

รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเหลือกล้วยเล็บมือนางด้วยระบบหมักความ
เข้มข้นสูงสำหรับการผลิตกล้วยอบ

Biogas production from banana waste using high solid digestion system
for banana drying process

โดย

รศ.ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

ผศ.ดร.ปิยะรัตน์ บุญแสวง

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ปี 2560

รายงานโครงการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเหลือกล้วยเล็บมือนางด้วยระบบหมักความ
เข้มข้นสูงสำหรับการผลิตกล้วยอบ

Biogas production from banana waste using high solid digestion system
for banana drying process

โดย

รศ.ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

ผศ.ดร.ปิยะรัตน์ บุญแสวง

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพอุตสาหกรรม คณะอุตสาหกรรมเกษตร

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่

ปี 2560

บทคัดย่อ

การศึกษาศักยภาพการผลิตมีเทนของของเสียจากผลไม้เขตร้อน ได้แก่ เปลือกกล้วย กล้วยน้ำว้า และเศษลำไย ด้วยวิธีการ BMP assay และเปรียบเทียบกับ stoichiometric โดยใช้ modified Buswell's equation พบว่าผลผลิตมีเทนของเปลือกกล้วยสด เปลือกกล้วยสับ เศษลำไยสับ และเศษเงาะสับ มีศักยภาพการผลิตมีเทนเท่ากับ 0.331, 0.268, 0.193 และ 0.235 L CH₄/g VS_{added} ตามลำดับ สอดคล้องกับค่าความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ สำหรับการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกกล้วยกล้วยน้ำว้าแบบต่อเนื่องที่ความเข้มข้นของของแข็งเท่ากับ 1%TS, 2%TS และ 1.5%TS พบว่า ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบขั้นตอนเดียว (HRT 20 วัน) เกิดการล้มเหลวของระบบที่ระดับความเข้มข้นวัสดุป้อน 2%TS ทำให้ต้องลดความเข้มข้นของเปลือกกล้วยที่ป้อนเข้าระบบเป็น 1.5%TS เพื่อกู้ระบบกลับคืน สำหรับระบบผลิตก๊าซแบบสองขั้นตอนที่ประกอบด้วยระบบ Pre-hydrolysis thermophilic reactor (HRT 4 วัน) สามารถใช้เป็นระบบย่อยเบื้องต้นก่อนเข้าสู่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพขั้นที่สอง mesophilic reactor (HRT 20 วัน) อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ผลผลิตก๊าซชีวภาพและพลังงานที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายแบบสองขั้นตอนจะใช้พลังงานมากกว่าระบบการหมักแบบขั้นตอนเดียว สามารถรับภาระบรรทุกของแข็งได้มากกว่า และมีประสิทธิภาพการทำงานย่อยสลาย VS ได้สูงถึง 68.5% ได้ผลผลิตพลังงานสูงถึง 2,510.9 kJ/kgVS_{added} ที่ 2%TS

Abstract

Methane production potential of tropical fruit wastes, namely lady-finger banana peel, rambutan waste and longan waste were compared using BMP assay and stoichiometric modified Buswell's equation. Methane yields were in the order of ground banana peel, chopped banana peel, chopped longna waste, and chopped rambutan waste (0.331, 0.268, 0.193 and 0.235 L CH₄/g VS_{added}) that corresponded to their calculated biodegradability. In continuous system operations on banana peel at feed concentrations 1%TS, 2%TS and 1.5%TS, mesophilic single stage digester (20-day HRT) failed at 2%TS, hence reduced to 1.5%TS for system recovery. Pre-hydrolysis thermophilic reactor (4-d HRT) was placed as pretreatment to mesophilic reactor (20-d HRT) and able to produce hydrogen continuously. Higher biogas and energy yields were obtained and greater system stability was achieved over the single stage digestion, particularly at high solid feedstock. The best performance of two-stage digestion was 68.5% VS destruction and energy yield of 2,510.9 kJ/kgVS_{added} at a feed concentration of 2%TS.

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	I
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	2
บทที่ 2 การทบทวนเอกสาร	3
2.1 กลัวย่อยมือนาง	3
2.2 เทคโนโลยีการหมักไร้อากาศ (Anaerobic Digestion Technology)	4
2.3 กลไกการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ	7
2.4 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ	9
2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	10
2.6 ข้อดีและข้อด้อยของระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศ	16
2.7 ระบบหมักสารอินทรีย์แบบของแข็ง	17
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานโครงการ	20
3.1 การสำรวจพื้นที่ผลิตกลัวย่อยมือนางอบแห้ง	20
3.2 การเตรียมวัสดุหมักและวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพเคมี	20
3.3 การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์	20
3.4 การวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตมีเทนทางชีวเคมี	20
3.5 การคำนวณศักยภาพการผลิตมีเทนทางทฤษฎีและผลผลิตพลังงาน	20
3.6 การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องในระดับห้องปฏิบัติการ	21
3.7 การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องในระดับครัวเรือน	23
3.8 การขยายผลระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องและถ่ายทอดเทคโนโลยี แก่กลุ่มสหกรณ์ผลิตกลัวย่อยมือนาง จ.ชุมพร	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง	28
4.1 สำรวจพื้นที่	28
4.2 กระบวนการผลิตกลัวย่อยมือนาง	30
4.3 ลักษณะทางกายภาพและเคมีวัสดุหมัก	32
4.4 ประเมินศักยภาพการผลิตมีเทนทางทฤษฎี	35
4.5 ศักยภาพการผลิตมีเทนจากวัสดุหมักประเภทต่างๆ ด้วยวิธี Biochemical Methane Potential assay (BMP assay)	38

สารบัญ

หน้า

4.6	ค่าใช้จ่ายและประโยชน์ของการย่อยสลายเศษวัสดุผลไม้สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ	41
4.7	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ Single-stage Mesophilic Reactor; MS และ Temperature phased anaerobic digestion (TPAD) ระดับห้องปฏิบัติการ	42
4.8	การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องในระดับครัวเรือน	50
4.9	การขยายผลระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องและถ่ายทอดเทคโนโลยีแก่กลุ่มสหกรณ์ผลิตกล้วยอบเล็บบี๋มีอนางและอุตสาหกรรม จ.ชุมพร	51
บทที่ 5 สรุป		56
เอกสารอ้างอิง		57

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการเพิ่มขึ้นของประชากรอย่างรวดเร็ว ทำให้มีความต้องการในการใช้ทรัพยากรเพื่ออุปโภคและบริโภคเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณขยะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ในปี พ.ศ. 2554 กรมควบคุมมลพิษเปิดเผยว่ามีปริมาณขยะมูลฝอยเพิ่มขึ้น คิดเป็น 43,800 ตันต่อวัน โดยในเขตกรุงเทพมหานครมีปริมาณ 9,497 ตันต่อวัน เขตเทศบาลและเมืองพัทยา มีปริมาณ 17,488 ตันต่อวัน และเขตองค์การบริหารส่วนตำบลมีปริมาณ 16,792 ตันต่อวัน ขยะมูลฝอยที่เกิดขึ้นมีปริมาณสูงขึ้นเรื่อยๆ การกำจัดขยะมูลฝอยที่เกิดจะใช้วิธีการฝังกลบ เผาทำลาย รวมถึงผลิตเป็นปุ๋ย แต่กระบวนการจัดการในปัจจุบันยังไม่เพียงพอต่อปริมาณขยะมูลฝอยที่เกิด ขยะมูลฝอยที่ก่อให้เกิดปัญหาในการจัดการมากที่สุดคือขยะอินทรีย์ เช่น เศษอาหาร ผัก ผลไม้ ซึ่งเกิดการบูดเน่าได้ง่าย วิธีการกำจัดที่เหมาะสมคือนำไปหมักทำปุ๋ยเพื่อใช้บำรุงดิน แต่ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีบำบัดแบบไร้อากาศเข้ามาใช้ พบว่าสามารถบำบัดขยะอินทรีย์ได้ดีและส่งผลให้เกิดก๊าซชีวภาพนำมาใช้ประโยชน์ในครัวเรือนได้ด้วย เมื่อพิจารณาขยะอินทรีย์ในอำเภอหลังสวน จังหวัดชุมพร พบว่าเปลือกกล้วยเล็บมือนางเป็นขยะอินทรีย์ที่มีปริมาณมากที่สุด เนื่องจากผลิตภัณฑ์แปรรูปจากกล้วยเล็บมือนางเป็นสินค้าขึ้นชื่อประจำจังหวัด และจากการผลิตที่สูงขึ้นทำให้มีเปลือกกล้วยเล็บมือนางเหลือเป็นขยะปริมาณมาก นอกจากต้องเสียงบประมาณในการกำจัดแล้ว เปลือกกล้วยที่เหลือนี้ยังส่งกลิ่นเหม็นรบกวนสร้างความรำคาญแก่ชุมชนส่งผลเสียแก่สภาพแวดล้อมด้วย หากนำเปลือกกล้วยดังกล่าวมาบำบัดโดยวิธีไร้อากาศ นอกจากจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดขยะ ลดกลิ่นรบกวนแล้ว ยังได้ก๊าซชีวภาพนำมาใช้ในครัวเรือนของเกษตรกรด้วย

การแปรรูปของเสียจากอุตสาหกรรมเกษตรเป็นพลังงานมีหลายวิธีด้วยกัน แต่วิธีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจในปัจจุบัน คือการหมักไร้อากาศ (anaerobic digestion) การหมักแบบไร้อากาศชนิดสองขั้นตอน เป็นการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทนอาศัย การทำงานของจุลินทรีย์สองกลุ่มใหญ่ การแยกจุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่มออกจากกันโดยวิธีการแยกถังหมักและจัดสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับจุลินทรีย์ในแต่ละกลุ่ม ถังแรกจะถูกควบคุมให้สภาพแวดล้อมเหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์สร้างกรด ขณะเดียวกันถังที่สองรับผลผลิตที่เกิดขึ้นจากถังแรกโดยมีสภาพแวดล้อมเหมาะสมสำหรับกลุ่มจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทน แต่ระบบแบบนี้ยังใหม่มากสำหรับประเทศไทยและยังต้องการการพัฒนาองค์ความรู้ให้เท่าทันเพื่อให้การประยุกต์ใช้ระบบนี้เป็นไปได้อย่างเป็นรูปธรรมและมีประสิทธิภาพในประเทศ

ดังนั้น ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพของเปลือกกล้วยเล็บมือนาง โดยทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเคมีของเศษเปลือกกล้วยเล็บมือนางจากส่วนต่างๆ ที่ไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น เปลือก ก้าน และใบ จากนั้นศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยระบบ

แบบกะและระบบต่อเนื่องโดยใช้ระบบบำบัดไร้อากาศแบบความเข้มข้นสูง โดยศึกษาหาสภาวะในการเดินระบบที่ทำให้ได้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูง

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของเศษเหลือจากการผลิตกล้วยเล็บมือนางอบแห้ง
2. ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Biological Methane Potential, BMP) ของเศษเหลือเปลือกกล้วย
3. ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบหมักแบบความเข้มข้นสูง อาทิ อัตราส่วนของปริมาณเชื้อตั้งต้น (seed) ต่อปริมาณเปลือกกล้วยเล็บมือนาง
4. ศึกษาการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพในระดับครัวเรือนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเหลือเปลือกกล้วย

1.3 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบปัจจัยการออกแบบและเดินระบบที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการหมักเปลือกกล้วยเล็บมือนางแบบควบคุมอุณหภูมิ 35, 55°C และ 35+55°C เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นในการศึกษาวิจัยและพัฒนาการหมักมูลฝอยชุมชนแบบไร้อากาศไปสู่ในระดับ pilot scale และ full scale ต่อไปที่สามารถนำองค์ความรู้ที่ได้นำไปจัดการเปลือกกล้วยเล็บมือนางและติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพต้นแบบของกลุ่มเกษตรกรระดับครัวเรือนต่อไป

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 กล้วยเล็บมือนาง

กล้วยเล็บมือนาง (รูปที่ 2-1) มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Musa* (AA group) “Kluai Leb Mu Nang” หรืออาจเรียกว่ากล้วยข้าว กล้วยหมาก กล้วยเล็บมือนางเป็นกล้วยที่กลายพันธุ์มาจากกล้วยป่าจนกระทั่งสายพันธุ์นี้ มี 2 สายพันธุ์ คือ พันธุ์ผลใหญ่และพันธุ์ผลเล็ก ในกล้วยประกอบด้วยน้ำตาล 3 ชนิด คือ ซูโครส ฟรุคโทส และกลูโคส มีเส้นใยและกากอาหาร ช่วยเพิ่มพลังงานสำหรับการออกกำลังกาย ช่วยป้องกันโรคโลหิตจาง เพราะมีธาตุเหล็กสูง



รูปที่ 2-1 กล้วยเล็บมือนาง

ที่มา : BN FRUIT Co., Ltd, (www.bnfruit.com)

พื้นที่ปลูกกล้วยเล็บมือนางในประเทศไทยพื้นที่เพาะปลูกส่วนใหญ่ คือ อำเภอลำสนธิ จังหวัด ชุมพร ซึ่งเดิมมีการปลูกเพื่อบริโภคในครัวเรือน แต่เนื่องจากเป็นพืชที่ให้ผลผลิตรวดเร็วจึงมีการ ส่งเสริมให้ปลูกอย่างจริงจัง พื้นที่ในการปลูกจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเนื่องพันธุ์กล้วย สภาพพื้นที่ สภาพภูมิอากาศส่งผลให้กล้วยมีรสชาติหอม หวานกว่ากล้วยที่ปลูกในพื้นที่อื่น และจากการที่ เกษตรกรจำนวนมากนิยมปลูกจึงส่งผลให้ผลผลิตล้นตลาด จึงมีการนำกล้วยเล็บมือนางมาแปรรูปเป็น ผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด เช่น อบแห้ง อบกรอบ กวน เป็นต้น (รูปที่ 2-2)



รูปที่ 2-2 กลุ่มเกษตรกรแปรรูปกล้วยเล็บมือนาง

เนื่องจากมีการนำกล้วยไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์จำนวนมาก ส่งผลให้มีเปลือกกล้วยที่เกิดขึ้นขยะในแต่ละวันมากด้วย เปลือกกล้วยที่เกิดขึ้นจึงเป็นปัญหาในการกำจัด จากการศึกษาของวรรณกร และคณะ (2553) พบว่าเปลือกกล้วยเล็บมือนางมีปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยง่าย 165.10 และ 136.03 มิลลิกรัมต่อลิตร (ตารางที่ 2-1) เมื่อนำไปหมักโดยใช้ระบบไร้อากาศแบบต่อเนื่องมีความสามารถในการผลิตก๊าซชีวภาพ 46.8 มิลลิกรัมต่อกรัมเปลือกกล้วย

ตารางที่ 2-1 คุณลักษณะของเปลือกกล้วยเล็บมือนาง

พารามิเตอร์	ความเข้มข้น
ความชื้น (ร้อยละ)	30.34
พีเอช	6.25
ของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัม/กรัม น้ำหนักเปียก)	165.10
ของแข็งระเหยง่าย (มิลลิกรัม/กรัม น้ำหนักเปียก)	136.03

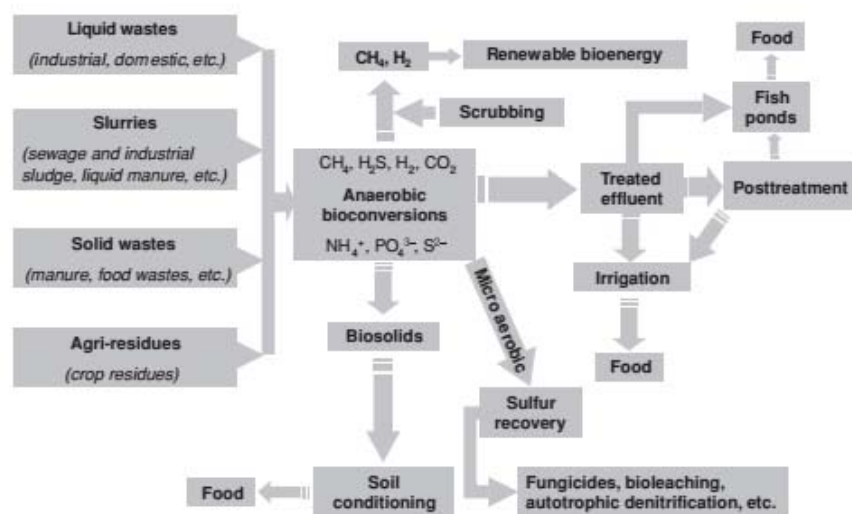
ที่มา : วรรณกร, อัจฉรียาและสุธีวัตร, 2553

2.2 เทคโนโลยีการหมักไร้อากาศ (Anaerobic Digestion Technology)

การหมักไร้อากาศเป็นเทคโนโลยีที่นำมาใช้ในการบำบัดและผลิตพลังงานจากสารอินทรีย์โดยอาศัยหลักการตามธรรมชาติจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศมาประยุกต์ใช้ทำให้ได้ก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพให้ค่าความร้อนประมาณ 21 MJ/m³ ที่สัดส่วนของก๊าซมีเทน 60% ก๊าซมีเทนก่อให้เกิดสภาวะเรือนกระจกซึ่งมีความรุนแรงกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 21 เท่า (Braber, 1995) หากปล่อยก๊าซชีวภาพสู่บรรยากาศจะเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดภาวะเรือนกระจกและทำให้โลกมีอุณหภูมิสูงขึ้น

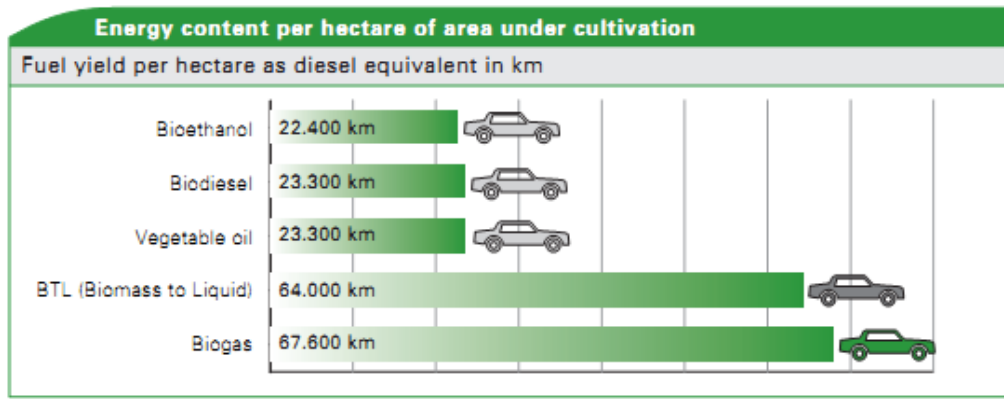
เทคโนโลยีการหมักย่อยแบบไร้อากาศได้ถูกนำมาใช้ในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ในต่างประเทศมานานหลายทศวรรษแต่ยังได้รับความสนใจน้อยในประเทศที่พัฒนา ซึ่งส่วนใหญ่ตั้งอยู่ในเขตอากาศหนาว เนื่องจากปฏิกิริยาการย่อยสลายโดยแบคทีเรียจะเกิดที่อุณหภูมิสูงได้ดีกว่าอุณหภูมิของประเทศในเขตนาน จึงทำให้จำเป็นต้องนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ส่วนใหญ่ไปใช้ในการเพิ่มความร้อนให้แก่ระบบ ส่งผลให้สูญเสียผลตอบแทนโดยรวมที่ควรจะได้รับจากระบบ ทำให้ขาดแรงจูงใจเชิงเศรษฐศาสตร์ ถึงอย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการหมักย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนก็ยังเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในหลายทวีปของโลก หลายประเทศได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการนำวัสดุอินทรีย์มาย่อยสลายร่วมกันมีการพัฒนาและประยุกต์ใช้กันในประเทศแถบยุโรปอย่างแพร่หลาย โดยการหมักวัสดุอินทรีย์ร่วมกันนี้จะส่งผลให้ผลิตก๊าซชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงในปริมาณที่สูงมาก หากเทียบกับการนำไปทำปุ๋ยหมัก compost ซึ่งไม่ได้พลังงานเป็นผลผลิตจะมีความคุ้มค่าต่ำกว่า และเมื่อเปรียบเทียบกับการนำไปเผาโดยตรงเพื่อผลิตเป็นพลังงานนั้น จะไม่มีผลพลอยได้ที่เป็นปุ๋ยอินทรีย์ในโตรเจน และฟอสฟอรัส เช่นเดียวกับการผลิตก๊าซชีวภาพ จะเห็นว่าการนำวัสดุอินทรีย์ไปหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพนั้นสามารถผนวกรวมผลประโยชน์จากทั้งสองวิธีคือการทั้งได้พลังงานจากก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและได้ปุ๋ยจากกากที่เหลือสามารถหมุนเวียนธาตุอาหารกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อมได้ เป็นปุ๋ยเพาะปลูกพืชสำหรับเป็นอาหารเพื่อการบริโภคต่อไป (รูปที่ 2-3) และจากการศึกษาในต่างประเทศ (รูปที่ 2-4) พบว่าการนำเอาวัสดุชีวมวลไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพจะได้พลังงานสุทธิสูงกว่าการนำไปผลิตเป็นเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ดังนั้นการส่งเสริมให้ใช้เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพจึงเป็นยุทธศาสตร์สำคัญสำหรับการแปรรูปชีวมวลเป็นพลังงานของประเทศที่มีแหล่งชีวมวลในปริมาณมาก ซึ่งการ Pretreatment วัสดุหมักก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะสามารถเพิ่ม Biogas yield ให้กับระบบได้มากขึ้น



