



การผลิตก๊าซชีวภาพจากใบยางพาราโดยการหมักร่วมกับมูลสุกรสำหรับใช้ในครัวเรือน
**Biogas Production from Rubber Leaves by Co-digestion with Pig Manure for
Household-scale**

ชิตชนก คงแดง

Chitchanoke Kongdang

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Chemical Engineering
Prince of Songkla University**


2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

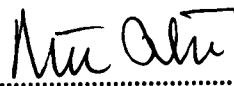
ชื่อวิทยานิพนธ์ การผลิตก๊าซชีวภาพจากใบยางพาราโดยการหมักร่วมกับมูลสุกรสำหรับใช้ใน
ครัวเรือน

ชื่อผู้เขียน นายชิตชนก คงแดง
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

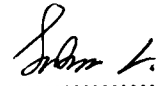

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งศิริพร)


คณะกรรมการสอบ

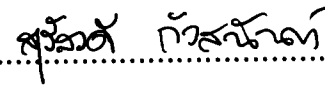

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

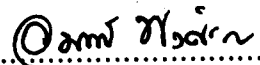

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งศิริพร)


.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยศรี สุขสาโรจน์)


.....กรรมการ
(ดร.สุรัสวดี กังสนันท์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี


.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์คารา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผลิตก๊าซชีวภาพจากไบอยาพาราโดยการหมักกากขี้หมู ลสุกรลี้ หาร์ บใช้ ใน ครี วรี ोन
ผู้เขียน	นายชิ ตชนก คงแดง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

ในปี จจุบัน ปริมาณความต้องการใช้ พลังงานที่เพิ่มขึ้นและที่ พลังงานที่มี มี อยู่ ปริมาณที่ จำกัดและมี แนวโน้ม ที่ จะหมดไปในอนาคตถึง 20 ปี ที่ผ่านมามี การหาพลังงาน ทางเลื อกเพิ่มเติม เทคโนโลยี การผลิตก๊าซชีวภาพเป็ นที่ รู้ จัก มาเป็ นระยะไ ทยชงไม่ สม่ ี มา นี้ ได้ รั บความสนใจเป็ นอันเนื้ องจากสามารถนำ มาทดแทนแก๊สหุงต้ มได้ สํา หาร บงานวิ จั ยนี้ สนใจศึกษาสั กยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมัก ระหว่างหมู ลสุกรลี้ หาร์ บใช้ อย ใน ขั้นแรกจะทํา การศึกษาในชุดทดลองระดับ บห้ องปฏิบัติ การระบบแบบ คํ านี นการหมัก ภายใต้ สภาวะอุณหภูมิ มี ห้ องเพื้ อที่ จะศึกษาผลของแก๊สสุกรลี้ หาร์ บใช้ อย พารา ขนาดของไบ อยาพาราและปริมาณของแฉั งในวั ตถุคิ บ (Total Solid,) TS 8-20% ที่ ี การผลิต ก๊าซชีวภาพ จากผลการทดลองพบสภาวะที่ เหมาะสมที่ สุดคือ แก๊สต่างหมู ลสุกรลี้ หาร์ บใช้ อย พารา ที่ 50:50 ปริมาณของของแฉั งในวั ตถุคิ บที่ TS 12% ผลการใช้ ใ้ ำ กับการบดแล้ว วั ในการ ทดลองต่อมาได้ ทําการศึกษาในชุดทดลองระดับ บห้ องปฏิบัติ การแบบคํ านี นการ ทดลองภายใต้ สภาวะอุณหภูมิ มี ห้ องเพื้ อที่ จะศึกษาผลของแก๊สสุกรลี้ หาร์ บใช้ อย พาราอ้ ตราการระบรทุกสารอินทรี ย์ (ปริมาณวั ตถุคิ บปล้ ัดวั ตถุคิ บบดั นระห้ ่างหมู ลสุกรลี้ หาร์ บใช้ อย พารา และปริมาณของของแฉั งทั้งหมดของวั ตถุคิ บป้ ่อน โดยคํ านี นการที่ สภาวะ TS เริ่มต้ น 12% จากผลการทดลองพบอ้ ตราการผลิต ก๊าซชีวภาพสูง สุดเมื่อ ี อมี อ้ ตราการระบรทุก สารอินทรี ย์ ที่ 2.56 kg COD/ระยเวลาการกักเก็บ 20 วั น สั ัดวั ตถุคิ บป้ ่อนระห้ ่างหมู ลสุกร ต่อไบอยาพาราที่ 75:25 สั ัดวั ตถุคิ บบดั นระห้ ่างหมู ลสุกรลี้ หาร์ บใช้ อย พาราที่ 50:50 และปริมาณ ของแฉั งทั้งหมดของวั ตถุคิ บป้ ่อนที่ TS 12% คั ้นมี คั ้น 1.89 L/g TS_{removed} ปริมาณการกำจัด ของแฉั งทั้งหมดและการกำจัด COD มี าคั ้น 5.50% และ 26.36% ตามล้ ัด บ สํา หาร บการทดลองในชุด การทดลองขนาดต้ นแบบระบบแบบป้ ่อนคํ านี นขนาดล้ ัก ้งหมั ก 200 ลิ ตระห้ ่างการผลิต ก๊าซชีวภาพได้ 10,043 ลิ ตร (112 ลิ ตร/วั น) คั ้นมี คั ้น 13.53 L/g TS_{removed} ปริมาณการกำจัด ของแฉั งทั้งหมดและการกำจัด COD มี าคั ้น 1.0 % และ 44.57% ตามล้ ัด บ สั ึ่ง ผลการทดลองใน

ชุดการทดลองขนาดต้นแบบสอดคล้อง **ผลการทดลอง**ในชุดทดลองระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง จากงานวิจัยที่สรุปได้ **ผล**ลสุกรและใบยางพาราเป็นวัตถุดิบที่มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมัก **สามารถนำมาประยุกต์ใช้**ในการผลิตก๊าซชีวภาพของเกษตรกรทางภาคใต้ของไทยได้

Thesis Title	Biogas production from rubber leaves by co-digestion with pig manure for household-scale
Author	Mr. Chitchanoke Kongdang
Major Program	Chemical Engineering
Academic Year	2011

ABSTRACT

In the present, increasing in energy demand and the issues about rapid depletion non-renewable energy resources as well as their environmental shortcomings led researchers to investigate alternative energy sources during the last two decades. Biogas technology has been known for a long time, but in recent years the interesting in it has been significantly increased, especially due to the higher cost of living and low cost fulfill of biomass. This research interested in increasing biogas production potential from co-digestion between pig manure and rubber leaves was evaluated in laboratory study by batch tests under room temperature at different proportions of pig manure and rubber leaves, size of rubber leaves in feedstock and feedstock proportions of pig manure and rubber leaves were 8-20% of Total Solid (TS). The research findings revealed that the optimum total solid for biogas production is 12%. The optimum fraction of pig manure and rubber leaves for biogas production is 50:50 and the optimum size of rubber leaves for biogas production is small particle size. In the subsequent experiment, laboratory scale co-digester were studied by semi-continuously testing under room temperature at different proportions of feed of pig manure and rubber leaves, organic loading rate (amount of feed), proportions of initial feedstock of pig manure and rubber leaves, total solid of feed and control total solid of feedstock at 12%. The result was found that the experimental set which provided the highest biogas production with organic loading rate of $2.56 \text{ kg COD/m}^3/\text{D}$, hydraulic retention time of 20 days, proportions of feed of pig manure and rubber leaves of 75:25, proportions of initial feedstock of pig manure and rubber leaves of 50:50, total solid of feed of 12%, methane yield $1.89 \text{ L/g TS}_{\text{removed}}$, total solid removal 45.50% and COD removal 26.36%. The result of the experiment of co-digestion between pig manure and rubber leaves in 200 liters container in pilot household scale by semi-continuous tests to find out the efficiency of

biogas production. The results showed that the amount of biogas was 10,043 liters, (112 L/Day), methane yield 13.53 L/g TS_{removed}, total solid removal 51% and COD removal 44.57%. Biogas production of pilot household scale is consistent with biogas production. Results from this study suggest that pig manure and rubber leaves are potential substrates for anaerobic co-digestion for the production of biogas and could provide additional benefits to agriculturist n southern Thailand.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอย่างยิ่งต่อ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา ชั่งสิริพร อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำปรึกษา คอยชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหา และให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา อีกทั้งยังช่วยตรวจทานและแก้ไข วิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยศรี สุขสาโรจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ร่วม รองศาสตราจารย์ ดร.กัลยา ศรีสุวรรณ และ ดร.สุรัสวดี กังสนันท์ กรรมการผู้แทน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) คณะวิศวกรรมศาสตร์ และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ทุนอุดหนุนในการดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่กรุณาอนุเคราะห์ตัวอย่างมูลสุกร

ขอขอบพระคุณทีมงานของหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการบำบัดมลพิษและสิ่งแวดล้อม (PTRU) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือและคอยแนะนำการแก้ปัญหาในการทำงานวิจัยตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ที่ให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน ที่มีส่วนช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้การทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ประโยชน์ที่ได้อันใดที่เกิดจากการทำงานวิจัยนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ผู้วิจัยมีความรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ชิตชนก คงแดง

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับองค์ประกอบและการใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพ	5
2.2 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ	9
2.3 เทคโนโลยีการหมักร่วม	15
2.4 ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	16
2.5 วิธีทำงานของระบบย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศ	28
2.6 แบบจำลองของถังปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่องที่ใช้ในการวิจัย	29
2.7 ระบบเก็บกักก๊าซชีวภาพ	31
2.8 ข้อดีของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ	31
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	32
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	36
3.1 การเก็บตัวอย่างวัสดุหมัก	36
3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุดิบเบื้องต้น	38
3.3 การทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักร่วม	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	63
4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบไบอยาพาราและมูลสุกร	63
4.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบไบอยาพาราและมูลสุกร	63
4.3 ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการแบบแบทช์	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ผลการทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยชุดการทดลองขนาด ห้องปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง	72
4.5 ผลการทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดต้นแบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	77
4.6 โมเดลต้นแบบสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานระดับครัวเรือน	85
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	88
5.1 สรุปผลการทดลอง	88
5.2 ข้อเสนอแนะ	89
เอกสารอ้างอิง	90
ภาคผนวก	98
ภาคผนวก ก วิธีวิเคราะห์	98
ภาคผนวก ข วิธีคำนวณ	108
ภาคผนวก ค ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์	112
ประวัติผู้เขียน	119

รายการตาราง

		หน้า
ตารางที่ 2-1	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	5
ตารางที่ 2-2	คุณสมบัติก๊าซชนิดต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	7
ตารางที่ 2-3	ตารางเปรียบเทียบผลตอบแทนก๊าซชีวภาพแต่ละวิธี	7
ตารางที่ 2-4	ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซมีเทน	8
ตารางที่ 2-5	แสดงข้อดีและข้อจำกัดของการหมักร่วมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ	15
ตารางที่ 2-6	องค์ประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการหมักในสภาวะไร้อากาศ	16
ตารางที่ 2-7	อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน	20
ตารางที่ 2-8	ช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์	20
ตารางที่ 2-9	การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง	21
ตารางที่ 2-10	ปริมาณสารอาหารรองที่จำเป็นปริมาณสารอาหารรองที่จำเป็นต่อการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศ	21
ตารางที่ 2-11	ความเข้มข้นกระดุนและยับยั้งของไอออนประจุบวกของโลหะเบา	22
ตารางที่ 2-12	ระดับความเป็นพิษของโลหะหนักในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน	24
ตารางที่ 3-1	แสดงการกระจายขนาดของไบogasพาราหลังการบด	37
ตารางที่ 3-2	วิธีวิเคราะห์คุณลักษณะวัสดุหมักชนิดมูลสุกรและไบogasพารา	38
ตารางที่ 3-3	แผนการวิเคราะห์จากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ	45
ตารางที่ 3-4	แสดงการออกแบบการทดลองชุดผลิตก๊าซชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ	46
ตารางที่ 3-5	ชุดการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	53
ตารางที่ 3-6	การออกแบบการทดลองศึกษาผลของสัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบogasพาราสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	54

รายการตาราง (ต่อ)

		หน้า
ตารางที่ 3-7	ชุดการทดลองศึกษาปริมาณวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	55
ตารางที่ 3-8	ชุดการทดลองสัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	56
ตารางที่ 3-9	ชุดการทดลองผลของปริมาณ TS ของวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	56
ตารางที่ 4-1	องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างใบยางพาราและมูลสุกร	64
ตารางที่ 4-2	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างหลังสิ้นสุดการทดลองสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระบบแบบแบทช์ระหว่างใบยางพาราและมูลสุกรในสถานะต่างๆ	66
ตารางที่ 4-3	แสดงผลของขนาดใบยางพาราคือการผลิตก๊าซชีวภาพในการหมักร่วม	70
ตารางที่ 4-4	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างหลังสิ้นสุดการทดลองเพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระบบแบบกึ่งต่อเนื่องระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราในสถานะต่างๆ	73
ตารางที่ 4-5	การป้อนวัตถุดิบสำหรับถังหมักระดับครัวเรือน	85
ตารางที่ 4-6	ข้อมูลของตัวแปรที่ใช้สำหรับสมการการประเมินกำลังการผลิตก๊าซชีวภาพ	86
ตารางที่ 4-7	ข้อมูลทางสถิติสำหรับสมการประเมินกำลังการผลิตก๊าซชีวภาพ	87

รายการภาพประกอบ

		หน้า
ภาพประกอบที่ 2-1	กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ	10
ภาพประกอบที่ 2-2	ขั้นตอนและร้อยละของสารอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ	14
ภาพประกอบที่ 2-3	ถังปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง	29
ภาพประกอบที่ 3-1	ลักษณะมูลสุกรที่ใช้ในการทดลอง	36
ภาพประกอบที่ 3-2	ลักษณะใบยางพาราก่อนการบด (ก) และลักษณะใบยางพาราหลังผ่านการบด (ข)	37
ภาพประกอบที่ 3-3	ไคอะแกรมชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมระดับห้องปฏิบัติการระบบแบทช์	40
ภาพประกอบที่ 3-4	ชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมระดับห้องปฏิบัติการระบบแบทช์	40
ภาพประกอบที่ 3-5	ไคอะแกรมถังหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมระดับห้องปฏิบัติการระบบแบทช์	41
ภาพประกอบที่ 3-6	ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมระดับห้องปฏิบัติการระบบแบทช์	42
ภาพประกอบที่ 3-7	ไคอะแกรมชุดกักเก็บก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมระดับห้องปฏิบัติการระบบแบทช์	43
ภาพประกอบที่ 3-8	ชุดกักเก็บก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมระดับห้องปฏิบัติการระบบแบทช์	43
ภาพประกอบที่ 3-9	ไคอะแกรมของชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดห้องปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง	48
ภาพประกอบที่ 3-10	ชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดห้องปฏิบัติการแบบกึ่งต่อเนื่อง	48
ภาพประกอบที่ 3-11	ไคอะแกรมถังหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	49
ภาพประกอบที่ 3-12	ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	50

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
ภาพประกอบที่ 3-13	ไคอะแกรมของชุดกักเก็บก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	51
ภาพประกอบที่ 3-14	ชุดกักเก็บก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	51
ภาพประกอบที่ 3-15	ไคอะแกรมชุดการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	57
ภาพประกอบที่ 3-16	ชุดการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	58
ภาพประกอบที่ 3-17	ไคอะแกรมถังหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	59
ภาพประกอบที่ 3-18	ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	59
ภาพประกอบที่ 3-19	ไคอะแกรมชุดกักเก็บก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	60
ภาพประกอบที่ 3-20	ชุดกักเก็บก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	61
ภาพประกอบที่ 4-1	ก๊าซชีวภาพสะสมในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมระบบแบบแบทช์ระหว่างมูลสุกรและไບียงพารา	65
ภาพประกอบที่ 4-2	แสดงผลของอัตราส่วนของไບียงพาราในวัตถุดิบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมในระบบแบบแบทช์ที่ TS 16%	67
ภาพประกอบที่ 4-3	แสดงผลของร้อยละความเข้มข้นของแข็งทั้งหมด (% TS) ในวัตถุดิบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมด้วยระบบแบบแบทช์ระหว่างมูลสุกรและไບียงพาราที่อัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับไບียงพารา 50:50	69

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

		หน้า
ภาพประกอบที่ 4-4	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในวัตถุดิบระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมด้วยระบบแบบเบทซ์ที่ TS 16%	70
ภาพประกอบที่ 4-5	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	78
ภาพประกอบที่ 4-6	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	78
ภาพประกอบที่ 4-7	ปริมาณก๊าซมีเทนในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	79
ภาพประกอบที่ 4-8	ค่า pH ในระบบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบด้วยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	80
ภาพประกอบที่ 4-9	กรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	81
ภาพประกอบที่ 4-10	สภาพต่างในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	82
ภาพประกอบที่ 4-11	อัตราส่วนความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพต่างในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	83
ภาพประกอบที่ 4-12	ปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	84
ภาพประกอบที่ 4-13	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง	84

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการพัฒนาประเทศ มีผลต่อความเป็นอยู่ ตั้งแต่ระดับครอบครัวไปจนถึงระดับประเทศและทั่วโลก ดังนั้นจึงมีการให้ความสำคัญในการจัดการทางด้านพลังงานเพื่อให้มีพลังงานใช้อย่างเพียงพอ ในขณะที่ความต้องการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้าและเชื้อเพลิงต่างๆ ประกอบกับพลังงานที่มีอยู่มีปริมาณที่จำกัดและมีแนวโน้มที่จะหมดไปในอนาคต โดยเฉพาะพลังงานจากใต้พิภพหรือพลังงานปิโตรเลียมซึ่งทั่วโลกกำลังประสบปัญหาเกี่ยวกับวิกฤติการณ์พลังงานอันเนื่องมาจากราคาน้ำมันดิบที่เพิ่มสูงขึ้นอยู่ตลอดเวลา รวมทั้งปริมาณการผลิตที่ลดลง ส่งผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศ นานาประเทศจึงมีความจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานเพิ่มเติมหรือแหล่งพลังงานทดแทน (Renewable Energy) เพื่อใช้ทดแทนแหล่งพลังงานปิโตรเลียม พลังงานที่ได้รับความสนใจในอันดับต้นๆ คือ พลังงานจากธรรมชาติในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar Energy) พลังงานลม (Wind Energy) พลังงานน้ำ (Water Energy) พลังงานชีวมวล (Biomass Energy) และ พลังงานก๊าซชีวภาพ (Biogas Energy) เป็นต้น

ก๊าซชีวภาพซึ่งเกิดจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) เป็นพลังงานทดแทนที่ได้รับการสนใจอย่างกว้างขวาง เป็นที่รู้จักมาตั้งแต่ศตวรรษที่ 18 ก๊าซชีวภาพที่ผลิตขึ้นมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักอยู่ประมาณ 45-70% จึงทำให้มีคุณสมบัติจุดติดไฟได้ดีและสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ เช่น ผลิตกระแสไฟฟ้าหรือใช้แทนก๊าซหุงต้มตามบ้านเรือน นอกจากนี้จะได้ประโยชน์ในด้านพลังงานแล้วยังได้ประโยชน์ในการแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม คือ ช่วยลดการเกิดภาวะเรือนกระจกอันเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อน เนื่องจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเป็นระบบปิดจึงเป็นการช่วยควบคุมการเกิดและการแพร่กระจายของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่ชั้นบรรยากาศ อีกทั้งลดปริมาณขยะของเสียได้อีกด้วย การผลิตก๊าซชีวภาพในอดีตอาจมีการหมักที่ใช้วัตถุดิบประเภทเดียว แต่ปัจจุบันได้มีการหมักร่วมกันระหว่างสองวัตถุดิบหรือมากกว่า เรียกว่า การหมักร่วม (Co-Digestion) (Gomez *et al*, 2006) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้น

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีผลผลิตทางการเกษตรและวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เป็นชีวมวลเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะเกษตรกรในภาคใต้ส่วนใหญ่มีอาชีพทำสวนยางพารา นอกจากน้ำยางพาราที่ได้แล้วยังมีใบยางพาราที่ร่วงหล่นจากต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูยางผลัดใบจะมีใบยางพาราร่วงหล่นเกือบทั้งต้น เมื่อมีปริมาณใบยางสะสมมากขึ้นโดยไม่มีการเก็บกวาดใบยางพาราที่ร่วงบริเวณใต้ต้น ก็จะก่อให้เกิดปัญหาเป็นวัฏกันระหว่างปุ๋ยกับดิน มีผลให้ปุ๋ยไม่สามารถซึมผ่านกองใบยางพาราลงไปในดินได้ ปัจจุบันใบยางพารายังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์มากนัก หากสามารถนำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ นอกจากจะสามารถนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ไปทดแทนการใช้ก๊าซหุงต้มแล้วยังช่วยลดปัญหาของใบยางพาราดังกล่าวได้อีกด้วย นอกจากนั้นมูลสุกรจากฟาร์มปศุสัตว์ต่างๆ ก็เป็นของเสียที่ก่อให้เกิดปัญหาต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อด้านสภาวะแวดล้อมทั้งในส่วนของน้ำ ดิน และอากาศ รวมทั้งสุขภาพอนามัยของประชาชนผู้ที่อยู่อาศัยในบริเวณใกล้เคียงกับฟาร์มเลี้ยงสุกร เนื่องจากมูลสุกรทำให้เกิดกลิ่นเหม็นเป็นบ่อเกิดของเชื้อโรคบางชนิด เป็นแหล่งเพาะพันธุ์สัตว์และแมลงนำโรคนิดต่างๆ เช่น แมลงวัน และผู้เลี้ยงสุกรส่วนใหญ่ยังไม่มียุทธวิธีบำบัดของเสียดังกล่าวแต่ประการใด สำหรับในแถบชนบทของหลายประเทศเริ่มมีการใช้ก๊าซชีวภาพกันอย่างแพร่หลาย ได้มาจากการหมักของเสียชนิดต่าง ๆ เช่น มูลวัว (Ahring *et al*, 2001) มูลสุกร (Ioannis *et al*, 2011) แต่ส่วนใหญ่ใช้วัตถุดิบเพียงชนิดเดียว การนำมูลสุกรมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพร่วมกับใบยางพาราจะช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ที่กล่าวมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การนำใบยางพารามาเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตก๊าซชีวภาพทำได้โดยใช้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ โดยทำการหมักร่วมกันระหว่างใบยางพารากับมูลสุกร เนื่องจากใบยางพาราเป็นอินทรีย์วัตถุ เช่นเดียวกับหญ้า ผักตบชวา และฟางข้าว อันเป็นแหล่งของสารประกอบเซลลูโลสที่สลายตัวให้คาร์บอนเพิ่มขึ้น (วิรัช, 2529) มีผลให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณร่อยละมีเทนสูงขึ้น และมูลสุกรยังช่วยให้เกิดก๊าซชีวภาพเร็วขึ้น (Fantozzi and Buratti, 2009) ผลพลอยได้อีกประการสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ กากตะกอนที่ได้จากการกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพทดแทนปุ๋ยเคมีที่ใช้อยู่ได้อีกทางหนึ่ง เนื่องจากกากตะกอนประกอบด้วยธาตุอาหารหลัก ธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริม พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Hornick *et al*, 1984) กระบวนการหมักแบบไร้อากาศจึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่งที่จะนำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพและการกำจัดของเสีย รวมทั้งได้ปุ๋ยชีวภาพ

งานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ด้วยระบบการหมักร่วมระหว่างไบอยาพารากับมูลสุกรโดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ เช่น สัดส่วนวัตถุดิบ ความเข้มข้นของของแข็ง อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) ระยะเวลาเก็บ (HRT) และอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ในระบบที่ระดับต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพและผลได้ของก๊าซมีเทน โดยทำการทดลองในถังหมักแบบแบทช์ (Batch) ขนาด 25 ลิตร เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดำเนินการต่อในชุดการทดลองระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous) ขนาด 4 ลิตร โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อที่จะนำผลที่ได้ไปใช้ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดต้นแบบ (Pilot Scale) ขนาด 200 ลิตร ผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการศึกษาวิจัยและเป็นแนวทางในการพัฒนาไปสู่การประยุกต์ใช้สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับครัวเรือนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักร่วมระหว่างไบอยาพารากับมูลสุกรในระบบแบบแบทช์และระบบกึ่งต่อเนื่อง
2. เพื่อศึกษาปัจจัยและสภาวะที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในถังหมักร่วมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพระดับครัวเรือน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาองค์ประกอบของไบอยาพาราและมูลสุกรที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ
2. สร้างและติดตั้งระบบถังหมักระบบแบบแบทช์ขนาดห้องปฏิบัติการ ถังหมักระบบแบบกึ่งต่อเนื่องขนาดต้นแบบและขนาดใช้งานจริง
3. ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างไบอยาพารากับมูลสุกรด้วยระบบถังหมักระบบแบบแบทช์ และระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง
4. ่วัดวิเคราะห์องค์ประกอบวัตถุดิบภายในถังหมักและก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้เพื่อประเมินผลได้การผลิตก๊าซชีวภาพ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบสถานะที่เหมาะสมในการหมักร่วมระหว่างไบอยาฟารากับมูลสุกรในสถานะไร้อากาศที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงในการผลิตก๊าซชีวภาพ
2. สามารถนำไบอยาฟาราซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในการผลิตพลังงานทดแทน
3. ช่วยลดภาวะโลกร้อนจากการใช้พลังงานทดแทนจากชีวมวล
4. เป็นแนวทางการนำเทคโนโลยีมาใช้ในการลดปริมาณของเสียจากสุกรและปัญหาสิ่งแวดล้อมในชุมชน
5. ใช้เป็นแนวทางสำหรับการส่งเสริมการผลิตและใช้ก๊าซชีวภาพจากของเสียทางการเกษตรในระดับครัวเรือนและระดับชุมชนต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับองค์ประกอบและการใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่เกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่มีอากาศโดยแบคทีเรียที่ไม่ต้องการอากาศ (Anaerobic Bacterial) ก๊าซชีวภาพมีองค์ประกอบหลักคือ ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) นอกจากนี้ยังมีก๊าซอื่นๆ ปะปนอยู่ด้วยเล็กน้อย เช่น ไฮโดรเจน (H_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ออกซิเจน (O_2) และไนโตรเจน (N_2) ดังแสดงในตารางที่ 2-1 ซึ่งสัดส่วนของก๊าซแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมต่างๆ ในขณะที่เดินระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ อุณหภูมิ องค์ประกอบของน้ำเสีย pH ความเป็นด่าง (Alkalinity) ระยะเวลาพักเก็บ (HRT) ระยะเวลาพักเก็บตะกอน (SRT) สารพิษ สารอาหาร (Nutrient and Trace Element) (Metcalf and Eddy, 2004 ; Gerardi, 2003) ซึ่งมีผลประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อแบคทีเรียแต่ละกลุ่มซึ่งจะมีหน้าที่ในแต่ละขั้นตอนของการย่อยสลายสารอินทรีย์ และขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพที่แตกต่างกันไป โดยจะขึ้นกับชนิดของสารอินทรีย์เริ่มต้น

ตารางที่ 2-1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบ	ส่วนผสม (%)
มีเทน (CH_4)	50-70
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	30-50
ก๊าซอื่น	0-8
• ไนโตรเจน (N_2)	
• ไฮโดรเจน (H_2)	
• ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	

ที่มา : Polprasert (1996)

ปริมาณค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพมีค่าแปรผันตามปริมาณก๊าซมีเทนที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพ ถ้าก๊าซชีวภาพมีปริมาณมีเทนอยู่ประมาณ 65-70% จะมีค่าความร้อนประมาณ 21-25 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ถ้าก๊าซชีวภาพมีปริมาณก๊าซมีเทนลดลงมาเหลือแค่ประมาณ 50-55% ค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพจะลดลงเหลือประมาณ 18-20 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร ดังตารางที่ 2-2 ดังนั้นปริมาณค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หรือระดับความบริสุทธิ์ของก๊าซชีวภาพ สำหรับก๊าซธรรมชาติมีส่วนผสมของก๊าซมีเทน ก๊าซโพรเพน และก๊าซบิวเทนให้ค่าความร้อนประมาณ 3.73 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (Metcalf and Eddy, 2004) เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงที่สามารถทดแทนเชื้อเพลิงจากแหล่งอื่นได้ เช่น ฟืน ถ่าน น้ำมัน ก๊าซหุงต้ม เป็นต้น จึงทำให้ก๊าซชีวภาพสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ โดยหากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีขนาดใหญ่ ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะสามารถนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า (Electric Energy) พลังงานความร้อนโดยใช้เครื่องยนต์ก๊าซ (Gas Engine) กังหันก๊าซ (Gas Turbine) หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม (Boiler) ส่วนระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่มีขนาดเล็กระดับชุมชนหรือครัวเรือน ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สามารถนำมาใช้สำหรับตะเกียงก๊าซ (Biogas Lamp) เตาหุงต้ม หรือเครื่องปั้มน้ำได้เหมือนก๊าซธรรมชาติ แต่มีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าการใช้ฟืนหรือถ่าน อีกทั้งยังปราศจากควันและเขม่า จึงทำให้สถานที่ที่ใช้ก๊าซนี้มีความสะอาดกว่า สามารถใช้ก๊าซชีวภาพได้โดยไม่ต้องดัดแปลงเครื่องมือใดๆ เพียงแต่ปรับสัดส่วนอากาศให้เหมาะสม ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตรสามารถทดแทนก๊าซหุงต้มได้ 0.46 กิโลกรัม ถ้าก๊าซหุงต้มราคา 17 บาทต่อหนึ่งกิโลกรัม ก๊าซชีวภาพมีค่า 7.82 บาทต่อหนึ่งลูกบาศก์เมตรแสดงดังตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-2 คุณสมบัติก๊าซชนิดต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ชนิดของก๊าซ/คุณสมบัติ	CH ₄	CO ₂	H ₂	H ₂ S	60%CH ₄ 40%CO ₂	65%CH ₄ 34%CO ₂ 1% อื่นๆ
ค่าความร้อน (KJ)	35.64	-	10.8	22.68	21.6	23.40
สัดส่วนติดไฟในอากาศ (%ในอากาศ)	5-15	-	4-80	4-45	6-12	7.7-23
อุณหภูมิติดไฟ (°C)	650-750	-	585	-	650-750	650-750
ความดันเปลี่ยนสถานะ (bar)	47	75	13	89	75-89	75-89
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ (°C)	-82.5	31	-240	100	-82.5	-82.5
ความหนาแน่น (g/L)	0.72	1.98	.09	1.54	1.2	1.15
ความจุความร้อน (KJ/m ³ /°C)	1.6	1.6	1.3	1.4	1.6	1.6

ตารางที่ 2-3 ตารางเปรียบเทียบผลตอบแทนก๊าซชีวภาพแต่ละวิธี

การนำก๊าซชีวภาพใช้งาน	มูลค่าก๊าซชีวภาพ (บาท/ลบ.ม.)
1. แทนน้ำมันเบนซิน (@20บาท/ลิตร) ได้ 0.68 ลิตร	13.60
2. แทนน้ำมันดีเซล (@16บาท/ลิตร) ได้ 0.59 ลิตร	9.44
3. แทนก๊าซหุงต้ม (@17บาท/กก.) ได้ 0.46 กก.	7.82
4. ผลิตไฟฟ้าด้วยเครื่องยนต์ (@2.3บาท/หน่วย) ได้ 2.086 หน่วย	4.80
5. แทนน้ำมันเตา (@9บาท/ลิตร) ได้ 0.52 ลิตร	4.70
6. ทำความเย็น (@2.3บาท/ตัน) ได้ 1.7 ตัน	3.91
7. ผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันไอน้ำ (@2.30บาท/หน่วย) ได้ 1.20 หน่วย	2.76

ที่มา : <http://www.vcharkarn.com/varticle/41001>

แต่อย่างไรก็ตามพบว่าก๊าซมีเทนจะส่งผลกระทบต่อบรรยากาศมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 24 เท่า (Wuebbles and Hayhoe, 2002) หากปล่อยออกสู่ชั้น

บรรยากาศ ดังนั้นการเผาทำลายก๊าซมีเทนซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพหรือการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์จึงช่วยลดอัตราการเกิดภาวะเรือนกระจกหรือลดอุณหภูมิความร้อนให้โลก ก๊าซชีวภาพมีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือจุดติดไฟได้ดี ตารางที่ 2-4 แสดงลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซมีเทนซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับก๊าซมีเทนได้

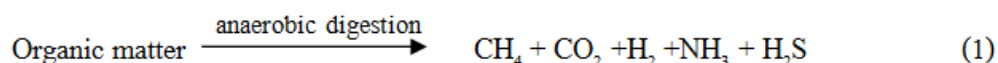
ตารางที่ 2-4 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของก๊าซมีเทน

สูตรเคมี	CH ₄
น้ำหนักโมเลกุล	16.042
จุดเดือดที่ 14.696 psia (760 mm)	-161.49°C
จุดเยือกแข็งที่ 14.696 psia (760 mm)	-182.48°C
ความดันวิกฤต	47.363 Kg/m ³
อุณหภูมิวิกฤต	-82.5°C
ความถ่วงจำเพาะ : ของเหลว °C: -164 °C	0.415
ความถ่วงจำเพาะ : ก๊าซ °C: 25 °C และ 770 mm	0.000658
ปริมาตรจำเพาะ °C : 15.5 °C และ 760 mm	1.47 L/g
ค่าความร้อน °C : 15.5 °C และ 760 mm	38,130.71 KJ/m ³
ความต้องการอากาศสำหรับการเผาไหม้	0.27 m ³
ความสามารถในการติดไฟ	5-15 % โดยปริมาตร
อัตราออกเทน	130
อุณหภูมิการเผาไหม้	650°C
สมการการเผาไหม้	CH ₄ + 2O ₂ → CO ₂ + 2H ₂ O
อัตราส่วน O ₂ /CH ₄ ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์	3.98 โดยน้ำหนัก
อัตราส่วน O ₂ /CH ₄ ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์	2.00 โดยปริมาตร
อัตราส่วน CO ₂ /CH ₄ ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์	2.74 โดยน้ำหนัก
อัตราส่วน CO ₂ /CH ₄ ในการเผาไหม้ที่สมบูรณ์	1.00 โดยปริมาตร

