

ผลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สาร
ต่อการหมักกากมะ เชื้อเห็ดแบบอับอากาศสองขั้นตอน

ปริญญานิพนธ์
ของ
สุพรรณิ ขาญประเสริฐ

- 5 เม.ย. 2537 -

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกเคมีชีวภาพ

ตุลาคม 2536

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

188063

คณะกรรมการควบคุมและคณะกรรมการสอบได้พิจารณาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควร
รับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกเคมีชีวภาพ ของ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้

คณะกรรมการควบคุม

.....  ประธาน

(ดร.ยุวดี นาคะพองรัตน์)

.....  กรรมการ

(รศ.ดร.มรกต ตันติเจริญ)

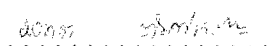
.....  กรรมการ

(ผศ.พรพรรณ เลิศทวีสินธุ์)

คณะกรรมการสอบ

.....  ประธาน

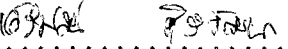
(ดร.ยุวดี นาคะพองรัตน์)

.....  กรรมการ

(รศ.ดร.มรกต ตันติเจริญ)

.....  กรรมการ

(ผศ.พรพรรณ เลิศทวีสินธุ์)

.....  กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(ดร.เสริมสิน ศิริวัฒนา)

บัณฑิตวิทยาลัยอนุมัติให้รับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกเคมีชีวภาพ ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....  คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ดร.ศิริยุภา พูลสุวรรณ)

วันที่... เดือน... พ.ศ.

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ดร.บุวดี นาคะผดุงรัตน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พรพรรณ เลิศทวีสินธุ์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร รองศาสตราจารย์ ดร.มรกต ตันติเจริญ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำสนับสนุน ตลอดจนได้สละเวลาตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงลงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ภาวิณี ชัยประเสริฐ คุณวิบูลย์ นุชประมูล ที่ช่วยแนะนำและให้คำปรึกษา ตลอดจนเพื่อน ๆ และทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ โครงการอาหารหลวงสำเร็จรูป ที่ได้อนุเคราะห์วัสดุดิบที่ใช้ในการวิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้เป็นบรมอาจารย์ ญาติพี่น้อง ผู้ซึ่งช่วยเหลือให้กำลังใจ ทุนทรัพย์ และอยู่เบื้องหลังของความสำเร็จของผู้วิจัยตลอดมา

สุพรรณิ ขาญประเสริฐ

ตุลาคม 2536

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
คำนำ	1
ก๊าซชีวภาพ	2
ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ	2
การเกิดก๊าซชีวภาพ	3
จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ	7
ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหมักแบบอับอากาศ	9
ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม	10
ปัจจัยในการปฏิบัติงาน	13
สาเหตุที่ทำให้ระบบการหมักล้มเหลว	14
คำจำกัดความของศัพท์ที่ใช้ในงานวิจัย	14
งานวิจัยที่เกี่ยวกับกระบวนการหมักแบบอับอากาศ	15
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	21
ประโยชน์ของงานวิจัย	21
2 วิธีการวิจัย	22
แผนการวิจัย	22
แหล่งของจุลินทรีย์ ถังปฏิกรณ์และวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ	24
วิธีดำเนินการทดลอง	26
การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์	26
การเตรียมถังปฏิกรณ์สำหรับผลิตก๊าซมีเทน	26
การหมักเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์	27
การหมักเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทน	27
การศึกษากิจกรรมของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน	27

บทที่	หน้า
3 ผลการวิจัย	35
ผลของระยะเวลาเก็บกักในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์	35
ผลของระยะเวลาเก็บกักในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	36
ผลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการบ่อนอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	40
การใช้สารตัวกลางของจุลินทรีย์ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน	51
การศึกษาความสามารถของจุลินทรีย์ในการใช้ขี้สเตรทต่าง ๆ เพื่อผลิตก๊าซมีเทน ..	53
4 สรุปอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	67
สรุปอภิปรายผล	67
ข้อเสนอแนะ	71
บรรณานุกรม	72
ภาคผนวก	77
ประวัติของผู้วิจัย	99

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและปัจจัยในการปฏิบัติงาน.....	10
2	แสดงผลการทดลองที่ได้จากการหมักในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ที่ระยะเวลาเก็บกักต่าง ๆ กัน	35
3	ผลของการใช้น้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน ต่อการผลิตก๊าซมีเทน	37
4	ผลของการใช้น้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน ต่อการผลิตก๊าซมีเทน	38
5	ผลของการใช้น้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน ต่อการผลิตก๊าซมีเทน	39
6	ผลของระยะเวลาเก็บกักเมื่อป้อนอินทรีย์สาร 0.2 กรัมชีโรดีต่อวัน ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	41
7	ผลของระยะเวลาเก็บกักเมื่อป้อนอินทรีย์สาร 0.5 กรัมชีโรดีต่อวัน ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	43
8	ผลของระยะเวลาเก็บกักเมื่อป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	45
9	ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมชีโรดีต่อวัน ต่อขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน	47
10	ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน ต่อขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน	49
11	ผลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สารในขั้นตอน การผลิตก๊าซมีเทนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	50
12	การใส่สารตัวกลางต่าง ๆ ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนจากกากมะเขือเทศ	52
13	ปริมาณร้อยละของก๊าซมีเทนเมื่อจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน ใช้รับสเตรทต่าง ๆ	54

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
14	แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ และ pH จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศ สองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.2 กรัมชีโรดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร	78
15	แสดงปริมาณอินทรีย์สารในรูปชีโรดี กรดอินทรีย์ระเหย และค่าความเป็นด่าง จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.2 กรัมชีโรดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร	81
16	แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ และ pH จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศ สองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.5 กรัมชีโรดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร	82
17	แสดงปริมาณอินทรีย์สารในรูปชีโรดี กรดอินทรีย์ระเหย และค่าความเป็นด่าง จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.5 กรัมชีโรดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร	85
18	แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ และ pH จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศ สองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร	86
19	แสดงปริมาณอินทรีย์สารในรูปชีโรดี กรดอินทรีย์ระเหย และค่าความเป็นด่าง จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร	89
20	แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ และ pH จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศ สองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร	90

บัญชีตาราง

ตาราง

หน้า

- | | | |
|----|---|----|
| 21 | แสดงปริมาณอินทรีย์สารในรูปซีโอดี กรดอินทรีย์ระเหย และค่าความเป็นต่างจากการหมักจากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมซีโอดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร | 92 |
| 22 | แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ และ pH จากการหมักจากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมซีโอดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร | 93 |
| 23 | แสดงปริมาณอินทรีย์สารในรูปซีโอดี กรดอินทรีย์ระเหย และค่าความเป็นต่างจากการหมักจากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมซีโอดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร | 95 |
| 24 | แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ และ pH จากการหมักจากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมซีโอดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร | 96 |
| 25 | แสดงปริมาณอินทรีย์สารในรูปซีโอดี กรดอินทรีย์ระเหย และค่าความเป็นต่างจากการหมักจากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมซีโอดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร | 98 |

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน	6
2 แผนการทดลองชุดที่ 1 ศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักในขั้นตอน การผลิตกรดอินทรีย์ต่อการผลิตก๊าซมีเทน	23
3 แสดงชุดการทดลองแบบอับอากาศสองขั้นตอน	25
4 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากขั้วสเตรทต่าง ๆ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตราการบ่อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน.....	55
5 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากขั้วสเตรทต่าง ๆ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน อัตราการบ่อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน.....	56
6 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากขั้วสเตรทต่าง ๆ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตราการบ่อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมชีโรดีต่อวัน.....	57
7 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากขั้วสเตรทต่าง ๆ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน อัตราการบ่อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมชีโรดีต่อวัน.....	58
8 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากขั้วสเตรทต่าง ๆ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตราการบ่อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน.....	59
9 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากขั้วสเตรทต่าง ๆ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน อัตราการบ่อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน.....	60
10 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากการใช้เอธานอลเข้มข้น ร้อยละ 0.1 ที่ระยะเวลาเก็บกักและอัตราการบ่อนอินทรีย์สารต่าง ๆ กัน	62
แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากการใช้กรดอะซิติกเข้มข้น ร้อยละ 0.1 ที่ระยะเวลาเก็บกักและอัตราการบ่อนอินทรีย์สารต่าง ๆ กัน	63
แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากการใช้เบปโตนเข้มข้น ร้อยละ 0.1 ที่ระยะเวลาเก็บกักและอัตราการบ่อนอินทรีย์สารต่าง ๆ กัน	64
13 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากการใช้กลูโคสเข้มข้น ร้อยละ 0.1 ที่ระยะเวลาเก็บกักและอัตราการบ่อนอินทรีย์สารต่าง ๆ กัน	65

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ

หน้า

14 แสดงปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อจุลินทรีย์ใช้กลูโคสเข้มข้น

ร้อยละ 1.0 ที่ระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่าง ๆ กัน 66

บทที่ 1

บทนำ

บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยมีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะทางด้านอุตสาหกรรมการเกษตร มีการแปรรูปสินค้าทางการเกษตรให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาดีขึ้น ในกระบวนการแปรรูปเหล่านี้มักมีของเหลือทิ้งที่เกิดจากการตัดแต่ง กาก หรือ ส่วนเปลือกที่ต้องกำจัดทิ้งเป็นจำนวนมาก และยังมีน้ำทิ้งจากโรงงานที่อาจก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น มะเจือเทศ ซึ่งจัดเป็นพืชผักที่มีความสำคัญเป็นอันดับสามของโลก รองจากมันฝรั่งและมันเทศ แต่มะเจือเทศเป็นพืชผักที่นำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อาหารกระป๋องเป็นอันดับหนึ่งของโลก สำหรับประเทศไทยในปี พ.ศ. 2531-2532 พ.ศ. 2532-2533 และ พ.ศ. 2533-2534 มีผลผลิตของมะเจือเทศเฉลี่ย 46,594 ตัน 69,564 ตัน และ 258,850 ตัน ตามลำดับ (กรมส่งเสริมการเกษตร. 2534) และการส่งออกของผลิตภัณฑ์จากมะเจือเทศ ในรูปมะเจือเทศลอกเปลือก เครื่องดื่มมะเจือเทศ และซอสมะเจือเทศมีแนวโน้มสูงขึ้นทุกปี ดังนั้นจะมีของเหลือทิ้งจากโรงงานแปรรูปมะเจือเทศได้แก่ผลเน่าเสีย ผลมีรอยตำหนิที่คัดทิ้ง ส่วนกาก คือเปลือกและเมล็ดที่ถูกแยกออกจากรสและเนื้อหลังจากผ่าน การบดด้วยโรลแล้ว (เกษม พิสิฐ. 2531) ของเสียเหล่านี้จะมีปริมาณร้อยละ 9 ของปริมาณมะเจือเทศ ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ (Hill and Dykstra. 1980) จากรายงานการวิจัยพบองค์ประกอบของกากมะเจือเทศโดยคิดเป็นร้อยละของของแข็งทั้งหมด (total solid) ดังนี้คือ ประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 39.3 โปรตีนร้อยละ 23.3 เซลลูโลสร้อยละ 8.0 ลิกนินร้อยละ 6.0 ether extract ร้อยละ 17.0 ฟอสฟอรัสร้อยละ 0.22 โซเดียมร้อยละ 0.151 โพแทสเซียมร้อยละ 0.954 แคลเซียมร้อยละ 0.028 ไนโตรเจนร้อยละ 3.73 และอัตราส่วนของธาตุคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 13.4 (Sarada and Nand. 1989) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของกากมะเจือเทศแล้ว น่าสนใจที่จะนำกากมะเจือเทศมาใช้เป็นวัตถุดิบในการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ให้ได้ผลผลิตที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อไปได้

จากปัญหาในการกำจัดของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตร และปัญหาเรื่องราคาน้ำมันที่แพงขึ้น จึงได้นำเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพมาประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม เพื่อกำจัดกากที่เป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตร เป็นการลดผลกระทบที่ก่อให้เกิดมลภาวะได้วิธีหนึ่ง

และยังสามารถนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ ซึ่งมีองค์ประกอบที่สำคัญคือก๊าซมีเทน กลับมาใช้เป็นพลังงานทดแทนภายในโรงงาน ทำให้ลดต้นทุนการผลิตได้

การนำเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพมาประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องศึกษาเพื่อให้เข้าใจถึงพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับการผลิตก๊าซชีวภาพ และศึกษาเพื่อให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งในด้านการผลิตก๊าซชีวภาพ การจัดการกากอินทรีย์สารในของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตร และความเหมาะสมด้านอื่น ๆ เช่น ในการควบคุมสภาวะต่าง ๆ ของกระบวนการหมักก่อนที่จะนำมาปรับใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มาจากสิ่งมีชีวิต ในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยมีจุลินทรีย์หลายชนิดเป็นตัวย่อยสลาย ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซผสมระหว่างก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้อาจจะมีก๊าซไนโตรเจน ก๊าซออกซิเจน ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ปนอยู่บ้างเล็กน้อย แต่ก๊าซที่เกิดจากกระบวนการหมักจะมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นกับวัตถุดิบที่ใช้ และสภาวะของกระบวนการหมัก แต่โดยทั่ว ๆ ไป องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพมีดังต่อไปนี้

ก๊าซมีเทน	ร้อยละ	55-65
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ร้อยละ	35-45
ก๊าซไนโตรเจน	ร้อยละ	0-8
ก๊าซออกซิเจน	ร้อยละ	0-1
ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์	ร้อยละ	0-1

ก๊าซชีวภาพที่สามารถใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้ จะต้องมีส่วนประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 (Updated guidebook on biogas development.1984)

ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ (Updated guidebook on biogas development.1984)

การนำก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์โดยทั่วไปนั้น อาจทำได้หลายวิธี เช่น

ก. นำมาใช้โดยตรงเพื่อให้ความอบอุ่น บรุงอาหาร ให้แสงสว่าง อบเมล็ด

พืช ใช้กับตู้เย็น ใช้กับเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น

จ. ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ และอาจจะนำกาก้างจากเครื่องยนต์ไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอีกทีหนึ่ง

ค. ให้ความร้อนแก่ถังหมักไรรักษาเงินในการกำจัดน้ำเสีย

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

โดยปกติสารอินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ ควรมีอัตราส่วนระหว่างธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส (C:N:P) ประมาณ 100:5:1 องค์ประกอบของวัตถุดิบยังมีผลต่อปริมาณของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพด้วย (Updated guidebook on biogas development.1984) ถ้าสารอินทรีย์ที่ใช้ในการหมักเป็นคาร์โบไฮเดรต ก๊าซผสมจะประกอบด้วยก๊าซมีเทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 1:1 หากเป็นไขมันจะได้ก๊าซมีเทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 2.64:1 และเมื่อเป็นโปรตีนจะได้ก๊าซมีเทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 3:1 ดังนั้นการนำสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนสูงหรือโปรตีนสูง ในการหมักก๊าซที่ได้จะมีคุณภาพสูงด้วย ส่วนสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนต่ำ เช่น พาง ใบไม้ หรือเศษพืช ผัก ผลไม้ จึงมักผสมกับมูลสุกร มูลวัว หรือเกลือแอมโมเนีย เพื่อเพิ่มปริมาณของไนโตรเจนให้เพียงพอที่จะนำมาใช้ในการหมัก

การเกิดก๊าซชีวภาพ (Updated guidebook on biogas development.1984)

กระบวนการหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาวะไร้ออกซิเจน สารอินทรีย์ส่วนใหญ่นำได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน จะถูกย่อยสลายจนได้ก๊าซชีวภาพ ปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรีย สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ (acid production) และขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน (methane production)

ขั้นที่ 1 ขั้นตอนไฮโดรไลซิส

ในขั้นตอนแรกนี้สารอินทรีย์ต่าง ๆ ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และ โปรตีน จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจากเซลล์

(exoenzymes) จาก fermentative bacteria ทำให้สารอินทรีย์แตกตัวมีขนาดเล็กลง และสามารถละลายน้ำได้ ในขั้นตอนนี้ ropolisaccharides จะถูกย่อยสลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ไรโบสเปลี่ยนไปเป็นเบสไพรีดีน หรือ กรดอะมิโน ไขมันจะเปลี่ยนเป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล นอกจากนี้ยังได้แอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์ระเหยง่าย ไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ชนิดและปริมาณของแบคทีเรียในถังหมักจะเปลี่ยนแปลงไป ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์

ขั้นที่ 2 การผลิตกรดอินทรีย์

สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก จากขั้นตอนแรกจะถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานของแบคทีเรียพวก facultative และ obligate anaerobe ผลของปฏิกิริยาของกระบวนการหมัก ทำให้ได้สารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปออกซิไดซ์ และรูปรีดิวส์ พวกที่อยู่ในรูปออกซิไดซ์ ส่วนใหญ่จะเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอม ได้แก่ กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทริก กรดแวลริก และ กรดคาโปรอิก แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในกระบวนการนี้ คือแบคทีเรียสร้างกรด (acidogenic bacteria) หรือ non-methanogenic bacteria พวกที่อยู่ในรูปรีดิวส์มีอยู่หลายอย่างขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและตัวรับอิเล็กตรอน ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียที่สร้างกรดบางชนิดสามารถใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดไฮโดรเจนโมเลกุลขึ้นมา แต่ผลของปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวส์ตัวอื่น ๆ เช่น แอลกอฮอล์ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอม ไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมาก ถ้าหากไม่มีการสร้างไฮโดรเจนโมเลกุลขึ้นมา แบคทีเรียที่สร้างกรดเหล่านี้จะใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดผลปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวส์ตัวอื่น ๆ เช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล หรือกรดแลคติก เป็นต้น นอกจากนี้แบคทีเรียบางชนิดยังสามารถสร้างกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ไฮโดรเจนโมเลกุลจากกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่ากรดอะซิติก หรือผลของปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวส์ตัวอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาในช่วงแรก เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนสามารถสร้างกรดได้ แต่แบคทีเรียที่สร้างกรดไม่สามารถสร้างไฮโดรเจนได้ ทำให้ยากที่จะแยกแบคทีเรียทั้งสองชนิดออกจากกันได้ ดังนั้นจึงจัดแบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจนเป็นแบคทีเรียที่สร้างกรดชนิดหนึ่ง และอาจเรียกแบคทีเรียทั้งสองชนิดว่า non-methanogenic bacteria ซึ่งผลของปฏิกิริยาสุดท้ายจากเมตามอลิซึมของแบคทีเรียเหล่านี้ คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก

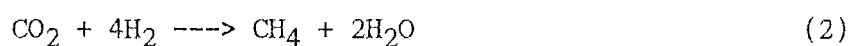
ขั้นที่ 3 การผลิตก๊าซมีเทน

กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่สองเป็นสารประกอบอย่างง่าย ส่วนใหญ่ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก กรดไพรูวอิก ไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า methanogenic bacteria จัดอยู่ในพวก obligate anaerobic bacteria จะดำรงชีวิตอยู่ได้แต่ในสภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น ปฏิกริยาทางชีวเคมีของการเกิดก๊าซมีเทนเกิดขึ้นได้จากการตีคาร์บอกซิเลท และการรีดักชันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังแสดงในสมการ

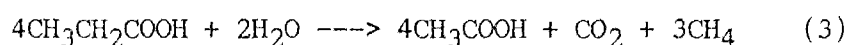
1. การเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทน



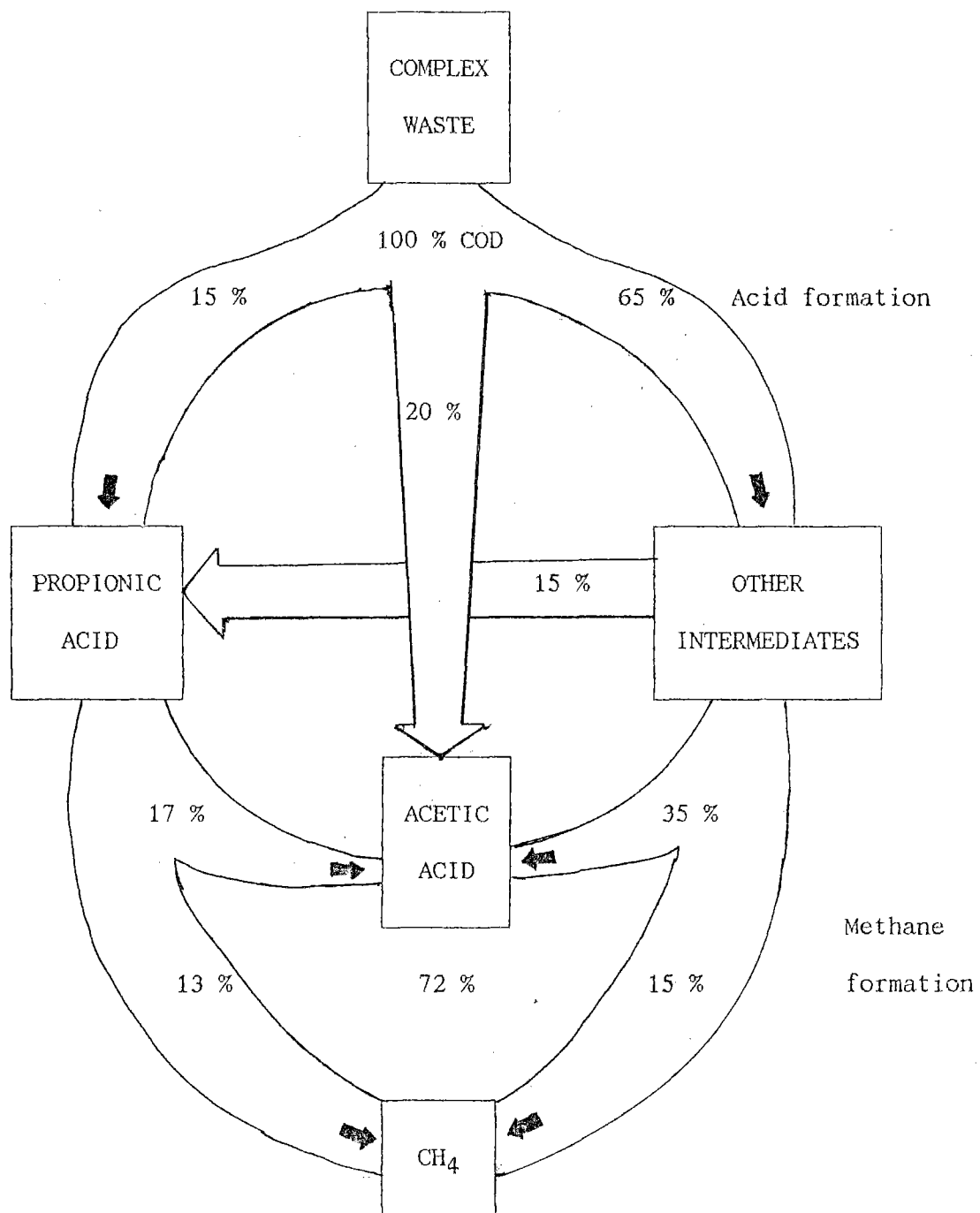
2. การเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซมีเทน



3. การเปลี่ยนกรดไพรูวอิกเป็นก๊าซมีเทน



จากการศึกษาพบว่าก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ได้มาจากการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติก ร้อยละ 72 และได้มาจากกรดไพรูวอิก และกรดอินทรีย์ระเหยอื่น ๆ ร้อยละ 28 (McCarty and Jeris.1984) ซึ่งแสดงแนวทางการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ต่าง ๆ ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 การเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน (ปรีดา ไย้ม เจริญวงศ์. 2534)

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (Update guidebook on biogas development. 1984)

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สารต่าง ๆ ในการผลิตก๊าซชีวภาพนี้ อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์หลายชนิด ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

(1) Non-Methanogenic Bacteria

เป็นจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนไฮโดรไลซิส และขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ จุลินทรีย์พวกนี้เจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 4.0-6.5 และส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียที่ดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะที่มีออกซิเจนและไร้ออกซิเจน (facultative anaerobic bacteria) ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงที่สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง แบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ fermentative bacteria , hydrogen producing acetogenic bacteria และ homoacetogenic bacteria (Novaes. 1986)

(2) Methanogenic Bacteria

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น (obligate anaerobic bacteria) จุลินทรีย์เหล่านี้เจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 6.5-7.5 ถ้า pH สูงกว่า 8 จุลินทรีย์จะหยุดทำงาน (Sprott ,Bird and McDonald. 1985) และการผลิตก๊าซมีเทนจะลดลงเมื่อ pH ต่ำลงด้วย มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้น้อยกว่าพวกแรก และมีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าระยะเวลาในการแบ่งตัว (doubling time) อยู่ระหว่าง 4-6 วัน

จุลินทรีย์ทั้ง 2 กลุ่มใหญ่นี้ สามารถจำแนกเป็น 4 กลุ่มย่อย (Novaes. 1986) คือ

1. Fermentative bacteria ทาหน้าที่ในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะผลิตเอนไซม์ออกมานอกเซลล์เพื่อย่อยสลายสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น เซลลูโลส แป้ง โปรตีน และสารโมเลกุลใหญ่อื่นๆ ให้เป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลง เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน กรดไขมัน สารต่าง ๆ เหล่านี้จะผ่านเข้าไปในเซลล์ และถูกเปลี่ยนไปเป็นสารต่าง ๆ เช่น อะซิเตท (acetate) โพรพิโอเนต (propionate) แลกเตท (lactate) บิวทิเรท (butyrate) และ เอทานอล (ethanol) เป็นต้น ผลผลิตที่ได้ในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้น และ

สภาวะแวดล้อมที่จุลินทรีย์เจริญเติบโต ในสภาวะที่มีก๊าซไฮโดรเจนแต่จุลินทรีย์จะผลิตสารอินทรีย์พวก อะซิเตท คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน แต่ในสภาวะแวดล้อมที่มีก๊าซไฮโดรเจนสูง จุลินทรีย์ จะผลิต โพรพิโอเนต แล็กเตท และเอทานอล เป็นต้น (Novaes. 1986)