รูปที่ 2-3 การใช้ประโยชน์ของเสียแปลงเป็นพลังงานก๊าซชีวภาพ

ที่มา : Khanal (2008)

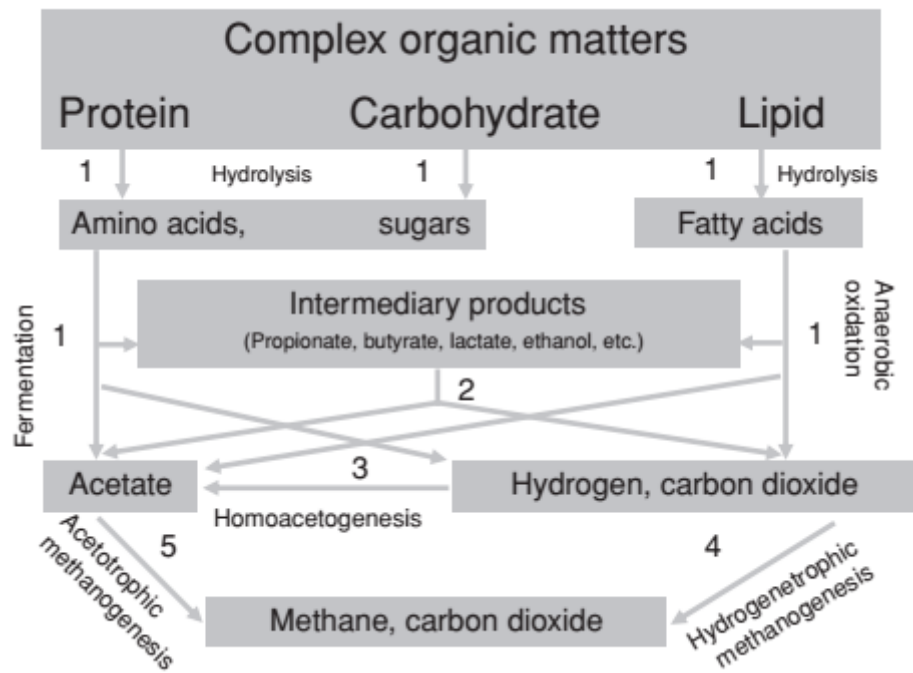


รูปที่ 2-4 เปรียบเทียบพลังงานรูปแบบต่างๆ ที่ผลิตจากชีวมวล
(EnviTech-Biogas, 2009)

การใช้พลังงานและการเจริญเติบโตของประเทศเป็นสิ่งที่เชื่อมโยงกันอย่างเห็นได้ชัด ปัจจัยที่ทำให้ประเทศและภูมิภาคต่างๆ ของโลกพัฒนาขึ้นย่อมต้องใช้พลังงาน โดยเฉพาะด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม ประเทศไทยจำเป็นต้องนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า การคมนาคมขนส่งและเป็นเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม โดยสถานการณ์พลังงานของประเทศไทยในช่วงไตรมาสแรกของปี พ.ศ.2558 ประเทศไทยมีการใช้พลังงานหลากหลาย สัดส่วนของพลังงานหมุนเวียนมีเพียง 11.92% ในขณะที่พลังงานมากกว่า 75% เป็นพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่าการเผาไหม้พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลก่อให้เกิดมลพิษและเป็นการเพิ่มปริมาณก๊าซเรือนกระจก พลังงานหมุนเวียนจึงเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่มีความเหมาะสมสำหรับประเทศไทย เนื่องจากเป็นพลังงานที่สามารถผลิตขึ้นมาได้ในระยะเวลาสั้น เป็นพลังงานที่ได้จากธรรมชาติและไม่ทำลายธรรมชาติ ซึ่งในปัจจุบันภาครัฐบาลได้วางนโยบายและสร้างแรงจูงใจในการลงทุนด้านการพัฒนาพลังงานทดแทน เช่น ไบโอดีเซล พลังงานชีวมวลและก๊าซชีวภาพ เป็นต้น

ก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานที่มีศักยภาพในการพัฒนาให้เกิดการผลิตและใช้ในสัดส่วนที่มากขึ้นเพื่อทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากสามารถจัดหาวัตถุดิบและมีกลไกการผลิตที่ไม่ซับซ้อน วัสดุส่วนใหญ่เป็นวัสดุที่เหลือใช้จากภาคการเกษตรหรือการปศุสัตว์ เช่น แกลบ ตอซัง ชานอ้อย หรือมูลสัตว์ต่างๆ นอกจากนี้ยังมีพืชพลังงานเช่น หญ้าเนเปียร์ ข้าวโพดหรือพืชโตไวชนิดอื่นที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ก๊าซชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Digestion) ซึ่งมีองค์ประกอบโดยทั่วไปคือ ก๊าซมีเทนประมาณร้อยละ 60 ถึง 70 และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่นๆ เช่น แอมโมเนีย ก๊าซไข่เน่า เทคโนโลยีในการผลิตก๊าซชีวภาพจะมุ่งเน้นให้เกิดก๊าซมีเทนสูงสุด เนื่องจากก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่ให้พลังงาน ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซมีเทน เมื่อวัสดุหมักอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่จำกัดอากาศ (No free oxygen) จุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic microorganism) จะปลดปล่อยเอนไซม์เพื่อ

ก่อนปฏิกิริยาชีวเคมีให้เปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน โดยกลไกของการผลิตก๊าซมีเทนโดยจุลินทรีย์สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังแสดงในรูปที่ 2-5



รูปที่ 2-5 กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ
ที่มา : Khanal (2008)

2.3 กลไกการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

กระบวนการย่อยสลายอินทรีย์ในน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกาศ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 : Hydrolysis
- ขั้นตอนที่ 2 : Acidogenesis
- ขั้นตอนที่ 3 : Acetogenesis
- ขั้นตอนที่ 4 : Methanogenesis

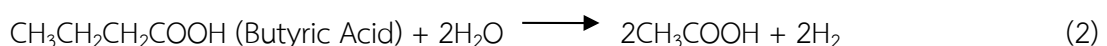
โดยอาจแบ่งขั้นตอนในการย่อยสลายได้เป็นสองระดับ ตามผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายคือการย่อยสลายแบบไม่มีการสร้างก๊าซมีเทน และการย่อยสลายแบบที่มีการสร้างก๊าซมีเทน

การย่อยสลายภายนอกเซลล์ ได้แก่ขั้นตอนที่ 1 คือกระบวนการ Hydrolysis สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมันและโปรตีน จะถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme) ให้กลายเป็นสารประกอบเชิงเดี่ยว (Monomer) สำหรับใช้ในกระบวนการสร้างกรดจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายคือจุลินทรีย์

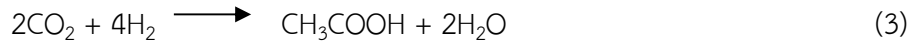
จำพวกแพคคัลเททีฟแอนด์แอโรบิกจุลินทรีย์ สำหรับความเร็วของกระบวนการย่อยสลายในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับเอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาจากจุลินทรีย์ จากการศึกษากระบวนการแตกสลายโพลีเมอร์จากของเสียหลายๆประเภท พบว่าการย่อยสลายโดยใช้จุลินทรีย์หลายชนิดร่วมกันจะได้ผลดีมากกว่าการย่อยสลายโดยใช้จุลินทรีย์เพียงชนิดเดียว

หลังจากเกิดกระบวนการย่อยสลายภายนอกเซลล์ การย่อยสลายก็จะเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายภายในเซลล์ ซึ่งได้แก่ขั้นตอนที่ 2 และขั้นตอนที่ 3 โดยในขั้นตอนที่ 2 หรือการเกิดกระบวนการ Acidogenesis การย่อยสลายในขั้นตอนนี้จะใช้สารที่ได้จากการย่อยสลายในขั้นตอนแรกเป็นสารตั้งต้น สำหรับจุลินทรีย์ประเภทสร้างกรด โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะเปลี่ยนสารอาหารดังกล่าวให้เป็นกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic acid) กรดวาเลอริก (Valeric acid) และกรดแลคติก (Lactic acid) โดยกรดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีส่วนของกรดอะซิติกสูงสุด และมีการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในขั้นตอนนี้ด้วย จุลินทรีย์สร้างกรดมีอัตราการเจริญเติบโตสูงและทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดีเป็นผลสืบเนื่องมาจากการอยู่ร่วมกันของจุลินทรีย์หลายสปีชีส์ (Species) สำหรับจุลินทรีย์ในขั้นตอนการสร้างกรด (Acidogenesis) คือจุลินทรีย์ในกลุ่มของ Fermentative Bacteria หรือ Acidogens ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่สามารถทำให้เกิดปฏิกิริยา Hydrolysis ได้อีกด้วย

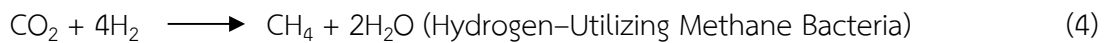
สำหรับการเกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 3 หรือการเกิดกระบวนการ Acetogenesis นั้นเป็นผลอันเนื่องมาจากการที่จุลินทรีย์สร้างมีเทนต้องการสารอาหารที่มีความเฉพาะเจาะจงสูงโดยสารอาหารที่จุลินทรีย์สร้างมีเทนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ประกอบไปด้วย กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมธิลามีน แต่ไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนอะตอมเกินกว่าสองอะตอม เช่น กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริก เป็นสารอาหารในการผลิตก๊าซมีเทนโดยตรงได้ ดังนั้นในกรณีที่กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ที่สร้างขึ้นยังอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม จุลินทรีย์สร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จุลินทรีย์กลุ่มหนึ่งที่สามารถย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอมให้เป็นกรดอะซิติกได้แก่ จุลินทรีย์ที่สร้างไฮโดรเจน (Hydrogen producing acetogenic bacteria) ผลผลิตที่ได้ประกอบไปด้วยกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน โดยมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีในภายใต้สภาวะ Low Hydrogen Partial Pressure ดังสมการที่ (1) และ (2)



นอกจากการสร้างกรดด้วยกระบวนการทั้งสองชนิดแล้ว ยังพบว่ามีจุลินทรีย์บางกลุ่มที่สามารถสร้างกรดอะซิติกได้จากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการที่ (3)



กระบวนการย่อยสลายที่มีการสร้างมีเทนกระบวนการนี้เกิดขึ้นเฉพาะในขั้นตอนที่ 4 เรียกว่ากระบวนการ Methanogenesis โดยที่กรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรดจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจุลินทรีย์ชนิดสร้างก๊าซมีเทน การเกิดก๊าซมีเทนเกิดได้ 2 แบบ แบบแรกคือเกิดจากการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนนี้มีปริมาณเป็น 70% ของก๊าซมีเทนสามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ และอีกส่วนหนึ่งจะเกิดจากการรีดิวซ์ก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทน โดยจุลินทรีย์ประเภท Hydrogen- Utilizing Methane Bacteria ดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ



จุลินทรีย์สร้างมีเทนเจริญเติบโตได้ช้าและสภาพแวดล้อมมีผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโตค่อนข้างมาก ทำให้ช่วงพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดนี้แคบ โดยสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงพีเอชประมาณ 6.8 – 7.2 และจุลินทรีย์ในกลุ่มที่มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific growth rate) หรือการเพิ่มขึ้นของจำนวนเซลล์ใหม่ต่อความต้องการสารอาหารที่โครงสร้างไม่ซับซ้อน ดังนั้นการเติบโตของจุลินทรีย์สร้างมีเทน จึงขึ้นอยู่กับการทำงานของจุลินทรีย์สร้างกรด โดยจุลินทรีย์ทุกกลุ่มต้องทำงานอย่างสัมพันธ์กัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาของกลุ่มจุลินทรีย์ที่อยู่รวมกันในระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่ากลุ่มของจุลินทรีย์สร้างมีเทนจะเป็นกลุ่มจุลินทรีย์หลักในการควบคุมความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาทั้งหมดในระบบ เนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มนี้อัตราการเติบโตช้าที่สุด และมีข้อจำกัดด้านสภาพแวดล้อมของระบบมากกว่าจุลินทรีย์กลุ่มอื่นๆ

2.4 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ

การย่อยทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจนเกิดขึ้นจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลายชนิดในการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์จนกระทั่งได้ก๊าซชีวภาพ ลักษณะสภาวะการดำรงชีพของจุลินทรีย์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 พวก คือ

- (1) Facultative anaerobic bacteria หรือจุลินทรีย์ที่สามารถอยู่ได้ทั้งสภาวะที่มีหรือไม่มีออกซิเจน

(2) Obligate anaerobic bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่ต้องอยู่ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนเท่านั้น ดังนั้นจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จึงไม่สามารถทำการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือดำรงชีพอยู่ได้ หากระบบมีการละลายของออกซิเจนอิสระ

นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งชนิดของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

(1) จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรด (Acid former bacteria) เป็นจุลินทรีย์ในกลุ่ม Facultative anaerobic bacteria และจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศ จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งไปเป็นกรดอินทรีย์ต่างๆ

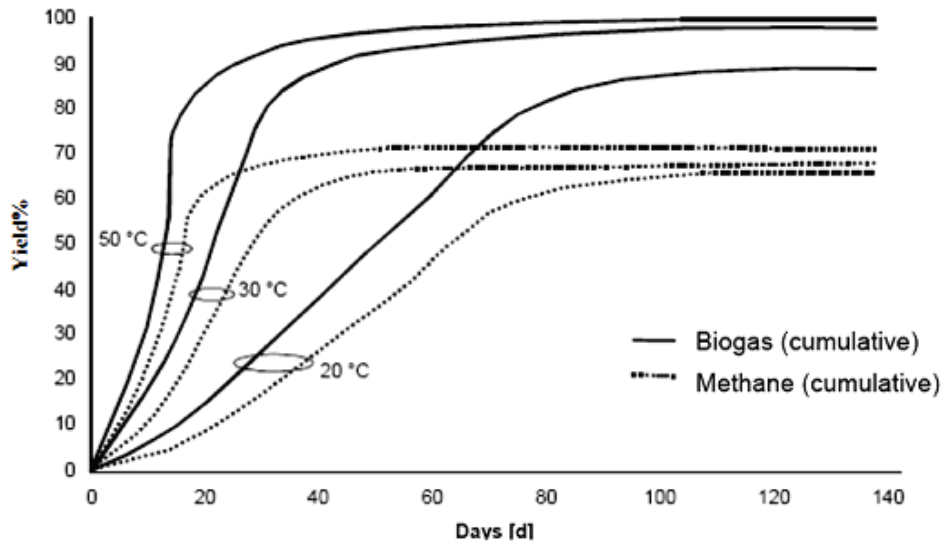
(2) จุลินทรีย์สร้างมีเทน (Methane former bacteria) เป็นจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่ใช้อากาศอย่างแท้จริง จะย่อยสลายพวกกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ จุลินทรีย์กลุ่มนี้มีการเจริญเติบโตได้ช้า โดยทั่วไปต้องการเวลากักเก็บตะกอน (Solid Retention Time, SRT) มากกว่า 4 วัน จุลินทรีย์ในกลุ่มสร้างกรดและสร้างมีเทน จะต้องพึ่งพาซึ่งกันและกัน

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณการผลิตมีเทนในกระบวนการย่อยสลายได้แก่ อุณหภูมิ (Temperature) ความเป็นกรด-ด่าง (pH) กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile acid) การกวน (Mixing) และคุณสมบัติของสารอินทรีย์ตั้งต้นที่จะย่อย

(1) อุณหภูมิ (Temperature) การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศของจุลินทรีย์มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วง คือช่วงอุณหภูมิ 35–40 องศาเซลเซียส เหมาะแก่การทำงานของมีโซฟิลิกแบคทีเรีย (Mesophilic Bacteria) และช่วงอุณหภูมิ 55–65 องศาเซลเซียส เหมาะแก่การทำงานของเทอร์โมฟิลิกแบคทีเรีย (Thermophilic Bacteria) (Rittmann and McCarty, 2001) ซึ่งโดยปกติแล้วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการทำงานของจุลินทรีย์ภายในเซลล์จะเพิ่มขึ้นพร้อมกับมีอัตราการเจริญเติบโตเร็วขึ้นแต่ถ้าอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าที่เซลล์จุลินทรีย์จะทำงานได้ โปรตีน กรดนิวคลีอิก และส่วนประกอบของเซลล์บางส่วนอาจถูกทำลายได้ นอกจากนี้การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิสามารถเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์ได้ที่อุณหภูมิหนึ่งเท่านั้น และถ้าหากอุณหภูมิสูงเกินไปการทำงานและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์จะลดลงอย่างรวดเร็ว

อุณหภูมิอุณหภูมิส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ การเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์จะดีขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น สามารถแบ่งช่วงอุณหภูมิได้เป็น 3 ช่วง (รูปที่ 2-6) คือ ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) อุณหภูมิควรต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) อุณหภูมิควรอยู่ในช่วงระหว่าง 20 – 45 องศาเซลเซียส และช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) อุณหภูมิควรสูงกว่า 45 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2-6 ช่วงอุณหภูมิกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

ที่มา : Al Seadi et al. (2008)

สำหรับระบบหมักแบบไร้อากาศที่ต้องการผลิตก๊าซมีเทน ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดก๊าซมีเทนได้ดี คือ ช่วงอุณหภูมิประมาณ 30–38 องศาเซลเซียส และช่วงอุณหภูมิ 48–57 องศาเซลเซียส แต่การเดินระบบที่มีอุณหภูมิสูงเกินไปจะสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่าการเดินระบบที่อุณหภูมิต่ำกว่า ในประเทศไทยช่วงอุณหภูมิมัชพิลิกเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม เนื่องจากสามารถเดินระบบได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า ทำให้สามารถลดพลังงานประหยัดค่าใช้จ่ายได้

Gray (2004) ได้รายงานช่วงอุณหภูมิมัชพิลิกเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมกับประเทศเขตร้อน ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายและลดพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิ เนื่องจากสามารถทำการเดินระบบได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าได้ นอกจากนี้อุณหภูมิในถังหมักยังมีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในขั้นตอนย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis) น้อยมาก แต่ถ้าหากอุณหภูมิกายในถังปฏิกรณ์ลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิช่วงมัชพิลิกประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส จะมีผลต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์กลุ่มผลิตกรดและ MPB เป็นอย่างมาก โดยอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง

(2) ค่าพีเอชของน้ำเสียในระบบบำบัดแบบไร้อากาศสามารถบ่งชี้ถึงสภาพภายในได้ ซึ่งพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6.6-7.6 ถ้ามีค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบลดลง เนื่องจากที่พีเอชต่ำกว่า 6.6 จะทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าปกติ และจะเกิดกลิ่นเหม็นของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์พร้อมทั้งฝ้าตะกอนลอยขึ้นมา แต่เมื่อพีเอชมีค่าสูงกว่า 7.6 จะส่งผลต่อ MPB ทำให้ทำงานเชิงเข้าเกิดมีเทนน้อยลง หรือระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์หยุดทำงาน (MetCalf and Eddy, 2004) ซึ่งในการควบคุมพีเอชในการบำบัดน้ำเสียไร้อากาศโดยทั่วไปจะควบคุมให้อยู่ในช่วงพีเอชเป็นกลาง (6.6-8.0) เพื่อให้จุลินทรีย์ผลิตกรด และ MPB สามารถทำงานได้ดี และเพิ่มจำนวนเซลล์ได้อย่างอิสระโดยใช้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (NH_4HCO_3) เป็นบัฟเฟอร์หลักในการควบคุมพี

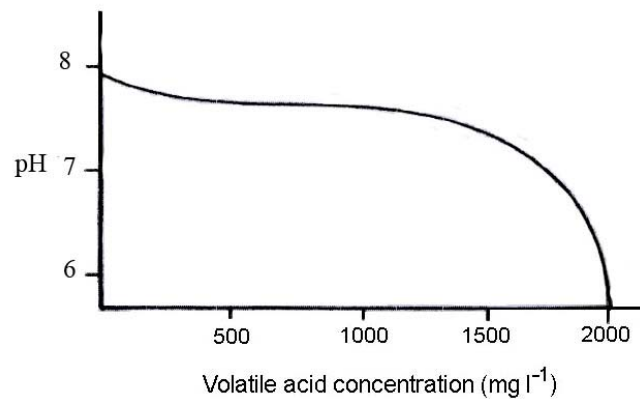
เอชของน้ำเสียในระบบไร้อากาศ (Grady et al., 1999) นอกจากนี้ยังเป็นช่วงพีเอช 6.0-7.0 ที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน อย่างไรก็ตามถ้าหากน้ำเสียในระบบมีพีเอชค่าต่ำกว่า 6.2 จะเป็นอันตรายต่อ MPB ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดระบบเริ่มเสียสมดุลเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย ถ้ามีสภาพต่าง (Alkalinity) ไม่เพียงพอจะทำให้พีเอชในระบบลดลง ซึ่งการควบคุมปริมาณกรดไขมันระเหยของน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรดสามารถทำได้โดยเติมด่างให้แก่ น้ำเสีย นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มความจุบัฟเฟอร์ (Buffer Capacity) ให้กับระบบ สามารถป้องกันการลดลงของพีเอชและรักษาเสถียรภาพของระบบได้

