

635.64

2634ก

6-3

การหมักกากมะเขือเทศแบบอัดอากาศสองชั้นตอน

E2 ก.ย. 2535

ปริญญานิพนธ์
ของ
วิบูลย์ นุชประมูล

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกเคมีชีวภาพ

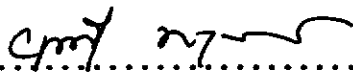
กุมภาพันธ์ 2535

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

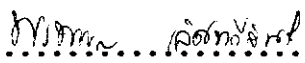
180515

คณะกรรมการควบคุม และคณะกรรมการสอบได้พิจารณาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้แล้วเห็นสมควร
รับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกเคมีชีวภาพ ของมหาวิท-
ยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้

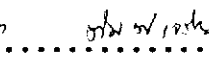
คณะกรรมการควบคุม

..........ประธาน

(ดร.ยุวดี นาคะผดุงรัตน์)

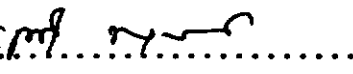
..........กรรมการ

(ผศ.พรพรรณ เลิศทวีสินธุ์)

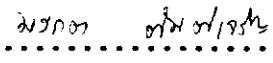
..........กรรมการ

(รศ.ดร.มรกต ตันติเจริญ)

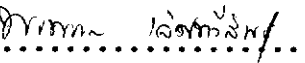
คณะกรรมการสอบ

..........ประธาน

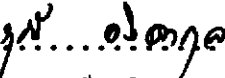
(ดร.ยุวดี นาคะผดุงรัตน์)

..........กรรมการ

(รศ.ดร.มรกต ตันติเจริญ)

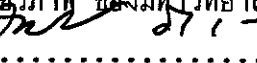
..........กรรมการ

(ผศ.พรพรรณ เลิศทวีสินธุ์)

..........กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(ดร.อรุณี อิงกากุล)

บัณฑิตวิทยาลัยอนุมัติให้รับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกเคมีชีวภาพ ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..........คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศ.ดร.สมพร บัวทอง)

วัน...๕...เดือน...มิ.ย.ค.พ...พ.ศ...๒๕๖๕..

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ก็ด้วยคำแนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง จาก อาจารย์ ดร.ยุวดี นาคะผดุงรัตน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พรพรรณ เลิศทวีสินธุ์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร รองศาสตราจารย์ ดร.มรกต ตันติเจริญ คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ว่าการการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และคณะกรรมการบริหาร ที่กรุณาอนุมัติให้ลาศึกษาต่อระดับ วท.ม. วิชาเอกเคมีชีวภาพ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผู้อำนวยการ และคณะกรรมการสำนักงานคณะกรรมการพัฒนา วิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี (STDB) ที่กรุณาให้ทุนบัณฑิตศึกษาของโครงการวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีเพื่อการพัฒนา

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ภาวิณี ชัยประเสริฐ คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี ที่กรุณาอำนวยความสะดวกในการตรวจวิเคราะห์ตัวอย่าง ก๊าซชีวภาพ

ผู้วิจัยขอโน้มรำลึกถึงพระคุณบิดา มารดา และผู้มีพระคุณทั้งที่มีชีวิตอยู่ขณะนี้ และที่ล่วงลับไปแล้ว ขอขอบคุณภรรยา และเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจสนับสนุน ตลอดจนผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีได้แจ้ง นามไว้ ณ ที่นี้ ซึ่งมีส่วนช่วยเหลือให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงได้ด้วยดี

วิบูลย์ นุชประมูล

มีนาคม 2535

บริษัทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยสาขาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ และเทคโนโลยีชีวภาพ

จาก

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี (STDB)

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ	1
	คำนำ	1
	หลักการผลิตก๊าซมีเทน	2
	กระบวนการทางเคมี	2
	กระบวนการทางจุลชีววิทยา	4
	พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการผลิตก๊าซมีเทน	5
	ลักษณะถังปฏิกรณ์	5
	อุณหภูมิ	6
	pH	6
	ความเป็นด่าง	7
	อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน	8
	ส่วนประกอบของของแข็ง	8
	ปริมาณน้ำ	9
	สารพิษ	9
	ระยะเวลาเก็บกัก	9
	อัตราการป้อนอินทรีย์สาร	10
	การหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอน	10
	การผลิตก๊าซมีเทนจากกากมะเขือเทศ	11
	องค์ประกอบของกากมะเขือเทศ	11
	การเริ่มเลี้ยงจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมัก	11
	การผลิตก๊าซมีเทนในระดับห้องปฏิบัติการ	12
	การผลิตก๊าซชีวภาพในระดับโรงงานต้นแบบ	12
	วัตถุประสงค์	13
	ประโยชน์ของงานวิจัย	13

บทที่	หน้า
2 วิธีการวิจัย	14
อุปกรณ์	14
ถังปฏิกรณ์ผลิตรก	14
ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน	14
อุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ	15
ถังเก็บก๊าซ	15
ระบบการผลิตก๊าซมีเทน	15
เชื้อจุลินทรีย์	15
เชื้อแบคทีเรียผสมผลิตรกอินทรีย์	15
เชื้อแบคทีเรียที่ใช้ผลิตก๊าซมีเทน	16
กากมะเขือเทศแห้ง	16
วิธีทดลอง	16
การหมักเพื่อให้ได้กรคอินทรีย์	16
การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน	17
การหมักเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทน	17
การเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์	18
วิธีวิเคราะห์	18
การวิเคราะห์ปริมาณกรคอินทรีย์, alkalinity	18
การวิเคราะห์ค่าซีโอดี chemical oxygen demand	18
การวิเคราะห์ความชื้น	18
การวิเคราะห์ของแข็ง	19
การวัด pH ของของเหลว	19
การวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ	19
การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ	19

บทที่	หน้า
3 ผลการวิจัย	20
ผลการหมักกากมะเขือเทศจากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์	20
ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	21
ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ	21
ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ	22
ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่อปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในถังปฏิกรณ์	24
ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่อปริมาณ alkalinity ในน้ำหมักที่ออกจาก ถังปฏิกรณ์	25
ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่อ pH ของน้ำหมักในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน ..	26
ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่อปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CO ₂ และ CH ₄	27
ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อการขจัดอินทรีย์สารในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซ มีเทน	28
ผลของระยะเวลาเก็บกัก ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	30
ผลของระยะเวลาเก็บกัก ต่อลักษณะของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน ..	31
ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการป้อนอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกัก การผลิตก๊าซ ชีวภาพ คุณภาพน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ และการขจัดอินทรีย์สาร	32
4 สรุปอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	36
สรุปและอภิปรายผล	36
การผลิตกรดอินทรีย์	36
การผลิตก๊าซชีวภาพ	36
ข้อเสนอแนะ	38
บรรณานุกรม	40
ภาคผนวก	44
ประวัติผู้วิจัย	61

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ลักษณะทางกายภาพของถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน	14
2 แผนการเริ่มเลี้ยงจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน	17
3 ความถี่ในการวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้ความถี่ในการวิเคราะห์ ต่าง ๆ กัน	18
4 ผลการหมักกากมะเขือเทศ ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน	20
5 การผลิตก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน	29
6 ผลของระยะเวลาเก็บกัก ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ	30
7 ผลของระยะเวลาเก็บกัก ต่อลักษณะของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซ มีเทน	31
8 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการป้อนอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกัก การผลิต ก๊าซชีวภาพ คุณภาพน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ และการขจัดอินทรีย์สาร	34
9 ผลการทดลองผลิตก๊าซมีเทน จากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน โดยกระบวนการหมักแบบอัดอากาศสองขั้นตอนระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน อัตรา การป้อนอินทรีย์สาร 4.19 กรัมซีไอที ต่อลิตร ต่อวัน	45
10 ผลการทดลองผลิตก๊าซมีเทน จากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน โดยกระบวนการหมักแบบอัดอากาศสองขั้นตอนระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตรา การป้อนอินทรีย์สาร 0.15 กรัมซีไอที ต่อลิตร ต่อวัน	47
11 ผลการทดลองผลิตก๊าซมีเทน จากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน โดยกระบวนการหมักแบบอัดอากาศสองขั้นตอนระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตรา การป้อนอินทรีย์สาร 0.27 กรัมซีไอที ต่อลิตร ต่อวัน	48
12 ผลการทดลองผลิตก๊าซมีเทน จากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน โดยกระบวนการหมักแบบอัดอากาศสองขั้นตอนระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตรา การป้อนอินทรีย์สาร 0.67 กรัมซีไอที ต่อลิตร ต่อวัน	49
13 ผลการทดลองผลิตก๊าซมีเทน จากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน โดยกระบวนการหมักแบบอัดอากาศสองขั้นตอนระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตรา การป้อนอินทรีย์สาร 0.88 กรัมซีไอที ต่อลิตร ต่อวัน	50

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
14 ผลการทดลองผลึกกำขี้เเทน จากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลึกกำขี้เเทน โดยกระบวนการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอนระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.70 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน	51
15 ผลการทดลอง ผลึกกำขี้เเทนจากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลึกกำขี้เเทน โดยกระบวนการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.13 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน	53
16 ผลการทดลอง ผลึกกำขี้เเทนจากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลึกกำขี้เเทน โดยกระบวนการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.19 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน	54
17 ผลการทดลอง ผลึกกำขี้เเทนจากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลึกกำขี้เเทน โดยกระบวนการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.26 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน	55
18 ผลการทดลอง ผลึกกำขี้เเทนจากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลึกกำขี้เเทน โดยกระบวนการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.31 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน	56
19 ผลการทดลอง ผลึกกำขี้เเทนจากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลึกกำขี้เเทน โดยกระบวนการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.14 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน	57
20 ผลการทดลอง ผลึกกำขี้เเทนจากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลึกกำขี้เเทน โดยกระบวนการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.22 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน	59

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ระบบการผลิตก๊าซมีเทนที่ใช้ในการทดลอง	15
2 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ	21
3 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อเทียบกับ กรัมซีโอไซด์ที่เติมเข้าไป	22
4 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อเทียบกับ กรัมซีโอไซด์ที่ถูกทำลาย	23
5 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในถังปฏิกรณ์	24
6 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อปริมาณ alkalinity -ในน้ำหมักที่ออกจาก ถังปฏิกรณ์	25
7 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อ pH ของน้ำหมักในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน ..	26
8 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CO_2 และ CH_4	27
9 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อการขจัดอินทรีย์สารในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน .	28