2. Hydrogen-producing acetogenic bacteria จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะทำหน้าที่ย่อยสลายโพรพิโอเนต เอทานอล และกรดอินทรีย์อื่น ๆ ที่มีโมเลกุลใหญ่กว่าอะซิเตทให้ได้เป็นอะซิเตท ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน

3. Homoacetogenic bacteria จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ เป็นพวกที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจน และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในการเจริญเติบโต และผลิตอะซิเตทออกมาเพียงอย่างเดียว และถ้าใช้ สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอม เช่น กรดแลคติก ไพรูเวท เฮกซอส จะผลิตทั้งบิวทาเรท และ อะซิเตทผสมกัน

4. Methanogenic bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน จุลินทรีย์กลุ่มนี้เป็นพวก obligate anaerobes คือ สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น จุลินทรีย์ เหล่านี้จะสลายอะซิเตท ใช้ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ จนได้ผลผลิตสุดท้ายอยู่ในสถานะ ก๊าซ จุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ง่าย ๆ และสารประกอบอนินทรีย์เป็นขั้วสเตรท จุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถเจริญเติบโตได้ทั้งในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (15-40 องศาเซลเซียส) และ ช่วงอุณหภูมิสูง (55-65 องศาเซลเซียส) pH ที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตและการผลิตก๊าซมีเทน อยู่ในช่วงระหว่าง 6.8-7.2 สิ่งที่จุลินทรีย์กลุ่มนี้ต้องการมากที่สุดคือ เกลือแร่ (mineral salts) กับคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนแอมโมเนียและซัลไฟด์ (sulphide) หรือ ซีสเทอีน (cysteine) เป็นสารที่จุลินทรีย์ต้องการเพิ่มเติม

กระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ (Calzada. 1984)

กระบวนการหมักก๊าซชีวภาพแบบอับอากาศนี้มี 2 แบบ คือแบบขั้นตอนเดียว และแบบ สองขั้นตอน ซึ่งจากการศึกษากิจกรรมของจุลินทรีย์ รวมทั้งสภาวะการดำรงอยู่ของเชื้อจุลินทรีย์ จึง ทำให้มีผู้สนใจศึกษาเกี่ยวกับวิธีการที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยศึกษาในเชิงเปรียบเทียบ ระหว่างกระบวนการหมักแบบอับอากาศขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน

กระบวนการหมักก๊าซชีวภาพแบบอับอากาศขั้นตอนเดียว

เป็นกระบวนการหมักที่มีการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์สองกลุ่มภายในถังปฏิกรณ์แบบเดียวกัน จึงเป็นการยากที่จะปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมกับการทำงานของจุลินทรีย์ทั้งสองกลุ่ม ทั้งยังต้องรักษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาแต่ละขั้นตอนให้สมดุลกัน ถ้าจุลินทรีย์ประเภท non-methanogen มีการเจริญเติบโตและใช้สารอาหารเร็วกว่าจุลินทรีย์พวก methanogen จะทำให้เกิดกรดอินทรีย์มากเกินไปกว่าพวก methanogen จะนำไปใช้ได้ทัน ก็จะทำให้มีการสะสมของกรดอินทรีย์ขึ้น pH จะต่ำลง ทำให้สภาวะแวดล้อมเปลี่ยนไป ซึ่งจะมีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของ methanogenic bacteria ซึ่งทำให้ระบบการหมักล้มเหลวได้

กระบวนการหมักก๊าซชีวภาพแบบอับอากาศสองขั้นตอน (Ghosh, Sajjad and Henry. 1983)

เพื่อที่จะแก้ไขสภาวะของระบบการหมักแบบขั้นตอนเดียว จึงได้มีการแยกขั้นตอนการหมักออกเป็นสองขั้นตอน โดยแยกขั้นตอนการเกิดกรดอินทรีย์ และขั้นตอนการเกิดก๊าซมีเทนออกจากกันซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมที่สุดสำหรับจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มได้เป็นอย่างดี และทำให้ระบบมีเสถียรภาพดีขึ้นด้วย

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหมักแบบอับอากาศ

การทำงานของกระบวนการหมักแบบอับอากาศมีปัจจัยต่าง ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องหลายอย่างที่จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยได้แก่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร (organic loading rate) องค์ประกอบของวัตถุดิบ ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ค่าความเป็นด่าง (alkalinity) อุณหภูมิ ระยะเวลาเก็บกัก (hydraulic retention time, HRT) และปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) เป็นต้น (ปรีดา แยมเจริญวงศ์. 2534)

ปัจจัยต่าง ๆ ข้างต้น สามารถจำแนกออกเป็น ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม และปัจจัยในการปฏิบัติงาน ดังนี้

ตาราง 1 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและปัจจัยในการปฏิบัติงาน

ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (environmental factor)	ปัจจัยในการปฏิบัติงาน (operational factor)
พีเอช (pH)	ระยะเวลาเก็บกัก
ความเป็นด่าง (alkalinity)	อัตราการป้อนอินทรีย์สาร
ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile acid concentration)	องค์ประกอบของวัตถุดิบ
อุณหภูมิ (temperature)	การกวนผสม
อาหารเสริม (nutrients)	ปริมาณความร้อน (heating)
สารพิษ (toxic materials)	

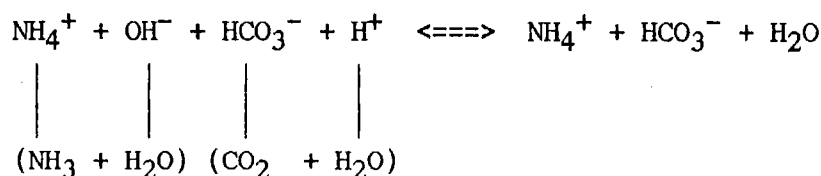
ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม

pH ระบบการหมักแบบอับอากาศขึ้นตอนเดียวจะทำงานได้ดีในช่วง pH ระหว่าง 6.6-7.6 (Barker. 1941; Mccarty. 1964) หรืออาจจะต่ำกว่านี้คือ pH เท่ากับ 6.4 (Barker. 1956) แต่ค่าที่เหมาะสมจะอยู่ประมาณ 7.0-7.2 (Andrews. 1969) นอกจากช่วงดังกล่าวนี้แล้ว การหมักแบบอับอากาศจะมีประสิทธิภาพลดลง และที่ pH 6.2 หรือต่ำกว่านี้ การทำงานของระบบจะล้มเหลว เพราะไฮโดรเจนไอออน (H^+) จะกลายเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนซึ่ง H^+ จัดเป็นพวก toxic cation ชนิดหนึ่ง (Mccarty and Mckinney. 1961)

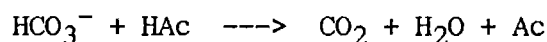
การแก้ไขสาเหตุการยับยั้งที่เกิดจาก pH ลดลงอย่างมากก็คือ การทำให้ H^+ เป็นกลาง ด้วยการเติมด่างเข้าไปควบคุมให้ pH อยู่ระหว่าง 7.0-7.5

pH เป็นสิ่งที่ใช้บ่งชี้สภาวะภายในถังหมักแบบอ็อกซิเจนได้ แต่ปัญหาคือเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงช้า ในขณะที่กรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มมากขึ้น แต่ค่า pH กลับเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย อันเนื่องมาจากผลของบัฟเฟอร์ของความเป็นต่างภายในถังหมัก ดังนั้นการใช้ค่า pH สำหรับการแก้ไขสภาวะภายในถังหมักอาจไม่ทันการ เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ค่า pH ก็ยังเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมระบบการหมักแบบอ็อกซิเจน

ความเป็นต่าง ความเป็นต่างในถังหมักแบบอ็อกซิเจนส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนีย กับคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ดังสมการ



ความสำคัญของการสร้างความเป็นต่างธรรมชาตินี้ ก็จะเป็นบัฟเฟอร์ที่ดีให้แก่ระบบที่จะควบคุม pH ให้อยู่ระหว่าง 6.8 ถึง 7.2 เมื่อความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยภายในระบบเพิ่มมากขึ้น ความเป็นต่างไบคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติก็จะถูกทำลายไป และถูกแทนโดย Volatile-Acid Alkalinity (VAA) ดังสมการ



การทำลายความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์นี้ เป็นสาเหตุทำให้ pH ลดลง ถึงแม้ว่าความเป็นต่างจะมีความจำเป็นในการควบคุมสภาวะสมดุลของการหมักก็ตาม แต่ความเป็นต่างอย่างเดียวไม่สามารถที่จะชี้ถึงปัญหาที่จะเกิดขึ้นในการหมักได้ นอกจากจะใช้เปรียบเทียบกับความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหย (สมชาย เจริญธีรสกุล. 2530) แต่โดยทั่วไปแล้วถ้าความเป็นต่างสูง แสดงว่าระบบสามารถรักษาค่าของ pH ให้คงตัวอยู่ได้ดีกว่าความเป็นต่างต่ำ ถ้าความเป็นต่างต่ำจำเป็นต้องเพิ่มความระมัดระวังในการควบคุมการทำงานของระบบหมัก เพราะ pH ของระบบมีแนวโน้มจะต่ำ

ลงได้ง่าย ค่าความเป็นด่างสามารถวัดได้ในรูปของไบคาร์บอเนต คาร์บอเนต และ ไฮดรอกไซด์ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อการหมักมีค่าประมาณ 1,000 - 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของคัลเซียมคาร์บอเนต

กรดอินทรีย์ระเหย เป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน แต่ถ้ามีความเข้มข้นสูง อาจทำให้เป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ซึ่งกรดอินทรีย์ระเหยในถังหมักจะต้องไม่เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้ากรดอินทรีย์ระเหยเกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีผลทำให้ปริมาณก๊าซลดลง และอาจจะยับยั้งขั้นตอนการเกิดก๊าซมีเทน โดยไม่คำนึงถึง pH เลย และการเติมด่างเข้าไปก็จะไม่ช่วยให้ดีขึ้น (Buswell and Mueller. 1952)

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะอับอากาศ มักจะพบกรดอินทรีย์ระเหยเกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ตัวกลาง (intermediate product) ถ้ามีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสะสมมากเกินไปควรจะแก้ไขได้โดย

ก. ปรับ pH ให้มีค่าสูงขึ้น ทำให้ลดการเติมด่างพวกโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) หรือคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ลงไปในถังหมัก

ข. ลดปริมาณการเติมอินทรีย์สารเข้าสู่ระบบหมัก เพื่อลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกที่สร้างกรดอินทรีย์ จะทำให้แบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนสามารถใช้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ปริมาณกรดอินทรีย์จะลดน้อยลง pH ของระบบก็จะสูงขึ้น

อุณหภูมิ อุณหภูมิเป็นสิ่งที่สำคัญในระบบการหมักแบบอับอากาศ เนื่องจากในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการทำงานปฏิกิริยาจะเร็วขึ้นด้วย (Pfeffer. 1974; Cooney and Wise. 1975; Therkelson and Carlson. 1979) ทำให้ใช้ระยะเวลาเก็บกักสั้นลง

อุณหภูมิที่ใช้ในการหมักแบบอับอากาศ แบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ

- mesophilic temperature อุณหภูมิจะอยู่ระหว่าง 21-40 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงนี้คือ 35-40 องศาเซลเซียส
- thermophilic temperature อุณหภูมิจะอยู่ระหว่าง 40-60 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วงนี้คือ 53-60 องศาเซลเซียส

อาหารเสริม นอกจากสารอินทรีย์ในระบบหมักที่ใช้เป็นแหล่งอาหารโดยตรงของแบคทีเรียแล้ว แบคทีเรียยังต้องการแร่ธาตุบางชนิดในการเสริมสร้างเซลล์ใหม่ด้วย เช่น ไนโตรเจน และ

ลงได้ง่าย ค่าความเป็นด่างสามารถวัดได้ในรูปของไบคาร์บอเนต คาร์บอเนต และ ไฮดรอกไซด์ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อการหมักมีค่าประมาณ 1,000 - 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของคัลเซียมคาร์บอเนต

กรดอินทรีย์ระเหย เป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน แต่ถ้ามีความเข้มข้นสูง อาจทำให้เป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ซึ่งกรดอินทรีย์ระเหยในถังหมักจะต้องไม่เกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้ากรดอินทรีย์ระเหยเกิน 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีผลทำให้ปริมาตรก๊าซลดลง และอาจจะยับยั้งขั้นตอนการเกิดก๊าซมีเทน โดยไม่คำนึงถึง pH เลย และการเติมต่างเข้าไปก็จะไม่ช่วยให้ดีขึ้น (Buswell and Mueller. 1952)

ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะอับอากาศ มักจะพบกรดอินทรีย์ระเหยเกิดขึ้นเป็นผลิตภัณฑ์ตัวกลาง (intermediate product) ถ้ามีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสะสมมากเกินไป จะระคายเคืองได้โดย

ก. ปรับ pH ให้มีค่าสูงขึ้น ทำได้โดยการเติมด่างพวกโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) หรือคัลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)_2) ลงไปในถังหมัก

ข. ลดปริมาณการเติมอินทรีย์สารเข้าสู่ระบบหมัก เพื่อลดการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกที่สร้างกรดอินทรีย์ จะทำให้แบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนสามารถใช้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ปริมาณกรดอินทรีย์จะลดน้อยลง pH ของระบบก็จะสูงขึ้น

อุณหภูมิ อุณหภูมิเป็นสิ่งที่สำคัญในระบบการหมักแบบอับอากาศ เนื่องจากในขณะที่ยุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการทําปฏิกิริยาจะเร็วขึ้นด้วย (Pfeffer. 1974; Cooney and Wise. 1975; Therkelson and Carlson. 1979) ทําให้ระยะเวลาเก็บกักสั้นลง

อุณหภูมิที่ใช้ในการหมักแบบอับอากาศ แบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ

- mesophilic temperature อุณหภูมิจะอยู่ระหว่าง 21-40 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมช่วงนี้คือ 35-40 องศาเซลเซียส
- thermophilic temperature อุณหภูมิจะอยู่ระหว่าง 40-60 องศาเซลเซียส แต่อุณหภูมิที่เหมาะสมช่วงนี้คือ 53-60 องศาเซลเซียส

อาหารเสริม นอกจากสารอินทรีย์ในระบบหมักที่ใช้เป็นแหล่งอาหารโดยตรงของแบคทีเรียแล้ว แบคทีเรียยังต้องการแร่ธาตุบางชนิดในการเสริมสร้างเซลล์ใหม่ด้วย เช่น ไนโตรเจน และ

พอสฟอรัส ในอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 100:2.2:0.4 แม้ว่าแบคทีเรียจะต้องการแร่ธาตุเหล่านี้ในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำมาก แต่ถ้าขาดสารเหล่านี้ แบคทีเรียจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ไม่เต็มที่ จึงจำเป็นต้องเติมสารเหล่านี้โดยปรับอัตราส่วน COD:N:P ให้เหมาะสม (พิทยากิทยะวัฒน์, 2531)

สารพิษ สารบางอย่างถ้ามีในถังหมักมากเกินไป จะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ซึ่งระดับความเป็นพิษจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสาร สารพิษส่วนใหญ่ได้แก่ พวกเกลืออินทรีย์ รวมทั้งสารประกอบอินทรีย์ที่มีพิษ (toxic organic compound) ส่วนพวกโลหะอัลคาไลน์และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ธนั้น จะไม่มีความเข้มข้นที่แน่นอนในการยับยั้งและเป็นพิษ จะแปรเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับว่าโลหะนั้นจะมีปฏิกิริยาโดยตัวมันเองหรือปฏิกิริยาร่วม เช่น แอมโมเนีย เมื่ออยู่ในรูปของ NH_3 จะยับยั้งเมื่อมีความเข้มข้นสูงเพียงพอ ซึ่งอยู่ระหว่าง 1,500–3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH สูงกว่า 7.4 แต่ที่ความเข้มข้นสูงกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรแล้ว แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) เพียงอย่างเดียวจะเป็นพิษรุนแรง ไม่ว่า pH จะเท่าใดก็ตาม (McCarty, 1964)

ปัจจัยในการปฏิบัติงาน

ระยะเวลาเก็บกัก เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการควบคุมประสิทธิภาพของกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ อัตราการย่อยสลายในกระบวนการหมักแบบอับอากาศจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บกักอินทรีย์สาร จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นก็ลดลง แต่ถ้าระยะเวลาเก็บกักน้อยเกินไปจะมีผลทำให้ตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากระบบได้มาก จนกระทั่งถึงขั้นหนึ่งที่แบคทีเรียถูกล้างออกจากระบบในอัตราที่เร็วกว่าที่แบคทีเรียจะเพิ่มจำนวนขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลว นอกจากนี้ ระยะเวลาเก็บกักจะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบการหมัก กล่าวคือระยะเวลาเก็บกักเป็นระยะเวลาที่ของเสียอยู่ในถังหมัก สามารถหาได้โดยการหารปริมาณถังหมักด้วยปริมาณของของเสียที่เติมลงถังหมักต่อหน่วยเวลา

อัตราการป้อนอินทรีย์สาร เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุด ที่กำหนดความสามารถในการบำบัดของเสีย การปรับอัตราการป้อนอินทรีย์สารให้มีค่าแตกต่างกัน ทำได้โดยการเปลี่ยนอัตราการไหลของของเสียที่ไหลผ่านถังหมัก หรือเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของของแข็งหรือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าไป ซึ่งการเปลี่ยนอัตราการป้อนอินทรีย์สารจะมีผลต่อระยะเก็บกัก

การกวน การกวนเป็นปัจจัยสำคัญในระบบการย่อยสลายแบบอับอากาศ เนื่องจากทำให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างสารอาหารกับจุลินทรีย์ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วย และป้องกันการเกิดการสะสมของอินทรีย์สารตามจุดต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์ และทำให้ของเหลวภายในมีสภาพเป็นเนื้อเดียวกัน กรรมวิธีการกวนของเหลวในถังปฏิกรณ์ มีหลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป (ชาญชัย คุณวานากิจ. 2529)

สาเหตุที่ทำให้ระบบการหมักล้มเหลว (causes of ultimate failure)

จากการศึกษาถึงปัจจัยของสิ่งแวดล้อมและปัจจัยในการทำงาน เพื่อที่จะให้ได้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพนั้น สามารถสรุปสาเหตุของการล้มเหลวในการควบคุมระบบกำจัดของเสียโดยวิธีการย่อยสลายแบบอับอากาศดังนี้คือ (Graef and Andrews. 1974)

ก) การให้ของเหลวเข้าสู่ระบบมากเกินไป (hydraulic overloading) จะทำให้ระยะเวลาเก็บกักจุลินทรีย์ให้อยู่ในระบบ (residence time) ลดลงจนถึงจุดซึ่งจุลินทรีย์ไม่สามารถที่จะขยายพันธุ์ (reproduced) ได้ทัน ก่อนที่จะถูกล้างออกจากระบบ

ข) การให้ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบมากเกินไป (organic overloading) จะทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหย ซึ่งจะยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน

ค) การให้ปริมาณสารพิษที่เข้าสู่ระบบมากเกินไป (toxic overloading) เมื่อสารพิษ เช่น โลหะหนัก สารเคมี แอมโมเนีย และอีออนลบเข้าสู่ระบบมากเกินไปจะไปทำลาย methanogenic bacteria ซึ่งสาเหตุของการตายเกิดจากการสะสมของสารพิษที่ความเข้มข้นสูง

คำจำกัดความของศัพท์ต่าง ๆ ที่ใช้งานวิจัย (Khan, Miller and Murray. 1983)

1) ระยะเวลาเก็บกัก คือระยะเวลาในการหมักซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการออกแบบการกำจัดของเสีย ตามทฤษฎีระยะเวลาเก็บกัก จะแทนเวลาที่ของเสียอยู่ในถังหมัก และหาได้โดยการหารปริมาตรของถังหมักด้วยปริมาตรของของเสียที่ไหลผ่านถังหมักต่อหน่วยเวลา ถ้าของเสียที่เติมในถังหมักเป็นของแข็ง จะเรียกว่าระยะเวลาเก็บกักของแข็ง (solid retention time, SRT)

2) ของแข็งทั้งหมด แสดงถึงปริมาณสิ่งเจือปนทั้งหมดในน้ำว่ามีมากน้อยเพียงใด เมื่อระเหยน้ำออกจนหมด ไม่รวมถึงสารบางอย่างที่ระเหยไปกับน้ำ เช่น พวกกรดอินทรีย์และกรดต่าง ๆ ที่ละลายน้ำโดยสิ่งเจือปนที่เหลือนี้เป็นของแข็ง มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทั้งที่ละลายและไม่ละลายในน้ำ

3) ของแข็งระเหย (volatile solids) คือปริมาณสารอินทรีย์ที่ระเหยง่าย จากคุณสมบัติของสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ เมื่อเผาในอากาศที่มีอุณหภูมิ 550-600 องศาเซลเซียส จะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และระเหยไป แต่สารอนินทรีย์จะคงอยู่ ดังนั้นจะบอกให้ทราบถึงปริมาณสารอินทรีย์ในวัตถุตัวอย่างคร่าว ๆ

4) กรดอินทรีย์ระเหย (volatile acids) เป็นผลิตภัณฑ์ตัวกลางในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพแอ้อากาศ ได้แก่ กรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 1 ถึง 5 ตัวเป็นส่วนใหญ่

5) สภาพความเป็นด่างรวม (total alkalinity) เป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงความเป็นบัฟเฟอร์ (buffer capacity) ของระบบ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของค่า pH ซึ่งเป็นอันตรายต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ในระบบ

6) ซีโอดี (chemical oxygen demand, COD) คือ ค่าความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่หาได้โดยวิธีการทางเคมี โดยค่าซีโอดีจะแสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำเสียหรือน้ำทิ้ง ทั้งที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้และย่อยสลายไม่ได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นักวิทยาศาสตร์พยายามศึกษาหาวิธีในการกำจัดของเหลือทิ้งทางการเกษตรให้เหมาะสม และสามารถผลิตพลังงานคือก๊าซชีวภาพนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้อีกวิธีการหนึ่ง คือการนำกากเหลือทิ้งทางการเกษตรมาหมักแบบแอ้อากาศ การหมักแบบแอ้อากาศนี้ได้มีการพัฒนาวิธีการและระบบเรื่อยมา โดยมีทั้งระบบขั้นตอนเดียว ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์สองกลุ่ม คือกลุ่มที่ไม่ผลิตก๊าซมีเทน และกลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทน และอีกระบบหนึ่งคือ แบบสองขั้นตอน โดยแยกขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์และขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนออกจากกัน (Ghosh, Sajjad and Herry. 1983) และมีการศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพเช่น การเริ่มเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ อัตราการ

ป้อนอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกัก ลักษณะของวัตถุดิบ เป็นต้น

การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสม ในการเพิ่มปริมาณเชื้อจุลินทรีย์สำหรับกระบวนการหมักพบว่าการเริ่มเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์โดยใช้น้ำเหลือทิ้งจากโรงงาน และเติมมูลวัวลงไปทำให้มีความเข้มข้นร้อยละ 5 หลังจากหมักไปได้ 20 วัน จึงเติมมูลวัวผสมกับกากมะเขือเทศทุกสัปดาห์โดยค่อย ๆ ลดปริมาณของมูลวัว แต่จะค่อย ๆ เพิ่มปริมาณของกากมะเขือเทศตามอัตราส่วนของมูลวัวต่อกากมะเขือเทศดังนี้ 90:10 80:20 70:30 60:40 50:50 40:60 30:70 20:80 10:90 และในที่สุดจะเติมแต่กากมะเขือเทศอย่างเดียว พบว่าการเริ่มเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์เป็นเวลานาน 10-12 สัปดาห์ จะได้เชื้อจุลินทรีย์ที่ให้ผลดีต่อกระบวนการหมัก (Sarada and Nand. 1989) การเริ่มเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้ผลดีอีกวิธีหนึ่งคือ การใช้เกลืออะซิเตทป้อนเป็นแหล่งอาหาร เชื้อจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ทำให้ระยะเวลาในการเริ่มเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ลดลง (ณรงค์ จิตต์จริงเกียรติ. 2529)

การศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกัก และอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ที่มีต่อปริมาณและคุณภาพของก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบอับอากาศ ในถังหมักที่บรรจุตัวกรองทำด้วยโลหะรูปอานม้า โดยใช้น้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นวัตถุดิบ ซึ่งมีกลูโคสและน้ำแช่ข้าวไรด์ (corn steep liquor) เป็นองค์ประกอบ ศึกษาภายใต้สภาวะต่าง ๆ กัน คือให้มีอัตราการป้อนอินทรีย์สารอยู่ในช่วง 1 ถึง 13 กิโลกรัมชีโรดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และระยะเวลาเก็บกักระหว่าง 12 ถึง 24 ชั่วโมง พบว่าระยะเวลาเก็บกักต่ำสุดที่ทำให้ระบบอยู่ตัวที่สุดคือ 12 ชั่วโมง สามารถจัดอินทรีย์สารในรูปของชีโรดีได้ประมาณร้อยละ 90 ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 11 กิโลกรัมชีโรดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (Yang and others. 1992)

การศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกัก โดยทดลองหมักมูลวัวในถังปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ คือ 0.9 วัน 1.5 วัน 2.1 วัน 6 วัน และ 8 วัน พบว่าการเพิ่มระยะเวลาเก็บกักจะทำให้การขจัดอินทรีย์สารสูงขึ้น การลดระยะเวลาเก็บกักไม่มีผลในการยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ และระยะเวลาเก็บกักจะไม่มีผลต่อปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพด้วย (Sanchez and others. 1992)