(3) สภาพต่าง (Alkalinity) สภาพต่างมีความสำคัญต่อระบบบำบัดไร้อากาศ กล่าวคือ เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถต้านทานความเป็นกรดของระบบ โดยทำหน้าที่รับอนุภาคโปรตรอน (Proton) ทำให้เกิดสภาพต่างคาร์บอเนตและไบคาร์บอเนต (Sawyer et al., 2003) มีหน่วยเป็น มก./ล. ของ CaCO_3 ซึ่งเป็นตัวที่แสดงถึงเสถียรภาพของระบบ โดยถ้าหากระบบบำบัดมีสภาพต่างสูงหรือมีความจุบัฟเฟอร์สูงสามารถรักษาระดับพีเอชของระบบให้คงตัวได้ดี ระบบทำงานยังคงได้ดีแม้มีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในระบบเพิ่มขึ้น โดยสภาพต่างที่มีความสำคัญคือ สภาพต่างไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) เพราะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์เมื่อมีกรดไขมันระเหยง่ายเกิดขึ้นในระบบ นอกจากนี้ปัจจัยสำคัญอีกปัจจัยหนึ่งคือ อัตราส่วนความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายต่อระดับสภาพต่างไบคาร์บอเนต (VFA: HCO_3^-) ถ้าหากมีอัตราส่วนน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบยังมีความจุบัฟเฟอร์สูง แต่ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่ามากกว่า 0.8 แสดงว่าระบบกำลังอยู่ในสภาวะความจุบัฟเฟอร์ต่ำพีเอชจะลดลงอย่างรวดเร็วหากมีกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มเพียงเล็กน้อย โดยสภาพต่างที่เหมาะสมสำหรับระบบไร้อากาศควรอยู่ระหว่าง 1,000-5,000 มก./ล. ของ CaCO_3 (MetCalf and Eddy, 2004)

(4) ความเป็นพิษ (Toxicity) สารที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมีอยู่หลายชนิด เช่น กรดไขมันระเหยง่าย แอมโมเนีย โลหะหนักต่างๆ และเกลืออินทรีย์ เป็นต้น โดยระดับความเป็นพิษขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารเหล่านั้น โดยสารที่เป็นพิษบางตัวเป็นสารอาหารที่จำเป็นส่งเสริมการทำงานและเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ แต่ทั้งนี้ต้องมีปริมาณที่พอเหมาะ ถ้าหากมีปริมาณสารดังกล่าวมากเกินไปจะกลายเป็นพิษต่อจุลินทรีย์โดยเฉพาะ MPB ได้ เนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มนี้มีความอ่อนไหวต่อสารพิษเมื่อเทียบกับจุลินทรีย์กลุ่มที่ย่อยสลายสารอินทรีย์และกลุ่มสร้างกรด ซึ่งถ้าหากในระบบมีสารพิษอยู่จะส่งผลให้ระบบล้มเหลว โดยสามารถจำแนกสารพิษที่ส่งผลต่อระบบบำบัดไร้อากาศได้ดังนี้

- กรดไขมันระเหยง่าย เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ มีความจำเป็นต่อ MPB เนื่องจาก MPB ใช้เป็นสารอาหารสำหรับการเจริญเติบโต โดยทั่วไประบบจะทำงานได้ดีที่กรดไขมันระเหยง่ายมีความเข้มข้นต่ำประมาณ 50 มก./ล. แต่ถ้าหากระบบมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มขึ้น 500-2,000 มก./ล. ของ CH_3COOH แสดงว่าระบบกำลังมีปัญหาเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย พีเอชในระบบลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อกรดไขมันระเหยง่ายมีค่ามากกว่า 1,500 มก./ล. ของ CH_3COOH หากมีความจุบัฟเฟอร์ไม่พอ ดังแสดงในรูปที่ 2-7 และถ้าพีเอชลดลงต่ำกว่า 6.2 จะเป็น

พืชต่อ MPB ได้ ดังนั้นจำเป็นต้องมีการควบคุมอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นกรดไขมันระเหยง่ายให้สมดุลกับอัตราการเปลี่ยนไปเป็นมีเทน



รูปที่ 2-7 ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายต่อพีเอชน้ำเสียในระบบถังหมักแบบไร้อากาศ
ที่มา : Gray (2004)

- แอมโมเนีย (Ammonia) เกิดจากการสลายตัวของโปรตีนและเกิดจากไนโตรเจนในสารอินทรีย์ซึ่งจะถูกย่อยสลายเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย ซึ่งจะอยู่ในรูปแอมโมเนียอิสระ (NH_3) หรือแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ขึ้นอยู่กับพีเอชของระบบ โดยสมดุลของแอมโมเนียอิสระจะเป็นบัพเฟอร์ที่สำคัญของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ โดยการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นที่เคเอ็นสูง จะเกิดการย่อยสลายโปรตีนหรือที่เคเอ็นในน้ำเสีย ทำให้สภาพต่างในน้ำเพิ่มขึ้นได้ (Sawyer et al., 2003) ทำหน้าที่เป็นบัพเฟอร์ของระบบได้เช่นกัน นอกจากนี้แอมโมเนียอิสระที่มีอยู่ในระบบจะถูกใช้เพื่อการเจริญและสร้างเซลล์ใหม่ ทำให้ความจุบัพเฟอร์ลดลงส่งผลให้ความคงตัวของระบบลดลงด้วยเช่นกัน และถ้าหากแอมโมเนียอิสระในน้ำเสียมีความเข้มข้นเกินกว่า 1,000 มก./ล.และแอมโมเนียไนโตรเจนมากกว่า 1,500-3,000 มก./ล. จะเริ่มมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของ MPB ที่อยู่ในระบบดังแสดงในตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 แอมโมเนียไนโตรเจนที่มีผลต่อระบบบำบัดไร้อากาศ

แอมโมเนีย (มก./ล.)	ผลกระทบต่อระบบ
50-200	ปริมาณที่พอเหมาะ
200-1,000	ยังไม่เกิดผลเสีย
1,500-3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อพีเอชสูง
มากกว่า 3,000	เป็นพิษโดยตรง

ที่มา : Khanal (2008)

- โลหะหนัก (Heavy Metals) ที่เป็นธาตุอาหารจำเป็นต่อจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศมี 5 ชนิดคือ เหล็ก นิกเกิล โครเมียม แคดเมียม และสังกะสี แต่ต้องการในปริมาณต่ำมาก ซึ่งถ้าหากขาดธาตุที่ต้องการเหล่านี้ทำให้ระบบไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ในขณะเดียวกันถ้ามีปริมาณโลหะหนักสูงเกินไปจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ได้ซึ่งสามารถเรียงลำดับความเป็นพิษของโลหะหนักที่ส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด คือ $Cu > Zn > Cr > Cd > Ni > Pb$ และกลุ่ม MPB คือ $Cd > Cu > Cr > Zn > Pb > Ni$ ซึ่งจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ ความเข้มข้นของทองแดงและสังกะสีน้อยกว่า 10 มก./ล.จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดไร้อากาศได้ (Chen et al., 2008)

(5) สารอาหาร (Nutrients) ไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นธาตุที่สำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมในระบบ เพื่อให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ และผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีควรมีอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 100:2.2:0.4 หรือ BOD:N:P เท่ากับ 100:1.1:0.2 (MetCalf and Eddy, 2004)

(6) ระยะเวลาพัก (Hydraulic Retention Time) ระยะเวลาพักพักกลศาสตร์คือระยะเวลาที่น้ำในระบบเป็นระยะเวลาที่จุลินทรีย์สัมผัสกับน้ำเสีย การลดระยะเวลาการกักน้ำเสียจะทำให้ขนาดของถังปฏิกรณ์ลดลง แต่หากระยะเวลากักน้ำน้อยเกินไปตะกอนจุลินทรีย์จะหลุดออกมาจากระบบมากซึ่งเป็นผลให้ค่าอายุตะกอนลดลงและทำให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD ลดลง (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

(7) การกวน (Mixing) เป็นขั้นตอนที่ทำให้สารอินทรีย์และจุลินทรีย์ในระบบเกิดการคลุกเคล้าผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันและเกิดการกระจายการสัมผัสระหว่างสารอินทรีย์และจุลินทรีย์มากขึ้น ทำให้ระบบเกิดภาวะเสถียร และทำให้ไม่เกิดฝ้า (scum) ที่ระดับผิว ช่วยให้อุณหภูมิภายในถังมีความสม่ำเสมอ การกระจายของสารพิษเบาบางลง และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าที่ไม่มีการกวนผสม ถ้ากวนผสมไม่เพียงพออาจมีการตกตะกอนบางส่วน ทำให้ปริมาตรใช้งานของถังปฏิกรณ์ลดลงและระยะเวลาเก็บกักลดลง ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ หากมีการกวนผสมมากเกินไปจะรบกวนการทำงานของจุลินทรีย์ การกวนต่อเนื่องตลอดเวลาอย่างช้าๆ จะให้ผลดีกว่าการกวนเร็ว เช่นเดียวกับ Andara and Esteban (1999) ที่ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกรโดยใช้ส่วนที่เป็นของแข็งที่กรองจากตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร เติมน้ำในถังหมักรูปไข่ 2 ถังที่มีการกวนผสม และไม่มีการกวนผสม และนำมาประยุกต์กับโมเดลทางจลนพลศาสตร์ พบว่า อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังกวนผสมและถังที่ไม่มีการกวนผสม เท่ากับ 0.75 และ 0.05 ต่อวัน ตามลำดับ ทำให้ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของถังกวนผสมมีค่าเฉลี่ยสูงกว่าถังที่ไม่มีการกวนผสม โดยทั่วไปการกวนผสมที่นิยมใช้กันมีอยู่ 3 วิธีดังนี้ (สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์, 2549)

- การกวนผสมโดยใช้เครื่องมือกล (Mechanical mixing) ได้แก่ ใบพัด (Impeller) ซึ่งใบพัดที่จะเลือกใช้จะมีลักษณะแตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ เช่น ใบพัดแบบ

puddle หรือ turbine อย่างไรก็ตาม ในการกวนผสมให้น้ำเสียผสมเป็นเนื้อเดียวกันจะต้องใช้พลังงานค่อนข้างสูง หากถังมีขนาดใหญ่มากจะต้องใช้พลังงานมากขึ้นเพื่อให้เกิดการกวนผสมอย่างสมบูรณ์

- การกวนผสมโดยใช้วิธีการสูบน้ำเสียภายในถังปฏิกริยาให้เกิดการหมุนเวียน (Mixing by recirculation of wastewater) เป็นวิธีการที่ใช้พลังงานไม่สูง และประสิทธิภาพไม่สูงมากนัก โดยการตั้งเครื่องสูบน้ำเสียภายในถังปฏิกริยาออกทางด้านล่างของถังปฏิกริยา และป้อนกลับเข้าทางด้านบนของถังปฏิกริยา ทำให้เกิดการหมุนเวียนและการกวนผสมของน้ำเสียภายในถังปฏิกริยา

- การกวนผสมโดยการนำก๊าซที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียในถังปฏิกริยามาใช้ในการกวนผสม (Mixing by producing gas) อาศัยก๊าซเป็นตัวช่วยให้เกิดการกวนผสมโดยดึงก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในถังปฏิกริยาบางส่วนกลับเข้าสู่ถังปฏิกริยา ทำให้เกิดการกวนผสมของน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์

(8) หัวเชื้อ (starter) การหมักสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ ต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์หลายชนิดในการเปลี่ยนจากสารอินทรีย์เป็นก๊าซมีเทน และต้องมีจุลินทรีย์ที่จำเป็นในการเปลี่ยนแปลงต่อเนื่อง ดังนั้น การนำเชื้อผสม (mixed culture) มาหมักกับสารอินทรีย์ที่ใช้ในปริมาณไม่มากในสภาพไร้อากาศ เมื่อเริ่มต้นหมักจะทำให้เชื้อมีการปรับตัวให้คุ้นเคยกับวัสดุหมักที่ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์และได้เชื้อจำพวกต่างๆ ที่เหมาะสม ถ้ามีการหมักไร้อากาศสารอินทรีย์นั้นอยู่แล้วสามารถนำของเหลวที่ผ่านการหมัก (sludge) มาผสมได้เลย เมื่อเริ่มต้นทำการหมักถังใหม่ ของเหลวที่มีจุลินทรีย์เหมาะสมที่นำมาผสมเริ่มต้นว่า “หัวเชื้อ หรือ starter”

(9) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) เป็นค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจนในสารอินทรีย์และมีความสำคัญมากต่อการย่อยสลายทางชีวภาพ เพราะคาร์บอนและไนโตรเจนจะถูกจุลินทรีย์นำไปสร้างเซลล์ใหม่และสร้างกำลังขับเพอร์ให้กับระบบ ค่าอัตราส่วน C/N ที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 20-30 (อี อัมพรายน, 2546) หากอัตราส่วน C/N สูงเกินไป ไนโตรเจนจะถูกใช้ไปอย่างรวดเร็ว อัตราการเกิดเซลล์จุลินทรีย์ลดลง ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้น้อยลง แต่หากอัตราส่วน C/N ต่ำเกินไป ทำให้ไนโตรเจนมากเกินไปจนจุลินทรีย์จะเปลี่ยนมาสร้างแอมโมเนียไนโตรเจนแทน ซึ่งอาจจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์และยับยั้งการทำงานของระบบ สำหรับอัตราส่วนที่เหมาะสมของระบบหมักไร้อากาศ (BOD:N:P) 100:1.1:0.2 (ไพเชษฐ์ ธรรมภาณ, 2541)

(10) ควบคุมปริมาณของเหลวในระบบ (dilution) โดยการเติมน้ำ หรือของเหลวเข้าไปในระบบ เพื่อรักษาระดับปริมาณของแข็งรวมในระบบให้ถูกต้องตามที่ออกแบบไว้ หากมีของแข็งรวมในระบบน้อยเกินไปหรือเจือจางมากเกินไป จะทำให้ส่วนที่เป็นของแข็งบางส่วนเกิดการตกตะกอนลงก้นถังปฏิกริยา อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจะลดลงอย่างรวดเร็ว และหากปริมาณของแข็งมีมากเกินไป ก็จะขัดขวางการไหลขึ้นของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น และการผสมของของเหลวในระบบ

(11) การป้อนสารอินทรีย์ (feeding) การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียหรือถังปฏิกริยามีอยู่ด้วยกัน 3 วิธีขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบบำบัดที่ออกแบบไว้ ได้แก่

- การป้อนสารอินทรีย์ครั้งเดียว (Batch type feeding) เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เพียงครั้งเดียวลงในถังปฏิกริยาหรือระบบบำบัดน้ำเสีย และปล่อยให้เกิดการย่อยสลายเกิดขึ้นเองด้วยจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสีย จากนั้นจึงดำเนินการซ้ำ
- การป้อนแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous type feeding) เป็นลักษณะการป้อนวัสดุเข้าสู่ถังปฏิกริยาหรือระบบบำบัด โดยจะมีการป้อนเป็นช่วงๆ ซึ่งจะพิจารณาการป้อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบให้สอดคล้องกับลักษณะการทำงานของโรงงานหรือลักษณะสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้น หลังจากนั้นจึงมีการถ่ายวัสดุหรือของเสียที่บำบัดแล้วออกจากระบบหรือถังปฏิกริยาแล้วเติมน้ำเสียใหม่เข้าไป และดำเนินการต่อไปตามกระบวนการข้างต้น

การป้อนแบบต่อเนื่อง (Continuous type feeding) เป็นลักษณะการป้อนวัสดุเข้าสู่ถังปฏิกริยาหรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบต่อเนื่องตลอดเวลา คือจะมีน้ำเสียถูกป้อนเข้าออกจากถังปฏิกริยาตลอดเวลา เป็นแบบที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ทั้งนี้เพื่อต้องการให้ระบบบำบัดน้ำเสียสามารถดำเนินไปอย่างสม่ำเสมอ รวมทั้งเหมาะสมสำหรับกรณีที่โรงงานมีการผลิตทั้งวันและน้ำเสียเกิดขึ้นตลอดเวลา

จากการศึกษาของ Dai et al. (2013) ได้ศึกษาความเสถียรและประสิทธิภาพการทำงานของระบบหมักแบบไร้อากาศที่มีปริมาณของแข็งสูง โดยใช้กากตะกอนของเสียหมักร่วมกับกากตะกอนกับเศษอาหาร 5 สัดส่วน ได้แก่ 0:1, 2.4:1, 0.9:1 และ 0.4:1 และ 1:0 ผลการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วน 0:1 และ 1:0 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่ำเนื่องจากการสะสมของ VFA ให้ผลการทดลองแตกต่างกับชุดการทดลองแบบหมักแบบร่วม (co-digestion: 2.4:1, 0.9:1 และ 0.4:1 เนื่องจากเศษอาหารเกิดการย่อยสลายจากการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ สามารถช่วยลดตัวบ่งชี้ ลด Na^+ ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยเศษอาหารไปเป็นก๊าซชีวภาพ และปริมาณสัดส่วนของเศษอาหารที่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยเพิ่มความเสถียรให้ระบบและเพิ่มศักยภาพการผลิตมีเทน

2.6 ข้อดีและข้อด้อยของการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นการจัดการขยะที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหากมีการควบคุมระบบที่ดี มีผลกระทบน้อยเมื่อเทียบกับการจัดการรูปแบบอื่นๆและยังเป็นการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่จะออกสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุของปรากฏการณ์เรือนกระจก และยัง

ได้ผลพลอยได้เป็นก๊าซชีวภาพ แต่ต้องมีการดูแลและใช้เวลาในการเดินระบบสูง ซึ่งข้อดีและข้อด้อย แสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อด้อยของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

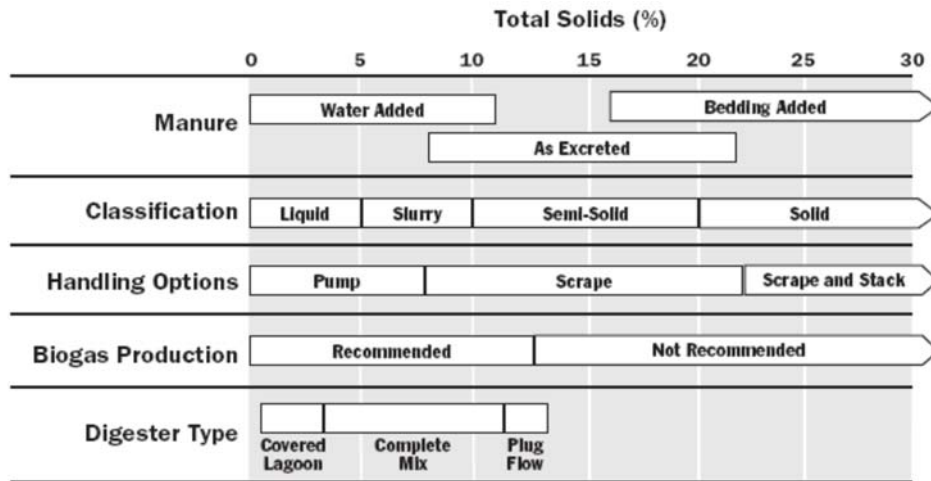
ข้อดี	ข้อด้อย
- ได้ก๊าซชีวภาพ	- ใช้เวลานานในการเดินระบบ
- ใช้พลังงานในการเดินระบบน้อย	- ต้องควบคุมดูแลระบบอย่างใกล้ชิด
- ใช้สารอาหารในการเลี้ยงระบบน้อย	- ผลผลิตเป็นก๊าซมีกลิ่นและมีฤทธิ์กัดกร่อน
- ใช้พื้นที่น้อย ระบบมีขนาดไม่ใหญ่	- บำบัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไม่ได้
- สามารถบำบัดสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูงได้	- น้ำหลังการบำบัดส่วนใหญ่ไม่ผ่านมาตรฐาน บำบัดน้ำทิ้ง

2.7 ระบบหมักสารอินทรีย์ของแข็ง

ระบบหมักมูลฝอยแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบ่งตามลักษณะความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของแข็ง (Total solid) ที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบหมักไว้อากาศ (Austermann et al., 2007) (รูปที่ 2-8) แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

(1) ระบบหมักแบบเปียก (Wet Digestion systems) สารอินทรีย์ที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบมีความเข้มข้นน้อยกว่า 15% TS หากมีปริมาณมากกว่า 15% TS จะมีการเพิ่มน้ำหรือที่เรียกว่า re-circulated process water เพื่อให้ของแข็งทั้งหมดมีเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำลงก่อนเข้าสู่ระบบ ลักษณะทางกายภาพ มีลักษณะหนืด เหนียว เหลว (slurry) มีปริมาณของแข็งต่ำ