บทที่ 1

บทนำ

คำนำ

มะเขือเทศเป็นพืชเศรษฐกิจชนิดหนึ่งของประเทศไทย ระหว่างปี พ.ศ. 2530-2532 ผลผลิตมะเขือเทศทั้งหมดในประเทศไทยเฉลี่ยปีละประมาณ 63,562 ตัน ใช้พื้นที่เพาะปลูกเฉลี่ยประมาณ 38,226 ไร่ และปริมาณมะเขือเทศส่งออกในปี พ.ศ. 2530, 2531 และ 2532 มีจำนวน 3,753 ตัน, 2,556 และ 1,538 ตัน ตามลำดับ (ส่งเสริมการเกษตร, กรม. 2530; ส่งเสริมการเกษตร, กรม. 2531 และ 2532; ส่งเสริมการเกษตร, กรม. 2528-2532) ส่วนที่เหลือจากการส่งออก ส่วนหนึ่งใช้เพื่อการบริโภคผลสดและอีกส่วนหนึ่งถูกนำเข้าสู่วิสาหกิจเพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปต่างๆ เช่น มะเขือเทศลูกเปลือก มะเขือเทศเนื้อแท้ เครื่องคั้นน้ำมะเขือเทศ มะเขือเทศเข้มข้น ซอสมะเขือเทศ มะเขือเทศฝัก มะเขือเทศผง มะเขือเทศกวน และมะเขือเทศเทศทอง เป็นต้น ขั้นตอนการทำผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปจากมะเขือเทศจะมีของเสียจากโรงงานอันได้แก่ ผลเน่าเสีย ผลมีรอยตำหนิทั้ง และส่วนกากคือเปลือกและเมล็ดที่ถูกแยกออกจากน้ำและเนื้อ หลังจากผ่านการบดด้วยเครื่องโม่แล้ว (เกษม พิลิก. 2531) ของเสียเหล่านี้จะมีปริมาณร้อยละ 9 ของปริมาณมะเขือเทศที่ใช้เป็นวัตถุดิบ (Hills and Dykstra. 1980) สำหรับโรงงานที่ตั้งอยู่ใกล้แหล่งที่มีการเลี้ยงสัตว์ จะนำของเสียไปใช้เลี้ยงสัตว์แต่โรงงานที่ตั้งไกลออกไป มักจัดการด้วยการนำไปกองทิ้งปล่อยให้มีการย่อยสลายไปเองตามธรรมชาติ หรืออาจฝังให้แห้ง แล้วเผาทั้งเป็นครั้งคราว (Lane. 1984) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น ส่งกลิ่นเน่าเหม็น เป็นแหล่งเพาะพันธุ์เชื้อโรคและพาหะ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของคนและสัตว์เลี้ยงที่อาศัยอยู่ในบริเวณใกล้เคียง ได้มีการศึกษาวิจัยถึงการนำเอาพลังงานเชื้อเพลิงจากกากเหล่านี้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่งวิธีหนึ่งที่สามารถปฏิบัติได้คือ การผสมกากกับน้ำในปริมาณที่เพียงพอ แล้วหมักแบบอับอากาศ ในระหว่างการหมักจุลินทรีย์จะย่อยสลายอินทรีย์สารโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กละลายน้ำ และมีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น ก๊าซชีวภาพนี้จุดไฟติดและมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ (Stafford, Horton and Hawkes. 1979) ก๊าซมีเทนเป็นก๊าซที่มีประโยชน์ โดยนอกจากจะใช้เป็นเชื้อเพลิงแล้วยังสามารถนำมาใช้ในการเตรียมก๊าซสังเคราะห์ ($\text{CO} + \text{H}_2$) ที่มีประโยชน์ในอุตสาหกรรมเคมี เช่น การผลิตเมทานอล การผลิตแอมโมเนียโดยใช้ไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้น การนำเมทานอลมาเตรียมฟอร์มัลดีไฮด์ที่ใช้ในการทำพลาสติก การสังเคราะห์คาร์บอนไดออกไซด์ในอุตสาหกรรม เป็นต้น (Ebbing. 1984)

หลักการผลิตก๊าซมีเทน

ก๊าซมีเทน เกิดจากการย่อยสลายอินทรีย์สารต่างๆ เช่น ของเสียจากปศุสัตว์ เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม ของเสียเหล่านี้มีสารอาหารที่สำคัญคือ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน แบคทีเรียอับอากาศ (anaerobic bacteria) จะย่อยสลาย อินทรีย์สารเหล่านี้ ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีเกิดขึ้นมากมาย ซึ่งกลไกละเอียดยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แบคทีเรียอับอากาศหลายกลุ่ม หลายชนิดจะทำงานอย่างผสมผสานกัน เพื่อให้ได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบสำคัญ

กระบวนการทางเคมี

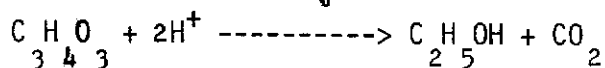
การย่อยสลายอินทรีย์สาร และเปลี่ยนให้เป็นก๊าซมีเทนนั้นจะเกิดปฏิกิริยาที่ซับซ้อนหลายระดับชั้น ซึ่งสามารถแยกเป็นขั้นตอนหลักได้ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการเกิด กรด (acidogenic stage) ขั้นตอนอินทรีย์สารโมเลกุลใหญ่ จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก ส่วนอีกขั้นตอนหนึ่ง คือการเกิดก๊าซมีเทน (methanogenic stage) ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์

1. ขั้นตอนการเกิด กรดอินทรีย์

ขั้นตอนการเกิดกรดอินทรีย์นี้ เป็นการทำงานที่ประสานซับซ้อนเป็นลูกโซ่ ของแบคทีเรียพวก facultative และ obligate anaerobe โดยจะปล่อยเอนไซม์ออกมานอกเซลล์ เพื่อไฮโดรไลซ์โมเลกุลที่ซับซ้อนของคาร์โบไฮเดรต ให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเล็กละลายน้ำและกรดอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดแลคติก เมธานอล เอทานอล เป็นต้น โมเลกุลของโปรตีนจะถูกย่อยสลายให้เป็นกรดอะมิโน และไขมันจะถูกย่อยสลายให้เป็นกรดไขมัน และกลีเซอรอล

ในการหมัก การย่อยสลายกลูโคส จะได้กรดไพรูวิกและไฮโดรเจนอิสระที่อยู่ในรูปของ hydrogen carrier complex ไฮโดรเจนอิสระรีดิวซ์กรดไพรูวิกต่อ ได้เป็นกรดโพรพิโอนิก ขณะเดียวกัน กรดไพรูวิกอาจถูกรีดิวซ์ ให้เป็นเอทานอลได้เช่นกัน โดยวิธีที่แตกต่างกัน เช่น

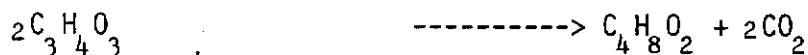
สมการ การเปลี่ยนกรดไพรูวิก เป็นเอทานอล



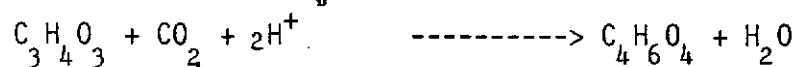
สมการ การเปลี่ยนกรดไพรูวิก เป็นกรดแลคติก



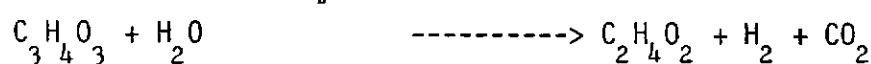
สมการ การเปลี่ยนกรดไพรูวิก เป็นกรดบิวไทริก



สมการ การเปลี่ยนกรดไพรูวิก เป็นกรดซักซินิก



สมการ การเปลี่ยนกรดไพรูวิก เป็นกรดอะซีติก

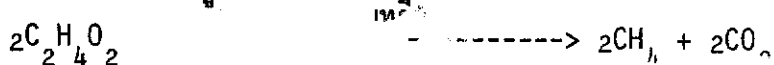


สรุป ผลผลิตที่ได้ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์คือ กรดอะซีติก กรดโพรพิโอนิก กรดแลคติก กรดบิวไทริก กรดซักซินิก เอทานอล คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน

2. ขั้นตอนการเกิดก๊าซมีเทน

กรดอินทรีย์

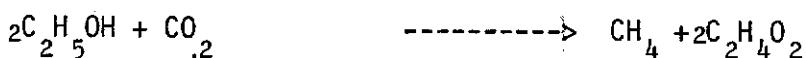
การเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนแรก ก่อให้เกิด ผลิตภัณฑ์กลาง (intermediate product) ซึ่งจะถูกนำมาใช้ในการผลิตก๊าซมีเทน โดยพบว่า กรดอะซีติก เป็นสารประกอบที่พบที่สูงสุดในการสร้างก๊าซมีเทน การไฮโดรไลซ์กรดอะซีติก จะเกิดก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกรีดิวซ์ต่อไป



สมการ การเปลี่ยนเมทานอล เป็นก๊าซมีเทน



สมการ การเปลี่ยนเอทานอล เป็นก๊าซมีเทน



สมการ การเปลี่ยนกรดไขมัน เป็นก๊าซมีเทน



ก๊าซมีเทน ที่เกิดจากการย่อยสลายอินทรีย์สารนั้น พบว่าร้อยละ 72 ได้มาจากกรดอะซีติก และอีกร้อยละ 28 ได้จากกรดอินทรีย์อื่น (McCarty, 1964A; Jeris and McCarty, 1965)

กระบวนการทางจุลชีววิทยา

การย่อยสลายกากอินทรีย์สารอย่างมีประสิทธิภาพ ให้เป็นก๊าซมีเทนเป็นกลไกร่วม และผสมผสานกันในการทำงานของแบคทีเรียย่อยสลายที่ใช้คาร์บอนเป็นแหล่งอาหาร แบคทีเรียเหล่านี้สามารถแยกออกได้เป็น 4 กลุ่มคือ

1. ไฮโดรไลติกแบคทีเรีย (hydrolytic bacteria)

แบคทีเรียกลุ่มนี้จะทำหน้าที่ย่อยสลายอินทรีย์สารโมเลกุลใหญ่ เช่น โพลีแซคคาไรด์ ไขมัน และโปรตีน ให้มีขนาดเล็กลง เช่น กรดอะซิติก กรดอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่กว่ากรดอะซิติก เมทานอล เอทานอล ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น

2. อะซิโตเจนิกแบคทีเรีย (acetogenic bacteria)

แบคทีเรียกลุ่มนี้ทั้งที่เป็น obligate anaerobe และ facultative anaerobe จะเป็นกลุ่มที่สร้างไฮโดรเจนและอะซิเตต จากการลดคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น กรดบิวไทริก กรดโพรพิโอนิก และสารประกอบที่มีคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ เช่น อะโครพานอล เป็นต้น

3. โฮโมอะซิโตเจนิกแบคทีเรีย (homoacetogenic bacteria)

แบคทีเรียกลุ่มนี้จะเปลี่ยนอินทรีย์สารโมเลกุลเล็กให้เป็นกรดอะซิติก

4. มีเทนโนเจนิกแบคทีเรีย (methanogenic bacteria)

แบคทีเรียกลุ่มนี้ จะเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ สารประกอบที่มีคาร์บอนหนึ่งอะตอม (เช่น เมทานอล คาร์บอนเมทานอลไฮไดรด์ เมทิลลาไมด์) และอะซิเตต ให้เป็นก๊าซมีเทน

มีเทนโนเจนิกแบคทีเรีย มีหลายชนิดแตกต่างกันไป ทั้งด้านรูปร่างของเซลล์ความสามารถในการดำรงชีพและการเจริญเติบโต แม้ว่าแบคทีเรียกลุ่มนี้มีความหลากหลายแต่ก็มีสมบัติร่วมกันคือ สามารถดำรงชีวิตได้ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนได้ มีเทนโนเจนิกแบคทีเรีย สามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม คือ

- (1) methanococcus
- (2) methanobacterium
- (3) methanosarcina
- (4) methanospirillum
- (5) methanobacillus

ตัวอย่างของมีเทนโนเจนิกแบคทีเรีย ได้แก่ Methanococcus vanniellii, Methanosarcina formicum, Methanosarcina thermoautotrophicum, Methanosarcina barkeri, และ Methanospirillum hungatei เป็นต้น (TATA. 1985)

แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดอินทรีย์ ซึ่งเป็น facultative anaerobe จะมีความสำคัญในการช่วยปรับสภาพแวดล้อม ให้เหมาะสมต่อมีเทนโนเจนิกแบคทีเรีย (ทรัพย์ วิถีธรรม. 2528) โดยการดึงออกซิเจนที่มีอยู่ในระบบไปใช้ ทำให้ภายในถังปฏิกรณ์มีสภาพอับอากาศมากขึ้นเหมาะต่อการเจริญเติบโตของมีเทนโนเจนิกแบคทีเรีย และมีเทนโนเจนิกแบคทีเรียจะดึงไฮโดรเจนในถังปฏิกรณ์ให้ต่ำลง และไม่เป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่สร้างกรดอินทรีย์อื่นๆ (Tanticharoen. 1981)