การย่อยสลายกากมะเขือเทศแบบอับอากาศขั้นตอนเดียวจนถึงปฏิกิริยาดังปฏิกิริยาดังขนาด 4 ลิตร โดยใช้กากมะเขือเทศที่มีขนาดต่าง ๆ กัน คือ 1.3 2.4 3.2 12.7 และ 20 มิลลิเมตร ซึ่งเตรียมโดยการบดกากมะเขือเทศแล้วร่อนผ่านตะแกรงที่มีช่องขนาด 1.3 2.4 3.2 12.7 และ 20 มิลลิเมตรตามลำดับ ศึกษาโดยบ่อนอินทรีย์สาร 3 กรัมของของแข็งระเหยต่อลิตรถึงปฏิกิริยาดังปฏิกิริยาดังระยะเวลาเก็บกัก 18 วัน พบว่ากากมะเขือเทศที่มีขนาด 1.3 มิลลิเมตร สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุดคือผลิตได้ 0.81 ลิตรต่อลิตรถึงปฏิกิริยาดังปฏิกิริยาดัง มีการจัดของแข็งระเหยได้มากที่สุดคือร้อยละ 60.3 ของของแข็งทั้งหมด ในขณะที่กากมะเขือเทศที่มีขนาด 20 มิลลิเมตร ผลิตก๊าซมีเทนได้เพียง 0.25 ลิตรต่อลิตรถึงปฏิกิริยาดังปฏิกิริยาดัง (Hill and Nakano, 1984)

นักวิจัยพยายามศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยเปรียบเทียบระหว่างการหมักแบบอับอากาศขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน โดยใช้กากเหลือทิ้งและน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องดื่มน้ำอัดลมซึ่งมีค่าซีรอดีสูง ผลการทดลองพบว่าการหมักแบบอับอากาศขั้นตอนเดียวโดยใช้ถึงปฏิกิริยาดังปฏิกิริยาดังที่มีการกวนธรรมดาได้รับการเติมปริมาณอินทรีย์สารได้น้อย และใช้ระยะเวลาเก็บกักนาน แต่กระบวนการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอนสามารถได้รับการเติมปริมาณอินทรีย์สารได้สูงถึง 12 กิโลกรัมซีรอดีต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกิริยาดังปฏิกิริยาดัง อดระยะเวลาเก็บกักได้ต่ำถึง 13 ชั่วโมง ทำให้ถึงปฏิกิริยาดังขนาดเล็ก ซึ่งจะลดต้นทุนในการสร้างถึงปฏิกิริยาดัง และต้นทุนในการดำเนินงาน สามารถให้พลังงานออกมาสูง (Ghosh, Ombregt and Pipyn, 1985) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาหากระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้วัตถุดิบต่าง ๆ กัน เช่น การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษผัก (vegetable solid wastes) โดยเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการหมักแบบอับอากาศขั้นตอนเดียวและสองขั้นตอน ทดลองที่อุณหภูมิตั้ง 35 องศาเซลเซียส กระบวนการหมักแบบขั้นตอนเดียวใช้ถึงปฏิกิริยาดังปฏิกิริยาดังมีการกวนปริมาตร 16 ลิตร บ่อนอินทรีย์สารวันละครั้ง การทดลองแบบสองขั้นตอนนั้น ขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ในถึงปฏิกิริยาดังปฏิกิริยาดังมีการกวนปริมาตร 7 ลิตร บ่อนอินทรีย์สารที่เป็นของแข็งวันละครั้ง ในขั้นตอนนี้มีการควบคุม pH โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วย และในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนนั้นมีการบ่อนอินทรีย์สารอย่างต่อเนื่อง ผลการทดลองพบว่ากระบวนการหมักแบบขั้นตอนเดียวสามารถได้รับการเติมปริมาณอินทรีย์สารได้ 3.6 กรัมของของแข็งทั้งหมดต่อลิตรถึงปฏิกิริยาดังปฏิกิริยาดัง ได้ก๊าซมีเทน 0.371 ลิตรต่อกรัมของของแข็งทั้งหมด ส่วนการหมักแบบสองขั้นตอนสามารถได้รับการเติมปริมาณอินทรีย์สารได้ 5.65 กรัมของของแข็งทั้งหมดต่อลิตรถึงปฏิกิริยาดังปฏิกิริยาดัง

าให้ก๊าซมีเทนได้สูงถึง 0.42 ลิตรต่อกรัมของของแข็งระเหย (Verrier, Ray and Albagmac. 1987)

การผลิตก๊าซมีเทน โดยกระบวนการย่อยสลายแบบอับอากาศสองขั้นตอนจากกากมะเขือเทศ โดยศึกษาทั้งในระดับห้องปฏิบัติการ และระดับโรงงานต้นแบบ ซึ่งในระดับห้องปฏิบัติการนั้น ใช้ถังปฏิกรณ์ปริมาตร 4 ลิตร ทดลองที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส มีการป้อนอินทรีย์สารแบบกึ่งต่อเนื่อง จากการศึกษาพบว่า อัตราการป้อนอินทรีย์สารที่เหมาะสมคือ 5 กิโลกรัมของของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมคือ 25 วัน สามารถกำจัดของแข็งระเหยได้ร้อยละ 33 ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.43 ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน ประสิทธิภาพของระบบคือจะาให้ก๊าซชีวภาพ 0.14 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหยที่เติม สำหรับผลของระดับโรงงานต้นแบบ ซึ่งทำในถังปฏิกรณ์ขนาด 25 ลูกบาศก์เมตร พบว่าได้ผลในทางองเดียว กับในระดับห้องปฏิบัติการ

การศึกษาการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน โดยทดลองที่อุณหภูมิห้อง ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 10 และ 20 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน น้ำหมักที่กรองได้มีปริมาณอินทรีย์สารเฉลี่ยเท่ากับ 1,754 และ 2,817 มิลลิกรัมซีโรดีต่อลิตร การจัดการกรดอินทรีย์สารร้อยละ 20.23 และ 12.74 ของของแข็งระเหยตามลำดับ ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนให้อัตราการป้อนอินทรีย์สารอยู่ระหว่าง 0.2 - 4.2 กรัมซีโรดีต่อลิตรต่อวัน ระยะเวลาเก็บกักอยู่ระหว่าง 1-2 วันจะได้ก๊าซชีวภาพที่มีปริมาณก๊าซมีเทนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 88.02-95.56 โดยอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะแปรผันตามอัตราการป้อนอินทรีย์สารเมื่อระยะเวลาเก็บกักคงที่ เมื่อป้อนน้ำหมักที่มีความเข้มข้นของอินทรีย์สารประมาณ 1.5 กรัมซีโรดีต่อลิตรต่อวัน ลดระยะเวลาเก็บกักลงพบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มขึ้น เช่น ลดระยะเวลาเก็บกักจาก 10 วัน เป็น 5 วัน จะทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มจาก 0.06 ลิตรต่อลิตรถึงปฏิกรณ์เป็น 0.13 ลิตรต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน (วิบูลย์ นุชประมูล. 2535)

การศึกษากระบวนการบำบัดของเสียแบบอับอากาศสองขั้นตอนจากหางนม ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมทำเนยแข็ง (cheese) จากนม ทำในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ และถึงผลิตก๊าซมีเทนที่มีขนาดเท่า ๆ กัน คือมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 6.6 เซนติเมตร ยาว 33 เซนติเมตร ปริมาตรภายใน 1 ลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พบว่าในถังปฏิกรณ์ผลิตกรด

อินทรีย์สามารถทำงานได้ดี ระบบอยู่ตัวที่ pH ประมาณ 4.5 น้ำหมักจากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนได้โดยนำมาเจือจาง จะได้อินทรีย์สารที่มีสภาพเหมาะสม โดยไม่ต้องมีการเติมต่างเพื่อเพิ่ม alkalinity ซึ่งกระบวนการแบบสองขั้นตอนนี้ สามารถจัดชีโรดีได้สูงถึงร้อยละ 99 ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมเท่ากับ 0.45 วัน รับภาระการเติมอินทรีย์สารได้ 30 กิโลกรัมชีโรดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสมเท่ากับ 0.75 วัน รับภาระการเติมอินทรีย์สารได้ 15 กิโลกรัมชีโรดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (Garcia, Rico and Fdz-Polanco. 1991)

การวิจัยเกี่ยวกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำที่บีบจากกากเหลือทิ้งจากการทำกาแฟ พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้กระบวนการหมักแบบขั้นตอนเดียว ถึงปฏิกรณ์สามารถรับปริมาณการเติมของแฉะร้อยละ 0.5-3 กรัมต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.97 กรัมของของแฉะร้อยละต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1.55 ลิตรต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน โดยมีองค์ประกอบเป็นก๊าซมีเทนร้อยละ 79 แต่เมื่อใช้กระบวนการหมักแบบสองขั้นตอน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ระบบอยู่ตัวคือ ขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ใช้ระยะเวลาเก็บกัก 0.5 วัน มีอัตราการป้อนอินทรีย์สาร 56 กรัมของของแฉะร้อยละต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน และในขั้นตอนการเกิดก๊าซมีเทนมีระยะเวลาเก็บกัก 8 วัน มีอัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.8 กรัมของของแฉะร้อยละต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1.9 ลิตรต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน (Calzada. 1984)

การศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากขยะโดยกระบวนการชีวภาพแบบอับอากาศสองขั้นตอน โดยใช้ระยะเวลาในการหมักต่าง ๆ กันคือ 3.49 5.17 11.39 และ 15.91 วัน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สารระหว่าง 0.18 ถึง 0.80 กิโลกรัมของของแฉะร้อยละที่เติมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าได้ปริมาณก๊าซชีวภาพอยู่ระหว่าง 0.052 ถึง 0.228 ลิตรต่อกรัม ของของแฉะร้อยละที่เติม และมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่ประมาณร้อยละ 58.98 ถึง 66.91 โดยระยะเวลาเก็บกัก 8.47 วัน จะให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดคือ 0.30 ลิตรต่อกรัมของของแฉะร้อยละที่เติมเข้าไป และมีองค์ประกอบของมีเทนสูงด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพส่วนรวมของกระบวนการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอน สูงกว่าการหมักแบบอับอากาศขั้นตอนเดียว โดย

สามารถกำจัดชีโรดีทั้งหมดอยู่ระหว่างร้อยละ 59.63 ถึง 94.38 และการกำจัดของแข็งทั้งหมด ร้อยละ 88.67 ถึง 97.79 ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน (สมชาย เจริญธีรสกุล. 2530)

การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ของกระบวนการย่อยสลายแบบอับอากาศขั้นตอนเดียว และสองขั้นตอนโดยใช้ municipal mixed sludge เป็นวัตถุดิบ โดยแบบสองขั้นตอนในขั้นตอน การผลิตกรดอินทรีย์ ควบคุมสภาพได้สภาวะที่เหมาะสมคือ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส pH 6.8 มีการกวนผสมความเร็ว 545 รอบต่อนาที ถึงปฏิกิริยามีปริมাত্রการใช้งานเท่ากับ 1.6 ลิตร มี ระยะเวลาเก็บกัก 1.6 วัน ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน ถึงปฏิกิริยามีปริมাত্রการใช้งานเท่ากับ 5 ลิตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส กวนผสมความเร็ว 300 รอบต่อนาที ระยะเวลาเก็บกัก 25 วัน ระบบการหมักเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง ขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์เติมอินทรีย์สารวันละ 1,000 มิลลิลิตร ขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนเติมอินทรีย์สารวันละ 500 มิลลิลิตร ซึ่งนำมาจากน้ำหมักที่ดึง ออกจากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ สำหรับแบบขั้นตอนเดียวเติมอินทรีย์สารวันละ 400 มิลลิลิตร จากการทดลองพบว่า กระบวนการหมักแบบสองขั้นตอนนี้ ประสิทธิภาพดีกว่าแบบขั้นตอนเดียว คือ ช่วงเวลาในการเริ่มเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์แบบสองขั้นตอนสั้นกว่า คือใช้เวลาเพียง 45 วัน แต่แบบ ขั้นตอนเดียวใช้เวลา 75 วัน สามารถลดระยะเวลาเก็บกัก สามารถบำบัดของเสียที่มีปริมาณมากกว่าในระยะเวลาที่สั้นกว่าแบบขั้นตอนเดียว (Peroland and Amar. 1989)

จากรายงานวิจัยต่าง ๆ สรุปได้ว่าปัจจัยต่าง ๆ เช่น การเริ่มเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ อัตรา การป้อนอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกัก และลักษณะวัตถุดิบมีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพและการจัด อินทรีย์สารในกากเหลือทิ้ง หรือน้ำทิ้งจากรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ นอกจากนี้การแยกขั้นตอน การผลิตกรดอินทรีย์และขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนออกจากกันทำให้สามารถควบคุมสภาวะให้เหมาะสม ได้ในแต่ละขั้นตอน เช่น การควบคุม pH การเติมวัตถุดิบ ทำให้ระบบรับภาระการเติมอินทรีย์สาร ได้มากขึ้นและลดระยะเวลาเก็บกักลงได้

จากความสนใจที่จะนำกากมะเขือเทศมาใช้เป็นวัตถุดิบในการศึกษากระบวนการหมักแบบอับ อากาศสองขั้นตอนนั้น จึงจำเป็นต้องศึกษาหาวิธีการและสภาวะที่เหมาะสมในการหมักกากมะเขือเทศ แบบอับอากาศ โดยจะศึกษาถึงผลของระยะเวลาเก็บกัก ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์รวมทั้งศึกษา ถึงผลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนต่อปริมาณและ คุณภาพของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมะเขือเทศโดยศึกษา

1. ผลของระยะเวลาเก็บกักในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่มีต่อปริมาณและคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น
2. ผลของระยะเวลาเก็บกัก และอัตราการป้อนอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนต่อปริมาณและคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

ประโยชน์ของงานวิจัย

1. ได้ข้อมูลและทราบถึงวิธีการจากการศึกษาหาผลของระยะเวลาเก็บกัก ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมะเขือเทศ
2. ได้ข้อมูลและทราบถึงวิธีการจากการศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกัก และอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมะเขือเทศ
3. ทราบถึงเข้าไปถึงสภาวะที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพจากกากมะเขือเทศมากขึ้น ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการควบคุมการทำงานของถังปฏิกรณ์เพื่อการศึกษาในรายละเอียดต่อไป
4. งานวิจัยนี้เป็นแนวทางในการใช้เทคโนโลยีชีวภาพในการกำจัดกากอุตสาหกรรมเกษตร

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

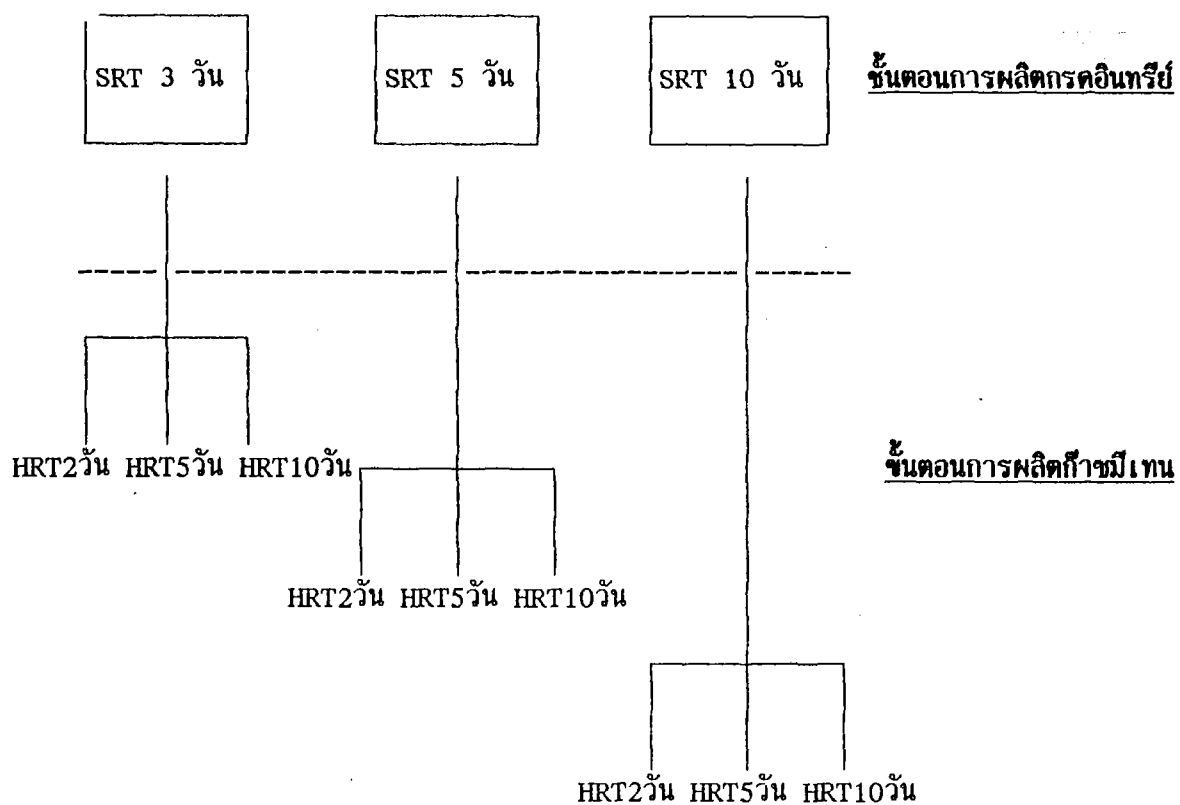
ทำการวิจัยที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร และที่คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี โดยมีแผนการวิจัยและวิธีการวิจัยดังนี้

แผนการวิจัย

ระบบการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอนที่ใช้ในการวิจัยได้แยกถึงปฏิกิริยาผลิตกรดอินทรีย์และถึงปฏิกิริยาผลิตก๊าซมีเทนออกจากกัน โดยนำกากมะเขือเทศผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์หมักจนถึงปฏิกิริยาผลิตกรดอินทรีย์ นำน้ำหมักที่ได้มากรองแล้วบ้อนเข้าสู่ถึงปฏิกิริยาผลิตก๊าซมีเทน เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างถึงปฏิกิริยาผลิตก๊าซมีเทนที่มีระยะเวลาเก็บกักต่าง ๆ กัน เมื่ออัตราการบ้อนอินทรีย์สารคงที่ และที่มีอัตราการบ้อนอินทรีย์สารที่ระดับต่าง ๆ กัน เมื่อระยะเวลาเก็บกักคงที่

การทดลองทั้งหมดมี 4 ชุดการทดลองดังนี้คือ

การทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่มีต่อการผลิตก๊าซมีเทน ดังแผนภาพแสดงในภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 แผนการทดลองชุดที่ 1 ศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักกากในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ต่อการผลิตก๊าซมีเทน

การทดลองที่ 2 ศึกษาเปรียบเทียบผลของระยะเวลาเก็บกัก และอัตราการป้อนอินทรีย์สาร โดยนำน้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน เป็นวัตถุดิบสำหรับป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน มีระยะเวลาเก็บกักในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนนาน 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน และปรับให้มีอัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 0.2 0.5 0.8 1.0 และ 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน

การทดลองที่ 3 ศึกษากิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน ในการใช้สารอาหารต่าง ๆ

– ศึกษากิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนในชุดการทดลองที่ 3 ซึ่งมี 6 สภาวะ

– อาหารที่ใช้ในการศึกษากิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์คือ

1. กรดอะซิติกมีความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยปริมาตรต่อปริมาตร
2. เอทานอลมีความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยปริมาตรต่อปริมาตร
3. เบบโตนมีความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
4. กลูโคสมีความเข้มข้นร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
5. กลูโคสมีความเข้มข้นร้อยละ 1.0 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

แหล่งของจุลินทรีย์ ถังปฏิกรณ์และวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

1. แหล่งของจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์ นำมาจากน้ำหมักที่ถ่ายออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำคั้นจากเปลือกสับปะรด ของภาควิชาพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

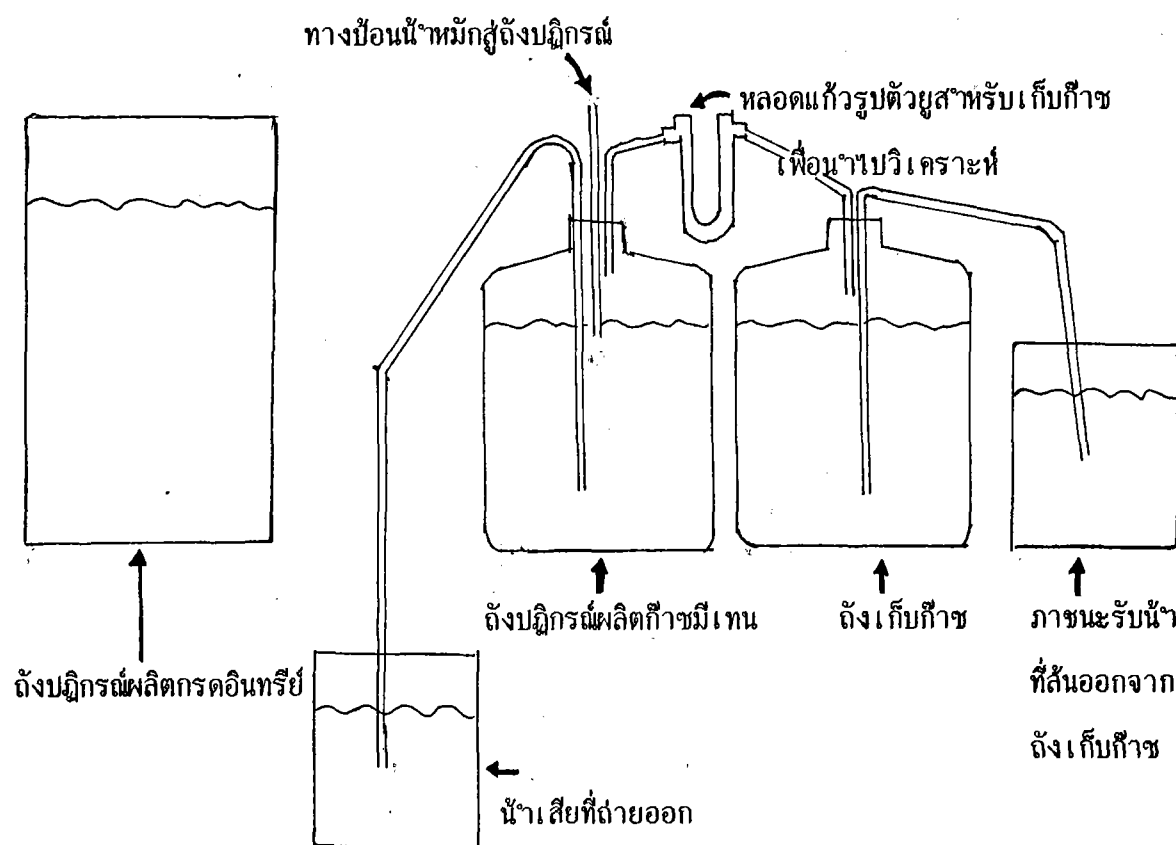
จุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตก๊าซมีเทน ได้จากน้ำเสียจากการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้สารแขวนลอยกากชื้อสั่วเหลืองที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร เป็นวัตถุดิบจากห้องปฏิบัติการวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

2. ถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ใช้ถังแก้วทรงกระบอกขนาดความจุ 20 และ 35 ลิตร

ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนเป็นขวดแก้วเกลลอน ขนาดความจุ 4 ลิตร ปริมาตรของเหลวที่ใช้ในการหมักเท่ากับ 3.5 ลิตร ฝาถูกขุดเป็นยางที่สอดหลอดแก้ว 3 แท่ง ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ขนาดยาว 8 เซนติเมตร สำหรับเป็นท่อนำก๊าซ ยาว 15 เซนติเมตร สำหรับเป็นทางน้ำเสียออก และยาว 25 เซนติเมตร สำหรับป้อนน้ำหมักเข้าสู่ถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนนี้จะต่อกับถังเก็บก๊าซ และอุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซดังภาพประกอบ 5 รอยที่ถังเก็บก๊าซ เป็นขวดแก้วขนาดความจุ 4 ลิตร เก็บก๊าซโดยการแทนที่น้ำ และ อุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ เป็นหลอดแก้วรูปตัวยูสำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซนำไปตรวจวิเคราะห์



ภาพประกอบ 3 แสดงชุดการทดลองแบบอับอากาศสองขั้นตอน

3. วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

กากมะเขือเทศแห้งเป็นกากเหลือทิ้ง และได้รับความอนุเคราะห์จากโครงการอาหารหลวงสำเร็จรูป บรรจุกาสุญญากาศปิดผนึก เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

วิธีดำเนินการทดลอง

1. การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์

นำกากมะเขือเทศแห้งมาผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์ ให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร หมักในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์การหมักในช่วงแรกเป็นแบบเก็บกัก(batch process) นานประมาณ 1 สัปดาห์ น้ำหมักที่ได้นำใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับการหมักเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์ต่อไป

2. การเตรียมถังปฏิกรณ์สำหรับผลิตก๊าซมีเทน

นำน้ำเสียจากการผลิตก๊าซมีเทนจากกากข้าวสาลีเหลืองซึ่งมีตะกอนเชื้อจุลินทรีย์อยู่สาในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนประมาณ 2 ลิตร เติมน้ำลงไปประมาณ 1.5 ลิตร เพิ่มปริมาณเชื้อจุลินทรีย์โดยการเติมขี้เถ้าหมักพืชเตาทุกวันเพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารเป็นเวลา 20 วัน รดน้ำให้มีความเข้มข้นของขี้เถ้าหมักพืชเตาร้อยละ 0.1 ในระหว่างที่เลี้ยงเชื้อด้วยขี้เถ้าหมักพืชเตานั้น เตรียมน้ำหมักจากกากมะเขือเทศร่อนกากมะเขือเทศแห้งมาผสมกับน้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ทิ้งไว้นานประมาณ 7-10 วัน

หลังจากเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนด้วยขี้เถ้าหมักพืชเตาเป็นเวลา 20 วัน จึงเติมขี้เถ้าหมักพืชเตาผสมกับน้ำหมักกากมะเขือเทศที่เตรียมไว้ทุก ๆ สัปดาห์ รดค่อย ๆ ลดปริมาณของขี้เถ้าหมักพืชเตาแต่จะค่อย ๆ เพิ่มปริมาณของน้ำหมักกากมะเขือเทศ ตามอัตราส่วนของขี้เถ้าหมักพืชเตาต่อปริมาณน้ำหมักกากมะเขือเทศดังนี้คือ 90:10 80:20 70:30 60:40 50:50 40:60 30:70 20:80 10:90 และในที่สุดจะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ด้วยน้ำหมักกากมะเขือเทศเท่านั้น ระยะเวลาในการเตรียมเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตก๊าซมีเทนนี้ประมาณ 12 สัปดาห์ ระหว่างที่เลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์นั้นจะทำการตรวจสอบปริมาณ และคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น จนกระทั่งก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาณและคุณภาพค่อนข้างคงที่แล้วจึงเริ่มทำการทดลอง

3. การหมักเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์

นำหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์ที่เตรียมได้ตามวิธีในข้อ 1 มาผสมกับกากมะเขือเทศแห้งที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร หมักที่อุณหภูมิห้อง การบ่มอินทรีย์สารเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง (semicontinuous process) ให้ระยะเวลาเก็บกักกาก นาน 3 5 และ 10 วัน กรองน้ำหมักที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ น้ำหมักส่วนหนึ่งจะนำไปวิเคราะห์หาค่าซีรอดี กรดอินทรีย์ระเหย pH และ alkalinity น้ำหมักที่เหลือนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับบ่มเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนต่อไป

4. การหมักเพื่อได้ก๊าซมีเทน

นำน้ำหมักที่ถ่ายออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ปรับ pH ให้เป็น 7.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีความเข้มข้น 1 นอร์มัล (N) บ่มเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนที่เตรียมไว้ตามข้อ 2 หมักแบบกึ่งต่อเนื่องให้ระยะเวลาเก็บกักนาน 2 5 และ 10 วัน เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักเมื่อบ่มอินทรีย์สารในอัตราที่คงที่และเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการบ่มอินทรีย์สารแต่ให้ระยะเวลาเก็บกักคงที่ โดยบ่มอินทรีย์สารวันละครั้ง และจะเก็บน้ำหมักที่ถ่ายออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าซีรอดี กรดอินทรีย์ระเหย pH และ alkalinity

การบันทึกข้อมูล

- วัดปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการแทนที่น้ำ pH ในถังที่ผลิตกรดอินทรีย์และถังที่ผลิตก๊าซมีเทนทุกวัน
- วิเคราะห์หาค่าซีรอดี ความเป็นด่างและกรดอินทรีย์ระเหยทุก ๆ 2 วัน
- วิเคราะห์คุณภาพของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสัปดาห์ละ 1 - 2 ครั้ง

5. การศึกษากิจกรรมของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน

การศึกษากิจกรรมของจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน เป็นการทดสอบความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอาหารต่าง ๆ โดยทำการทดลองในขวดซีรัมที่มีขนาดความจุ 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใช้น้ำหมักที่ดึงออกมาจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน เป็นอาหาร

หลัก(basal media) เพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากในการเตรียมสารอาหาร และเพื่อป้องกันการขาดสารอาหารบางตัว ซึ่งอาจเป็นที่ต้องการของเชื้อเหล่านี้ สำหรับน้ำหมักนี้ก่อนที่จะนำมาใช้เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลาประมาณ 1-2 เดือน เพื่อให้สารอาหารที่มีเหลืออยู่เดิมหมดไป ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของน้ำทิ้งจะใสขึ้น หรือก่อนจะนำมาใช้อาจทดสอบหาแป้งหรือน้ำตาล ถ้าตรวจไม่พบจะนำน้ำหมักดังกล่าวมากรองด้วยกระดาษกรอง และเก็บน้ำหมักที่กรองได้ไว้ที่ 4 องศาเซลเซียส เพื่อนำมาใช้เป็นสารอาหารหลักต่อไป ซึ่งมีวิธีการศึกษากิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ดังนี้

1. เจือจางสารอาหารหลักที่เตรียมได้จากข้อ 5 ด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:1 แล้วนำไปฆ่าเชื้อ พร้อมกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ด้วยหม้อนึ่งความดัน เป็นเวลา 15 นาที

2. เติม yeast extractลงในสารอาหารที่ได้จากข้อ 1 จนมีความเข้มข้นร้อยละ 0.02

3. แบ่งอาหารออกเป็นส่วน ๆ เพื่อเติมกรดอะซิติก หรือ เอทานอล หรือเบบโตน ลงในสารอาหารหลักที่เตรียมได้ในข้อ 2 ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และเติมกลูโคสลงในสารอาหารหลักให้มีความเข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 1.0

4. ปรับ pH ของสารอาหารทั้งหมดให้เป็น 7.2

5. นำสารอาหารหลักที่มีแหล่งคาร์บอนต่างกัน ไปฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ด้วยหม้อนึ่งความดันเป็นเวลา 15 นาที

6. นำน้ำหมักจากถังปฏิบัติการผลิตก๊าซมีเทนที่ต้องการศึกษากิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ มาเติมลงในสารอาหารที่เตรียมไว้ในข้อ 5 ในปริมาณร้อยละ 10 (โดยปริมาตรต่อปริมาตร) ผสมให้เข้ากัน แล้วนำมาใส่ในขวดซีรัมขวดละ 9.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ปิดด้วยจุกยางโดยพยายามให้มีอากาศอยู่ในขวดน้อยที่สุด

7. ฆ่าเชื้อเข็มฉีดยาแทงทะลุจุกยาง ดูดเอาอากาศออก

8. ครอบทับจุกยางด้วยฟาลูมิเนียมแล้วบีบให้แน่น นำไปบ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน หลังจากนั้นติดตามการใส่สารอาหารของเชื้อโดยวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซทุกวัน

- สำหรับกลุ่มควบคุม (control) ทำการทดลองเหมือนวิธีการข้างบน แต่ใช้น้ำกลั่นแทนน้ำหมักในข้อ 6

การวิเคราะห์หาค่าซีโอดี เป็นการหาปริมาณอินทรีย์สารในน้ำหมักโดยวิธี open reflux (APHA. AWWA. WPCF.1985) โดยคิดเปรียบเทียบกับรูปของปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการออกซิไดซ์อินทรีย์สารด้วยสารเคมีซึ่งมีอำนาจในการออกซิไดซ์สูง (strong chemical oxidant) ในสารละลายที่เป็นกรด (ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2525)

เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือที่ใช้ในการรีฟลักซ์ (refluxing apparatus) ประกอบด้วย

1. ขวดกลมก้นแบน (flat bottom flask) ชนิดที่มีปากแบบกราวจอยท์ (ground joint) ขนาดความจุ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. เครื่องควบแน่น (condensor)
3. เตาแผ่นร้อน (hot plate)

วิธีวิเคราะห์

1. ใส่เมอคิวรี (II) ซัลเฟต (HgSO_4) ปริมาณ 0.4 กรัมลงในขวดรีฟลักซ์ เติมน้ำหมักหรือน้ำหมักที่ทำห้เจือจางแล้วลงไป 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร เขย่าให้เข้ากัน เติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่มีความเข้มข้น 0.0417 โมลาร์ จำนวน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วค่อย ๆ เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นซึ่งมีซิลเวอร์ซัลเฟตเจือปนอยู่ (ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต 22 กรัมในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1ขวด ซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม)จำนวน 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ลูกแก้ว 5-6 เม็ดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเดือดอย่างรุนแรง

2. นำขวดรีฟลักซ์ต่อกับเครื่องควบแน่น แล้วรีฟลักซ์หรือต้มให้เดือดเป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง กึ่งไว้ให้เป็น ล้างเครื่องควบแน่นด้วยน้ำกลั่นก่อนที่จะถอดเครื่องควบแน่นออกจากขวดรีฟลักซ์

3. เจือจางส่วนผสมที่ได้ด้วยน้ำกลั่น จนมีปริมาตรประมาณ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำให้เป็นลงที่อุณหภูมิห้อง แล้วติเตรตหาปริมาณของไดโครเมตที่มากเกินไปด้วยสารละลายมาตรฐานไอโอรอน (II)แอมโมเนียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ โดยใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์ เมื่อถึงจุดสมมูลย์สารละลายจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

4. ทำแบบลองค์ (blank) โดยใช้น้ำกลั่น 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรแทนน้ำหมัก และทำการวิเคราะห์พร้อมไปกับตัวอย่าง

การคำนวณ

$$\text{ซีโรดี (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)} = \frac{(a-b)M \times 8,000}{\text{ปริมาตรของน้ำหมัก (ลูกบาศก์เซนติเมตร)}}$$

a = ปริมาตรของไอธรีออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตซึ่งใช้ติเตรตกับแบบลองค์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

b = ปริมาตรของไอธรีออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตซึ่งใช้ติเตรตกับน้ำหมัก (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

M = ความเข้มข้นของไอธรีออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต (โมลาร์)

การวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย alkalinity โดยวิธีการติเตรต (direct titration) (ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2525; Powell and Archer, 1989)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องมือวัดความเป็นกรด - ด่าง (pH-meter)
2. บิวเรตขนาด 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร 2 อันพร้อมขาตั้ง
3. เตาแผ่นร้อน
4. เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge)
5. เครื่องกวนโดยใช้แท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
6. ปีกเกอร์ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมน้ำหมักที่จะหาปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย โดยวางทิ้งไว้ตกตะกอนและรินเอาแต่ส่วนที่ใสหรือนำไปปั่นตกตะกอนที่ความเร็ว 1,000 g ประมาณ 5 นาที
2. นำน้ำหมักใส่ในปิเกตอร์ 2 ใบ ใบละ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร วัด pH ของน้ำหมัก แล้วเติมเตรตน้ำหมักด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ เขย่าตลอดเวลาจนกระทั่ง pH เป็น 4 จดปริมาตรกรดที่ใช้เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเป็นด่างของน้ำหมักทั้งหมด (total alkalinity) แล้วเติมเตรตต่อจน pH อยู่ระหว่าง 3.3-3.5
3. ต้มสารตัวอย่างให้เดือดเบา ๆ ประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้อง ระหว่างนี้ให้ปรับเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง ด้วยสารละลายมาตรฐานบัฟเฟอร์ pH 4
4. เติมเตรตน้ำหมักจากข้อ 5 ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ จน pH ขึ้นเป็น 4 เติมเตรตต่อจน pH ขึ้นเป็น 7 จดปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการเติมเตรตจาก pH 4 ถึง pH 7

การคำนวณ

1. คำนวณค่าความเป็นด่างของสารละลายตัวอย่างน้ำหมัก
ความเป็นด่างทั้งหมด (มิลลิกรัม CaCO_3 ต่อลิตร)

$$= \frac{[\text{ปริมาตรของกรดซัลฟูริกที่ใช้จน pH เป็น 4 (ลบ.ซม.)}] \times 0.1 \times 50 \times 1,000}{\text{ปริมาตรของน้ำหมัก (50 ลูกบาศก์เซนติเมตร)}}$$

$$= [\text{ปริมาตรของกรดซัลฟูริกที่ใช้จน pH เป็น 4 ลบ.ซม.}] \times 100$$

ความเป็นด่างของกรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัม CaCO_3 ต่อลิตร)

$$= \frac{[\text{ปริมาตรของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เปลี่ยน pH 4 เป็น 7}] \times 0.1 \times 50 \times 1,000}{\text{ปริมาตรของน้ำหมัก (50 ลูกบาศก์เซนติเมตร)}}$$

$$= [\text{ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เปลี่ยน pH 4 เป็น 7}] \times 100$$

การคำนวณหาปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย

1. ถ้าความเป็นด่างของกรดอินทรีย์ระเหยมากกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร
 $(\text{ปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหย}) = \text{ความเป็นด่างของกรดอินทรีย์ระเหย} \times 1.5$
2. ถ้าความเป็นด่างของกรดอินทรีย์ระเหยน้อยกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร
 $(\text{ปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหย}) = \text{ความเป็นด่างของกรดอินทรีย์ระเหย} \times 1.0$

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหย

อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหย

Shimadzu Gas Chromatography Model GC-14A

- Flame Ionization Detector (FID)
- อุณหภูมิคอลัมน์ 170 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิของ injector port 200 องศาเซลเซียส

ใช้ไนโตรเจนเป็น carrier gas ที่อัตราการไหล 50 มิลลิเมตรต่อนาที

การวิเคราะห์หาปริมาณของของแข็ง

ปริมาณของของแข็งทั้งหมด เป็นปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากการระเหยน้ำออกจากน้ำหนักทั้งหมด โดยน้ำหนักปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในถ้วยระเหย และนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ บ่อยๆให้เป็นนาเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งหาน้ำหนักของของแข็งในภาชนะนั้น เทียบหาปริมาณของของแข็งทั้งหมดซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. การเตรียมจานระเหย จานที่ใช้ต้องอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสประมาณ 1 ชั่วโมง บ่อยๆให้เป็นนาเดสิเคเตอร์ (desicator) แล้วชั่งหาน้ำหนัก

2. เลือกใช้ปริมาตรของน้ำตัวอย่างที่เหมาะสม โดยปกติใช้ 50 หรือ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. ค่อย ๆ รินน้ำตัวอย่างที่ต้องการหาปริมาณของของแข็งทั้งหมดลงในถ้วยระเหยที่ตั้งบนเครื่องอังไอน้ำ เมื่อไอน้ำระเหยออกหมด น้ำจางระเหยอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปลดอย่าให้เป็นในเตสิกเคเตอร์
4. ชั่งจางระเหยทันทีที่เป็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือน้ำหนักของสารทั้งหมด ซึ่งคำนวณเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณของของแข็งทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{\text{น้ำหนักของสารทั้งหมด (มก.)} \times 1,000}{\text{ปริมาตรของน้ำหมักตัวอย่าง (ลบ. ซม.)}}$$

ปริมาณของของแข็งระเหย เป็นปริมาณของสารที่สลายได้ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ ส่วนตะกอนที่เหลืออยู่ไม่สลายไปเรียกว่าปริมาณสารคงตัว ส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์

วิธีวิเคราะห์

1. น้ำจางระเหยที่วิเคราะห์หาปริมาณของของแข็งทั้งหมดแล้วเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 15-20 นาที) ปลดอย่าให้เป็นในเตสิกเคเตอร์
2. ชั่งจางระเหยทันทีที่เป็นลงที่อุณหภูมิห้อง จะได้น้ำหนักสารคงตัวที่เหลืออยู่ ซึ่งจะนำไปคำนวณหาปริมาณของของแข็งระเหย

การคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณสารคงตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)} &= \frac{\text{น้ำหนักสารคงตัว (มก.)} \times 1,000}{\text{ปริมาตรของน้ำหมักตัวอย่าง (ลบ. ซม.)}} \\ \text{ปริมาณสารระเหยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} &= \text{ปริมาณสารทั้งหมด} - \text{ปริมาณสารคงตัว} \\ &\quad (\text{มก./ล.}) \quad (\text{มก./ล.}) \end{aligned}$$

การวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ

โดยการวัดปริมาตรของน้ำที่ล้นออกมาเมื่อถูกแทนที่ด้วยก๊าซชีวภาพ

การวิเคราะห์คุณภาพของก๊าซชีวภาพ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์

Shimadzu Gas Chromatography Model GC-9A

- Thermal Conductivity Detector (TCD)
- 80/100 mesh Porapak N.Column
- อุณหภูมิคอลัมน์ 70 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิของ injector port 100 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิของ detector 120 องศาเซลเซียส

วิธีวิเคราะห์

เป็นการหาปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ โดยจะเก็บก๊าซจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน
โดยใช้หลอดแก้วรูปตัวยูต่อเข้าระหว่างถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนกับขวดเก็บก๊าซ ดังภาพประกอบ 5
แล้วนำก๊าซที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซมีเทนโดยวิธีทางเคมี ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ
ใช้ syringe ดูดเอาก๊าซตัวอย่างจากหลอดแก้วรูปตัวยูฉีดเข้าไปยัง injector port ก๊าซตัวอย่าง
จะถูกส่งผ่านเข้าไปในคอลัมน์ซึ่งสามารถแยกก๊าซออกจากกันโดยมีฮีเลียม (He) เป็น carrier gas
และก๊าซที่แยกได้จะเคลื่อนออกจากคอลัมน์ผ่านเข้าไปใน detector และส่งสัญญาณไปยัง recorder
บันทึกเป็น peak ของโครมาโตแกรมและบอกค่าก๊าซที่แยกได้เป็นร้อยละของก๊าซทั้งหมด โดย peak
แรกเป็นอากาศ ต่อไปคือก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ

บทที่ 3

ผลการวิจัย

1. ผลของระยะเวลาเก็บกักต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์

หมักกากมะเขือเทศเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์ตามวิธีการวิจัยในบทที่ 2 โดยให้มีระยะเวลาเก็บกักนาน 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน หลังจากทำการทดลองนานประมาณ 1 เดือน นำน้ำหมักที่ได้มากรอง และวิเคราะห์หาค่าชีโรดี กรดอินทรีย์ระเหย pH และค่าความเป็นด่าง พบว่าเมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น ชีโรดี กรดอินทรีย์ระเหย และ การย่อยสลายอินทรีย์สารจะสูงขึ้นตามลำดับ คือ ที่ระยะเวลาเก็บกักนาน 3 วัน จะมีการย่อยสลายอินทรีย์สารในรูปของร้อยละของของแข็งทั้งหมด และร้อยละของของแข็งระเหยเท่ากับ 19.89 และ 24.23 ที่ระยะเวลาเก็บกักนาน 5 วัน เท่ากับ 22.42 และ 27.56 ที่ระยะเวลาเก็บกักนาน 10 วัน เท่ากับ 50.87 และ 53.56 ตามลำดับ ปริมาณอินทรีย์สารในน้ำหมัก ที่ระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน เท่ากับ 1,470 2,058 และ 2,303 มิลลิกรัมชีโรดีต่อลิตร ตามลำดับ ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 720 991 และ 1,116 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเป็นด่างทั้งหมดเท่ากับ 91 128 และ 185 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมี pH อยู่ในช่วง 4.24 ถึง 4.34 ดังแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการหมักในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักต่าง ๆ กัน

SRT (วัน)	COD (มก./ลิตร)	กรดอินทรีย์ ระเหย (มก./ลิตร)	pH	ความเป็นด่าง ทั้งหมด (มก./ลิตร)	การจัดอินทรีย์สาร	
					ร้อยละของของแข็ง ทั้งหมด	ร้อยละของของแข็ง ระเหย
3	1,470	720	4.26	91	19.89	24.23
5	2,058	991	4.24	128	22.42	27.56
10	2,303	1,116	4.34	185	50.87	53.56

2. ผลของระยะเวลาเก็บกักในขั้นตอนผลิตกรดอินทรีย์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อใช้ระยะเวลาเก็บกักในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนต่าง ๆ กัน

นำน้ำหมักที่กรองได้จากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์จากผลการวิจัยข้อ 1 เป็นวัตถุดิบสำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน โดยทำการหมักเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทน ตามวิธีการวิจัยในบทที่ 2 ให้มีระยะเวลาเก็บกักนาน 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน ทำการทดลองนานประมาณ 1 เดือน จึงเริ่มเก็บน้ำหมักจากถังปฏิกรณ์มาวิเคราะห์ค่าซีโรดี กรดอินทรีย์ระเหย pH ค่าความเป็นด่าง และเก็บข้อมูลในการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ ผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้น้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักถากนาน 3 วัน เป็นวัตถุดิบ ในการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน โดยมีอัตราการบ่อนอินทรีย์สารเป็น 1.74 0.69 และ 0.35 กรัมซีโรดีต่อวัน ปริมาณก๊าซชีวภาพจะลดลงจาก 0.297 เป็น 0.153 และ 0.072 ลิตรต่อวัน มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 ร้อยละ 97.42 84.71 และ 96.01 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.17 0.22 และ 0.21 ลิตรต่อกรัมซีโรดีที่เติม หรือ เท่ากับ 0.30 0.28 และ 0.26 ลิตรต่อกรัมซีโรดีที่ถูกทำลาย การขจัดอินทรีย์สารในรูปของซีโรดีเท่ากับร้อยละ 56.45 78.12 และ 83.66 การขจัดกรดอินทรีย์ระเหยจะเป็นร้อยละ 55.58 72.86 และ 81.43 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 3

ตาราง 3 ผลของการใช้น้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน ต่อการผลิตก๊าซมีเทน

พารามิเตอร์	HRT 2 วัน	HRT 5 วัน	HRT 10 วัน
ปริมาณก๊าซชีวภาพ(ลิตร/วัน)	0.297	0.153	0.072
ปริมาณก๊าซชีวภาพ(ลิตร/ลิตร/วัน)	0.074	0.038	0.018
ร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH ₄ +CO ₂	97.42	84.71	96.01
ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร/กรัมชีโรดีที่เติม)	0.17	0.22	0.21
(ลิตร/กรัมชีโรดีที่ถูกทำลาย)	0.30	0.28	0.26
pH	6.98	7.00	7.01
ค่าความเป็นด่าง (มก./ลิตร)	571	578	644
COD reduction (ร้อยละ)	56.45	78.12	83.66
TVA reduction (ร้อยละ)	55.58	72.86	81.43

เมื่อใช้น้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 5 วันเป็นวัตถุดิบในการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน โดยมีอัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 2.09 0.84 และ 0.42 กรัมชีโรดีต่อวัน ปริมาณก๊าซชีวภาพจะลดลงจาก 0.462 เป็น 0.239 และ 0.162 ลิตรต่อวัน มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH₄ และ CO₂ ร้อยละ 95.50 93.67 และ 95.05 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.22 0.28 และ 0.38 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่เติม หรือ เท่ากับ 0.34 0.36 และ 0.45 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่ถูกทำลาย การขจัดอินทรีย์สารในรูปของชีโรดีเท่ากับร้อยละ 65.66 80.31 และ 86.68 การขจัดกรดอินทรีย์ประเภทยจะเป็นร้อยละ 49.32 73.40 และ 78.07 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 ผลของการใช้น้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน ต่อการผลิตก๊าซมีเทน

พารามิเตอร์	HRT 2 วัน	HRT 5 วัน	HRT 10 วัน
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/วัน)	0.462	0.239	0.162
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/ลิตร/วัน)	0.116	0.060	0.040
ร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH ₄ +CO ₂	95.50	93.67	95.05
ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร/กรัมชีโรดีที่เติม)	0.22	0.28	0.38
(ลิตร/กรัมชีโรดีที่ถูกทำลาย)	0.34	0.36	0.45
pH	6.96	7.00	7.01
ค่าความเป็นด่าง (มก./ลิตร)	685	748	772
COD reduction (ร้อยละ)	65.66	80.31	86.68
TVA reduction (ร้อยละ)	49.32	73.40	78.07

เมื่อใช้น้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 10 วันเป็นวัตถุดิบในการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน โดยมีอัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 2.61 1.04 และ 0.52 กรัมชีโรดีต่อวัน ปริมาณก๊าซชีวภาพจะลดลงจาก 0.674 เป็น 0.446 และ 0.244 ลิตรต่อวัน มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH₄ และ CO₂ ร้อยละ 92.21 93.74 และ 95.77 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.26 0.43 และ 0.47 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่เติม หรือ เท่ากับ 0.55 0.59 และ 0.55 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่ถูกทำลาย การจัดอินทรีย์สารในรูปของชีโรดีเท่ากับร้อยละ 46.67 72.86 และ 85.89 การจัดกรดอินทรีย์ระเหยจะเป็นร้อยละ 18.10 61.20 และ 82.42 ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 5

ตาราง 5 ผลของการใช้น้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน ต่อการผลิตก๊าซมีเทน

พารามิเตอร์	HRT 2 วัน	HRT 5 วัน	HRT 10 วัน
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/วัน)	0.674	0.446	0.244
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/ลิตร/วัน)	0.169	0.112	0.061
ร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซผสม			
ระหว่าง CH_4+CO_2	92.21	93.74	95.77
ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร/กรัมชีโรดิที่เติม)	0.26	0.43	0.47
(ลิตร/กรัมชีโรดิที่ถูกทำลาย)	0.55	0.59	0.55
pH	6.97	7.03	7.00
ค่าความเป็นด่าง (มก./ลิตร)	873	972	1,049
COD reduction (ร้อยละ)	46.67	72.86	85.89
TVA reduction (ร้อยละ)	18.10	61.20	82.42

จากตาราง 3 4 และ 5 พบว่าน้ำหมักที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนในการทดลองนี้ จะมี pH ก่อนเข้าถังหมักในช่วง 6.97 ถึง 7.03 ปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 68.76 ถึง 80.85 และ ค่าความเป็นด่างอยู่ในช่วง 571 ถึง 1,049 มิลลิกรัมต่อลิตร

จะเห็นว่าเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารต่ำ และมีระยะเวลาเก็บกักนาน การขจัดอินทรีย์สารในรูปของชีโรดิ และการขจัดกรดอินทรีย์ระเหยจะสูง แต่ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะต่ำ แต่ถ้าวัดอัตราการป้อนอินทรีย์สารสูง ระยะเวลาเก็บกักต่ำ การขจัดอินทรีย์สารในรูปของชีโรดิ และการขจัดกรดอินทรีย์ระเหยจะต่ำ

เนื่องจากเมื่อนำน้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพจะให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงที่สุด องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพสูง การจัดอินทรีย์สารในรูปของชีโรดีและ กรดอินทรีย์ระเหยสูง ดังนั้นจึงเลือกใช้น้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน เป็นวัตถุดิบสำหรับป้อนในการทดลองในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนต่อไป

3. ผลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนต่อการผลิตก๊าซ

ชีวภาพ

นำน้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักนาน 10 วัน มาปรับความเข้มข้นของอินทรีย์สาร แล้วป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนแบบกึ่งต่อเนื่อง ปล่อยให้มีความอัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 0.2 0.5 และ 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน และระยะเวลาเก็บกักในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนนี้เป็น 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน ทำการทดลองนานประมาณ 1 เดือน จึงนำน้ำหมักที่ได้มาวิเคราะห์และแสดงผลในตาราง 6 7 และ 8