(2) ระบบหมักแบบแห้ง (Dry Digestion systems) สารอินทรีย์ที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบหรือถึงหมักจะมีความเข้มข้นประมาณ 15–40% TS (Total Solid) ลักษณะทางกายภาพ มีของแข็งสูง เนื้อไม่เหลว ระบบหมักแบบแห้งมีข้อได้เปรียบกว่าระบบหมักแบบเปียกคือ ใช้พื้นที่น้อยกว่า ใช้น้ำน้อยกว่าการหมักแบบเปียก มีความต้องการพลังงานน้อยกว่า ถึงปฏิกรณ์มีขนาดเล็กกว่า ซึ่งทำให้คู้มูลค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์มากกว่า



รูปที่ 2-8 การจำแนกและการแบ่งความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปของแข็งในการหมักไร้อากาศ
ที่มา : Ogejo *et al.* (2002)

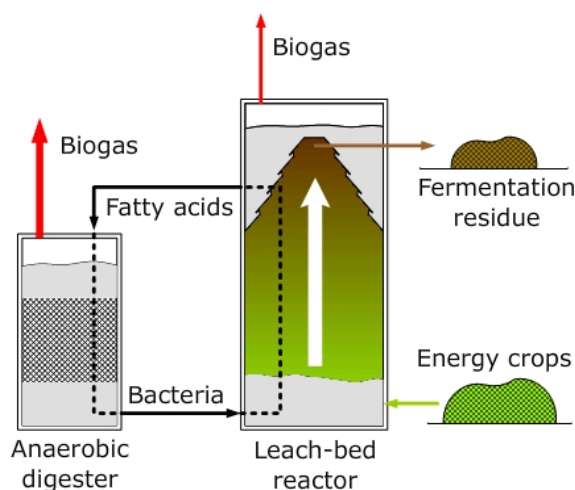
การหมักไร้อากาศแบบแห้ง (ความเข้มข้นสูง) เป็นกระบวนการหมักที่อาศัยการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนวัสดุหมักในสภาพที่ไม่มีน้ำอิสระ น้ำที่อยู่ในกระบวนการหมักแบบแห้งนี้อยู่ในสภาพความชื้นที่ถูกดูดซับอยู่บนวัสดุหมัก เท่านั้น กระบวนการหมักแบบแห้งสามารถประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิตเอทานอล กรดอินทรีย์ อาหารหมัก ปุ๋ยหมัก หรือใช้ในการกำจัดสารพิษที่เป็นอันตรายซึ่งอยู่ในวัสดุทางการเกษตร เป็นต้น (Pandey *et al.*, 2000) ตัวอย่างระบบหมักมูลฝอยชุมชนไร้อากาศแบบแห้ง อาทิ

Dry Continuous Digestion เป็นระบบการหมักแบบต่อเนื่อง มูลฝอยที่ป้อนเข้าสู่ระบบจะมีของแข็งอยู่ 20-40% นอกจากนี้ใช้น้ำน้อยทำให้สมดุลความร้อนโดยรวมดีมากสำหรับการดำเนินงานที่อุณหภูมิสูง โดยในประเทศเยอรมันได้มีการจัดการมูลฝอยชุมชน โดยใช้ระบบหมักแบบแห้งเป็นห้องๆ ซึ่งมีประตูของห้องหมักที่มีขนาดจำเพาะสามารถป้องกันออกซิเจนเข้าสู่ห้องหมัก ดังแสดงในรูป 2-9 ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการหมักแบบแห้งของเหลือที่ได้สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดิน



รูปที่ 2-9 ระบบหมักแบบแห้งในประเทศเยอรมัน

- Dry Batch Digestion เป็นการหมักแบบเติมครั้งเดียว มูลฝอยที่ป้อนมีของแข็งร้อยละ 20-40 ในระหว่างการหมักมีการรวบรวมน้ำชะมูลฝอยจากตอนล่างของถังหมัก และถูกนำไปหมวนเวียนเข้าสู่ถังหมักเพื่อเพิ่มความชื้น สารอาหาร และแบคทีเรียให้กับระบบ ข้อเสียของระบบนี้คือการปรับสภาพเพิ่มขึ้นเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อให้การย่อยสลายวัสดุที่เหมาะสมจากการกลั่น
- Wet Continuous Multi-Step Digestion ระบบนี้ต่างจากระบบอื่น โดยจะมีถังหมักมากกว่า 1 ถัง มีการแยกถังหมักกรตออกจากถังสร้างมีเทนหรือเพิ่มจำนวนถังหมัก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหมักให้ได้ก๊าซมีเทนสูงขึ้น ขยะที่จะใช้เป็นวัตถุดิบเป็น slurry จากการผสมกับน้ำหรือของเหลวจากรีไซเคิล (ของแข็งร้อยละ 10) และป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ที่แยกถึง acetogenesis และ methanogenesis
- Leach Bed Digestion ระบบปรับสภาพวัสดุอิงกับแบบลิชเบด Anaerobic leach bed reactor (ALBR) เป็นระบบหมักย่อยไร้อากาศแบบแห้ง (Dry digestion) ที่มีปริมาณของแข็งมากกว่า 20% (Guendouz et al., 2010) จึงจัดว่าเป็นระบบหมักอัตราสูง (High rate reactor) โดยลักษณะการทำงานของระบบ ALBR แบ่งเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นส่วนของถังที่บรรจุวัสดุอินทรีย์ที่ต้องการหมัก ส่วนที่ 2 เป็นส่วนของถังรับน้ำชะ (Leachate) (รูปที่ 2-10) เพื่อใช้สำหรับการหมวนเวียนน้ำชะ เพื่อเข้ามาหมวนเวียนทำปฏิกิริยาเร่งอัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในขั้นตอน Hydrolysis และขั้นตอนการผลิตกรดเหมาะสมกับการ Pretreatment เบื้องต้น ทั้งนี้ น้ำชะที่ใช้สำหรับหมวนเวียนเป็นการเพิ่ม COD สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้อีกทางหนึ่งด้วย ส่วนเศษเหลือจากการหมักสามารถนำมาไปใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินได้เช่นกัน



Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V.

รูปที่ 2-10 ระบบหมักไร้อากาศแบบลิชเบด

ที่มา : Lehtomaki et al. (2008)

บทที่ 3

วิธีการศึกษา

3.1 การสำรวจพื้นที่ผลิตกล้วยเล็บมือนางอบแห้ง

นักวิจัยลงพื้นที่เพื่อสัมภาษณ์ และเก็บข้อมูลกระบวนการผลิตกล้วยเล็บมือนางอบแห้ง และการเกิดของเสีย กลุ่มชุมชนในเขตอำเภอหลังสวน และอำเภอท่าแซะ จังหวัดชุมพร

3.2 การเตรียมวัสดุหมักและวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมี

กล้วยเล็บมือนางสดในพื้นที่ภาคใต้ บ่มจนสุกเหลือง แกะเปลือก เตรียม 2 ขนาด ได้แก่ (1) สับ ขนาด 5 mm และ (2) บด ขนาด <1 mm เตรียมลำไยและเงาะสดที่ซื้อจากตลาดในจังหวัดสงขลา โดยผสมเปลือกและเมล็ด สับให้มีขนาด 5 mm อบแห้งวัสดุหมักทั้งหมดที่อุณหภูมิ 60°C จนน้ำหนักคงที่ วิเคราะห์ total solid (TS), volatile solid (VS) contents, elemental compositions (CHNS-O) และปริมาณ cellulose hemicellulose และ lignin

3.3 การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์

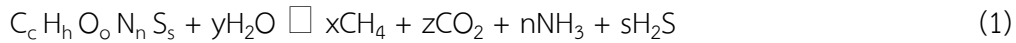
หัวเชื้อผสมจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพของโรงงานผลิตน้ำยางข้น และฟาร์มหมูใช้สำหรับการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตมีเทนทางชีวเคมีที่อัตราส่วน 1:1 TS

3.4 การวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตมีเทนทางชีวเคมี

การศึกษานี้ทำการทดลองในขวดปริมาณ 120 mL ปริมาตรใช้งาน 60 mL โดยผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์ 15 g TS/L และวัสดุหมักแต่ละชนิดแยกกัน ได้แก่ เปลือกกล้วย 1.8 g/L , 2.7 g/L เงาะและลำไย 4.6 g/L เติมสารอาหารและอาหารเสริม 1% (v/v) ร่วมกับบัพเฟอร์เข้มข้น 50 g/L NaHCO₃ ปริมาณ 10% (v/v) ปรับ pH เป็น 7.0 ใช้ 0.1 M NaOH หรือ 0.1 M HCl ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 60 mL ใส่อากาศในขวดด้วยก๊าซไนโตรเจน 60 sec และปิดทันทีเพื่อรักษาภาวะไร้อากาศ บ่มในตู้ที่อุณหภูมิ 35 ± 1°C และเขย่าต่อเนื่องด้วยอัตรา 150 rpm ทำชุดควบคุมเช่นเดียวกันแต่ไม่ใส่วัสดุหมัก ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ระหว่างการหมักทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพและมีเทนเมื่อสิ้นสุดการทดลองวิเคราะห์ pH, total alkalinity (TA) และ total volatile fatty acids (TVFA)

3.5 การคำนวณศักยภาพการผลิตมีเทนทางทฤษฎีและผลผลิตพลังงาน

คำนวณศักยภาพการผลิตมีเทนทางทฤษฎี ซึ่งเป็นการประเมินจากการย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ คำนวณจากองค์ประกอบธาตุ คือ CHONS โดยใช้สมการของ Buswell and Mueller ดังสมการที่ 1 และ 2 (Buswell and Mueller, 1952; Deublein and Steinhauser, 2008).



โดยที่ ; $x = 0.125 (4c + h - 2o - 3n - 2s)$

$y = 0.250 (4c - h - 2o + 3n + 2s),$

$z = 0.125 (4c - h + 2o + 3n + 2s)$

เมื่อ $c, h, n, s,$ and o โมลของ carbon, hydrogen, nitrogen, sulfur และ oxygen ตามลำดับ กำหนดให้ $s = 1$

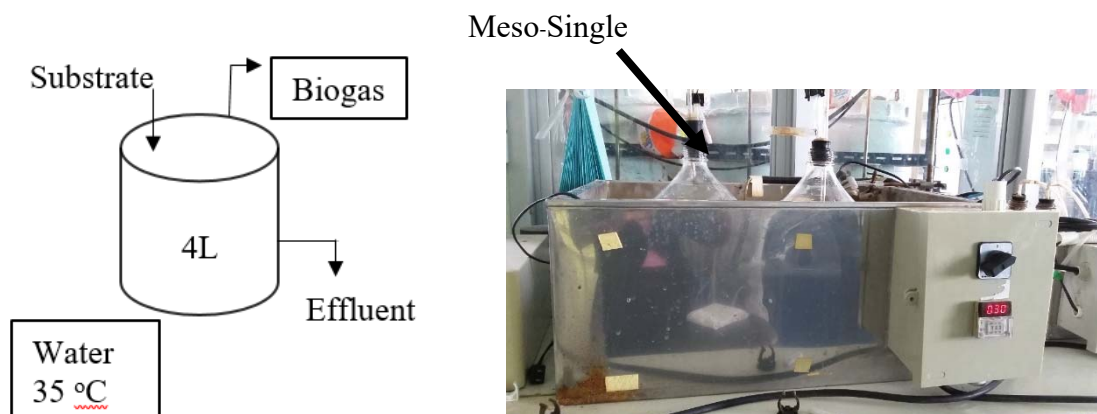
3.6 การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องในระดับห้องปฏิบัติการ

ดำเนินการติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพ แบบ Anaerobic sequencing batch reactor (ASBR) เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ จำนวน 2 ระบบ ได้แก่

3.6.1 ระบบ Single stage mesophilic reactor (Meso-Single: MS reactor)

ถังปฏิกรณ์แบบถังเดี่ยว สร้างจากแก้ว ปริมาตรใช้งาน 4 L มีท่อป้อนวัสดุหมักและนำ digestate ออกจากระบบ บริเวณด้านข้างขวด ท่อนำก๊าซออกติดตั้งส่วนบนของระบบต่อเข้ากับถุงเก็บก๊าซ ตรวจวัดปริมาณก๊าซด้วย wet gas meter และวิเคราะห์ความเข้มข้นมีเทนด้วยเครื่อง gas chromatography ควบคุมอุณหภูมิการเดินระบบที่ $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ตลอดการทดลอง โดยใช้ water bath ที่มีการติดตั้งชุดควบคุมความร้อนอัตโนมัติ และติดตั้งระบบกระจายความร้อน ดังภาพที่ 3-1

เตรียมเปลือกกล้วยบดเป็นของเหลวเพื่อป้อนในถังปฏิกรณ์ MS reactor ควบคุม HRT 20 วัน และป้อนวัสดุหมักที่ความเข้มข้น TS 1%, 2%, and 1.5% ซึ่งเทียบเท่า OLR 0.41, 0.83, และ $0.62\text{ kg/m}^3\cdot\text{d}$ ตามลำดับ การป้อนวัสดุหมักเรียงลำดับจาก 2% จนถึง 1.5% TS เนื่องจากเกิดการสะสมกรดในระบบทำให้การเดินระบบล้มเหลว

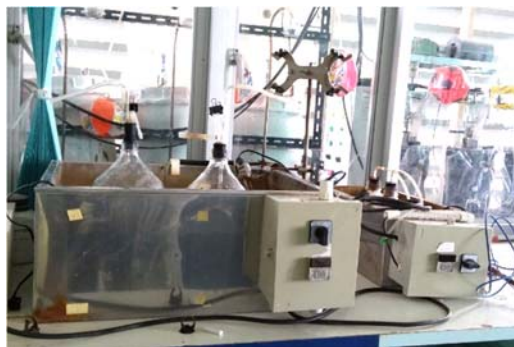
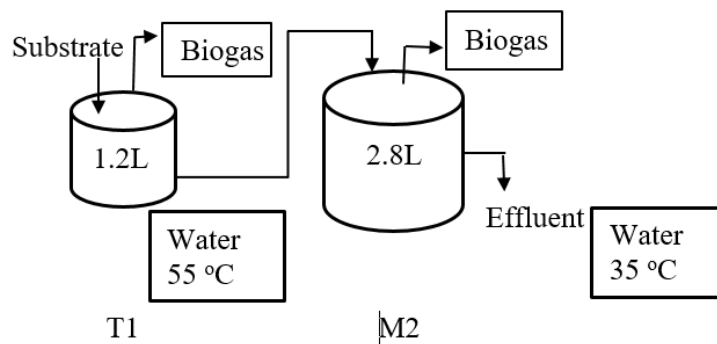


รูปที่ 3-1 แผนภาพของการทำงานของระบบหมักไร้อากาศ (ก) ระบบหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว ที่อุณหภูมิ $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Single-stage Mesophilic Reactor; MS) ในห้องปฏิบัติการ

3.6.2 ระบบ Temperature phased anaerobic digestion (TPAD)

ชุดถังปฏิกรณ์แบบ 2 ขั้นตอน (two stage system) สร้างจากแก้ว ประกอบด้วย ถังปฏิกรณ์ จำนวน 2 ถัง คือ thermophilic reactor (Thermo-1st) เชื่อมต่อกับ mesophilic reactor (Meso-2nd) มีปริมาตรใช้งาน 2.5 L และ 1.2 L ตามลำดับ มีท่อป้อนวัสดุหมักและนำ digestate ออกจากระบบ บริเวณด้านข้างขวด ท่อนำก๊าซออกติดตั้งส่วนบนของระบบต่อเข้ากับถุงเก็บก๊าซ ตรวจวัดปริมาณก๊าซด้วย wet gas meter และวิเคราะห์ความเข้มข้นมีเทนด้วยเครื่อง gas chromatography ควบคุมอุณหภูมิการเดินระบบที่ 55 °C และ 35°C ตามลำดับ ตลอดจนการทดลอง โดยใช้ water bath ที่มีการติดตั้งชุดควบคุมความร้อนอัตโนมัติ และติดตั้งระบบกระจายความร้อน ดังแสดงในรูปที่ 3-2

หลักการทำงานของระบบ TPAD เริ่มป้อนวัสดุหมักเข้าถังปฏิกรณ์ Thermo-1st เดินระบบ ภายใต้สภาวะที่กำหนด จากนั้นดึง digestate ออกจากระบบ แล้วป้อนเข้าสู่ Meso-2nd เดินระบบ ภายใต้สภาวะที่กำหนด (รูปที่ 3-3)



ภาพที่ 3-2 Temperature phased anaerobic digestion (TPAD) ในห้องปฏิบัติการ

ระบบ TPAD ถังปฏิกรณ์ T1 เดินระบบที่ HRT 4 วัน และความเข้มข้น TS TS 1%, 2%, and 1.5% ซึ่งเทียบเท่า OLR ของแข็ง 2.07, 4.14, และ 3.11 kg/m³.d ตามลำดับ ในขณะที่ถังปฏิกรณ์

M2 เตินระบบที่ HRT 20 วัน รับวัสดุหมัก 140 mL digestate ของ T1 ซึ่งทำหน้าที่ปรับสภาพเปลือกกล้วย

3.7 การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องในระดับครัวเรือน

เป็นการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกกล้วยสดที่เตรียมโดยตัดหั่นเปลือกกล้วยสดให้มีขนาด 2 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นวัสดุหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบบ่อหมักแบบต่อเนื่องในระดับครัวเรือน โดยทำการออกแบบระบบและก่อสร้างระบบบ่อหมัก (รูปที่ 3-3)

ดำเนินการก่อสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ fixed dome บริเวณบ้านพักอาจารย์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา เพื่อใช้ในการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบก่อนการติดตั้งให้กับเกษตรกรผู้ผลิตกล้วยอบเล็บมือนาง

ขั้นตอนการก่อสร้างดังรูปที่ 3-3 ถึง 3-6 เริ่มจากการขุดดิน แต่งหลุม จากนั้นดำเนินการก่อสร้าง การก่อสร้างดำเนินการเสร็จสิ้นแล้วในวันที่ 21 มีนาคม 2558



รูปที่ 3-3 การขุดและตักแต่งหลุมเพื่อสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Fixed dome



ก. การผสมปูน ทรายและหิน สำหรับใช้เพื่อเสริมความแข็งแรงของผนังบ่อก๊าซชีวภาพ



ข. การเทปูนเพื่อเสริมความแข็งแรงให้กับผนังบ่อก๊าซชีวภาพ



ค. การฉาบปูนด้านในบ่อเพื่อป้องกันการรั่วซึมของของเสียและก๊าซชีวภาพ



ง. การตกแต่งรอยฉาบปูนด้านในบ่อก๊าซชีวภาพ



จ. บ่อก๊าซชีวภาพที่ปิดฝาและต่อท่อส่งก๊าซชีวภาพออกจากบ่อ และการเตรียมบ่อล้น สำหรับ
ถ่ายเทวัสดุหมักที่ผ่านการหมักแล้วออกจากระบบ



ฉ. การเตรียมบ่อป้อนวัสดุหมัก



ช. ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ Fixed dome ที่ก่อสร้างเสร็จแล้ว



ข. การถ่ายทอดเทคนิคด้านการก่อสร้างจากหัวหน้าช่างก่อสร้าง

รูปที่ 3-5 ดำเนินการก่อสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพ Fixed dome

เริ่มดำเนินการติดตั้งและเดินระบบในวันที่ 22 กรกฎาคม 2558 โดยเริ่มต้นเดินระบบด้วยการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่รับน้ำเสียจากฟาร์มสุกร ในจังหวัดสงขลา ปริมาตร 150 L มีค่า TS 89.4 g/L และ VS 58.3 g/L ใช้เศษอาหารจากครัวเรือนเป็นวัสดุหมัก ป้อนเศษอาหารวันละ 1-0.5 kg เป็นประจำทุกวัน ก๊าซชีวภาพที่ได้สามารถนำไปใช้ให้ความร้อนเพื่อปรุงอาหาร ใช้ได้ประมาณ 15-30 นาที ต่อวัน นอกจากนี้นักวิจัยได้ติดตั้งเครื่อง gas meter เพื่อใช้ในการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น และได้ปรับเปลี่ยนวัสดุหมักเป็นเปลือกกล้วยน้ำว้าแทนเศษอาหาร สำหรับการเดินระบบ household biogas เตรียมเปลือกกล้วยให้พร้อมสำหรับการป้อนระบบ โดยการสับให้มีขนาดเล็ก ประมาณ 2x2 cm ดังรูปที่ 3-6 ป้อนใส่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพทุกวัน ทำการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพเป็นประจำทุกวัน



ภาพที่ 3-6 การเตรียมเปลือกกล้วยสำหรับป้อนระบบ household biogas

3.8 การขยายผลระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องและถ่ายทอดเทคโนโลยีแก่กลุ่มสหกรณ์ผลิตกล้วยอบเล็บมือนาง จ.ชุมพร

ทำการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพและทำการจัดสร้างจากเปลือกกล้วยเล็บมือนางและถ่ายทอดเทคโนโลยีการแก่กลุ่มสหกรณ์ผลิตกล้วยอบและผู้ที่สนใจ ณ กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรรพอตาหินช้าง ต.สลูย อ.ท่าแซะ จ.ชุมพร พร้อมทั้งถ่ายทอดความรู้ให้แก่ภาคอุตสาหกรรม ณ ชุมพร อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ต. สลูย อ.ท่าแซะ จ.ชุมพร พร้อมทั้งประชุมหารือแนวทางการขยายผลงานวิจัยในอนาคต สำหรับประยุกต์ใช้ก๊าซชีวภาพต่อไป

บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การสำรวจพื้นที่

คณะนักวิจัยลงพื้นที่เพื่อสัมภาษณ์ และเก็บข้อมูลการเกิดของเสียจากกระบวนการผลิตกล้วยเล็บมือนางอบแห้งของกลุ่มชุมชนในเขตอำเภอหลังสวน และอำเภอท่าแซะ จังหวัดชุมพร ระหว่างวันที่ 2-4 เมษายน 2557 จำนวน 5 แห่ง ดังรายละเอียดต่อไปนี้ และรูปที่ 4-1

- 1) กลุ่มอาชีพสตรีศรีชั้นเงิน ที่อยู่ เลขที่ 2 ม.1 ต.ชั้นเงิน อ.หลังสวน จ.ชุมพร โทร 077-520137 , 087-8954152
- 2) นื่องแก่ง ที่อยู่ 45 หมู่ 8 ต.ท่ามะปลา อ.หลังสวน จ.ชุมพร โทร 077-541311 และ 086-9473949
- 3) วิสาหกิจชุมชนกลุ่มสตรีเพื่อการแปรรูป ที่อยู่ 6/4 หมู่ 2 ต.วังไผ่ อ.เมือง จ.ชุมพร โทร 087-2651574 , 080-1439318 , 077-658825
- 4) กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรบ้านสวนทรัพย์ ที่อยู่ 4 สวนทรัพย์ หมู่ 7 เพชรเกษม ต.สลวย อำเภอท่าแซะ จังหวัดชุมพร 86140 โทร 0862744197
- 5) กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรพ่อดาทินช้าง ที่อยู่ เลขที่ 256 หมู่ 3 ต.สลวย อ.ท่าแซะ จ.ชุมพร โทร 081-8933704



กลุ่มอาชีพสตรีศรีชั้นเงิน



นื่องแก่ง



วิสาหกิจชุมชนกลุ่มสตรีเพื่อการแปรรูป



กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรบ้านสวนทรัพย์



กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรพ่อดาหินช้าง

รูปที่ 4-1 การลงพื้นที่เก็บข้อมูลกลุ่มชุมชนผลิตกล้วยอบแห้งในเขต อ. หลังสวน และ
อ. ท่าแซะ จ. ชุมพร

นอกจากนี้ คณะนักวิจัยได้ลงพื้นที่อีกครั้งในวันที่ 24-25 ธันวาคม 2557 เพื่อประเมินพื้นที่ติดตั้งก่อสร้างและติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการสำรวจ จำนวน 3 พื้นที่ คือ ร้านน้องเก่ง และ ร้านศรีภา อำเภอลังสวน และอีกหนึ่งที่คือ กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรพ่อดาหินช้าง อำเภوتاแซะ จังหวัดชุมพร ดังภาพที่ 2 นักวิจัยได้พิจารณาติดตั้งระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรพ่อดาหินช้าง เนื่องจากเป็นองค์กรที่มีการรวมตัวกันของผู้ผลิตรายย่อยมากกว่า 10 ราย ซึ่งเป็นพื้นที่เหมาะสมสำหรับการเผยแพร่และถ่ายทอดเทคโนโลยี นอกจากนี้ ทีมนักวิจัยยังได้ลงสำรวจผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่แปรรูปจากกล้วยเล็บมือนาง เช่น กล้วยอบเล็บมือนาง กล้วยเล็บมือนางทอด กล้วยเล็บมือนางฉาบ เป็นต้น บริเวณพ่อดาหินช้าง อ. ท่าแซะ จ. ชุมพร ดังรูปที่ 4-2



ก. การสัมภาษณ์กระบวนการและการใช้
เชื้อเพลิงสำหรับผลิตกล้วยอบ



ข. การอบกล้วยเล็บมือนาง



ค. การสัมภาษณ์การใช้เชื้อเพลิงสำหรับผลิต
กล้วยอบ



ง. จุดจำหน่ายสินค้าที่พ่อตาหินช้าง อ.ท่าแซะ
จ.ชุมพร

รูปที่ 4-2 การลงพื้นที่เพื่อประเมินพื้นที่ติดตั้งระบบก๊าซชีวภาพในเขต อ. หลังสวน และ อ. ท่าแซะ จ. ชุมพร

4.2 กระบวนการผลิตกล้วยอบเล็บมือนาง

กระบวนการผลิตกล้วยเล็บมือนางอบแห้ง ดังรูปที่ 4-3 เริ่มต้นจากผู้ผลิตจะรับซื้อกล้วยเล็บมือนางดิบซึ่งมีสีเขียวจากเกษตรกร นำมาบ่มให้สุกเป็นสีเหลือง จากนั้นบางรายล้างกล้วยแล้วปอกเปลือก ในขณะที่บางผู้ผลิตปอกเปลือกก่อนแล้วจึงล้างกล้วยด้วยน้ำสะอาด แล้วจึงนำกล้วยไปอบด้วยตู้อบที่ใช้ทั้งพลังงานจากก๊าซหุงต้มและไฟฟ้าที่อุณหภูมิประมาณ 50-60 °C เป็นเวลา 2-3 วัน แต่บางรายที่อบด้วยตู้อบพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้เวลา 3 วัน ในขั้นตอนการปอกเปลือกจะก่อให้เกิดของเสียดังรูปที่ 4-4 และสัดส่วนการเกิดของเสียแสดงดังตารางที่ 4-1 ซึ่งพบว่าเปลือกกล้วยเป็นเศษเหลือที่มีสัดส่วนมากที่สุดถึง 60% ของเศษเหลือกล้วยทั้งหมด



ก. การบ่มกล้วยเล็บมือนางที่รับซื้อจาก
เกษตรกร



ข. การปอกเปลือกกล้วยเล็บมือนางสุก



ค. กลัยเล็บมีอนางปอกเปลือก



ง. กลัยเล็บมีอนางอบแห้งด้วยเตาอบพลังงาน
ก๊าซและไฟฟ้า



จ. กลัยเล็บมีอนางอบแห้งด้วยเตาอบพลังงาน
แสงอาทิตย์ (พลังงานทางเลือก)



ฉ. กลัยเล็บมีอนางอบแห้ง



ช. ผลิตภัณฑ์กลัยเล็บมีอนางพร้อมจำหน่าย

รูปที่ 4-3 กระบวนการผลิตกลัยเล็บมีอนางอบ



ก. ของเสียจากการผลิตกล้วยเล็บมือนางอบ



ข. การคัดแยกของเสีย



ค. ของเสียเศษกล้วยประเภทต่างๆ



ง. การชั่งเพื่อหาสัดส่วนของเสีย

รูปที่ 4-4 ของเสียจากกระบวนการผลิตกล้วยเล็บมือนางอบแห้ง

4.3 ลักษณะทางกายภาพและเคมีวัสดุหมัก

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัสดุหมักที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ เลือกกล้วยเล็บมือนาง (LF) เศษเหลือเงาะ (เปลือก+เมล็ด) และเศษเหลือลำไย (เปลือก+เมล็ด) แสดงดังตารางที่ 4-2 ที่รวมถึงองค์ประกอบธาตุของแต่ละชนิดวัสดุได้แก่ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และ ซัลเฟอร์ (CHONS) ซึ่งผลรวมองค์ประกอบธาตุมีค่าใกล้เคียงกับ VS ของตัวอย่างโดยมีค่าแตกต่างเพียง 2.3% ของ LF, 3.6% ของเงาะ และ 0.8% ของลองกอง ความแตกต่างอาจเกิดจากธาตุอาหารรองซึ่งไม่ได้ทำการศึกษาในเศษวัสดุ เช่น โพแทสเซียม แมงกานีส โซเดียม แคลเซียม เหล็ก เป็นต้น โดยเลือกกล้วยเล็บมือนางมีปริมาณ VS เท่ากับ 88.1% ของน้ำหนักแห้ง และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าโดย Bardiya et al. (1996), Gunaseelan (2004) and Pisutpaisal et al. (2014) พบว่ามีค่า VS ใกล้เคียงกันอยู่ที่ 87% ของน้ำหนักแห้ง แสดงให้เห็นว่าเปลือกกล้วยมีคุณสมบัติองค์ประกอบอินทรีย์คล้ายคลึงกัน แต่องค์ประกอบเส้นใยภายในอาจขึ้นอยู่กับสายพันธุ์กล้วยบ้าง ลักษณะทางพันธุกรรมของแต่ละสายพันธุ์ของกล้วยและอายุส่งผลให้มีความแตกต่างขององค์ประกอบโครงสร้างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ตัวอย่างเช่นกล้วยจีโนโทป์ AAA, แกรนด์นาโนในระยะเหลืองสุกมี hemicellulose (8.4) สูงกว่าเซลลูโลส (7.5) จากการรายงาน

ของ Happi Emaga et al. (2008) ในขณะที่ Bardiya et al. (1996) รายงานว่า เซลลูโลสที่สูงกว่า (11.11) มากกว่าเฮมิเซลลูโลส (5.36) ทั้งนี้เปลือกกล้วยเล็บมือนางที่ใช้ในการศึกษามีค่าเฮมิเซลลูโลสสูงกว่าลิกนิน 3 เท่า (ตารางที่ 4-2) เนื่องจากคุณลักษณะทางกายภาพของเปลือกกล้วยเล็บมือนาง และนิ่ม มากกว่าเปลือกกล้วยชนิดอื่นๆ เช่น Cavendish banana, Red Java banana เป็นต้น

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสว่า VS ของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสถึงร้อยละ 96.8% และ 92.0% ของน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ทั้งนี้เศษเหลือแฉะและเศษเหลือแห้งที่ประกอบด้วยโคร่งสร้างที่พืชรูปร่าง ได้แก่ เซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส, ลิกนิน, เพคติน, wax และ cutin การย่อยสลายของผนังเซลล์พืชสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้หลักๆ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพคติน (Mohammad J. and Keikhosro Karimi, 2008) แม้ว่าส่วนประกอบอื่น ๆ จะมีผลต่อการย่อยสลายได้ แต่โดยทั่วไปแล้วเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส จะเป็นองค์ประกอบหลักของโคร่งสร้างพืชที่บ่งบอกถึงแนวโน้มของการย่อยสลายทางชีวภาพของสารตั้งต้นได้ โดยสามารถดูได้จากองค์รวม holocellulose content ที่เป็นผลรวมจากเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส โดยที่เปลือกกล้วยเล็บมือนาง (LF) ที่ใช้ในการศึกษามีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าเศษเหลือแฉะและเศษเหลือแห้งเปลือกกล้วยกับคาร์บอนของ holocellulose ที่สูงกว่าเศษเหลือแฉะและลำไย

นอกจากนี้อัตราส่วนของ C/N ในเปลือกกล้วยเล็บมือนางเท่ากับ 23.1 และเศษเหลือลำไยเท่ากับ 29.5 ซึ่งมีค่า C/N อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการหมักไร้อากาศในช่วง 20-30 ในขณะที่เศษเหลือแฉะมีค่า C/N ที่สูงถึง 44.2 หากใช้เศษเหลือแฉะมาใช้เป็นวัสดุสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องต้องมีเพิ่มสัดส่วน N เพื่อให้มี C/N ที่เหมาะสมต่อ metabolism ของจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศ โดยการเติมแหล่ง N สามารถทำได้โดยการหมักร่วม (Co-digestion) กับวัสดุหมักอื่นๆ เช่น มูลสุกร มูลไก่ เป็นการปรับสมดุลสารอาหารที่เหมาะสมกับระบบผลิตมีเทน

ตารางที่ 4-1 ผลการสำรวจสัดส่วนการเกิดของเสียจากระบบการผลิตกล้วยเล็บมือนางอบแห้ง¹

ชื่อกลุ่มชุมชน	กำลังการผลิต (Kg ผลิตภัณฑ์/ปี)	สัดส่วนของเสีย (% ww) ²		
		เปลือกกล้วย	ส่วนปลาย เปลือกกล้วย	ก้านหวีกล้วย เนื้อกล้วย
กลุ่มอาชีพสตรีศรีเงิน	ไม่ให้ข้อมูล	72	9	15
น้องแก	ไม่ให้ข้อมูล	55	18	20
วิสาหกิจชุมชนกลุ่มสตรีเพื่อ การแปรรูป	5,008	63	12	22
กลุ่มแม่บ้านเกษตรกร บ้านสวนทรัพย์	18,720	55	13	29
กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรพ้อตาหินช้าง	64,800	59	14	27
เฉลี่ย	-	61±7	13±3	23±5

หมายเหตุ

¹เดือนเมษายนมีกำลังผลิตกล้วยอบน้อย เนื่องจากเกษตรกรผลิตกล้วยดิบได้ต่ำเพราะเป็นช่วงหน้าแล้ง

²ไม่รวมก้านเครือกล้วย

ตารางที่ 4-2 ลักษณะวัสดุหมักที่ใช้ในการศึกษา

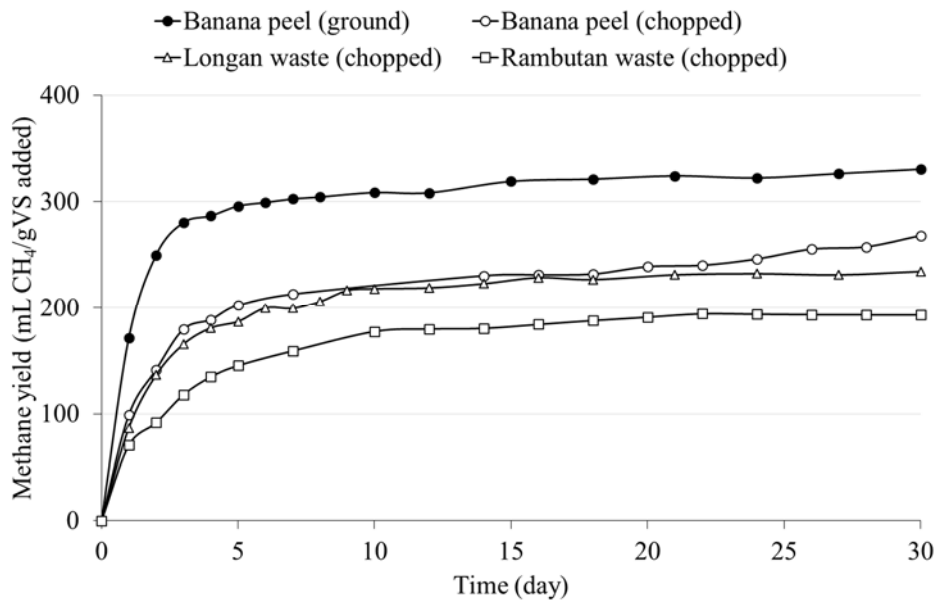
พารามิเตอร์	หน่วย	Banana waste (peel)	Rambutan waste (peel+seed)	Longan waste (peel+seed)
Moisture	% fresh wt.	82.3	69.8	34.5
Volatile solids	% dry wt.	88.1	96.8	92.0
Fixed solids	% dry wt.	11.9	3.2	8.0
Carbon	% dry wt.	39.2	48.6	44.3
Hydrogen	% dry wt.	5.3	5.9	5.5
Nitrogen	% dry wt.	1.7	1.1	1.5
Sulfur	% dry wt.	0.1	0.1	0.2
Oxygen	% dry wt.	39.6	37.6	39.7
Sum CHNS-O	% dry wt.	85.8	93.2	91.2
Cellulose	% dry wt.	13.5	9.8	17.8
Hemicellulose	% dry wt.	39.7	10.0	24.2
C/N ratio	-	23.1	44.2	29.5

4.4 ศักยภาพการผลิตมีเทนจากวัสดุหมักประเภทต่างๆ ด้วยวิธี Biochemical Methane Potential assay (BMP assay) ของเปลือกกล้วยเล็บมือนาง เศษเหลือเงาะ และเศษเหลือลำไย

ในการทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของเปลือกกล้วยเล็บมือนาง เศษเหลือเงาะ และเศษเหลือลำไย ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ แสดงในรูปที่ 4-5 และสามารถแสดงให้เห็นว่าการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วของทุกชุดการทดลอง ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้หัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์ไร้อากาศที่ Active จากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ 2 แהל่ง ทำให้มีความหลากหลายของกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในตะกอนผสม (Dechrugsa, et al., 2013) ส่งผลให้ศักยภาพการผลิตมีเทนสะสมของเปลือกกล้วยเล็บมือนางสับ เปลือกกล้วยเล็บมือนางบด เศษเหลือลำไยสับ และเศษเหลือเงาะสับ ที่ระยะเวลาการศึกษา 30 วัน เท่ากับ 268.3, 330.6, 234.6 และ 193.2 mLCH₄/gVS ตามลำดับ โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเปลือกกล้วยบดมีผลผลิตมีเทนสูงที่สุดเนื่องจากมีพื้นที่ผิวสัมผัสมีมากกว่าเปลือกกล้วยสับ เกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพิ่มขึ้นถึง 23.2% และเมื่อพิจารณาเศษเหลือเงาะและเศษเหลือลำไยการลดขนาดส่งผลให้เพิ่มผลผลิตของก๊าซชีวภาพได้แต่จะสิ้นเปลืองพลังงานในการลดขนาด อย่างไรก็ตามเปลือกหรือผิวของผลไม้ไม่มีศักยภาพการผลิตมีเทนต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อและเมล็ดเนื่องจากเปลือกมีประกอบด้วยโครงสร้างเซลลูโลส ลิกโนเซลลูโลสและลิกนินสูง (Thitilertdecha et al., 2008) จากการรายงานของ Sanjaya et al., 2016 เมล็ดเงาะและเม็ดมะม่วงมีศักยภาพการผลิตมีเทนสูงเนื่องจากเมล็ดประกอบด้วยไขมันสูง แต่จากการทดลองบ่งชี้ได้ว่าไม่แน่นอนเสมอไปที่สัดส่วนร้อยละ VS สูงอย่างเศษเหลือเงาะและเศษเหลือลำไย จะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าเปลือกกล้วยเล็บมือนาง นอกจากปริมาณก๊าซมีเทน

ที่สามารถผลิตได้สูงกว่าในเปลือกกล้วยบดอัตราการผลิตยังรวดเร็วกว่าด้วย ดังแสดงในค่าระยะเวลาที่ใช้ในการสร้างก๊าซขึ้น ตารางที่ 4-4

เปรียบเทียบผลการศึกษาศักยภาพการผลิตมีเทนของเปลือกกล้วยเล็บมือนางบดจากงานชิ้นนี้กับผลงานวิจัยอื่น พบว่ามีค่าศักยภาพการผลิตมีเทนสูงกว่า Banana peel varieties (ground) 0.243-0.322 LCH₄/gVS_{added} ของ Gunaseelan (2004) และค่า maximum methane yield 0.077 LCH₄/gVS_{added} ของ Pisutpaisal et al., (2014) (ตารางที่ 4-3) อาจเป็นเพราะความหลากหลายของในระดับ Genotype และความสุกของกล้วย และองค์ประกอบทางชีวเคมีของเปลือกกล้วย ซึ่งจะส่งผลให้ความสามารถในการย่อยแตกต่างกันไป และการที่เศษเปลือกกล้วยจะเกิดขึ้นมาก่อนข้างสม่ำเสมอไม่มีผลของฤดูกาลมากเท่ากับเปลือกผลไม้ชนิดอื่น จะเห็นว่ากล้วยเล็บมือนางมีความเหมาะสมในการที่จะนำไปเป็น Feed stock พื้นฐานสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศ



รูปที่ 4-5 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของเปลือกกล้วย, เศษเหลือเงาะ และเศษเหลือลำไย

ตารางที่ 4-3 การเปรียบเทียบผลงานวิจัยที่ผ่านมาในการตรวจสอบอัตราการผลิตมีเทนของเสียจากการเกษตรโดยใช้กระบวนการหมักแบบแบปท์

วัสดุหมัก	CH ₄ yield (L CH ₄ /g VS added)	อ้างอิง
1 Stalk of grape bunch (ground)	0.180	Gunaseelan N, 2004
2 Sweet sorghum roots (ground)	0.230	Gunaseelan N, 2004
3 Napier grass (chopped)	0.190-0.340	Chynoweth D.P. et al., 1993
4 Pine apple peels (ground)	0.360	Gunaseelan N, 2004
5 Sugarcane (chopped)	0.230-0.300	Chynoweth D.P. et al., 1993
6 Banana peels (chopped/ ground)	0.190/ 0.200	Bardiya et al., 1996
7 Banana peels varieties (ground)	0.243-0.322	Gunaseelan N, 2004
8 Banana peels (chopped)	0.077	Pisutpaisal et al., 2014
9 LF banana peel (chopped/ground)	0.268/0.331	This study
10 Rambutan waste (chopped)	0.193	This study
11 Longan waste (chopped)	0.235	This study

ตารางที่ 4-4 ระยะเวลาที่ใช้ในการสร้างมีเทนเทียบกับค่าอัตราการผลิตมีเทนสูงสุดของวัสดุหมักแต่ละชนิด ของการทดลอง BMP ที่ 30 วัน