พารามิเตอร์ ที่เกี่ยวข้องในการผลิตก๊าซมีเทน

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการผลิตก๊าซมีเทน มีหลายอย่าง เช่น ลักษณะถังปฏิกรณ์ อุณหภูมิ pH alkalinity อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน ส่วนประกอบของของแข็ง ปริมาณของน้ำ สารพิษ ระยะเวลาเก็บกัก อัตราการป้อนอินทรีย์สาร และวิธีการหมัก เป็นต้น

ลักษณะถังปฏิกรณ์

จุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ มีทั้งที่เป็น facultative และ obligate anaerobe พวก facultative anaerobe สามารถเปลี่ยนกลไก สลับไปมาระหว่างการใช้และไม่ใช้ออกซิเจนอิสระได้ แบคทีเรียพวกนี้มักที่อยู่ในกลุ่มไฮโดรไลติกแบคทีเรีย และอะซิโตเจนิกแบคทีเรีย แต่สำหรับ มีเทนโนเจนิกแบคทีเรีย เป็น obligate anaerobe จุลินทรีย์ชนิดนี้ จะเจริญเติบโตได้ดีเมื่อปราศจากออกซิเจนอิสระ ฉะนั้นถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตก๊าซมีเทน จะต้องเป็นถังที่อากาศเข้าออกไม่ได้เพื่อให้เป็นสภาพอับอากาศ

อุณหภูมิ

อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทน มีอยู่สองช่วงคือช่วงอุณหภูมิปานกลางอยู่ระหว่าง 21°C - 45°C และช่วงอุณหภูมิสูงอยู่ระหว่าง 55°C - 70°C จากการทดลองย่อยอินทรีย์สาร โดยการหมักในถังปฏิกรณ์หมักแบบอับอากาศชั้นตอนเดียว โดยใช้อุณหภูมิ 20°C 30°C และ 50°C พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น อัตราการย่อยสลายสารโปรตีน และอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจะเพิ่มขึ้น (Maly and Fadrus. 1971) และมีรายงานที่อุณหภูมิ 54°C ถึงปฏิกรณ์แบบอับอากาศสามารถรับอัตราการป้อนอินทรีย์สารได้เป็น 2.4 เท่าของการหมักที่อุณหภูมิ 38°C แต่ประสิทธิภาพในการขจัดอินทรีย์สารใกล้เคียงกัน (Ono. 1965) นอกจากนี้การลดหรือเพิ่มอุณหภูมิในถังปฏิกรณ์แบบอับอากาศอย่างกะทันหันเพียง 2°C - 3°C จะมีผลกระทบต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (Kotze, Thiel and Hattingh. 1969)

pH

แบคทีเรียอับอากาศต้องการสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมในการทำงาน เช่นพวกไฮโดรไลติก และ อะซิโตเจนิก แบคทีเรีย จะทำงานได้ดีในสภาพแวดล้อมที่เป็นกลางถึงเป็นกรด คือ pH 5.5 หรือต่ำกว่า ในขณะที่ มีเทนโนเจนิกแบคทีเรียชอบสภาพแวดล้อมที่เป็นกลางถึงเป็นด่างเล็กน้อย โดยมี pH อยู่ระหว่าง 6.8-8.5 (TATA. 1985) และถ้า pH ของกระบวนการหมักแบบอับอากาศต่ำกว่า 6.5 จะยับยั้งการเจริญเติบโตของมีเทนโนเจนิกแบคทีเรีย (TATA. 1985) นอกจากนี้ยังพบว่า ในระบบถังปฏิกรณ์แบบอับอากาศที่มี pH ต่ำกว่า 6.5 และปริมาณความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ประมาณ 5,000 มก.ต่อลิตร จะไม่มีก๊าซเกิดขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับถังปฏิกรณ์หมักแบบอับอากาศ ที่มี pH อยู่ระหว่าง 6.8-7.2 และมีปริมาณความเข้มข้นของกรดอินทรีย์เท่าเดิม พบว่ามีก๊าซเกิดขึ้น เมื่อปริมาณความเข้มข้นของกรดอินทรีย์เพิ่มจากเดิมเป็น 7,000 มก.ต่อลิตรและ pH อยู่ระหว่าง 6.8-7.2 พบว่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณมากขึ้น นอกจากนี้ ถ้า pH ของระบบต่ำกว่า 6.2 จะทำให้เกิดไฮโดรเจนอิสระจำนวนมากภายในระบบถังปฏิกรณ์ ซึ่งเป็นพิษอย่างรุนแรงต่อมีเทนโนเจนิกแบคทีเรีย ทำให้ระบบเสียสมดุลและการทำงานของระบบล้มเหลว สำหรับการเริ่มเลี้ยงแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ใหม่ ของผสมที่ใช้หมักยังไม่ได้รับระบบบัฟเฟอร์ ก็สามารถช่วยได้ด้วยการเติมสารเคมีลงไป หรือโดยการเติมตะกอน (sludge) ที่ได้จากถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนลงไป (Dague, Hopkins and Tonn. 1970)

ความเป็นด่าง (alkalinity)

โมเลกุลของกรดอ่อน และด่างอ่อนที่ไม่แตกตัวเป็นไอออน (unionized) สามารถซึมผ่านเข้าผนังเซลล์ของแบคทีเรียได้รวดเร็วมากทำให้ pH ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์เปลี่ยนแปลงไป เป็นเหตุให้จุลินทรีย์ตายได้ (Kotze and others 1969) ความเป็นด่างในถังปฏิกรณ์แบบอับอากาศส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ให้แก่ระบบ ถ้าอัตราส่วนของกรดอินทรีย์ต่อสภาพความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนต มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีความเป็นบัฟเฟอร์สูงหากอัตราส่วนนี้ สูงกว่า 0.8 แสดงว่าความเป็นบัฟเฟอร์ของระบบต่ำมาก pH อาจลดลงได้อย่างรวดเร็ว เมื่อปริมาณของกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยก็ตาม ส่วนใหญ่ความเป็นด่างในรูป ไบคาร์บอเนต จากเกลือแอมโมเนียม เช่น แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต และแอมโมเนียมอะซิเตต เกิดจากการย่อยสลายสารประกอบพวกโปรตีน ค่าความเป็นด่างไบคาร์บอเนต (bicarbonate alkalinity) สามารถหาได้จากสมการ (Albertson. 1961; McCarty. 1964B)

$$BA = TA - (0.85) (0.833) TVA$$

โดยที่ BA = ความเข้มข้นของด่างไบคาร์บอเนต (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูป $CaCO_3$)

TA = ความเข้มข้นของด่างทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูป $CaCO_3$)

TVA = ความเข้มข้นทั้งหมดของกรดอินทรีย์ (มิลลิกรัมต่อลิตรในรูป CH_3COOH)

หากภายในถังปฏิกรณ์แบบอับอากาศ มีความเป็นด่างไม่เพียงพอที่จะควบคุม pH จำเป็นจะต้องเติมสารเคมีเข้าไปเพื่อให้ระบบมีความเป็นบัฟเฟอร์สูงขึ้น สารเคมีที่ใช้มีอยู่หลายประเภท เช่น ด่างแก่ และสารประกอบคาร์บอเนต ซึ่งสารเคมีแต่ละประเภทจะมีข้อดีข้อเสียต่างกันไป พบว่าโซเดียมไบคาร์บอเนต เป็นสารเคมีที่ดีที่สุดในการควบคุม pH เพราะสามารถละลายน้ำได้ดีและให้ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตโดยตรง แต่จะมีราคาแพงกว่าสารเคมีชนิดอื่นๆ (Kirsch and Sykes. 1971) อย่างไรก็ตาม รายงานการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานที่ใช้มะเขือเทศเป็นวัตถุดิบ โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบตะกอนจุลินทรีย์อับอากาศไหลขึ้น และใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการปรับ pH แทนโซเดียมไบคาร์บอเนต ปรากฏว่า แคลเซียมไฮดรอกไซด์ สามารถรักษาความเป็นบัฟเฟอร์ได้ดี และยังทำให้จุลินทรีย์ตกตะกอนได้ดีขึ้นจึงเป็นการกักตะกอนจุลินทรีย์ไว้ในถังปฏิกรณ์ให้นานขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้ระบบมีความสามารถในการรับอัตราการป้อนอินทรีย์สารได้เพิ่มขึ้น (Lettinga, Van Velsen, Hobma, de Zeeuw and Klapwijk. 1980)

การเปลี่ยนแปลง pH ในถังปฏิกรณ์แบบอับอากาศ จะขึ้นกับสภาพความเป็นต่างความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ และขึ้นอยู่กับปริมาณของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้น โดยความสัมพันธ์ระหว่าง pH สภาพความเป็นต่างไบคาร์บอเนต และปริมาณร้อยละของคาร์บอนไดออกไซด์จะแสดงได้ดังสมการ (Albertson. 1961)

$$\text{pH} = 5.14 - \log (\% \text{CO}_2) + \log (\text{HCO}_3^-)$$

ความเข้มข้นของต่างไบคาร์บอเนตที่เหมาะสม สำหรับการหมักแบบอับอากาศ ควรน้อยกว่า 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อจะรักษาระดับ pH ไม่ให้ต่ำลงจนเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ในระบบ (Mc Carty. 1964B)

อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน

แบคทีเรียผลิตกรดอินทรีย์และแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทนต้องการธาตุอาหารที่มีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน ระหว่าง 20 ถึง 30 หรืออัตราส่วนของซีโอซี ต่อไนโตรเจน ระหว่าง 53 ถึง 80 (Koster. 1984) แต่เนื่องจากกากอินทรีย์สารหลายชนิดมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่างกัน ดังนั้น เพื่อให้ได้ธาตุอาหารที่เหมาะสม จึงต้องผสมกากอินทรีย์สารที่ใช้บางชนิดเข้าด้วยกัน ให้มีอัตราส่วนของ คาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 30 (TATA. 1985) อย่างไรก็ตามมีรายงานว่า การหมักกากอินทรีย์สารที่มีอัตราส่วนของ คาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 16 นั้น ระบบก็ยังคงทำงานได้ดี แต่ถ้าอัตราส่วนน้อยกว่านี้จะทำให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียมากขึ้น และจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ได้ (Sanders and Bloodgood. 1965)

ส่วนประกอบของของแข็ง

ปริมาณและคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ จะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของกากอินทรีย์สารที่ใช้ เช่น ปริมาณของแข็งระเหย (volatile solid;vs) และถาวร (fixed solid) ของแข็งระเหยจะมีส่วนประกอบเป็น C, H, O, N และอื่นๆ ซึ่งเป็นส่วนที่ถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ แต่กากอินทรีย์สารบางพวก เช่น ลิกนิน (lignin) จะให้ปริมาณของของแข็งระเหยสูง แต่ย่อยสลายยากและให้ก๊าซชีวภาพน้อย (TATA. 1985)

ปริมาณน้ำ

ปริมาณน้ำของวัตถุดิบที่ใช้ป้อนเข้าไปในถังปฏิกรณ์ ควรจะมีร้อยละ 90 ของน้ำหนักของส่วนประกอบทั้งหมด ถ้าปริมาณน้ำมากเกินไป อัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่อปริมาตรถังปฏิกรณ์จะลดลง แต่ถ้าปริมาณน้ำน้อยไป เช่น ลดลงเหลืออยู่ระหว่างร้อยละ 60-68 ของน้ำหนักทั้งหมดจะเป็นผลให้มีการสะสมของกรครินทรีย์ ซึ่งจะไปยังยังการผลิตก๊าซมีเทนได้ (TATA. 1985)