ตาราง 6 ผลของระยะเวลาเก็บกักเมื่อป้อนอินทรีย์สาร 0.2 กรัมชีโรดีต่อวัน ในขั้นตอนการผลิต
ก๊าซมีเทนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์	อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.2 กรัมชีโรดีต่อวัน		
	HRT 2 วัน	HRT 5 วัน	HRT 10 วัน
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/วัน)	0.051	0.102	0.112
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/ลิตร/วัน)	0.013	0.026	0.028
ร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซผสม			
ระหว่าง $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$	97.54	95.59	93.31
pH	6.97	6.92	6.97
ค่าความเป็นด่าง (มก./ลิตร)	230	410	666
COD influent (mg/l)	114.28	285.71	571.41
COD effluent (mg/l)	78.40	93.10	94.73
COD reduction (ร้อยละ)	31.39	67.41	83.42
TVA influent (mg/l)	55.48	138.71	277.42
TVA effluent (mg/l)	38.33	48.33	51.66
TVA reduction (ร้อยละ)	30.93	65.15	81.37
ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร/กรัมชีโรดีที่เติม)	0.26	0.51	0.56
(ลิตร/กรัมชีโรดีที่ถูกทำลาย)	0.81	0.76	0.67

ผลการทดลองในตาราง 6 แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.2 กรัมชีโรดีต่อวัน แล้วเมื่อหมักที่ระยะเวลาเก็บกักนานขึ้นจาก 2 วัน เป็น 5 วัน และ 10 วัน ปริมาตรของก๊าซชีวภาพจะสูงขึ้นจาก 0.051 เป็น 0.102 และ 0.112 ลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นจาก 0.26 เป็น 0.51 และ 0.56 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่เติม หรือ เท่ากับ 0.81 0.76 และ 0.67 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่ถูกทำลาย การขจัดอินทรีย์สารในรูปชีโรดีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 31.39 เป็น 67.41 และ 83.42 การขจัดกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มจากร้อยละ 30.93 เป็น 65.15 และ 81.37 ค่า pH ของน้ำหมักที่ออกจากถังปฏิกรณ์เท่ากับ 6.97 6.92 และ 6.97 องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เท่ากับร้อยละ 97.54 95.57 และ 93.31 ค่าความเป็นด่างเท่ากับ 230 410 และ 666 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

ตาราง 7 ผลของระยะเวลาเก็บกักเมื่อบีโตนอินทรีย์สาร 0.5 กรัมชีโรดีต่อวัน ในขั้นตอนการผลิต
ก๊าซมีเทนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์	อัตราการบีโตนอินทรีย์สาร 0.5 กรัมชีโรดีต่อวัน		
	HRT 2 วัน	HRT 5 วัน	HRT 10 วัน
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/วัน)	0.166	0.227	0.248
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/ลิตร/วัน)	0.042	0.057	0.062
ร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซผสม			
ระหว่าง $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$	95.87	95.87	90.69
pH	7.02	6.99	7.09
ค่าความเป็นด่าง (มก./ลิตร)	323	624	1,084
COD influent (mg/l)	285.71	714.28	1,428.50
COD effluent (mg/l)	101.36	136.22	176.40
COD reduction (ร้อยละ)	64.52	80.92	87.65
TVA influent (mg/l)	138.38	345.95	691.91
TVA effluent (mg/l)	54.99	75.00	90.00
TVA reduction (ร้อยละ)	60.26	78.32	86.99
ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ			
(ลิตร/กรัมชีโรดีที่เติม)	0.33	0.45	0.50
(ลิตร/กรัมชีโรดีที่ถูกทำลาย)	0.51	0.56	0.57

ผลการทดลองในตาราง 7 เมื่อใช้อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.5 กรัมชีโรดีต่อวัน และระยะเวลาเก็บกักเพิ่มจาก 2 วัน เป็น 5 วัน และ 10 วัน ปริมาตรของก๊าซชีวภาพ ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ การจัดอินทรีย์สารในรูปชีโรดี การจัดการอินทรีย์ระเหยจะสูงขึ้นด้วย คือ ปริมาตรก๊าซชีวภาพเพิ่มจาก 0.166 เป็น 0.227 และ 0.248 ลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มจาก 0.33 เป็น 0.45 และ 0.50 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่เติม หรือ เท่ากับ 0.51 0.56 และ 0.57 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่ถูกทำลาย การจัดอินทรีย์สารในรูปชีโรดี เพิ่มจากร้อยละ 64.52 เป็น 80.92 และ 87.65 การจัดการอินทรีย์ระเหยเพิ่มจากร้อยละ 60.26 เป็น 78.32 และ 86.99 องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เท่ากับร้อยละ 95.87 95.87 และ 90.69 ค่าความเป็นด่างเท่ากับ 323 624 และ 1,084 pH ของน้ำหมักที่ออกมาเท่ากับ 7.02 6.99 และ 7.09 ตามลำดับ

ตาราง 8 ผลของระยะเวลาเก็บกักเมื่อบีโอมินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน ในขั้นตอนการผลิต
ก๊าซมีเทนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์	อัตราการบิโอมินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน		
	HRT 2 วัน	HRT 5 วัน	HRT 10 วัน
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/วัน)	0.249	0.306	0.415
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/ลิตร/วัน)	0.062	0.077	0.104
ร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซผสม			
ระหว่าง $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$	94.10	92.24	86.23
pH	6.99	7.02	7.20
ค่าความเป็นด่าง (มก./ลิตร)	392	837	1,626
COD influent (mg/l)	457.14	1,142.85	2,285.71
COD effluent (mg/l)	156.29	271.46	308.70
COD reduction (ร้อยละ)	65.81	76.25	86.49
TVA influent (mg/l)	222.56	556.41	1105.71
TVA effluent (mg/l)	78.50	108.83	139.99
TVA reduction (ร้อยละ)	64.71	80.42	87.33
ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ			
(ลิตร/กรัมชีโรดีที่เติม)	0.32	0.38	0.52
(ลิตร/กรัมชีโรดีที่ถูกทำลาย)	0.48	0.51	0.60

ผลการทดลองในตาราง 8 เมื่อใช้อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน ได้ผลการทดลองที่สอดคล้องกันกับ ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 0.2 และ 0.5 กรัมชีโรดีต่อวัน คือ เมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บกักจาก 2 วัน เป็น 5 วัน และ 10 วัน ปริมาตรของก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นจาก 0.249 เป็น 0.306 และ 0.415 ลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นจาก 0.32 เป็น 0.38 และ 0.52 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่เติม หรือ เท่ากับ 0.48 0.51 และ 0.60 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่ถูกทำลาย การขจัดอินทรีย์สารในรูปชีโรดีเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 65.81 เป็น 76.25 และ 86.49 การขจัดกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 64.71 เป็น 80.42 และ 87.33 องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เท่ากับร้อยละ 94.10 92.24 และ 86.23 ค่าความเป็นด่างเท่ากับ 392 837 และ 1,626 มิลลิกรัมต่อลิตร และ pH ของน้ำหมักที่ออกมาเท่ากับ 6.99 7.02 และ 7.20 ตามลำดับ

จากผลการทดลองในตาราง 6 7 และ 8 พบว่าประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ และปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน และ 10 วัน ให้ผลการทดลองใกล้เคียงกันจึงได้ทำการทดลองต่อไป โดยเพิ่มอัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 1.0 และ 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน และใช้ระยะเวลาเก็บกักเป็น 2 วัน และ 5 วัน เท่านั้น

ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมชีโรดีต่อวัน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน พบว่า ปริมาตรก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นจาก 0.215 เป็น 0.267 ลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.21 และ 0.27 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่เติม หรือเท่ากับ 0.57 และ 0.28 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่ถูกทำลาย องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เท่ากับ 96.22 และ 92.27 การขจัดอินทรีย์สารในรูปชีโรดีเท่ากับร้อยละ 65.96 และ 66.20 การขจัดกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับร้อยละ 65.86 และ 81.36 ค่าความเป็นด่างเท่ากับ 432 และ 948 มิลลิกรัมต่อลิตร pH ของน้ำหมักที่ออกมาจากถังปฏิกรณ์เท่ากับ 6.99 และ 7.04 ตามลำดับ แสดงในตาราง 9

ตาราง 9 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมชีโรดีต่อวัน ต่อขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน

พารามิเตอร์	อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมชีโรดีต่อวัน	
	HRT 2 วัน	HRT 5 วัน
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/วัน)	0.215	0.267
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/ลิตร/วัน)	0.054	0.067
ร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซผสม		
ระหว่าง $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$	96.22	92.27
pH	6.99	7.04
ค่าความเป็นด่าง (มก./ลิตร)	432	948
COD influent (mg/l)	571.43	1428.57
COD effluent (mg/l)	194.52	482.83
COD reduction (ร้อยละ)	65.96	66.20
TVA influent (mg/l)	276.77	691.91
TVA effluent (mg/l)	94.50	129.00
TVA reduction (ร้อยละ)	65.86	81.36
ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ		
(ลิตร/กรัมชีโรดีที่เติม)	0.21	0.27
(ลิตร/กรัมชีโรดีที่ถูกทำลาย)	0.57	0.28

ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน พบว่า เมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น ปริมาตรก๊าซชีวภาพ ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ การจัดอินทรีย์สารในรูปชีโรดี และการจัดการคอินทรีย์ระเหยจะสูงขึ้นด้วย คือที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.456 และ 0.528 ลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.30 และ 0.35 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่เติม หรือ เท่ากับ 0.44 และ 0.45 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่ถูกทำลาย การจัดอินทรีย์สารในรูปชีโรดีเท่ากับร้อยละ 69.57 และ 79.54 การจัดการคอินทรีย์ระเหยเท่ากับร้อยละ 67.84 และ 80.13 ตามลำดับ องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เท่ากับร้อยละ 91.26 และ 90.17 ค่าความเป็นด่างเท่ากับ 600 และ 1,332 มิลลิกรัมต่อลิตร และ pH ของน้ำหมักที่ออกจากถังปฏิกรณ์เฉลี่ยเท่ากับ 7.04 และ 7.10 ตามลำดับ ดังผลการทดลองในตาราง 10

ตาราง 10 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมชีโรดีต่อวันต่อขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน

พารามิเตอร์	อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน	
	HRT 2 วัน	HRT 5 วัน
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/วัน)	0.456	0.528
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/ลิตร/วัน)	0.114	0.132
ร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซผสม		
ระหว่าง $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$	91.26	90.17
pH	7.04	7.10
ค่าความเป็นต่าง (มก./ลิตร)	600	1,332
COD influent (mg/l)	857.14	2142.86
COD effluent (mg/l)	260.83	438.39
COD reduction (ร้อยละ)	69.57	79.54
TVA influent (mg/l)	415.15	1037.89
TVA effluent (mg/l)	133.50	206.25
TVA reduction (ร้อยละ)	67.84	80.13
ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ		
(ลิตร/กรัมชีโรดีที่เติม)	0.30	0.35
(ลิตร/กรัมชีโรดีที่ถูกทำลาย)	0.44	0.45

จากผลการทดลองในตารางที่ 6 7 8 9 และ 10 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารคงที่ ปริมาตรก๊าซชีวภาพ ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพต่อกรัมชีโรดีที่เติม การขจัดอินทรีย์สารในรูปชีโรดี และการขจัดกรดอินทรีย์ระเหย จะสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น และเมื่อระยะเวลาเก็บกักคงที่ แต่อัตราการป้อนอินทรีย์สารสูงขึ้น อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะสูงขึ้นด้วย ดังผลสรุปในตาราง 11

ตาราง 11 ผลของระยะเวลาเก็บกัก และอัตราการไหลเวียนขึ้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์	HRT 2 วัน			HRT 5 วัน			HRT 10 วัน			HRT 2 วัน			HRT 5 วัน		
	OLR (กรัมชีโอดี/วัน)			OLR (กรัมชีโอดี/วัน)			OLR (กรัมชีโอดี/วัน)			OLR (กรัมชีโอดี/วัน)			OLR (กรัมชีโอดี/วัน)		
	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8	0.2	0.5	0.8
ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	0.051	0.166	0.219	0.102	0.227	0.306	0.112	0.248	0.415	0.215	0.456	0.267	0.528	0.132	0.132
ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร/ลิตร/วัน)	0.013	0.042	0.062	0.026	0.057	0.077	0.028	0.062	0.104	0.054	0.114	0.067	0.132	0.132	0.132
ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร/กรัมชีโอดีที่เติม)	0.26	0.33	0.32	0.51	0.45	0.38	0.56	0.50	0.52	0.21	0.30	0.27	0.35	0.35	0.35
(ลิตร/กรัมชีโอดีที่ถูกลำลาย)	0.81	0.51	0.48	0.75	0.56	0.51	0.67	0.57	0.60	0.57	0.44	0.28	0.45	0.45	0.45
COD reduction (ร้อยละ)	31.39	64.52	65.81	67.41	80.92	76.25	83.42	87.65	86.49	65.96	69.57	66.20	79.54	79.54	79.54
TVA reduction (ร้อยละ)	30.93	60.26	64.71	65.15	78.32	80.42	81.37	86.99	87.33	65.86	67.84	81.36	80.13	80.13	80.13

4. การใช้สารตัวกลางของจุลินทรีย์ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน

นำน้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน มาวิเคราะห์หาปริมาณและชนิดของสารตัวกลางก่อนป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน ศึกษาในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 1.0 และ 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน หลังจากทดลองนานประมาณ 1 เดือน น้ำหมักที่ถ่ายจากถังปฏิกรณ์มาวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของสารตัวกลางที่เหลืออยู่ เพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของสารตัวกลางที่ถูกใช้ไปในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน ผลการทดลองพบว่า ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สารต่างๆ ยกเว้นที่ 1.0 กรัมชีโรดีต่อวัน การขจัดอินทรีย์สารที่ใช้ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน จะสูงกว่าที่ใช้ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน สารตัวกลางที่ได้จากขั้นตอนแรกและใช้เป็นขั้วสเตรทสำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน คือ เอทานอล กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และ กรดบิวทริก จะถูกใช้ไปในช่วงร้อยละ 85 ถึง 100 ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน จะให้ก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 0.132 ลิตรต่อลิตรต่อวัน โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 อยู่ร้อยละ 90.17 การขจัดอินทรีย์สารในรูปของชีโรดีเท่ากับร้อยละ 79.54 สารตัวกลางที่ได้จากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์คือ เอทานอล กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และ กรดบิวทริก ซึ่งจะถูกใช้ไปเฉลี่ยร้อยละ 91.95 87.68 85.69 และ 91.60 ตามลำดับ จะเห็นว่าอัตราการป้อนอินทรีย์สาร และระยะเวลาเก็บกักในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนนี้ไม่มีผลต่อชนิดและปริมาณของสารตัวกลางต่าง ๆ ที่ถูกใช้ไป ดังผลแสดงในตาราง 12

ตาราง 12 การใช้สารตัวกลางต่าง ๆ ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนจากกากมะเขือเทศ

อัตราการป้อนอินทรีย์สาร (กรัมชีโรดีต่อวัน)	0.8		1.0		1.5	
ระยะเวลาเก็บกัก(วัน)	2	5	2	5	2	5
การจัดอินทรีย์สารในรูป ชีโรดี (ร้อยละ)	66.03	76.79	65.96	66.20	69.57	79.54
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อลิตรต่อวัน)	0.051	0.054	0.054	0.067	0.114	0.132
ปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซ ผสมระหว่าง $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$ (ร้อยละ)	94.43	94.25	96.22	92.27	91.26	90.17
สารตัวกลางที่ถูกใช้ไป (ร้อยละ)						
เอทานอล	100.00	95.60	98.33	100.00	95.75	91.95
กรดอะซิติก	95.01	95.65	92.68	88.83	86.60	87.68
กรดไพรูวอิก	94.59	95.63	94.83	90.06	88.95	85.69
กรดบิวทริก	96.77	98.35	98.05	94.75	95.18	91.60

การศึกษาความสามารถของจุลินทรีย์ในการใช้ขับสเตรทต่างๆ เพื่อผลิตก๊าซมีเทน

การศึกษากิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนที่ใช้ในการทดลองนี้ โดยเก็บเชื้อจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักกากมะเขือเทศที่สภาวะต่าง ๆ กันคือ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 1.0 และ 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน มาทดสอบความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายขับสเตรทต่างๆ คือ เอธานอลเข้มข้นร้อยละ 0.1 (ปริมาตรต่อปริมาตร) กรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 0.1 (ปริมาตรต่อปริมาตร) เบปโตนเข้มข้นร้อยละ 0.1 (น้ำหนักต่อปริมาตร) กลูโคสเข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 1.0 (น้ำหนักต่อปริมาตร) โดยทำการทดลองตามวิธีการวิจัยในบทที่ 2 ผลการทดลองพบว่า จุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ที่มีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน สามารถใช้เอธานอล กรดอะซิติก เบปโตน และ กลูโคสเข้มข้นร้อยละ 0.1 เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบเฉลี่ยร้อยละ 32.06 54.60 56.24 และ 35.57 (ผลการศึกษาพบก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 60.70 81.37 77.86 และ 60.44) เมื่อระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน ก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 18.63 57.07 44.08 และ 6.80 (ผลการศึกษาพบก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 64.80 85.56 68.76 และ 14.12)ตามลำดับ

เมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมชีโรดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน สามารถใช้เอธานอล กรดอะซิติก เบปโตน และ กลูโคสเข้มข้นร้อยละ 0.1 เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบเฉลี่ยร้อยละ 10.37 44.44 46.81 และ 17.21 (ผลการศึกษาพบก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 36.60 81.98 72.95 และ 47.05) เมื่อระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน ก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 7.48 38.28 51.29 และ 19.88 (ผลการศึกษาพบก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 37.79 77.78 70.86 และ 46.70 ตามลำดับ

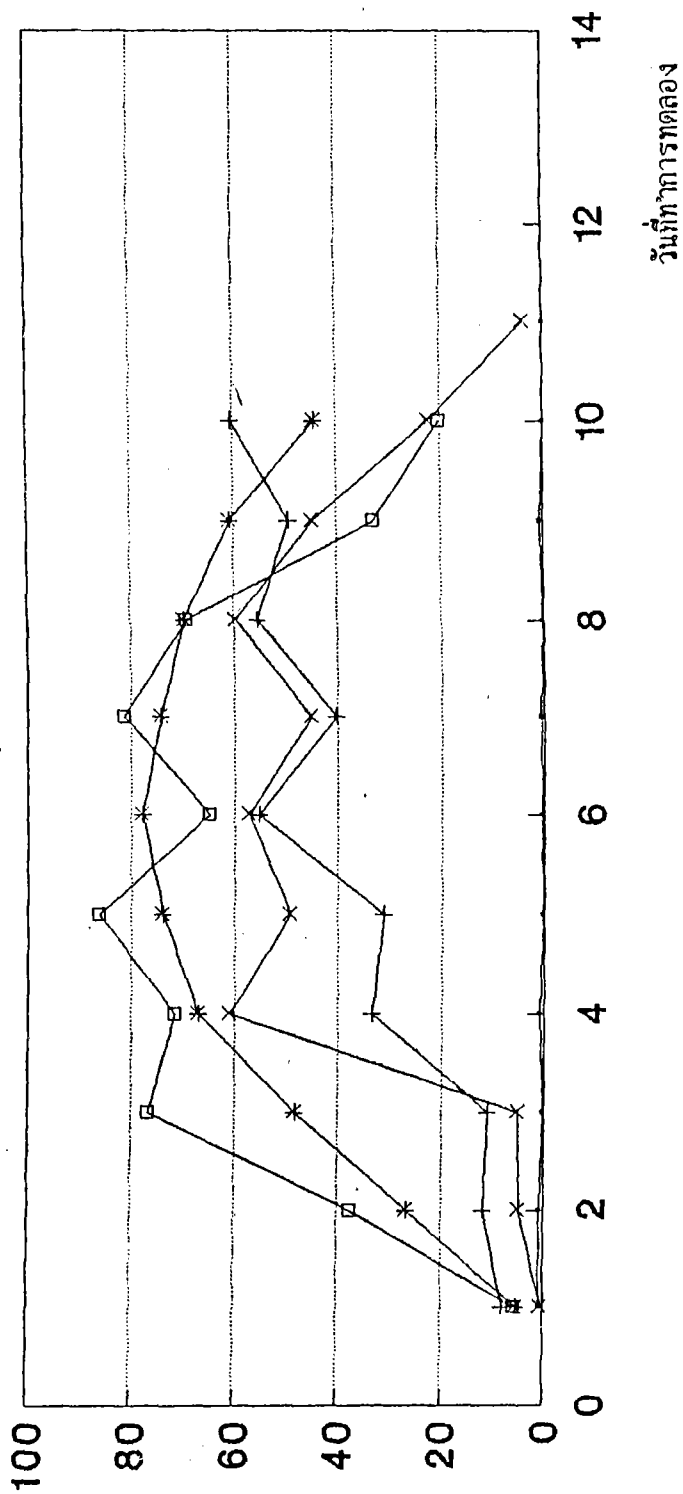
เมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน สามารถใช้เอธานอล กรดอะซิติก เบปโตน และ กลูโคสเข้มข้นร้อยละ 0.1 เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบเฉลี่ยร้อยละ 39.97 49.28 59.04 และ 38.27 (ผลการศึกษาพบก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 78.78 78.96 80.11 และ 62.69) ที่ระยะเวลา

เก็บกัก 5 วัน ก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 22.09 44.54 50.44 และ 13.32 (ผลการศึกษาก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับร้อยละ 64.25 89.62 77.50 และ 60.76) ตามลำดับ (ในการทดลองนี้ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้เป็นก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่างอากาศ CH_4 และ CO_2) ผลการทดลองแสดงในตาราง 13 และ ภาพประกอบ 4 ถึง 9

ตาราง 13 ปริมาตรร้อยละของก๊าซมีเทนเมื่อจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนใช้ขั้วสเตรทต่างๆ

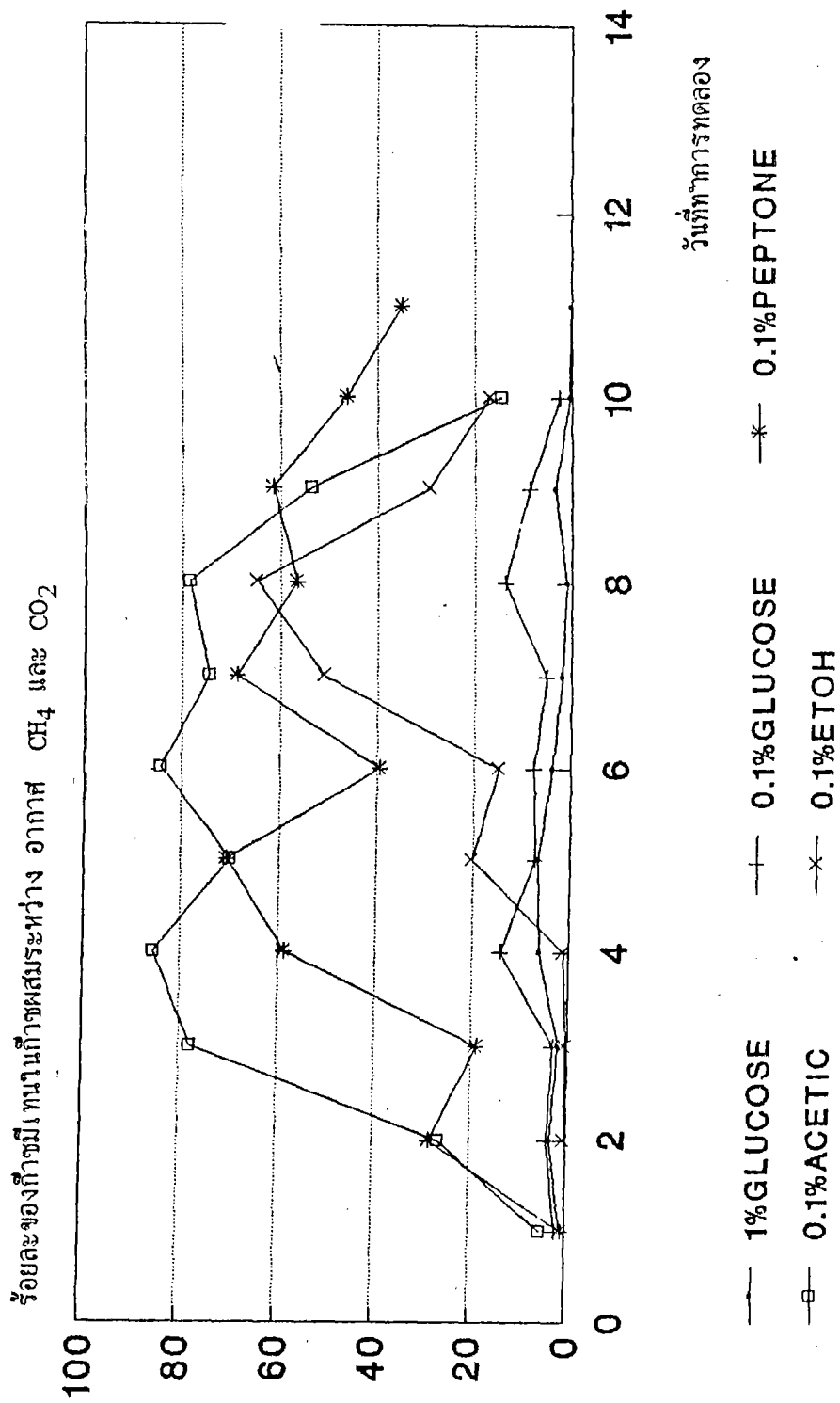
ปริมาณร้อยละของก๊าซมีเทน ในก๊าซผสมระหว่าง อากาศ CH_4 และ CO_2 เมื่อใช้	สถานะของถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนที่นำจุลินทรีย์มาใช้ในการศึกษา					
	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน			ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน		
	อัตราการบ่อนอินทรีย์สาร (กรัมชีโรดี/วัน)			อัตราการบ่อนอินทรีย์สาร (กรัมชีโรดี/วัน)		
	0.8	1.0	1.5	0.8	1.0	1.5
- เอธานอล	32.06	10.37	39.97	18.63	7.48	22.09
- กรดอะซิติก	54.60	44.44	49.28	57.07	38.28	44.54
- เปปโตน	56.24	46.81	59.04	44.08	51.29	50.44
- กลูโคส	35.57	17.21	38.27	6.80	19.88	13.32

ร้อยละของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นระหว่างอากาศ CH_4 และ CO_2