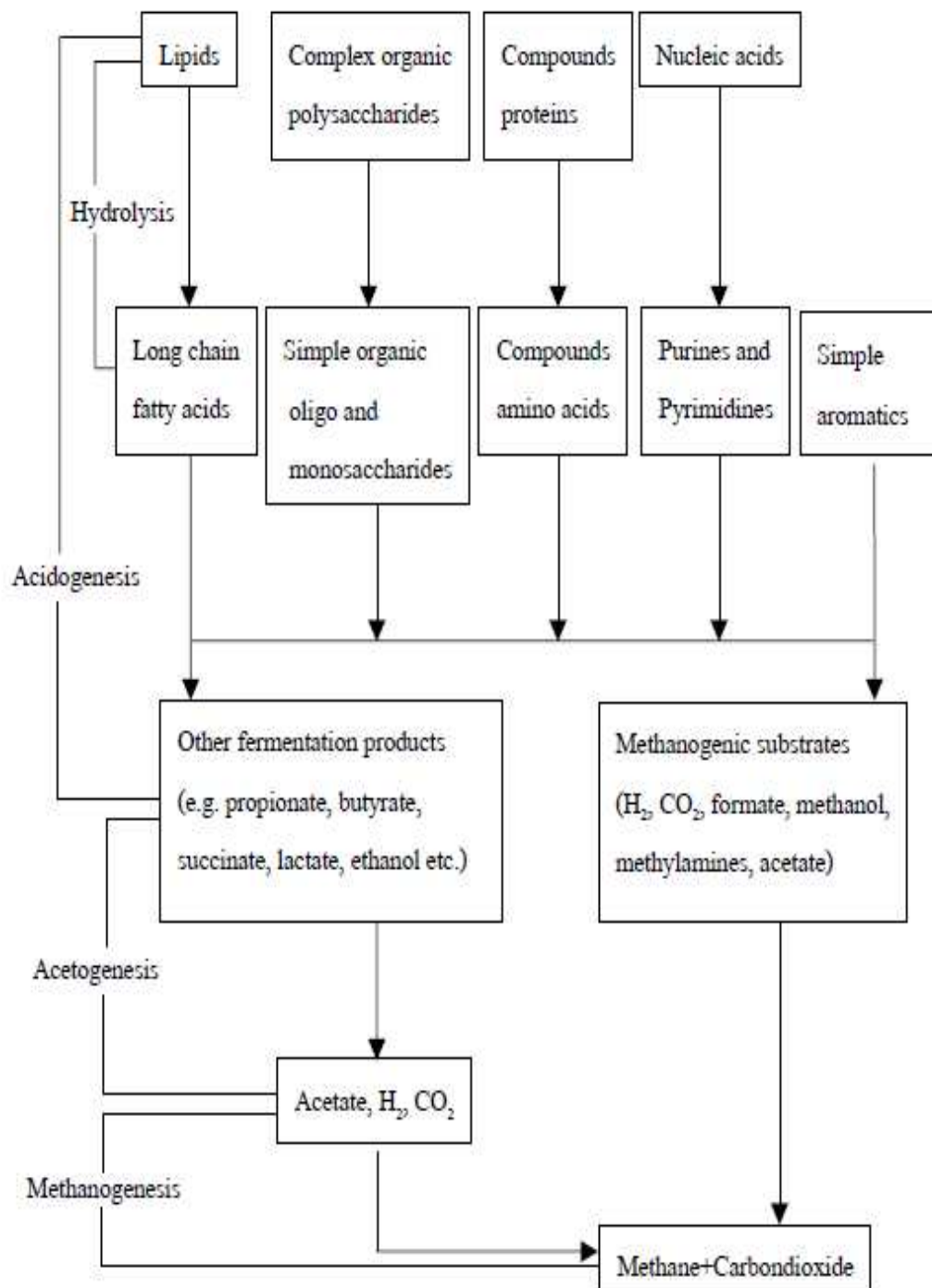
ที่มา : Diaz, 1993

2.2 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Digestion)

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาวะไร้อากาศเกิดจากการหมักสารอินทรีย์ โดยที่สารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียหลายชนิดเพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซทั้งสองชนิดเป็นองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ กระบวนการทางชีววิทยาสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศในการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพ แสดงได้ดังสมการ (1) สารอินทรีย์ในวัสดุหมักจะถูกย่อยสลายจากโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลงเรื่อยๆ และมีสภาพคงตัวมากขึ้น



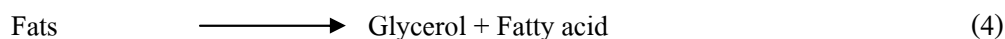
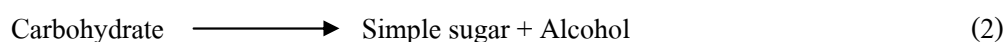
ปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียสามารถแบ่งได้ 4 ขั้นตอน (John Wiley and Sons, 1994) คือ การไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis) การอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis) และการสร้างมีเทน (Methanogenesis) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2-1



ภาพประกอบที่ 2-1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ
ที่มา : Holland et al. (1987)

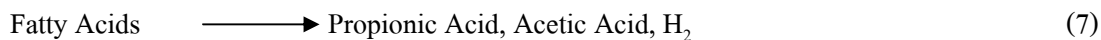
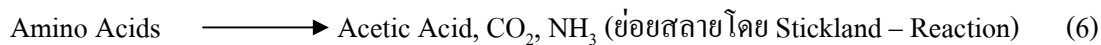
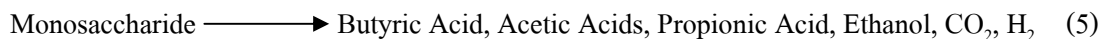
1. กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

กระบวนการนี้เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า กระบวนการแตกสลายพอลิเมอร์ (Polymer Break-Down) การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน (Complex Organic Compound) ให้กลายเป็นสารอินทรีย์เชิงเดี่ยวโดยที่ยังไม่มีการลดจำนวนสารอินทรีย์แต่อย่างใด แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้เป็นพวก Hydrolytic Bacteria และ Fermentative Bacteria ผลของปฏิกิริยาจะได้อินทรีย์ประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลไม่ซับซ้อนและละลายน้ำได้ เช่น การย่อยสลายแป้งซึ่งเป็นสารประกอบประเภทคาร์โบไฮเดรตให้อยู่ในรูปของน้ำตาลโมเลกุลเล็กกลึงคือน้ำตาลกลูโคส การย่อยสลายโปรตีนให้อยู่ในรูปของกรดอะมิโน และการย่อยสลายไขมันให้อยู่ในรูปของกรดไขมัน เป็นต้น ดังแสดงในสมการที่ (2)-(4) โดยสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ในตอนแรกจะเป็นพวก Simple Soluble Compound จะถูกทำให้ละลายน้ำและเคลื่อนย้ายเข้าไปในเนื้อเยื่อในเซลล์ต่อไปซึ่งใช้เอนไซม์ที่ขับออกมาสู่ภายนอกเซลล์ (Extra Cellular Enzyme) ของแบคทีเรียจำพวก Hydrolytic Bacteria ชนิดและปริมาณของแบคทีเรียในถังหมักจะเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของความเข้มข้นสารอินทรีย์และสภาพแวดล้อมภายในระบบ เช่น pH และอุณหภูมิ เป็นต้น



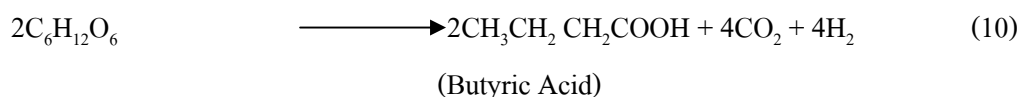
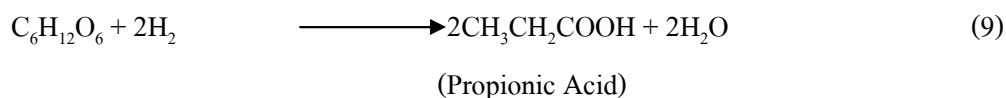
2. กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเดี่ยวที่ได้จากกระบวนการไฮโดรไลซิส โดยจะถูกแบคทีเรียพวกสร้างกรด (Acidogenic Bacteria) ดูดซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าสู่เซลล์ และใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานโดยกระบวนการหมัก (Fermentation) ผลของปฏิกิริยาจะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงเดี่ยวให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) ที่มีโมเลกุลคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอมเช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid) กรดฟอร์มิก (Formic Acid) กรดโพรพิโอนิก (Propionic Acid) กรดไอโซบิวทีริก (Isobutyric acid) กรดวาเลอริก (Valeric Acid) กรดไอโซวาเลอริก (Isovaleric Acid) และกรดบิวทีริก (Butyric Acid) เป็นต้น ดังแสดงในสมการที่ (5)-(7) (Banerjee, *et al.* 1998) นอกจากนี้ยังได้แอลกอฮอล์ ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อีกด้วย

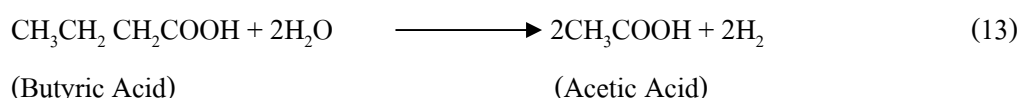
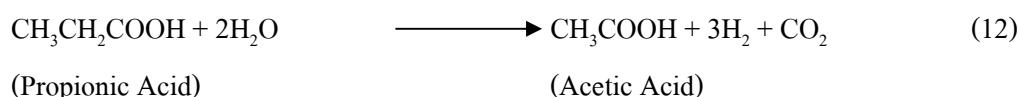
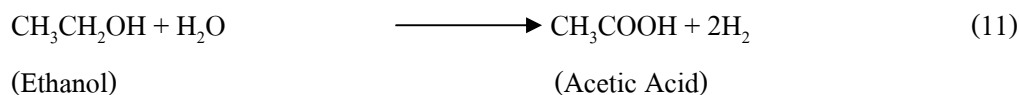


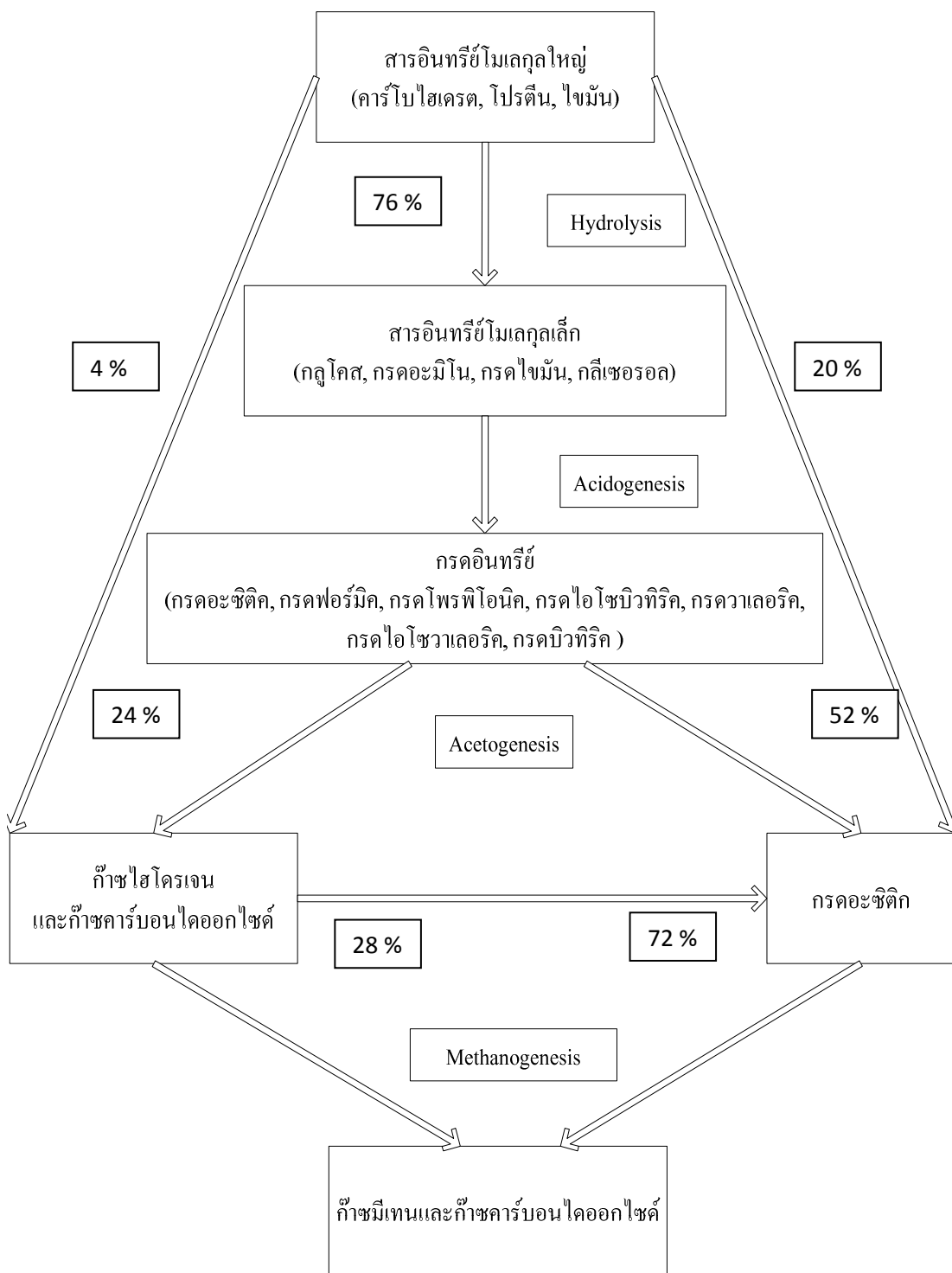
3. อะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis)

อะซิโตเจเนซิสเป็นกระบวนการที่นำกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็กจากกระบวนการอะซิโตเจเนซิสที่มีปริมาณคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม มาเปลี่ยนให้กลายเป็นอะซิเตท (Acetate) ฟอर्मेट (Formate) ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญในการสร้างก๊าซมีเทน โดยใช้ Acetogenic Bacteria ขั้นตอนนี้ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการหลีกเลี่ยงการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยและไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงพอที่จะยับยั้งกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน ตัวอย่างกระบวนการย่อยสลายกลูโคสไปเป็นกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ (Thiele, 1991) แสดงดังสมการ (8)-(10)



ตัวอย่างปฏิกิริยาในการเปลี่ยนกรดอินทรีย์และแอลกอฮอล์ที่เกิดขึ้นไปเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจน (Gourdon, 1989) แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้ (11)-(13)





ภาพประกอบที่ 2-2 ขั้นตอนและร้อยละของสารอินทรีย์ที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

2.3 เทคโนโลยีการหมักร่วม (Co-Digestion)

การหมักร่วม (Co-Digestion) เป็นกระบวนการหมักร่วมกันระหว่างสองวัตถุดิบหรือมากกว่า กระบวนการหมักแบบไร้อากาศในอดีตจะใช้วัตถุดิบเพียงชนิดเดียวในการหมัก ทำให้ได้ผลได้ของมีเทนน้อย (Parawira *et al*, 2004) ในปัจจุบันได้มีการนำวัตถุดิบหลายชนิดมาหมักร่วมกัน หลักเกณฑ์พื้นฐานสำหรับการเลือกวัตถุดิบนั้นจะต้องประกอบไปด้วยวัตถุดิบหลักและวัตถุดิบรอง วัตถุดิบหลักส่วนใหญ่เป็นพวกมูลสัตว์หรือกากตะกอน (Manure, Sewage Sludge) และวัตถุดิบรองเป็นพวกที่มีเส้นใยในปริมาณที่สูง เนื่องจากเส้นใยจะมีสารประกอบพวกเซลลูโลส ในปริมาณที่มากส่งผลให้เกิดก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น (Hong และ David, 2007) แต่สำหรับไบโม่บางชนิดจะไม่เหมาะสมที่จะนำมาหมักร่วม เนื่องจากมีความเป็นพิษในตัวเอง ได้แก่ ไบโม่ Calotropts ซึ่งมีสาร Cardiotomic (Sharma *et al*, 1999) โดยการหมักร่วมช่วยให้เกิดความสมดุลระหว่างค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) และช่วยเพิ่มค่า C/N Ratio ให้สูงขึ้นกว่าการหมักด้วยวัตถุดิบเพียงชนิดเดียว โดยค่า C/N Ratio มีส่วนช่วยให้ยังยั้งการเปลี่ยนแปลงไนโตรเจนส่วนเกินไปเป็นแอมโมเนียอันเป็นตัวยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพ โดยทั่วไปค่า C/N Ratio ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศอยู่ช่วง 8-23 การหมักร่วมนอกจากช่วยเพิ่มผลได้ของมีเทนในก๊าซชีวภาพ ยังมีข้อดีและข้อจำกัดบางประการแสดงดังตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2-5 แสดงข้อดีและข้อจำกัดของการหมักร่วมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

ข้อดี	ข้อจำกัด
<ul style="list-style-type: none"> ● ช่วยปรับปรุงความสมดุลของสารอาหารในการหมัก ● ช่วยให้วัตถุดิบเกิดความเข้ากัน ● ช่วยเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพ ● ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดของเสีย ● ช่วยเพิ่มปริมาณปุ๋ยที่ได้ ● เป็นการนำชีวมวลมาใช้ให้เกิดประโยชน์ 	<ul style="list-style-type: none"> ● เป็นการเพิ่มค่า COD ที่ปล่อยออก ● เป็นการเพิ่มกระบวนการผลิต ● ขึ้นอยู่กับพื้นที่และปริมาณของชีวมวลที่ใช้ ● ขึ้นอยู่กับราคาของชีวมวลที่ใช้

ที่มา: <http://home.eng.iastate.edu/~tge/ce421-521/wei.pdf>

2.4 ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ประกอบด้วยการทำงานของแบคทีเรีย 2 กลุ่มหลักๆ ที่เกี่ยวข้องกันได้แก่ แบคทีเรียพวกที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน (Non Methanogenic Bacteria) และแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic Bacteria) ซึ่งหากมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นในแบคทีเรียกลุ่มใด ย่อมส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานทั้งระบบ ดังนั้น สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมจึงส่งผลต่อการทำงานแบคทีเรีย ซึ่งเป็นกรณีที่จะบ่งชี้ให้เห็นถึงประสิทธิภาพโดยรวมของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณของถังหมัก ดังนั้น ระบบที่มีประสิทธิภาพสูงจะผลิตก๊าซได้มากกว่าระบบที่มีประสิทธิภาพต่ำสำหรับถังหมักขนาดเท่ากัน หรืออีกนัยหนึ่งถ้าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้สูงขึ้นได้สามารถลดขนาดของถังหมักได้ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนการผลิตลงได้ ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 2 ประการด้วยกัน คือ องค์ประกอบทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Parameter) และองค์ประกอบทางด้านการทำงานของถังหมัก (Operational Parameter) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2-6 (Grady *et al*, 1999)

ตารางที่ 2-6 องค์ประกอบที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการหมักในสภาวะไร้อากาศ

Environmental Parameters	Operational Parameters
1. pH	1. Raw Materials
2. Alkalinity	2. Physical State of Organic Substance
3. Volatile Acid concentration	3. Mode of Operation
4. Temperature	4. Organic Loading
5. Nutrient Availability	5. Hydraulic Retention Time
6. Toxic Substances	6. Solid Retention Time
7. Mixing	

2.4.1 องค์ประกอบด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental Parameter)

1) ความเป็นกรดต่าง (pH) ความเป็นด่าง (Alkalinity) และ กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty Acid or VFA)

ปัจจัยนี้มีความสัมพันธ์กัน โดยตรงอย่างเห็นได้ชัดต่อระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยตรง ซึ่ง pH มีส่วนสำคัญต่อระบบเป็นอย่างมากสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ใช้ อากาศและไร้อากาศ กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงของ pH จะส่งผลโดยตรงกับค่า Alkalinity และ VFA เมื่อค่าของ pH ลดลงปริมาณของ Alkalinity จะลดลงตามไปด้วย ส่วน VFA จะมีค่าเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันถ้าค่าของ pH เพิ่มขึ้น ปริมาณของ Alkalinity เพิ่มขึ้นและ VFA จะมีค่าลดลง เนื่องมาจากเมื่อความเข้มข้นของ VFA ภายในระบบเพิ่มขึ้น ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตก็จะถูก ทำลายไป การทำลายความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์นี้เป็นสาเหตุทำให้ pH ลดลง

Alkalinity หมายถึง ความเป็นด่างในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะ ไร้อากาศส่วนใหญ่อยู่ในรูปไบคาร์บอเนต บ่งบอกถึงความสามารถของน้ำหรือของเหลวในการรับ โปรตอน (Proton) ที่เกิดมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์และ น้ำ ความเป็นด่างนี้จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงบัฟเฟอร์ (Buffering Capacity) ที่ดีให้แก่ระบบที่จะควบคุม pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญของแบคทีเรีย (คือความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนค่า pH) มีความสำคัญมากต่อการหมักวัสดุที่มีความเป็นกรดสูง ระบบมีความเป็นด่างสูงแสดงถึง ความสามารถรักษาค่า pH ของระบบให้คงตัวอยู่ได้นาน ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ได้ง่าย เมื่อมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณกรดในระบบความสามารถในการ รักษาระดับความเป็นกรด-ด่าง โดยทั่วไประบบควรมีสภาพด่างทั้งหมดประมาณ 1,000 – 1,500 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปแคลเซียม คาร์บอเนต (Metcalf and Eddy, 2004)

การปรับสภาพความเป็นด่างทำได้ 3 วิธี คือ

1. การเติมสารเคมี เช่น ปูนขาว โซเดียมไบคาร์บอเนต
2. การใช้วัสดุหมักร่วมกับวัสดุหมักอื่นที่มีในโตรเจนเป็นองค์ประกอบสูง
3. การนำส่วนที่เป็นสารละลายจากตะกอนที่ออกจากระบบหมักกลับมาใช้อีก

Volatile Fatty Acid หมายถึง การที่สารอินทรีย์ต่างๆ เช่น โปรตีน ไขมัน และ คาร์โบไฮเดรต ถูกแบคทีเรียที่เรียกว่า Acid Formers แยกสลายเป็นกรดอินทรีย์ โมเลกุลเล็กๆ หลายๆ ชนิดที่สำคัญ ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก (Propionic Acid) แล้วจึงถูกแบคทีเรีย พวก Methane Formers ย่อยสลายกลายเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ เกิดขึ้นจากการย่อยสลายในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรด การย่อยสลายที่ดีจะต้องมี ความสมดุลของกรดระเหย กล่าวคือ ต้องควบคุมไม่ให้อัตราการเกิดกรดระเหยเร็วกว่าอัตราที่ถูก

เปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน คือ จะต้องมีการระเหยเหลือปรากฏให้วัดได้น้อย เพราะเมื่อกรดนี้เกิดขึ้นมากจะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซทันที ดังนั้นการวัดปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยจึงมีความสำคัญในการตรวจสอบสถานะสมดุลของระบบสำหรับระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศระดับของกรดอะซิติกที่มีค่าเกิน 800 มิลลิกรัมต่อลิตร หรืออัตราส่วนของกรดโพธิโอไนคต่อกรดอะซิติกเกิน 1.4 จะทำให้ระบบเกิดการล้นเหลวได้ (Marchaim and Krause, 1993) และเมื่อปริมาณ Volatile Acid เพิ่มขึ้นจนเกินไป แสดงว่าระบบเสียสมดุล โดยปกติปริมาณ Volatile Acid ในถังหมักควรมีไม่เกิน 4,000 มิลลิกรัม/ลิตร ระบบที่ปกติควรมีค่าความเข้มข้นของ Volatile Acid ไม่เกิน 2000 มิลลิกรัม/ลิตร แต่ถ้าความเข้มข้นเพิ่มขึ้นถึง 8000-10000 มิลลิกรัม/ลิตร ก็เกิดเป็นพิษขึ้นได้โดยตรงกับระบบ วิธีการแก้พิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายทำได้โดยการเติมต่าง เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพิ่มระยะเวลาในการหมักวัตถุดิบ หรือมีการหมุนเวียน (Circulate) ของเสียกลับเข้ามาในระบบ

เนื่องจากค่า pH มีความสำคัญต่อการทำงานของแบคทีเรีย ซึ่งจะส่งผลต่อการทำงานของเอนไซม์และการเจริญที่แตกต่างกันไป ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศที่ต้องรักษาให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมประมาณ 6.5-7.5 (Archer and Kirsop, 1991) ซึ่งแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างกรดจะสามารถเจริญได้ดีในช่วง pH ต่ำประมาณ 4.0-6.0 ส่วนแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนจะเจริญได้ดีในช่วง pH ที่สูงกว่ามีค่าประมาณ 6.5-7.5 แต่ช่วงที่มีความเหมาะสมที่สุดประมาณ 7.0-7.2 ซึ่งเชื้อแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนจะมีความไวต่อค่า pH มากที่สุด ดังนั้นถ้ามีการเปลี่ยนแปลงค่า pH จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ ถ้า pH มีค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ ประสิทธิภาพของระบบจะลดน้อยลง และถ้า pH มีค่าต่ำกว่า 6.0 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงต่ำอย่างรวดเร็ว เนื่องจากที่สภาวะนี้จะช่วยยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียเหล่านี้ใช้กรดอินทรีย์ระเหยไม่ทันทำให้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยถูกสะสมเพิ่มมากขึ้น pH จึงลดลงต่ำอย่างรวดเร็ว ถ้า pH ลดต่ำลงถึง 4.5 – 5.0 จะทำให้แบคทีเรียสร้างมีเทนหยุดการเจริญเติบโต แต่สามารถป้องกันได้โดยการเติมสารเคมีจำพวกต่างๆ ลงไป เช่น ปูนขาว (CaO) โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) โซดาไฟ (NaOH) และ โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นต้น หรืออาจจะลดปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าระบบลง ในการใช้ต่างแก้หรือคาร์บอเนตปรับสภาพจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำเกิดสมดุลชั่วคราว เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศถูกดึงเข้าไปทดแทนคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ เพื่อสร้างต่างไบคาร์บอเนตทำให้ pH เพิ่มขึ้น แต่เมื่อแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาแทนที่ จะทำให้จุดสมดุลเคลื่อนไปจนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำสมดุลกับคาร์บอนไดออกไซด์ใน

บรรยากาศ ซึ่งแต่ละชนิดของแบคทีเรียจะมีระดับ pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของระบบที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. Hydrolytic Bacteria แบคทีเรียประเภทนี้จะเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับ pH ที่เป็นกลางและสามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับ pH และสามารถทนได้ถึงระดับ pH ต่ำที่ 4.5

2. Acidogenic Bacteria แบคทีเรียประเภทนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Hydrolytic Bacteria ที่สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับ pH ซึ่งสามารถทนได้ถึงระดับ pH ที่ 4.5 แต่โดยส่วนใหญ่แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดจะเจริญได้ดีที่ระดับ pH ที่เป็นกรดมากกว่า

3. Methanogenic Bacteria แบคทีเรียประเภทนี้จะเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับ pH ที่เป็นกลางเท่านั้น ในช่วง 6.5-7.5 และไม่ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับ pH ถ้าระดับ pH ต่ำกว่า 6.5 หรือมากกว่า 8.0 แบคทีเรียกลุ่มนี้อาจจะเกิดการหยุดการเจริญเติบโตชั่วคราวและสามารถไหลหลุดออกนอกระบบได้ ประสิทธิภาพในการย่อยสลายจะลดลง

2) อุณหภูมิ

อุณหภูมิถือเป็นอีกปัจจัยที่มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น อัตราการทำปฏิกิริยาของระบบก็จะเร็วขึ้นตามไปด้วย ช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบบไร้อากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 50-65 องศาเซลเซียส ช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 20-45 องศาเซลเซียส และช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 5-15 องศาเซลเซียส แต่จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศมีอยู่ 2 ช่วง ได้แก่ 30-35 องศาเซลเซียส ซึ่งแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงนี้เรียกว่า Mesophilic Bacteria และ 50-60 องศาเซลเซียส ซึ่งแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงนี้เรียกว่า Thermophilic Bacteria (Kim *et al*, 2002) โดยอุณหภูมิช่วง 40-50 องศาเซลเซียส กลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนจะถูกยับยั้ง (Gerardi, 2003) ในช่วง Thermophilic Temperature อัตราเร็วของปฏิกิริยาและประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะมากกว่าในช่วง Mesophilic Temperature (Ahn and Forster, 2002) อันส่งผลให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่าที่ระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์สั้นลงและลดปริมาณคั่งหมักลง (Pagilla *et al*, 2000; Zupancic and Ros, 2003) โดยอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในช่วง Thermophilic Temperature จะสูงกว่าอัตราการย่อยสลายที่ช่วง Mesophilic Temperature อยู่ประมาณ 1.9 เท่า (Bryant, 1979) แต่ส่วนใหญ่จะเดินระบบที่อุณหภูมิ 30-35 องศาเซลเซียส มากกว่า 50-60 องศาเซลเซียส เนื่องจาก

Thermophilic Bacteria มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยสิ่งแวดล้อม ไม่สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงมักประสบปัญหาในการควบคุมระบบการผลิตก๊าซได้ง่ายกว่า Mesophilic Bacteria จึงส่งผลให้มีความเสี่ยงในการล้มเหลวของระบบสูง อีกทั้งยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของระบบเนื่องจากต้องอาศัยระบบทำความร้อนซึ่งเป็นการยุ่งยากมากและส่งผลโดยตรงกับต้นทุนสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ และช่วง Mesophilic Temperature ยังเหมาะสมกับประเทศไทยมากกว่า เนื่องจากสภาพอากาศของประเทศไทยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงนี้ด้วย รายละเอียดกลุ่มแบคทีเรียแสดงในตารางที่ 2-7 และ 2-8 และการเปรียบเทียบการดำเนินระบบระหว่าง Mesophilic Digesters และ Thermophilic Digesters ในตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-7 อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน (Gerardi, 2003)

Temperature (°C)	Methane Production
35	Optimum
32-34	Minimum
21-31	Little, digester going "sour"
<21	Nil, digester is "sour"

ตารางที่ 2-8 ช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์ (Gerardi, 2003)

Feature	Mesophilic Digester	Thermophilic Digester
Loading rates	Lower	Higher
Destruction of pathogens	Lower	Higher
Sensitivity to toxicants	Lower	Higher
Operational costs	Lower	Higher
Temperature control	Less Difficult	More Difficult

ตารางที่ 2-9 การเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูง (Gerardi, 2003)

Bacteria Group	Temperature Range (°C)
Psychrophiles	5-25
Mesophiles	30-35
Thermophiles	50-60
Hyperthermophiles	>65

3) สารอาหาร (Nutrient)

แบคทีเรียที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศต้องการสารอาหารในการเจริญเติบโตหลายชนิด โดยทั่วไปสารอาหารแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ สารอาหารหลัก (Macronutrient) ได้แก่ คาร์บอน (C) ซึ่งมีส่วนสำคัญในการสังเคราะห์พลังงาน ไนโตรเจน (N) เป็นสารอาหารสำหรับการสังเคราะห์โปรตีน ฟอสฟอรัส (P) เป็นสารอาหารที่มีส่วนสำคัญสำหรับการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก ซัลเฟอร์ (S) และสารอาหารรอง (Micronutrient หรือ Trace Element) ที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่ม Methanogenic ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) โคบอลต์ (Co) ทองแดง (Cu) และนิกเกิล (Ni) สำหรับหน้าที่ของสารอาหารรองแสดงดังตารางที่ 2-10 ดังนั้นการควบคุมสภาวะให้เหมาะสมจึงต้องใส่อาหารเสริมให้เพียงพอแก่ความต้องการ เพราะของเสียที่เข้าสู่ระบบนั้น มีคุณสมบัติแตกต่างกันออกไป โดยทั่วไปของเสียเป็นมูลที่เกิดจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ และจากชุมชนจะจะมีปริมาณธาตุอาหารเหล่านี้สมดุลและเพียงพออยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเติมสารอาหารใดๆ ลงไปในระบบเพื่อหมักก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 2-10 ปริมาณสารอาหารรองที่จำเป็นต่อการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศ

สารอาหาร	ความเข้มข้น (g/l)	ผล
Fe ²⁺	0.2	ต่อ โครงสร้างฟิล์มชีว (Biofilm) การตกตะกอนของซัลไฟด์
Ni ²⁺	0.01 0.006	สร้าง F ₄₂₀ Co Factor ในพวก Methanogen เพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์
SO ₄ ²⁻	0.02	เพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์
CO ²⁺	0.03	เพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์

ที่มา : สุรพล 2530

4) สารยับยั้งและสารพิษ (Inhibiting and Toxic Materials)

สารบางอย่างหากมีปริมาณมากเกินไปในระบบจะส่งผลกระทบต่อการทำงานและการดำรงชีพของแบคทีเรีย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารชนิดต่างๆ ที่ปรากฏอยู่ในระบบด้วย สารเหล่านี้มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ แต่ในบางกรณีสารเหล่านี้ก็อาจกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรียให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นหากมีความเข้มข้นหรือปริมาณที่พอเหมาะ ในระบบการหมักแบบไร้อากาศซึ่งระดับความเป็นพิษจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารพิษ ตัวอย่างสารพิษได้แก่

a) ไอออนประจุบวกของโลหะเบา (Light Metal Cat Ion)

ไอออนประจุบวกของโลหะเบา ได้แก่ โซเดียม (Na^+) โพแทสเซียม (K^+) แคลเซียม (Ca^{2+}) และแมกนีเซียม (Mg^{2+}) ซึ่งเกิดขึ้นมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบหรืออาจเกิดจากการเติมสารเคมีเพื่อปรับ pH ในระบบ ซึ่งจะมีผลต่อการทำงานของแบคทีเรีย ซึ่งความเป็นพิษของมันเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปริมาณของไอออนประจุบวกของโลหะเบาด้วยว่ามีปริมาณมากน้อยเท่าใด ซึ่งถ้ามีความเข้มข้นที่พอเหมาะจะเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้ามีมากเกินไป ความจำเป็น จะเป็นพิษต่อแบคทีเรียแสดงดังตารางที่ 2-11