สารพิษ

แอมโมเนียที่มีความเข้มข้น ยาบปฏิชีวนะ ยาปราบวัชพืช ผงซักฟอก โลหะหนัก (เช่น โครเมียม ทองแดง นิกเกิล และ สังกะสี เป็นต้น) จะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ และมีผลกระทบต่อการเกิดก๊าซมีเทน เช่น ในกรณีที่ อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน มีค่าต่ำจะทำให้มีความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงขึ้น ซึ่งอาจอยู่ในรูปของ แอมโมเนีย หรือแอมโมเนียมไอออนขึ้นกับ pH ในถังปฏิกรณ์ ถ้า pH สูงกว่า 7.2 จะเกิดก๊าซแอมโมเนียมากทำให้เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ (Mc Carty. 1964b) ยาบปฏิชีวนะที่ใช้ในอาหารสัตว์ หรือฉีดยาเข้าไปในสัตว์ จะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้ผลิตก๊าซมีเทนได้ไม่เต็มที่ ถ้าใช้ของเสียจากปศุสัตว์ที่ปนเปื้อนด้วยยาปฏิชีวนะเป็นวัสดุป้อน สารเคมีที่มีอยู่ในอินทรีย์สารที่ใช้ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ควรมีค่าไม่เกินที่กำหนดคือ ซัลเฟตไม่เกิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โซเดียมคลอไรด์ไม่เกิน 40,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โซเดียมไม่เกิน 5,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ทองแดงไม่เกิน 100 มิลลิกรัมต่อลิตร โครเมียมไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร นิกเกิลไม่เกิน 500 มิลลิกรัมต่อลิตร โซเดียมไนต์ไม่เกิน 25 มิลลิกรัมต่อลิตร แอมโมเนียไม่เกิน 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โพแทสเซียมไม่เกิน 4,500 มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมไม่เกิน 4,500 มิลลิกรัมต่อลิตร แมกนีเซียมไม่เกิน 1,500 มิลลิกรัมต่อลิตร ซัลไฟด์ไม่เกิน 200 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นต้น (TATA. 1985)

ระยะเวลาเก็บกัก (hydraulic retention time, HRT)

ระยะเวลาเก็บกักหมายถึง ค่าเฉลี่ยของจำนวนวัน ที่หนึ่งหน่วยปริมาตรของส่วนผสมที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์จะยังคงอยู่ในถังปฏิกรณ์ ระยะเวลาเก็บกักนี้ สามารถทำได้โดยการหาร ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ด้วยปริมาตรของอินทรีย์สารที่ดึงออกจากถังปฏิกรณ์ ต่อหน่วยเวลา ระยะ

เวลาเก็บกักเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการออกแบบถังปฏิกรณ์ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของการหมัก เป็นต้น ถ้าระยะเวลาเก็บกักสั้นมาก แบคทีเรียจะถูกชะออกจากถังปฏิกรณ์อย่างรวดเร็วการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียเกิดขึ้นน้อย ซึ่งเป็นผลให้จำนวนแบคทีเรียไม่คงที่ ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าระยะเวลาเก็บกักคือเวลาสั้นที่สุดที่ต้องใช้ เพื่อให้มีเทนโนเจนิกแบคทีเรียสามารถเพิ่มจำนวนให้มีปริมาณคงที่ตามต้องการ ขณะเดียวกันการใช้ระยะเวลาเก็บกักที่นานจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย เนื่องจากต้องสร้างถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ ระยะเวลาเก็บกักค่าที่สุดที่แบคทีเรียสามารถอยู่ได้ในถังปฏิกรณ์จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และชนิดของแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ ส่วนชนิดของแบคทีเรีย จะขึ้นอยู่กับประเภทของสารอาหารที่ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ (TATA. 1985)

อัตราการป้อนอินทรีย์สาร (organic loading rate, OLR)

อัตราการป้อนอินทรีย์สาร คือน้ำหนักของของแข็งระเหยที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ในแต่ละวันหารด้วยปริมาตรของถังปฏิกรณ์ อัตราการป้อนอินทรีย์สารนี้เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง เพราะว่าถ้าอัตราการป้อนอินทรีย์สารสูง จะมีผลต่อ pH ในถังปฏิกรณ์ เนื่องจากอินทรีย์สารจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอินทรีย์โดยแบคทีเรียผลิตกรด ทำให้มีการสะสมของกรดอินทรีย์มากขึ้น pH ในถังปฏิกรณ์จะลดลง ทำให้เกิดผลกระทบต่อการทำงานของมีเทนโนเจนิกแบคทีเรีย เป็นผลให้การผลิตก๊าซมีเทนต่ำไปด้วย (TATA. 1985)

การหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอน

การหมักแบบอับอากาศดั้งเดิม เป็นแบบขั้นตอนเดียว โดยรวมการทำงานของแบคทีเรียผลิตกรด และแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทนไว้ด้วยกัน การหมักแบบนี้พบว่า มีเทนโนเจนิกแบคทีเรียจะเจริญช้ากว่าแบคทีเรียผลิตกรดอินทรีย์ และอาจเกิดการชะล้างของมีเทนโนเจนิกแบคทีเรียออกจากถังปฏิกรณ์ได้ ทำให้การหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทนในถังปฏิกรณ์เกิดการล้มเหลวได้ง่าย การแยกขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ และการผลิตก๊าซมีเทนออกจากกันทำให้ระยะเวลาเก็บกักในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์สั้นลง และในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน จะสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้มากขึ้นอย่างชัดเจน (Lo, Liao and Balley. 1986) นอกจากนี้จะทำให้สามารถควบคุมระบบได้ง่าย และสะดวกในการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ และลดระยะเวลาเก็บกักให้สั้นลงด้วย

การผลิตก๊าซมีเทนจากกากมะเขือเทศ

องค์ประกอบของกากมะเขือเทศ

จากรายงานของ ฮิลล์ และคิกสตรา (Hills and Dykstra, 1980) พบว่ากากมะเขือเทศจะประกอบไปด้วยของแข็งระเหยร้อยละ 95.0 ค่าซีไอดีเท่ากับ 125.0 กรัมต่อลิตร ค่าซีไอดีต่อของแข็งระเหยเท่ากับ 1.31 ค่า Kjeldahl nitrogen เท่ากับร้อยละ 4.38 ของของแข็งทั้งหมด ค่าฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 0.69 ของของแข็งทั้งหมด และค่าโปแตสเซียมเท่ากับร้อยละ 0.4 ของของแข็งทั้งหมด จากรายงานของ ฮิลล์ และนาคาโน (Hill and Nakano, 1984) พบว่ากากมะเขือเทศประกอบด้วยของแข็งระเหยร้อยละ 93.2 ค่าซีไอดีเท่ากับ 132.3 กรัมต่อลิตร ค่าซีไอดี ต่อของแข็งระเหยเท่ากับ 1.42 ค่า Kjeldahl nitrogen เท่ากับร้อยละ 3.85 ของของแข็งทั้งหมด ค่าซีไอดี ต่อไนโตรเจนเท่ากับ 300 ต่อ 8.6 ค่าฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 0.51 ของของแข็งทั้งหมด ค่าโปแตสเซียมเท่ากับร้อยละ 0.49 ของของแข็งทั้งหมด และจากรายงานของซาระดา และแนนด์ (Sarada and Nand, 1989) พบว่ากากมะเขือเทศประกอบด้วย ของแข็งระเหยร้อยละ 95.45 (ether extract ร้อยละ 17.0 เซมิเซลลูโลส ร้อยละ 39.3 เซลลูโลส ร้อยละ 8.0 ลิกนิน ร้อยละ 6.0 โปรตีน ร้อยละ 23.3) Kjeldahl nitrogen เท่ากับร้อยละ 3.73 ของของแข็งทั้งหมด คาร์บอนต่อไนโตรเจน เท่ากับ 13.4 ฟอสฟอรัส เท่ากับร้อยละ 0.22 ของของแข็งทั้งหมด โพแทสเซียมเท่ากับร้อยละ 0.151 ของของแข็งทั้งหมด โพแตสเซียมเท่ากับร้อยละ 0.954 ของของแข็งทั้งหมด แคลเซียมเท่ากับร้อยละ 0.028 ของของแข็งทั้งหมด อัตราส่วนของ ซีไอดี ต่อไนโตรเจน ต่อฟอสฟอรัส ที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทน ควรมีค่าประมาณ 300 ต่อ 5 ต่อ 1 ซึ่งเป็นปริมาณที่เพียงพอสำหรับเป็นอาหารของจุลินทรีย์ (Hills and Dykstra, 1980)

การเริ่มเลี้ยงจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมัก

การเริ่มเลี้ยงจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมัก สำหรับย่อยสลายกากมะเขือเทศเพื่อผลิตก๊าซมีเทนนี้ จะประสบผลสำเร็จด้วยก็ถ้าเริ่มต้นจากการใช้กากตะกอน (sludge) ที่ได้จากการหมักมูลสัตว์เพื่อผลิตก๊าซมีเทน แล้วมาหมักแบบเก็บกัก (batch process) ในถังปฏิกรณ์ก่อนแล้วจึงเปลี่ยนมาเป็นการหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง (semicontinuous process) โดยการป้อนด้วยมูลสัตว์ก่อน หลังจากนั้นค่อยผสมกากมะเขือเทศลงไปในมูลสัตว์ที่ละน้อย และค่อยๆ เพิ่มมากขึ้นตามลำดับจนในที่

สุดจะป้อนแต่เฉพาะกากมะเขือเทศอย่างเดียว วิธีนี้เป็นการเริ่มเลี้ยงจุลินทรีย์ที่ใช้ระยะเวลาสั้น และเสถียรภาพของระบบดี โดยจะใช้ระยะเวลาทั้งสิ้นประมาณ 8-10 สัปดาห์ พบว่าความเป็น กรดในถังปฏิกรณ์มีค่าเหมาะสม ไม่ต้องควบคุม pH ของระบบ (Sarada and Nand. 1989)

การผลิตก๊าซมีเทนในระดับห้องปฏิบัติการ

การทดลองผลิตก๊าซมีเทน โดยใช้กากมะเขือเทศเป็นวัตถุดิบซึ่งรายงานโดย ชาระตะ และแนนด์ (Sarada and Nand. 1989) ใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 5.5 ลิตร ที่อุณหภูมิ 30°C (ปริมาตรใช้งานของถังปฏิกรณ์นี้เท่ากับ 5.0 ลิตร) ที่สภาวะคงตัว (steady state) จะมี ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซเท่ากับ 0.597 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของของแข็งระเหยและมีก๊าซ มีเทนเป็นองค์ประกอบอยู่ถึงร้อยละ 72 ส่วนการทดลองของฮิลล์และดิกสตรา (Hills and Dykstra. 1980) ได้ทดลองหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศชั้นตอนเดียวใช้ถังปฏิกรณ์ จำนวน 9 ถัง ขนาดความจุถังละ 4 ลิตร หมักที่อุณหภูมิ 35°C โดยใช้ระยะเวลาเก็บกักเป็น 15, 25 และ 35 วัน และอัตราการป้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 1.0, 3.0 และ 5.0 กิโลกรัม ของของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตร ต่อวัน พบว่าการผลิตก๊าซมีเทนจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการป้อน อินทรีย์สารสูงขึ้นและใช้ระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น ประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ระหว่าง 0.24 - 0.60 ปริมาตรต่อปริมาตรถังปฏิกรณ์ ต่อวัน ก๊าซที่ได้มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบอยู่ร้อยละ 58.5 - 64.7 การขจัดซีไอคี่ มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 19.7 - 42.9