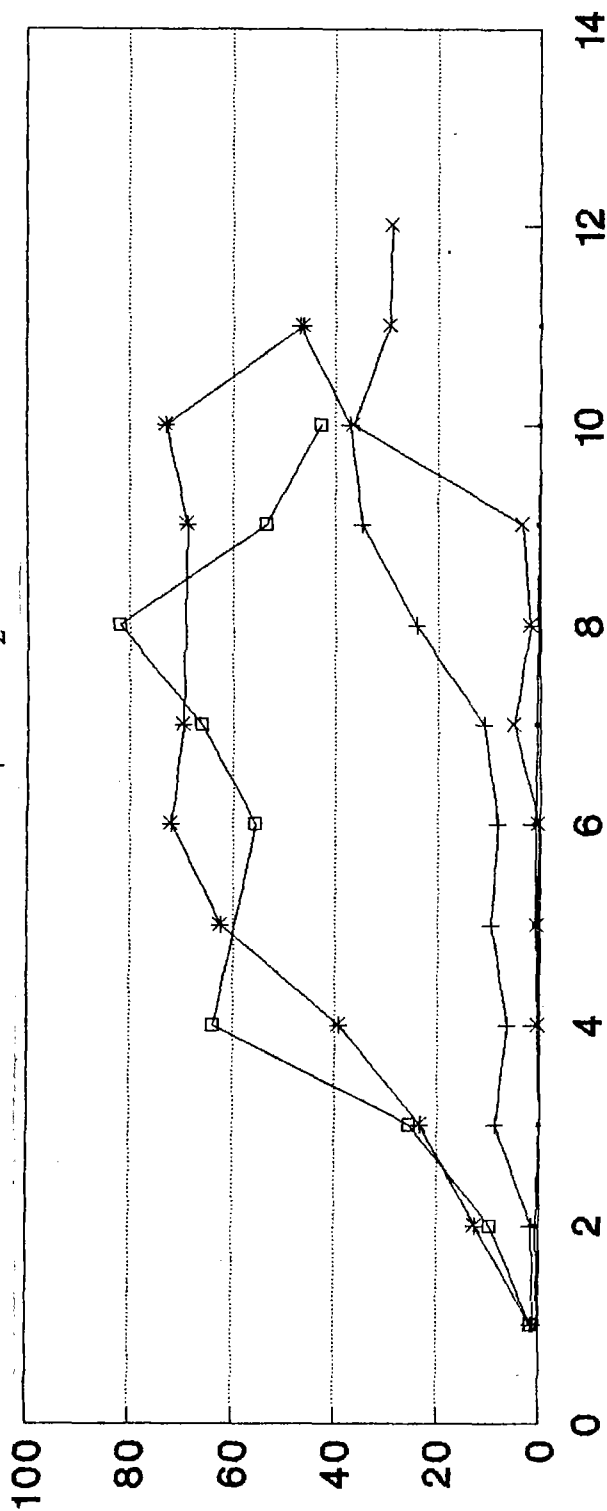
— 1% GLUCOSE — 0.1% GLUCOSE —*— 0.1% PEPTONE
 —□— 0.1% ACETIC —x— 0.1% ETOH

ภาพประกอบ 4 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากซับสเตรตต่าง ๆ ที่ระยะ
 เวลาเก็บกัก 2 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีวจิตต่อวัน



ภาพประกอบ 5 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากวัสดุต่าง ๆ ที่ระยะ
เวลาเก็บกัก 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีรอตต่อวัน

ร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง อากาศ CH_4 และ CO_2

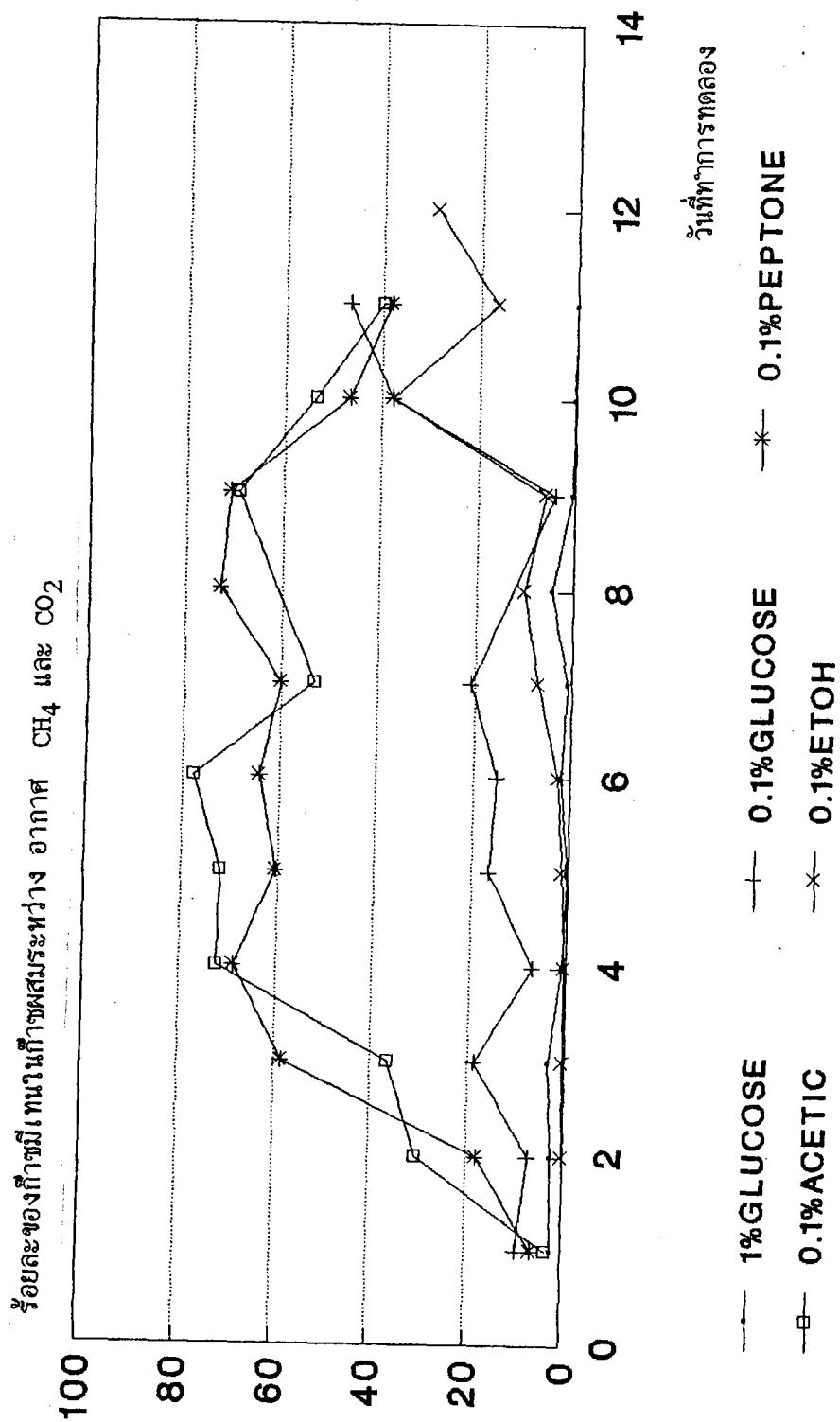


วันที่ทำการทดลอง

—+— 1% GLUCOSE —+— 0.1% GLUCOSE —*— 0.1% PEPTONE
 —□— 0.1% ACETIC —x— 0.1% ETOH

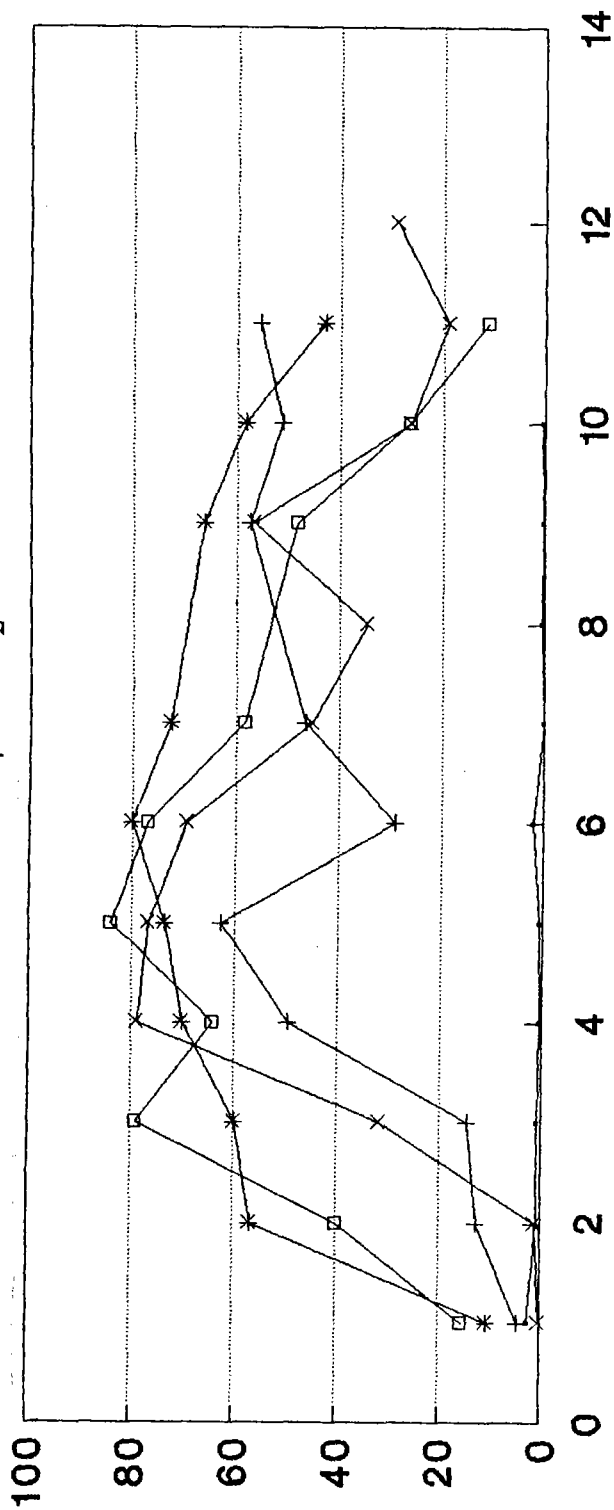
ภาพประกอบ 6 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากสับسترต่าง ๆ ที่ระยะ

เวลาเก็บกัก 2 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมชีโรดิตต่อวัน



ภาพประกอบ 7 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากวัสดุสเตรต่าง ๆ ที่ระยะ
เวลาเก็บกัก 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมชีโรดีต่อวัน

ร้อยละก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง อากาศ CH_4 และ CO_2

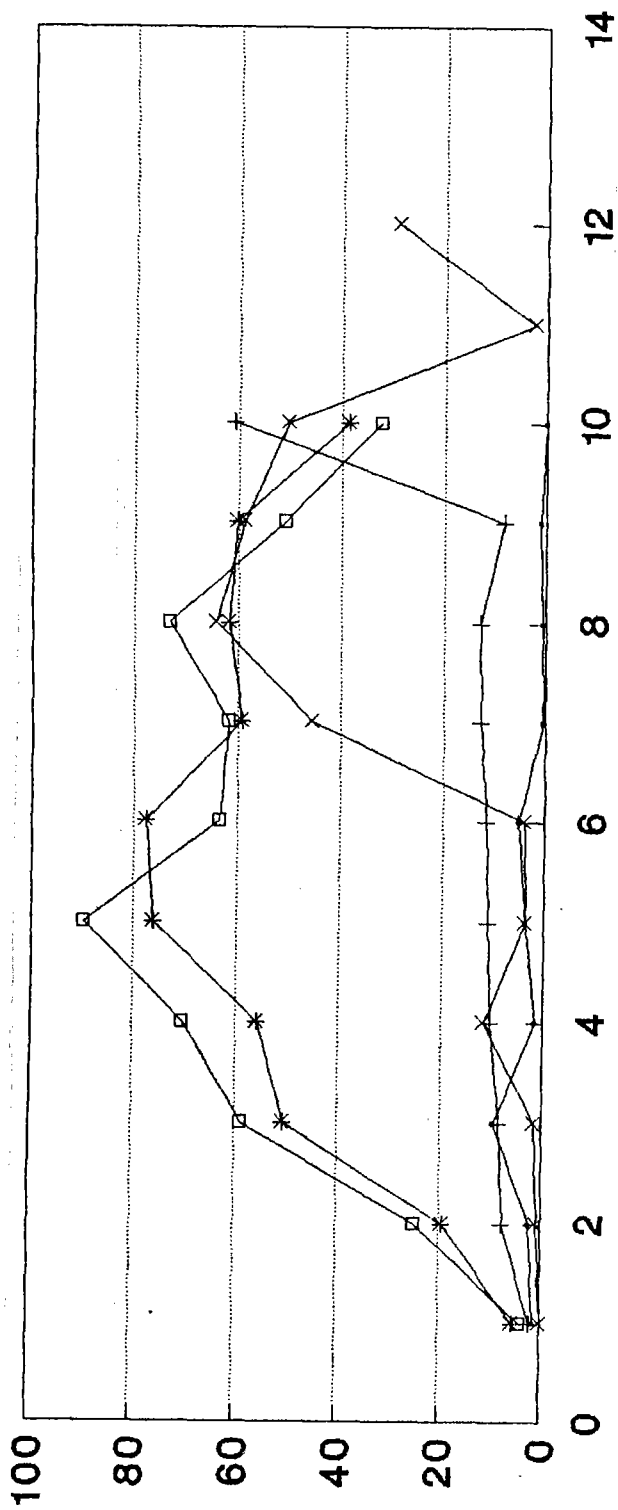


วันที่ทำการทดลอง

— 1% GLUCOSE — 0.1% GLUCOSE —*— 0.1% PEPTONE
 —□— 0.1% ACETIC —x— 0.1% ETOH

ภาพประกอบ 8 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากซับสเตรตต่าง ๆ ที่ระยะ
 เวลาเก็บกัก 2 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมชีโรดิตต่อวัน

ร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง อากาศ CH_4 และ CO_2



วันที่ทำการทดลอง

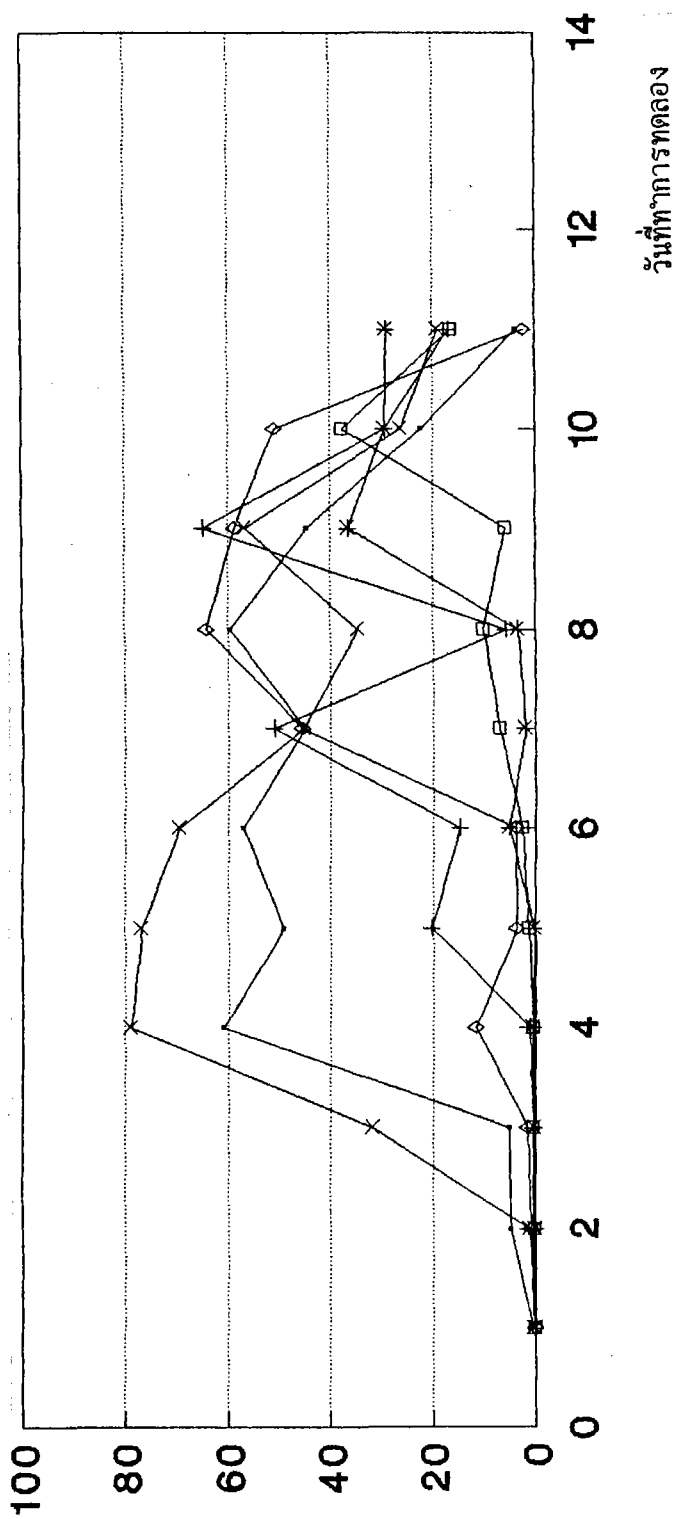
1% GLUCOSE 0.1% GLUCOSE 0.1% PEPTONE
 0.1% ACETIC 0.1% ETOH

ภาพประกอบ 9 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากคาร์โบไฮเดรตต่าง ๆ ที่ระยะ
เวลาเก็บกัก 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมชีโรดิตต่อวัน

เปรียบเทียบความสามารถของจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์แต่ละถังในการผลิตก๊าซมีเทน เมื่อใช้สารอาหารชนิดเดียวกัน พบว่า จุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ที่ควบคุมให้มีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 และ 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน ใช้เอธานอลได้ดีในช่วงแรกของการทดลอง แต่ที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมชีโรดีต่อวัน และที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 1.0 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน สามารถใช้เอธานอลได้ดีในช่วงหลังของการทดลอง โดยในช่วงแรก ก๊าซที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบก๊าซมีเทนในปริมาณน้อยมาก เมื่อพิจารณาการใช้กรดอะซิติก และ เปปโตน พบว่าจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาสามารถใช้กรดอะซิติก และผลิตเป็นก๊าซมีเทนได้ดี สำหรับกลูโคส เข้มข้นร้อยละ 0.1 จุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ที่มีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 และ 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน จะใช้ผลิตเป็นก๊าซมีเทนได้ดีกว่าจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ที่มีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมชีโรดีต่อวัน และ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 1.0 และ 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 10 ถึง 13

อนึ่งจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้สามารถใช้กลูโคส เข้มข้นร้อยละ 1.0 ได้ในปริมาณน้อยมาก ในการเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซที่ได้ส่วนใหญ่เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แสดงดังภาพประกอบ 14

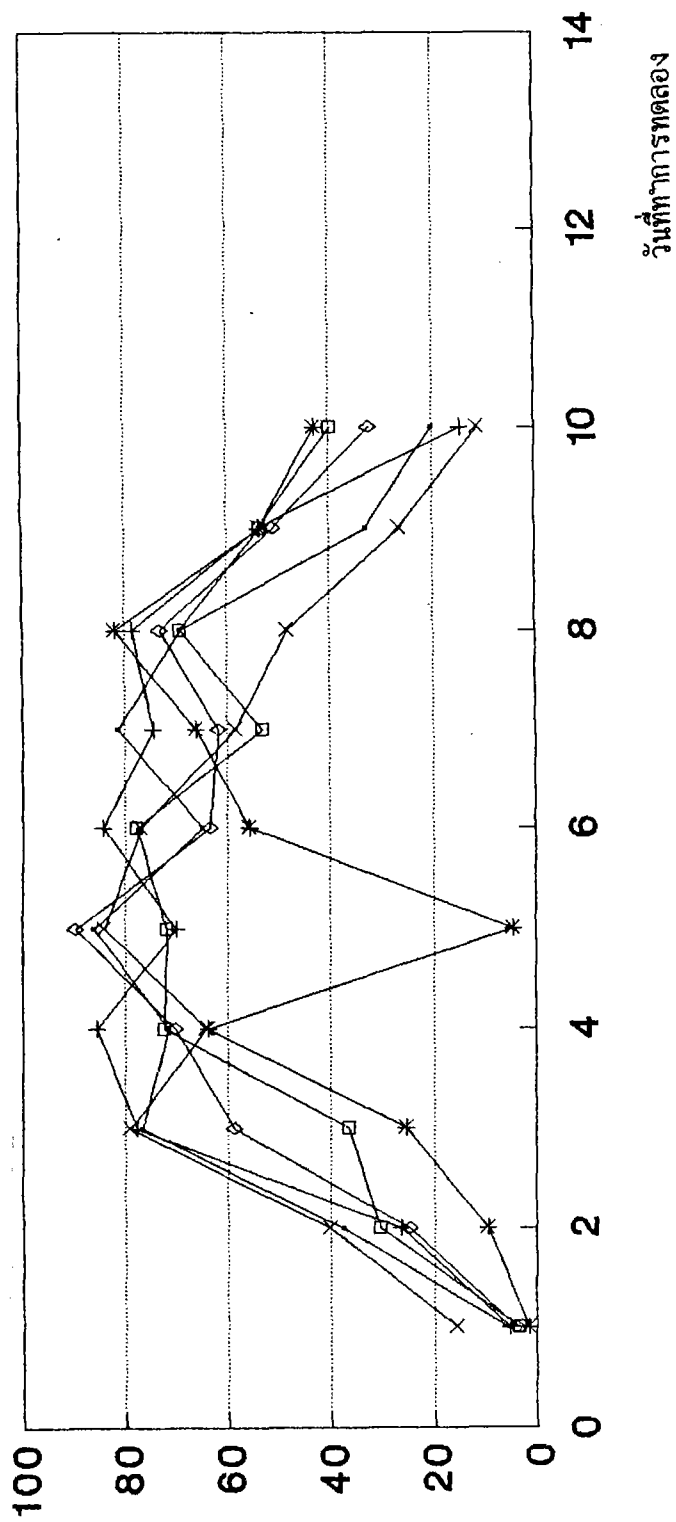
ร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง อากาศ CH_4 และ CO_2 •



—+— HRT2,OLR0.8gCOD/d —+— HRT5,OLR0.8gCOD/d *— HRT2,OLR1.0gCOD/d
 —□— HRT5,OLR1.0gCOD/d —x— HRT2,OLR1.5gCOD/d —◇— HRT5,OLR1.5gCOD/d

ภาพประกอบ 10 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากการใช้เอธานอลเข้มข้น
 ร้อยละ 0.1 ที่ระยะเวลาเก็บกัก และอัตราการบ่มอินทรีย์สารต่าง ๆ กัน

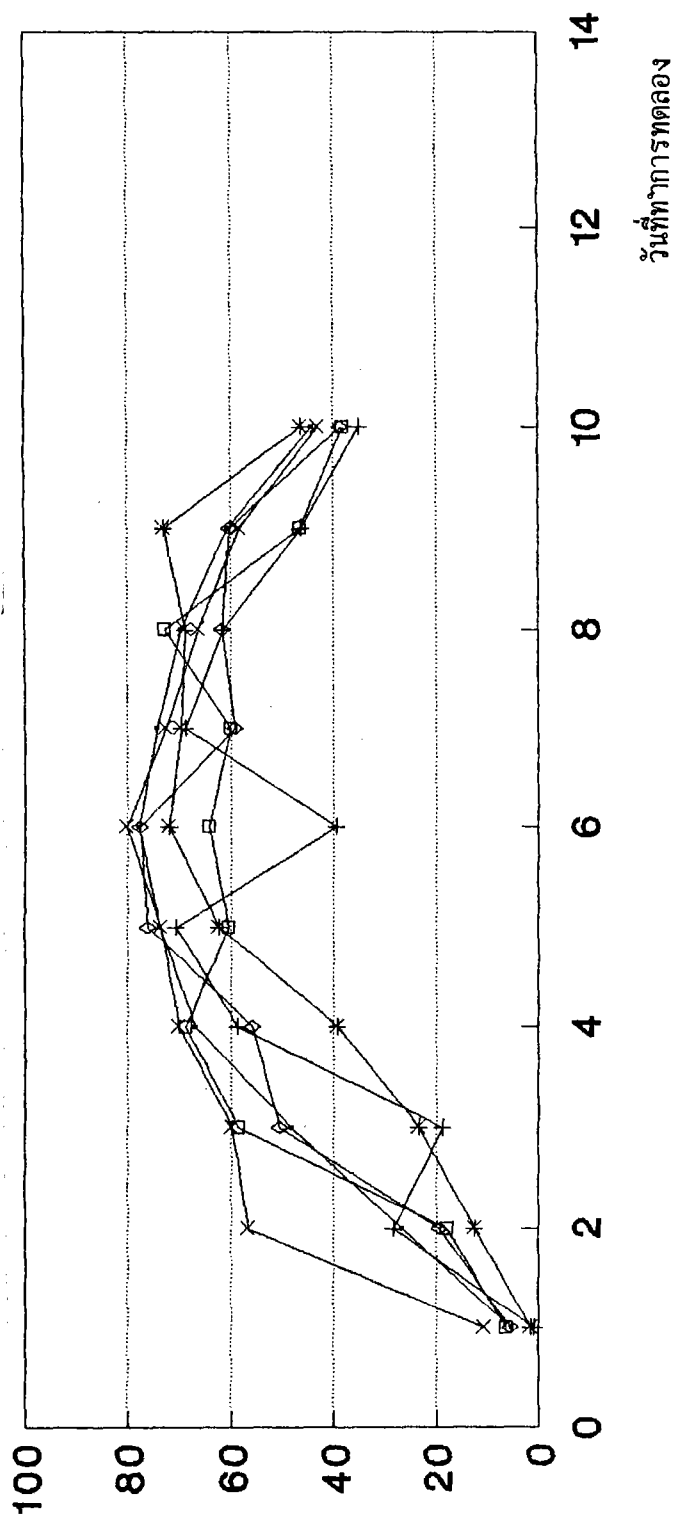
ร้อยละก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง อากาศ CH_4 และ CO_2