ตารางที่ 2-11 ความเข้มข้นกระตุ้นและยับยั้งของไอออนประจุบวกของโลหะเบา

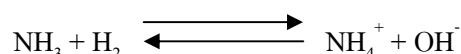
ไอออนประจุบวก	ความเข้มข้น (mg/l)		
	กระตุ้น	เริ่มยับยั้ง	ยับยั้งอย่างรุนแรง
โซเดียม	100-200	3,500-5,500	8,000
โพแทสเซียม	200-400	2,500-4,500	12,000
แคลเซียม	100-200	2,500-4,500	8,000
แมกนีเซียม	75-150	1,000-1,500	3,000

ที่มา : McCarty (1964)

จากตารางจะเห็นได้ว่าแบคทีเรียสามารถทำงานช่วงความเข้มข้นต่ำได้ดีกว่าในช่วงความเข้มข้นที่สูง โดยจะเริ่มเป็นพิษเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น สำหรับมูลสัตว์โดยทั่วไป ปริมาณความเข้มข้นของสารเหล่านี้ยังไม่มากจนเป็นพิษต่อการดำรงชีพของแบคทีเรีย อย่างไรก็ตาม ในการเลี้ยงสัตว์ต่างๆ อาจมีการใช้ยาปฏิชีวนะซึ่งผลตกค้างจะอยู่ในมูลสัตว์ เมื่อนำมูลสัตว์ไปเติมลงในบ่อหมัก อาจจะทำให้แบคทีเรียตายหมดได้ดังนั้นจึงต้องระมัดระวังในเรื่องนี้

b) ก๊าซบางชนิด

ก. แอมโมเนีย (Ammonia) เป็นสารที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยไนโตรเจนภายใต้สภาวะไร้อากาศ เช่น โปรตีน ยูเรีย เป็นต้น เป็นแอมโมเนียไนโตรเจนซึ่งไนโตรเจนอาจอยู่ในรูปของ แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) หรือก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) โดยทั้งสองตัวนี้จะเปลี่ยนไปเปลี่ยนมาขึ้นอยู่กับ pH ดังสมการ



ถ้า pH ต่ำกว่า 7.2 จะมี NH_4^+ มากกว่า แต่ถ้า pH สูงกว่า 7.2 จะมี NH_3 มากกว่า ซึ่งจะยับยั้งการทำงานและมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียมากกว่า NH_4^+ แอมโมเนียเมื่ออยู่ในรูปของ NH_3 จะเป็นพิษก็ต่อเมื่อมีความเข้มข้นประมาณ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ในรูปของ NH_4^+ จะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้นสูงเท่ากับ 7,000-9,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ข. ซัลไฟด์ (Sulfide) ในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศซัลไฟด์สามารถอยู่ได้ทั้งในรูปของสารละลาย หรือก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เกิดขึ้นจากซัลเฟต (Sulfate) ที่มีอยู่ในน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบหรือเกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ เช่น โปรตีน ซึ่งซัลไฟด์ที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียต้องเป็นซัลไฟด์ที่ละลายน้ำเท่านั้นและมีความเข้มข้นสูงกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสามารถเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟูริกได้ ความเป็นพิษจะเกิดขึ้นเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 200 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อโลหะหนักทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์สร้างผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายน้ำขึ้น ดังนั้นการเติมโลหะบางชนิด เช่น เหล็ก สามารถลดความเป็นพิษของซัลไฟด์ละลายได้ การทำให้ซัลไฟด์ตกตะกอน และอาจทำการเจือจางน้ำเสียหรือทำการแยกซัลไฟด์ออกจากน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบ ซัลไฟด์จะถูกแยกออกมาอยู่ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ดังนั้นความเข้มข้นของซัลไฟด์ละลายขึ้นอยู่กับ pH ของของเหลวและส่วนประกอบของก๊าซ

ค) โลหะหนัก (Heavy Metal) สำหรับโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียหรือของเสียอินทรีย์ได้บ่อยและมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มที่ไร้อากาศ ได้แก่ เหล็ก ดีบุก ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง แคดเมียม โคบอล โครเมียม นิเกิล เป็นต้น ซึ่งไอออนของโลหะหนักเหล่านี้เป็นพิษต่อแบคทีเรียและพิษของโลหะหนักก็ขึ้นอยู่กับว่าเกลือของโลหะหนักนั้นจะละลายน้ำ ได้มากน้อยเพียงใด และพิษของโลหะหนักจะมากหรือน้อยเพียงใดก็ขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มข้นของ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีอยู่ในของเสียนั้น แสดงดังตารางที่ 2-12 เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์จะรวมตัวกับโลหะหนักเกิดเป็นเกลือซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำและตกตะกอน ถ้าของเสียนั้นมีปริมาณซัลไฟด์ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนได้ ก็จะต้องเติมเกลือซัลไฟด์หรือเกลือซัลเฟตลงไป เกลือทั้งสองชนิดจะถูกรีดิวซ์ไปเป็นซัลไฟด์ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ทำให้สามารถลดพิษของโลหะหนักลงได้ แม้ว่าโลหะหนักจะเป็นพิษ แต่โลหะหนักบางประเภทยังมีความจำเป็นสำหรับการดำรงชีวิตของแบคทีเรีย ตัวอย่างเช่น นิเกิลหรือโคบอลต์ เป็นต้น แต่ต้องมีปริมาณที่ไม่มากเกินไป

ตารางที่ 2-12 ระดับความเป็นพิษของโลหะหนักในการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (mg/l)		
	ยับยั้ง	เป็นพิษ	หยุดทำงาน
Cr(III)	130	260	<200
Cr(VI)	110	420	<180
Cu	40	70	<50
Ni	10	30	>30
Cd	-	>20	>10
Pb	340	>340	>250
Zn	400	600	<1,700

ที่มา : Hayes and Theis (1978)

5) การกวน (Mixing)

การกวนเป็นสิ่งสำคัญในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ เป็นการทำให้ของผสมที่อยู่ในระบบผสมกันและเกิดการสัมผัสกันอย่างทั่วถึง มีส่วนช่วยในการกระจายความร้อนให้อุณหภูมิเท่ากันตลอด ทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างสารอาหารกับแบคทีเรีย และป้องกันการเกิดการสะสมของสารอินทรีย์ตามจุดต่างๆ ของถังหมัก และทำให้วัตถุดิบภายในถังหมักผสมกันจนมีสภาพเป็นเนื้อเดียวกัน รวมทั้งเพื่อป้องกันการเกิดตะกอนลอย (Scum) บริเวณส่วนบนของถังหมักด้วย กล่าวโดยสรุปการกวนผสมเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอีกทางหนึ่งซึ่งจะช่วยให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น แต่การกวนผสมมากเกินไปจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอาหารได้ดีจนเกินไป จนอาจเกิดการลดอินทรีย์ระเหยง่ายในปริมาณที่สูงเกินไปจนส่งผลกระทบต่อการทำงานและการดำรงชีพของแบคทีเรียประเภทสร้างมีเทน แต่อย่างไร

ก็ตามการใช้อัตราการกวนน้อยที่สุดจะดีกว่าการกวนแบบต่อเนื่องตลอดเวลาและการกวนช้าจะให้ผลดีกว่าการกวนเร็ว จำนวนครั้งในการกวนจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการย่อยสลาย กรรมวิธีในการกวนของวัตถุดิบภายในถังหมักมีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป การที่จะเลือกใช้วิธีไหนต้องคำนึงถึงปัจจัยในหลายๆ ด้านประกอบกัน วิธีในการกวนของเหลวในถังหมักมีหลายวิธี เช่น

- 1) ใช้เครื่องสูบลมผ่านท่อ (Pumping Draft Tube)
- 2) ใช้เครื่องกวน (Mechanical Mixing)
- 3) หมุนเวียนตะกอนด้วยปั๊ม (Recycling of Sludge by Pump)

6) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio)

เป็นค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนในสารอินทรีย์และมีความสำคัญต่อการย่อยสลายทางชีววิทยาเป็นอย่างยิ่ง กล่าวคือ คาร์บอนและไนโตรเจนจะถูกแบคทีเรียนำไปสร้างเป็น โปรโตพลาสซึมของเซลล์ใหม่และสร้างกำบังบัพเฟอร์ให้กับระบบ ค่าอัตราส่วน C/N ที่เหมาะสมในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศอยู่ในช่วง 8-23 (อธี, 2546) ถ้าอัตราส่วน C/N มีค่าสูงเกินไป ไนโตรเจนจะมีไม่เพียงพอเนื่องจากถูกใช้หมดอย่างรวดเร็ว ผลคืออัตราการเกิดเซลล์ของแบคทีเรียลดน้อยลง ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีปริมาณน้อย ในทางกลับกันถ้าหากอัตราส่วน C/N มีค่าต่ำเกินไป ไนโตรเจนจะมีมากเกินไปจนเป็นการทำงานที่เกินของแบคทีเรีย ทำให้เปลี่ยนมาสะสมอยู่ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน ซึ่งจะเป็นตัวขัดขวางการทำงานของระบบ ดังนั้นการมีแอมโมเนียไนโตรเจนในปริมาณที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อระบบ มูลสัตว์ เช่น มูลวัว มูลสุกร จะเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมในการย่อยสลาย เนื่องจากมีค่าอัตราส่วน C/N เฉลี่ยประมาณ 24 ส่วนพวกพืช เช่น ฟาง ข้าว ขี้เถ้า จะมีอัตราส่วน C/N สูง และสิ่งขบถ่ายของมนุษย์จะมีค่าอัตราส่วน C/N ที่ค่อนข้างต่ำ ประมาณ 8 สำหรับค่าที่นำมาใช้คำนวณอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะเป็นปริมาณคาร์บอนและปริมาณไนโตรเจนที่ย่อยสลายได้ การปรับสภาพอัตราส่วน C/N ให้กับวัตถุดิบที่ใช้ในการย่อยสลายให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยการเติมวัตถุดิบอีกชนิดที่มีอัตราส่วน C/N สูงกว่าหรือเติมไนโตรเจนโดยตรงให้กับวัสดุหมัก

2.4.2 องค์ประกอบทางด้านการทำงานของถังหมัก (Operational Parameter)

1) วัตถุดิบ

สารอินทรีย์ทุกชนิด เช่น มูลสัตว์ชนิดต่างๆ เศษพืชผักผลไม้ต่างๆ ฯลฯ สามารถนำมาผลิตก๊าซชีวภาพได้ อย่างไรก็ตามความยากง่ายในการหมักหรือปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นต่อหน่วยน้ำหนักของสารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับความความยากง่ายในการสลายตัวของสารอินทรีย์ เช่น มูลวัวซึ่งกินหญ้าเป็นอาหารจะมีสารอินทรีย์พวกลิกนินและเซลลูโลสมาก ทำให้ย่อยยาก และมีสารอินทรีย์ที่ย่อยได้เพียง 49% ส่วนมูลสุกรมีสารอินทรีย์พวกแป้งและโปรตีนมาจึงสามารถย่อยสลายได้ง่าย ก๊าซที่เกิดจากการหมักมูลสุกรจึงมีปริมาณมากกว่าเมื่อใช้เวลาในการหมักและปริมาณมูลเท่ากัน

2) สถานะทางกายภาพของอินทรีย์สาร

การย่อยสลายอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศนี้ หากสามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้อยู่ในสถานะที่แบคทีเรียสามารถย่อยสลายได้ง่ายที่สุดจะทำให้ประสิทธิภาพของถังหมักเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนสถานะทางกายภาพของสารอินทรีย์ อาจจะทำให้ได้แล้วแต่กรณี เช่น การนำวัตถุดิบมาผ่านการลดขนาดโดยการบด หรือกรณีใช้มูลสัตว์อาจนำมาเจือจางด้วยน้ำให้ปริมาณความเข้มข้นของมูลสัตว์น้อยลงแล้วกรองเอาภาคตะกอนส่วนที่ไม่ละลายน้ำทิ้งไป เหลือแต่ส่วนที่ละลายน้ำเติมลงในบ่อหมัก ซึ่งวิธีนี้นอกจากจะทำให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นแล้ว ยังช่วยลดการตกตะกอนของกากมูลในบ่อหมักและการอุดตันตามเส้นท่อต่างๆอีกด้วย

3) อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR)

เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่ใช้ในการกำหนดความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ การปรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้มีค่าแตกต่างกันทำได้โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของของเสีย (Flow Rate) ที่ไหลผ่านถังหมัก หรือเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของแข็งหรือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าไป ซึ่งการเปลี่ยนอัตราการป้อนสารอินทรีย์จะมีผลต่อระยะเวลาที่เก็บด้วยถ้าเวลากักพักนานเกินไปจะทำให้การก่อสร้างระบบมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องใช้ถังหมักขนาดใหญ่ และระบบอาจเกิดการล้นเหลวเนื่องจากระบบมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสูงขึ้น ทำให้ pH ลดต่ำลงตามมา และมีผลต่อการทำงานและการดำรงชีพของแบคทีเรียสร้างมีเทนในที่สุด ในทางตรงกันข้ามหากใช้เวลาที่กักพักสั้นเกินไป ความเร็วในการไหลของน้ำจะสูงแบคทีเรียเกิดการหลุดออกจากระบบ ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลงไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ค่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่เหมาะสมของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์

แบบไร้อากาศ อยู่ในช่วงประมาณ 1-15 kg VS/m³.d แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของระบบและอัตราการย่อยสลายของแบคทีเรียในระบบ (Barnet, 1978)

4) ระยะเวลาักเก็บ (Hydraulic Retention Time, HRT)

ระยะเวลาักเก็บเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการควบคุมประสิทธิภาพของกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ เป็นระยะเวลาทั้งหมดที่สารอินทรีย์อยู่ในระบบอัตราการย่อยสลายในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาักเก็บอินทรีย์สารจนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นก็ลดลงจนกระทั่งถึงขั้นหนึ่งที่แบคทีเรียถูกล้างออกจากระบบ (Washout) ในอัตราที่เร็วกว่าแบคทีเรียจะเพิ่มจำนวนขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลวได้ สามารถแก้ไขการที่แบคทีเรียถูกล้างออกจากระบบได้โดยการเพิ่มระยะเวลาักเก็บให้นานขึ้น (Wen *et al*, 1999) ระยะเวลาักเก็บที่เหมาะสมส่งผลให้แบคทีเรียมีปริมาณเพียงพอ นอกจากนี้ระยะเวลาักเก็บจะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบการหมัก กล่าวคือ ระยะเวลาักเก็บเป็นระยะเวลาที่ของเสียอยู่ในถังหมักสามารถหาได้โดยการหารปริมาตรถังหมักด้วยปริมาตรของเสียที่เติมลงไปในแต่ละหน่วยเวลา

ระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบ (Solid retention time, SRT) หมายถึง มวลของของแข็งภายในระบบหารด้วยมวลของของแข็งที่ปล่อยออกจากระบบต่อวัน ในถังหมักแบบธรรมดาที่ไม่มีการหมุนเวียนตะกอน มีระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบจะเท่ากับระยะเวลาักเก็บน้ำเสีย (SRT=HRT) แต่ในถังหมักที่มีการหมุนเวียนตะกอน มีระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบมากกว่าระยะเวลาักเก็บน้ำเสีย (SRT>HRT)

$$HRT = SRT = \frac{\text{Volume}}{\text{FlowRate}} = \frac{V}{Q}$$

2.5 วิธีทำงานของระบบย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศ

การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกริยาจำแนกตามลักษณะการป้อนสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี ดังต่อไปนี้

1) การทำงานระบบแบบแบทช์ (Batch Operation)

เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกริยาเพียงครั้งเดียวให้เต็มระบบในขณะที่เริ่มต้นระบบ (Start Up) หลังจากนั้นจะปล่อยให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในระบบและจะไม่มีสารอินทรีย์เพิ่มเข้าไปอีก สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายจนหมดสังเกตได้จากไม่มีก๊าซเกิดขึ้น จึงถ่ายหรือสูบล้างทิ้งไป แล้วเติมสารอินทรีย์เข้าไปใหม่ ระบบนี้เหมาะสมกับวัตถุดิบที่ปริมาณมากๆ แต่นานๆ จึงจะมีสักครั้ง การหมักแบบนี้ประสิทธิภาพไม่ดีนักและเสถียรภาพของระบบไม่คงที่ เนื่องจากปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ

2) การทำงานระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous Operation)

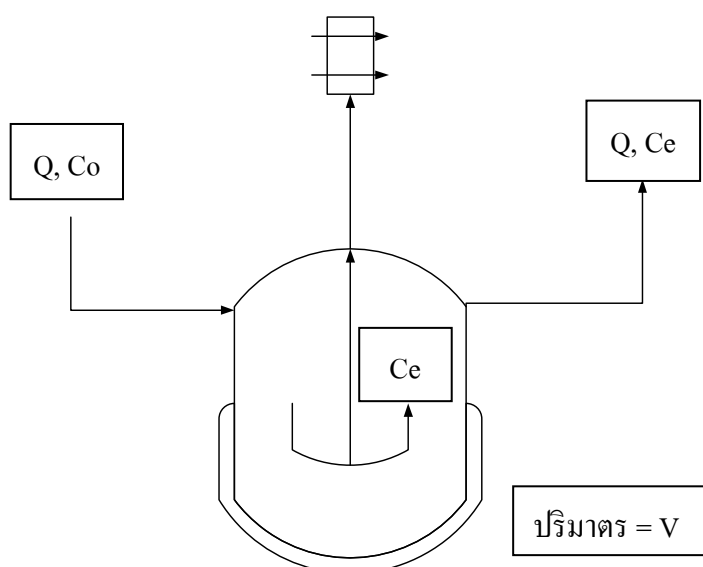
เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกริยาในลักษณะเป็นช่วงๆ แต่สม่ำเสมอ โดยจะมีการป้อนเข้าของสารอินทรีย์และถ่ายวัสดุหมักที่ผ่านการกำจัดสารอินทรีย์แล้วออกจากระบบหมักหรือถังปฏิกริยา เหมาะสำหรับใช้ในกรณีที่มีวัตถุดิบเป็นประจำจะมีท่อสำหรับป้อนวัตถุดิบลงในระบบและท่อสำหรับให้วัตถุดิบเก่าในระบบที่ผ่านการย่อยสลายแล้วไหลล้นออกมาหรือถ่ายทิ้ง ปกติจะเติมสารอินทรีย์ใหม่ทุกวันๆ ละครั้ง การหมักแบบนี้จะส่งผลดีต่อการทำงานของแบคทีเรีย เนื่องจากช่วยให้เกิดสภาวะคงตัว (Steady-State) ของระบบ เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างมีเทนไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่อความเข้มข้นของสารอาหาร ช่วยลดปัญหาอันเนื่องมาจากการที่สารอาหารเพิ่มเข้าสู่ระบบอย่างกะทันหัน (Shock Load) มีผลทำให้ประสิทธิภาพดีกว่าแบบครั้งคราว ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอใช้ทั่วไป

3) การทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous Operation)

เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกริยาอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา วัสดุหมักจะถูกย่อยสลายภายในระบบหมักหรือถังปฏิกริยาช่วงเวลาหนึ่งและถูกถ่ายออกจากระบบหมักหรือถังปฏิกริยาอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน ประสิทธิภาพของระบบจะสูงที่สุด แต่การเติมวัสดุหมักตลอดเวลาด้วยอัตราคงที่นั้น อาจทำได้ยากหากไร้อากาศ ดังนั้นในทางปฏิบัติระบบนี้อาจจะมีความยุ่งยาก เมื่อนำไปใช้ผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็กในชนบท

2.6 แบบจำลองของถังปฏิกรณ์ระบบแบบกึ่งต่อเนื่องที่ใช้ในการวิจัย

ถังปฏิกรณ์ที่ใ้ใช้ในการวิจัยในสภาวะไร้อากาศ เป็นถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมburgh์ชนิดขั้นตอนเดียว (Single Stage Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) ประกอบไปด้วยถังหมักและใบพัดกวน สามารถรองรับวัสดุหมักที่เข้าสู่ระบบอย่างกะทันหันได้ดี แสดงดังภาพประกอบที่ 2-3 เนื่องจากการกวนผสมจะช่วยในการกระจายวัสดุหมักไปทั่วทั้งถังหมัก



ภาพประกอบที่ 2-3 ถังปฏิกรณ์ระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

ที่มา : เกรียงศักดิ์, 2535

เมื่อพิจารณาภาพประกอบที่ 2-3 และคุณมวลสารสามารถวิเคราะห์สมดุลถึงปฏิกิริยาระบบแบบกึ่งต่อเนื่องได้ดังนี้

$$[\text{เข้า}] - [\text{ออก}] \pm \begin{pmatrix} \text{อัตราการเพิ่มหรือลด} \\ \text{มวลสารของตัวทำปฏิกิริยา} \\ \text{เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยา} \\ \text{ภายในถังปฏิกรณ์} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{อัตราการเปลี่ยนแปลง} \\ \text{มวลสารของตัวทำปฏิกิริยา} \\ \text{ภายในถังปฏิกรณ์} \end{pmatrix}$$

$$QCo - QCe + r(C)V = \frac{(dCV)}{dt}$$

เมื่อสภาวะภายในถังคงที่

$$\frac{dC}{dt} = 0$$

$$QCo - QCe + r(C)V = 0$$

$$\frac{Q}{V}(Co - Ce) + r(C) = 0$$

$$(Co - Ce) + tr(C) = 0$$

$$r(C) = \frac{(Co - Ce)}{t}$$

เมื่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์เป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (Cechi *et al*, 1991)

$$r(C) = -kCe$$

แทนค่า $r(C)$ ลงในสมการ

ดังนั้น สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง จะได้

$$\frac{Co}{Ce} = kt + 1$$

2.7 ระบบกักเก็บก๊าซชีวภาพ

การออกแบบระบบสำหรับส่วนพักก๊าซชีวภาพจากระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ สำหรับฟาร์มเลี้ยงสัตว์โดยทั่วไปมีด้วยกัน 3 แบบจำแนกตามลักษณะการกักเก็บ ดังต่อไปนี้ (Metcalf and Eddy, 2004)

1. แบบลอย (Floating Type) จะมีภาชนะคลุมรอบบ่อหมัก โดยภาชนะที่ใช้จะมีน้ำหนักน้อยสามารถเคลื่อนที่ขึ้นได้เมื่อมีก๊าซดันขึ้นไป แบบนี้จะต้องป้องกันไม่ให้เกิดการผสมกันของอากาศกับก๊าซที่เกิดขึ้น ระบบจะต้องมีท่อก๊าซที่ติดตั้งไว้แล้วเพื่อควบคุมความดัน กรณีมีก๊าซเต็มภาชนะจะมีตัวจุดไฟทำลายก๊าซที่มีมากเกินไป

2. แบบยึดกับที่ (Fixed Type) ภายในบ่อจะมีช่องว่างระหว่างหลังคาของบ่อหมัก และของเหลวในบ่อ เพื่อใช้ในการเก็บก๊าซชีวภาพที่ผลิตขึ้นมา จากนั้นส่งไปยังส่วนเก็บก๊าซภายนอกบ่อ ภายในช่องว่างมักมีการติดตั้งมิเตอร์วัดความดันก๊าซที่มากเกินไปจะถูกกำจัดโดยการจุดไฟเผาทิ้ง

3. แบบเมมเบรน (Membrane Type) ส่วนที่ใช้คลุมบ่อมีลักษณะเป็นใยสังเคราะห์ที่ยืดหยุ่นได้ สามารถขยายออกไปคล้ายถุงหรือโดมเมื่อมีปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้น ระบบกักเก็บก๊าซชีวภาพแบบนี้เป็นที่นิยมนักทั่วไป เนื่องจากเป็นรูปแบบที่สะดวกต่อการติดตั้ง ประหยัดค่าใช้จ่ายและง่ายสำหรับการดูแลรักษา

2.8 ข้อดีของระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ

การย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะไร้อากาศ มีข้อดีหลายประการ ดังต่อไปนี้ (Rao *et al*, 2000)

1. ระบบบำบัดสารอินทรีย์แบบไร้อากาศนี้ไม่ต้องการออกซิเจนเลยซึ่งต่างจากระบบบำบัดแบบมีออกซิเจน ทำให้สามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการให้อากาศกับระบบ
2. สามารถทำงานได้ดี หลังจากที่มีการหยุดทำงานไปชั่วเวลาหนึ่ง โดยไม่ต้องมีการเริ่มเลี้ยงแบคทีเรียใหม่
3. ได้ก๊าซมีเทนมาเป็นแหล่งของพลังงาน
4. สามารถใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหามลพิษจากการกำจัดของเสีย
5. สามารถลดปรากฏการณ์เรือนกระจกจากก๊าซที่มีผลกระทบต่อชั้นบรรยากาศ โดยการเปลี่ยนให้เป็นพลังงานนำมาใช้

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.9.1 การหมักร่วมระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

Berna และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะไร้อากาศจากการหมักร่วมระหว่าง Cheese whey กับมูลโคในถังหมักระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ใช้ไบโพดกววนเป็นตัวกวนผสมด้วยความเร็วรอบ 0.3 รอบต่อนาที ขนาดถังหมัก 26.6 ลิตร และปริมาตรใช้งาน 20 L ไม่ได้ใช้เชื้อเริ่มต้น (Inoculums) ในการเริ่มต้นระบบ ได้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 25°C และ 34°C โดยได้ทำการศึกษาปัจจัยของปริมาณของแข็งเริ่มต้นของวัสดุหมัก (% TS) ที่ TS 8% และ TS 10% ที่ระยะเวลาการกักเก็บ (HRT) แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 5, 10, และ 20 วัน ตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ จากการทดลองพบว่าที่ปริมาณของแข็งเริ่มต้น 8 % TS และที่ระยะเวลาการกักเก็บ 5 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณสูงสุด คือ 1.510 m³/m³/d ปริมาณร้อยละของก๊าซมีเทนที่ 60 ที่ประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงสุดที่ 54% ส่วนประสิทธิภาพการกำจัด TS และ VS สูงสุดเท่ากับ 49.4% และ 49.5% ตามลำดับที่ระยะเวลาการกักเก็บ 10 วัน และพบว่าปริมาณผลได้ของก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะเวลาการกักเก็บให้มากขึ้นสำหรับปริมาณของแข็งเริ่มต้นที่ TS 8% และ TS 10% ส่วนปัจจัยของอุณหภูมิพบว่า ที่อุณหภูมิ 34°C สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีกว่าที่อุณหภูมิ 25°C

Rene และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะไร้อากาศจากการหมักแบบร่วมระหว่างมูลสุกร เศษผลไม้ เศษผัก และของเสียจากโรงฆ่าสัตว์จากปัจจัยของอัตราการป้อนของสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ (OLR) และสัดส่วนของวัสดุป้อนโดยได้ปรับเปลี่ยนสัดส่วนของวัสดุที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ภายในถังหมักระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ขนาดถังหมัก 2 ลิตร และปริมาตรใช้งาน 1.8 ลิตร ดำเนินการภายในอุณหภูมิช่วงปานกลาง (Mesophilic) ที่อุณหภูมิ 35°C และได้ใช้เชื้อเริ่มต้นในการเริ่มต้นระบบ จากการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยน OLR อยู่ในช่วง 0.14-0.34 m³/kg VS โดยควบคุมระยะเวลาการกักเก็บให้คงที่ และได้ปรับเปลี่ยนสัดส่วนของวัสดุป้อนในสัดส่วนต่างๆ ผลการทดลองปรากฏว่าเมื่อทำการหมักร่วมระหว่างสองวัตถุดิบขึ้นไปจะช่วยเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นกว่าการหมักเพียงวัตถุดิบเดียว สังเกตได้จากปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณผลได้ของก๊าซมีเทน

2.9.2 การหมักร่วมโดยใช้ของเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นวัตถุดิบ

Jewell และคณะ (1993) ได้ศึกษาผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียจากการเพาะปลูกทางการเกษตร (Crops) มีการศึกษาปัจจัยของปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบ โดยพบว่าในระบบหมักที่มีของแข็งต่ำที่ TS 8 - 10 % ระบบจะมีความเหมาะสมที่สุด แต่ถ้าหากในระบบที่มีของแข็งอยู่สูงที่ TS 18 - 35 % พบว่าถ้าปริมาณของแข็งมากขึ้นมีผลให้ระยะเวลาการกักเก็บกาก (SRT) นานขึ้น และทำให้ระบบล้มเหลวเนื่องมาจากการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายหรือค่า pH ต่ำ ทำให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียและการขาดแคลนธาตุอาหารจำพวกธาตุโลหะ การเติมธาตุอาหารและการปรับค่า C/N Ratio ในของแข็งต่ำและของแข็งสูง พบว่าทำให้ระบบมีเสถียรภาพและมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพมากขึ้น จากผลการทดลองในถังหมักที่ใช้วัตถุดิบ 5 กิโลกรัม ที่อัตราการระการรับสารอินทรีย์ 18 g VS/kg/d ทำให้เกิดมีเทน 5.4 l / kg-d และที่อัตราการระการรับสารอินทรีย์ 24 g VS/kg/d ทำให้เกิดมีเทน 7.5 l/kg/d

Radvan และคณะ (1993) ได้ทำการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการหมักแบบแห้ง (Dry digestion) ในสภาวะไร้อากาศ โดยวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาเป็นของเหลือทิ้งทางการเกษตร ประกอบด้วย ฟางข้าว และเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นได้จากมูลวัว การทดลองนี้ได้มีการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อผลได้ของก๊าซชีวภาพ ประกอบไปด้วยการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ โดยอุณหภูมิที่ศึกษามีดังต่อไปนี้ 22°C, 30°C และ 37°C ปัจจัยของปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) โดย TS ทั้งหมดที่ศึกษามีดังต่อไปนี้ 13- 25% ปัจจัยของเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น โดยทำการทดลองใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากมูลวัว ในช่วง TS 5-15% และปัจจัยของการเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สูงขึ้นด้วยและพบว่าอุณหภูมิ 37°C ที่ใช้ในการทดลองเหมาะสมที่สุด ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดมีความเหมาะสมที่ TS 21% ผลของเชื้อจุลินทรีย์พบว่าเชื้อจากมูลวัวมากจะทำให้มีปริมาณแบคทีเรียมาก เป็นผลทำให้เกิดก๊าซชีวภาพเร็วขึ้น แต่ถ้ามากเกินไปจะทำให้เกิดการไม่สมดุลระหว่างจำนวนแบคทีเรียทำให้ค่า pH ต่ำได้ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้การเกิดก๊าซชีวภาพ การเติมแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO₃) เป็นการช่วยเพิ่มค่าอัลคาไลน์ตี (Alkalinity) แต่ถ้าเติมแคลเซียมคาร์บอเนตมากเกินไปส่งผลให้ค่า pH ลดลงเล็กน้อยซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพน้อยลง สภาวะที่ดีที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว คือ TS 21% อุณหภูมิ 37 °C ใช้เชื้อจุลินทรีย์จากมูลวัว TS 11% และใช้แคลเซียมคาร์บอเนต 2%

2.9.3 การหมักร่วมแบบต่อเนื่อง

Fantozzi และ Buratti (2009) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะไร้อากาศ โดยใช้สารอาหารที่แตกต่างกัน ในถังหมักแบบต่อเนื่อง (CSTR) ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการหมักที่อุณหภูมิปานกลาง ได้มีการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลอง การทดลองชุดแรกเป็นการศึกษาปัจจัยของสารอาหารที่แตกต่างกันที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วยสารอาหารที่ต่างกัน 3 ชนิด คือ มูลไก่ มูลสุกร และมูลวัว การทดลองชุดที่สองเป็นการศึกษาปัจจัยของเชื้อจุลินทรีย์ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ประกอบด้วยส่วนผสมจากสิ่งปลูกจากสัตว์ (มูลไก่และมูลวัว) และชีวมวล (เปลือกมะกอก) ผสมกับแหล่งของเชื้อจุลินทรีย์ (Inocula) ที่แตกต่างกัน โดยเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ คือ ของเหลวในรูเมนจากวัวและกากตะกอนจากฟาร์มสุกร จากผลการทดลองพบว่าการทดลองชุดแรก ส่วนผสมจากมูลสุกรกับมูลไก่ มีปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณมีเทนที่ผลิตได้สูงสุดที่สุด มีค่า $0.35 \text{ Nm}^3/\text{kg VS}$ และ $0.13 \text{ Nm}^3/\text{kg VS}$ การใช้มูลไก่เป็นสารอาหารและการใช้มูลสุกรร่วมกับมูลไก่จะเกิดก๊าซชีวภาพเร็วกว่าการใช้มูลวัวเป็นสารอาหาร การทดลองชุดที่สอง ส่วนผสมจากเปลือกมะกอกกับเชื้อจุลินทรีย์จากกากตะกอนของมูลสุกร มีปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณมีเทนที่ผลิตได้สูงสุด มีค่า $0.28 \text{ Nm}^3/\text{kg VS}$ และ $0.11 \text{ Nm}^3/\text{kg VS}$ ตามลำดับ ส่วนผสมจากมูลไก่กับเชื้อจุลินทรีย์จากกากตะกอนของมูลสุกร มีปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ใกล้เคียงกัน มีค่า $0.22 \text{ Nm}^3/\text{kg VS}$ และ $0.11 \text{ Nm}^3/\text{kg VS}$ ตามลำดับ

Shanmugam และ Horan (2009) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะไร้อากาศ ด้วยการหมักแบบร่วมใช้วัตถุดิบจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกหนัง (LF) กับขยะชุมชน (MSW) ในถังหมักแบบต่อเนื่อง โดยวัตถุดิบ LF อย่างเดียวไม่เหมาะสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพเนื่องจากมีค่า C/N Ratio ต่ำประมาณ 3.2 และมีความเป็นด่างสูง จึงได้ทำการหมักแบบร่วมกับ MSW เพื่อขจัดปัญหาดังกล่าว โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุดการทดลองเพื่อหาค่า pH และค่า C/N Ratio ที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ลดปริมาณแอมโมเนียที่เป็นตัวยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพ เพิ่มผลได้ของก๊าซชีวภาพและผลได้มีเทน การทดลองชุดแรกเป็นการศึกษาปัจจัยของค่า C/N Ratio ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการทดลองที่ค่า C/N Ratio แตกต่างกันว่า 5, 10, 15, 20, 30, LF และ MSW จากการทดลองพบว่าค่า C/N Ratio มีค่าเท่ากับ 15 มีปริมาณผลได้ก๊าซชีวภาพสูงที่สุดมีค่า 87.87 Nm mL/d การทดลองชุดที่สองเป็นการศึกษาปัจจัยของค่า pH ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการทดลองที่ค่า C/N Ratio มีค่าเท่ากับ 15 ทำการทดลองที่ค่า pH แตกต่างกันว่า 4.5, 5.5, 6.5, 7.5 และ 8.5 จากการทดลองพบว่าค่า pH มีค่าเท่ากับ 6.5 มีปริมาณผลได้ก๊าซชีวภาพสูงที่สุดมีค่า 170 Nm mL/d ส่วนที่ค่า pH มีค่าเท่ากับ 8.5 จะมีปริมาณแอมโมเนียสูงที่สุดถึง $2,473.06 \text{ mg/L}$ ซึ่งเป็นตัวยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพ ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของก๊าซชีวภาพมีค่าน้อย ส่วนที่ค่า

pH มีค่าเท่ากับ 4.5 จะมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (VFA) สูงสุดถึง 26,803 mg/L ซึ่งเป็นตัวยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพ ส่งผลให้ปริมาณผลได้ของก๊าซชีวภาพมีค่าน้อย จากทั้งสองชุดการทดลองพบว่า การหมักร่วมระหว่าง LF กับ MSW ช่วยลดปริมาณแอมโมเนียอันเป็นตัวยับยั้งการเกิดก๊าซชีวภาพและส่งผลให้ได้ผลได้ก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น