การผลิตก๊าซชีวภาพในระดับโรงงานต้นแบบ

การผลิตก๊าซชีวภาพ จากกากมะเขือเทศในระดับโรงงานต้นแบบ (pilot plant) โดยการหมักแบบอับอากาศชั้นตอนเดียว ใช้ถังปฏิกรณ์ขนาดความจุ 22 ลูกบาศก์เมตร บุด้วยฉนวน โพลียูเรเทน โฟมหนา 150 มิลลิเมตร หมักที่อุณหภูมิ 35°C พบว่าอัตราการป้อนกากมะเขือเทศ ที่เหมาะสมเท่ากับ 5 กิโลกรัมของของแข็งระเหยต่อ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน โดยใช้ระยะเวลาเก็บ กักนาน 25 วัน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเท่ากับ 0.61 ลูกบาศก์เมตร ต่อกิโลกรัมของ ของแข็งระเหยที่ถูกทำลาย อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.43 ปริมาตรต่อปริมาตรถัง ปฏิกรณ์ต่อวัน และมีองค์ประกอบเป็นก๊าซมีเทนอยู่ร้อยละ 60 การขจัดซีไอคี่เท่ากับร้อยละ 21.3 (Hills and Roberts. 1982)

การศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนโดยการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนนี้ เป็น การศึกษาถึงการใช้ประโยชน์จากกากมะเขือเทศเพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซมีเทน โดยการ แยกขั้นตอนการเกิดกรดอินทรีย์ และขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนออกจากกัน ทำให้ประสิทธิภาพและ ความคงทนของระบบดีกว่าแบบดั้งเดิม ซึ่งรวมทั้งสองขั้นตอนไว้ด้วยกัน ดังนั้น การหมักแบบอับ อากาศสองขั้นตอนจะสามารถควบคุมระบบได้ง่ายขึ้นและสามารถเร่งปฏิกิริยาการเกิดก๊าซมีเทนได้ (Ghosh, Sajjad and Henry. 1983; Tanticharoen, Supajunya and Bhumiratana. 1984)

วัตถุประสงค์

- ก) เพื่อศึกษาวิธีการหมัก ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ โดยใช้กากมะเขือเทศ
- ข) เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกัก และอัตราการบ้อนอินทรีย์สาร ต่อการผลิตก๊าซ มีเทน

ประโยชน์ของงานวิจัย

- ก) ทราบถึงกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน โดยใช้วิธีการทางเทคโนโลยีชีวภาพ
- ข) เข้าใจ และสามารถศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงการผลิตก๊าซมีเทนให้มีปริมาณมาก
- ค) งานวิจัยนี้ เป็นแนวทางในการใช้เทคโนโลยีชีวภาพในการกำจัดกาก

อุตสาหกรรมการเกษตร

บทที่ 2
วิธีการวิจัย

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย ถังปฏิกรณ์ผลิตรก ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน อุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ ถังเก็บก๊าซ pH meter gas chromatograph เตาแผ่นร้อน เครื่องกวนแท่งแม่เหล็ก เตาเผา และเครื่องแก้ว

ถังปฏิกรณ์ผลิตรก ใช้ถังพลาสติกทรงกระบอกขนาดความจุ 4, 7 และ 14 ลิตร พร้อมไม้สำหรับกวนผสม

ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน ทำด้วยท่อ พีวีซี มีลักษณะทางกายภาพดังแสดงในตาราง 1

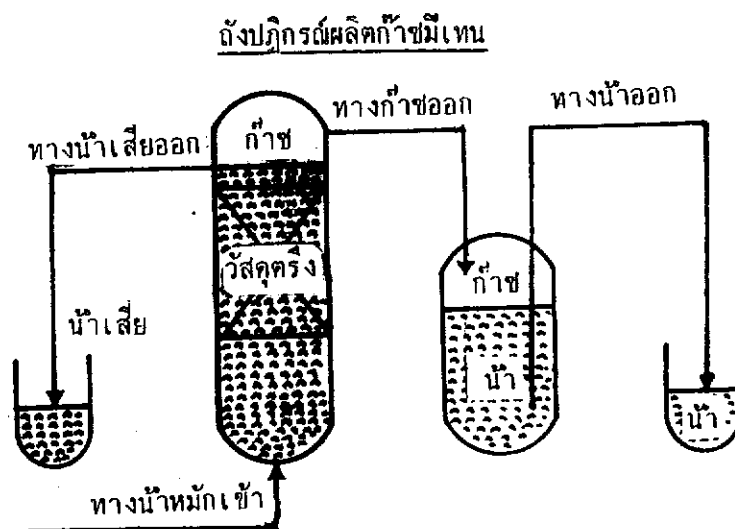
ตาราง 1 ลักษณะทางกายภาพของถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน

ลักษณะทางกายภาพของถังปฏิกรณ์	ขนาด
เส้นผ่าศูนย์กลาง (เซ็นติเมตร)	7.50
ความยาว (เซ็นติเมตร)	68.00
ความจุภายในเมื่อไม่มีวัสดุตั้ง (ลิตร)	2.66
ปริมาตรวัสดุตั้ง (ลิตร)	0.39
ความจุภายในเมื่อมีวัสดุตั้ง (ลิตร)	2.27
ปริมาตรใช้งาน (ลิตร)	2.00
การป้อนน้ำหมักเข้าสู่ถังปฏิกรณ์	ด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน

อุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ เป็นหลอดแก้วรูปตัวยู สำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซนำไปตรวจวิเคราะห์

ถังเก็บก๊าซ เป็นขวดแก้ว ขนาดความจุประมาณ 4 ลิตร เก็บก๊าซโดยการแทนที่น้ำในขวด

ระบบการผลิตก๊าซมีเทน แสดงไว้ในภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 ระบบการผลิตก๊าซมีเทนที่ใช้ในการทดลอง

เชื้อจุลินทรีย์

เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองได้มาจาก

เชื้อแบคทีเรียผสมผลิตภัณฑ์ ได้มาจากท่อระบายน้ำทิ้ง ห้องที่เขตภาษีเจริญ กรุงเทพมหานคร โดยการเก็บตัวอย่างน้ำจะต้องกวนคนน้ำในท่อระบายน้ำทิ้งให้ขึ้นเสียก่อนแล้วตักขึ้นมาประมาณ 10 ลิตร แล้วกรองเอากากทิ้งน้ำกากมะเขือเทศแห้งหนัก 100 กรัม ใส่ลงไปแล้วหมักทิ้งไว้ประมาณ 10 วัน นำน้ำหมักที่ได้มากรองเอากากออกทิ้ง น้ำที่กรองได้จะไว้ใช้เป็นหัวเชื้อต่อไป

เชื้อแบคทีเรียที่ใช้ผลิตก๊าซมีเทน ได้มาจากน้ำเสียจากการหมักกากซอสเปือกในน้ำ
ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 3 เพื่อผลิตก๊าซมีเทน จากห้องปฏิบัติการวิจัยก๊าซชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

กากมะเขือเทศแห้ง

กากมะเขือเทศแห้ง ได้จากการนำกากมะเขือเทศสด จากโรงงานผลิตปลากระป๋อง ที่
อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ มาตากแดดให้แห้ง แล้วบรรจุใส่ถุงพลาสติกปิดผนึก เก็บไว้
ที่อุณหภูมิห้อง โดยที่กากมะเขือเทศแห้งที่ได้มีความชื้นร้อยละ 8.57 ± 0.32

วิธีทดลอง

การหมักเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์

นำกากมะเขือเทศแห้งมาผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ (เชื้อแบคทีเรียผสมผลิตกรดอินทรีย์) ให้มี
ความเข้มข้นเป็น 10 และ 20 กรัม ต่อลิตร แล้วหมักในถังปฏิกรณ์ผลิตรวด การหมักในช่วงแรกเป็น
แบบเก็บกัก (batch process) นานประมาณ 1 สัปดาห์ แล้วเปลี่ยนกระบวนการหมักมาเป็นแบบ
กึ่งต่อเนื่อง (semicontinuous process) โดยให้มีระยะเวลาเก็บกักกาก (solid retention
time, SRT)) นาน 3 วัน น้ำหมักที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์จะนำมารองผ่านผ้ากอส
หนา 2 ชั้น นำกากออก น้ำที่กรองได้นำมาใช้สำหรับเติมเข้าไปในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนต่อไป

การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ผลึกก๊าซมีเทน

เชื้อแบคทีเรียที่ใช้ผลึกก๊าซมีเทนใส่ลงในถังปฏิกรณ์ผลึกก๊าซมีเทน โดยใส่หัวเชื้อลงไปประมาณ 2 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้มีการหมักแบบเก็บกักนาน 10 วัน เพื่อให้จุลินทรีย์เริ่มเกาะติดและเพื่อเพิ่มจำนวนที่วัสดุตั้งแล้วจึงเปลี่ยนกระบวนการหมักมาเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง เพื่อรับจุลินทรีย์ให้คุ้นเคยต่อวิธีการบ่อนอินทรีย์สารแบบกึ่งต่อเนื่องตามขั้นตอนในตาราง 2 โดย ES คือน้ำเสียที่ได้จากการผลึกก๊าซมีเทน จากกากข้อสเปียง และ LS คือน้ำหมักกากมะเขือเทศแห้งที่ทำการหมักเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์

ตาราง 2 แผนการเริ่มเลี้ยงจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ผลึกก๊าซมีเทน

ลำดับที่	อินทรีย์สารที่บ่อน	อัตราส่วนของ LS/ES	ระยะเวลาเก็บกัก (HRT; วัน)	จำนวนวันที่บ่อน
1.	ES	-	2	10
2.	LS + ES	1/4	2	10
3.	LS + ES	1/2	2	10
4.	LS + ES	3/4	2	10
5.	LS	-	10	10

หมายเหตุ การทดลองที่ 2-5 ต้องปรับ pH ให้เป็น 7.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 นอร์มัล รวมระยะเวลาในการเตรียมถังปฏิกรณ์ผลึกก๊าซมีเทนนาน 60 วัน

การหมักเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทน ในถังปฏิกรณ์ผลึกก๊าซมีเทนที่เตรียมไว้ นำน้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลึกกรดอินทรีย์ บ่อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผลึกก๊าซมีเทนที่เตรียมไว้ให้ระยะเวลาเก็บกักนาน 10 5 และ 2 วัน โดยจะทำการศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักต่างๆ เมื่อบ่อนอินทรีย์

สารในอัตราที่คงที่ และเมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราป้อนอินทรีย์สารโดยให้มีการป้อนวันละครั้ง

การเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ จากถังปฏิกรณ์ผลึกก๊าซมีเทนเพื่อทำการวิเคราะห์

ตาราง 3 ความถี่ในการวิเคราะห์ค่า พารามิเตอร์ต่างๆ

พารามิเตอร์	ความถี่ในการวิเคราะห์
1. pH, alkalinity, volatile fatty acid และซีโอดี	วันเว้นวัน
2. ปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้น	ทุกวัน
3. ปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ	สัปดาห์ละครั้ง

วิธีวิเคราะห์

การวิเคราะห์ ปริมาณกรดอินทรีย์ (VFA) alkalinity โดย direct titration method (ธงชัย พรณสวัสดิ์. 2525)

การวิเคราะห์ค่า ซีโอดี โดย open reflux method (APHA. AWWA. WPCF. 1985)

การวิเคราะห์ความชื้น โดยการคำนวณหาร้อยละของน้ำหนักของกากมะเขือเทศที่หายไป เมื่อนำไปอบแห้งที่ 105°C นาน 3 ชั่วโมง หรือจนกระทั่งน้ำหนักคงที่

การวิเคราะห์ของแข็ง total solid, volatile solid และ fixed solid
(APHA. AWWA. WPCF. 1985)

การวัด pH ของของเหลว โดยใช้ pH meter (orion research model 611)

การวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ โดยการวัดปริมาตรน้ำที่ล้นออกมาเมื่อถูกแทนที่ด้วยก๊าซชีวภาพ

การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ นำก๊าซจากหลอดแก้วรูปตัวยูจิดำ
ตรวจสอบในเครื่อง gas chromatograph ที่มี detector เป็นแบบ thermal
conductivity detector และคอลัมน์ porapak N.

