเซลล์ของจุลินทรีย์พวกไฮโดรไลติกแบคทีเรีย (Hydrolytic bacteria) ปฏิกิริยาในขั้นนี้จะถูกเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ที่อยู่ภายนอกเซลล์ (Extracellular enzymes) ของจุลินทรีย์พวกไฮโดรไลติกแบคทีเรีย (Hydrolytic bacteria) และยังมีเอนไซม์อื่นๆ ที่เกี่ยวข้องอีก ได้แก่ เซลลูเลส อะไมเลส โปรตีเอส โดยเอนไซม์เหล่านี้สร้างขึ้นโดยแบคทีเรียในกระบวนการหมัก ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของปฏิกิริยาขั้นถัดไป อย่างไรก็ตามการย่อยสลายในขั้นตอนนี้เป็นไปได้ช้า และมีขีดจำกัดในการย่อยสลายสารบางชนิดเช่น พวกลิกนินที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบ

**ขั้นตอนที่ 2** ปฏิกิริยาอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) เป็นปฏิกิริยาที่การย่อยสลายกรดอะมิโนและน้ำตาลโดยอาศัยแบคทีเรียเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า อะซิโดเจนิคแบคทีเรีย (Acidogenic bacteria) ได้แก่ กลุ่ม obligate anaerobes และ facultative anaerobes ผลผลิตหลักในปฏิกิริยานี้คือ สารกลางที่ถูกย่อยสลายได้ต่อไป ได้แก่ กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดบิวทีริก (Butyric acid) และสารตั้งต้นโดยตรงของมีเทน



รูปที่ 3 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบการย่อยภายใต้สภาวะที่ไร้อากาศ (ดัดแปลงมาจาก [25])

ได้แก่ กรดอะซิติก (Acetic acid) และแก๊สไฮโดรเจน ในปริมาณน้อย นอกจากนี้ผลผลิตของปฏิกิริยานี้ได้แก่ แอลกอฮอล์ และคีโตน เช่น เอทานอล เมทานอล กลีเซอรอล และคาร์บอนไดออกไซด์

**ขั้นตอนที่ 3** ปฏิกิริยาอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่าย (volatile fatty acid) ได้แก่ กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริก และแอลกอฮอล์ ไปเป็นอะซิเตต ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้สภาวะความดันไฮโดรเจนต่ำ โดยการทำงานของอะซิโตจีนิกแบคทีเรีย (Acetogenic bacteria) หรือแบคทีเรียที่สร้างอะซิเตตและไฮโดรเจน (Acetate and H<sub>2</sub>-producing bacteria) อะซิโตจีนิกแบคทีเรีย (สร้างอะซิเตต) แต่ตัวที่สร้างมีเทนเรียกว่า methanogenic bacteria หรือเมทาโนเจน การทำงานของแบคทีเรียกลุ่มนี้เกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาต่อไปนี้





ปฏิกิริยาอะซิโตเจนนิซิสมือได้ว่าเป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในการหลีกเลี่ยงไม่ให้มีการสะสมของกรดไขมันระเหยและแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงพอที่จะยับยั้งปฏิกิริยาในขั้นต่อไป

**ขั้นตอนที่ 4** ปฏิกิริยามาโนจินิซิส (Methanogenesis) เป็นปฏิกิริยาการสร้างแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) โดยแบคทีเรียกลุ่มมาโนจินิกแบคทีเรียหรือมาโนเจน (Methanogens) ซึ่งมีทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบที่มีรูปร่างต่างๆกัน แบคทีเรียกลุ่มนี้เจริญเติบโตได้ช้ามากในน้ำเสีย โดยเวลาที่จุลินทรีย์ใช้เพิ่มประชากรเป็นสองเท่า (generation time) อยู่ที่ 3 วัน (ที่อุณหภูมิ  $53^\circ\text{C}$ ) และ 50 วัน (ที่อุณหภูมิ  $10^\circ\text{C}$ ) มาโนเจนิกแบคทีเรียถูกแบ่งเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. Hydrogenotrophic methanogens เป็นแบคทีเรียที่ใช้ไฮโดรเจนซึ่งเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนไปเป็นมีเทน เรียกว่า ปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ ขั้นตอนนี้เกิดสภาวะความดันไฮโดรเจนต่ำที่เอื้อต่อการทำงานของอะซิโดจินิกแบคทีเรีย