CH ₄ yield ratio against 30-day BMP	ระยะเวลา (วัน)			
	LF Banana peel (ground)	LF Banana peel (chopped)	Rambutan waste (chopped)	Longan waste (chopped)
> 0.5	1	2	3	2
> 0.6	2	3	3	3
> 0.7	2	5	5	3
> 0.8	3	14	7	6
> 0.9	6	24	10	9

จากผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4-4 จะเห็นว่าตัวอย่างเปลือกกล้วยเล็บมือนางสามารถสร้างมีเทนถึงร้อยละ 80 ของค่าศักยภาพภายใน 14 วันแรก ขณะที่เปลือกกล้วยเล็บมือนางบดใช้เวลาเพียง 3 วัน ในการสร้างมีเทนในระดับร้อยละ 80 ของค่าศักยภาพ เนื่องจากการทำให้ผนังเซลล์พืชเสียหายด้วยวิธีทางกลด้วยการบดทำให้โครงสร้าง β -glucosidic linkages ของ เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสส่งผลให้ย่อยสลายง่ายขึ้น (Gañán et al., 2004) และเมื่อพิจารณาคุณสมบัติของเหลวในขวดหมักหลังจากการทำ BMP พบว่ามีค่า pH อยู่ในช่วง 7.4-8.1 ค่า total Alkalinity อยู่ในช่วง 3,500-4,600 mg/L as CaCO₃ และ TVFA:ALK ต่ำกว่า 0.1 ของทุกชุดการทดลอง แสดง

ว่าวัสดุที่ใช้ในการศึกษามีคุณสมบัติในการผลิตมีเทนได้และสภาพที่ทดลองไม่ได้ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาการผลิตก๊าซชีวภาพ (ตารางที่ 4-5)

ตารางที่ 4-5 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำ digestate จากการทดสอบศักยภาพการผลิตมีเทนของวัสดุหมักประเภทต่างๆ

วัสดุหมัก	pH	Alkalinity (mg/L as CaCO ₃)	Total volatile fatty acid (mg/L as CaCO ₃)	TVFA/ Alkalinity
Lady-finger banana flesh	7.85	4,625	218.75	0.047
Lady-finger banana peel	8.10	4,438	250.00	0.056
Rambutan flesh	8.11	4,188	462.50	0.110
Rambutan peel	8.11	3,875	243.75	0.063
Longan flesh	7.30	3,375	250.00	0.074
Longan peel	7.42	3,500	212.50	0.061
Longkong flesh	7.48	3,625	218.75	0.060
Longkong peel	7.47	3,750	206.25	0.055

4.5 ค่าการผลิตก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี และอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพของวัสดุหมัก (Theoretical Methane Potential and Biodegradability)

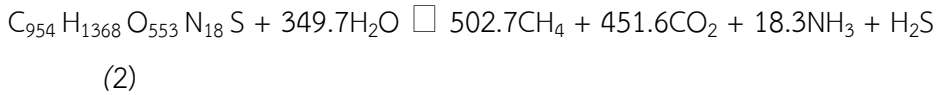
โดยทั่วไปจะมีส่วนของเซลล์พืชที่ไม่เปลี่ยนแปลงทางชีวภาพภายใต้เงื่อนไขที่ทำการทดสอบ ระดับการย่อยสลายในหลาย pathways จะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร แต่เราสามารถใช้อพารามิเตอร์ที่สามารถอธิบายความสามารถในการย่อยสลายโดยพารามิเตอร์อัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ หรือ biodegradability ที่มีความจำเพาะกับสภาวะที่ศึกษา โดยเป็นส่วนระหว่างค่าการผลิตมีเทนที่วัดได้จากการทดสอบหมักแบบกะในสภาวะที่ทดสอบกับค่าศักยภาพการผลิตมีเทนทางทฤษฎี ซึ่งสามารถคำนวณจากองค์ประกอบธาตุ CNON-S โดยใช้สมการของ Buswell and Mueller (1952)

จากสมการ stoichiometric ของการย่อยสลายแบบไร้อากาศของวัสดุหมัก จะใช้อองค์ประกอบธาตุ CHNS-O ในการคำนวณศักยภาพการผลิตมีเทนทางทฤษฎี ดังแสดงในสมการที่ (1) - (3) โดยวิธีการนี้อนุมานว่า VS ของวัสดุหมักทั้งหมดสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้ 100% จากการประเมินตามสมการพบว่าปริมาณการผลิตมีเทนของเปลือกกล้วยเล็บมือนาง เศษเหลือเงาะ และเศษเหลือลำไย มีค่า 364.1, 477.5 และ 417.5 L CH₄/kgTS หรือ 413.2, 493.1 และ 453.7 L CH₄/kg VS ตามลำดับ

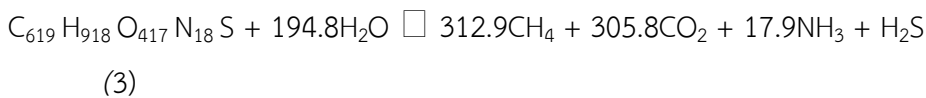
เศษเปลือกกล้วย (banana peel):



เศษเหลือเงาะ (rambutan waste):



เศษเหลือลำไย (longan waste):



ความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradability) ในการทดลองนี้จะประเมินจากผลผลิตก๊าซมีเทนสะสมทั้งหมด (ในหน่วย LCH_4/g VS) ของการทดสอบ BMP ที่ 30 วัน โดยแสดงในตารางที่ 4-6 ซึ่ง biodegradability ของเปลือกกล้วยมีค่าเพิ่มขึ้นจากเปลือกกล้วยเล็บมือนางสับที่ 65.4% เป็น 80.5% เมื่อเปลือกกล้วยเล็บมือนางผ่านการบด การลดขนาดส่งผลกระทบในเชิงบวกต่ออัตราการผลิตก๊าซมีเทนให้เพิ่มขึ้น แม้ว่าการผลิตก๊าซมีเทนของเปลือกกล้วยสับจะยังมีเกิดขึ้นต่อเนื่องอยู่ และเมื่อสิ้นสุดระยะเวลา 30 วัน การย่อยสลายของเศษเหลือลำไยและเศษเหลือเงาะมีค่า biodegradability เพียง 52.0% และ 39.4% ตามลำดับ สัดส่วนของ halocellulose ของเปลือกกล้วยเป็นลักษณะเด่นที่ทำให้ความสามารถในการย่อยสลายสูงกว่าเศษเหลือเงาะและลำไย หากมีการบดเศษเหลือเงาะและลำไยก็จะสามารถเพิ่ม biodegradability ได้เช่นกัน จะสังเกตว่าลำดับของผลผลิตก๊าซมีเทนจาก BMP จะกลับกันกับลำดับของค่าผลผลิตมีเทนทางทฤษฎีที่คำนวณ

นอกจากนี้ได้ทำการประเมินการผลิตก๊าซชีวภาพและพลังงานแสดงไว้ในตารางที่ 4-6 โดยค่าความร้อนต่ำ (LHV) และค่าความร้อนที่สูง (HHV) ของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการคำนวณทางทฤษฎีและผล BMP เปรียบเทียบความร้อนของชีวมวลที่ประเมินด้วยสมการของ modified Dulong's (สมการที่ 4 และ 5) โดยสมการ modified Dulong นี้มักใช้เพื่อประเมินค่าความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง (Hosokai et al., 2016)

$$\text{Energy content (LHV, kJ/g)} = 38.2m_C + 84.9(m_H - m_O/8) - \Delta H_l$$

(4)

$$\begin{aligned} \text{Sample's heat of water vaporization} &= (M_{\text{H}_2\text{O}}/M_{\text{H}_2}) \times \Delta H_{\text{boil}} \times m_{\text{H}} \\ &= (18/2) \times 2.44m_{\text{H}} = 22.0 m_{\text{H}} \end{aligned} \quad (5)$$

ขณะที่ m_C , m_H และ m_O คือค่าคงที่ (อยู่ในช่วง 0-1) ของ carbon hydrogen และ oxygen ตามลำดับ โดยน้ำหนักแห้ง, ΔH_l คือ ความร้อนแฝงของตัวอย่าง (kJ/g), $M_{\text{H}_2\text{O}}$ and M_{H_2} คือ มวลโมเลกุลของน้ำและไฮโดรเจน และ ΔH_{boil} คือค่าความร้อนการระเหยของน้ำ (2.44 kJ/g) Hosokai et al. (2016) แนะนำใช้ค่า $\Delta H_l = 0.62$ kJ/g สำหรับสมการ modified Dulong สำหรับการประเมินค่าความร้อนของเชื้อเพลิงแข็ง จากตารางที่ 4-6 เห็นได้ว่า HHV จากสมการ modified Dulong และค่าพลังงานที่ได้จากการคำนวณ stoichiometric (TMP) ซึ่งเป็นการแปรรูปชีวมวลผ่านกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนทางทฤษฎี จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการศึกษา BMP เนื่องจากวัสดุถูกย่อยสลายและเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพแต่ยังคงเหลือเศษที่ไม่ย่อยสลาย (digestate) มีพลังงานที่ไม่ได้แปรสภาพเหลืออยู่ แต่หากจะใช้ digestate ที่เหลือจากการหมักแปลงเป็นพลังงานจะมีอุปสรรคจากความชื้นที่เหลืออยู่ ยากที่จะเกิดการเผาไหม้โดยตรงด้วยตัวเอง หากจะใช้เป็นเชื้อเพลิงต้องมีการอบแห้งด้วยแสงแดดหรือเทคนิคการอบแห้งด้วยความร้อนแหล่งอื่น ๆ ซึ่งจะเพิ่มขั้นตอนของกระบวนการผลิตพลังงาน ดังนั้นการประยุกต์ใช้ digestate ที่ง่ายและคุ้มค่าที่สุดควรใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินหรือปุ๋ยที่สามารถพบเห็นโดยทั่วไปในทางการปฏิบัติ

ตารางที่ 4-6 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและแหล่งพลังงานที่ได้จากพื้นผิวที่ศึกษา

วัสดุหมัก	TMP yield (LCH ₄ /gVS)	BMP yield (LCH ₄ /gVS)	Biodegradability (%)	Energy content (kJ/kg)		
				Dulong's Eq. (LHV / HHV)	TMP (HHV)	BMP (HHV)
LF banana peel (ground)	0.413	0.330	80.5	16,631 / 17,954	16,520	13,200
LF banana peel (chopped)	0.413	0.268	65.4	16,631 / 17,954	16,520	10,720
Longan waste (chopped)	0.454	0.234	52.0	18,216 / 19,531	18,160	9,360
Rambutan waste (chopped)	0.493	0.193	39.4	19,591 / 20,932	19,720	7,720

TMP = theoretical methane potential

LHV = lower heating value

BMP = biochemical methane potential

HHV = higher heating value

4.6 ค่าใช้จ่ายและผลตอบแทนจากการย่อยสลายเศษเหลือวัสดุผลไม้สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ

มูลค่าของการขายก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากเปลือกกล้วยสามารถประเมินเทียบกับก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) หรือไฟฟ้า ดังแสดงในสมการ 6 และ 7:

Case 1: ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ทดแทน LPG

$$\text{Value} = (0.45 \text{ kg LPG/m}^3 \text{ biogas}) * (24.16 \text{ Baht/kg LPG}) = 10.9 \text{ Baht/m}^3 \text{ biogas}$$

(6)

Case 2: ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า

$$\text{Value} = (2.0 \text{ kWh/m}^3 \text{ biogas}) * (4.2 \text{ baht/kWh}) = 8.4 \text{ baht/m}^3 \text{ biogas}$$

(7)

สมมติฐาน: อัตราพลังงานเทียบเท่าของก๊าซชีวภาพที่ 60% CH₄ เท่ากับ 0.45 kgLPG/m³ ราคาก๊าซ LPG ในปัจจุบัน (พ.ศ.2559) ของประเทศไทยเท่ากับ 24.16 บาท/กก. และอัตราการใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าในเครื่องยนต์สันดาปภายใน เท่ากับ 2 kWh/m³ ของก๊าซชีวภาพที่ 60% CH₄ ราคาไฟฟ้าในประเทศไทย (พ.ศ.2559) เท่ากับ 4.2 บาท/kWh ค่าใช้จ่ายในการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถคาดการณ์จากผลการทดสอบ BMP ดังแสดงในสมการ 8

$$\text{Cost} = (A \text{ baht/kg substrate}) / (0.051 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg substrate})$$

(8)

โดยที่ A เป็นค่าใช้จ่ายทั้งหมด (การจัดซื้อ + การขนส่ง + O&M) ต่อกิโลกรัม และ 0.051 m³ เป็นผลผลิต CH₄ จากการทดสอบ BMP ต่อกิโลกรัมของเปลือกกล้วยเล็บมือนาง เมื่อเปรียบเทียบกับสมการ 7 และ 8

ถ้า $\text{Cost} < \text{Value}$ กำไร (Positive return for the investment of the biogas system)

$\text{Cost} = \text{Value}$ จุดคุ้มทุน (Break-even)

$\text{Cost} > \text{Value}$ ขาดทุน (Negative return or loss)

โรงผลิตก๊าซชีวภาพเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่ใช้การเดินระบบที่ให้ค่าตอบแทนสูงสุดและการเดินระบบใช้ต้นทุน (A) ต่ำสุด ซึ่งครอบคลุมการลดต้นทุนทั้งการจัดซื้อ ขนส่ง และ O&M ขณะที่ใช้วัสดุที่ผลิตก๊าซชีวภาพได้สูง ในการวิเคราะห์เชิงลึกจำเป็นต้องศึกษาการใช้ของเสียจากผลไม้ซึ่งมีการแปรผันตามฤดูกาลในช่วงปี ดังนั้นจำเป็นต้องมีค่านึงถึงระบบย่อยสลายที่สามารถรับของเสียหลาย

ชนิดได้ แม้ว่ากล้วยจะเป็นพืชที่ให้ผลผลิตตลอดค่อนข้างสม่ำเสมอทั้งปี แต่ก็ควรต้องหาวัสดุอื่นเสริมในช่วงที่มีผลผลิตต่ำด้วยเพื่อให้การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพเกิดผลประโยชน์สูงสุด

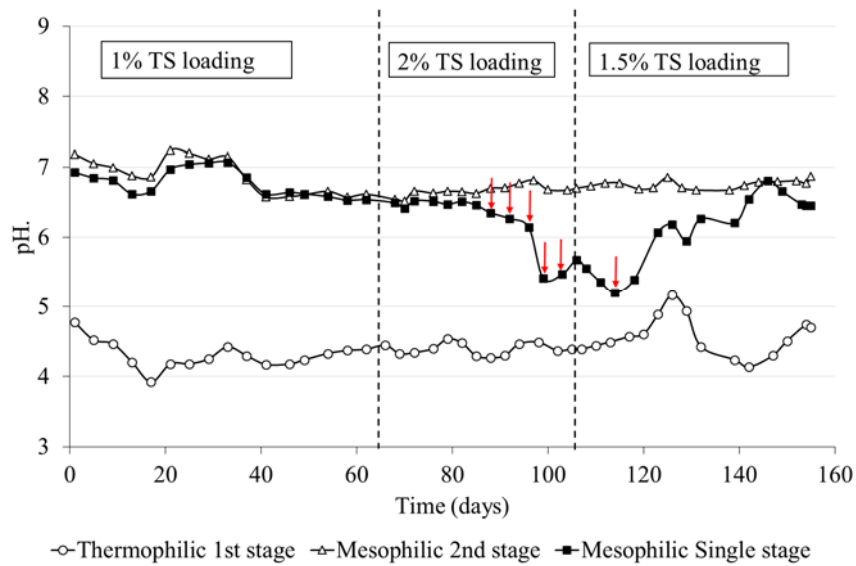
4.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระบบผลิตก๊าซชีวภาพขั้นตอนเดียว (Single-stage Mesophilic Reactor; MS) และแบบสองขั้นตอนต่างอุณหภูมิ (Temperature phased anaerobic digestion, TPAD)

4.7.1 pH ในระบบ

การเปรียบเทียบการเดินระบบหมักเปลือกกล้วยเล็บมือนางแบบต่อเนื่องที่ความเข้มข้นของวัสดุป้อนที่ความเข้มข้นของแข็ง (TS) แตกต่างกัน โดยใช้ระบบหมัก 2 ระบบได้แก่ mesophilic single stage (MS) เดินระบบ HRT 20 วัน และระบบสองขั้นตอนต่างอุณหภูมิ (TPAD) ซึ่งประกอบไปด้วยถังปฏิกรณ์ thermophilic reactor (T1) ตามด้วยถังปฏิกรณ์ mesophilic (M2) ที่การป้อนวัสดุหมัก TS 1% พบว่า ระบบ MS และ M2 ที่สภาวะคงตัวมี pH ประมาณ 6.6 ขณะที่ pH ที่สภาวะคงตัวของระบบ T1 อยู่ที่ประมาณ 4.4 (รูปที่ 4-6) การลดลงของ pH ของระบบ T1 ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นระบบ (ไม่แสดงข้อมูล) เป็นผลสืบเนื่องมาจากที่ HRT สั้น (4 วัน) และอุณหภูมิสูง (55°C) ทำให้ระบบ T1 เกิดปฏิกิริยา hydrolysis และสร้างกรดอย่างรวดเร็วจากการย่อยสลายเปลือกกล้วยเล็บมือนางซึ่งมีลักษณะย่อยสลายง่าย จนเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ขณะที่จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนไม่สามารถทำงานย่อยสลาย VFA ที่เกิดขึ้นได้ทัน

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ TS เป็น 2% พบว่า pH ของระบบ M2 ยังมีเสถียรภาพอยู่ที่ 6.8 ใกล้เคียงกับค่าเป็นกลาง ขณะที่ pH ของระบบ T1 ที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นกรดอยู่ในช่วง 4.3-4.6 เกิดการสะสมของ VFA เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มภาระบรรทุกของสารอินทรีย์ (organic loading) แต่กลับพบว่า pH ของระบบ MS ที่รองรับอาหารที่ความเข้มข้น 2%TS ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และได้มีการเติมสารละลายต่าง NaOH 1M เพื่อพยายามรักษาระดับ pH ในระบบ MS ของวันที่ 88 เพื่อควบคุมให้ pH อยู่ในช่วง 6.8-7.0 สังเกตได้จากลูกศรในรูปที่ 4-6 แม้จะมีการเติมสารละลายต่างเข้าไปในระบบ MS เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบอย่างต่อเนื่อง แต่ก็ส่งผลกระทบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพระหว่างการเดินระบบวันที่ 70 ถึงวันที่ 103 โดยพบว่าอัตราการลดลงของก๊าซชีวภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญจาก 442 เป็น 71 มล./วัน และความเข้มข้นมีเทนลดลงจาก 50.4 เป็น 4.5% ทำให้ผู้วิจัยปรับความเข้มข้นการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบลง 1.5%TS ส่งผลให้ pH ของระบบ MS ปรับตัวเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 6.5-6.7 รวมระยะเวลาการกู้ระบบกลับคืนใช้เวลา 40 วัน ด้วยการปรับ pH เพียงครั้งเดียว สำหรับการเพิ่มความเข้มข้น TS พบว่าไม่ได้ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลง pH ในระบบ T1 ระบบสามารถดำเนินไปได้โดยเกิดการ hydrolysis และสร้างกรดจากเปลือกกล้วยเล็บมือนางอย่างต่อเนื่อง ความเป็นกรดที่สูง pH ต่ำนี้ สามารถยับยั้งจุลินทรีย์กลุ่ม methanogen และ VFA ที่เกิดขึ้นจึงไม่ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น VFA ที่ผลิตได้และของแข็งที่เหลือต้องมี

ขั้นตอนผลิตก๊าซมีเทนด้วยจุลินทรีย์ผลิตมีเทนรองรับต่อเพื่อเปลี่ยนสาร intermediate จากรบบ T1 ที่ย่อยง่ายต่อไป