2.9.4 การหมักร่วมจากชีวมวล

Ali และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากผลมะกอก โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากมูลวัว ดำเนินการทดลองในถังหมักระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ภายใต้อุณหภูมิ 37 °C ทำการศึกษาที่ปริมาณ TS 5, 10, และ 15% ตามลำดับ และระยะเวลาการกักเก็บ 10, 20, 30, และ 40 วัน ตามลำดับที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ จากผลการทดลองพบว่า กากผลมะกอกสามารถนำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองคือ ปริมาณ TS 10% ที่ระยะเวลาการกักเก็บ 20 วัน

Jagadish และคณะ (1997) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลวัวกับใบไม้ ถังหมักที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบ Plug Flow โดยศึกษาปัจจัยของวัตถุดิบตั้งต้น อัตราการป้อนสารอินทรีย์ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ช่วงปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบที่ทำการศึกษายู่ในช่วง TS 14-18% ใบไม้ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยใบไม้หลายชนิด ก่อนนำมาใช้ในการทดลองมีการลดขนาดให้อยู่ในช่วง 15-20 เซนติเมตร จากผลการทดลองพบว่า ถังหมักแบบ Plug Flow สามารถผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลวัวกับใบไม้ได้ มีการกำจัดของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วง 40-60%

สมฤดี (2551) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับสาหร่ายหนาม ดำเนินการในชุดทดลองระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบเบทซ์และระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ใช้เชื้อจุลินทรีย์ในการเริ่มต้นระบบ เพื่อที่ศึกษาภาวะที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ได้แก่ สัดส่วนระหว่างวัตถุดิบระหว่างมูลสุกรกับสาหร่ายหนาม ปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบ อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ ผลการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทดลองคือ ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 2 kg VS/m³.d อัตราส่วนระหว่างมูลสุกรต่อสาหร่ายหนามที่ 50:50 ซึ่งให้ผลได้การผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.16 mlCH₄/mg VS_{removed}

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา โดยดำเนินการวิจัยและรวบรวมข้อมูลที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ซึ่งมีรายละเอียดของการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 การเก็บตัวอย่างวัสดุหมัก

3.1.1 การเก็บตัวอย่างวัตถุดิบมูลสุกร

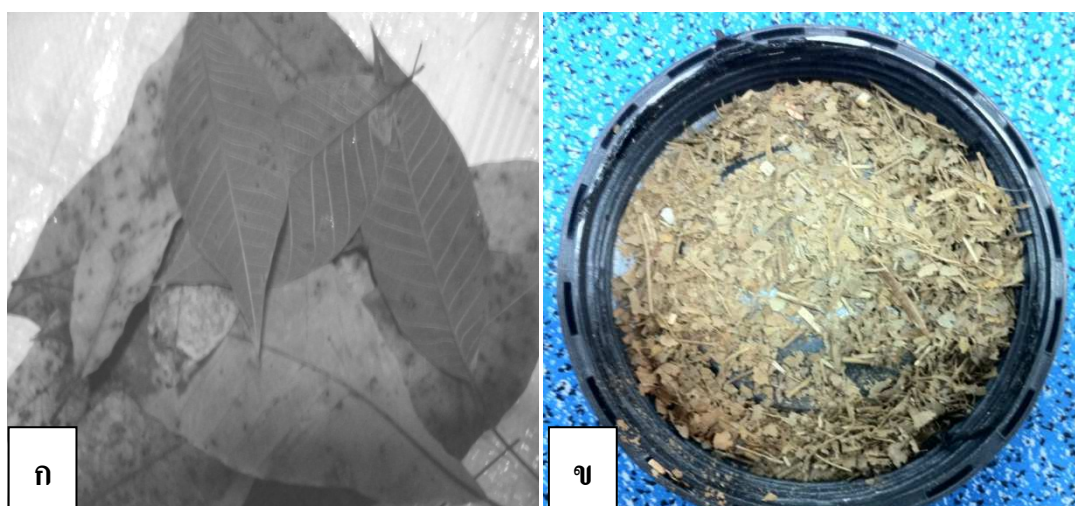
มูลสุกรที่ใช้สำหรับการทดลองเป็นมูลสุกรสดซึ่งเป็นมูลสุกรแม่พันธุ์ จับถ่ายไม่เกิน 24 ชั่วโมง ทำการเก็บมูลสุกรก่อนที่จะมีการล้างทำความสะอาดโรงเรือน ได้รับความอนุเคราะห์มูลสุกรจากภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ มูลสุกรที่ได้มีลักษณะค่อนข้างแข็งและแห้ง ภาพตัวอย่างมูลสุกรแสดงดังภาพประกอบที่ 3-1 ก่อนทำการทดลองต้องทำการบดละเอียดมูลสุกรด้วยการปั่นละเอียดด้วยเครื่องปั่น



ภาพประกอบที่ 3-1 ลักษณะมูลสุกรที่ใช้ในการทดลอง

3.1.2 การเก็บตัวอย่างวัตถุดิบใบยางพารา

วัตถุดิบใบยางพาราที่ใช้ในการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพเก็บรวบรวมได้จากใบยางพาราแห้งที่ร่วงบริเวณโคนต้นของต้นยางพาราพันธุ์ 600 จากสวนยางพาราในอำเภอควนเนียง จังหวัดสงขลา ทำการควบคุมคุณภาพของใบยางพาราให้เหมือนกันในทุกการทดลองด้วยการใช้ใบยางพาราที่มีลักษณะทางกายภาพที่เหมือนกัน โดยการพิจารณาจากสี ความสดเขียว และขนาดของใบยางพารา ซึ่งขนาดใบยางพาราเริ่มต้นมีขนาดประมาณ 5x4 ตารางเซนติเมตร แสดงดังภาพประกอบที่ 3-2 (ก) ทำการบดใบยางพาราด้วยเครื่องบดจนมีขนาดเล็ก แล้วนำมาหาขนาดด้วยตะแกรงร่อน อยู่ในช่วง Mesh No.4-7 แสดงดังภาพประกอบที่ 3-2 (ข) โดยผลของขนาดใบยางพาราที่ผ่านการบดแสดงดังตารางที่ 3-1 จากนั้นเก็บวัตถุดิบใบยางพาราบไว้ในถุงพลาสติกเพื่อกันความชื้น



ภาพประกอบที่ 3-2 ลักษณะใบยางพาราก่อนการบด (ก)
และลักษณะใบยางพาราหลังผ่านการบด (ข)

ตารางที่ 3-1 แสดงการกระจายขนาดของใบยางพาราหลังการบด

Sieve size (mm)	< 4.75	3.35- 4.75	2.81-3.35	> 2.81
% Residue	0.37	1.85	4.18	93.60

3.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุดิบเบื้องต้น

ก่อนเริ่มการทดลองการหมักร่วมเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพจะมีการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบมูลสุกรและใบยางพารา ตามรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3-2 วิธีวิเคราะห์คุณลักษณะวัสดุหมักชนิดมูลสุกรและใบยางพารา

Parameter	Objective	Method
1. ค่า pH	ความเป็นกรด-ด่างของระบบ	pH Meter
2. ปริมาณ COD	ปริมาณสารอินทรีย์	APHA 5220, 1998 (ภาคผนวก ก)
3. ปริมาณ TS (Total Solid)	สัดส่วนของแข็งในวัตถุดิบ	APHA 2540, 1998 (ภาคผนวก ก)
4. ปริมาณ TVS (Total Volatile Solid)	สัดส่วนสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ	APHA 2540, 1998 (ภาคผนวก ก)
5. ปริมาณ Alkalinity	การต้านการยับยั้งปฏิกิริยา	APHA 2310, 1998 (ภาคผนวก ก)
6. ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด (Total Volatile Fatty Acid, VFA)	การทำงานของแบคทีเรียสร้างกรด	APHA 2310, 1998 (ภาคผนวก ก)
7. ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen, TKN)	ปริมาณสารอาหาร	APHA 2310, 1998 (ภาคผนวก ก)
8. ปริมาณความชื้น (Moisture content)	ปริมาณน้ำในวัตถุดิบ	AOAC, 1995 (ภาคผนวก ก)

3.3 การทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักร่วม

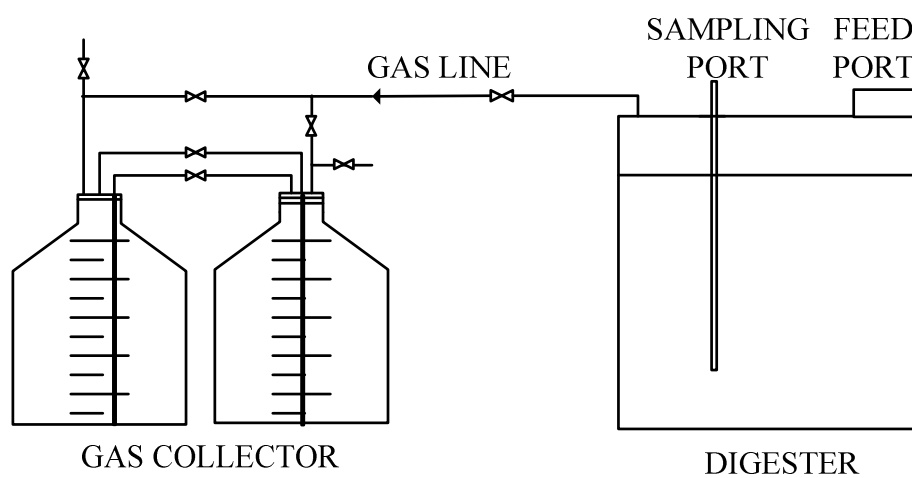
การทดลองการหมักร่วมระหว่างไบogas พาราซึ่งเป็นวัตถุดิบรองกับมูลสุกรซึ่งเป็นวัตถุดิบหลัก ทำการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพในชุดการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการแบบแบทช์ (Batch) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการดำเนินการ และนำสภาวะที่เหมาะสมที่มีประสิทธิภาพของผลได้ในการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดมาทำการทดลองด้วยชุดการทดลองระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous) โดยทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อที่จะนำผลที่ได้ไปใช้ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดต้นแบบ (Pilot Scale) ต่อไป โดยการเริ่มต้นดำเนินการระบบสำหรับการทดลองนี้ไม่มีการใช้เชื้อจุลินทรีย์ในตะกอนเริ่มต้น (Seed Sludge) เหมือนงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตก๊าซชีวภาพโดยทั่วไป ไม่มีการปรับ pH และควบคุมอุณหภูมิ ดำเนินการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (28 ± 3 °C) เนื่องจากต้องการกำหนดสภาวะในการทดลองให้คล้ายคลึงกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในระดับครัวเรือนมากที่สุด โดยมีกิจกรรมหลักในการดำเนินการทดลอง 3 กิจกรรม คือ

กิจกรรมที่ 1 การศึกษาทดลองผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมในระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบแบทช์ (Batch)

ชุดการทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบแบทช์นี้เป็นการหาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและไบogas พารา โดยดำเนินการทดลองที่สภาวะต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมไปใช้ในการดำเนินการผลิตก๊าซชีวภาพระบบแบบกึ่งต่อเนื่องต่อไป ซึ่งสภาวะที่สนใจในการศึกษาคือ ผลของสัดส่วนระหว่างมูลสุกรต่อไบogas พารา ผลของปริมาณความเข้มข้นของ TS ในวัตถุดิบ และผลของขนาดไบogas พารา ซึ่งรายละเอียดในการทดลองมีดังต่อไปนี้

1.1 ชุดทดลองผลิตก๊าซชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบแบทช์

ทำการสร้างชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งประกอบไปด้วยถังหมักพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมขนาด 25 ลิตร ปริมาตรใช้งานจริง (Working Volume) ประมาณ 20 ลิตร และระบบกักเก็บก๊าซชีวภาพขนาด 6 ลิตร ไตอะแกรมของชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมระดับห้องปฏิบัติการที่ประกอบขึ้นจากถังหมักร่วมและชุดกักเก็บก๊าซแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 3-3 และชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมระดับห้องปฏิบัติการแสดงดังภาพประกอบที่ 3-4 ซึ่งมีหลักการในติดตั้งและการดำเนินการของแต่ละส่วนประกอบหลักดังนี้

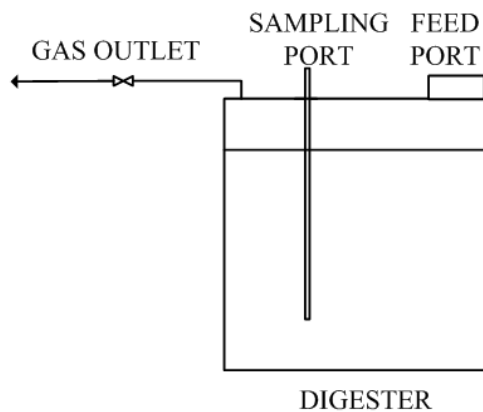


ภาพประกอบที่ 3-3 ไดอะแกรมชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักกร่วม
ระดับห้องปฏิบัติการระบบแบทช์



ภาพประกอบที่ 3-4 ชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักกร่วม
ระดับห้องปฏิบัติการระบบแบทช์

1. ถังหมักรวม (Digester) ประกอบไปด้วยท่อสำหรับป้อนวัตถุดิบ (Feed Port) ท่อสำหรับลำเลียง (Gas Line) ก๊าซชีวภาพไปยังระบบกักเก็บ ขนาด 1/4 นิ้ว และท่อสำหรับเก็บตัวอย่าง (Sampling Port) ทำการป้องกันการรั่วของก๊าซชีวภาพโดยใช้เทปพันเกลียวพันรอบบริเวณปากถังหมัก บริเวณรอยต่อจะอัดแน่นด้วยซิลิโคน และทำการทดสอบรอยรั่วของระบบโดยการเติมน้ำเข้าไปภายในถังหมักเพื่อสังเกตการรั่วซึมของถังหมักประกอบด้วยใช้น้ำฟองสบู่ทาบริเวณข้อต่อหรือบริเวณที่มีรอยต่อทุกจุด หากพบว่ามีรอยรั่วเกิดขึ้นให้ทำการอุดรอยรั่วด้วยกาวซิลิโคน การตรวจสอบรอยรั่วนี้เป็นสิ่งที่ยังจำเป็นอย่างยิ่งเนื่องจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพต้องเป็นระบบที่ปิดอย่างแท้จริง มิฉะนั้นจะส่งผลให้แรงดันก๊าซมีปริมาณไม่มากพอที่จะแทนที่น้ำในระบบกักเก็บก๊าซชีวภาพและปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ลดลงหรือไม่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ เนื่องจากระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศมีโอกาสสัมผัสกับอากาศภายนอก จะมีการป้อนวัตถุดิบเข้าภายในถังหมักโดยผ่านทางช่องป้อน โดยทำการป้อนวัตถุดิบเพียงครั้งเดียวในขณะที่เริ่มการทดลอง ไคอะแกรมของชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักรวมขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบแบทช์ที่ประกอบขึ้นจากถังหมักรวมและชุดกักเก็บก๊าซแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 3-5 และชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักรวมขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบแบทช์แสดงดังภาพประกอบที่ 3-6

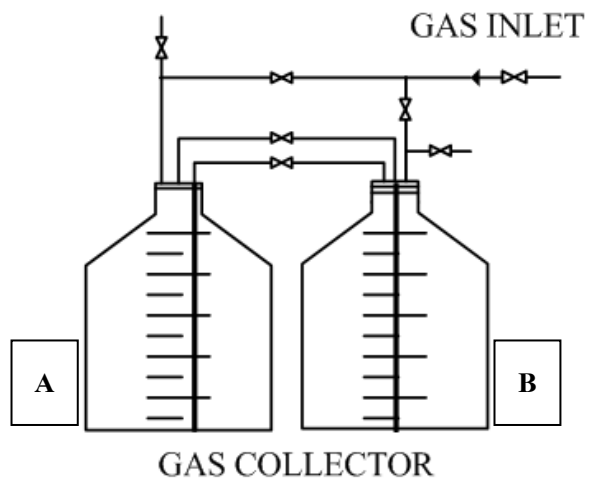


ภาพประกอบที่ 3-5 ไคอะแกรมถังหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักรวม
ระดับห้องปฏิบัติการระบบแบทช์

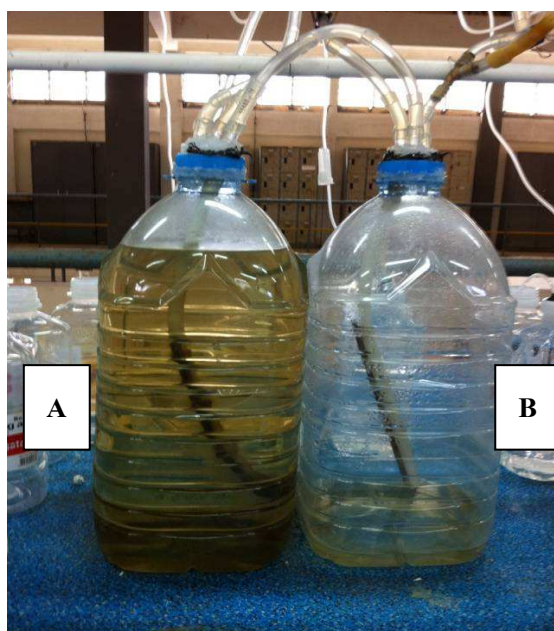


ภาพประกอบที่ 3-6 ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วม
ระดับห้องปฏิบัติการระบบแบทช์

2. ชุดกักเก็บก๊าซ (Gas Collector) ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากถังหมักจะถูกส่งไปยังถังกักเก็บก๊าซผ่านทางท่อส่งก๊าซ ชุดกักเก็บก๊าซเตรียมขึ้นจากขวดพลาสติก PET มีจำนวน 2 ถัง ไตอะแกรมของชุดกักเก็บก๊าซและชุดเครื่องมือที่เตรียมขึ้นในงานนี้แสดงดังภาพประกอบที่ 3-7 และ 3-8 การเก็บและการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทำได้โดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำ (Fluid Displacement Method) อ่านปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นได้จากสเกลที่ข้างขวด ซึ่งสเกลวัดปริมาตรก๊าซที่ผลิตได้เตรียมได้จากการตวงน้ำที่ปริมาตรต่างๆ ตั้งแต่ 0 ลิตร ถึง 6 ลิตร แล้วเทลงในขวด จากนั้นจะทำการจีดระดับที่ปริมาตรต่างๆ มีความละเอียด 0.5 ลิตรต่อหนึ่งระดับ ในขณะที่เริ่มต้นการทดลอง ชุดกักเก็บก๊าซชีวภาพขวด A จะมีปริมาณน้ำเต็มขวด ต่อมาเมื่อเริ่มมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ น้ำในขวด A จะถูกแทนที่ด้วยปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้และน้ำในขวด A จะไหลไปยังขวด B เมื่อขวด A รองรับก๊าซชีวภาพจนเต็มสามารถปรับวาล์วให้น้ำจากขวด B ไหลกลับมายังขวด A โดยไม่ต้องเติมน้ำอีก มีท่อสำหรับการเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพเพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น



ภาพประกอบที่ 3-7 ไดอะแกรมชุดกักเก็บก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วม
ระดับห้องปฏิบัติการระบบแบทช์



ภาพประกอบที่ 3-8 ชุดกักเก็บก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมฯ
ระดับห้องปฏิบัติการระบบแบทช์

1.2 ขั้นตอนการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพในชุดทดลองระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบเบบัทซ์

การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพในชุดทดลองระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบเบบัทซ์ มีรายละเอียดการทดลองดังต่อไปนี้

1. เก็บตัวอย่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ผ่านการลดขนาดแล้ว มาทำการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน (Organic Carbon, OC) และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen, TKN) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) เริ่มต้นของแต่ละวัตถุดิบ

2. เตรียมวัตถุดิบสำหรับการหมักด้วยสัดส่วนของวัตถุดิบมูลสุกรและใบยางพาราในถังหมักที่สัดส่วนต่างๆ กันตามสภาวะที่ต้องการศึกษา ด้วยปริมาตรของผสมที่ใช้ในการทดลองประมาณ 20 ลิตร (Working Volume) ทำการป้อนวัตถุดิบเพียงครั้งเดียวในขณะเริ่มต้นการทดลอง มีการควบคุมปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS) ของวัตถุดิบที่ TS 8 - 20% โดยควบคุมจากน้ำหนักของใบยางพาราและมูลสุกร พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างเริ่มต้นจากภายในถังหมักมาวิเคราะห์ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid, VFA) ปริมาณอัลคาร์ไลนิตี (Alkalinity) และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen, TKN)

3. ทำการหมักวัตถุดิบในถังหมักเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการปิดถังหมักไม่ให้สัมผัสกับอากาศ ดำเนินการหมักภายใต้อุณหภูมิห้อง (28 ± 3 °C) กวนผสมโดยการเขย่าถังหมักวันละ 1 ครั้ง ครั้งละประมาณ 1 นาที

4. สังเกตการเกิดก๊าซชีวภาพในถังเก็บก๊าซและบันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบบกักเก็บก๊าซโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำ ซึ่งดูได้จากสเกลของภาชนะเก็บก๊าซ ทำการปล่อยก๊าซชีวภาพทิ้งทุกวันหลังจากวัดปริมาตรก๊าซแล้ว

5. เก็บตัวอย่างวัตถุดิบภายในถังหมักด้วยหลอดฉีดยาขนาด 60 มิลลิลิตร โดยดูดจากทางท่อเก็บตัวอย่าง เพื่อวัดค่า pH และอุณหภูมิของของผสมในการหมักทุกสัปดาห์และทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของของผสมในถังหมักตามความถี่และรายละเอียดในตารางที่ 3-3 เพื่อนำผลมาวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพของระบบ

6. ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพเมื่อมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงขึ้นด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซมีเทน (Methane Analyzer) เปรียบเทียบความถูกต้อง โดยเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพไปวิเคราะห์โดยวิธีก๊าซโครมาโตกราฟี (GC TCD) พร้อมทั้งทดสอบการจุดติดไฟ

7. เมื่ออัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเริ่มคงที่และลดน้อยลงจะหยุดการทดลอง บันทึกข้อมูลพร้อมวิเคราะห์ผลการทดลองทั้งหมด

ตารางที่ 3-3 แผนการวิเคราะห์จากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

ลักษณะสมบัติ	ความถี่ในการวิเคราะห์
ปริมาณก๊าซชีวภาพ	ทุกวัน
อุณหภูมิ	ทุกวัน
พีเอช	ทุกสัปดาห์
กรดอินทรีย์ระเหยง่าย	ทุกสัปดาห์
องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ	ทุกสัปดาห์
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	ก่อนและหลัง
ปริมาณ TS	ทุกสัปดาห์
ปริมาณคาร์บอน	ก่อนและหลัง

ที่มา: APHA, AWWA and WEF, 1998

1.3 สถานะการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบแบทช์

1. ผลของความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมด (TS) ในวัตถุดิบ ทำการทดลองโดยเตรียมวัตถุดิบหมักระหว่างส่วนผสมของมูลสุกรและใบยางพาราโดยทำการควบคุมสัดส่วนโดยน้ำหนักของมูลสุกรและใบยางพาราให้คงที่ที่สัดส่วน 50:50 และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณ TS ที่ระดับต่างๆ ดังนี้ 8, 12, 16 และ 20 % ดำเนินการหมักด้วยการกวนผสมวันละครั้ง วัดค่า pH ของส่วนผสมในถังหมักตอนเริ่มต้นและระหว่างดำเนินการหมักโดยไม่มีการปรับค่า pH รายละเอียดการออกแบบการทดลองแสดงได้ตามการทดลองชุดที่ 1 การทดลองที่ R1-R4 ในตารางที่ 3-4

2. ผลของสัดส่วนวัตถุดิบเริ่มต้นต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ทำการเตรียมวัตถุดิบสำหรับหมักด้วยส่วนผสมของมูลสุกรและใบยางพาราโดยควบคุมปริมาณ TS ของวัตถุดิบของทุกชุดการทดลองที่ปริมาณ TS 16 % และทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนระหว่างใบยางพารากับมูลสุกรโดยน้ำหนักที่สัดส่วนต่างๆ คือ 0:100 (Control), 25:75, 50:50 และ 75:25 ดำเนินการหมักด้วยการกวนผสมโดยการเขย่าถังหมักวันละครั้ง ครั้งละประมาณ 1 นาที เก็บตัวอย่างภายในถังหมักด้วยหลอดฉีดขนาด 60 มิลลิเมตร โดยการดูดจากท่อเก็บตัวอย่าง เพื่อนำมาวัดค่า pH ของส่วนผสมในถังหมักตอนเริ่มต้นและระหว่างดำเนินการหมักโดยไม่มีการปรับค่า pH รายละเอียดการออกแบบการทดลองแสดงได้ตามการทดลองชุดที่ 2 การทดลองที่ R3, R5, R6 และ R7 ในตารางที่ 3-4

3. ผลของขนาดไบบางพาราต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ทำการทดลองโดยใช้ไบบางพาราที่ผ่านการลดขนาดแล้วเปรียบเทียบกับไบบางพาราที่ยังไม่ผ่านการลดขนาด โดยเตรียมวัตถุดิบหมักระหว่างส่วนผสมของมูลสุกรและไบบางพาราโดยควบคุมสัดส่วนของมูลสุกรและไบบางพารา และปริมาณ TS ของวัตถุดิบเริ่มต้นให้คงที่ที่สัดส่วนระหว่างมูลสุกรและไบบางพารา 50:50 และที่ปริมาณ TS 16 % ดำเนินการหมักด้วยการกวนผสมวันละครั้ง วัดค่า pH ของส่วนผสมในถังหมักตอนเริ่มต้นและระหว่างดำเนินการหมักโดยไม่มีการปรับค่า pH รายละเอียดการออกแบบการทดลองแสดงได้ตามการทดลองชุดที่ 3 การทดลองที่ R8 ในตารางที่ 3-4

ตารางที่ 3-4 แสดงการออกแบบการทดลองชุดผลิตก๊าซชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบแบทช์

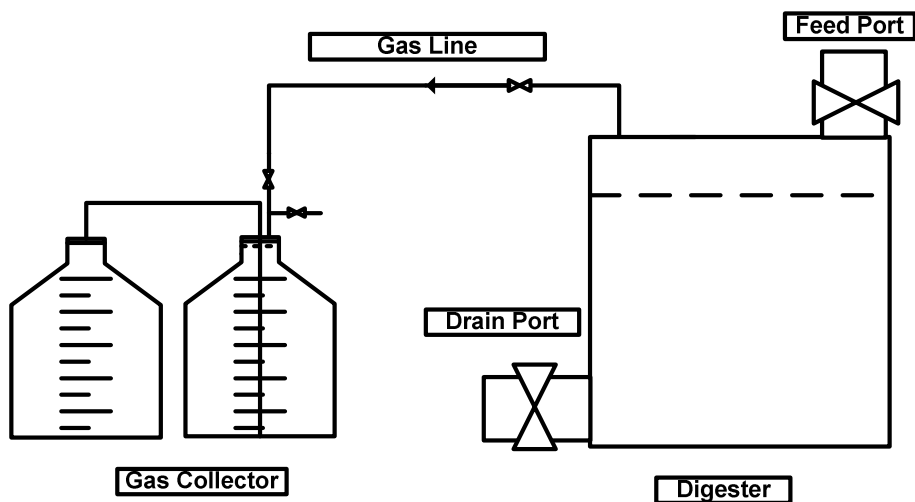
ชุดการทดลอง	การทดลองที่	วัตถุดิบ (มูลสุกร: ไบบางพารา)	ลักษณะไบบางพารา	TS ของวัตถุดิบ (%)
ชุดที่ R1 ศึกษาปัจจัยของ ความเข้มข้นของ TS (%TS)	R1	50:50	บด	8
	R2	50:50	บด	12
	R3	50:50	บด	16
	R4	50:50	บด	20
ชุดที่ R2 ศึกษาสัดส่วน วัตถุดิบเริ่มต้น	R5	100:0	บด	16
	R6	25:75	บด	16
	R7	75:25	บด	16
ชุดที่ R3 ศึกษาปัจจัยขนาด ของไบบางพารา	R8	50:50	ไม่บด	16

กิจกรรมที่ 2 การศึกษาทดลองผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมในระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous)

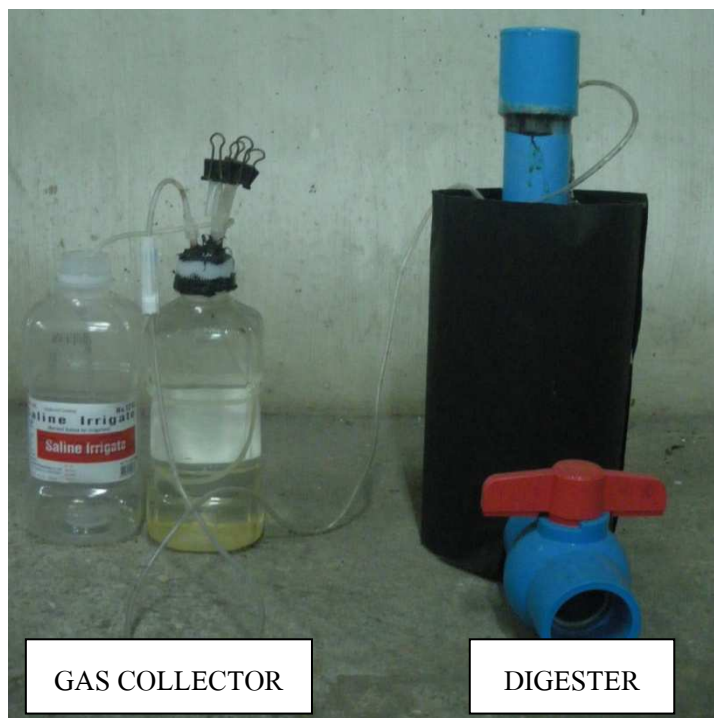
ชุดการทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่องนี้เป็นการหาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา โดยดำเนินการทดลองที่สภาวะต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมไปใช้ในการดำเนินการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดต้นแบบต่อไป ซึ่งสภาวะที่สนใจในการศึกษาคือ ผลของสัดส่วนวัตถุดิบเริ่มต้นและสัดส่วนป้อนระหว่างมูลสุกรต่อใบยางพารา ผลของปริมาณความเข้มข้นของ TS ในวัตถุดิบป้อน และผลของปริมาณวัตถุดิบป้อน โดยดำเนินการที่ความเข้มข้นของ TS เริ่มต้นที่มีสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในกิจกรรมที่ 1 ซึ่งรายละเอียดในการทดลองมีดังต่อไปนี้

2.1 ชุดทดลองผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

ทำการสร้างชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ประกอบไปด้วยถังหมักพลาสติกรูปทรงกระบอกขนาด 4 เพื่อให้สามารถกวนผสมวัตถุดิบหมักอย่างสมบูรณ์ ปริมาตรใช้งานจริงของถังหมักประมาณ 3.2 ลิตร และระบบกักเก็บก๊าซชีวภาพมีขนาด 1 ลิตร ไดอะแกรมของชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่องที่ประกอบขึ้นจากถังหมักร่วมและชุดกักเก็บก๊าซแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 3-9 และชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง แสดงดังภาพประกอบที่ 3-10 ซึ่งมีหลักการในติดตั้งและการดำเนินการของแต่ละส่วนประกอบหลักดังนี้

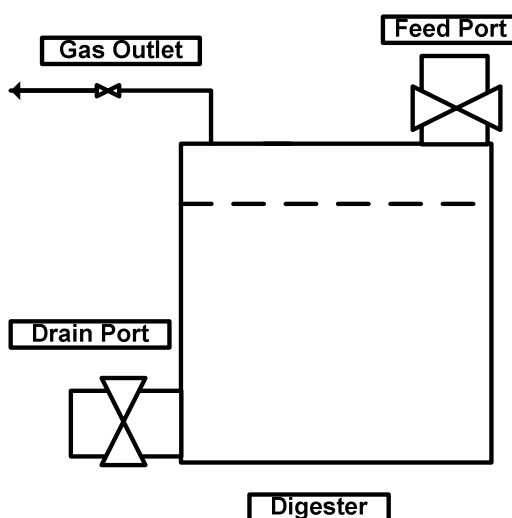


ภาพประกอบที่ 3-9 ไดอะแกรมของชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วม
ขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง



ภาพประกอบที่ 3-10 ชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วม
ขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

1. ถังหมักร่วม (Digester) ถังหมักประกอบไปด้วยท่อสำหรับป้อนวัตถุดิบ (Feed Port) ท่อสำหรับลำเลียงก๊าซ (Gas Line) ไปยังชุดกักเก็บก๊าซขนาด 1/4 นิ้ว ท่อระบายอากาศตะกอน (Drain Port) สำหรับถ่ายวัตถุดิบที่ผ่านการหมักแล้วและสำหรับเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ขนาด 2 นิ้ว ไดอะแกรมและภาพถังหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง แสดงได้ดังภาพประกอบที่ 3-11 และ 3-12 การตรวจสอบการรั่วซึมของระบบทำเช่นเดียวกับชุดทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบเบทซ์