บทที่ 3
ผลการวิจัย

ผลการหมักกากมะเขือเทศ จากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์

การหมักสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ ที่มีความเข้มข้น 10 และ 20 กรัมต่อลิตร โดยผสมกับหัวเชื้อแบคทีเรียผสมผลิตกรดอินทรีย์ แล้วหมักในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์นาน 3 วัน นำน้ำหมักที่กรองได้มาวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์สาร ในรูปของซีไอดี และนำกากที่กรองได้มาวิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมดหรือของแข็งระเหย ผลการวิจัยแสดงไว้ในตาราง 4 คือเมื่อใส่กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 และ 20 กรัมต่อลิตร จะให้ปริมาณอินทรีย์สารออกมาในน้ำหมักที่กรองได้เฉลี่ย เท่ากับ 1,754 และ 2,817 มิลลิกรัมซีไอดีต่อลิตร pH ของน้ำหมักมีค่าเท่ากับ 4.30 และ 4.22 น้ำหนักของกากลดลงร้อยละ 20.23 และ 12.74 ของของแข็งทั้งหมดหรือร้อยละ 19.61 และ 12.15 ของของแข็งระเหยตามลำดับ

ตาราง 4 ผลการหมักกากมะเขือเทศ ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน

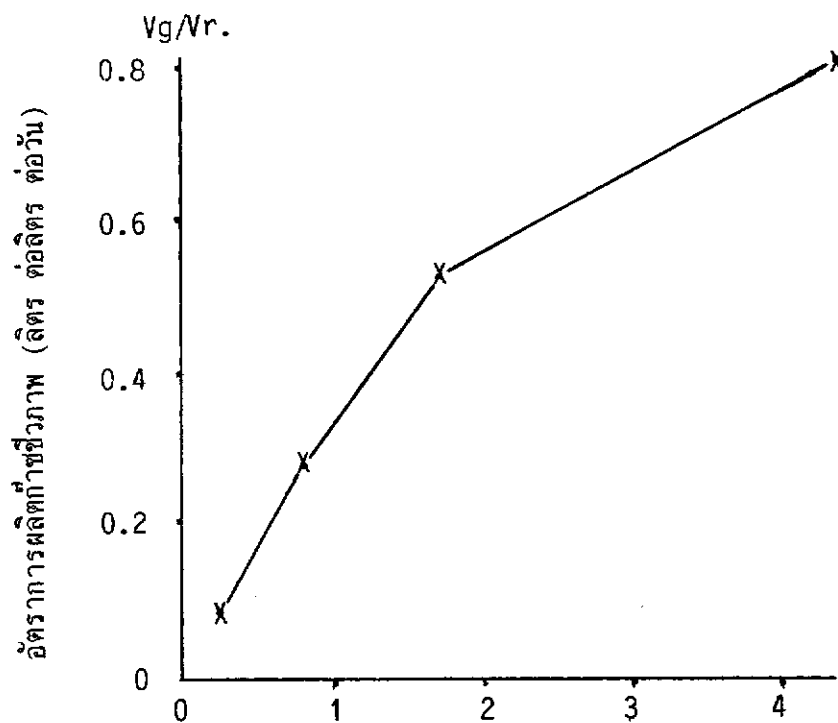
ปริมาณกากมะเขือเทศในน้ำ (กรัมต่อลิตร)	ลักษณะน้ำหมักที่กรองได้		น้ำหนักกากลดลง	
	ปริมาณอินทรีย์สาร (มก. ซีไอดีต่อลิตร)	pH	ร้อยละของของ แข็งทั้งหมด	ร้อยละของของ แข็งระเหย
10	1,754	4.30	20.23	19.61
20	2,817	4.22	12.74	12.15

ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

นำน้ำหมักที่กรองได้ จากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนและศึกษาผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ดังต่อไปนี้

ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในหนึ่งวัน ต่อปริมาตรถังปฏิกรณ์: V_g/V_r) พบว่าเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารสูงขึ้น จะทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นด้วย ดังแสดงในภาพประกอบ 2 และตาราง 5 คือเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 0.2 0.8 และ 1.7 กรัมชีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเท่ากับ 0.08 0.29 และ 0.54 ลิตร ต่อลิตร ต่อวัน ตามลำดับ และเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 4.2 กรัม ชีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ จะเท่ากับ 0.81 ลิตร ต่อลิตร ต่อวัน



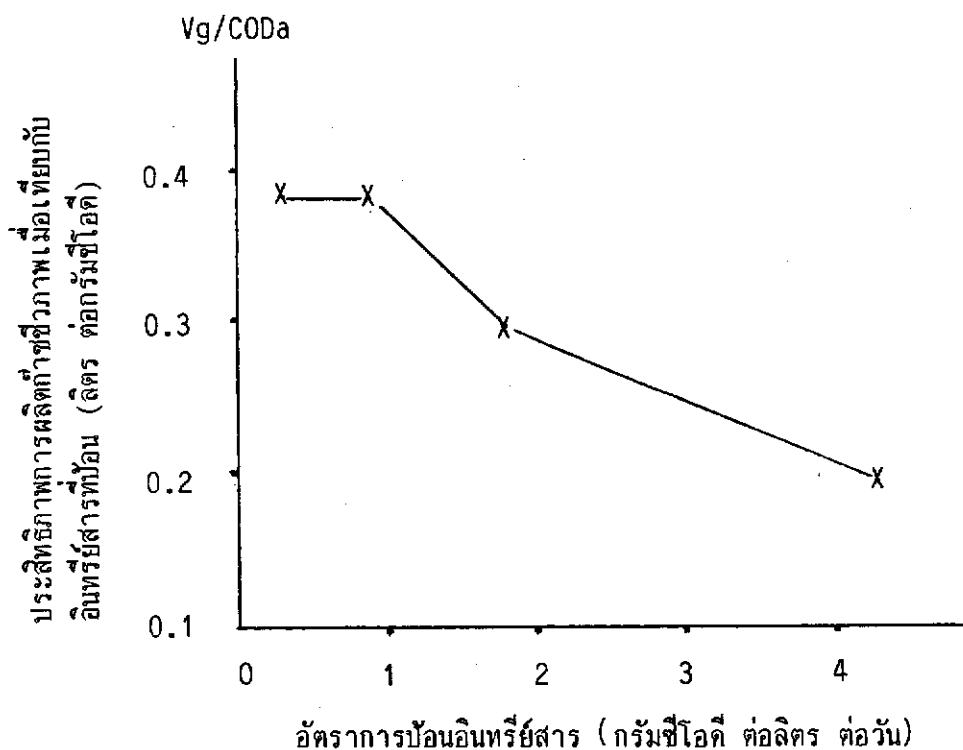
อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร ต่อลิตร ต่อวัน)

ภาพประกอบ 2 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

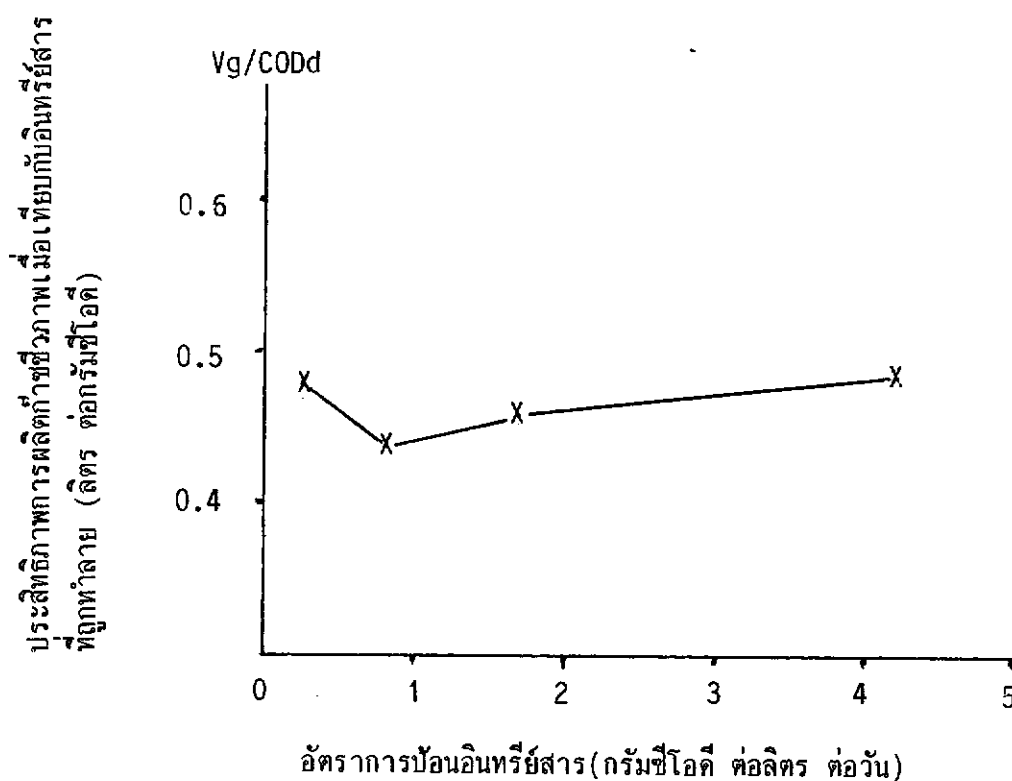
ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในหนึ่งวัน ต่อปริมาณอินทรีย์สารในรูปของกรัมซีโอดีที่เติมเข้าไป ; V_g/COD_a หรือปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในหนึ่งวัน ต่อปริมาณอินทรีย์สารในรูปของกรัมซีโอดีที่ถูกทำลาย ; V_g/COD_d)

ก. ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงค่าในรูปของ V_g/COD_a พบว่า เมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อเทียบกับกรัมซีโอดีที่เติมเข้าไปมีค่าต่ำลง ดังแสดงในภาพประกอบ 3 และตาราง 5 คือ เมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 0.2 0.8 และ 1.7 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจะมีค่าเท่ากับ 0.38 0.38 และ 0.30 ลิตร ต่อกรัมซีโอดีที่เติมเข้าไป ตามลำดับ และเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 4.2 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ จะมีค่าเท่ากับ 0.19 ลิตร ต่อกรัมซีโอดีที่เติมเข้าไป



ภาพประกอบ 3 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อเทียบกับกรัมซีโอดีที่เติมเข้าไป

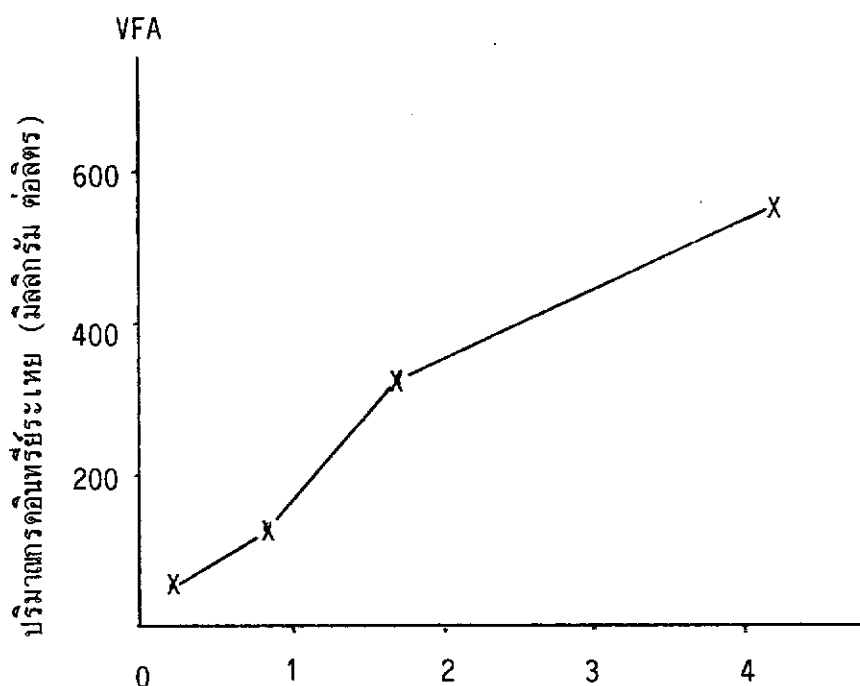
ข. ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงค่าในรูปของ V_g/COD_d พบว่า เมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารสูงขึ้น จะไปมีผลต่อประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อเทียบกับกรัมซีโอไซด์ที่ถูกทำลาย ดังแสดงในภาพประกอบ 4 และ ตาราง 5 คือเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 0.2 0.8 และ 1.7 กรัมซีโอไซด์ ต่อลิตร ต่อวัน โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจะมีค่าเท่ากับ 0.48 0.44 และ 0.46 ลิตร ต่อกรัมซีโอไซด์ที่ถูกทำลาย ตามลำดับ และเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 4.2 กรัมซีโอไซด์ ต่อลิตร ต่อวัน โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจะมีค่าเท่ากับ 0.49 กรัมซีโอไซด์ที่ถูกทำลาย