รูปที่ 4-6 pH ของระบบ ที่ภาระบรรทุกอินทรีย์ต่างๆ

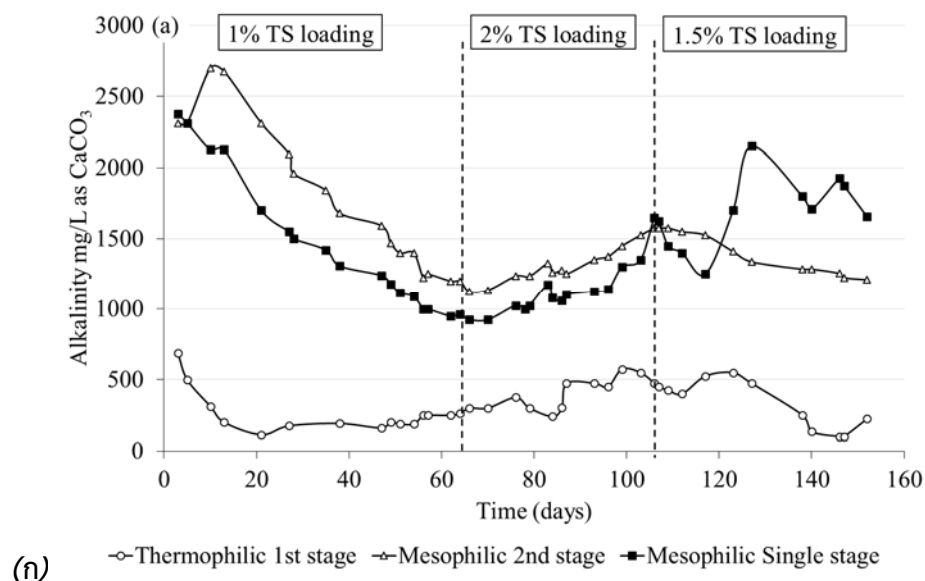
4.7.2 Alkalinity และ VFA ในระบบ

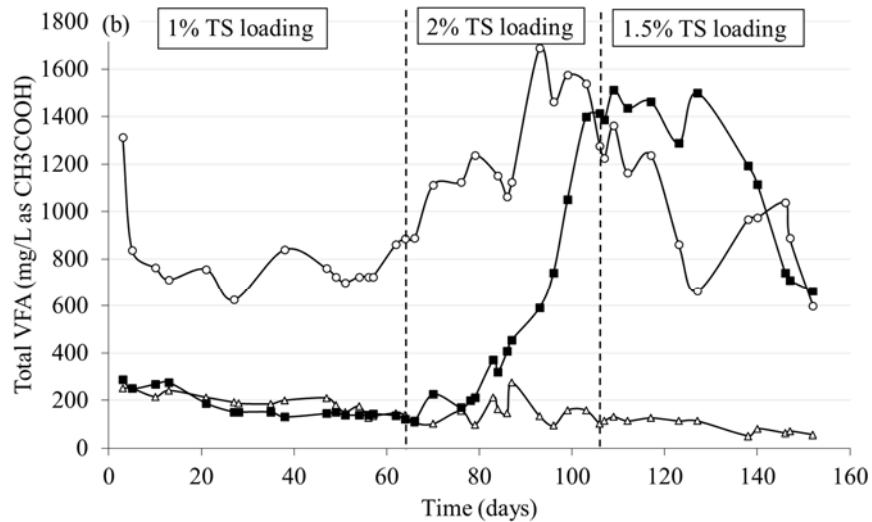
การเปลี่ยนแปลง Alkalinity และ total VFA (TVFA) จากการเดินระบบที่ความเข้มข้น TS 1%, 1.5% และ 2% สามารถแสดงในรูปที่ 4-7ก และ 4.7ข แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง alkalinity และ TVFA สอดคล้องกับปริมาณภาระบรรทุกของแข็ง (TS) หรือ OLR ที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งโดยธรรมชาติเปลือกกล้วยเล็บมือนางมีความสามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วสังเกตได้จากการผลิตมีเทนจากการศึกษา BMP (รูปที่ 4-4) โดยที่อัตราภาระบรรทุกของแข็งที่ 1%TS (OLR = 0.42 kg/m³.d) alkalinity ของระบบ MS มีค่าประมาณ 1,000 mg/L as CaCO₃ และ TVFA 135 mg/L as CH₃COOH โดยมีค่า TVFA/ALK 0.14 คล้ายคลึงกับระบบ M2 มีค่า alkalinity ประมาณ 1,200 mg/L as CaCO₃ และ TVFA 135 mg/L as CH₃COOH สัดส่วน TVFA/ALK 0.10 (รูปที่ 4-7) โดยที่ระบบ M2 มีอัตราภาระบรรทุกของแข็งเท่ากับ 0.36 kg/m³.d สำหรับระบบ T1 (1%TS; OLR = 2.11 kg/m³.d) จะเห็นว่ามีค่า alkalinity ต่ำ เนื่องจากเป็นระบบที่รองรับอัตราภาระบรรทุกของแข็งสูง (HRT ต่ำ) อุณหภูมิสูง (55°C) ส่งผลให้ค่าสัดส่วน TVFA/ALK สูงถึง 3.5

เมื่อพิจารณาการเพิ่ม OLR ที่ภาระบรรทุกของแข็ง 2%TS ระบบ MS มีค่า alkalinity เท่ากับ 1,350 mg/L as CaCO₃ และ TVFA เพิ่มขึ้นถึง 1,400 mg/L as CH₃COOH ส่งผลให้ค่าสัดส่วน TVFA/ALK ต่ำว่า 0.8 ที่ส่งผลให้ระบบขาดเสถียรภาพอาจทำให้ระบบผลิตมีเทนล้มเหลวได้ (Khanal, 2008) จึงมีความจำเป็นในการปรับลด OLR ลงเหลือ 1.5%TS ซึ่งได้กล่าวไว้ในข้างต้นแล้ว สำหรับระบบ M2 ที่รับ digestate ที่ 2%TS จากรบบ T1 พบว่า ค่า TVFA/ALK ratio ต่ำกว่า 0.4 แสดงว่าระบบ M2 สามารถรักษาเสถียรภาพการทำงานของระบบได้ดี ในการย่อยสลาย digestate

จากระบบ T1 (2% TS; OLR = 4.03 kg/m³.d) ปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเพิ่มขึ้นขั้นตอนย่อยเบื้องต้นเพื่อเตรียมเข้าสู่ระบบผลิตมีเทนในรูปแบบ T1-M2 ทำให้สามารถเดินระบบที่รองรับอาหารที่ย่อยสลายเร็วและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตมีเทนได้ นอกจากนี้ pH ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดย pH 4-6 ของระบบ T1 เป็นระดับที่สามารถส่งผลให้เกิดการผลิตไฮโดรเจนได้ (Fernández-Rodríguez et al., 2015; Riau et al. 2010) ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

ผลจากการศึกษาพบว่า ชนิด VFA หลักที่พบในระบบหมักไร้อากาศได้แก่ acetic acid และ butyric acid แต่สำหรับระบบ T1 ตรวจพบ isovaleric acid และ valeric acid ร่วมด้วย และจะพบ acetic acid และ propionic acid ในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบ M2 ซึ่งคล้ายคลึงกับผลการวิจัยของของ Riau et al. (2010) โดยพบว่า acetate และ propionate พบเฉพาะในน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบที่สองขั้นตอน (thermophilic vs mesophilic) ในการบำบัดตะกอนจากในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ในระบบ MS ที่ทดลองที่ความเข้มข้นวัสดุป้อน 1%TS พบกรดอะซิติกและโพรพิโอนิกเป็นชนิด VFA หลัก แต่ที่ 2%TS พบ VFAs หลากหลายประเภท acetic acid, propionic butyric, iso-valeric และ valeric acid





(ข) —○— Thermophilic 1st stage —△— Mesophilic 2nd stage —■— Mesophilic Single stage

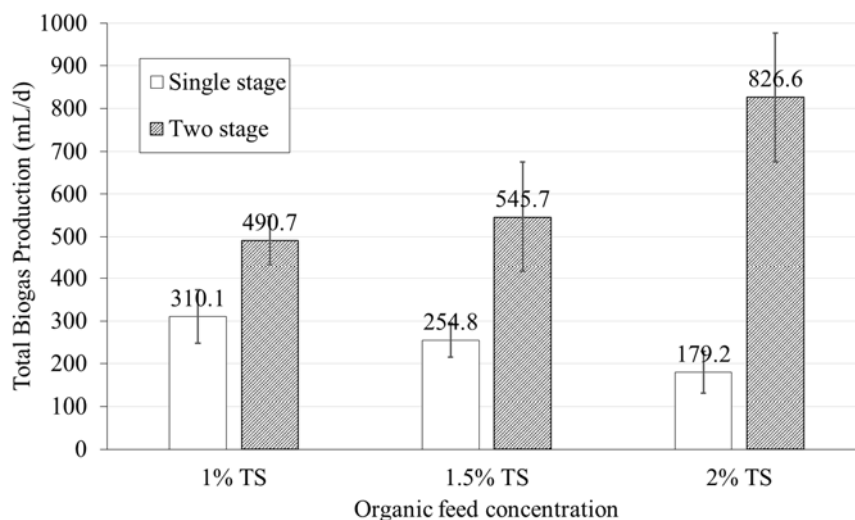
รูปที่ 4-7 (ก) Alkalinity และ (ข) total VFA น้ำทิ้งจากระบบ

4.7.3 การผลิตก๊าซชีวภาพ

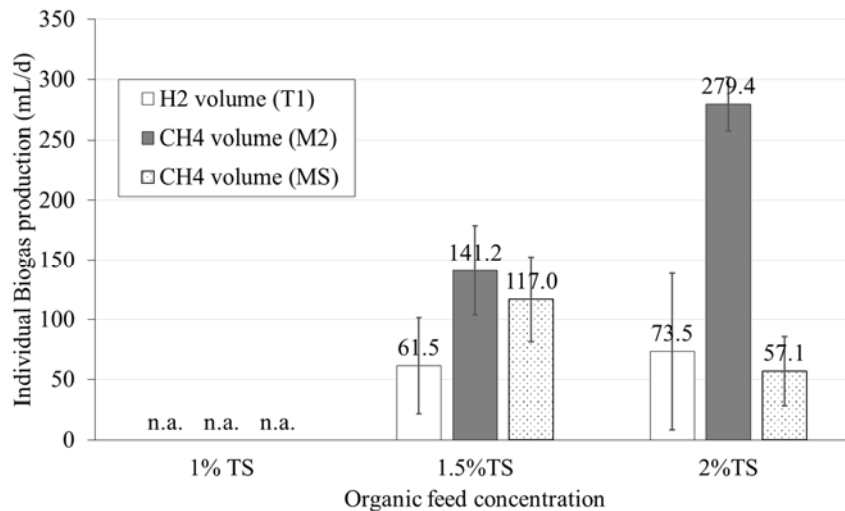
รูปที่ 4-8 แสดงถึงปริมาณก๊าซชีวภาพที่อัตราการป้อนของแข็ง 3 ความเข้มข้น (1%TS, 2%TS และ 1.5%TS) ของระบบ MS และ TPAD โดยที่ 1%TS ไม่ได้ทำการวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเนื่องจากเป็นระยะ Start up ระบบ ในการเดินระบบที่ 2%TS ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบบ MS เริ่มมีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงประมาณวันที่ 71 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณการเพิ่มขึ้นของ TVFA (รูปที่ 4-7ข) ขณะที่ยังรักษา pH ไว้ได้ และวันที่ 85 ของการเดินระบบ pH เริ่มลดลง ขณะที่ TVFA เริ่มเพิ่มขึ้น บ่งชี้ว่า alkalinity ในระบบไม่เพียงพอที่จะต้านทานความเป็นกรดที่เกิดขึ้นได้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการเริ่มทำการปรับให้ขึ้นไปเป็นกลาง (ประมาณ 7.0) เพื่อรักษาสมดุลแต่ก็ไม่สามารถรักษาสมดุลไว้ได้ เป็นเหตุให้ปริมาณมีเทนลดลงจาก 50.4% เป็น 4.5% ของช่วงเวลาดังกล่าว และเมื่อเพิ่ม OLR เท่ากับ 2%TS พบว่า ระบบ MS มีค่าเฉลี่ยของ methane yield เท่ากับ 17.14 L CH₄/kg VS แม้ว่า VS ถูกย่อยสลายเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดการสะสมของ VFA เกิดปรากฏการณ์ Over load สารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นไม่ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพ เกิดการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ จำเป็นต้องลดความ OLR ลง เหลือความเข้มข้น 1.5%TS ซึ่งสังเกตเห็นปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในระดับ 254.8 mL/d มากกว่าที่ป้อนวัสดุหมัก 2%TS ซึ่งอยู่ในระดับ 179.2 mL/d และมีสัดส่วนมีเทนเพิ่มสูงขึ้นอยู่ในช่วง 51.5-57.3% (เฉลี่ย 53.2%) เนื่องจากเกิดการปรับสมดุลในระบบ TVFA ที่สะสมถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้ดีโดยที่สภาวะคงที่ ระบบ MS มีค่า methane yield เฉลี่ย 46.0 L CH₄/kgVS

ผลการวิเคราะห์หาสถิติของระบบผลิตก๊าซชีวภาพของทุกระบบที่ 1%TS, 2%TS และ 1.5%TS ดังแสดงในรูปที่ 4-9 แสดงให้เห็นว่าระบบ Thermophilic (T1) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการ hydrolysis เปลือกกล้วยเล็บมือนางผลิตเป็น VFA อย่างมีประสิทธิภาพ และช่วย

เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบหมักในขั้นตอนที่ 2 (M2) เพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากระบบ T1 มีไฮโดรเจนผสม บ่งชี้ได้ว่า T1 มีการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม hydrolytic-acidogenic สูงกว่า methanogens ซึ่งพบว่ามีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบในก๊าซชีวภาพเพียงเล็กน้อย (ต่ำกว่า 1.5%) โดย methane yield ไม่มีนัยสำคัญและไม่ถูกนำมาคิดในการคำนวณพลังงานขั้นต่อไป และแม้ว่าการเดินระบบที่ TS สูง ระบบ T1 ยังคงมีศักยภาพในการช่วยส่งเสริมการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพขั้นที่ 2 ได้ ป้องกันการสะสมของสารยับยั้งเช่น VFA หรือสารพิษอื่นๆ ที่ส่งผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ผลิตมีเทนในขั้นที่สอง ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับการย่อยสลายวัสดุอินทรีย์จากมูลฝอยชุมชน (organic fraction) ที่ย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว (Fernández-Rodríguez et al., 2015) จากการทดสอบทางสถิติพบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบแบบขั้นตอนเดียว (MS) ที่การป้อนของแข็ง 1% TS และ 1.5% TS ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ แต่มีความแตกต่างจากที่ 2%TS อย่างมีนัยสำคัญ ในทางกลับกันการผลิตก๊าซชีวภาพโดยรวมของกระบวนการย่อยแบบสองขั้นตอนที่ 1%TS และ 1.5%TS ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกัน แต่ต่ำกว่าที่ 2%TS อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ $\alpha=0.05$



รูปที่ 4-8 เปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพถึงปฏิกรณ์แบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน



รูปที่ 4-9 ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ความเข้มข้นวัสดุหมักต่างๆ

ในการย่อยสลายเปลือกกล้วยเล็บมือนางแบบ 2 ขั้นตอน พบว่าเมื่อเพิ่ม solid loading มากกว่า 1%TS สามารถตรวจวัด H₂ พบในก๊าซชีวภาพจากระบบ T1 โดยที่ 1.5%TS และ 2%TS มีค่า hydrogen yield เท่ากับ 17.5 และ 15.2 L H₂/kg VS ตามลำดับ โดยมีเข้มข้นของ H₂ เท่ากับ 33.0% และ 33.4% ตามลำดับ สำหรับการผลิตมีเทนและ VS ที่ถูกทำลายของระบบ M2 เพิ่มสูงขึ้น (รูปที่ 5-9 และตารางที่ 4-7) มีความสอดคล้องกัน โดยที่ VS ที่ถูกทำลายจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ โดยที่ระบบ M2 มีค่าเฉลี่ยของ methane yield เท่ากับ 43.3 และ 70.3 L CH₄/kgVS ของ 1.5%TS และ 2%TS คิดเป็นร้อยละ VS ที่ถูกทำลายเท่ากับ 48.8 และ 61.3 ตามลำดับ เมื่อประเมิน VS ที่ถูกทำลายโดยภาพรวมการผลิตก๊าซชีวภาพแบบ 2 ขั้นตอนระบบมีประสิทธิภาพการย่อยสลาย VS สูงกว่าการผลิตก๊าซชีวภาพแบบขั้นตอนเดียว (ตารางที่ 4-7)

4.7.4 ผลผลิตพลังงาน

ผลวิเคราะห์ผลผลิตพลังงานที่ได้จากก๊าซไฮโดรเจนและมีเทนที่ผลิตได้ในหน่วยของพลังงานต่อกิโลกรัมเปลือกกล้วยในรูปของแข็งระเหยง่าย (kgVS) แสดงดังตารางที่ 4-7 ความหนาแน่นของก๊าซไฮโดรเจนและมีเทนที่ใช้ในการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.09 kg/m³ และ 0.72 kg/m³ ตามลำดับ ค่าความร้อนของไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนที่ใช้ในการคำนวณคือ 142 kJ/g และ 55.6 kJ/g หรือ 12.78 kJ/L และ 40.0 kJ/L ตามลำดับ (Zhu et al., 2008) ผลผลิตพลังงานโดยรวมจากระบวนการผลิตก๊าซรวมแบบสองขั้นตอนได้ค่าพลังงานเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของอัตราภาวะบรรจุของแข็งสูงขึ้น ในช่วยที่ทดสอบ ในทางตรงกันข้ามผลผลิตพลังงานต่อน้ำหนักอาหารจากระบบแบบขั้นตอนเดียวจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของอาหารเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในสภาวะที่ระบบเกิดความเครียด เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ได้ตรวจวัดองค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ระดับอาหารป้อน 1%TS แต่สามารถอนุมานว่าผลผลิตพลังงานจะสอดคล้องกับระดับของการทำลายของแข็ง (VS destruction) ในช่วงระดับ OLR

ที่ต่ำซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นผลผลิตพลังงานที่ได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนจึงควรมีค่าไม่แตกต่างกันที่ 1%TS โดยการเพิ่มระบบขั้นต้นแบบอุณหภูมิสูง (T1) เข้าไปทำให้ระบบโดยรวมสามารถรับ TS loading ได้สูงขึ้น ส่งผลให้เกิดเป็นถึง prehydrolysis และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายของแข็ง VS และผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี ขณะที่ระบบมีเสถียรภาพเพิ่มมากขึ้น ได้พลังงานสูงกว่าการเดินระบบแบบขั้นตอนเดียว แต่ควรต้องคำนึงถึงพลังงานที่ใช้ในการเดินระบบ T1 ที่อุณหภูมิสูงขึ้นด้วย การใช้ความร้อนเหลือทิ้งจากเครื่องยนต์ปั่นไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ (ไอเสีย และน้ำหล่อเย็นเครื่องยนต์) จะสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายพลังงานในการให้ความร้อนแก่ถังปฏิกรณ์ T1 ได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 4-7 ประสิทธิภาพและผลการทำงานของระบบต่อเนื่องแบบขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอนต่างอุณหภูมิที่สภาวะคงที่ สำหรับย่อยสลายเปลือกกล้วยที่ความเข้มข้นวัสดุ
ป้อนต่างๆ

ระบบถึงปฏิกรณ์	Feed (% TS)	OLR (kg VS/m ³ .d)	VS destroyed (%)	Avg. CH ₄ (%)	Avg. H ₂ (%)	Biogas yield (L/kg VS)	Energy yields (kJ/kg VS)
Mesophilic single stage	1.0	0.41	40.4	n.a.	n.a.	160.3	n.a.
(M5)	1.5	0.62	41.0	49.6	n.d.	91.2	1840.9
	2.0	0.83	53.8	33.3	n.d.	49.0	526.2
Two stage	1.0	2.07	19.2	n.a.	n.a.	47.4	n.a.
Thermophilic prehydrolysis (T1)	1.5	3.11	22.2	<1.5%	33.0	44.7	1827.7 ^c
	2.0	4.14	18.6	n.d.	33.4	42.4	2510.9 ^c
Mesophilic (M2)	1.0	0.35	24.0 (42.9 ^a)	n.a.	n.a.	165.1 (192.9 ^b)	
	1.5	0.54	48.8 (58.4 ^a)	36.1	n.d.	118.8 (151.2 ^b)	
	2.0	0.66	61.3 (68.5 ^a)	48.0	n.d.	147.7 (171.1 ^b)	

^a Overall VS destroyed calculated from influent to thermophilic first stage (T1) reactor and effluent from mesophilic second stage (M2) reactor