—+— HRT2,OLR0.8gCOD/d —+— HRT5,OLR0.8gCOD/d *— HRT2,OLR1.0gCOD/d
 —x— HRT5,OLR1.0gCOD/d —x— HRT2,OLR1.5gCOD/d —◇— HRT5,OLR1.5gCOD/d

ภาพประกอบ 11 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากการใช้กรดอะซิติกเข้มข้น
 ร้อยละ 0.1 ที่ระยะเวลาเก็บกัก และอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่าง ๆ กัน

ร้อยละก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่างอากาศ CH_4 และ CO_2

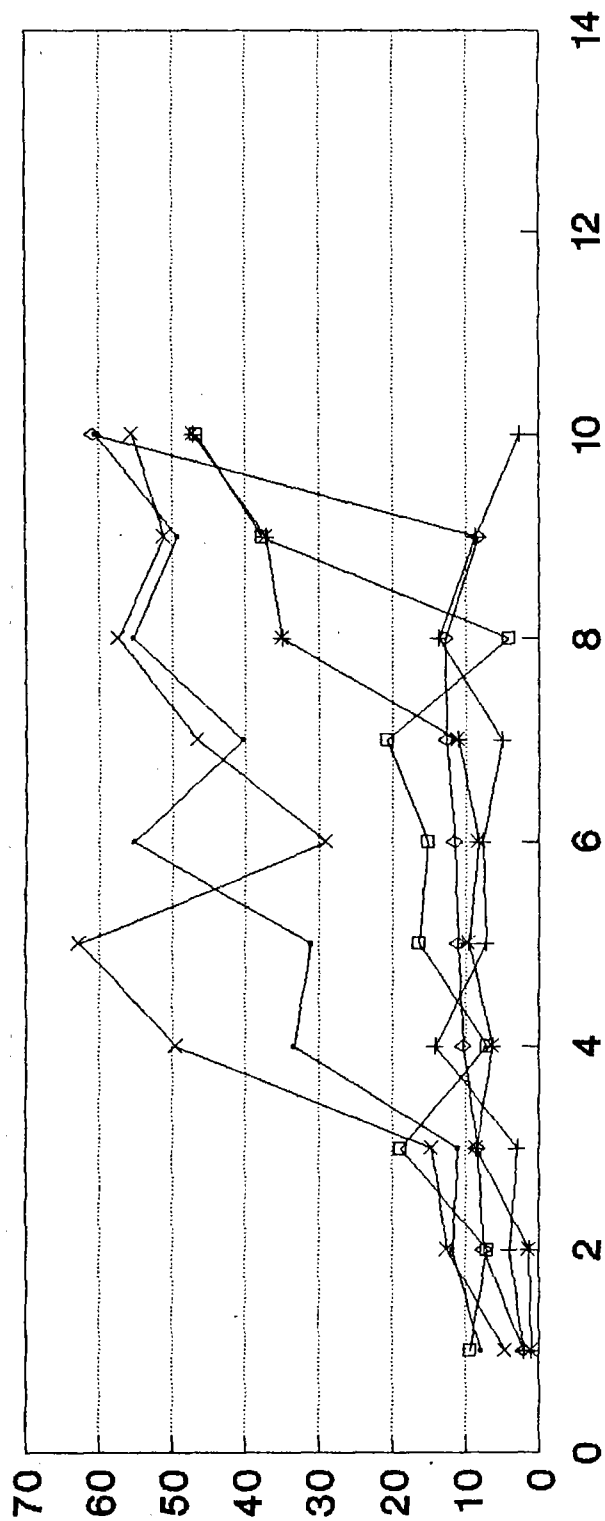


—+— HRT2,OLR0.8gCOD/d —+— HRT5,OLR0.8gCOD/d *— HRT2,OLR1.0gCOD/d
 —x— HRT5,OLR1.0gCOD/d —x— HRT2,OLR1.5gCOD/d —o— HRT5,OLR1.5gCOD/d

ภาพประกอบ 12 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากการใช้ไบโเรนเข้มข้น

ร้อยละ 0.1 ที่ระยะเวลาเก็บกัก และอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่าง ๆ กัน

ร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง อากาศ CH_4 และ CO_2



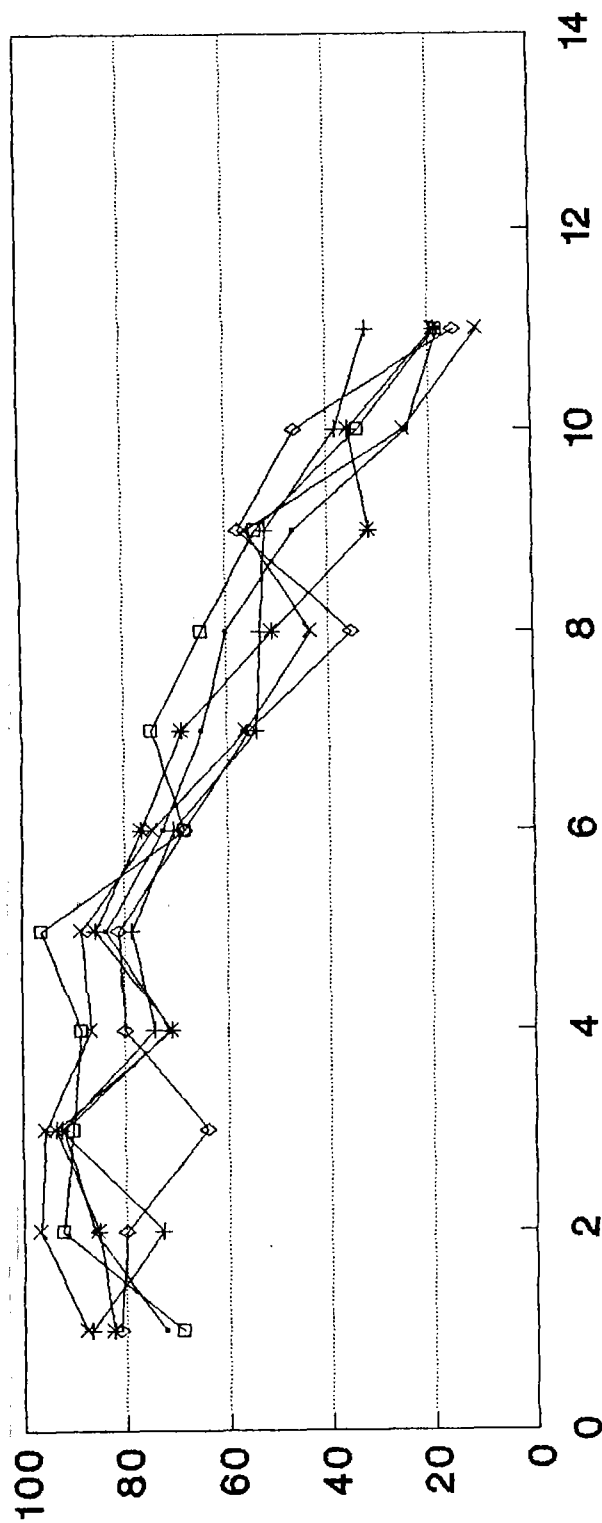
วันที่ทำการทดลอง

- HRT2,OLR0.8gCOD/d — HRT5,OLR0.8gCOD/d —*— HRT2,OLR1.0gCOD/d
- HRT5,OLR1.0gCOD/d —x— HRT2,OLR1.5gCOD/d —◇— HRT5,OLR1.5gCOD/d

ภาพประกอบ 13 แสดงความสามารถของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนจากการใช้กลูโคสเข้มข้น

ร้อยละ 0.1 ที่ระยะเวลาเก็บกัก และอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่าง ๆ กัน

ร้อยละของ CO₂ ในก๊าซผสมระหว่าง อากาศ CH₄ และ CO₂



วันที่ทำการทดลอง

- +— HRT2,OLR0.8gCOD/d —+— HRT5,OLR0.8gCOD/d —*— HRT2,OLR1.0gCOD/d
- HRT5,OLR1.0gCOD/d —x— HRT2,OLR1.5gCOD/d —◇— HRT5,OLR1.5gCOD/d

ภาพประกอบ 14 แสดงปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เมื่อจุลินทรีย์ใช้กลูโคสเข้มข้นร้อยละ

1.0 ที่ระยะเวลาเก็บกัก และอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่าง ๆ กัน

บทที่ 4

สรุปอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพนั้นมีอยู่ 2 พวก คือ พวก non-methanogenic bacteria ซึ่งเจริญเติบโตได้ในช่วง pH กว้าง คือระหว่าง 3.5-6.5 อีกกลุ่มหนึ่งคือ methanogenic bacteria ซึ่งเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH ที่เป็นกลาง คือประมาณ 7.0-7.8 และมีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าพวกแรก ดังนั้นในการศึกษาจึงแยกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ pH ประมาณ 3.5-4.0 และขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน pH ประมาณ 7.0-7.8 งานวิจัยนี้ศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่อการเกิดก๊าซชีวภาพจากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ในถังปฏิกรณ์ขนาด 4 ลิตร ในขั้นตอนผลิตกรดอินทรีย์นั้นนำหัวเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตกรดอินทรีย์ จากน้ำหมักที่ถ่ายออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์จากเปลือกสับประรดของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ผสมกับกากมะเขือเทศแห้งให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบป้อนเข้าถังปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง ทำการหมักให้มีระยะเวลาเก็บกักนาน 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน ตรวจวัด pH ของน้ำหมัก ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยและอินทรีย์สารในรูปมิลลิกรัมชีโรดีต่อลิตรในน้ำหมักพบว่า น้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ต่าง ๆ มี pH ไม่แตกต่างกันมากนัก คืออยู่ในช่วง 4.2-4.4 ซึ่งมีสภาพเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของ non-methanogenic bacteria และเมื่อหมักกากมะเขือเทศให้มีระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยและปริมาณอินทรีย์สารในรูปมิลลิกรัมชีโรดีต่อลิตรจะสูงขึ้น สามารถนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตก๊าซมีเทนได้ โดยนำมาปรับ pH จนเป็น 7.0 ก่อนเติมลงในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน ในการเตรียมถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนเพื่อเพิ่มปริมาณเชื้อจุลินทรีย์กลุ่ม methanogen นั้น จะใช้สารละลายโซเดียมอะซิเตทเข้มข้นร้อยละ 0.1 ป้อนเป็นแหล่งคาร์บอนแก่จุลินทรีย์โดยตรง เพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์เพิ่มปริมาณได้อย่างรวดเร็ว ตามวิธีการที่ Zeew และ Lettinga (1980) ได้ทดลองและแนะนำว่าการเริ่มเลี้ยงตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ ควรใช้เกลืออะซิเตทป้อนเป็นน้ำเสีย จะทำให้ methanogenic bacteria เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการลดระยะเวลาในการเริ่มเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ หลังจากนั้นจึงเริ่มเติมน้ำหมักกากมะเขือเทศที่ได้จากขั้นตอนแรกป้อนผสมกับโซเดียมอะซิเตท และค่อย ๆ ลดปริมาณของโซเดียมอะซิเตท ในที่สุดจะป้อนแต่น้ำหมักกากมะเขือ

เทศเพียงอย่างเดียว จากการทดลองในส่วนนี้จะเห็นว่าการบ้อนอินทรีย์สารในระดับต่ำ ๆ ก่อน เพื่อให้เกิดความสมดุลของเชื้อจุลินทรีย์กลุ่ม methanogen และ non-methanogen เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในขั้นตอนผลิตก๊าซมีเทนนั้น อยู่ในลักษณะของเชื้อผสมคือมีทั้ง methanogenic bacteria และ non-methanogenic bacteria พวก non-methanogenic bacteria จะเจริญเติบโตได้ดีกว่า methanogenic bacteria ถ้ามีการเติมอินทรีย์สารเข้มข้นสูงพวก non-methanogen จะย่อยสลายอินทรีย์สารอย่างรวดเร็ว เกิดกรดอินทรีย์ปริมาณสูง กลุ่ม methanogen ไม่สามารถนำไปใช้ได้ทัน ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ และก๊าซที่ได้จะเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ (Kenedy. 1982) นอกจากการบ้อนอินทรีย์สารในระดับต่ำ ๆ แล้ว ในการทดลองยังควบคุมให้ถึงปฏิกิริยาผลิตก๊าซมีเทน มี pH เป็นกลาง ซึ่งจะเป็นการควบคุมอัตราการเจริญเติบโตของ non-methanogenic bacteria อีกทางหนึ่งด้วย

ในขณะที่เตรียมถึงปฏิกิริยาผลิตก๊าซมีเทนเพื่อเพิ่มเชื้อจุลินทรีย์ จะตรวจวัด pH และปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น จนกระทั่งพบว่าจุลินทรีย์สามารถใช้อินทรีย์สารเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้ในอัตราค่อนข้างคงที่แล้ว จะนำก๊าซชีวภาพที่ได้ไปตรวจวิเคราะห์คุณภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ โดยดูองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ พบว่ามีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 70 ซึ่งนับว่าก๊าซชีวภาพที่ได้มีคุณภาพดี เมื่อเตรียมถึงปฏิกิริยาผลิตก๊าซมีเทนพร้อมแล้วจึงทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการบ้อนอินทรีย์สารที่มีต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ ศึกษาที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน อัตราการบ้อนอินทรีย์สาร 0.2 0.5 และ 0.8 กรัมชีโรดิตต่อวัน จากการทดลองพบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในหม้อของลิตรต่อลิตรต่อวันจะสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น และอัตราการบ้อนอินทรีย์สารสูงขึ้น คืออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าสูงสุด 0.104 ลิตรต่อลิตรต่อวัน เมื่อหมักที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน และอัตราการบ้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดิตต่อวัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.52 ลิตรต่อกรัมชีโรดิตที่เติม ก๊าซชีวภาพที่ได้มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เท่ากับร้อยละ 86.23 ผลการศึกษาในครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการบ้อนอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนจาก cheese ซึ่ง Yan(1988) พบว่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มมากขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น ที่ระยะเวลาเก็บกักคงที่อัตราการผลิตก๊าซมีเทนจะเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มอินทรีย์สาร Pfeffer(1974) Echenfelder และ Ford (1970) ให้

ผลการทดลองทำนองเดียวกัน ในขั้นตอนนี้ยังได้ศึกษาถึงความสามารถในการกำจัดอินทรีย์สารในรูปของชีโรดี พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์สารจะดีขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น โดยสามารถกำจัดอินทรีย์สารในรูปของชีโรดีได้สูงสุดร้อยละ 86.49 ที่ระยะเวลาเก็บกักนาน 10 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน เนื่องจากว่า ระยะเวลาเก็บกักมีอิทธิพลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ ถ้าเพิ่มระยะเวลาเก็บกักจะทำให้จุลินทรีย์มีเวลาสัมผัสกับน้ำเสียมากขึ้น ซึ่งจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์สารในรูปชีโรดี ถ้าลดระยะเวลาเก็บกักต่ำมาก ๆ จุลินทรีย์จะหลุดออกจากระบบได้ ดังนั้นระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบสั้นทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำเสียลดลงด้วย

ที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน และ 10 วัน ที่ทุก ๆ ระดับอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก ดังนั้นในการทดลองต่อไป จึงเลือกศึกษาที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน เนื่องจากการหมักที่ระยะเวลาเก็บกักนาน ๆ จะต้องใช้ถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรมเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับต้นทุนการผลิต และเมื่อพิจารณาอัตราการป้อนอินทรีย์สาร พบว่า ที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน เพิ่มอัตราการป้อนอินทรีย์สารจาก 0.5 กรัมชีโรดีต่อวัน เป็น 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเปลี่ยนจาก 0.45 เป็น 0.38 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่เติม แสดงว่าถังปฏิกรณ์ยังสามารถรับภาระในการเติมอินทรีย์สารได้มากขึ้น คือปริมาณอินทรีย์สารที่ป้อนยังไม่สูงที่จะทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน การจัดปริมาณอินทรีย์สารในรูปชีโรดีที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน จะมีประสิทธิภาพดี คือสามารถกำจัดอินทรีย์สารในรูปชีโรดีได้สูงถึงร้อยละ 86.49 ดังนั้นจึงเพิ่มอัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 1.0 และ 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น และอัตราการป้อนอินทรีย์สารสูงขึ้น คืออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดเท่ากับ 0.528 ลิตรต่อวัน หรือ 0.132 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน ประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์สารในรูปชีโรดีจะสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น คือมีประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์สารในรูปชีโรดีสูงสุดเท่ากับร้อยละ 79.54 เมื่อระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน การกำจัดอินทรีย์สารเมื่อใช้ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน จะสูงกว่าเมื่อใช้ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน

การใส่สารตัวกลางในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน

การทดลองได้วิเคราะห์หาปริมาณและชนิดของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในวัตถุดิบที่เข้าสู่อังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน และที่เหลืออยู่ตามหมักที่ผ่านการบำบัดจนถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน เพื่อศึกษาว่ามีการใช้กรดอินทรีย์ระเหยง่ายในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน พบว่า กรดอินทรีย์ระเหยง่ายหรือสารตัวกลางที่ได้จากขั้นตอนแรกและใช้เป็นขั้วสเตรทสำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน ส่วนใหญ่คือ เอทานอล กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทริก จะถูกใช้ไปในช่วงร้อยละ 85-100 สารตัวกลางที่เหลือหลังผ่านการบำบัดจนถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนคือ เอทานอล กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทริก จะพบว่าสารตัวกลางที่ได้จากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ถูกใช้ไปมากที่สุดเมื่อเข้าสู่ังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน แสดงว่าระบบการย่อยสลายแบบอับอากาศสองขั้นตอน กรดอินทรีย์ระเหยง่ายซึ่งเป็นสารอาหารสำหรับแบคทีเรียพวกที่ผลิตก๊าซมีเทนจะถูกใช้ไปในขั้นตอนที่สองเป็นส่วนใหญ่

การศึกษากิจกรรมของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนเมื่อใช้ขั้วสเตรทต่าง ๆ

การศึกษากิจกรรมของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทนเมื่อใช้ขั้วสเตรทต่าง ๆ คือ เอทานอล เข้มข้นร้อยละ 0.1 (ปริมาตรต่อปริมาตร) กรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 0.1 (ปริมาตรต่อปริมาตร) เบปโตรนเข้มข้นร้อยละ 0.1 (น้ำหนักต่อปริมาตร) กลูโคสเข้มข้นร้อยละ 0.1 และ 1.0 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ผลการทดลองพบว่าจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ที่มีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 1.0 และ 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน เมื่อใช้กรดอะซิติกสามารถผลิตก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง อากาศ CH_4 และ CO_2 เฉลี่ยร้อยละ 54.60 44.44 และ 49.28 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับเมื่อใช้เบปโตรน องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง อากาศ CH_4 และ CO_2 ที่ได้จากการย่อยสลายกรดอะซิติกและเบปโตรนนี้จะสูงกว่าที่ได้จากการย่อยสลายเอทานอล และกลูโคส ทั้งนี้ methanogenic bacteria ที่ใช้ศึกษานานจวดชีร์มอาจใช้กรดอะซิติกเป็นขั้วสเตรทได้ดีในการเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ในขณะที่เมื่อใช้เบปโตรนเป็นขั้วสเตรท methanogenic bacteria อาจจะใช้เบปโตรนในการเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนได้ยากกว่าเมื่อใช้กรดอะซิติก เพราะเบปโตรนเป็นนมเลกุลที่ซับซ้อน แต่ methanogenic bacteria อาจจะใช้เบปโตรนในการเพิ่มปริมาณเชื้อได้ จึงทำให้สามารถผลิตก๊าซมีเทนเมื่อใช้เบปโตรนเป็นขั้วสเตรทได้ใกล้เคียงกับเมื่อใช้กรดอะซิติก จุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ที่ใส่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน ให้ผลการ

ทดลองคล้ายกับจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ที่ใช้ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน แต่จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ไม่สามารถใช้กลูโคสเข้มข้นร้อยละ 1.0 หรือใช้ได้ปริมาณน้อยมากในการเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในการป้อนสารอาหารที่ความเข้มข้นสูงพวก non-methanogen จะเจริญเติบโตเร็วกว่าพวก methanogen เช่น ใช้กลูโคสเข้มข้นร้อยละ 1.0 พวก non-methanogen จะย่อยสลายอินทรีย์สารอย่างรวดเร็วเกิดกรดอินทรีย์ในปริมาณสูง ซึ่งเชื่อพวก methanogen ไม่สามารถนำไปใช้ได้ทัน ดังนั้นก๊าซที่ได้ส่วนใหญ่จึงเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ข้อเสนอแนะ

1) เมื่อพิจารณาผลการทดลอง พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีการเพิ่มอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าสูงที่สุดคือ 0.132 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.35 ลิตรต่อกรัมชีโรดีที่เติมต่อวัน ดังนั้นจึงควรจะทดลองต่อไปที่อัตราการป้อนอินทรีย์สารมากกว่า 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน เพื่อหาอัตราการป้อนอินทรีย์สารสูงสุดที่ระบบสามารถจะคงอยู่ได้ ทำอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ และผลการจัดปริมาณอินทรีย์สารสูงสุด

2) ในการศึกษาในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ในงานวิจัยครั้งนี้ปริมาณอินทรีย์สารในรูปชีโรดี และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยที่ได้จากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์มีค่าต่ำ ดังนั้นจึงไม่สะดวกในการนำมาปรับความเข้มข้นของอินทรีย์สารเพื่อใช้ศึกษาต่อในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน ในการศึกษาต่อไปควรจะควบคุมระบบการป้อนอินทรีย์สารโดยไม่ให้มีการหมุนเวียนของตะกอนสลัดจ์ ซึ่งจะทำให้มีการสะสมกากของเสีย จุลินทรีย์จะสามารถย่อยสลายได้มากขึ้นทำให้ได้ปริมาณอินทรีย์สารในรูปชีโรดี และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้นซึ่งเหมาะที่จะนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับป้อนเพื่อผลิตก๊าซมีเทน

3) ปริมาณอินทรีย์สารที่มีอยู่ในน้ำหมักจากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ค่อนข้างต่ำ แสดงว่าแบคทีเรียย่อยสลายกากมะเขือเทศได้ไม่ค่อยดี เพราะกากมะเขือเทศมีองค์ประกอบของเซลลูโลส และ เฮมิเซลลูโลสค่อนข้างสูง ดังนั้นน่าที่จะมีการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซจากกากมะเขือเทศ โดยหาวิธีที่จะช่วยในการย่อยสลายกากมะเขือเทศให้มากขึ้นในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์

បរិច្ឆេទ

บรรณานุกรม

- เกษม พิสิฐ. การผลิตมะเชื้อเทศส่งโรงงาน. สมาคมการค้าปุ๋ยและธุรกิจเกษตรไทย, 2531.
- ชาญชัย คุณาวานากิจ. การผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาภายใต้การย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน.
วิทยานิพนธ์ วศ.ม. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529. อัดสำเนา.
- ปรีดา แยมเจริญวงศ์. เทคโนโลยีน้ำและน้ำเสีย. ภาควิชาสุขาภิบาล คณะสาธารณสุขศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2534.
- ณรงค์ จิตต์จรุงเกียรติ. การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากถั่วเหลืองโดยกรรมวิธีขึ้นตะกอนจุลินชีพ
ไร้อากาศไหลขึ้น. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.
อัดสำเนา.
- ธงชัย พรหมสวัสดิ์. คู่มือวิเคราะห์น้ำทิ้ง. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2525.
- วิบูลย์ นุชประมูล. การหมักกากมะเชื้อเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน. ปริญญาานิพนธ์ วท.ม.
กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร, 2535. อัดสำเนา.
- ศักดิ์ชัย โรภาสวัสดิ์ชัย. การย่อยสลายและการผลิตก๊าซชีวภาพของขยะแบบไร้ออกซิเจนโดยแบคทีเรีย
ชนิดชอบความร้อน. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527.
อัดสำเนา.
- ส่งเสริมการเกษตร, กรม. สถิติการปลูกพืชผักรายพืช. หน้า 37. กรุงเทพฯ: กองแผนงานและโครงการ
การพิเศษ, 2534.
- สมชาย เขียมธีรสกุล. การผลิตก๊าซมีเทนจากขยะโดยกระบวนการชีวภาพแบบไร้อากาศ. วิทยานิพนธ์
วศ.ม. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530. อัดสำเนา.
- หัตถยา ทิพย์วัฒน์. การศึกษากลุ่มจุลินทรีย์และสารตัวกลางในกระบวนการย่อยสลายเปลือกสับปะรด
ในสภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์ วท.ม. กรุงเทพฯ:
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2531. อัดสำเนา.
- Andrews, J.F. "Dynamic Model of the Anaerobic Digestion Process,"
Proceeding of the American Society of Civil Engineers. 95;1969.

- APHA,AWWA.WPCH. "Standard Method for the Examination of Water and Wastewater," New York: 16th.edition. 533-535;1985.
- Barker,H.A. "Biological Formation of Methane," Industrial and Engineering Chemistry. 48(9):1438-1443;1956.
- _____. "Studies on the Methane Fermentation V.Biochemical Activities of Methanobacterium omelianskill," Journal Biological Chemistry. 131-153;1941.
- Buswell,A.M. and H.F.Mueller. "Mechanisms of Methane Fermentation," Industrial and Engineering Chemistry. 44(3):550-552;1952.
- Calzada,J.F. "Biogas Production from Coffee Pulp Juice:One and Two-Phase Systems," Agricultural Wastes. 9:217-230;1984.
- Cooney,C.L. and D.L.Wise. "Thermophilic Anaerobic Digestion of Solid Wastes for Fuel Gas Production," Biotechnology and Bioengineering. 17:1119-1135;1975.
- Echenfelder,W.W. and D.L. Ford. "Experimental Procedures for Process Design," Water Pollution Control. 1970.
- Garcia,P.A.,J.L.Rico and F.Fdz-Polanco. "Anaerobic Treatment of Cheese Whey in a Two-Phase UASB Reactor," Environmental Technology. 12: 355-362;1991.
- Ghosh,S.,A.Sajjad and M.P.Herry. "Two-Stage Upflow Anaerobic Digestion of Concentrated Sludge," Biotechnology and Bioengineering Symposium. 13:351-370;1983.
- Ghosh,s.,J.P. Ombregt and P.Pipyn. "Methane Production from Industrial Wastes by Two-Phase Anaerobic Digestion ," Water Research. 19(9): 1083-1088;1985.
- Graef,S.P. and J.F.Andrews. "Stability and Control of Anaerobic Digestion," Journal of the Water Pollution Control Federation. 4:666-683;1974.
- Hill,D.J and K. Nakano. "Effects of Particle Size on Anaerobic Digestion of Tomato Solid Wastes," Agricultural Wastes. 10:285-295;1984.
- Hill,D.J and S. Dykstra. "Anaerobic Digestion of Cannery Tomato Solid Wastes, "Journal of the Environmental Engineering Division. 106: 266-380;1980.
- Kennedy,K.J. and L. Van Den Berg. "Anaerobic Digestion of Piggery Waste Using a Stationary Fixed Film Reactor," Agricultural Wastes. 4: 151-158;1982.