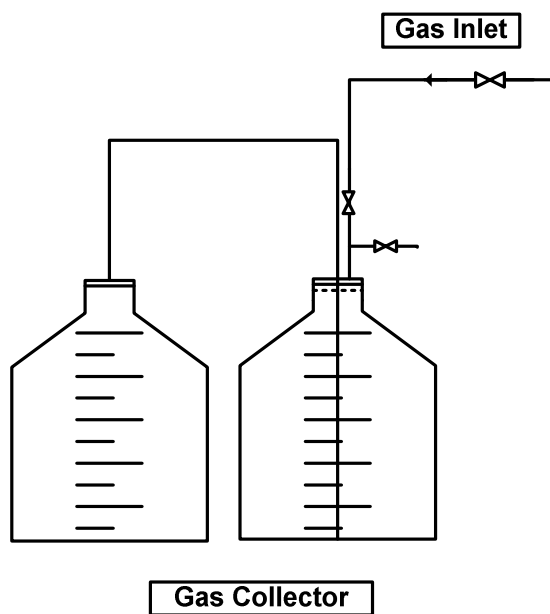


ภาพประกอบที่ 3-11 ไดอะแกรมถังหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วม
ขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง



ภาพประกอบที่ 3-12 ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักรวม
ขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

2. ชุดกักเก็บก๊าซ (Gas Collector) ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากถังหมักจะถูกส่งไปยังชุดกักเก็บก๊าซผ่านทางท่อส่งก๊าซ ชุดกักเก็บก๊าซเตรียมขึ้นจากขวดน้ำเกลือ มีจำนวน 2 ถัง ดังแสดงไดอะแกรมของชุดกักเก็บก๊าซและชุดเครื่องมือที่เตรียมขึ้นในงานนี้ตามภาพประกอบที่ 3-13 และ 3-14 การเก็บและการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทำได้โดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำ เช่นเดียวกับชุดทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบแบทช์ มีท่อสำหรับการเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพเพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของและวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น



ภาพประกอบที่ 3-13 ไดอะแกรมของชุดกักเก็บก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วม
ขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง



ภาพประกอบที่ 3-14 ชุดกักเก็บก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วม
ขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

2.2 ขั้นตอนการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพในชุดทดลองขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

วิธีดำเนินการทดลองทำเช่นเดียวกับการทดลองในกิจกรรมที่ 1 โดยเลือกอัตราส่วนที่มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดจากการทดลองในกิจกรรมที่ 1 มาใช้ในการหมักวัตถุดิบเริ่มต้น แล้วทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ดังต่อไปนี้ สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา ปริมาณวัตถุดิบป้อน สัดส่วนป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา และปริมาณ TS ของวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา โดยจะดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง คือ จะทำการทดลองหมักวัตถุดิบเริ่มต้นที่ปริมาตร 3.2 ลิตร เป็นเวลา 21 วัน จากนั้นจะทำการถ่ายวัตถุดิบหมักออกครึ่งหนึ่ง จากนั้นจะทำการป้อนวัตถุดิบหมักใหม่ลงในถังหมักตามสัดส่วนและเวลาที่กำหนด สำหรับการทดลองนี้ไม่มีการปรับ pH ให้แก่ระบบ และจะทำการกวนผสมโดยอาศัยการเขย่าวันละหนึ่งครั้ง ครั้งละประมาณ 1 นาที การดำเนินการทดลองกระทำที่อุณหภูมิห้อง

2.3 สถานะการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

การออกแบบการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง สามารถอธิบายรายละเอียดตามตารางที่ 3-5

ตารางที่ 3-5 ชุดการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

การทดลอง	สัดส่วนเริ่มต้น มูลสุกร : ใบยางพารา	ปริมาณ วัตถุดิบป้อน (กิโลกรัม)	สัดส่วนวัสดุป้อน มูลสุกร : ใบยางพารา	ความเข้มข้นของ แข็งวัตถุดิบป้อน (%)
S1	50:50	0.15	50:50	12
S2	50:50	0.15	75:25	12
S3	50:50	0.15	100:0	12
S4	50:50	0.3	50:50	12
S5	50:50	0.3	75:25	12
S6	50:50	0.3	100:0	12
S7	100:0	0.15	50:50	12
S8	100:0	0.15	75:25	12
S9	100:0	0.15	100:0	12
S10	100:0	0.15	50:50	20

1. ผลของสัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา

ต้องการศึกษาผลของสัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราโดยสภาวะที่ทำการศึกษามีด้วยกันสองสภาวะ คือ สัดส่วนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 50:50 และ 100:0 โดยควบคุมปริมาณวัตถุดิบป้อน สัดส่วนป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา และปริมาณ TS ป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราให้คงที่ และทำการทดลองเพื่อยืนยันผลอีกสองชุดการทดลอง โดยเปลี่ยนสัดส่วนวัสดุป้อนระหว่างมูลสุกรกับใบยางพารา ที่ 75:25 และ 100:0 รายละเอียดการออกแบบการทดลองแสดงได้ตามการตารางที่ 3-6

ตารางที่ 3-6 การออกแบบการทดลองศึกษาผลของสัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

การทดลอง	สัดส่วนเริ่มต้น มูลสุกร : ใบยางพารา	ปริมาณ วัตถุดิบป้อน (กิโลกรัม)	สัดส่วนวัสดุป้อน มูลสุกร : ใบยางพารา	ความเข้มข้นของ แก๊สวัตถุดิบป้อน (%)
S1	50:50	0.15	50:50	12
S7	100:0	0.15	50:50	12
S2	50:50	0.15	75:25	12
S8	100:0	0.15	75:25	12
S3	50:50	0.15	100:0	12
S9	100:0	0.15	100:0	12

2. ผลของปริมาณวัตถุดิบป้อนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

ทำการทดลองเพื่อที่จะศึกษาความสามารถของระบบในการรับภาระสารอินทรีย์ที่เกิดจากวัตถุดิบต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการเตรียมวัตถุดิบการหมักด้วยส่วนผสมของมูลสุกรและใบยางพาราด้วยการควบคุมสัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราสัดส่วนป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา และปริมาณ TS ป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราให้คงที่ ทำการปรับเปลี่ยนปริมาณวัตถุดิบป้อน 2 ค่าที่แตกต่างกัน ที่ 0.15 กิโลกรัม และ 0.3 กิโลกรัม โดยทำการป้อน ทุก ๆ 3 วัน วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันพร้อมทั้งวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซและเก็บตัวอย่างของวัตถุดิบภายในถังหมักเพื่อวิเคราะห์ค่า pH, VFA, Alkalinity และ COD รายละเอียดการออกแบบการทดลองแสดงได้ตามการตารางที่ 3-7

ตารางที่ 3-7 ชุดการทดลองศึกษาปริมาณวัตถุบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

การทดลอง	สัดส่วนเริ่มต้น มูลสุกร : ใบยางพารา	ปริมาณ วัตถุบป้อน (กิโลกรัม)	สัดส่วนวัตถุบป้อน มูลสุกร : ใบยางพารา	ความเข้มข้นของ แก๊สวัตถุบป้อน (%)
S1	50:50	0.15	50:50	12
S4	50:50	0.30	50:50	12
S2	50:50	0.15	75:25	12
S5	50:50	0.30	75:25	12
S3	50:50	0.15	100:0	12
S6	50:50	0.30	100:0	12

3. ผลของสัดส่วนวัตถุบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา

ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของสัดส่วนป้อนที่แตกต่างกันระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่แตกต่างกันที่มีผลการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยจะทำการควบคุมสัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา ปริมาณวัตถุบป้อน และปริมาณ TS ป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา ทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนระหว่างใบยางพารากับมูลสุกรโดยน้ำหนักที่สัดส่วนต่างๆ ดังนี้ 0:100 (control), 50:50 และ 75:25 ตามลำดับ รายละเอียดการออกแบบการทดลองแสดงได้ตามการตารางที่ 3-8

ตารางที่ 3-8 ชุดการทดลองสัดส่วนวัสดุบดป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

การทดลอง	สัดส่วนเริ่มต้น มูลสุกร : ใบยางพารา	ปริมาณ วัสดุบดป้อน (กิโลกรัม)	สัดส่วนวัสดุบดป้อน มูลสุกร : ใบยางพารา	ความเข้มข้นของ แก๊สวัสดุบดป้อน (%)
S1	50:50	0.15	50:50	12
S2	50:50	0.15	75:25	12
S3	50:50	0.15	100 : 0	12

4. ผลของปริมาณของแก๊สทั้งหมดของวัสดุบดป้อน

ทำการทดลองโดยเตรียมวัสดุบดป้อนหมักระหว่างส่วนผสมของมูลสุกรและใบยางพาราโดยควบคุมสัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา ปริมาณวัสดุบดป้อนและสัดส่วนบดป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราให้คงที่และทำการปรับเปลี่ยนปริมาณ TS บดป้อนที่ 12 และ 20% รายละเอียดการออกแบบการทดลองแสดงได้ตามการตารางที่ 3-9

ตารางที่ 3-9 ชุดการทดลองผลของปริมาณ TS ของวัสดุบดป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

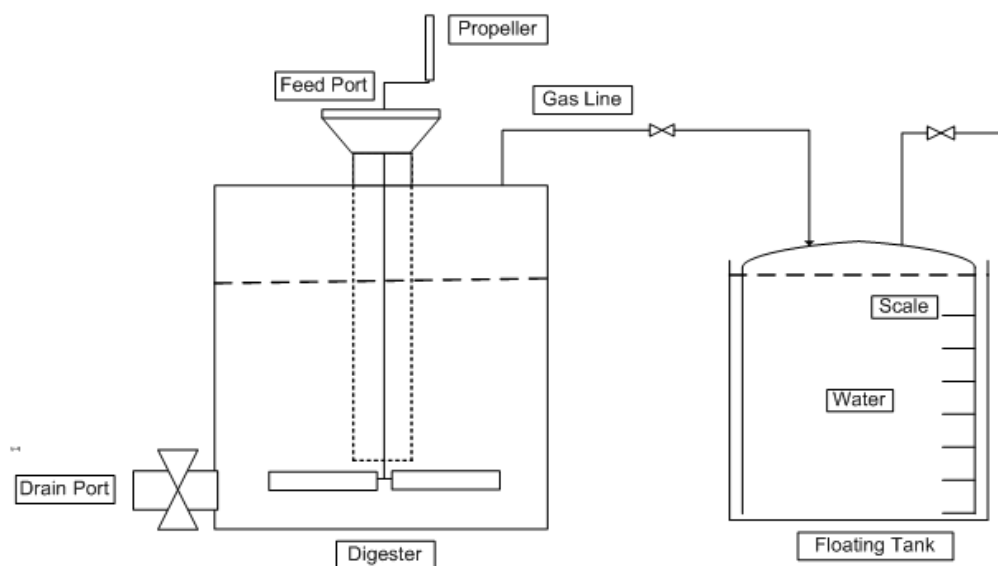
การทดลอง	สัดส่วนเริ่มต้น มูลสุกร : ใบยางพารา	ปริมาณ วัสดุบดป้อน (กิโลกรัม)	สัดส่วนวัสดุบดป้อน มูลสุกร : ใบยางพารา	ความเข้มข้นของ แก๊สวัสดุบดป้อน (%)
S7	100:0	0.15	50:50	12
S10	100:0	0.15	50:50	20

กิจกรรมที่ 3 การศึกษาทดลองผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดต้นแบบ (Pilot Scale) ระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

ชุดการทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่องนี้เป็นการหาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา โดยดำเนินการด้วยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในกิจกรรมที่ 2 และวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งรายละเอียดในการทดลองมีดังต่อไปนี้

3.1 ชุดทดลองผลิตก๊าซชีวภาพขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

ทำการสร้างชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ประกอบด้วยถังหมักพลาสติกรูปทรงกระบอกขนาด 200 ลิตร ปริมาตรใช้งานจริงประมาณ 160 ลิตร และระบบกักเก็บก๊าซชีวภาพมีขนาด 160 ลิตร ใต้อะแกรมของชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่องที่ประกอบขึ้นจากถังหมักร่วมและชุดกักเก็บก๊าซแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 3-15 และชุดทดลองการหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่องแสดงดังภาพประกอบที่ 3-16 ซึ่งมีหลักการในติดตั้งและการดำเนินการของแต่ละส่วนประกอบหลักดังนี้

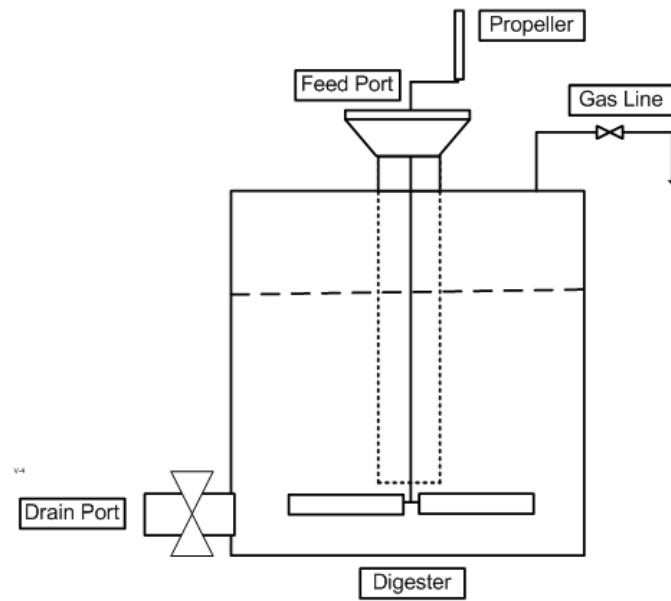


ภาพประกอบที่ 3-15 ใต้อะแกรมชุดการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง



ภาพประกอบที่ 3-16 ชุดการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วม
ขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

1. ถังหมักร่วม (Digester) ทำการเจาะด้านบนของถังหมักให้เป็นรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว ใส่ท่อพีวีซีเพื่อเป็นช่องป้อนวัตถุดิบ (Feed Port) ท่อป้อนวัตถุดิบมีความยาว 80 เซนติเมตร เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว บริเวณด้านล่างของถังหมักใส่ท่อพีวีซีเพื่อเป็นท่อสำหรับถ่ายวัสดุที่ผ่านการหมักออกมาวิเคราะห์ (Drain Port) มีวาล์วสำหรับควบคุมการเปิดปิด ภายในช่องป้อนวัตถุดิบมีการติดตั้งใบกวน (Agitator) โดยที่เพลลาของชุดกวนนี้ติดอยู่กับฝาของถังหมัก และมีชุดประกอบเพลาลักษณะเป็นปลอกสวมตัวเพลลาอยู่ เพื่อป้องกันไม่ให้เพลลาแกว่งขณะหมุนซึ่งอาจทำให้ถังหมักรั่วได้ มีใบพัดติดอยู่ปลายเพลลา 2 ชุด ที่มีลักษณะเป็นแฉก ด้านบนของถังหมักมีท่อสำหรับลำเลียงก๊าซที่ผลิตได้ไปยังระบบกักเก็บขนาด ½ นิ้ว ซึ่งเป็นสายยางพลาสติกใส ไดอะแกรมและภาพชุดถังหมักก๊าซชีวภาพขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่องแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 3-17 และ 3-18 ทำการตรวจสอบการรั่วซึมของระบบชุดทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อไม่ให้เกิดการรั่ว

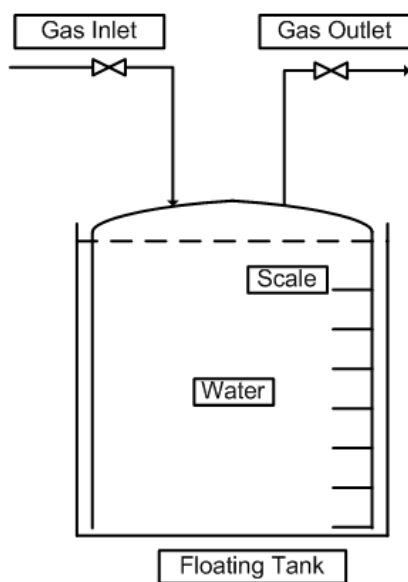


ภาพประกอบที่ 3-17 ไดอะแกรมถังหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วม
ขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง



ภาพประกอบที่ 3-18 ถังหมักก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วม
ขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

2. ชุดกักเก็บก๊าซ (Gas Collector) ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ถังเก็บน้ำขนาด 200 ลิตร ที่ตั้งหงายเพื่อบรรจุน้ำสำหรับเป็นตัวกันไม่ให้ก๊าซรั่วออกนอกถังเก็บ ถังจะตั้งหงายเพื่อให้ถังใบเล็กอีกถังครอบ ถังเก็บก๊าซซึ่งเป็นถังขนาด 160 ลิตร ตั้งคว่ำลงในถังเก็บน้ำขนาด 200 ลิตร ทำหน้าที่เป็นตัวกักก๊าซไว้ ดังแสดงไดอะแกรมของชุดกักเก็บก๊าซและชุดเครื่องมือที่เตรียมขึ้นในงานนี้ตามภาพประกอบที่ 3-19 และ 3-20 โดยตัวถังจะลอยขึ้นเมื่อก๊าซชีวภาพถูกปล่อยมาจากถังหมัก ด้านบนของถังเก็บก๊าซ จะติดตั้งท่อปล่อยก๊าซพร้อมทั้งวาล์วสำหรับเปิดและปิดเพื่อนำก๊าซที่ผลิตได้ไปยังจุดใช้งานและเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ



ภาพประกอบที่ 3-19 ไดอะแกรมชุดกักเก็บก๊าซชีวภาพแบบหมักพร้อม
ขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง



ภาพประกอบที่ 3-20 ชุดกักเก็บก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วม
ขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

3.2 ขั้นตอนการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

วิธีดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในกิจกรรมที่ 1 และ 2 โดยเลือกสถานะที่มีประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดจากการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ ระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่องมาใช้เป็นสถานะในการดำเนินระบบ โดยจะดำเนินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง ป้อนวัตถุดิบทุกๆ 3 วัน ครั้งละ 7.5 กิโลกรัม เริ่มป้อนวัตถุดิบครั้งแรกเมื่อระยะเวลาการหมัก 14 วัน ปริมาตรในการหมักวัตถุดิบเริ่มต้น 80 กิโลกรัม สำหรับการทดลองนี้ไม่มีการปรับ pH ให้แก่ระบบ และจะทำการกวนผสมวันละหนึ่งครั้ง ครั้งละประมาณ 1 นาที การดำเนินการทดลอง

กระทำที่อุณหภูมิห้อง ทำการวัดองค์ประกอบของก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

3.3 สถานะการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดใช้งานจริงระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

สถานะในการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2 ของกิจกรรมที่ 2 คือ ดำเนินการทดลองที่สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 50:50 ความเข้มข้นของ TS เริ่มต้นของวัตถุดิบที่ 12% ปริมาณวัตถุดิบป้อนครั้งละ 7.5 กิโลกรัม ที่สัดส่วนของวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 75:25 ปริมาณ TS วัตถุดิบป้อน 12% (ระยะเวลาการเก็บกัก 20 วัน อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ 2.56 kg COD/m³/D)

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบใบยางพาราและมูลสุกร

ตัวอย่างใบยางพาราที่ใช้ในการหมักร่วมเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับงานวิจัยนี้เป็นใบยางพาราพันธุ์ 600 มีลักษณะทางกายภาพ คือ ใบมีสีน้ำตาลเข้ม ก่อนข้างแห้ง เพ็ชรร่วงจากต้นยางพาราประมาณ 1-2 สัปดาห์ เก็บตัวอย่างจากสวนยางพารา อำเภอกวนเนียง จังหวัดสงขลา

ตัวอย่างมูลสุกรที่ใช้ในการหมักร่วมเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับงานวิจัยนี้เป็นมูลสุกรสดจากสุกรแม่พันธุ์ ขั้วถ่ายไม่เกิน 24 ชั่วโมง ได้รับความอนุเคราะห์จากภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ลักษณะของมูลสุกรค่อนข้างแข็งและแห้ง ก่อนการทดลองจึงต้องมีการบดและลดขนาดของมูลสุกรก่อน โดยเครื่องบด

4.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบใบยางพาราและมูลสุกร

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีในของตัวอย่างใบยางพาราและมูลสุกร ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-1 จากผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณความชื้นทั้งมูลสุกรและใบยางพารามีค่าความชื้นต่ำ 2.31 และ 0.19% ตามลำดับ เนื่องมาจากบริเวณที่เก็บใบยางพารามีแสงแดดส่องอย่างทั่วถึงและก่อนเก็บใบยางพาราไม่มีฝนตก สำหรับมูลสุกรทำการเก็บตัวอย่างมูลสุกรก่อนที่จะมีการทำความสะอาดฟาร์ม จึงมีน้ำล้างคอกและปัสสาวะของสุกรปนอยู่ในปริมาณที่น้อย

ตารางที่ 4-1 องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างใบยางพาราและมูลสุกร

Parameter	Raw material	
	Pig manure	Rubber Leaves
Organic Carbon (OC) % (dry wt.)	17.15	29.76
Total nitrogen (TN) % (dry wt.)	1.59	2.41
C/N ratio	10.79	12.34
Moisture (%)	2.31	0.19

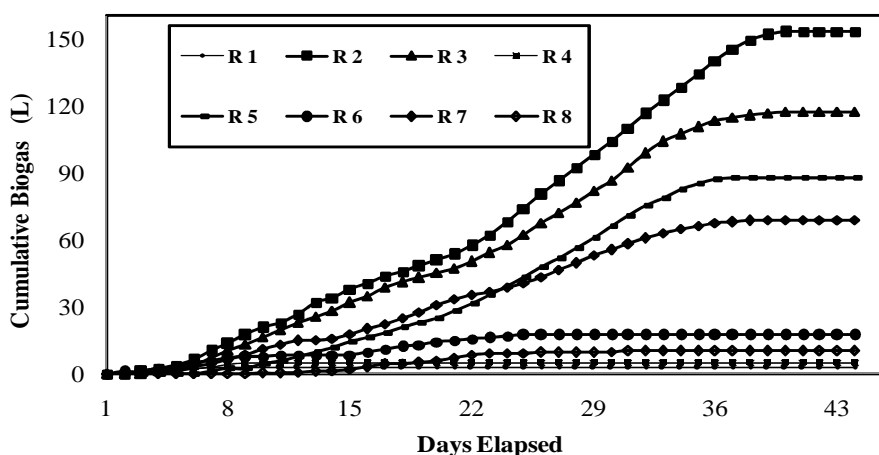
ค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน (C/N Ratio) ของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นอัตราส่วนที่บ่งบอกถึงการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปราศจากออกซิเจน จากผลการวิเคราะห์พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนกับไนโตรเจนของมูลสุกรและใบยางพาราเป็น 10.79 และ 12.34 ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ต่ำเมื่อเทียบกับค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนตามทฤษฎี ซึ่งควรมีค่าอยู่ที่ประมาณ 20-30:1 ถ้าค่า C/N มากกว่า 30 พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจะต่ำ เนื่องจากระบบมีปริมาณไนโตรเจนน้อยเกินไปจะส่งผลให้การเริ่มต้นระบบได้ช้ากว่า ซึ่งการมีปริมาณไนโตรเจนไม่เพียงพอจะส่งผลต่อการจับกลุ่มกันของแบคทีเรีย (Punal *et al*, 2000) แต่ถ้าค่า C/N น้อยกว่า 30 มากๆ จำเป็นต้องมีการลดปริมาณไนโตรเจนให้น้อยลง เนื่องจากถ้ามีปริมาณไนโตรเจนมากเกินไปจะเกิดการสร้างแอมโมเนียมากขึ้น สาเหตุที่ค่าอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจนของทั้งมูลสุกรและใบยางพารามีค่าต่ำเนื่องจากมีปริมาณไนโตรเจนที่ค่อนข้างสูง พบว่ามูลสุกรและใบยางพารามีปริมาณไนโตรเจน 1.59% และ 2.41% ตามลำดับ แต่ใบยางพารามีปริมาณคาร์บอนสูงกว่ามูลสุกรประมาณ 2 เท่า ใบยางพาราจึงเป็นตัวช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอนให้กับระบบ ซึ่งปริมาณคาร์บอนเกิดจากการสลายตัวของสารประกอบเซลล์ulosภายในใบยางพารา (วิรัช, 2529) มีผลให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณร้อยละมีเทนสูงขึ้น

4.3 ผลการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบแบทช์ (Batch)

การทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพระบบแบบแบทช์เป็นชุดการทดลองระดับห้องปฏิบัติการด้วยการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพารา มีการป้อนวัตถุดิบเพียงครั้งเดียวในตอนเริ่มต้นการทดลอง โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ชุดการทดลอง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพใน

การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา คือ ชุดการทดลองที่ R1 ศึกษาผลของความเข้มข้นของของแข็งของวัตถุดิบ ชุดการทดลองที่ R2 ศึกษาผลของสัดส่วนวัตถุดิบเริ่มต้นและชุดการทดลองที่ R3 ศึกษาผลของขนาดใบยางพารา ดังแสดงรายละเอียดของการออกแบบการทดลองในตาราง 3-ก

การเริ่มต้นระบบการหมักร่วมสำหรับการทดลองนี้ไม่มีการใช้เชื้อจุลินทรีย์ในตะกอนเริ่มต้น (Seed Sludge) เนื่องจากต้องการกำหนดสถานะในการทดลองให้คล้ายคลึงกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในระดับครัวเรือน จึงมีผลให้ช่วงเวลาในการเริ่มต้นระบบเกิดก๊าซชีวภาพช้ากว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เป็นเชื้อเริ่มต้น เนื่องจากปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นมีปริมาณน้อย (Souza, 1986) ดังแสดงภาพประกอบที่ 4-1 ก๊าซชีวภาพเริ่มผลิตได้เมื่อการทดลองผ่านไปประมาณ 7 วัน การทดลองในกิจกรรมนี้ได้ทำการเติมวัตถุดิบเพียงครั้งเดียวในตอนเริ่มต้นการทดลอง การทดลองและบันทึกผลสิ้นสุดลงเมื่อปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพเริ่มลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายของแบคทีเรียเริ่มลดน้อยลง หรือไม่มีการย่อยสลายของแบคทีเรียแล้ว เนื่องมาจากสารอาหารสำหรับเลี้ยงแบคทีเรียเริ่มลดน้อยลงหรือหมดแล้ว ซึ่งระยะเวลาในการทดลองและเก็บบันทึกผลทั้งหมด 44 วัน ผลการวิเคราะห์ห่อจี้ประกอบทางเคมีของตัวอย่างหลังสิ้นสุดการทดลองเพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างใบยางพาราและมูลสุกรในสถานะต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4-2



ภาพประกอบที่ 4-1 ก๊าซชีวภาพสะสมในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมระบบแบบแบทช์ระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา

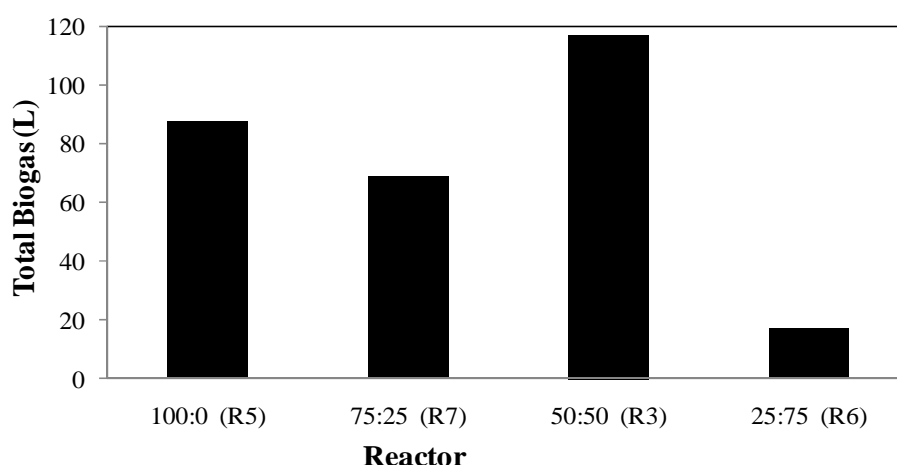
ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างหลังสิ้นสุดการทดลองสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระบบแบบแบทช์ระหว่างใบยางพาราและมูลสุกรในสภาวะต่างๆ

No.	Pig Manure (PM): Rubber Leaves (RL)	TS (%)	Biogas Production (L/D)	CH ₄ Content (%)	Total CH ₄ (L)	CH ₄ Yield (L/kg TS _{removed})	C/N Ratio	VFA _{eff} (mg/l)	pH		%TS removal
									After	Before	
R1	50:50	8	0.06	-	-	-	11.72	550	6.7	7.01	74.36
R2	50:50	12	3.48	58	88.8	0.38	11.72	500	6.3	7.22	71.13
R3	50:50	16	2.66	50	58.5	0.14	11.72	1500	6.2	7.16	68.97
R4	50:50	20	0.11	-	-	-	11.72	2000	5.9	6.85	45.67
R5	100:0	16	1.99	41	35.9	0.06	10.79	1250	7.4	5.95	84.44
R6	25:75	16	0.39	-	-	-	12.06	2250	5.9	7.15	64.14
R7	75:25	16	1.56	-	-	-	11.31	550	6.7	7.02	71.96
R8*	50:50	16	0.23	-	-	-	11.72	1000	6.0	5.50	24.18

*R8 ใช้ใบยางพาราที่ยังไม่ผ่านการบด

4.3.1 ผลของสัดส่วนวัตถุดิบเริ่มต้นต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

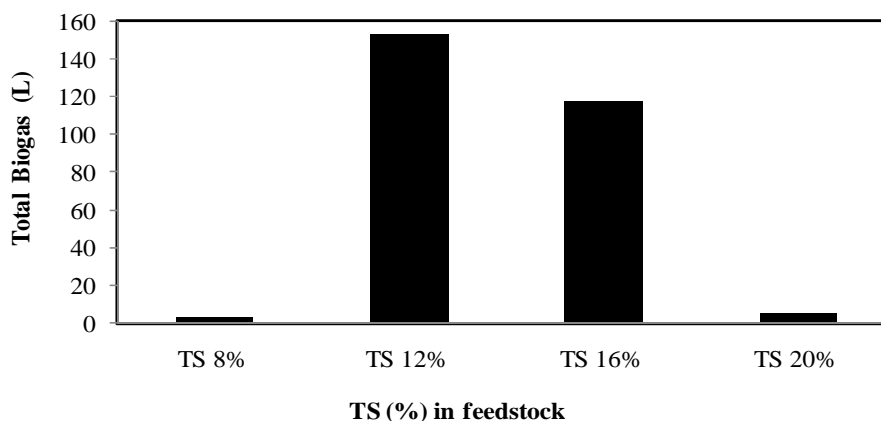
จากการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่อัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน ในอัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่ 100:0, 75:25, 50:50, และ 25:75 ตามลำดับ (การทดลองที่ R5, R7, R3, และ R6 ตามลำดับ) โดยการควบคุมปริมาณ TS ของวัตถุดิบที่ 16 % พบว่า ที่อัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่ 50:50 (การทดลองที่ R3) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณสูงสุด ในขณะที่อัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่ 75:25 (การทดลองที่ R7) ผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณต่ำที่สุด แสดงดังภาพประกอบที่ 4-2 ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าการเติมใบยางพาราจะช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอนและสารอาหารในวัตถุดิบหมัก แต่ต้องมีปริมาณที่เหมาะสม กล่าวคือ ถ้าหากใบยางพารามีปริมาณที่น้อยจนเกินไปจะไม่สามารถเพิ่มสารอาหารให้แก่ระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ เนื่องจากใบยางพาราเพียงอย่างเดียวจะมีแบคทีเรียสำหรับสร้างก๊าซมีเทนในปริมาณน้อยในระดับที่ไม่ผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยผลการทดลองสอดคล้องกับการทดลองของ Kim *et al*, (2004) และ Carucci *et al*, (2005) ในทางกลับกันหากใบยางพารามีปริมาณที่มากจนเกินไป ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะมีปริมาณน้อยเช่นกัน เนื่องจากใบยางพารามีปริมาณไนโตรเจนที่ค่อนข้างจะสูงประมาณร้อยละ 2.4 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบพวกแอมโมเนีย ซึ่งเป็นตัวการที่สำคัญในการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียพวกที่สร้างมีเทน สังเกตได้จากค่า pH ในการทดลองที่อัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่ 75:25 (การทดลองที่ R7) มีค่า pH เริ่มต้นการทดลองต่ำที่สุดในทุกชุดการทดลองและมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายสูงที่สุดด้วย



ภาพประกอบที่ 4-2 แสดงผลของอัตราส่วนของใบยางพาราในวัตถุดิบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมในระบบแบบแบทช์ที่ TS 16%

4.3.2 ผลของความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมด (TS) ในวัตถุดิบ

จากการทดลองหาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักร่วมระหว่างไบโอยางพารา กับมูลสุกรระบบแบบแบทช์ โดยพิจารณาผลของความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมด (TS) ในวัตถุดิบเริ่มต้น ได้ทำการทดลองที่ TS ต่างกัน 4 ค่า ดังต่อไปนี้ 8%, 12%, 16%, และ 20% ตามลำดับ (การทดลองที่ R1, R2, R3, และ R4 ตามลำดับ) และควบคุมอัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับไบโอยางพาราให้คงที่ที่ 50:50 จากผลการทดลองพบว่าที่ TS 12% (การทดลองที่ R2) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพในระยะเวลาการทดลองทั้งสิ้น 44 วัน ได้ปริมาณสูงสุด 153.1 ลิตร ในขณะที่ TS 8% และ 20% สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ในปริมาณน้อย คือ 2.6 ลิตร และ 4.9 ลิตร ตามลำดับ แสดงถึงภาพประกอบที่ 4-3 และตารางที่ 4-2 ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นของของแข็งสูงที่ TS 20% จะมีปริมาณวัตถุดิบตั้งต้นสูง ทำให้เข้าใกล้การหมักแบบแห้ง (Dry Anaerobic Digestion) ซึ่งการหมักของแข็งสูงที่มีค่า TS อยู่ในช่วง 22-50% (Wujcik *et al*, 1980) ส่งผลให้การหมักไม่มีเสถียรภาพโดยมีการสะสมของตัวยับยั้งการทำงานแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสะสมอยู่ในระดับที่สูงประมาณ 2,000 มิลลิกรัม/ลิตร และค่า pH ของระบบมีค่าค่อนข้างต่ำประมาณ 5.9 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Radwan *et al*, (1993) ซึ่งได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลวัวกับผลพลอยได้จากเกษตรกรรม ซึ่งพบว่าที่ความเข้มข้นของของแข็งสูง ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจะน้อยลง และงานวิจัยของ Jewell และคณะ (1993) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียจากการเพาะปลูกทางการเกษตร พบว่าที่ TS มากกว่า 50% อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพลดลงอย่างรวดเร็ว สำหรับที่ TS 8% (การทดลองที่ R1) จะมีปริมาณอาหารของแบคทีเรียที่ใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนน้อยเกินไป จึงไม่เพียงพอต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ



ภาพประกอบที่ 4-3 แสดงผลของร้อยละความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมด (% TS) ในวัตถุดิบต่อการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมด้วยระบบแบบแบทช์ระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่อัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับไบยางพารา 50:50

4.3.3 ผลของขนาดไบยางพาราต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

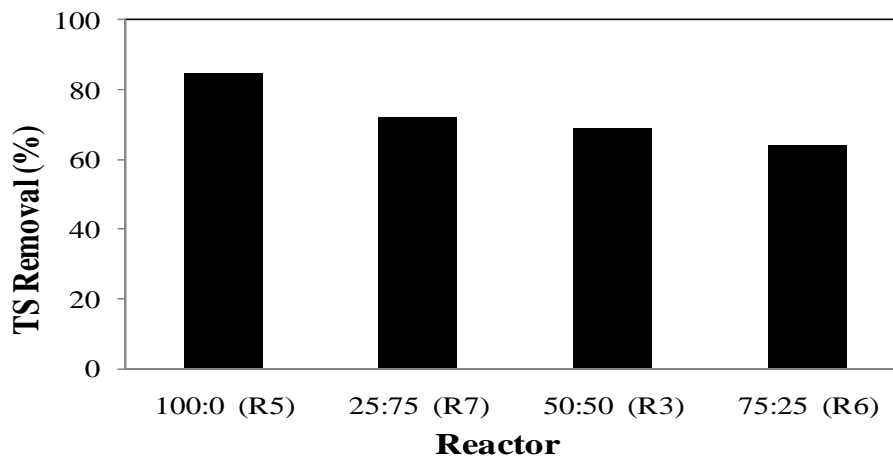
จากการทดลองระบบแบบแบทช์เพื่อหาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยพิจารณาผลของขนาดไบยางพารา ซึ่งขนาดของไบยางพาราที่ใช้ในการศึกษามีด้วยกัน 2 ขนาด คือ ไบยางพาราที่ผ่านการบดและไบยางพาราที่ยังไม่ผ่านการลดขนาด โดยไบยางพาราที่ผ่านการบดมีขนาดโดยเฉลี่ยที่ $2.81 \times 2.81 \text{ mm}^2$ (การทดลองที่ R3) และไบยางพาราที่ยังไม่ผ่านการลดขนาดมีขนาดประมาณ $50 \times 40 \text{ mm}^2$ (การทดลองที่ R8) การทดลองได้ทำการควบคุมอัตราส่วนระหว่างมูลสุกรกับไบยางพาราให้คงที่ที่ 50:50 และ TS 16 % จากผลการทดลองดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4-3 เห็นได้ชัดเจนว่าไบยางพาราที่ผ่านการบดสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ปริมาณที่มากกว่าการทดลองที่ใช้ไบยางพาราที่ไม่ผ่านการลดขนาด สาเหตุเนื่องมาจากไบยางพาราที่ผ่านการลดขนาดแล้วจะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับแบคทีเรียมากกว่า ช่วยให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายได้ดีกว่าไบยางพาราที่ยังไม่ผ่านการลดขนาด จึงส่งผลโดยตรงต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตารางที่ 4-3 แสดงผลของขนาดใบยางพาราต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในการหมักร่วม

Property	Shred	No Shred
Particle Size (mm ²)	2.81×2.81	50×40
Biogas Production (L)	117	29.76

4.3.4 ผลของการหมักร่วมต่อการกำจัดของแข็งทั้งหมดในวัตถุดิบ

การกำจัดของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบที่ผ่านการย่อยสลายในการทดลองระบบแบบแบทช์ สามารถบ่งบอกประสิทธิภาพการย่อยสลายของแบคทีเรียในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราได้ โดยทั่วไปธรรมชาติของแบคทีเรียจะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายก่อน หลังจากนั้นจะย่อยสารอินทรีย์ที่ย่อยยากกว่า จากการทดลองได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมดในวัตถุดิบเริ่มต้น สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีอัตราส่วนระหว่างใบยางพาราและมูลสุกรที่แตกต่างกัน โดยควบคุมน้ำหนักของวัตถุดิบเริ่มต้นทั้งสองให้เท่ากันที่ TS 16% แสดงดังภาพประกอบที่ 4-4



ภาพประกอบที่ 4-4 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในวัตถุดิบระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพแบบหมักร่วมด้วยระบบแบบแบทช์ที่ TS 16%

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดขึ้นอยู่กับปริมาณอัตราส่วนของมูลสุกรกับใบยางพารา กล่าวคือ ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดจะแปรผันตรงกับอัตราส่วนของใบยางพาราในวัตถุดิบ ในการทดลองที่ R5 เป็นการหมักมูลสุกรเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดสูงที่สุด (84.44%) ส่วนการทดลองที่ R6 มีอัตราส่วนใบยางพาราในวัตถุดิบปริมาณสูงที่สุด คือ 75% มีผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดต่ำที่สุด (64.14%) สาเหตุเนื่องมาจากแบคทีเรียจะย่อยสลายใบยางพาราได้ยากกว่ามูลสุกรเนื่องจากใบยางพาราเป็นชีวมวลซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่ของลิกนิน เซลลูโลส และโปรตีน (Thiago, 2007) สำหรับผลการเปรียบเทียบร้อยละของการกำจัดของแข็งทั้งหมดระหว่างการทดลองที่ R3 และ R8 ซึ่งเป็นการศึกษาปัจจัยของขนาดของใบยางพาราที่มีผลต่อการกำจัดของแข็งทั้งหมด โดยศึกษาเปรียบเทียบระหว่างใบยางพาราที่ผ่านการบดแล้วกับใบยางพาราที่ยังไม่ผ่านการบด พบว่า ใบยางพาราที่ยังไม่ผ่านการบดจะประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่ต่ำ (24.18%) เนื่องมาจากการย่อยสลายของแบคทีเรียเป็นไปได้ยาก ดังแสดงผลตามตารางที่ 4-2

สถานะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการะบวนการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราแบบแบทช์ในระดับห้องปฏิบัติการ คือ สัดส่วนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 50:50 ปริมาณ TS 12% และใช้ใบยางพาราที่ผ่านการบดแล้ว

4.4 ผลการทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยชุดการทดลองขนาดห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous)

การทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบแบบกึ่งต่อเนื่องเป็นชุดการทดลองขนาดห้องปฏิบัติการด้วยการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพารา ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดทดลอง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา คือ ชุดการทดลองที่ S1 ศึกษาผลของสัดส่วนเริ่มต้นของวัตถุดิบ (Feedstock) ชุดการทดลองที่ S2 ศึกษาผลของปริมาณวัตถุดิบป้อน ชุดการทดลองที่ S3 ศึกษาผลของสัดส่วนวัตถุดิบป้อน (Feed) และชุดการทดลองที่ S4 ปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบป้อน ดังแสดงการออกแบบการทดลองในตารางที่ 3-5

การเริ่มต้นดำเนินการระบบสำหรับในการทดลองนี้ไม่มีการใช้เชื้อจุลินทรีย์ในตะกอนเริ่มต้น (Seed Sludge) เช่นเดียวกับการทดลองระบบแบบแบทช์ เนื่องจากต้องการกำหนดสถานะในการทดลองให้คล้ายคลึงกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในระดับครัวเรือนมากที่สุด ความเข้มข้นของของแข็งเริ่มต้นของวัตถุดิบได้มาจากการทดลองในกิจกรรมที่ 1 ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของของแข็งที่ให้ผลได้ก๊าซมีเทนสูงสุด คือ TS 12% โดยดำเนินการระบบแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยปริมาณวัตถุดิบเริ่มต้นที่ใช้ในการเริ่มต้นระบบ 3.2 กิโลกรัม ดำเนินการระบบเป็นเวลา 21 วัน โดยไม่มีการป้อนวัตถุดิบเพิ่มหรือถ่ายวัตถุดิบออก จากนั้นจะทำการถ่ายวัตถุดิบหมักออกครึ่งหนึ่ง (ประมาณ 1.6 กิโลกรัม) และป้อนวัตถุดิบหมักใหม่ลงในถังหมักเพิ่มทุกๆ 3 วัน ปริมาณวัตถุดิบป้อนแสดงดังตารางที่ 3-9 ซึ่งในขณะที่เติมวัตถุดิบระบบจะได้รับการระบรทุกสารอินทรีย์แบบทันทีทันใด (Shock Load) และในตลอดวันนั้นจะไม่มีการเติมวัตถุดิบเพิ่มอีกเลย การทดลองในกิจกรรมนี้ได้ทำการทดลองและบันทึกผลสิ้นสุดลงเมื่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเริ่มคงที่ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการย่อยสลายของแบคทีเรียเริ่มลดน้อยลงหรือไม่มีการย่อยสลายแล้ว เนื่องจากสารอาหารสำหรับเลี้ยงแบคทีเรียเริ่มลดน้อยลงหรือหมดแล้ว การทดลองเข้าสู่สถานะสมดุลในวันที่ 61 เนื่องจากปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเริ่มคงที่ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างวัตถุดิบหลังสิ้นสุดการทดลองเพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างใบยางพาราและมูลสุกรแบบกึ่งต่อเนื่องในสถานะต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ผลการวิเคราะห์ห้องค้ประกอบทางเคมีของตัวอย่างหลังสิ้นสุดการทดลองเพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระบบแบบกึ่งต่อเนื่องระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราในสภาวะต่างๆ

No.	Feedstock Pig manure: Rubber leaves	Feed Pig manure: Rubber leaves	HRT (Day)	OLR (kg COD/m ³ /D)	Biogas Production (L/D)	CH ₄ Content (%)	CH ₄ yield (L/g TS _{removed})	%TS removal	%COD removal
S1	50:50	50:50	20	3.25	0.32	65.07	2.07	34.08	24.64
S2	50:50	75:25	20	2.56	0.36	70.18	1.89	45.50	26.36
S3	50:50	100:0	20	4.07	0.27	57.25	0.74	71.50	29.61
S4	50:50	50:50	10	6.50	0.20	63.64	0.70	31.50	28.00
S5	50:50	75:25	10	5.13	0.22	69.63	0.79	33.17	26.84
S6	50:50	100:0	10	8.13	0.19	49.01	0.28	58.08	28.07
S7	100:0	50:50	20	3.25	0.18	49.01	0.70	43.42	25.92
S8	100:0	75:25	20	2.56	0.19	64.58	0.73	56.58	25.75
S9	100:0	100:0	20	4.07	0.18	47.40	0.34	83.00	23.96
S10	100:0	50:50	20	4.75	0.16	40.66	0.46	29.20	23.65

4.4.1 ผลของสัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพารา

จากการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับไบยางพาราที่สัดส่วนเริ่มต้นแตกต่างกัน โดยสัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ทำการศึกษามี 2 ค่า คือ สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 50:50 (การทดลองที่ S1) และ 100:0 (การทดลองที่ S7) โดยควบคุมปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.15 กิโลกรัม สัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 50:50 และ TS วัตถุดิบป้อนที่ 12% โดยการทดลองที่ S1 คือ สัดส่วนเริ่มต้นของวัตถุดิบที่ให้ผลได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดในการทดลองกิจกรรมที่ S1 จากผลการทดลองพบว่าที่สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 50:50 สามารถให้ผลได้การผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าที่สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 100:0 โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 19.53 ลิตร (0.32 ลิตร/วัน) ในขณะที่สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 100:0 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 11.09 ลิตร (0.18 ลิตร/วัน) ในระยะเวลาการทดลองทั้งสิ้น 61 วัน แสดงผลดังตารางที่ 4-3 ถ้าพิจารณาผลได้ของก๊าซมีเทน พบว่า สัดส่วนวัตถุดิบเริ่มต้น 50:50 มีผลได้ของก๊าซมีเทนมากกว่าสัดส่วนวัตถุดิบเริ่มต้น 100:0 ประมาณ 3 เท่า

เมื่อทำการเปลี่ยนสัดส่วนวัตถุดิบป้อนที่ 75:25 (การทดลองที่ 2 และ 8) และ 100:0 (การทดลองที่ 3 และ 9) โดยควบคุมตัวปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.15 กิโลกรัมและ TS วัตถุดิบป้อนที่ 12% แต่ทำการศึกษาที่สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 50:50 และ 100:0 อีกครั้ง พบว่าที่สัดส่วนเริ่มต้นของวัตถุดิบที่ 50:50 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพและผลได้ของก๊าซมีเทนสูงกว่าที่ 100:0 ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันผลการทดลองของสัดส่วนเริ่มต้นที่เหมาะสมของวัตถุดิบ คือ สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 50:50

4.4.2 ผลของปริมาณวัตถุดิบป้อนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากการทดลองศึกษาความสามารถของระบบผลิตก๊าซชีวภาพระบบแบบกึ่งต่อเนื่องในการรับภาระสารอินทรีย์จากวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรกับไบยางพาราต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ รวมถึงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมปริมาณวัตถุดิบป้อนแตกต่างกัน โดยปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ทำการศึกษามีด้วยกัน 2 ค่า คือ 0.15 กิโลกรัม/ครั้ง (การทดลองที่ S1) และ 0.30 กิโลกรัม/ครั้ง (การทดลองที่ S4) ซึ่งมีค่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (OLR) ที่ 1.08 และ 2.17 kg COD/m³/D ตามลำดับ มีการป้อนวัตถุดิบทุกๆ 3 วัน โดยควบคุมสัดส่วนเริ่มต้นของวัตถุดิบและสัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและไบยางพาราที่ 50:50 และ TS วัตถุดิบป้อนที่ 12% จากผลการทดลองพบว่าปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.15 กิโลกรัม/ครั้ง ให้ผลได้

การผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่าการทดลองที่ปริมาณวัตถุดิบป้อน 0.30 กิโลกรัม/ครั้ง โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 19.53 ลิตร (0.32 ลิตร/วัน) ในขณะที่ปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.30 กิโลกรัม/ครั้ง สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 12.44 ลิตร (0.20 ลิตร/วัน) แสดงดังตารางที่ 4-3 ถ้าพิจารณาผลได้ของก๊าซมีเทนพบว่า ที่ปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.15 กิโลกรัม/ครั้ง มีผลได้ของก๊าซมีเทนมากกว่าที่ปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.30 กิโลกรัม/ครั้ง ประมาณ 3 เท่า ถ้าพิจารณาการกำจัดของแข็งทั้งหมดพบว่า ที่ปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.15 กิโลกรัม/ครั้ง มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมด 34.08% ในขณะที่ปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.30 กิโลกรัม/ครั้ง มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่ต่ำกว่า คือ 31.50% สาเหตุเนื่องจากแบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายอาหารสำหรับปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.30 กิโลกรัม/ครั้ง ได้หมด เกิดการสะสมของปริมาณของแข็งในระบบที่สูงกว่า ส่งผลให้มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่ต่ำกว่า

4.4.3 ผลของสัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา

จากการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่สัดส่วนวัตถุดิบป้อนที่แตกต่างกัน โดยสัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ทำการศึกษามี 3 ค่า คือ สัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 50:50 (การทดลองที่ S1) 75:25 (การทดลองที่ S2) และ 100:0 (การทดลองที่ S3) จะมีการเติมวัตถุดิบป้อนทุกๆ 3 วัน โดยควบคุมตัวปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.15 กิโลกรัม/ครั้ง สัดส่วนวัตถุดิบเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 50:50 และ TS วัตถุดิบป้อนที่ 12% จากผลการทดลองพบว่าที่สัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 75:25 ให้ผลได้การผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 22.02 ลิตร (0.36 ลิตร/วัน) ในขณะที่สัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 50:50 และ 100:0 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 19.53 (0.32 ลิตร/วัน) และ 16.65 ลิตร (0.27 ลิตร/วัน) ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4-3 ถ้าพิจารณาผลได้ของก๊าซมีเทนพบว่า สัดส่วน 75:25 มีผลได้ของก๊าซมีเทนมากกว่าสัดส่วน 50:50 และ 100:0 ถ้าพิจารณาการกำจัดของแข็งทั้งหมดพบว่า ที่สัดส่วน 75:25 มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมด 45.50% ในขณะที่สัดส่วน 50:50 และ 100:0 มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมด 34.08% และ 31.50% ตามลำดับ สาเหตุที่สัดส่วน 100:0 มีการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่สูงที่สุดเนื่องจากไม่มีใบยางพาราเป็นส่วนผสม แบคทีเรียจึงย่อยสลายได้ง่ายกว่า

4.4.4 ผลของปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบป้อน

จากการทดลองศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบป้อนที่แตกต่างกัน โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดของวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ทำการศึกษามี 2 ค่า คือ TS ของวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 12% (การทดลองที่ S7) และ 20% (การทดลองที่ S10) โดยควบคุมตัวปริมาณวัตถุดิบป้อนที่ 0.15 กิโลกรัม/ครั้ง สัดส่วนวัตถุดิบป้อนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 50:50 และสัดส่วนวัตถุดิบเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 100:0 จากผลการทดลองพบว่า TS วัตถุดิบป้อนที่ 12% ให้ผลได้การผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงกว่า TS วัตถุดิบป้อนที่ 20% โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 11.09 ลิตร (0.18 ลิตร/วัน) ในขณะที่ TS วัตถุดิบป้อนที่ 20% สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 9.9 ลิตร (0.16 ลิตร/วัน) แสดงผลดังตารางที่ 4-3 ถ้าพิจารณาผลได้ของก๊าซมีเทนพบว่าที่ TS วัตถุดิบป้อนที่ 12% มีผลได้ของก๊าซมีเทนมากกว่าที่ TS วัตถุดิบป้อนที่ 20% ประมาณ 2 เท่า ถ้าพิจารณาการกำจัดของแข็งทั้งหมดพบว่า TS วัตถุดิบป้อนที่ 12% มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมด 45.50% ในขณะที่ TS วัตถุดิบป้อนที่ 20% มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมด 29.20% สาเหตุเนื่องจากที่ปริมาณ TS วัตถุดิบป้อนที่ 20% มีปริมาณของของแข็งมากเกินไป ทำให้แบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายอาหารได้ทั้งหมด จึงเกิดการสะสมของปริมาณของแข็งในระบบที่สูงกว่าและมี pH ของระบบต่ำกว่าด้วย ส่งผลให้มีค่าการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่ต่ำกว่าการทดลองที่ปริมาณ TS วัตถุดิบป้อน 12%

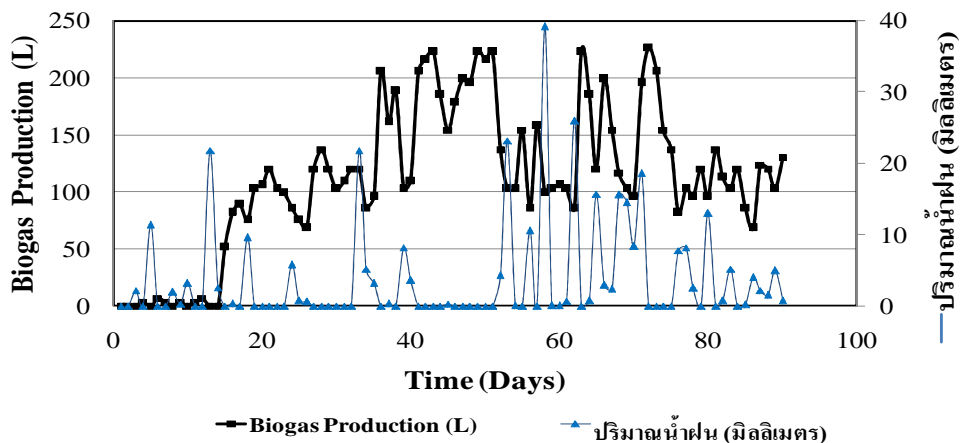
4.5 ผลการทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดต้นแบบด้วยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

การทดลองศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบแบบกึ่งต่อเนื่องด้วยชุดการทดลองขนาดขนาดต้นแบบ โดยการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพารา โดยดำเนินการด้วยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลองในกิจกรรมที่ 2 ตามลำดับ สัดส่วนเริ่มต้นระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่ 50:50 ปริมาณวัตถุดิบเริ่มต้นที่ใช้ 80 กิโลกรัม TS ของวัตถุดิบเริ่มต้นและวัตถุดิบป้อน 12% การเริ่มต้นดำเนินการระบบสำหรับการทดลองนี้ไม่มีการใช้เชื้อจุลินทรีย์ในตะกอนเริ่มต้นระบบ เมื่อดำเนินการระบบเป็นเวลา 14 วัน จะทำการป้อนวัตถุดิบเพิ่มทุกๆ 3 วัน ปริมาณวัตถุดิบป้อนครั้งละ 7.5 กิโลกรัม สัดส่วนป้อนระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราที่ 75:25 (ระยะเวลาการเก็บกัก 20 วัน อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.56 Kg COD/m³/D) การทดลองในกิจกรรมนี้ได้ทำการทดลองและบันทึกผลสิ้นสุดลงเมื่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเริ่มคงที่ จากการทดลองไม่ได้มีการควบคุมอุณหภูมิของถังหมัก โดยได้ดำเนินการศึกษาที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (28±3°C) ซึ่งอุณหภูมิของการดำเนินการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic) ซึ่งมีอุณหภูมิประมาณ 20-45°C

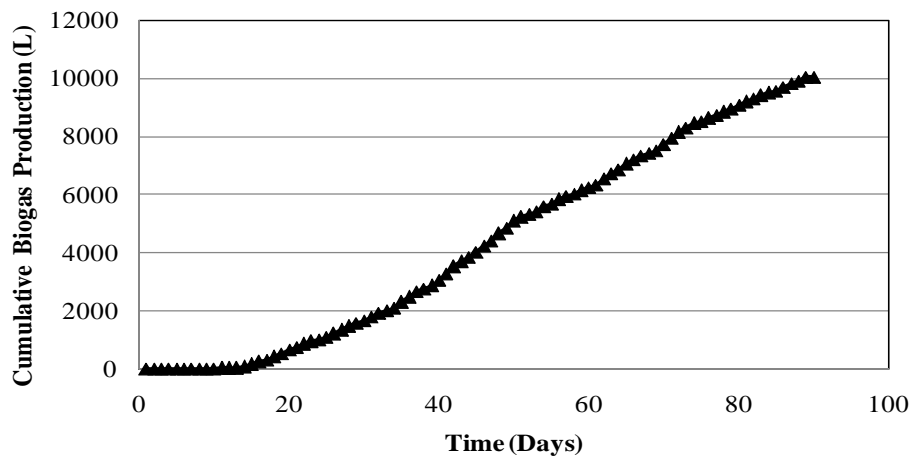
4.5.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการหมักร่วม

ในแต่ละวันวัดปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่ผลิตได้จากสเกลข้างถังเก็บก๊าซ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีหน่วยลิตรต่อวัน ในช่วง 14 วันแรกของการดำเนินการทดลองสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ในปริมาณน้อย เนื่องจากใช้วัตถุดิบเริ่มต้นจากมูลสุกรและใบยางพาราเท่านั้น ไม่ได้ใช้เชื้อจุลินทรีย์จากตะกอนบ่อหมักในการเริ่มต้นระบบ ประกอบกับระดับ pH ในระบบเริ่มปรับตัวต่ำลงจนอยู่ในสภาวะที่ไม่ค่อยเหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน ต่อมาเมื่อมีการป้อนวัตถุดิบเพิ่มทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้น กล่าวคือ ระดับค่า pH เริ่มปรับตัวสูงขึ้นและค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายค่อยๆ ลดลง ส่งผลให้เพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ และในช่วงวันที่ 50-70 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพปรับตัวลดลงอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องมาจากสภาพอากาศและอุณหภูมิแวดล้อมลดต่ำลง สังเกตได้จากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะแปรผกผันกับปริมาณน้ำฝน กล่าวคือ ในช่วงที่มีฝนตกปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพจะลดต่ำกว่าช่วงที่ไม่มีฝนตก ซึ่งก่อให้เกิดการหยุดการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน แสดงผลดังภาพประกอบที่ 4-5 ต่อมาหลังจากวันที่ 70 ของการทดลอง ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีปริมาณเพิ่มขึ้น และหลังจากวันที่ 80 ของการทดลองเป็นต้นไปอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จนกระทั่งไม่มีการเปลี่ยนแปลง

ซึ่งสอดคล้องกับระดับการเปลี่ยนแปลงกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ตลอดการทดลองทั้งหมด 90 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 10,000 ลิตร (112 ลิตร/วัน) แสดงดังภาพประกอบที่ 4-6



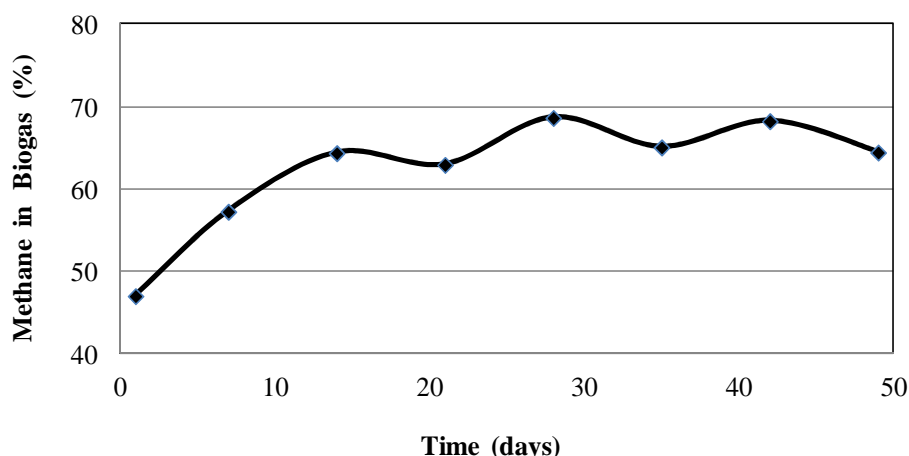
ภาพประกอบที่ 4-5 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง



ภาพประกอบที่ 4-6 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

4.5.2 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วม

ผลได้ก๊าซมีเทนมีค่า 13.53 L/g TS_{removed} ซึ่งมีค่ามากกว่าผลได้ของก๊าซมีเทนที่สภาวะเดียวกันสำหรับการทดลองในกิจกรรมที่ 2 ซึ่งมีค่า 2.07 L/g TS_{removed} ประมาณ 6 เท่า ในช่วงแรกของการทดลองก๊าซชีวภาพจะมีร้อยละของก๊าซมีเทนที่ต่ำ เนื่องจากอยู่ในช่วงการปรับตัวของแบคทีเรียและหลังจากวันที่ 30 ร้อยละก๊าซมีเทนเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก สำหรับองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในช่วงวันที่ 15-50 พบว่ามีร้อยละก๊าซมีเทนในช่วง 62-68% มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Prasad และ Jukka (2005) และ Rene *et al*, (2007) ซึ่งมีร้อยละมีเทนอยู่ในช่วง 58-63% และ 44-59% ตามลำดับ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-7 สำหรับปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีค่าอยู่ในช่วง 334-550 ppm ซึ่งอยู่ในช่วงที่มีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับกับการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งมีค่าประมาณ 2,000 ppm ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระบบและวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วย

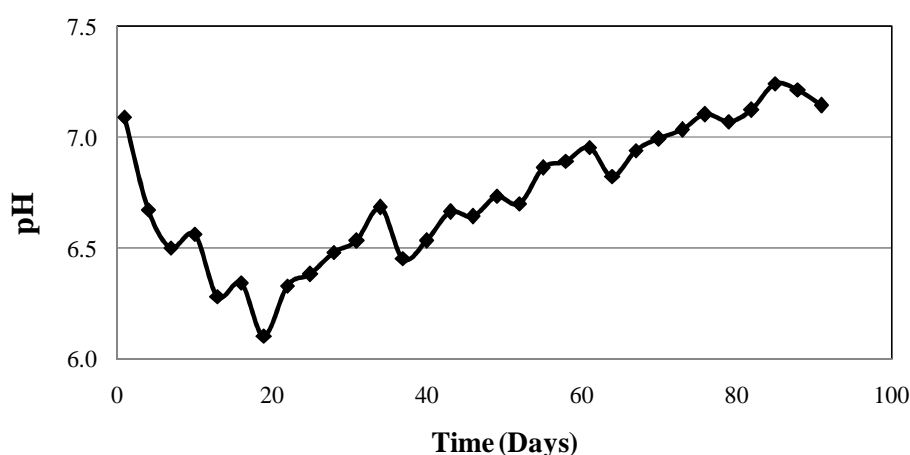


ภาพประกอบที่ 4-7 ปริมาณก๊าซมีเทนในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่าง
มูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

4.5.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของระบบ

ค่า pH ของวัตถุดิบภายในถังหมักตลอดการทดลองทั้งหมด 90 วัน อยู่ในช่วงระหว่าง 6.10-7.24 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่า pH อยู่ในช่วงแคบๆ ซึ่งส่งผลดีต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน โดยค่า pH เริ่มต้นของระบบมีค่าประมาณ 7.09 ในช่วง 20 วันแรกของการดำเนินการทดลอง ระดับ pH ภายในระบบลดลงอย่างต่อเนื่อง จนถึงระดับ pH 6.1 แต่ยังคงอยู่ในช่วงที่แบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถทำงานได้ แสดงผลดังภาพประกอบที่ 4-8 เนื่องจากมีข้อย

สลายสารอินทรีย์ให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจึงทำให้ pH ลดลง (Rao *et al*, 2000) จากนั้นเมื่อเริ่มป้อนวัตถุดิบในวันที่ 14 ระดับ pH ในระบบเริ่มปรับระดับสูงขึ้นเรื่อยๆ ในช่วงหลังจากวันที่ 20 จนถึงสุดการทดลอง เนื่องจากเมื่อดำเนินการหมักนานขึ้นระบบจะมีเสถียรภาพและกิจกรรมของแบคทีเรียสร้างมีเทนทำให้ pH เพิ่มขึ้นและรักษาระดับความเป็นกลางภายในถังหมัก (Bouallagui *et al*, 2002) จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ภายในถังหมักยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการดำรงชีพของแบคทีเรียสร้างมีเทนและเหมาะสมสำหรับการย่อยสลายภายในสภาวะไร้อากาศ กล่าวคือ ระดับ pH ยังคงอยู่ในช่วง 6.5-7.5 (Acher and Kirsop, 1991)

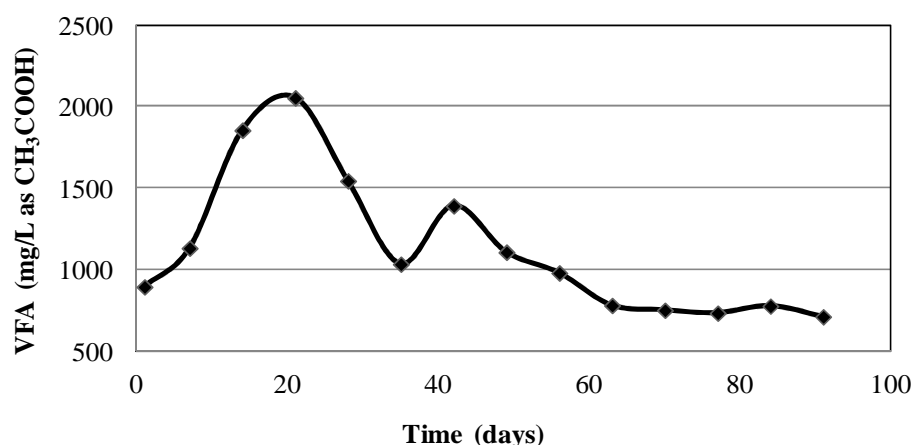


ภาพประกอบที่ 4-8 ค่า pH ในระบบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบด้วยระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

4.5.4 กรดอินทรีย์ระเหยง่ายของระบบ

จากการทดลองความเข้มข้นเริ่มต้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบมีค่า 897 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงอยู่ในรูปกรดอะซิติก ($\text{mg/l as CH}_3\text{COOH}$) เมื่อเริ่มดำเนินการระบบในช่วง 20 วันแรกของการทดลอง ระดับของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายค่อยๆ ปรับตัวสูงขึ้น แสดงถึงภาพประกอบที่ 4-9 เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเป็นก๊าซมีเทนได้ทั้งหมด จึงเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย จากนั้นเมื่อเริ่มมีการป้อนวัตถุดิบ ในวันที่ 14 ของการทดลอง พบว่ากรดอินทรีย์ระเหยง่ายค่อยๆ ปรับตัวลดลง เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนทำงานได้ดี สอดคล้องกับการปรับตัวสูงขึ้นของค่า pH ในช่วงวันที่ 60-90 ของการทดลอง ระดับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีระดับการเปลี่ยนแปลงต่ำ สาเหตุเนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไปเป็นก๊าซมีเทนได้ดี จากผลการทดลองจะเห็นได้

ว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในการทดลองนี้มีค่าสูงสุดประมาณ 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบการผลิตก๊าซชีวภาพไม่เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย อันส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียจำพวกสร้างมีเทน (Schober *et al*, 1999)