^b Overall biogas yield from T1 and M2 reactors

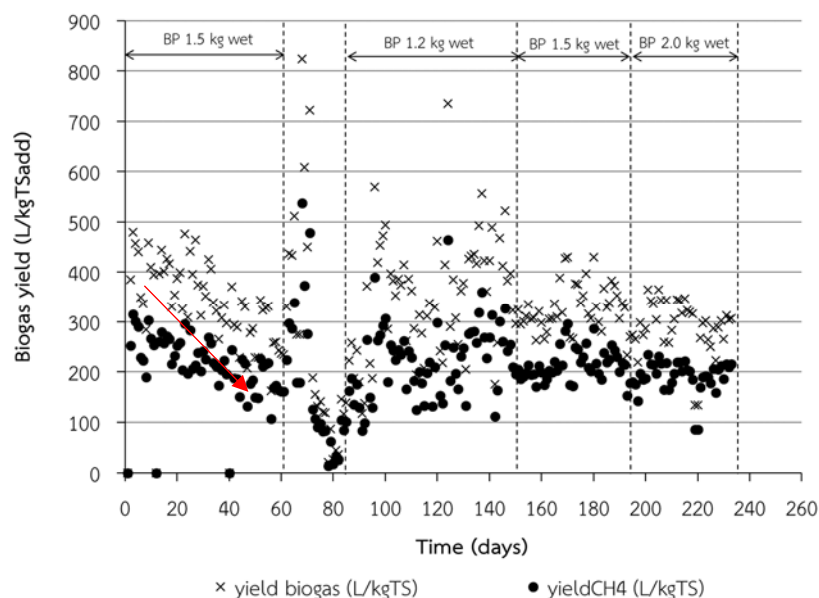
^c Overall energy yield from T1 and M2 reactors

n.d. not detected

n.a. not available

4.8 การเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องในระดับครัวเรือน

จากการดำเนินการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกกล้วย (banana peel; BP) โดยช่วงเริ่มต้นเดินระบบทำการป้อนเปลือกกล้วยที่สัดส่วนของแข็งต่อน้ำเท่ากับ 1:1 (weight by volume) โดยที่ใช้น้ำ 1.5 kg และเปลือกกล้วยสด 1.5 kg พบว่าปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นในช่วง 31.8-94.3 L/d ในขณะที่มีเทนอยู่ในช่วง 20.0-66.4 LCH₄/d คิดผลผลิตมีเทน อยู่ในช่วง 13.3-44.3 L CH₄/kg TS และมีแนวโน้มก๊าซชีวภาพลดลงตามลำดับ แสดงว่าปริมาณเปลือกกล้วยที่ป้อนเข้าสู่ระบบมีปริมาณ TS loading สูงเกินไป ผู้วิจัยจึงหยุดการเติมเปลือกกล้วยเป็นเวลา 18 วัน เพื่อป้องกันระบบล้มเหลว เนื่องจากการย่อยสลายของกล้วยเกิดช้ากว่าอัตราการป้อนสารอาหาร และอาจเป็นเพราะจุลินทรีย์ในระบบกำลังปรับตัวให้คุ้นชินกับการย่อยสลายเปลือกกล้วย ทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนไม่ได้สูงเท่าที่ควรจะเป็น ทำให้ผู้วิจัยปรับ loading ลดลงเหลือเปลือกกล้วยสด 1.2 kg และน้ำ 1.2 L/d โดยเริ่มเดินระบบอีกครั้งในวันที่ 83 ผสมกับน้ำจากบ่อสุดท้ายมาหมุนเวียนกลับ 6 L/d พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นอยู่ระหว่าง 18.4-58.4 L CH₄/d คิดผลผลิตมีเทน อยู่ในช่วง 15.3-48.7 L CH₄/kg TS เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวได้ทำการเพิ่มปริมาณเปลือกกล้วยสดเป็น 1.5 kg และน้ำ 1.5 L/d ผลที่ได้พบว่าผลผลิตมีเทนใกล้เคียงกับสภาวะการป้อนเปลือกกล้วยสดที่ 1.2 kg โดยมีค่าผลผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนเฉลี่ย 339±42 และ 222±28 L/kg ตามลำดับ และมีค่าความเข้มข้นมีเทนเฉลี่ย 66.5±0.6% อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่เปลือกกล้วยภาระบรรทุกสุดท้ายเท่ากับ 2.0 kg wet พบว่าผลผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนใกล้เคียงต่ำกว่าที่ปริมาณเปลือกกล้วยสดที่ 1.5 kg ก่อนหน้ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 285±55 และ 188±36 L/kg TS ตามลำดับ และมีค่าความเข้มข้นมีเทนเฉลี่ย 66.2±3.9% ดังนั้นการผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกกล้วยที่ปริมาณ 1.5 kg wet จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตเป็นพลังงานทดแทนสำหรับใช้งานต่อไป



รูปที่ 4-10 ปริมาณก๊าซชีวภาพและมีเทนที่ได้จากระบบก๊าซชีวภาพระดับครัวเรือน



รูปที่ 4-11 เศษเปลือกกล้วยอัดตันตรงบ่อป้อน และหลุดออกบริเวณจุดระบายน้ำทิ้ง household biogas

4.9 การขยายผลระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องและถ่ายทอดเทคโนโลยีแก่กลุ่มสหกรณ์ผลิตกล้วยอบเล็บมือนางและอุตสาหกรรม จ.ชุมพร

ทำการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพและทำการจัดสร้างจากเปลือกกล้วยเล็บมือนาง โดยลงสำรวจพื้นที่สำหรับก่อสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาด 2x2 m (รูปที่ 4-12 ถึง รูปที่ 4-13) แบบ Fix dome คงที่ประกอบด้วย บ่อเติมเศษเปลือกกล้วย บ่อหมัก และบ่อล้น และถ่ายทอดเทคโนโลยีการแก่กลุ่มสหกรณ์ผลิตกล้วยอบและผู้ที่เกี่ยวข้อง ณ กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรรพótaหินช้าง ต.สลู อ.ท่าแซะ จ.ชุมพร เมื่อวันที่ 18 มิถุนายน 2559



รูปที่ 4-12 ลงสำรวจพื้นที่สำหรับก่อสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพแก่กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรรพótaหินช้าง จ.ชุมพร



รูปที่ 4-13 กิจกรรมก่อสร้างบ่อหมักไร้อากาศ ณ กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรรพอดาทินช้าง จ. ชุมพร

ขั้นตอนการก่อสร้าง

- 1) ขุดบ่อดินให้มีความลึก 1.5 ม สำหรับวางลูกท่อจำนวน 3 ปล้อง วางบ่อซีเมนต์ขนาด 1 m ลงไปใบบ่อที่ขุดเตรียมไว้
- 2) เจาะรูวงทำซีเมนต์ขนาด 4 นิ้ว ไว้สำหรับเชื่อมต่อท่อ PVC สำหรับเติมเศษเปลือกกล้วย ของปล้องบ่อด้านล่าง และเจาะรูขนาด 4 นิ้ว ของปล้องบนสุด สำหรับเชื่อมต่อกับบ่อล้น
- 3) สำหรับบ่อล้นเตรียมโดยวางท่อซีเมนต์ขนาด 1 m บนพื้นดินจำนวน 2 ลูก (กันบ่อล้นต้องอยู่ระดับเดียวกับบ่อหมัก)
- 4) สำหรับบ่อป้อนเปลือกกล้วยจะใช้ท่อซีเมนต์ขนาด 0.8 m โดยกันของบ่อป้อนอยู่ในระดับที่สูงกว่าปากของบ่อหมัก
- 5) ติดตั้งท่อนำส่งก๊าซชีวภาพด้วยท่อ PVC สำหรับระบายก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยติดตั้งท่อขนาด 0.5 นิ้ว เชื่อมต่อกับฝาบ่อหมัก พร้อมติดตั้งวาล์วเปิดปิด
- 6) ต่อท่อเพิ่มแรงดันก๊าซชีวภาพสูง 1.8 m พร้อมกับเดินท่อ PVC นำส่งก๊าซชีวภาพไปยังบริเวณที่ใช้งาน

ขั้นตอนการเริ่มต้นเดินระบบหมัก

- 1) ทำการเติมมูลสัตว์เพื่อใช้เป็นหัวเชื้อตั้งต้นสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ 30% โดยปริมาตรบ่อ และอีก 70% คือน้ำ ระยะเวลาแรกค่อยๆ เติมเศษอาหารลงไปประมาณ 1.5 kg wet พร้อมกับน้ำ 1.5 L รอประมาณ 20 วันและทดสอบการการจุดไปไฟ แสดงว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถใช้งานได้
- 2) เปลี่ยนตัวอย่างการป้อนเป็นเปลือกกล้วยลงไปประมาณ 1.5 kg wet พร้อมกับน้ำจากบ่อล้น 1.5 L เป็นประจำทุกวัน เพื่อให้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถใช้งานได้ดี

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการก่อสร้างระบบบ่อหมักผลิตก๊าซชีวภาพ คณะทำงานและผู้วิจัยได้มีการจัดประชุมการถ่ายทอดเทคโนโลยีให้แก่ชุมชนและผู้สนใจเพื่อนำไปสู่การใช้งานจริง (รูปที่ 4-14) โดยมีจำนวนผู้เข้าร่วม 16 คน เมื่อวันที่ 18 มิถุนายน 2559 และได้มีการถ่ายทอดความรู้ให้แก่ภาคอุตสาหกรรม ณ ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ต.สลูย อ.ท่าแซะ จ.ชุมพร พร้อมทั้งประชุมหารือแนวทางการขยายผลงานวิจัยในอนาคต (รูปที่ 4-15)



รูปที่ 4-14 การถ่ายทอดเทคโนโลยีสู่ชุมชน ณ กลุ่มแม่บ้านเกษตรกรพ่อดาทินช้าง ต.สลุย อ.ท่าแซะ จ.ชุมพร เมื่อวันที่ 18 มิถุนายน 2559



รูปที่ 4-15 ถ่ายทอดความรู้ให้แก่ภาคอุตสาหกรรม ณ ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) ต.สลูย อ.ท่าแซะ จ.ชุมพร

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาศักยภาพการย่อยสลายวัสดุทางการเกษตรผลไม้ ได้แก่ เปลือกกล้วย เศษเงาะ และ เศษลำไย พบว่ามีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 0.268, 0.193 และ 0.235 L CH₄/gVS_{added} ตามลำดับ ซึ่งผลจากการปรับสภาพทางกายภาพด้วยการลดขนาดเปลือกกล้วยด้วยวิธีการบดช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพและผลผลิตมีเทนได้ 0.331 LCH₄/gVS_{added} เนื่องจากเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสส่ง่ายแก่การย่อยสลาย

การขยายผลการศึกษากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพผลิตก๊าซชีวภาพด้วยเปลือกกล้วย เล็บมีอนางด้วยการหมักแบบต่อเนื่องในระบบหมักแบบขั้นตอนเดียว (Single-stage Mesophilic Reactor; MS) และระบบหมักแบบสองขั้นตอนที่ประกอบไปด้วยถังปฏิกรณ์ thermophilic reactor (T1) ต่อด้วยถังปฏิกรณ์ mesophilic second stage (M2) หรือเรียกว่า Temperature phased anaerobic digestion (TPAD) พบว่าระบบการหมักเปลือกกล้วยแบบสองขั้นตอนมีเสถียรภาพกว่า การหมักแบบขั้นตอนเดียว เนื่องจากถังปฏิกรณ์ T1 รับภาระบรรทุกของแข็งได้สูงทำหน้าที่ย่อยสลายเปลือกกล้วยด้วยปฏิกิริยา hydrolysis ก่อนที่จะเข้าสู่ระบบการหมักขั้นที่ 2 ซึ่งสามารถเดินได้อย่างมีเสถียรภาพ เมื่อเปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพที่ความเข้มข้นของวัสดุป้อนของการหมักที่ 2.0%TS ในระบบขั้นตอนเดียว (MS) และสองขั้นตอน (TPAD) พบว่าระบบมีผลผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 49.0 L/kgVS และ 171.1 L/kgVS ตามลำดับ ซึ่งผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าถึง 3.5 เท่า สำหรับผลการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องในระดับครัวเรือนโดยใช้เปลือกกล้วยเป็นวัสดุหมักโดยใช้ระยะเวลาการเดินระบบ 223 วัน โดยปริมาณเปลือกกล้วยที่เหมาะสมอยู่ที่ 1.5 kg_{fresh} มีค่าผลผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนเฉลี่ย 339±42 และ 222±28 L/kg TS ตามลำดับ และมีค่าความเข้มข้นมีเทนเฉลี่ย 66.5±0.6%

บรรณานุกรม

- กรมควบคุมมลพิษ. สืบค้นเมื่อ 27 ตุลาคม 2555, สืบค้นจาก www.pcd.go.th/
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. การผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียฟาร์มปศุสัตว์และโรงงานอุตสาหกรรม สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน สืบค้นเมื่อ 24 ธันวาคม 2555, สืบค้นจาก http://www2.dede.go.th/km_ber/Attach/Biogas-present.pdf
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบการผลิตการควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม.
- กัญญารัตน์ สฤกษ์พงศ์ทิรช. (2550). ผลการปรับพีเอชด้วยเถ้าไม้ยางพาราและอัตราส่วนการสูบลบ น้ำทิ้งต่อสมรรถภาพการทำงานของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นในการบำบัดน้ำเสียโรงงานยางชั้น, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. เคมีวิทยาของน้ำและน้ำเสีย. กรุงเทพฯ : มิตรนราการพิมพ์.
- ขวัญทิพา ปานเดชา. 2549. “การหมักขยะอินทรีย์สังเคราะห์โดยใช้ไส้เดือน *Perionyx excavatus*”. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยนเรศวร. (สำเนา)
- ข้อบังคับกรุงเทพมหานครว่าด้วยหลักเกณฑ์การจัดการมูลฝอยและสิ่งปฏิกูลของอาคาร สถานที่ และสถานบริการสาธารณสุข พ.ศ. 2545. (2545). ราชกิจจานุเบกษา, 119(43), 1-3.
- คลังปัญญาไทย. สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2555, สืบค้นจาก <http://www.panyathai.or.th/wiki/index.php/%E0%B8%82%E0%B8%A2%E0%B8%B0%E0%B8%A1%E0%B8%B9%E0%B8%A5%E0%B8%9D%E0%B8%AD%E0%B8%A2>
- จิราพร ศิริวัฒน์. 2555. การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานน้ำยางชั้นร่วมกับกากสัลดิจจากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ณรงค์ ณ เชียงใหม่. 2530. สุขภาพสิ่งแวดล้อมชุมชน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์

ทวีศักดิ์ ตันติฉันทการุณ. 2546. อิทธิพลของสภาวะฝนและการหมุนเวียนน้ำชะมูลฝอยต่อปริมาณ และลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอยในถังปฏิกริยาฝังกลบมูลฝอย. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เทวุษย์ บริรักษ์สันติกุล. 2552. การมีส่วนร่วมของชาวกรุงเทพมหานครในการจัดการมูลฝอย. คุชฎี นิพนธ์ปรัชญาคุชฎีบัณฑิต คณะรัฐประศาสนศาสตร์, มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

ธงชัย ทองทวี.2553. สภาพปัญหาการจัดการขยะมูลฝอย องค์การบริหารส่วนตำบลหนองขาม อำเภोजักราช จังหวัดนครราชสีมา

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และวิบูลย์ลักษณ์ วิสุทธ์ศักดิ์. 2540. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย

ธนาคารโลก (2012, มิถุนายน).What a Waste: a Global Review of Solid Waste Management สืบค้นเมื่อ 27 ตุลาคม 2555, สืบค้นจาก <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTURBANDEVELOPMENT/0,,contentMDK:23172887~pagePK:210058~piPK:210062~theSitePK:337178,00.html>

แนวคิดเกี่ยวกับการจัดการมูลฝอย. สืบค้นเมื่อ 27 ตุลาคม 2555, สืบค้นจาก <http://www.idis.ru.ac.th/report/index.php?topic=6140.0;wap2>

พระราชบัญญัติการสาธารณสุข พ.ศ. ๒๕๓๕. สืบค้นเมื่อ 20 ตุลาคม 2555, สืบค้นจาก <http://www.apphca.krisdika.go.th/Naturesug/CheckSig?whichLaw=law2&folderName=%lawPath=%a136-20-9999-update>

รายงานการทบทวนวรรณกรรม การเผาขยะชุมชนในที่โล่งแจ้งและการจัดการ ศูนย์วิจัยและจัดการคุณภาพอากาศ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ 2554

วรรณกร กุลศรี, อัจฉรียา นารีนรงค์และสุธิวัตร วงศ์ใหญ่. 2553. ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักเศษผลไม้และเปลือกกล้วยเล็บมือนาง.

วรัญญา ทิฆัมพรพิทยา. 2544. ผลของอัตราการหมุนเวียนน้ำชะมูลฝอยต่อการกำจัดสารอินทรีย์ในมูลฝอยจากตลาดโดยใช้วิธีการหมักไร้ออกซิเจนแบบสืซเบต. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วิชาการดอทคอม. สืบค้นเมื่อ 27 ตุลาคม 2555, สืบค้นจาก <http://www.vcharkarn.com>

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทยและ World Environmental Center. 2535. คู่มือวิเคราะห์น้ำเสีย. กรุงเทพฯ : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

- สวัสดี โนนสูง. 2543. ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์.
- สมพรเหมืองทอง และสมทิพย์ ด้านธีรวิชัย การวิเคราะห์ความจุและความหนาแน่นมูลฝอยขณะบรรทุกของรถเก็บขนมูลฝอยประเภทต่างๆ การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 39 สาขาวิทยาศาสตร์ สาขาการจัดการทรัพยากรและสิ่งแวดล้อม 5-7 กุมภาพันธ์ 2544
- สุพินดา ชูระเจน. 2544. การเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักเศษผักและผลไม้ไร้อากาศแบบแห้งที่มีการหมุนเวียนน้ำชะขยะ. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- AOAC. 1999. Official Method of Analysis of The Association of Official Analytical Chemists. 14 th edition.
- APHA, AWWA and WEF. 1998. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 20 th edition. American Public Health Association, Washington DC.
- Austermann, S., Archer, E. and Whiting, K.J. 2007. Commercial Assessment Anaerobic Digestion Technology for Biomass Projects. Juniper for Renewables East.
- Babel, S., Fukushi, K., Sitanrassamee, B. 2004. Effect of acid speciation on solid waste liquefaction in an anaerobic acid digester. Water Research, 38(9), 2417-2423.
- Bodik, B., Herdova, M. Drtil. 2002, The use of upflow anaerobic filter and AnSBR for wastewater treatment at ambient temperature, Water Research 36(4), 1084-1088.
- Cho, J.K., Park, S.C. 1995. Biochemical Methane Potential and Solid Stage Anaerobic Digestion of Korean Food Waste. Bioresource Technology, 52, 245-253
- Chugh, S., Chynoweth, D.P., Clark, W., Pullamnanappallil, P. and Rudolph, V. 1999. Degradation of Sorted Municipal Solid Waste by a Leach-Bed Process. Bioresource Technology. 69: 103-115.
- Chynoweth, P., D., Owens, M., J. and Legrand, R. 2001. Renewable Methane from Anaerobic Digestion of Biomass. Renewable Energy. 22 1-8.
- Demirer, G.N., Chen, S. 2008. Anaerobic biogasification of undiluted dairy manure in leaching bed reactors. Waste Management, 28(1), 112-119.

- Deublein, D. and Steinhauser, A. 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources. Germany, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Evans, G. 2001. Biowaste and biological waste treatment. New York: The Cromwell press.
- Gray, N.F. 1989. Biological of Wastewater Treatment. New York : Oxford Science Publications.
- Guendouz, J., Buffiere, P., Cacho, J., Carrere, M. and Delgenes, J.-P. 2010. Dry Anaerobic Digestion in Batch Mode: Design an Operation of Labolatory-Scale, Compleately mixed reactor. Waste Management (Impress).
- Hoorweg D, Thomas L, Otten L. 1999. Composting and Its Applicability in Developing Countries. Urban Waste Management Working Paper Series 8. Washington, DC: World Bank.
- Karnchanawong, S., Amprai, A. 2008. Performance Study of Leach Bed Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Waste at Mesophilic, Thermophilic and Room Temperatures Journal of Environmental Engineering Thailand, 19(1), 81-91
- Kusch, S., Oechsner, H. and Jungbluth, T. 2008. Biogas Production with Horse Drug in Solid-Phase Digestion Dystem. Bioresource Technology. 99: 1280-1292.
- Lay, J.J., Li, Y.Y., Noike, T. 1997. "Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion", Water Research. 31 (6): 1518-1524.
- Lehtomaki, A., Huttunen, S., Lehtinen, vT., M. and Rintala, J., A. 2008. Anaerobic Digestion of Grass Silage in Batch Leach Bed Processes for Methane Production. Bioresource Technology. 99: 3267-3278
- Teodorita, A.S. et al. 2008 Biogas Handbook. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg.
- Myint , M.T. and Nirmalakandan, N. 2009. Enhanceing Anaerobic Hydrolysis of Cattle Manure in Leachbed Reactors. Bioresource Technology. 100: 1695-1699.

- Regional Information Service Centre for South East Asia on Appropriate Technology (RISE-AT) (Nov 1998), Review of current status of Anaerobic Digestion Technology fortreatment of MSW.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1993). Integrated solid waste management. New York:McGraw-Hill.
- Ogejo, A.J., Wen, Z., Ignosh, J., Bendfeldt, E. and Collins, E., R. . 2002. Biomethane Technology, Virginia Polytechnic Institute and Iowa State University.
- Pandey, A., Soccol C.R. and Mitchell D.A. 2000. New developments in solid state fermentation : I-bioprocesses and products. *Process Biochem.* 35: 1153-1169.
- Parawira, W., Murto, M., Read, J.S. and Mattiasson, B. 2005. Profied of Hydrolysis and Biogas Production Druing Two-Stage Mesophilic Anaerobic Digestion of Solid Potato Waste. *Process biochemistry.* 40: 2945-2952.
- Polprasert, C. 1989. Organic Waste Recycling. New York : John Wiley& Sons.
- Speece, R.E. 2008. Anaerobic Biotechnology and Odor/Corrosion Control for Municipalities and Industries. Tennessee Nashville : Archae Press.
- Stabnikova, O., Liu, X.Y. and Wang, J.Y. 2008. Anaerobic Digestion of Food Waste in Hybrid Anaerobic Solid-Liquid System with Leachate Recirulation in Acidogenic Reactor. *Biochemical Engineering Journal.* 41: 198-201.
- Xiaohu Dai et al. 2013. High-solids anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in comparison with mono digestions: Stability and performance. *Waste Management* 33 : 308-316.
- Zhang, L., Du, L.Z., Cui, W.W., Zhang, K.Q. 2012, Influence of Inoculum to Substrate Ratio on Solid Acidogenic Digestion with Pig Manure and Maize Straw, *Advance Material Research*, 223-228.