2. Acetotrophic methanogens เป็นแบคทีเรียที่เปลี่ยนรูปอะซิเตดให้เป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกว่าปฏิกิริยาอะซิโตคลาสิก



## 6. จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ที่มีโครงสร้างซับซ้อนภายใต้สภาวะไร้อากาศจนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายอยู่ในรูปของแก๊สชีวภาพนั้น จำเป็นต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ โดยแบคทีเรียที่มีบทบาทต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศสามารถแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ [26] ดังนี้ (1) Non-methanogenic bacteria แบคทีเรียพวกนี้ส่วนใหญ่เป็นพวก Facultative anaerobic bacteria ดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะแวดล้อมที่มีและไม่มีอากาศ เจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 4.0-6.5 ทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้ดี ได้แก่แบคทีเรียในกลุ่ม Acidogenic bacteria และ Acetogenic bacteria และ(2) Methanogenic bacteria แบคทีเรียทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการผลิตมีเทน ส่วนใหญ่จัดอยู่ในพวก obligately anaerobic bacteria เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่ขาดออกซิเจน ค่า pH อยู่ในช่วง 7.0-7.8 ทนต่อการเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมได้น้อย และมีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าพวกไม่สร้างมีเทน ได้แก่ แบคทีเรียในกลุ่ม Hydrogenotrophic methanogens และ Acetotrophic methanogens

## 7. ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ

เนื่องจากในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ประกอบด้วยจุลินทรีย์ 2 กลุ่มที่เกี่ยวข้องกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสภาวะแวดล้อมให้มีสภาวะที่เหมาะสมในการที่จะควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพมีดังนี้ [26]

1. อุณหภูมิ (Temperature) ประเทศไทยอยู่ในเขตร้อนชื้น ดังนั้นอุณหภูมิเฉลี่ยของประเทศจึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียในสภาวะไร้ออกซิเจน แบคทีเรียที่อยู่ในบ่อแก๊สชีวภาพจะทำงานได้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 20–42°C อุณหภูมิที่แบคทีเรียสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพได้ดีที่สุดประมาณ 35°C ประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียลดลงครั้งหนึ่ง เมื่ออุณหภูมิลดลงไป 10°C [23], [27]

2. ความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญ ที่ต้องรักษาให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม แบคทีเรียที่ผลิตมีเทน จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในช่วง pH ประมาณ 6.7-7.5 ค่า pH ในบ่อแก๊สชีวภาพ เป็นผลมาจากกรดไขมันที่สร้างขึ้นจากสารอินทรีย์ในน้ำเสีย กรดไขมันที่มีระดับสูงจะส่งผลทำให้ ค่า pH ลดลงต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว [23], [27]

3. อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของขยะอินทรีย์ที่สามารถใช้ผลิตแก๊สชีวภาพ คือ ตั้งแต่ 20–30 แต่อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพคือประมาณ 23 ถ้า C/N ratio สูงมาก ไนโตรเจนจะถูก Methanogen นำไปใช้เพื่อเสริมโปรตีนให้ในการเจริญเติบโต ทำให้ไนโตรเจนมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ได้แก๊สน้อย แต่ถ้าหาก C/N Ratio ต่ำมาก ๆ ก็จะทำให้ไนโตรเจนมีมากทำให้เกิดแอมโมเนียส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้น ซึ่งถ้าหากค่า pH สูงถึง 8.5 จะเป็นพิษกับแบคทีเรียพวก Methanogen นอกจากนี้หาก C/N ratio อยู่เหนือจากช่วง 8-30 จะทำให้มีสัดส่วนปริมาณแก๊สที่ได้เป็นแก๊สอื่น ๆ เช่นคาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น [28] มูลสัตว์โดยเฉพาะวัวควายมี C/N ratio ที่เหมาะสมที่สุดรองลงมาก็ได้แก่พวกคอกจอกผักตบและเศษอาหาร ขณะที่ฟางข้าวมี C/N ratio ที่ค่อนข้างจะสูง อย่างไรก็ตามสามารถนำวัตถุดิบที่มี C/N ratio สูงมาผสมกับวัตถุดิบที่มี C/N ratio ต่ำได้เพื่อให้ได้วัตถุดิบที่มี C/N ratio ที่ต้องการ