- Khan, A.W., S. Miller and D. Murray. "Development of a Two-Phase Combination Fermenter for the Conversion of Cellulose to Methane," Biotechnology and Bioengineering. 25:1571-1579;1983.
- McCarty, P.L. "Anaerobic Waste Treatment Fundamentals Part 1,2,3 and 4," Public Works. 1964.
- McCarty, P.L. and J.S. Jeris. "The Biochemistry of Methane Fermentation Using ^{14}C Tracers," Journal of Water Pollution Control Fed. 37: 178-192;1984.
- McCarty, P.L. and R.E. McKinney. "Volatile Toxicity in Anaerobic Digestion," Journal of the Water Pollution Control Federation. 33(3):223-232; 1961.
- Novaes, R.F. "Microbiology of Anaerobic Digestion," Water Science Technology. 18(12):1-14;1986.
- Perolland, C and D. Amar. "Optimization of Sludge Anaerobic Digestion by Separation of Hydrolysis - Acidification and Methanogenic," Environmental Technology Letters. 10:633-644;1989.
- Pfeffer, J.T. "Temperature Effects on Anaerobic Fermentation of Domestic Refuse," Biotechnology and Bioengineering. 16:777-787;1974.
- Powell, G.E. and D.B. Archer. "On-Line Titration Method for Monitoring Buffer Capacity and Total Volatile Fatty Acid Levels in Anaerobic Digesters ," Biotechnology and Bioengineering. 33:570-577;1989.
- Sanchez, E.P. and others. "Effect of the Hydraulic Retention Time on the Anaerobic Biofilm Reactor Efficiency Applied to Screened Cattle Waste Treatment," Biotechnology Letters. 14(7):635-638;1992.
- Sarada, R. and K. Nand. "Start-Up of Anaerobic Digestion of Tomato Processing Wastes for Methane Generation," Biological Wastes. 30:231-237;1989.
- Sprott, G.D., S.E. Bird and I.J. McDonald. "Proton Motive Force as a Function of the pH at Which Methanobacterium bryantii is Grown," Journal of Microbiology. 31:1031-1034;1985.
- Therkelsen, H.H. and D.A. Carlson. "Thermophilic Anaerobic Digestion of a Strong Complex Substrate," Journal of the Water Pollution Control Federation. 51(7):1949-1964;1979.
- Updated guidebook on biogas development. Energy Resources Development Series. New York:1984.
- Verrier, D., F. Ray and G. Albagmac. "Two-Phase Methanization of Solid Vegetable Wastes," Biological Wastes. 22:163-177;1987.
- Yan, J.Q. "Methane Production from Cheese," Biomass. 17:185-202;1988.

- Yang, M. and others. "Stability and Performance of Thermophilic Anaerobic Fixed-Bed Reactor Packed with a Saddle-Shaped Slag Biocarrier," Environmental Technology.13:671-678;1992.
- Zeeuw, W. and G. Lettinga. "Acclimation of Digested Sewage Sludge During Start Up an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor," Proceedings of the 35th Industrial Waste Conference. 39;1980.

ภาคผนวก

ตาราง 14 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ และ pH จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน
ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.2 กรัมชีโรดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน
ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน	
	ปริมาตรก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาตรก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาตรก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH
1	0.043		0.103		0.100	
2	0.047	7.08	0.100	7.05	0.120	7.04
3	0.048		0.105		0.115	
4	0.045	6.97	0.095	6.93	0.113	6.98
5	0.047		0.100		0.115	
6	0.043	6.94	0.097	6.90	0.111	6.97
7	0.048		0.095		0.121	
8	0.050	6.90	0.100	6.86	0.112	6.94
9	0.047		0.105		0.110	
10	0.042	6.97	0.100	6.86	0.114	6.97
11	0.049		0.105		0.120	
12	0.043	7.00	0.095	6.94	0.100	6.99
13	0.053		0.099		0.105	
14	0.042	6.99	0.093	6.86	0.112	6.91
15	0.044		0.107		0.116	
16	0.057	6.8	0.108	6.91	0.110	6.91

ตาราง 14 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน	
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH
17	0.060		0.100		0.120	
18	0.045	7.03	0.107	6.96	0.108	7.05
19	0.039		0.100		0.117	
20	0.048	-	0.105	-	0.115	
21	0.048		0.107		0.115	
22	0.052	7.00	0.105	6.99	0.110	7.03
23	0.049		0.098		0.118	
24	0.055	6.92	0.110	6.84	0.105	6.90
25	0.059		0.100		0.108	
26	0.047	6.97	0.098	6.92	0.113	6.97
27	0.058		0.109		0.118	
28	0.058	7.00	0.105	6.93	0.100	6.95
29	0.060		0.100		0.109	
30	0.065	6.94	0.107	6.89	0.108	6.97
31	0.060		0.095		0.108	
32	0.055	-	0.105	-	0.100	-
33	0.055		0.101		0.112	
34	0.057	6.98	0.107	6.91	0.117	6.99

ตาราง 14 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน	
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH
35	0.052		0.090		0.110	
36	0.053	6.96	0.112	6.95	0.117	7.00
37	0.047		0.100		0.117	
38	0.058	6.97	0.095	6.92	0.110	6.94
39	0.055		0.101		0.122	
40	0.055	7.00	0.109	6.90	0.115	6.97
41	0.058		0.103		0.111	
42	0.052	6.94	0.105	6.88	0.116	6.98
43	0.057		0.105		0.102	
44	0.057	6.95	0.102	6.94	0.111	6.97
45	0.060		0.097		0.109	
46	0.058	6.99	0.097	6.96	0.109	6.96
47			0.107			

ตาราง 15 แสดงปริมาณอินทรีย์สารในรูปซีโอดี กรดอินทรีย์ระเหย และค่าความเป็นด่าง จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.2 กรัมซีโอดีต่อวัน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน			ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน			ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน		
	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)
1	83.3	30	230	98.0	45	410	98.0	60	670
2	78.4	45	230	88.2	45	410	88.2	60	670
3	78.4	45	240	88.2	60	400	-	60	660
4	78.4	45	230	98.0	45	400	88.2	45	660
5	88.2	30	230	88.2	45	410	107.8	60	670
6	78.4	45	230	93.1	60	420	98.0	45	670
7	73.5	30	220	98.0	45	420	98.0	45	660
8	68.6	30	230	93.1	45	410	88.2	45	670
9	73.5	45	230	88.2	45	410	93.1	45	670
10	83.3	-		98.0			93.1		

ตาราง 16 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ และ pH จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน
ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.5 กรัมชีโอดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน
ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน	
	ปริมาตรก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาตรก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาตรก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH
1	170		230		245	
2	166	7.08	231	7.08	249	7.14
3	152		234		230	
4	140	7.04	221	7.04	260	7.10
5	155		225		257	
6	140	7.01	220	6.95	249	7.06
7	165		236		260	
8	154	6.98	223	6.91	251	7.04
9	170		220		247	
10	145	7.01	236	6.91	249	7.04
11	171		210		240	
12	150	7.08	215	6.99	244	7.13
13	170		223		251	
14	175	7.08	223	6.96	240	7.10
15	171		215		235	
16	170	7.00	230	6.98	248	7.15

ตาราง 16 (ต่อ)14

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน	
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH
17	150		223		252	
18	159	7.00	221	7.00	255	7.10
19	156		236		250	
20	175	-	220	-	240	-
21	170		227		257	
22	165	7.02	236	7.11	251	7.09
23	180		237		240	
24	181	6.92	230	6.92	255	7.05
25	169		235		247	
26	168	7.00	221	6.99	267	7.09
27	172		240		256	
28	171	7.04	225	7.02	250	7.04
29	170		227		247	
30	177	7.02	220	6.96	238	7.14
31	164		235		255	
32	167	-	235	-	240	-
33	169		232		255	
34	160	7.02	225	6.99	260	7.08

ตาราง 16 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน	
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH
35	171		235		246	
36	170	6.99	230	7.05	247	7.10
37	175		233		247	
38	160	7.05	224	6.97	240	7.07
39	165		235		260	
40	160	7.01	227	6.98	255	7.11
41	175		220		249	
42	171	7.02	235	7.00	235	7.09
43	173		220		250	
44	166	7.00	235	6.98	245	7.12
45	172		220		252	
46	170	7.04	240	6.99	245	7.06

ตาราง 17 แสดงปริมาณอินทรีย์สารในรูปซีโอดี กรดอินทรีย์ระเหย และค่าความเป็นด่าง จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอ็อกซิเจนสองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.5 กรัมซีโอดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน ปริมาณการหมัก 3.5 ลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน			ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน			ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน		
	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)
1	107.8	45	330	127.4	75	630	176.4	105	1100
2	98.0	60	330	137.2	75	630	166.6	90	1090
3	107.8	60	340	127.4	75	620	176.4	90	1080
4	107.8	60	320	137.2	75	620	176.4	75	1100
5	107.8	45	320	137.2	75	630	176.4	90	1070
6	107.8	60	320	147.0	90	620	-	90	1070
7	107.8	45	320	127.4	60	630	176.4	90	1070
8	117.6	60	320	147.0	75	620	166.6	90	1100
9	107.8	60	310	137.2	75	620	186.2	90	1080
10	98.0			137.2			186.2		

ตาราง 18 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ และ pH จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน
ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน
ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน	
	ปริมาตรก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาตรก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาตรก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH
1	303		390		420	
2	312	7.10	414	7.03	405	7.26
3	296		403		415	
4	305	6.97	400	7.03	422	7.14
5	307		410		435	
6	295	7.00	402	7.03	420	7.20
7	298		337		430	
8	291	6.92	395	7.00	425	7.04
9	305		375		405	
10	309	7.00	370	7.02	418	7.16
11	300		400		400	
12	285	7.04	390	7.05	407	7.24
13	275		414		403	
14	295	6.98	370	7.01	392	7.29
15	296		375		400	
16	300	7.05	420	7.08	407	7.16

ตาราง 18 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน	
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH
17	293		375		420	
18	290	7.00	405	7.05	417	7.18
19	285		400		408	
20	285	-	409	-	430	-
21	285		395		405	
22	277	7.04	388	7.08	410	7.22
23	290		390		413	
24	290	6.87	395	6.96	390	7.20
25	300		400		402	
26	301	7.00	380	7.03	418	7.16
27	298		400		426	
28	295	7.05	406	7.00	420	7.28
29	297		398		410	
30	288	6.95	388	7.06	447	7.25
31	280		395		440	
32	292	-	397	-	418	-
33	286		390		420	
34	300	6.98	404	7.01	410	7.26

ตาราง 18 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน	
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH
35	291		395		422	
36	311	7.02	390	7.05	411	7.20
37	303		385		434	
38	295	7.00	377	6.99	400	7.23
39	287		397		412	
40	307	6.97	405	7.07	420	7.17
41	285		391		430	
42	294	7.03	415	7.03	425	7.20
43	280		376		415	
44	270	7.01	395	7.04	420	7.26
45	300		381		410	
46	295	6.99	394	7.02	428	7.14

ตาราง 19 แสดงปริมาณอินทรีย์สารในรูปซีโอดี กรดอินทรีย์ระเหย และค่าความเป็นด่าง จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมซีโอดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน			ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน			ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน		
	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)
1	156.8	75	420	269.5	120	900	343.0	150	1620
2	166.6	75	430	294.0	120	900	343.0	150	1650
3	147.0	90	410	294.0	105	900	294.0	135	1600
4	156.8	90	400	245.0	120	880	294.0	120	1580
5	147.0	90	420	245.0	135	880	294.0	150	1650
6	171.5	90	420	294.0	135	870	343.0	150	1620
7	151.9	90	420	294.0	120	880	318.5	150	1650
8	156.8	90	420	-	120	880	294.0	120	1640
9	156.8	75	410	294.0	120	880	294.0	135	1630
10	161.7	-	-	269.5	-	-	269.5	-	-

ตาราง 20 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ และ pH จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน
ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมชีโรดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน ปริมาตร
การหมัก 3.5 ลิตร

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน	
	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH
1	190	6.96	-	6.95
2	205	6.94	230	6.92
3	218	6.95	221	7.00
4	209	6.94	241	6.94
5	227	7.03	220	7.12
6	202	-	232	-
7	218	7.01	195	7.00
8	200	6.91	205	7.01
9	211	-	210	7.08
10	190	6.93	195	6.96
11	201	7.05	205	7.06
12	211	7.01	217	7.05
13	203	7.04	210	6.98
14	198	7.01	223	6.79
15	200	7.00	230	6.99
16	190	6.97	220	7.01
17	198	7.01	225	6.97

ตาราง 20 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน	
	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH
18	200	6.98	237	7.00
19	213	6.95	213	6.94
20	180	7.01	208	7.03
21	195	7.03	228	6.95
22	210	6.97	222	7.02
23	225	6.99	215	6.96
24	221	7.01	245	7.01

ตาราง 21 แสดงปริมาณอินทรีย์สารในรูปซีโอดี กรดอินทรีย์ระเหย และค่าความเป็นด่าง จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 กรัมซีโอดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน ปริมาณการหมัก 3.5 ลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน			ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน		
	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)
1	176.4	45	385	274.4	75	770
2	156.8	75	390	254.8	105	790
3	176.4	75	390	235.2	90	790
4	156.8	75	385	235.2	120	790
5	-	75	420	215.6	82.5	795
6	156.8	60	410	254.8	90	780
7	-	90	400	235.2	105	790
8	156.8	67.5	410	274.4	97.5	795
9	137.2	75	415	235.2	90	790
10	156.8	82.5	420	215.6	105	800
11	137.2	-	-	274.4	-	-
12	156.8	-	-	274.4	-	-
13	147.0	-	-	235.2	-	-
14	147.0	-	-	254.8	-	-
15	156.8	-	-	254.8	-	-

ตาราง 22 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ และ pH จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน
ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมชีโรดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน ปริมาตร
การหมัก 3.5 ลิตร

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน	
	ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น (ลิตร/วัน)	pH
1	-	6.97	275	7.04
2	218	6.92	260	7.00
3	207	7.04	265	7.07
4	200	6.95	260	7.01
5	216	7.16	269	7.22
6	221	-	277	-
7	-	7.04	265	7.07
8	204	7.00	-	7.07
9	215	7.09	280	7.17
10	230	6.94	305	7.02
11	-	7.07	315	7.02
12	204	6.98	268	7.05
13	200	6.91	260	7.01
14	213	6.98	268	7.06
15	228	6.95	287	7.01
16	220	6.97	298	7.03
17	224	6.97	282	7.02

ตาราง 22 (ต่อ)

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน	
	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH
18	201	6.94	273	7.02
19	231	6.98	290	7.05
20	200	6.98	260	7.00
21	203	7.01	266	7.10
22	220	7.00	-	6.99
23	225	6.97	-	7.01
24	233	6.99	292	7.04

ตาราง 23 แสดงปริมาณอินทรีย์สารในรูปซีโอดี กรดอินทรีย์ระเหย และค่าความเป็นด่าง จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมซีโอดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน			ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน		
	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)
1	215.6	75	420	294.0	105	950
2	205.8	90	430	274.4	105	930
3	196.0	90	420	294.0	105	940
4	176.4	90	430	254.8	135	945
5	176.4	90	420	254.8	135	960
6	196.0	105	-	274.4	150	940
7	186.2	120	440	294.0	150	950
8	205.8	75	450	254.8	120	960
9	196.0	105	440	254.8	150	960
10	176.4	105	440	313.6	135	950
11	205.8	-	-	294.0	-	-
12	196.0	-	-	303.8	-	-
13	205.8	-	-	294.0	-	-
14	196.0	-	-	254.8	-	-
15	176.4	-	-	274.4	-	-

ตาราง 24 แสดงปริมาณก๊าซชีวภาพ และ pH จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมชีโรดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน ปริมาตร การหมัก 3.5 ลิตร

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน	
	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH
1	415	7.02	502	7.02
2	430	7.01	500	7.03
3	420	7.01	-	7.05
4	447	7.02	515	7.16
5	460	7.27	525	7.27
6	452	-	533	-
7	445	7.04	522	7.10
8	447	7.01	537	7.07
9	264	7.29	543	7.20
10	449	7.00	548	7.12
11	425	7.13	570	7.27
12	440	7.03	517	7.13
13	428	6.89	500	6.94
14	430	7.02	535	7.12
15	441	7.03	540	7.02
16	495	7.01	530	7.03
17	500	7.02	515	7.07

ตารางต่อ

วันที่ทำการทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน		ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน	
	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลิตร/วัน)	pH
18	505	7.04	520	7.12
19	475	6.97	525	7.12
20	475	7.00	535	6.98
21	465	7.10	540	7.05
22	480	6.99	535	7.10
23	470	7.07	523	7.07
24	495	7.04	532	7.01

ตาราง 25 แสดงปริมาณอินทรีย์สารในรูปซีโอดี กรดอินทรีย์ระเหย และค่าความเป็นด่าง จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.5 กรัมซีโอดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน ปริมาตรการหมัก 3.5 ลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน			ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน		
	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	TVA (mg/l)	T-alk (mg/l)
1	284.2	120	580	431.2	210	1,320
2	254.8	120	600	470.4	210	1,320
3	284.2	120	590	470.4	210	1,340
4	-	135	590	450.8	195	1,335
5	254.8	135	620	431.2	195	1,350
6	254.8	150	610	431.2	195	1,320
7	254.8	150	610	411.6	225	1,330
8	254.8	120	580	450.8	202.5	1,350
9	264.6	150	620	421.4	210	1,320
10	264.6	135	600	411.6	210	1,335
11	235.2	-	-	411.6	-	-
12	235.2	-	-	431.2	-	-
13	274.4	-	-	450.8	-	-
14	-	-	-	470.4	-	-
15	274.4	-	-	431.2	-	-

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ นางสาวสุพรรณิ ชื่อสกุล ชาณประเสริฐ

เกิดวันที่ 9 เดือนธันวาคม พุทธศักราช 2510

สถานที่เกิด อำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร

สถานที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 348 ถนนสุขนรวิท ตำบลตลาดกระทุ่มแบน

อำเภอกระทุ่มแบน จังหวัดสมุทรสาคร 74110

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2532

กศ.บ.วิชาเอกเคมี (เกียรตินิยมอันดับ 2) จากมหาวิทยาลัย

ศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

พ.ศ. 2536

วท.ม.วิชาเอกเคมีชีวภาพ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประสานมิตร

ผลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สาร
ต่อการหมักกากมะเขือเทศแบบอัดอากาศสองขั้นตอน

บทคัดย่อ

ของ

สุพรรณณี ขาญประเสริฐ

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกเคมีชีวภาพ

ตุลาคม 2536

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่อการเกิดก๊าซชีวภาพจากกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ในถังปฏิกรณ์ขนาด 4 ลิตร โดยป้อนอินทรีย์สารแบบกึ่งต่อเนื่อง ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ใช้กากมะเขือเทศผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์ให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ทำการหมักโดยมีระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน พบว่าเมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น ในน้ำหมักที่กรองได้จะมีปริมาณอินทรีย์สารในรูปซีโรดีและ ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้น ที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน น้ำหมักที่ได้มีปริมาณอินทรีย์สารสูงถึง 2,303 มิลลิกรัมซีโรดีต่อลิตร และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 1,116 มิลลิกรัมต่อลิตร น้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ที่มีระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน มาปรับ pH เป็น 7.0 เพื่อใช้ป้อนเป็นวัตถุดิบสำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน ให้มีอัตราการป้อนอินทรีย์สารลงสู่ถังปฏิกรณ์ต่าง ๆ กันคือ 0.2 0.5 และ 0.8 กรัมซีโรดีต่อวัน และมีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน 5 วัน และ 10 วัน ผลการทดลองพบว่าเมื่อให้อัตราการป้อนอินทรีย์สารคงที่ แต่เพิ่มระยะเวลาเก็บกักจาก 2 วัน เป็น 5 วัน และ 10 วัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ การจัดอินทรีย์สารในรูปของซีโรดี และการจัดกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มขึ้น และเมื่อให้ระยะเวลาเก็บกักคงที่แต่เพิ่มอัตราการป้อนอินทรีย์สารจาก 0.2 เป็น 0.5 และ 0.8 กรัมซีโรดีต่อวัน พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพค่อนข้างคงที่ การจัดอินทรีย์สารในรูปซีโรดี และกรดอินทรีย์ระเหยที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.5 กรัมซีโรดีต่อวัน ใกล้เคียงกับที่ 0.8 กรัมซีโรดีต่อวัน แต่สูงกว่าที่ 0.2 กรัมซีโรดีต่อวัน ในการศึกษาต่อมาได้เพิ่มอัตราการป้อนอินทรีย์สารถึง 1.5 กรัมซีโรดีต่อวัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด 0.528 ลิตรต่อวัน หรือ 0.132 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.35 ลิตรต่อกรัมซีโรดีที่เติม หรือ 0.45 ลิตรต่อกรัมซีโรดีที่ถูกทำลาย ก๊าซที่ได้มีปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ก๊าซมีเทนร้อยละ 90.17 และสามารถจัดอินทรีย์สารในรูปซีโรดีได้ร้อยละ 79.54

การศึกษาถึงชนิดและปริมาณของสารตัวกลางที่ถูกใช้ไปในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน ที่มีอัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.8 1.0 และ 1.5 กรัมซีโรดีต่อวัน และระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และ 5 วัน พบว่าสารตัวกลางที่ได้จากขั้นตอนแรกและใช้เป็นขั้วสเตรทสำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนส่วนใหญ่คือ เอทานอล กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก และกรดบิว

ทาริก จะถูกใช้ไปร้อยละ 85-100 นอกจากนี้ได้ศึกษาถึงกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการใช้ซัพสเตรท
ต่างๆ เพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน พบว่าจุลินทรีย์จากถังปฏิกิริยาทุกถังที่ใช้ศึกษาสามารถให้ปริมาณก๊าซ
มีเทนเมื่อใช้กรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 0.1 (โดยปริมาตรต่อปริมาตร) และเปปตोनเข้มข้นร้อยละ
0.1 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) สูงกว่าเมื่อใช้เอธานอลเข้มข้นร้อยละ 0.1 (โดยปริมาตรต่อปริมาตร)
และกลูโคสเข้มข้นร้อยละ 0.1 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) แต่จุลินทรีย์จากถังปฏิกิริยาผลิตก๊าซมีเทน
ไม่สามารถใช้กลูโคสเข้มข้นร้อยละ 1.0 หรือ ใช้ได้น้อยมากในการเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซที่ได้
ส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

EFFECTS OF HYDRAULIC RETENTION TIME AND ORGANIC LOADING RATE
ON TWO-STAGE ANAEROBIC DIGESTION OF TOMATO SOLID WASTES

AN ABSTRACT
BY
SUPUNNEE CHANPRASERT

Presented in partial fulfillment of requirements for the
Master of Science degree in Biological Chemistry
at Srinakharinwirot University

October 1993

This research was carried out to study the effects of hydraulic retention time (HRT) and organic loading rate on the biogas production from two-stage anaerobic digestion of tomato solid waste. The experiments were performed by using 4-litre reactors and semicontinuous feeding. The tomato solid waste mixed with the acidogenic inoculum into the concentration of 10 g/litre was used as raw material in the acidogenic stage. The results of the study at various HRTs of 3, 5 and 10 days, showed that the organic content, in term of mgCOD/litre, in the filtered liquor increased as HRT increased. At 10-day HRT the filtered liquor contained the organic and volatile fatty acid contents is the average of 2,303 mgCOD/litre and 1,116 mg/litre, respectively. This filtered liquor was adjusted to pH 7 and used as feed of the methanogenic stage. The methanogenic stage was carried out at various organic loading rates of 0.2, 0.5 and 0.8 gCOD/day and various HRTs of 2, 5 and 10 days. It was found that when increasing the HRTs at a constant organic loading rate, the rate and the efficiency of gas production increased. Moreover, the organic and volatile fatty acid destruction also increased. When increasing the organic loading rates at a constant HRT, the rate of gas production increased, whereas the efficiency of gas production was rather constant. The organic and volatile fatty acid destruction at the organic loading rate of 0.5 gCOD/day was more or less the same as that of 0.8 gCOD/day but higher than that of 0.2 gCOD/day. When the organic loading rate increased up to 1.5 gCOD/day with 5-day HRT. The maximum gas production, with methane content, in the combined gases between carbondioxide and methane, of 90.17% was obtained at the rate of 0.528 litre/day or 0.132 litre/litre/day. The efficiency of gas production

was 0.35 litre/gCOD added or 0.45 litre/gCOD destroyed . The organic destruction was 79.54%

In the study of the intermediates obtained from the first stage and used as raw materials for the methanogenic stage, in the reactors that carried out with the organic loading rates of 0.8, 1.0 and 1.5 gCOD /day and the HRTs of 2 and 5 days, were found to be ethanol , acetic acid, propionic acid and butyric acid. These intermediates were used in the range of 85-100%. The activity of microorganism in using various substates as carbon source for methane production was also studied. It showed that the methane contents produced by the microorganism from each reactors studied using acetic acid (0.1%v/v) and peptone (0.1%w/v) were higher than those using ethaol (0.1%v/v) and glucose (0.1%w/v). Whereas at 1% (w/v) glucose, the gas produced was only carbondioxide.