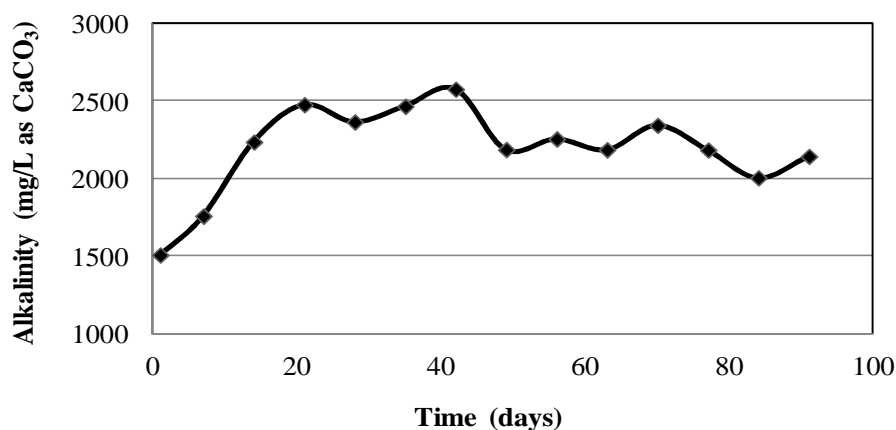


ภาพประกอบที่ 4-9 กรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

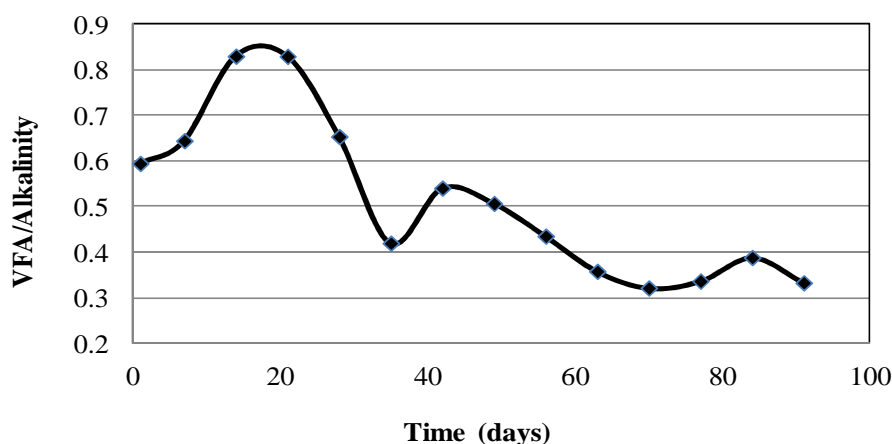
4.5.5 สภาพความเป็นด่างทั้งหมดของระบบ

จากการทดลองค่าสภาพด่างเริ่มต้นระบบมีค่า 1,509 mg/l แสดงอยู่ในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต (mg/l as CaCO₃) โดยค่าสภาพด่างเริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศอยู่ในช่วง 1,000-5,000 mg/L ในช่วง 40 วันแรกของการทดลอง สภาพด่างในระบบมีการปรับตัวสูงขึ้นและมีค่าสูงสุดในวันที่ 42 ของการทดลองที่ประมาณ 2,500 mg/l แสดงดังภาพประกอบที่ 4-10 ทั้งนี้เนื่องมาจากมีการป้อนวัตถุดิบเพิ่มเข้ามาในระบบ แสดงให้เห็นว่าระบบเกิดความเป็นบัฟเฟอร์ โดยจะช่วยป้องกันแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนให้สามารถทนต่อกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นได้ (Raynal *et al*, 1998) ในช่วงหลังจากวันที่ 40 จนถึงสิ้นสุดการทดลอง สภาพด่างของระบบเริ่มมีการปรับตัวค่อนข้างต่ำ สอดคล้องกับระดับการเปลี่ยนแปลงของ pH และกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมีการเปลี่ยนแปลงน้อยด้วย ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในการทดลองนี้ไม่จำเป็นต้องมีการปรับค่าสภาพความเป็นด่าง เนื่องจากวัตถุดิบภายในถังหมักมีค่าสภาพความเป็นด่างอยู่ในช่วงที่เหมาะสม แต่ถ้ามีสภาพความเป็นด่างมากเกินไปจะเกิดการสะสมของแอมโมเนีย ซึ่งจะยับยั้งการทำงานของเชื้อแบคทีเรียสร้างมีเทน

เมื่อพิจารณาค่าอัตราส่วน VFA/Alkalinity ซึ่งแสดงความสามารถของระบบที่จะรองรับการเปลี่ยนแปลงของสภาพกรดที่เกิดขึ้นได้ หากค่าอัตราส่วน VFA/Alkalinity มีค่าต่ำกว่า 1.0 ระบบจะมีเสถียรภาพในการทำงาน (Peter *et al*, 2001) และถ้ามีค่าต่ำกว่า 0.3 แสดงว่าระบบมีความเสี่ยงต่อการเกิดกรดในปริมาณที่สูง อาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ (Borja *et al*, 2002) ตลอดระยะเวลาการทดลองพบว่า ค่าอัตราส่วน VFA/Alkalinity อยู่ในช่วง 0.32-0.83 แสดงถึงภาพประกอบที่ 4-11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีความสามารถที่จะรองรับการเปลี่ยนแปลงของสภาพกรดได้ดี เนื่องจากอัตราส่วนของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายยังน้อยกว่าสภาพด่างอยู่มาก



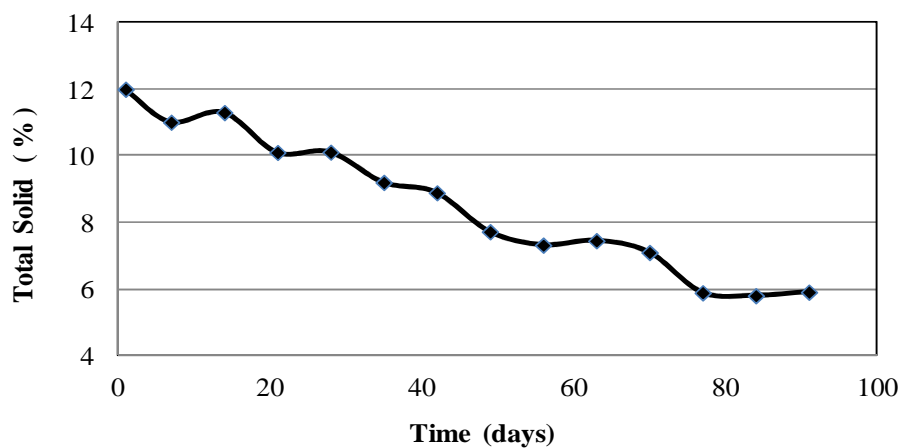
ภาพประกอบที่ 4-10 สภาพด่างในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่าง
มูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง



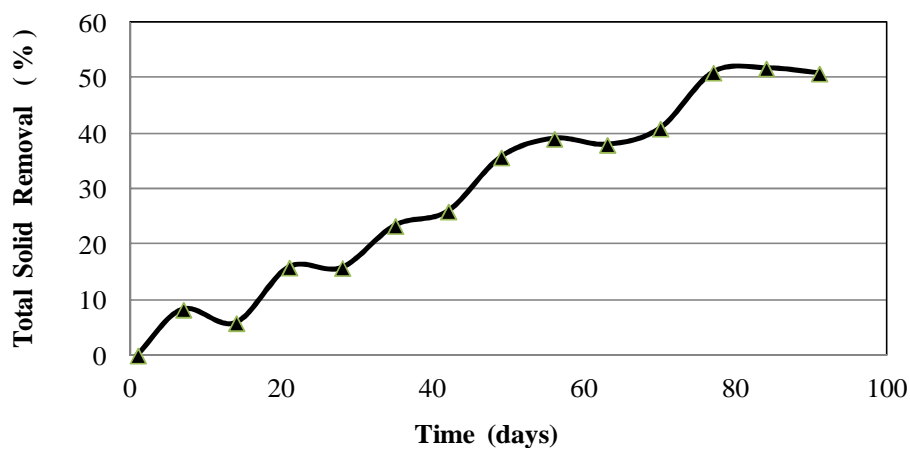
ภาพประกอบที่ 4-11 อัตราส่วนความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อสภาพต่าง
ในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและไบogas พารา
ขนาดคั้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

4.5.6 ปริมาณของแข็งทั้งหมด

TS เริ่มต้นในการดำเนินระบบมีค่า 12% จากนั้นค่า TS ของวัตถุดิบจะค่อยๆ ลดลง เนื่องจากเกิดการย่อยสลายโดยแบคทีเรีย ในช่วงแรกของการทดลองจะมีการกำจัดของแข็งที่ไม่สูงนัก เนื่องจากมีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบ หลังวันที่ 20 ของการทดลองเริ่มมีการกำจัดของแข็งมากยิ่งขึ้น เนื่องจากในช่วงนี้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารอาหารได้ดี สอดคล้องกับปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพที่เริ่มสูงขึ้นด้วย และไม่มีอาการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย จนถึงช่วงวันที่ 77 ของการทดลอง ปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบเริ่มมีค่าคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายวัตถุดิบได้แล้ว ปริมาณของแข็งทั้งหมดและการกำจัดของแข็งทั้งหมดแสดงได้ดังภาพประกอบที่ 4-12 และ 4-13 ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมดอยู่ที่ 51%



ภาพประกอบที่ 4-12 ปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่าง
มูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง



ภาพประกอบที่ 4-13 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากการ
หมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราขนาดต้นแบบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง

4.6 โมเดลต้นแบบสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานระดับครัวเรือน

โมเดลต้นแบบสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับครัวเรือน สำหรับถังหมักขนาด 200 ลิตร จะทำการป้อนวัตถุดิบระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยขณะเริ่มต้นการหมักจะทำการป้อนวัตถุดิบประมาณ 80 กิโลกรัม เตรียมได้จากวัตถุดิบเริ่มต้นของมูลสุกรประมาณ 5 กิโลกรัมและใบยางพาราที่ผ่านการลดขนาดแล้วประมาณ 5 กิโลกรัม น้ำประมาณ 70 ลิตร หลังจากหมักไปแล้วประมาณ 14 วัน โดยจะทำการเติมวัตถุดิบเพิ่มทุกๆ 3 วัน เตรียมได้จากมูลสุกรและใบยางพาราประมาณ 1 กิโลกรัม (มูลสุกร 3 ส่วน ใบยางพารา 1 ส่วน) และน้ำประมาณ 6.5 ลิตร ทำการกวนผสมทุกวันๆ ละครั้ง เพื่อให้การทำงานของแบคทีเรียดีขึ้น ทำการป้อนวัตถุดิบประมาณ 10 ครั้ง แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ข้อมูลการป้อนวัตถุดิบสำหรับถังหมักระดับครัวเรือน

วันที่ดำเนินการหมัก	จำนวนครั้งที่เติมวัตถุดิบ	น้ำหมักวัตถุดิบ (กิโลกรัม)		
		มูลสุกร	ใบยางพารา	น้ำ
1	1	5	5	70
14	2	0.75	0.25	6.5
17	3	0.75	0.25	6.5
20	4	0.75	0.25	6.5
23	5	0.75	0.25	6.5
27	6	0.75	0.25	6.5
30	7	0.75	0.25	6.5
33	8	0.75	0.25	6.5
36	9	0.75	0.25	6.5
39	10	0.75	0.25	6.5
42	11	0.75	0.25	6.5

สำหรับสมการที่ใช้ในการประเมินปริมาณกำลังการผลิตก๊าซชีวภาพได้จากชุดการทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง รายละเอียดแสดงดังสมการที่ 1 และตารางที่ 4-6 และ 4-7 ซึ่งสมการนี้จะช่วยสำหรับการประเมินกำลังการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราอย่างคร่าวๆ ได้

$$Y = [A_0 + (A_1 \times C_1) + (A_2 \times C_2) + (A_3 \times C_3)] \left[\frac{(B \times 7)}{4} \right] \quad (1)$$

ตารางที่ 4-6 ข้อมูลของตัวแปรที่ใช้สำหรับสมการการประเมินกำลังการผลิตก๊าซชีวภาพ

Variable	Value
Y	ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)
A ₀	0.595
A ₁	-0.270
A ₂	-0.041
A ₃	-0.741
C ₁	ร้อยละของใบยางพาราในวัตถุดิบเริ่มต้น
C ₂	ร้อยละของใบยางพาราในวัตถุดิบป้อน
C ₃	ปริมาณวัตถุดิบป้อน (กิโลกรัม) = $0.15 \times \frac{B}{4}$
B	ขนาดถังหมัก (ลิตร)

ตารางที่ 4-7 ข้อมูลทางสถิติสำหรับสมการประเมินกำลังการผลิตก๊าซชีวภาพ

Variable	Value
R^2	0.8953818
R^2_{adj}	0.8326108
R_{msd}	0.0067762
Variance	0.0007439

ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทดแทนก๊าซ LPG ได้ 0.46 กิโลกรัม ก๊าซ LPG หนึ่งถังขนาด 15 กิโลกรัม (ราคา 300 บาท/ถัง) สามารถใช้ประกอบอาหารต่อหนึ่งครัวเรือน (สมาชิก 3-6 คนต่อหนึ่งครัวเรือน) โดยเฉลี่ยประมาณ 3 เดือน ดังนั้น ก๊าซชีวภาพประมาณ 33 ลูกบาศก์เมตร สามารถใช้ประกอบอาหารต่อหนึ่งครัวเรือนได้ประมาณ 3 เดือน โดยเฉลี่ย 1 เดือน ปริมาณการใช้ก๊าซชีวภาพในการประกอบอาหารต่อหนึ่งครัวเรือนประมาณ 11 ลูกบาศก์เมตรและ 1 วันจะใช้ก๊าซชีวภาพประมาณ 0.37 ลูกบาศก์เมตร (370 ลิตร) หากใช้ถังหมักขนาด 200, 500, และ 1,000 ลิตร สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เฉลี่ยประมาณ 112, 280, และ 560 ลิตร/วัน ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 ข้อมูลการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราสำหรับ ถังหมักขนาดต่างๆ

ขนาดถังหมัก (ลิตร)	ปริมาณการผลิต ก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	ปริมาณวัตถุดิบ เริ่มต้น (กิโลกรัม)	ปริมาณวัตถุดิบ ป้อน (กิโลกรัม)	ค่าใช้จ่ายที่สามารถ ประหยัดได้ (บาท/เดือน)
200	112	80	7.5	31
500	280	200	18.75	77
1,000	560	400	37.5	155

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราในชุดทดลองระดับห้องปฏิบัติการแบบแบทช์และแบบกึ่งต่อเนื่องที่สภาวะต่างๆ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมไปใช้ในการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพขนาดต้นแบบ จากผลการทดลองพบว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งจากทางการเกษตรและของเสียจากทางปศุสัตว์ คือ ใบยางพาราและมูลสุกรมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ การทดลองทั้งหมดดำเนินการโดยไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิห้อง และไม่ได้ใช้เชื้อจุลินทรีย์ในตะกอนเริ่มต้น เนื่องจากต้องการกำหนดสภาวะในการทดลองให้คล้ายคลึงกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในระดับครัวเรือนมากที่สุด จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ใบยางพาราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ พิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากการทดลองในระบบแบทช์เพิ่มขึ้นจาก 1.99 ลิตร/วัน เป็น 2.66 ลิตร/วัน ร้อยละก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 41% เป็น 58% และผลได้ของก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้นจาก 0.06 L/kg TS_{removed} เป็น 0.38 L/kg TS_{removed} เมื่อเทียบกับการใช้มูลสุกรเพียงชนิดเดียวในการหมัก

2. สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราแบบแบทช์ คือ สัดส่วนระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 50:50 ปริมาณ TS 12% และใช้ใบยางพาราที่ผ่านการบดแล้ว ปริมาณใบยางพาราในวัตถุดิบถือเป็นตัวแปรสำคัญต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมกับมูลสุกร กรณีมีปริมาณใบยางพาราในวัตถุดิบน้อยเกินไป จะไม่สามารถเพิ่มสารอาหารให้กับระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้และกรณีมีปริมาณใบยางพารามากเกินไปจะส่งผลให้ระบบเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย

3. สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราแบบกึ่งต่อเนื่องในระดับห้องปฏิบัติการปริมาตรถึงหมักขนาด 4 ลิตร คือ TS วัตถุดิบเริ่มต้นและวัตถุดิบป้อนที่ 12% สัดส่วนเริ่มต้นวัตถุดิบและสัดส่วนป้อนวัตถุดิบระหว่างมูลสุกรและใบยางพาราที่ 50:50 และ 75:25 ตามลำดับ ระยะเวลาพักเก็บ 20 วัน อัตราการระบรทุก

สารอินทรีย์ 2.56 kg COD/m³/D ทำการป้อนวัตถุดิบทุกๆ 3 วัน ปริมาณวัตถุดิบป้อนครั้งละ 0.15 กิโลกรัม

4. สภาพที่เหมาะสมจากการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการะบวนการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราแบบกึ่งต่อเนื่องสามารถนำมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดต้นแบบปริมาตรถังหมักขนาด 200 ลิตร ทำการป้อนวัตถุดิบทุกๆ 3 วัน ปริมาณวัตถุดิบป้อนครั้งละ 7.5 กิโลกรัม ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยประมาณ 112 ลิตร/วัน ผลได้ก๊าซมีเทน 13.53 L/g TS_{removed} มีร้อยละก๊าซมีเทนในช่วง 62-68% สามารถทดแทนการใช้ก๊าซ LPG ปริมาณ 1.55 กิโลกรัม/เดือน คิดเป็นเงิน 31 บาท/เดือน

5. ประสิทธิภาพสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างมูลสุกรกับใบยางพาราสำหรับใช้ในครัวเรือนขึ้นอยู่กับ TS วัตถุดิบเริ่มต้นและวัตถุดิบป้อน สัดส่วนเริ่มต้นวัตถุดิบและสัดส่วนป้อนวัตถุดิบระหว่างมูลสุกรและใบยางพารา ปริมาณวัตถุดิบป้อน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ขนาดของใบยางพาราถือเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้น ในการประยุกต์ใช้ระดับครัวเรือนควรมีเครื่องลดขนาดใบยางพารา

2. ใบยางพารามีศักยภาพในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่ ปริมาณของใบยางพาราที่จะใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพไม่มีตลอดทั้งปี จะมีมากช่วงฤดูใบยางผลัดใบ ดังนั้น หากต้องการนำใบยางพารามาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตการชีวภาพต้องมีการเก็บรวบรวมใบยางพาราในช่วงเวลาดังกล่าว

3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการนำชีวมวลและมูลสัตว์ชนิดอื่นๆ มาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพแทนการใช้ใบยางพารากับมูลสุกร เนื่องจากในบางพื้นที่ไม่สามารถหามูลสุกรหรือใบยางพารามาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพได้

เอกสารอ้างอิง

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2535. วิศวกรรมกำจัดน้ำเสีย เล่มที่ 2. สำนักพิมพ์มิตรนราการพิมพ์.
กรุงเทพฯ.
- จิตตาวดี ดือขุนทด. 2546. การผลิตก๊าซมีเทนด้วยการหมุนเวียนน้ำชะขยะระหว่างถังปฏิกรณ์ หลุมฝัง
กลบจำลอง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- วิรัช สัจจแพรวพันธ์. 2529. ผลของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและสารบางอย่างที่มีต่อการหมักมูล
วัวในสภาพไร้อากาศ. การค้นคว้าแบบอิสระเชิงวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย,
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สมฤดี ฤทธิยากุล. 2551. ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ และผลพลอยได้จากการหมักมูลสุกรร่วมกับ
สาหร่ายหนามจากทะเลสาบสงขลา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการ
จัดการสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สุเมธ ชวเดช. 2530. ระบบหมักก๊าซชีวภาพ UASB เอกสารประกอบคำบรรยาย เรื่องการออกแบบ
และพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์ก๊าซชีวภาพ. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. กรุงเทพฯ.
- สุรพล สายพานิช. 2530. กระบวนการเร่งตะกอนคอนแทกต์สเตบิลไลเซชันแบบแอนแอโรบิก.
รายงานผลการวิจัย. สถาบันวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.
- อธี อัมพรายน. 2546. การศึกษาสมรรถนะของการหมักแบบไร้ออกซิเจนโดยวิธีสี่เบคของส่วนที่
เป็นสารอินทรีย์จากมูลฝอยชุมชนที่อุณหภูมิมีโซฟิลิก เทอร์โมฟิลิก และอุณหภูมิห้อง.
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม,
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- Ahn, J-H.; and Forster, C.F. The effect of temperature variations on the performance of mesophilic and thermophilic anaerobic filters treating a simulated papermill wastewater. *Process Biochemistry*. 2002, 37, 589-594.
- Ahring, B.; Ibrahim, A.; and Mladenovska, Z. Effect of temperature increase from 55 to 65 °C on performance and microbial population dynamics of an anaerobic reactor treating cattle manure. *Water Resources*. 2001, 35, 2446–2452.
- Albagnac, G.; Tholozan, J. L.; Samain, E.; and Grivet, J. P. Propionate metabolism in a methanogenic enrichment culture: Direct reductive carboxylation and acetogenesis pathways. *PEMS microbial. Ecol.* 1990, 73, 291-298
- Ali, R.T.; and Coskun, A.D. Biogas production from olive pomace. *Resources Conservation and Recycling*. 2000, 30, 301-313.
- APHA, AWWA and WEF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th ed. Maryland: American Public Health Association. Washington D.C. U.S.A. 1998.
- Archer, D.B.; and Kirsop, B.H. The microbiology and control of anaerobic digestion. In A.W. ed. *Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology*. Elsevier Applied Science Publisher. London. 1991, 49-91.
- Banerjee, A.; Elefsiniotis, P.; and Tuhtar, D. Effect of HRT and temperature on the Acidogenesis of municipal primary sludge and industrial wastewater. *Water Science and Technoiogy*. 1998, 33(8-9), 417-423
- Barnet, A.; Pyle, L.; and Subramanian, S.K. *Biogas Technology in the Third World. A Multidisciplinary Review*. Ottawa: International Development Research Centre. 1978.

- Berna, K.; and Bahattin, T. Biogas production form co-digestion of a mixture of cheese whey and dairy manure. 2010. *Biomass and Bioenergy*.2010, 42, 1321-1329
- Borja, R.; Gonzalez, E.; Raposo, F.; Millan, F.; and Martin, A. Performance evaluation of a mesophilic anaerobic fluidized-bed reactor treating wastewater derived from the production of proteins from extracted sunflower flour. *Bioresource Technology*. 2001, 76, 45-52
- Bouallagui, H.; Cheikh, R.B.; Marouani, L.; and Hamdi, M. Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. *Bioresource Technology*. 2002, 1-5.
- Bryant, M.P. Microbial Methane Production Theoretical Aspects. *Anim. Sci.* 1979, 48(1), 193-201.
- Buswell, A.M.; and Mueller, H.F. Mechanisms of Methane Fermentation. *Industrial and Engineering Chemistry*. 1952, 44(3), 550-552.
- Carucci, G.; Carrasco, F.; Trifoni, K.; Majone, M.; and Beccari, M. Anaerobic Digestion of Food Industry Wastes. Effect of Codigestion on Methane Yield. *Journal of Environmental Engineering*. 2005, 1073-1045.
- Cecchi, F.; Pavan, P.; Mata Alvarez, J.; Bassetti, A.; and Cozzolilino. Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste: Thermophilic vs. Mesophilic at High Solid. *Waste Management & Reseach*. 1991, 9, 305-315.
- Chanakya, H.N.; Borgankar, S.; Meena, G.; and Jagadish, K.S. Solid-phase biogas production with garbage and water hyacinth. *Bioresource Techcology*. 1993, 46, 227-231.
- Diaz, L.F.; Savage, G.M.; Eggerth, L.L.; and Golueke, C.G. *Composting and Recycling Municipal Solid Waste*. Lewis Publishers. New York. 1993.

Economic Value of Biogas. Available online: <http://www.vcharkarn.com/varticle/41001>

(สืบค้นเมื่อวันที่ 12 มีนาคม 2554)

Fantozzi, F.; and Buratti, C. Biogas production from different substrates in an experimental Continuously Stirred Tank Reactor anaerobic digester. *Bioresource Techcology*. 2009, 100, 5783-5789.

Gerardi, M.H. *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. New Jersey: John Wiley & Son. 2003.

Gomez, X.; Cuetos, M.J.; and Sanchez, M.E. Production of Hydrogen by Dark Fermentation of Municipal Solid Waste and Slaughterhouse Waste: A two-Phase Process. *Journals of Power Sources*. 2006, 157, 727-732.

Gourdon and Ben- Hassan, R. M. Continuous production of biogas from dairy manure using an innovative no-mix reactor. *Applied Biochemical Biotechnology*. 1989, 541-559.

Grady, R. M.; Grange, R. W.; Lau, K. S.; Maimone, M. M.; Nichol, M. C.; Stull, J. T.; and Sanes, J. R. Role for alpha-dystrobrevin in the pathogenesis of dystrophin-dependent muscular dystrophies. *Nat. Cell Biol*. 1999, 1, 215-220

Hayes, T.P.; and Theis, T.L. The distribution of heavy metals in anaerobic digestion. *Water Pollut Control Fed*. 1978, 50 (1), 307-313.

Holland, K.T.; Knapp J.S.; and Shoesmith, J.G. *Anaerobic Bacteria*. Chapman and Hall, New York. 1987.

Hong-Wei, Y.; and David, E.B. Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane. *Bioresource Techcology*. 2007, 98, 130-134.

- Hornick, J.R.; Zerbe, J.I.; and Whitmore, J.L. Jari's successes. *Journal of forestry*. 1984, 82, 663-667.
- Jagadish, K.S.; Chanakya, H.N.; and Rajabapaiah, P. Biogas production from leaf biomass. *Biomass and Bioenergy*, 1998, 14, 415-423
- Jewell, W.J.; Cummings, R.J.; and Richards, B.K. Methane Fermentation of Energy Crops : Maximum Conversion Kinetics and In Situ Biogas Purification. *Biomass and Bioenergy*. 1993, 5, 3-4, 261-278.
- John, W.; and Sons. *Anaerobic Sewage Treatment*. 3rd Edition. Chichester. New York. 1994.
- Kim, M.; Ahn, Y.H.; and Speece, R.E. Comparative process stability and efficiency of anaerobic Digestion. mesophilic vs. thermophilic. *Wat. Res.* 2002, 1-17.
- Kim, S.-H.; Han, S.-K.; Shin; and Song, H.-S. Feasibility of biohydrogen production by anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2004, 29, 1607-1616.
- Ioannis, S. Z.; and George, A. P. Anaerobic Co-Digestion of table olive debittering & washing Effluent, cattle manure and pig manure in batch and high volume laboratory anaerobic digesters: Effect of temperature. *Bioresource Technology*. 2011, 102(8), 4995-5003
- McCarty, P.L. Anaerobic waste treatment fundamental part 1, 2, 3, 4. *Public Works*. 1964, 95(9), 107-115.
- Marchaim, U.; and Krause, C. Propionic to acetic acid ratios in overloaded anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. 1993, 43, 195-203

- Metcalf and Eddy. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. 4th Edition. McGraw-Hill. New York. 2004.
- Parawira, W.; Murto, M.; Zvauya, R.; and Mattiasson, B. Anaerobic batch digestion of solid potato waste alone and in combination with sugar beet leaves. Renewable Energy. 2004, 29, 1811-1823.
- Pagilla, K.R.; Kim, H.; and Cheunbarn, T. Aerobic thermophilic and anaerobic mesophilic treatment of swine waste. Water Research. 2000, 34(10), 2747-2753.
- Prasad, K.; Jukka, R. Anaerobic co-digestion of potato tuber and its industrial by-products with pig manure. Resources Conservation & Recycling. 2005, 43, 175-188
- Polprasert, C. Organic Waste Recycling Technology and Management. 3rd Edition. John Wiley and Sons Ltd. West Sussex. 1996.
- Potential of Co-digestion. Available online: <http://home.eng.iastate.edu/~tge/ce421-521/wei.pdf>,
(สืบค้นเมื่อวันที่ 14 มกราคม 2553)
- Punal, A.; Trevisan, M.; Rozzi, A.; and Lema, J.M. Influence of C:N ratio on the start-up of upflow anaerobic filter reactors. Water Research. 2000, 34 (9), 2614-2619.
- Radwan, A.M.; Sebak, H.A.; Mitry, N.R.; EL-ZaNati, E.A.; and Hamad, M.A. Dry Anaerobic Fermentation of Agricultural Residues. Biomass and Bioenergy. 1993, 5, 495-499.
- Rao, M.S.; Singh, S.P.; Singh, A.K.; and Sodha, M.S. Bioenergy conversion studies of the organic fraction of MSW: assessment of ultimate bioenergy production potential of municipal garbage. Applied Energy. 2000, 66, 75-87.

- Raynal, J.; Delgenes J.P.; and Moletta, R. Two-phase anaerobic digestion of solid wastes by a multiple liquefaction reactors process. *Bioresource Technology*. 1998, 65, 97-103.
- Rene, A.; and Gunnar, L. Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste. *Renewable Energy*, 2007, 33(4), 726-734
- Schober, G.; Schafer, J.; Schmid-Staiger, U.; and Trosch, W. One and two-stage digestion of solid organic waste. *Water Resources*. 1999, 33(3), 854-860.
- Sharma, V.k.; Testa, C.; Cornacchia, G.; Lastella, G. ; and Farina, F. Anaerobic digestion of Semi-Solid Organic Waste Available From Orthofruit Market: Preliminary Experimental Result. *Energy & Conversion & Management*. 1999, 40, 287-304.
- Shanmugam, P.; and Horan, N.J. Optimising the biogas production from leather fleshing waste by co-digestion with MSW. *Bioresource Techcology*. 2009, 100, 4117-4120.
- Souza, M.E. Criteria for the utilization. design and operation of UASB reactors. *Water Science and Technology*. 1986, 18(12), 55-69.
- Thiago, C. G.; Luiz C. A.; and Ely Nahas. Decomposition of The Rubber Tree *Hevea brasiliensis* litter at Two Depths. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2008, 68,128-135
- Thiele, J.H. Mixed- Culture Interaction in Methanogenesis. *Mixed Cultures in Biotechnology*, Edited by Zeikus, G.; and Johnson, E.A., McGraw –Hill. New York. 1991, 216-292.
- Wen, C.; Huang, X.; and Qian, Y. Domestic wastewater treatment using an anaerobic bioreactor coupled with membrane filtration. *Process Biochemistry*. 1999, 35, 335-340.
- Wuebbles, D.J.; and Hayloc, K. Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews*. 2002, 57, 177-210.

Wujcik, W.J.; and Jewell, W.J. Dry Anaerobic Fermentation. *Biotechnology and Bioengineering Symposium*. 1980, 10, 43-65.