4. สารอาหารและธาตุอาหาร (Nutrients and elements) ระบบบ่อแก๊สชีวภาพเป็นการทำงานของแบคทีเรีย ดังนั้นแบคทีเรียจึงต้องการอาหารในการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนเซลล์ สารอาหารที่แบคทีเรียใช้ได้จากสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยประกอบไปด้วย ธาตุอาหารหลัก (Macronutrients) ได้แก่ ไนโตรเจน (nitrogen; N) ฟอสฟอรัส (phosphorus; P) กำมะถัน (sulfur; S) และธาตุอาหารรอง (micronutrients) ได้แก่ แคลเซียม (calcium; Ca) แมกนีเซียม (magnesium; Mg) สังกะสี (zinc; Zn) แมงกานีส (manganese; Mn) ทองแดง (copper; Cu) โดยเฉพาะธาตุเหล็ก (ferrous; Fe) นิกเกิล (nickel; Ni) และโคบอลต์ (cobalt; Co) เป็นธาตุที่พบ เป็นองค์ประกอบสูงในเซลล์ของแบคทีเรียที่สร้างแก๊สมีเทน [23], [27]

5. สารที่เป็นพิษ (Toxic substances) เป็นสารประกอบที่มีผลต่อกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ อาจส่งผลโดยตรงหรือโดยอ้อม เช่น (ก) ออกซิเจน (oxygen) แก๊สออกซิเจนเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างแก๊ส

มีเทน (methane formers) [29] (ข) กรดไขมัน (volatile fatty acid) กรดไขมันที่มีความเข้มข้นสูงเกินไป มาจากการเติมสารอินทรีย์หรือน้ำเสียลงในบ่อหมักแก๊สชีวภาพมากเกินไป เนื่องจากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดจากสารอินทรีย์ จะมีอัตราการทำงานที่เร็วกว่าแบคทีเรียกลุ่มที่ย่อยสลายกรดไขมันเป็นแก๊สมีเทน จึงมีการสะสมของกรดไขมันอยู่ในบ่อแก๊สชีวภาพในปริมาณที่มากเกินไป ซึ่งเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างแก๊สมีเทน และ(ค) แอมโมเนีย (ammonia) การย่อยสลายโปรตีนในน้ำเสียจะได้แอมโมเนียที่มีความจำเป็นต่อระบบแก๊สชีวภาพ เนื่องจากเป็นอาหารที่จำเป็นต่อแบคทีเรีย และช่วยลดสภาพความเป็นกรดอันเนื่องมาจากกรดไขมันที่อยู่ในระบบ แอมโมเนียที่มีในปริมาณมากเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่สร้างแก๊สมีเทน ทำให้การสร้างแก๊สชีวภาพในระบบมีประสิทธิภาพที่ลดลง ทั้งนี้สามารถแก้ไขได้โดยการลดปริมาณอาหารที่เข้าสู่ระบบ เนื่องจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียทำหน้าที่เหมือนเป็นสารปฏิชีวนะ (antibiotic) ที่มีผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างแก๊สมีเทนลดลงถึง 50 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้แบคทีเรียสามารถทำงานได้อย่างปกติ [23]