Zupancic, G.D.; and Ros, M. Heat and energy requirements in thermophilic anaerobic sludge digestion. *Renewable Energy*. 2003, 28, 2255-2267.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีการวิเคราะห์

1. Chemical Oxygen Demand (COD) โดย Titrimetric Method

การวิเคราะห์หาค่า COD โดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux) มีหลักการเช่นเดียวกับวิธีรีฟลักซ์แบบเปิด (Open Reflux) สารอินทรีย์ที่ระเหยจะสามารถถูกออกซิไดซ์ได้มากกว่าในระบบเปิดเพราะมีเวลาสัมผัสกับสารออกซิไดซ์ได้นานกว่า โดยเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ โดยสารเคมีที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูง (Strong Chemical Oxidant) ในสถานะที่เป็นกรด ได้แก่ โพรแตสเซียมเปอร์มังกานेट (KMnO_4) และ โพรแตสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) ใช้ฟิโรอินเป็นอินดิเคเตอร์ ที่จุดยุติจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง สำหรับการย่อยสลายในตู้อบจะใช้อุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐาน โพตัสเซียมไดโครเมต 0.0167 M ละลาย $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 4.913 กรัม ที่อบแห้งในตู้อบอุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น (Dessicator) ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร ค่อย ๆ เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 167 มิลลิลิตร และ HgSO_4 33.3 กรัม คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วปรับให้มีปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น

2. กรดซัลฟูริกเรเจนต์ ละลาย Ag_2SO_4 22 กรัม ลงในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1 ขวด ซึ่งมีน้ำหนัก 4.0 กิโลกรัม

3. สารละลายเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ ละลาย $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.695 กรัม และ 1,10 Phenanthroline Monohydrate 1.485 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร

4. สารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.1 M ละลาย $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 39.2 กรัม ในน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 20 มิลลิลิตร คนให้ละลาย ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร สารละลายนี้ต้องเทียบมาตรฐานกับสารละลายมาตรฐาน โพตัสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้ง ที่นำมาใช้เติมสารเคมีตามตารางผนวกที่ 1 ในภาชนะย่อยสลายแต่ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำ ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต ใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์ 1-2 หยด ทำ ประมาณ 1-2 หลอด ไตเตรทจนถึงจุดยุติสีจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง Molarity ของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 = \text{มิลลิลิตร } \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \times 0.1 \text{ มิลลิลิตร } \text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$

วิธีการวิเคราะห์

1. ล้างหลอดย่อยสลายและฝาจุกด้วยกรดซัลฟูริก 20 เปอร์เซ็นต์ ก่อนนำไปใช้เพื่อป้องกันการปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์
2. เลือกใช้ปริมาตรของตัวอย่างน้ำและสารเคมีที่เหมาะสม
3. นำตัวอย่างน้ำมาใส่หลอดย่อยสลาย เติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับในการย่อยสลาย
4. ก่อขยๆ เทกรดซัลฟูริกหรือกรดให้ไหลลงก้นหลอดแก้ว เพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ได้ชั้นตัวอย่างน้ำและสารละลายในการย่อยสลาย
5. ปิดจุกหลอดแก้วให้แน่นหรือถ้าใช้แอมพูลก็ให้เชื่อมให้สนิท แล้วคว่ำหลอดแก้วไปมาหลาย ๆ ครั้งเพื่อผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง
6. นำหลอดทดลองนี้ไปใส่เครื่องย่อยสลาย (Block Digester) หรือตู้อบ ซึ่งได้ทำให้ร้อนถึงอุณหภูมิประมาณ 150 องศาเซลเซียส ก่อนใช้เวลาริฟลักซ์ 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นถึงอุณหภูมิห้อง โดยนำหลอดทดลองมาวางในที่วางหลอดทดลอง
7. เปิดฝาจุก แล้วจึงใส่แท่งแม่เหล็กที่หุ้มด้วยทีเอฟอี (TFE Covered Magnetic Bar) เพื่อนำ ไปไทเตรท เติมเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ประมาณ 1-2 หยด กวนผสมให้เข้ากัน ในขณะที่ไทเตรทด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.1 M จุดยุติจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วจากสีฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง ให้ทำแบลงค์ในลักษณะเดียวกัน

การคำนวณ

$$\text{COD}(\text{mg/l}) = \left(\frac{(A - B) \times M \times 8,000}{V} \right)$$

A = มิลลิลิตร $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ ที่ใช้ในการไทเตรทแบลงค์

B = มิลลิลิตร $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$ ที่ใช้ในการไทเตรทตัวอย่างน้ำ

M = Molarity ของ $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$

V = ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ (ml)

ตารางผนวกที่ 1 ปริมาณตัวอย่างและรีเอเจนต์ที่ใช้สำหรับขนาดต่างๆ ของภาชนะที่ใช้ในการย่อยสลาย

ขนาดของภาชนะ ย่อยสลาย	ตัวอย่างน้ำ (ml)	สารละลาย ในการย่อยสลาย (ml)	กรดซัลฟูริก รีเอเจนต์(ml)	ปริมาตรทั้งหมด (ml)
16x100 mm	2.5	1.5	3.5	7.5
20x150 mm	5.0	3.0	7.0	15.0
25x159 mm	10.0	6.0	14.0	30.0

2. ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)

ของแข็งทั้งหมด หมายถึง ปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออก จากสารตัวอย่างจนหมด แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนัก คงที่ปล่อยให้เย็นใน โถดูดความชื้น (Desiccators) แล้วชั่งน้ำหนักของของแข็งในภาชนะนั้น จะ ได้ปริมาณของของแข็งทั้งหมด

วิธีการวิเคราะห์

1. การเตรียมจานระเหยเซรามิก จานที่จะใช้ต้องอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสประมาณ 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นใน โถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนักที่แน่นอน สมมติให้ น้ำหนัก คือ A มิลลิกรัม
2. เลือกใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำให้เหมาะสมไม่ควรน้อยหรือมากเกินไป
3. นำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ใส่ในจานระเหย นำไประเหยน้ำออกให้หมดบน Hot Plate จากนั้นนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็น ใน โถดูดความชื้น
4. ชั่งน้ำหนักจานระเหยทันทีที่เย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง สมมติให้น้ำหนัก คือ B มิลลิกรัม น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นก็คือ น้ำหนักของปริมาณของแข็งทั้งหมด ซึ่งคำนวณออกมาในรูปของ มิลลิกรัมต่อลิตร (V =ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร)

การคำนวณ

$$TS(\text{mg/l}) = \left(\frac{(A - B)\text{mg} \times 1,000}{V} \right)$$

3. ของแข็งระเหยทั้งหมด (Total Volatile Solids, TVS)

ของแข็งระเหยทั้งหมด หมายถึง ปริมาณของสารที่ระเหยไปได้ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ส่วนตะกอนที่เหลืออยู่ไม่สลายไปเรียกว่าปริมาณของแข็งคงตัว (Fix Solids)

วิธีการวิเคราะห์

1. นำจานระเหยเซรามิกที่ได้จากการหาปริมาณของแข็งทั้งหมดแล้ว นำไปเผาในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 550 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 15-20 นาที)
2. ปล่อยให้เย็นลงเท่ากับอุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักของแข็งที่เหลืออยู่ (Fix Solids)

การคำนวณ

$$\text{Fix - Solids (mg/l)} = \left(\frac{\text{Fix - Solids (mg)} \times 1,000}{V} \right)$$

ดังนั้น มิลลิกรัม/ลิตร Total Volatile Solid = มิลลิกรัม/ลิตร Total Solid – มิลลิกรัม/ลิตร Fix Solids

4. กรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Fatty Acid, VFA) และความเป็นด่างทั้งหมด (Total Alkalinity, TALK)

วิธีนี้เป็นวิธีหยาบ ๆ ค่าที่ได้ไม่แม่นยำ นัก ไม่ควรนำไปใช้ในงานวิเคราะห์ที่ต้องการความละเอียด แต่สามารถนำไปใช้ในการควบคุมระบบเพื่อที่จะได้ทราบถึงการทำงานของแบคทีเรียในระบบ ใช้เวลาในการทดลองประมาณ 1 ชั่วโมง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. หาสภาพต่างทั้งหมดที่ pH 4.0 โดยวิธีการไตเตรทแบบโพเทนชิอเมตริก
2. ต้มไล่กรดคาร์บอนิก
3. ไตเตรทกลับจาก pH 4.0 ไปเป็น 7.0 เพื่อหาสภาพต่างของกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Acid Alkalinity) และสภาพต่างของเบส (Base Alkalinity) แล้วจึงคำนวณหาค่ากรดอินทรีย์ระเหยต่อไป

สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.5 N
2. สารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 N

วิธีการวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างใส่ในหลอดทดลองและไปเข้าเครื่องแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบประมาณ 7,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที หรือจนกว่าตะกอนจะแยกออกจากน้ำ จากนั้นนำเอาส่วนใสที่อยู่ส่วนบนมา 50-200 มิลลิลิตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100-300 มิลลิลิตร วัดค่า pH ของตัวอย่างน้ำ ไตเตรทตัวอย่างน้ำจนถึง pH 4.0 ด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.5 M บันทึกปริมาณกรดมาตรฐานที่ใช้ สมมติ = A มิลลิลิตร
2. ไตเตรทตัวอย่างน้ำต่อไปจน pH ถึง 3.3-3.5 ไม่ต้องบันทึกปริมาณกรดที่ใช้ จากนั้นนำไปต้มจนเดือดประมาณ 2-3 นาที กรดคาร์บอนิกจะถูกไล่ออกไป
3. ปรับ pH ให้เป็น 4.0 ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 M จดปริมาณสารละลายมาตรฐานที่ใช้ในการไตเตรทกลับตั้งแต่ pH 4.0 ถึง 7.0 ซึ่งจะเป็นสภาพต่างเนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile Acid Alkalinity) สมมติปริมาณสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้สมมติ = B มิลลิลิตร

การคำนวณ

$$\text{Alkalinity (mg/l)} = \left(\frac{A \times N(\text{H}_2\text{SO}_4) \times 50 \times 1,000}{V} \right)$$

$$\text{VFA (mg/l)} = \left(\frac{B \times N(\text{NaOH}) \times 50 \times 1,000}{V} \right)$$

ก) กรณีที่ 1 ถ้าสภาพต่าง VFA น้อยกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{VFA (มิลลิกรัม/ลิตร คัดในรูป } \text{CH}_3\text{COOH)} = \text{สภาพต่าง VFA} \times 1.0$$

ข) กรณีที่ 2 ถ้าสภาพต่าง VFA มากกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{VFA (มิลลิกรัม/ลิตร คัดในรูป } \text{CH}_3\text{COOH)} = \text{สภาพต่าง VFA} \times 1.5$$

5. ไนโตรเจนทั้งหมด (Total Nitrogen, TKN)

การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด หมายถึงผลบวกระหว่างออร์แกนิกไนโตรเจน (Organic Nitrogen) และแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia Nitrogen) สำหรับการวิเคราะห์หาออร์แกนิกไนโตรเจนถ้าไม่ได้แยกแอมโมเนียไนโตรเจนออกเสียก่อน ผลที่ได้จะได้เป็นไนโตรเจนทั้งหมดไนโตรเจนทั้งหมดที่จะกล่าวถึงนี้หาได้โดยวิธีเจลดาคาร์ล มีเมอร์คิวรี (II) ซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งจะเปลี่ยนพวกออร์แกนิกไนโตรเจนเป็นแอมโมเนียมซัลเฟต หลังจากการย่อยสลายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้นที่มีโพแทสเซียมซัลเฟตเป็นตัวเพิ่มจุดเดือดให้สูงขึ้นถึง 344-371 องศาเซลเซียส หลังจากการย่อยสลายแล้วให้เจือจางส่วนที่เหลือภายในขวดเจลดาคาร์ล แล้วทำให้เป็นค่าด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น นำไปกลั่นโดยมีสารละลายกรดบอริกเป็นตัวดูดกลืนสารเคมี

สารเคมี

1. สารละลายสำหรับการย่อยสลาย (Digestion Solution) ละลาย K_2SO_4 134 กรัม ในน้ำกลั่น 650 มิลลิลิตร ผสมกรดซัลฟูริกเข้มข้น 200 มิลลิลิตร แล้วละลายเมอร์คิวรี (II) ออกไซด์แดง (Red Mercury (II) Oxide) 2 กรัม ในกรดซัลฟูริก 3 N ค่อย ๆ เติมลงในสารละลายโพแทสเซียมซัลเฟต แล้วเจือจางปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร เก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 14 องศาเซลเซียสเพื่อป้องกันการตกตะกอน

2. ฟีนอล์ฟทาลีนอินดิเคเตอร์

3. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium Hydroxide-Sodium Thiosulphate Reagent) ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 500 กรัมและโซเดียมไธโอซัลเฟตเพนตาไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) 25 กรัม ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 มิลลิลิตร

4. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Mixed Indicator) ละลายเมทิลเรดอินดิเคเตอร์ (Methyl Red Indicator) 200 มิลลิกรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl Alcohol) 95 เปอร์เซ็นต์ 100

มิลลิลิตรละลายเมทิลีนบลู (Methylene Blue) 100 มิลลิกรัม ในเอทิลแอลกอฮอล์ 95 เปอร์เซ็นต์ 50 มิลลิลิตรแล้วผสมสารละลายทั้งสองชนิดนี้เข้าด้วยกัน สารละลายนี้ควรเตรียมทุก ๆ เดือน

5. สารละลายอินดิเคติงบอริกแอซิด (Indicating Boric Acid Solution) ละลายกรดบอริก 20 กรัม ในน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อย เติมอินดิเคเตอร์ผสมลงไป 10 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

6. สารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.01 M

วิธีการวิเคราะห์

1. ตวงตัวอย่างน้ำโดยให้มีปริมาตรที่เหมาะสม ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางผนวกที่ 2 ใส่ลงในขวดเจดดาห์ลและใส่ลูกแก้ว 5-6 ลูก

2. เติมสารละลายสำหรับย่อยสลายออร์แกนิกในโตรเจน 50 มิลลิลิตร

3. ต้มเคี่ยวจนได้สารละลายใส เคี่ยวต่อไปอีก 20-30 นาที ทิ้งให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นลงไป 300 มิลลิลิตร

4. ทำให้เป็นด่างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์-โซเดียมไฮโอซัลเฟต ประมาณ 50 มิลลิลิตร โดยใช้ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein) เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วนำไปกลั่นลงในสารละลายอินดิเคเตอร์ บอริกแอซิด 50 มิลลิลิตร จนได้ปริมาตรทั้งหมดเป็น 200 มิลลิลิตร

5. นำส่วนที่กลั่นได้ให้เย็น นำไปไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริก 0.01 M โดยใช้อินดิเคเตอร์ผสม 2-3 หยด จดปริมาตรของกรดซัลฟูริกมาตรฐานที่ใช้ไว้

การคำนวณ

$$\text{Total - Nitrogen (mg/l)} = \left(\frac{(A - B) \times M \times 1,000 \times 28}{V} \right)$$

A = มิลลิลิตร สารละลายกรดซัลฟูริกที่ใช้สำหรับตัวอย่างน้ำ

B = มิลลิลิตร สารละลายกรดซัลฟูริกที่ใช้สำหรับแบลนด์

M = Molality ของสารละลายกรดซัลฟูริกมาตรฐานที่ใช้

ตารางผนวกที่ 2 ปริมาตรของตัวอย่างน้ำที่เหมาะสม

ออร์แกนิกไนโตรเจนในตัวอย่างน้ำ (mg/l)	ปริมาณของตัวอย่างน้ำ (ml)
0-1	500
1-10	250
10-20	100
20-50	50
50-100	25

6. การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (Gas Composition)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ คือ การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทน เครื่องมือและอุปกรณ์เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography) Shimadzu Model GC-14B สภาวะและอุปกรณ์การวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ มีดังนี้

- คอลัมน์ WG-100 SS เส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 มิลลิเมตร ความยาว 1.8 เมตร
- เครื่องตรวจวัดแบบ Thermal Conductivity Detector (TCD)
- อุณหภูมิคอลัมน์ 40 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิ Injection port 40 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิ Detector 85 องศาเซลเซียส
- Carrier Gas ที่ใช้คือ ก๊าซฮีเลียม
- Bridge Current ที่ใช้คือ 120 mA

วิธีการวิเคราะห์

การฉีดตัวอย่างก๊าซชีวภาพโดยใช้ Syringe แบบ Gas Tight Syringe ขนาด 1 มิลลิลิตร ฉุดก๊าซชีวภาพจากหลอดสูญญากาศที่ใช้เก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพมา 1 มิลลิลิตร ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี ปริมาณร้อยละของก๊าซมีเทน คำนวณได้จากความสูงของกราฟ (Peak Area)

7. ปริมาณความชื้น (Moisture Content)

หาปริมาณความชื้นเริ่มต้นในวัตถุดิบโดยใช้วิธีอบในตู้อบ 103 – 105 องศาเซลเซียส (AOAC, 1995)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เตอบไฟฟ้า
2. เครื่องชั่งน้ำหนักแบบละเอียด
3. Moisture Can

วิธีการ

1. นำ Moisture Can ไปอบที่ 100 °C ประมาณ 2 ชั่วโมง โดยขณะอบให้เปิดฝา
2. นำ Moisture Can ที่อบแล้ว ปิดฝา ใส่โถดูดความชื้น ทิ้งไว้ให้เย็น
3. ชั่งน้ำหนัก Moisture Can ด้วยเครื่องชั่งแบบละเอียด ทศนิยม 3 ตำแหน่ง

บันทึกน้ำหนัก

4. ชั่งตัวอย่างมูลสุกรและไบยางพารา ประมาณ 2-5 กรัม (บันทึกน้ำหนักที่

แน่นอน) ใส่ Moisture Can (A)

5. นำไปอบที่ 105 °C ประมาณ 24 ชั่วโมง
6. นำออกจากตู้อบ ทิ้งไว้ให้เย็น ชั่งน้ำหนักที่หายไป บันทึกผล (B)
7. คำนวณหาความชื้นในตัวอย่าง ดังนี้

$$\text{Moisture Content (\%)} = \left(\frac{(A - B) \times 100}{A} \right)$$

ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณ

วิธีการคำนวณ

1. การคำนวณการเตรียมวัตถุดิบที่มีค่าของแข็งทั้งหมดประมาณ 16 %

ต้องการเตรียมมูลสุกรที่มีค่าของแข็งทั้งหมดประมาณ 16 %

มูลสุกรมีความชื้นเริ่มต้น 2.31% (97.69 %TS)

ตัวอย่างการคำนวณ

TS 16 กรัม จะต้องเติมน้ำ 84 มิลลิลิตร

TS 97.69 กรัม จะต้องเติมน้ำ $(84 \times 97.69) / 16 = 512.87$ มิลลิลิตร

ดังนั้น มูลสุกร 100 กรัม จะต้องเติมน้ำเพิ่มอีก $512.87 - 2.31 = 510.56$ มิลลิลิตร

น้ำหนักรวมทั้งหมดประมาณ $100 + 510.56 = 610.56$ มิลลิลิตร

ต้องการให้ได้ปริมาตรทั้งหมด 1,000 มิลลิลิตร

$$\text{OLR} \left(\frac{\text{kgCOD}}{\text{l} \times \text{d}} \right) = \frac{Q(\text{l/d}) \times \text{COD}_{\text{inf}}(\text{mg/l})}{V_{\text{working}}(\text{l})}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

ค่า COD ของของเหลวที่เข้าระบบ = 65,000 mg/l

ปริมาตรของเหลวที่เข้าระบบ = 0.15 l/d

ปริมาตรใช้งานจริง = 3 l

$$\text{OLR} = (0.15 \times 65,000) / (3 \times 1,000)$$

$$\text{OLR} = 3.25 \text{ g COD/l/d}$$

$$\text{OLR} = 3.25 \text{ kg COD/m}^3/\text{D}$$

2. การคำนวณประสิทธิภาพการกำจัดของระบบ (% Removal)

$$\text{Removal}(\%) = \frac{(\text{Organic}_{\text{inf}} - \text{Organic}_{\text{eff}}) \times 100}{\text{Organic}_{\text{inlet}}}$$

ตัวอย่างการคำนวณ

%COD removal

COD ที่เข้าระบบ = 65,000 mg/l

COD ที่ออกจากระบบ = 48,987 mg/l

ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ = $(65,000 - 48,987) \times 100 / 48,987$

ประสิทธิภาพการกำจัด COD ของระบบ = 24.64%

ประสิทธิภาพการกำจัด TS ของระบบ (%)

TS ที่เข้าระบบ = 12,000 mg/l

TS ที่ออกจากระบบ = 7,910 mg/l

ประสิทธิภาพการกำจัด TS ของระบบ = $(12,000 - 7,910) \times 100 / 7,910$

ประสิทธิภาพการกำจัด TS ของระบบ = 34.08%

3. การคำนวณผลได้มีเทนที่เกิดต่อน้ำหนักสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด (Organics Removed)

$$\text{Methane Yield} \left(\frac{\text{ml CH}_4}{\text{mg TS}_{\text{removed}}} \right) = \frac{\text{Biogas (l/d)} \times \text{CH}_4 (\%)}{(\text{TS}_{\text{inf}} - \text{TS}_{\text{eff}}) (\text{mg/l}) \times Q (\text{l/d})}$$

ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด = 19.53 l/d

ปริมาณของเหลวที่เข้าระบบโดยเฉลี่ย = 0.15 l/d

ค่า TS ของของเหลวที่เข้าระบบโดยเฉลี่ย = 12,000 mg/l

ค่า TS ของของเหลวที่ออกจากระบบโดยเฉลี่ย = 7,910 mg/l


ปริมาณก๊าซมีเทน (% CH₄) = 65.07 %

$$\text{MethaneYield}\left(\frac{\text{ml CH}_4}{\text{mg TS}_{\text{removed}}}\right) = \frac{19.53(1/\text{d}) \times 65.07(\%) / 100}{(12,000 - 7,910)(\text{mg/l}) \times 0.15(1/\text{d})}$$


$$\text{MethaneYield}\left(\frac{\text{ml CH}_4}{\text{mg TS}_{\text{removed}}}\right) = 2.07\text{L} / \text{g TS}_{\text{removed}}$$

ภาคผนวก ค

ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่จากวิทยานิพนธ์



The cover features a collage of images: the top left shows the logos of Prince of Songkla University (PSU) and the National Science and Technology Development Agency (NSTDA); the top right shows a map of Thailand; the middle left shows a tropical beach with palm trees at sunset; the middle right shows a boat on a tropical island. The title 'ICET-2011' is prominently displayed in a large, stylized font.








ICET-2011

Faculty of Engineering
Prince of Songkla University

**The 5th PSU-UNS International Conference on Engineering
 and Technology (ICET-2011)**

May 2-3, 2011 : Merlin Beach Resort Hotel, Tritrang Beach,
 Phuket, Thailand

ICET-2011

<http://www.icet.eng.psu.ac.th>






The 5th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2011), Phuket, May 2-3, 2011
 Prince of Songkla University, Faculty of Engineering
 Hat Yai, Songkhla, Thailand 90112

BIOGAS PRODUCTION BY ANAEROBIC BATCH CO-DIGESTION OF PIG MANURE AND RUBBER LEAVES

Chitchanoke Kongdang¹, Chaisri Suksaroj² and Juntima Chungsiriporn^{*,1}

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,

² Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering,

Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112, Thailand

*E-mail: juntima.c@psu.ac.th

Abstract: *Co-digestion of various wastes has been shown to improve the digestibility of the material and biogas yield. The possible use of rubber leaves (RL) from rubber tree waste co-digestion with pig manure (PM) was evaluated in laboratory study by batch tests under room temperature. The length of batch experiment was 44 days. Furthermore, co-digestion in varying proportions of PM and RL were studied. The effects of increasing concentration of rubber leaves expressed as percentage of total solids (TS). The carbon-to-nitrogen ratios (C/N ratio) were investigated and feedstock proportions of rubber leaves and pig manure were 8-20% of TS. A maximum methane yield of 0.38 l CH₄/kg TS_{removed} was obtained at 12% of TS and 11.72:1 of C/N ratios. A methane content of up to 58% was obtained from this proportion of PM and RL of 50:50 whereas PM alone had produced biogas with 41%. Co-digestion can improve the methane production and the methane yield by 40% compared with digestion of PM waste alone.*

Key Words: *Biogas/ Anaerobic co-digestion/ Methane/ Pig manure/ Rubber leave*

1. Introduction

Increasing in energy demand and the issues about rapid depletion non-renewable energy resources as well as their environmental shortcomings led researchers to investigate alternative energy sources during the last two decades. Renewable energy resources draw attention all over the world because of sustainable and improvement in environmental quality. Biomass and agricultural waste represent a large potential renewable energy source, which could benefit society with a clean fuel in the form of methane. Biogas technology has been known for a long time, but in recent years the interesting in it has been significantly increased, especially due to the higher cost of living and low cost fulfill of biomass.

Anaerobic digestion is a proven and established technology for treating many types of organic wastes, both solid and liquid. This alternative allows the production of energy in the form of biogas, which

contains mainly methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) and a solid product that can be used as an amendment of soils. Co-digestion is a promising technology widely applied two or more organic residues are well described in the literature [1]. Thus, co-digestion between manure and cellulolytic would give balancing in nutrients, appropriate C/N ratio, and stable pH that needed to increase methane production, because of the added plant materials with high carbon content provides the preliminary energy source for the microorganisms growth and could improve the C/N ratio of the feedstock, thereby decreasing the risk of ammonia inhibition to the digestion process. [2]. Anaerobic digestion of pig manure (PM) alone produces low methane yield due to the high content of water and fibers of this material. It is hence clear that if it is desired to produce more methane yield to meet local energy needs, there is a need to look for other feedstock, along with PM.

In rural areas of developing countries various cellulosic biomass (cow manure, agricultural residues, leafy biomass, etc.) are available in plenty which have a good potential to producing biogas. The biogas potential of leafy biomass feedstock is almost twice that which can be produced by animal dung. Rubber tree is a major industrial crop in the south of Thailand. Rubber leaves (RL), a surplus waste from the rubber tree, has been defined as organic matter formed by photosynthetic capture of solar energy and stored as chemical energy, which are a suitable raw material for biogas production. The solar energy stored in biomass could be released as biogas through anaerobic digestion. The pigs produce large amounts of manure, which are suitable substrate for anaerobic digestion and excellent co-substrate due to its high buffering capacity and rich in a wide variety of nutrients needed by the methanogens. Moreover it has been demonstrated that the composted PM is a valuable fertilizer for increasing crop yield and improving in technical feasibility of the process

This study presents the biogas production achieved in batch reactors using PM and high carbon content RL at different fractions in order to determine optimum mixture for successful co-digestion. The effects of RL waste adding and total solid (TS) of 8-20% in feedstock were evaluated for methane production using co-digestion batch system. The total volatile fatty acids (VFAs), alkalinity, pH, methane yield, and organic substance removal were investigated.

2. Material

2.1. Operating procedure

RL, a leafy biomass waste was obtained from a source of rubber tree plantation (Songkhla, Thailand). The RL was grinded into smaller pieces with an electric grinder. Fresh PM used in these experiments was obtained from a pig farm (Faculty of Natural Resources of Prince of Songkla University, Thailand) was stored less than 24 hours. The RL and PM waste were weighted and mixed together. The design of experiment for biogas production in laboratory scale is described in Table 1. Batch biodegradability assays were carried out with 8 different proportions of the two solid wastes at room temperature ($28 \pm 2^\circ\text{C}$) and for a period of 44 days in order to reach reactor stabilization. The TS concentration in each reactor was 8-20%. In each set of trials, a digestion of PM alone was used as a control and the digestions were run in duplicate.

Table 1. Proportion of initial waste in biogas reactor

No.	PM:RL	Shred	% TS	C/N Ratio
R1	50:50	/	8	11.72
R2	50:50	/	12	11.72
R3	50:50	/	16	11.72
R4	50:50	/	20	11.72
R5	100:0	/	16	10.79
R6	25:75	/	16	12.06
R7	75:25	/	16	11.31
R8	50:50	×	16	11.72

2.2. Anaerobic digestion of PM and RL

The co-digestion of PM and RL were carried out in 8 sets of digestion reactor with a volume of 25 L reactors constructed by using plastic bottles with a working volume about 20 L. The biogas produced was collected in 6 L of PET bottles (see Fig. 1). The volume of gas collected was measured by the displacement of water from the collecting PET bottles and was recorded every day. The reactors were shaken manually for 0.5 min twice daily to mix their content.

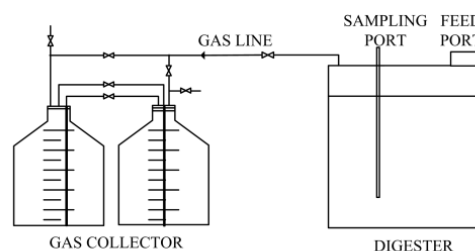


Fig. 1. Sketch of the anaerobic digester

2.3. Analytical

The biogas composition was determined using a gas chromatograph; fitted with a ShinCarbon ST 100/120 mesh column, a micropacked column and a thermal conductivity detector. The oven, detector and inlet temperatures were 40, 200, and 100°C , respectively. The compounds detected were methane and carbon dioxide. The volume of biogas collected in the gas-tight aluminium bags. In all experiments the following data were determined: methane yield, total solids (TS), volatile solid (VS), pH, and alkalinity. Total volatile fatty acids (VFAs) were determined according to the APHA Standard Methods (1995) [4]. Total organic carbon (TOC) was measured by wet oxidation. Total nitrogen (TN) was estimated by the Kjeldahl method. Moisture was determined as described by AOAC standard methods.

Removal rates of TS were calculated after reactors stabilization (i.e., after more than 44 days of experiments) by equation (1)

$$\text{TS Removal (\%)} = \frac{\text{TS}_{\text{initial}} - \text{TS}_{\text{final}}}{\text{TS}_{\text{initial}}} \quad (1)$$

3. Result and discussion

3.1. Feedstock characteristics

Table 2 shows analyzed properties and characterization of initial waste.

Table 2. Properties and characteristics of PM and RL

Parameter	PM	RL
Organic Carbon (OC) % (dry wt.)	17.15	29.76
Total nitrogen (TN) % (dry wt.)	1.59	2.41
C/N ratio	10.79	12.34
Moisture (%)	2.31	0.19

Biogas production

The accumulative biogas production through the co-digestion of different feedstock is presented in Fig. 2. It indicates that mixed raw materials of PM and RL at 12% TS produced the highest volume of biogas (R2), whereas R3, R5, and R7, followed, respectively. For the biogas quality measuring by methane gas percentage, the result showed the highest figure of 58% CH_4 from R2, while for R3 is 50% CH_4 and R5 is 41% CH_4 .

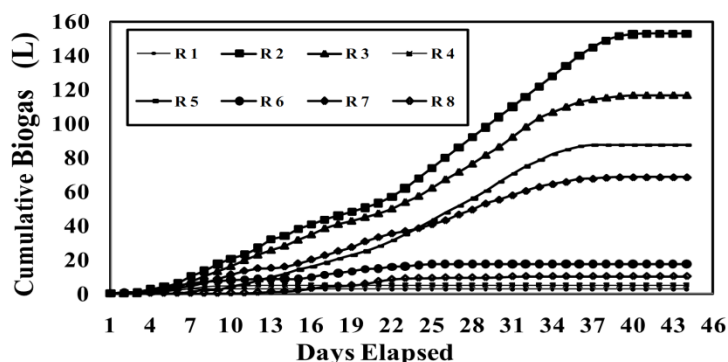


Fig. 2. Cumulative curve of biogas production

3.2 Effect of RL fraction on biogas production using co-digestion reactor

The single wastes and mixtures of wastes were studied with regard to methane production in batch assays for a period of 44 days. Fig. 3 shows the quantity of the total biogas production using RL fraction in feedstock at 0, 25, 50, and 75%, respectively, at 16%TS. It is clear shown that the maximum biogas occurs at 50% RL fraction, whereas at 75% RL produces minimum biogas. This demonstrated that a small amount of RL as co-substrate in the anaerobic digestion can highly increase the biogas production compared with PM alone. This could be due to positive synergism in the digestion medium, supplying missing nutrients and reducing/diluting of inhibitory materials in feed stocks by the co-substrates.

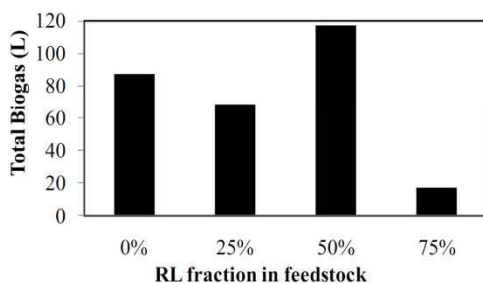


Fig. 3. Effect of RL fraction on biogas production using co-digestion reactor

3.3 Effect of percentages of TS in feedstock on biogas production using co-digestion reactor

In order to assess the TS in feedstock on biogas production, four sets of experiments are performed at 8% TS, 12% TS, 16% TS, and 20% TS, respectively, at the feedstock fraction of 50:50. Fig. 4 represents the quantity of the total biogas production against the

percentages of TS in feedstock. It is obvious that the 12% TS gives the highest gas productivity. This could be attributed to organic overloading due to inefficient contact between the microorganisms and the substrate at the highest initial total solids concentration. These results agree with Radwan *et al.*, [3]. The biogas production at 8%TS was lowest, because the amount of initial seed low.

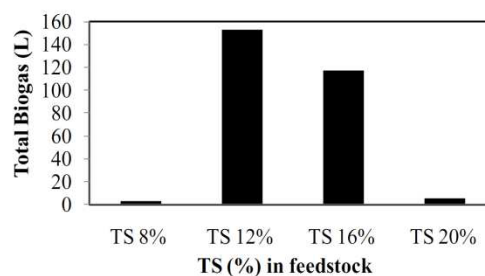


Fig. 4. Effect of percentages of TS in feedstock on biogas production using co-digestion reactor

3.4 Effect of size of RL in feedstock on biogas production using co-digestion reactor

In this study different sizes of RL in feedstock were used to determine the effect of feed size for biogas production. These experimental conditions were specified at 16% TS and at the feedstock fraction of 50:50. Table 3 shows the results obtained in this study clearly illustrate that the reduction of particle size increases substrate utilization, and hence gives enhanced biogas production. On the other hand, smaller particles would provide a large surface area available for the microorganisms, resulting in increased microbial activity; thus, the anaerobic biodegradability increased.

Table 3. Effect of size of RL in feedstock on biogas production using co-digestion reactor

Property	Shred	No Shred
Biogas Production (L)	117	29.76
Particle Size (mm ²)	2.81×2.81	50×40

3.5 TS removal

The total solids destruction for various co-digested of PM and RL leads to the reduction of organic matter that measured through TS removal. Fig. 6 presents the results of all experiments for 44 days of batch operation. It can then be seen that there is an increase in the TS removal with the decrease in the amount of RL fraction, especially with PM alone. The highest TS removal in the R5 because of microorganisms was degradation of organic matter digestible. It can be seen that TS removal depends mainly on the percentage of PM in the mixture of wastes, becoming higher with a higher amount of PM. These might influence the TS removal in all experimental.

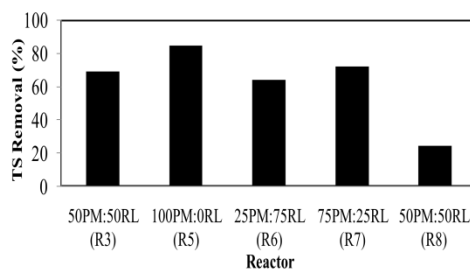


Fig. 6. TS Removal for the different fraction tested at 16% TS

Table 4. Results of biogas production at 44-day batch anaerobic digestion

No.	Total gas production (L)	CH ₄ Content (%)	Total Methane (L)	CH ₄ Yield (L/kg TS _{removed})	pH	VFAs (mg/l)
R1	2.6	-	-	-	7.01	550
R2	153.1	58	88.8	0.38	7.22	500
R3	117	50	58.5	0.14	7.16	1500
R4	4.9	-	-	-	6.85	2000
R5	87.6	41	35.9	0.06	5.95	1250
R6	17.3	-	-	-	7.15	2250
R7	68.6	-	-	-	7.02	550
R8	10.1	-	-	-	5.5	1000

4. CONCLUSIONS

The present study demonstrate that anaerobic co-digestion of RL and PM is a feasible process as well as the effects of fraction ratio and TS in feedstock on the performance of the batch scale. Furthermore, anaerobic co-digestion of RL and PM is a viable alternative for recovering energy in the form of biogas with 41–58% methane content and increase total biogas production, compared with that of a control digestion using PM alone. The conclusions are the

Table 4 summarizes the results on biogas production of anaerobic digestion of PM and RL, the experiments lasted for 44 days. During the experimental period, methane content of the biogas was at about 41-58% and there were no significant differences among different reactors. Co-digestion of PM and RL can improve the methane production and the methane yield by 40% compared with digestion of PM waste alone. The marked increase in the methane yield could be due to positive synergism established in the digestion liquor and the supply of additional nutrients by the co-substrates. The waste PM fractions in the co-digestion with RL were on the total solid basis. After being digestion, all the waste became alkaline except pig manure alone. A mixture of rubber leaves that is not shred was slightly acidic. The results indicate that PM mixed with RL in the ratio of 50:50 at 12% TS (R3) gave the highest total biogas, percentage of methane, and yield of methane per kg of total solid.

optimum total solid for biogas production is 12% TS. The optimum fraction of PM and RL for biogas production is 50:50. Results from this study suggest that PM and RL are potential substrates for anaerobic digestion for the production of biogas and could provide additional benefits to agriculturist in southern Thailand. Therefore, further research is planned to run a semi-continuous reactor to examine the effect of PM and RL feeding.

5. ACKNOWLEDGMENT

The authors are grateful to the Prince of Songkla University and National Research Council of Thailand provided the funding for this research, budget year 2010. The authors also thank the Department of chemical Engineering, Faculty of Engineering, and Graduated school of prince of Songkla University for their support.

6. REFERENCE

- [1] Callaghan FJ, Wase DAJ, Thayanithy K, Forster CF, "Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure", *Biomass and Bioenergy.*, 2002;22(1):71–77.
- [2] Murto M, Bjõrnsson L, Mattiasson B, "Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure", *Environmental Management.*, 2004;70:101–7.
- [3] Radwan, A.M., Sebak, H.A., Mitry, N.R., El-Zanati, E.A., Hamad, M.A., "Dry anaerobic fermentation of agricultural residues", *Biomass and Bioenergy.*, 1993;5 (6):495–499.
- [4] APHA, "Standard methods for the examination of water and waste water", 19th ed. Washington, DC: *American Public Health Association.*, 1995.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล

นายชิตชนก คงแดง

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5210120127

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2552

ทุนการศึกษา (ที่ได้รับระหว่างการศึกษา)

- ทุนบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ทุนวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
- ทุนก้นกุฏิ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

Kongdang, C., Chungsiriporn, J., and Suksaroj, C. 2011. BIOGAS PRODUCTION BY ANAEROBIC BATCH CO-DIGESTION OF PIG MANURE AND RUBBER LEAVES. Proceeding of the 5th PSU-UNS International Conference on Engineering and Technology (ICET-2011), May 2-3, Phuket, Prince of Songkla University, Faculty of Engineering Hat Yai, Songkhla, Thailand 90112