## 8. สรุป

วัสดุเศษเหลือทางการเกษตรประเภทกลีโกลเซลลูโลสที่ประกอบด้วยเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสเป็นวัสดุที่มีศักยภาพ ที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ จึงเป็นพลังงานทดแทน ทั้งในระดับครัวเรือน และในระดับอุตสาหกรรม สำหรับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม มีระบบอุตสาหกรรมเกษตรหลายประเภท ส่งผลให้มีวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรในปริมาณมาก ดังนั้นการนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตแก๊สชีวภาพจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสม และยังเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สามารถนำมาผลิตเป็นพลังงานทดแทนที่หาได้ง่าย ต้นทุนไม่สูง อีกทั้งยังเป็นการจัดการวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรได้อีกด้วย

## กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของหน่วยวิจัยจุลินทรีย์เพื่อการเกษตร คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] ชนกวร วงษ์วัน และ อรทัย ชาวลาภฤทธิ, “การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับของเสียกลีเซอรอล,” ในรายงานการประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9 (สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม), มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม, หน้า 1837-1844, 2555.
- [2] อรุณี ศุภสินสาธิต, “พลังงานจากชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสสูง,” วารสารสิ่งแวดล้อม ปีที่ 16 ฉบับที่ 2, หน้า 36 – 43, 2555.

- [3] รัชพล พะวงส์รัตน์, “การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไฮโดรไลสเสทผักตบชวาโดยหมอนึ่งไอน้ำแรงดันสูงเพื่อผลิตเอทานอล,” *Veridian E – Journal*, Silpakorn University, ปีที่ 4 ฉบับที่ 1, หน้า 891-901, 2554.
- [4] กิตติกานท์ สุขวาณิชย์, การเปรียบเทียบการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังระหว่างกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรดและด่าง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2554.
- [5] รัชพล พะวงส์รัตน์, “กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส,” *Veridian E – Journal*, Science and Technology Silpakorn University, ปีที่ 2, ฉบับที่ 1, หน้า 143-157, 2558.
- [6] L. Eriksson, R. A. Blanchette and P. Ander, *Biodegradation of Cellulose*, Springer publisher, Berlin, 1990.
- [7] B. Norkrans, “Cellulose and cellulolysis,” *Adv. Appl. Microbiol.*, Vol. 9, pp. 91-215, 1967.
- [8] วนิตา ปานอุทัย, นิคม แหลมสัก, สาโรจน์ ศิริสันสนียกุล, วิรัตน์ วาณิชย์ศรีรัตน และประมุข กระจุกสุขสถิตย์, “การผลิตเอทานอลจากไม้ยูคาลิปตัสโดยกระบวนการย่อยเป็นน้ำตาล และหมักพร้อมกัน,” ในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48: สาขาอุตสาหกรรมเกษตร, กรุงเทพฯ, หน้า 392-400, 2553.
- [9] B. Bastawde, “Cellulolytic enzymes of a thermotolerant *Aspergillus terreus* strain and their action on cellulosic substrates,” *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, Vol. 8, pp. 45-49, 1992.
- [10] Y. Sun and J. Cheng, “Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review,” *Bioresource Technology*, Vol. 83, pp. 1-11, 2002.
- [11] ชชนันท์ นิवासวงษ์ และ เฉลิม เรืองวิริยะชัย, “การผลิตเซลลูโลซิเคทานอลในประเทศไทย,” *วารสารวิทยาศาสตร์ มข.*, ปีที่ 40 ฉบับที่ 4, หน้า 1073-1088, 2555.
- [12] Z. Sapci, J. Morken and R. Linjordet, “An Investigation of the Enhancement of Biogas Yields from Lignocellulosic Material Using Two Pretreatment Methods: Microwave Irradiation and Steam Explosion,” *Bioresources*, Vol. 8, No. 2, pp. 1976-1985, 2013.
- [13] Z. Sapci, “The Effect of Microwave Pretreatment on Biogas Production from Agricultural Straws,” *Bioresource Technology*, Vol. 128, pp. 487-494, 2013.
- [14] V.N. Nkemka and M. Murto, “Production of Biogas from Wheat Straw in Batch and Uasb Reactors: The Roles of Pretreatment and Seaweed Hydrolysate as a Co-Substrate,” *Bioresource Technology*, Vol. 128, pp. 164-172, 2013.
- [15] V. Vivekanand, E.F. Olsen, V.G.H. Eijsink and S.J. Horn, “Methane Potential and Enzymatic Saccharification of Steam-Exploded Bagasse,” *Bioresources*, Vol. 9, No.1, pp. 1311-1324, 2014.

- [16] M. Krishania, V.K. Vijay and R. Chandra, "Methane Fermentation and Kinetics of Wheat Straw Pretreated Substrates Co-Digested with Cattle Manure in Batch Assay," *Energy*, Vol. 57, pp. 359-367, 2013.
- [17] Y. Li, U. Merrettig-Bruns, S. Strauch, S. Kabasci and H. Chen, "Optimization of Ammonia Pretreatment of Wheat Straw for Biogas Production," *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, Vol. 90, No. 1, pp.130-138, 2015.
- [18] M.M. Kabir, K. Rajendran, M.J. Taherzadeh and I.S. Horvath, "Experimental and Economical Evaluation of Bioconversion of Forest Residues to Biogas Using Organosolv Pretreatment. *Bioresource Technology*," Vol. 178, pp. 201-208, 2015.
- [19] S.D. Kalamaras and T.A. Kotsopoulos, "Anaerobic Co-Digestion of Cattle Manure and Alternative Crops for the Substitution of Maize in South Europe," *Bioresource Technology*, Vol. 172, pp. 68-75, 2014.
- [20] S. Aslanzadeh, M.J. Taherzadeh and I.S. Horvath, "Pretreatment of Straw Fraction of Manure for Improved Biogas Production," *Bioresources*, Vol. 6, No. 4, pp. 5193-5205, 2011.
- [21] ชลิต ทิพยยะ, ความต้องการใช้ก๊าซชีวภาพภายในครัวเรือนของประชากรเขตหมู่ที่ 1 และหมู่ที่ 3 ตำบลป่าสัก อำเภอเมือง จันทดลำพูน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2553.
- [22] นवलจันทร์ พารักษา, "การใช้มูลสุกรในการผลิตกระแสไฟฟ้า," *สุกรสาร*, ปีที่ 14 ฉบับที่ 54 หน้า 69-75, 2531.
- [23] กรมควบคุมมลพิษ, คู่มือการจัดการน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยใช้เทคโนโลยีชีวภาพ, กองจัดการคุณภาพน้ำ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ, 2538.
- [24] ธีษฐวุฒิ คุชฎี, อัจฉรา แก้วกล้า และ อภิชาติ สวนคำทอง, การสร้างมูลค่าเพิ่มลำไยตกเกรด, มหาวิทยาลัยแม่โจ้, เชียงใหม่, 2555.
- [25] วิไลรัตน์ ชีวะเศรษฐกรรม และ อาніตา ปาเก, การผลิตแก๊สชีวภาพจากสาหร่ายขนาดใหญ่ร่วมกับชีวมวลจากการผลิตน้ำยางข้น, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2556.
- [26] พงษ์ศักดิ์ โพธิ์ศรีทอง, การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลโคและเปลือกสับปะรดโดยกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 2553.
- [27] กรมโรงงานอุตสาหกรรม, คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบการผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogs) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม, กระทรวงอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ, 2553.
- [28] N.J. Themelis, *Anaerobic Digestion of biodegradable Organics in Municipal solid Wastes*, Columbia University, New York, 2002.
- [29] พัชริน ดำรงกิตติกุล, มลภาวะจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์. การสัมมนาเรื่อง เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพเพื่อลดมลภาวะและผลผลิตพลังงานในฟาร์มเลี้ยงสุกร, หน่วยบริการก๊าซชีวภาพ สถาบันวิจัยและพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่, 2538.