ภาพประกอบ 4 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อเทียบกับกรัมซีโอไซด์ที่ถูกทำลาย

ผลของอัตราการบ่อนอินทรีย์สาร ต่อปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์

ผลของอัตราการบ่อนอินทรีย์สาร ต่อปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ พบว่า เมื่ออัตราการบ่อนอินทรีย์สารสูงขึ้น จะทำให้มีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์มากขึ้น ดังแสดงในภาพประกอบ 5 และตาราง 5 คือเมื่ออัตราการบ่อนอินทรีย์สารเป็น 0-2 0-8 และ 1-7 กรัมซีไอที ต่อลิตร ต่อวัน โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์จะมีค่าเท่ากับ 54 128 และ 325 มิลลิกรัม ต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่ออัตราการบ่อนอินทรีย์สารเป็น 4.2 กรัมซีไอที ต่อลิตร ต่อวัน โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าเท่ากับ 557 มิลลิกรัม ต่อลิตร

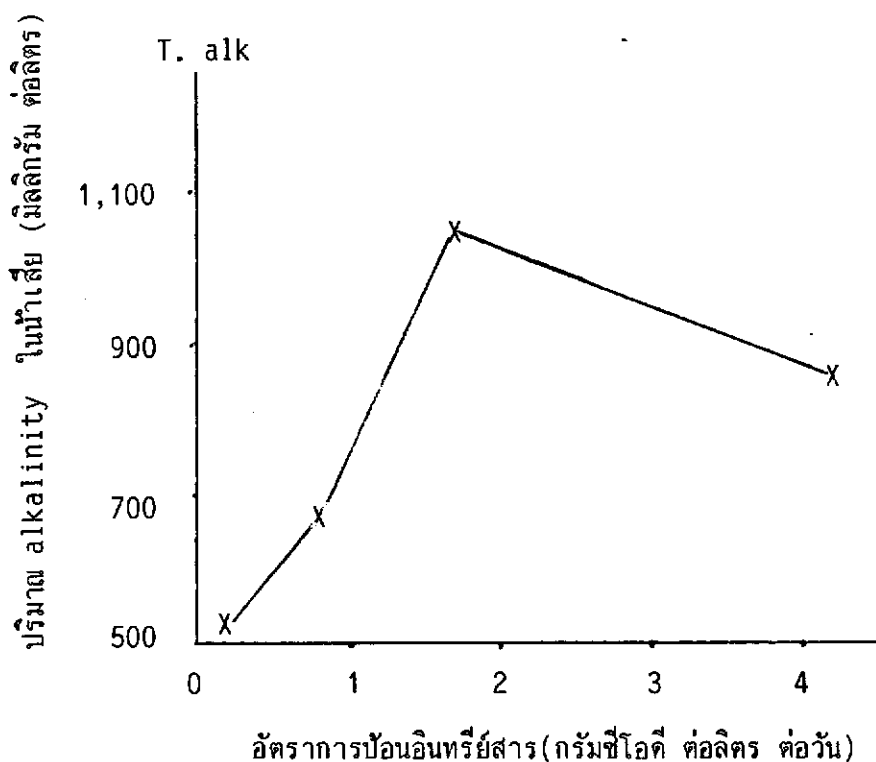


อัตราการบ่อนอินทรีย์สาร(กรัมซีไอที ต่อลิตร ต่อวัน)

ภาพประกอบ 5 ผลของอัตราการบ่อนอินทรีย์สาร ต่อปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์

ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อปริมาณ alkalinity ในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์

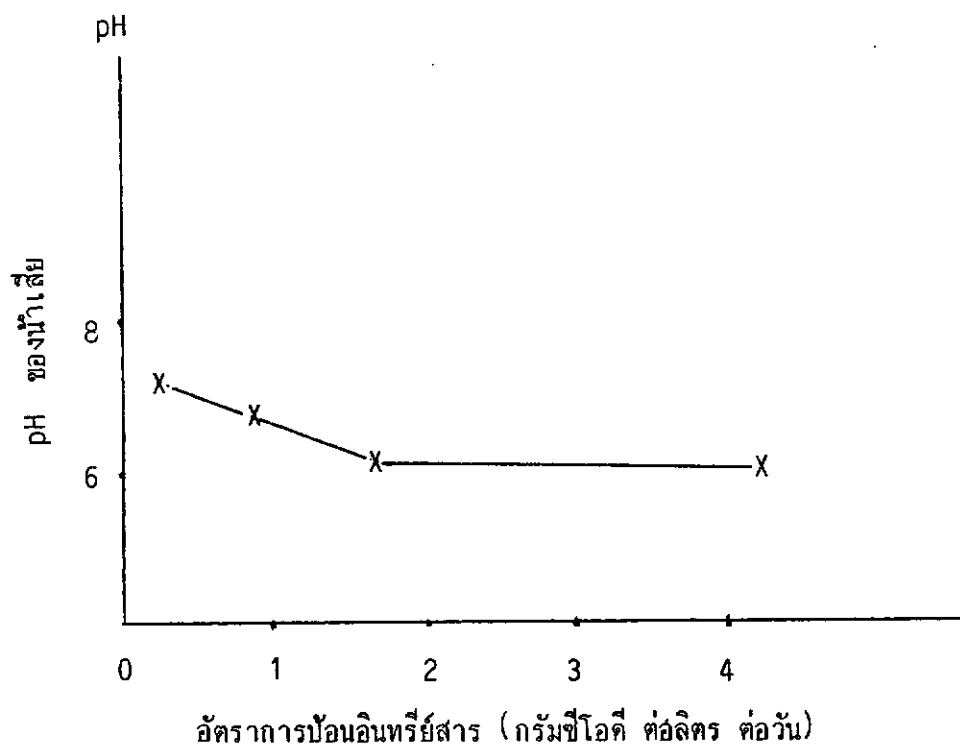
ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อปริมาณ alkalinity ในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ พบว่า เมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 0.2 0.8 และ 1.7 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน โดยใช้ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน ปริมาณ alkalinity ในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์มีค่าเท่ากับ 514 670 1,055 มิลลิกรัม ต่อลิตร ตามลำดับ และเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 4.2 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน ปริมาณ alkalinity ในน้ำเสียค่าลดลง เท่ากับ 864 มิลลิกรัม ต่อลิตร ดังผลแสดงในภาพประกอบ 6 และตาราง 5



ภาพประกอบ 6 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อปริมาณ alkalinity ในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์

ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อ pH ของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลึกทำขี้เเทน

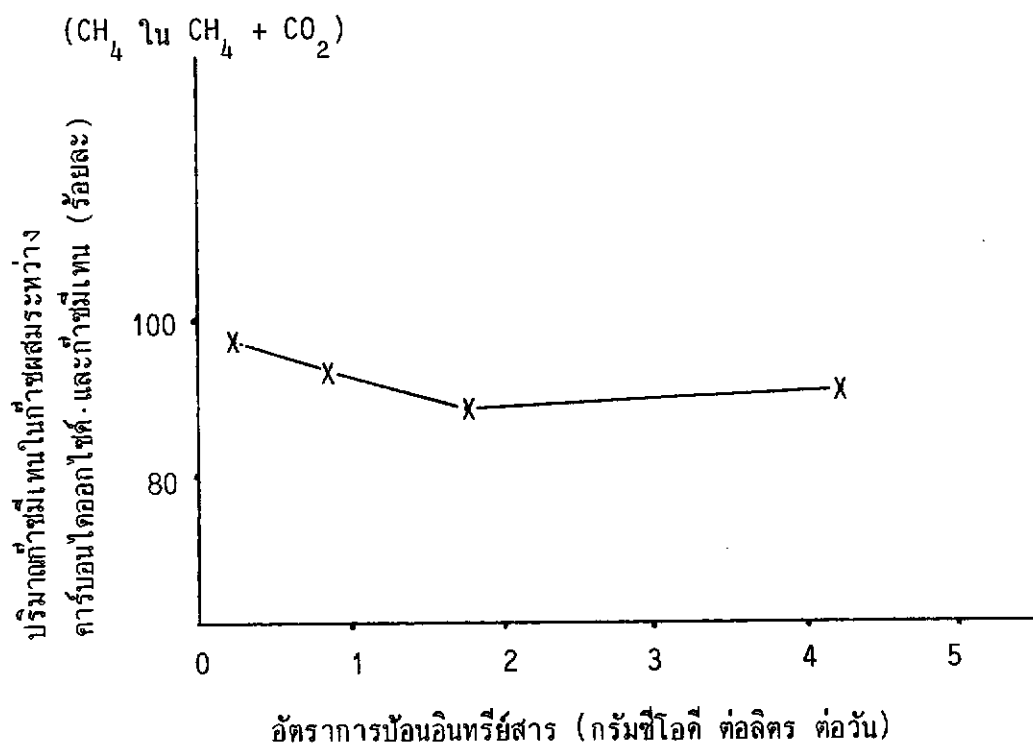
ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อ pH ของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลึกทำขี้เเทน พบว่า เมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารเพิ่มขึ้นจาก 0.2 เป็น 0.8 และ 1.7 กรัมซีไอดี ต่อลิตร ต่อวัน โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน pH ของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ลดต่ำลงจาก 7.07 เป็น 6.68 และ 6.07 ตามลำดับ และเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 4.2 กรัมซีไอดี ต่อลิตร ต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน pH ของน้ำเสียจะมีค่าเท่ากับ 6.04 ดังผลแสดงใน ภาพประกอบ 7 และตาราง 5



ภาพประกอบ 7 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อ pH ของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลึกทำขี้เเทน

ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CO_2 และ CH_4

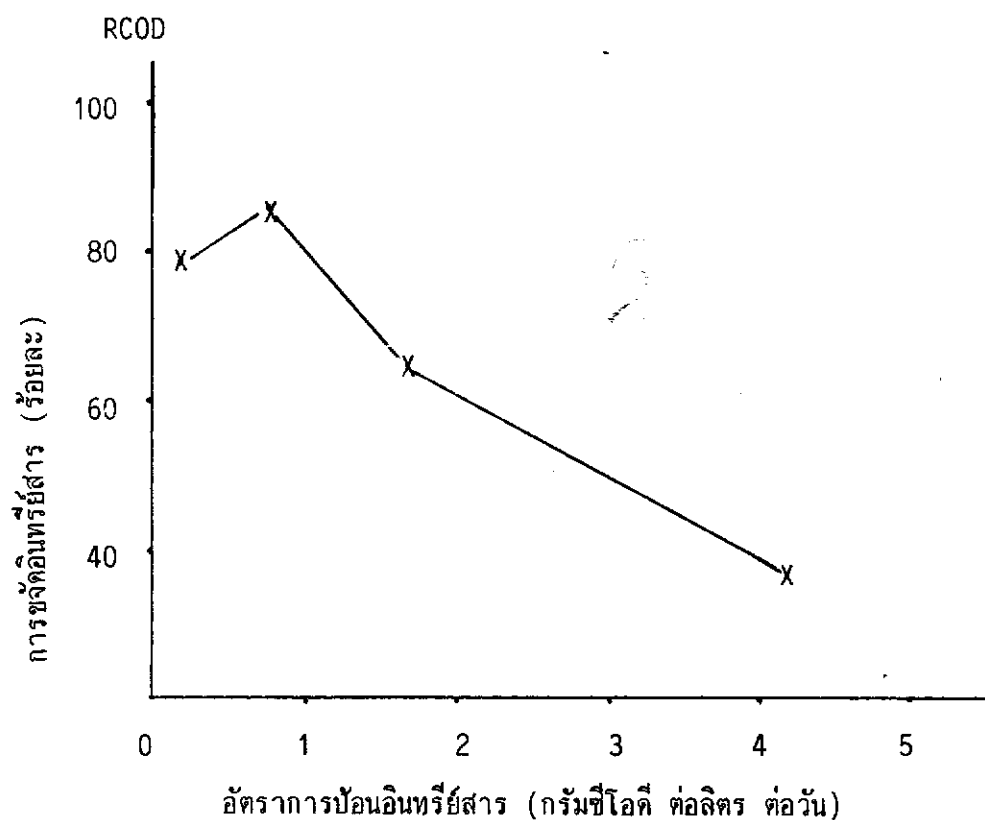
ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CO_2 และ CH_4 พบว่า อัตราการป้อนอินทรีย์สารที่ 0.2 0.8 และ 1.7 กรัมซีโอที ต่อลิตร ต่อวัน โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน ปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CO_2 และ CH_4 มีค่าร้อยละ 94.60 93.58 และ 88.02 ตามลำดับ และเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 4.2 กรัมซีโอที ต่อลิตร ต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน มีปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CO_2 และ CH_4 เท่ากับร้อยละ 88.81 ดังผลแสดงในภาพประกอบ 8 และตาราง 5



ภาพประกอบ 8 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อปริมาณก๊าซมีเทน ในก๊าซผสมระหว่าง CO_2 และ CH_4

ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อการขจัดอินทรีย์สารในถังปฏิกรณ์ผลึกก๊าซมีเทน

ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อการขจัดอินทรีย์สารในถังปฏิกรณ์ผลึกก๊าซมีเทน พบว่า เมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารสูงขึ้น จะทำให้การขจัดอินทรีย์สารลดต่ำลง โดยคิดออกมาเป็น ร้อยละของกรัมซีไอดีที่ลดลง ดังผลแสดงในภาพประกอบ 9 และตาราง 5 คือเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 0.2 0.8 และ 1.7 กรัมซีไอดี ต่อลิตร ต่อวัน โดยมีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน การขจัดอินทรีย์สารมีค่าเท่ากับร้อยละ 79.83 86.42 และ 65.60 ตามลำดับ และเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 4.2 กรัมซีไอดี ต่อลิตร ต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน มีการขจัดอินทรีย์สารร้อยละ 39.21



ภาพประกอบ 9 ผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ต่อการขจัดอินทรีย์สารในถังปฏิกรณ์ผลึกก๊าซมีเทน

ตาราง 5 การวัดค่าพีเอชและค่าการนำไฟฟ้าของน้ำดื่ม

การเปลี่ยนแปลงค่า	ของเสียที่ออกจากร่างกาย		การวัดค่าพีเอช	
	ค่า	หน่วย	ค่า	หน่วย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	0.2	ค่าเฉลี่ย	7.07	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	0.8	ค่าเฉลี่ย	6.68	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	1.7	ค่าเฉลี่ย	6.07	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	4.2	ค่าเฉลี่ย	6.04	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	2	ค่าเฉลี่ย	514	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	2	ค่าเฉลี่ย	670	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	2	ค่าเฉลี่ย	1,055	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	1	ค่าเฉลี่ย	864	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	2	ค่าเฉลี่ย	461	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	2	ค่าเฉลี่ย	241	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	2	ค่าเฉลี่ย	1,363	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	1	ค่าเฉลี่ย	2,825	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	2	ค่าเฉลี่ย	79.83	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	2	ค่าเฉลี่ย	86.42	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	2	ค่าเฉลี่ย	63.53	ค่าเฉลี่ย
ค่าการนำไฟฟ้า (ค่าเฉลี่ย)	1	ค่าเฉลี่ย	39.21	ค่าเฉลี่ย

ผลของระยะเวลาเก็บกัก ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากการนำน้ำหมักที่กรองได้ จากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ที่มีความเข้มข้นของอินทรีย์สารประมาณ 1,500 มิลลิกรัม ต่อลิตร บ้อนเข้าดังปฏิกิริยาผลิตก๊าซมีเทนให้ระยะเวลาเก็บกักต่างๆ กัน คือ 10 5 และ 2 วัน แล้วศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกัก ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังผลแสดงในตาราง 6 คือ เมื่อลดระยะเวลาเก็บกักลง จาก 10 วัน เป็น 5 วัน และ 2 วัน จะทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มจาก 0.06 ลิตร ต่อลิตร เป็น 0.13 และ 0.27 ลิตรต่อลิตร ตามลำดับ แต่ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจะไม่ต่างกันมากนัก โดยมีค่าเท่ากับ 0.40 0.44 และ 0.40 ลิตรต่อ กรัมชีโอคี่ที่เติมเข้าไป หรือ 0.43 0.47 และ 0.45 ลิตรต่อกรัมชีโอคี่ที่ถูกทำลาย และปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เป็นร้อยละ 93.18 85.39 และ 95.56 ตามลำดับ

ตาราง 6 ผลของระยะเวลาเก็บกัก ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

การผลิตก๊าซชีวภาพ	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)		
	10	5	2
ความเข้มข้นอินทรีย์สารที่บ้อน (มิลลิกรัมชีโอคี่ ต่อลิตร)	1,567	1,566	1,488
อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร ต่อลิตร)	0.06	0.13	0.27
ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร ต่อกรัมชีโอคี่ที่เติมลงไป)	0.40	0.44	0.40
(ลิตร ต่อกรัมชีโอคี่ที่ถูกทำลาย)	0.43	0.47	0.45
ร้อยละของปริมาณก๊าซมีเทน ในก๊าซผสมระหว่าง CO_2 และ CH_4	93.18	85.39	95.56

ผลของระยะเวลาเก็บกัก ต่อลักษณะของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน

จากการนำน้ำหมักที่กรองได้ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ที่มีความเข้มข้นอินทรีย์สารประมาณ 1.500 มิลลิกรัม ซีโอดี ต่อลิตร บ้อนเข้าถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน ให้มีระยะเวลาเก็บกักต่างกกัน คือ 10 5 และ 2 วัน แล้วศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกัก ต่อลักษณะของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน ทั้งผลแสดงในตาราง 7 คือ เมื่อลระยะเวลาเก็บกักลดลงจาก 10 วัน เป็น 5 วัน และ 2 วัน จะทำให้ pH ของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนลดลงจาก 7.05 เป็น 6.98 และ 6.64 แต่ปริมาณของกรดไขมันระเหยจะเพิ่มขึ้นจาก 69 เป็น 80 และ 135 มิลลิกรัม ต่อลิตร ปริมาณ alkalinity จะลดลงจาก 787 เป็น 729 และ 655 มิลลิกรัม ต่อลิตร และการขจัดอินทรีย์สารจะไม่มีเปลี่ยนแปลงมากนักคือจากร้อยละ 92.72 เป็น 93.91 และ 89.31 ตามลำดับ

ตาราง 7 ผลของระยะเวลาเก็บกัก ต่อลักษณะของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน

การผลิตก๊าซชีวภาพ	ระยะเวลาเก็บกัก (วัน)		
	10	5	2
ความเข้มข้นอินทรีย์สารที่บ้อน (มิลลิกรัม ซีโอดี ต่อลิตร)	1,567	1,566	1,488
ลักษณะน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน			
pH	7.05	6.98	6.64
ปริมาณกรดไขมันระเหย (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	69	80	135
ปริมาณ alkalinity (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	787	729	655
การขจัดอินทรีย์สาร (ร้อยละ)	92.72	93.91	89.31

ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราการป้อนอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกัก การผลิตก๊าซชีวภาพ
คุณภาพน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ และการขจัดอินทรีย์สาร

จากการทดลองโดยการป้อนอินทรีย์สารเข้าถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน โดยให้อัตราการป้อนอินทรีย์สาร อยู่ระหว่าง 0.13-0.41 กรัมชีโอดี ต่อลิตรของถังปฏิกรณ์ ต่อวัน และให้มีระยะเวลาเก็บกักต่างๆ กัน คือ 10 5 2 และ 1 วัน จะได้ผลการทดลองดังแสดงไว้ในตาราง 8 ดังนี้

1. การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้ น้ำหมักจากกากมะเขือเทศป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน มีระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน และมีอัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 0.14 และ 0.22 กรัมชีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.06 และ 0.10 ลิตร ต่อลิตร โดยมีปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เป็นร้อยละ 93.18 และ 80.72 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (เมื่อพิจารณาจากปริมาณอินทรีย์สารที่ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์) มีค่าเท่ากับ 0.40 และ 0.49 ลิตร ต่อกรัมชีโอดี ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (เมื่อพิจารณาจากปริมาณอินทรีย์สารที่ถูกทำลาย) มีค่าเท่ากับ 0.43 และ 0.51 ลิตรต่อกรัมชีโอดี น้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์มี pH เท่ากับ 7.05 และ 6.95 มีปริมาณ alkalinity เท่ากับ 787 และ 880 มิลลิกรัม ต่อลิตร มีปริมาณกรดไขมันระเหยเท่ากับ 69 และ 136 มิลลิกรัมต่อลิตร การขจัดอินทรีย์สารเป็นร้อยละ 92.72 และ 95.48 ตามลำดับ

2. การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้ น้ำหมักจากกากมะเขือเทศป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน มีระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน และมีอัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 0.13 0.19 และ 0.31 กรัมชีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน พบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.04 0.08 0.12 และ 0.13 ลิตรต่อลิตร โดยมีปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เป็นร้อยละ 86.46 90.55 81.71 และ 89.07 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อพิจารณาจากปริมาณอินทรีย์สารที่ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์เป็น 0.33 0.40 0.45 และ 0.43 ลิตรต่อกรัมชีโอดี ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อพิจารณาจากปริมาณอินทรีย์สารที่ถูกทำลายเป็น 0.37 0.44 0.48 และ 0.46 ลิตรต่อกรัมชีโอดี น้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์มี pH เท่ากับ 6.97 6.95 7.11 และ 6.84 จะมีปริมาณ alkalinity เท่ากับ 620 745 728 และ 730 มิลลิกรัมต่อลิตร มีปริมาณกรดไขมันระเหยเท่ากับ 70 87 84 และ 76 มิลลิกรัมต่อลิตร การขจัดอินทรีย์สารเป็นร้อยละ 89.20 91.02 94.19 และ 93.62 ตามลำดับ

3. การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้ น้ำหมักจากกากมะเขือเทศป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน มีระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน และมีการป้อนอินทรีย์สารเพิ่มขึ้นเป็นอัตรา 0.15 0.27 0.67 0.88 และ 1.70 กรัมชีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน พบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มขึ้นโดยเท่ากับ 0.05 0.11 0.27 0.31 และ 0.54 ลิตร ต่อลิตร และมีปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เป็นร้อยละ 94.90 94.31 95.56 91.60 และ 88.02 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อพิจารณาจากปริมาณอินทรีย์สารที่ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์เป็น 0.36 0.41 0.40 0.36 และ 0.30 ลิตรต่อกรัมชีโอดี ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อพิจารณาจากปริมาณอินทรีย์สารที่ถูกทำลายเป็น 0.46 0.51 0.45 0.43 และ 0.46 ลิตร ต่อกรัมชีโอดี น้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์มี pH เท่ากับ 7.13 7.01 6.64 6.72 และ 6.07 ปริมาณ alkalinity จะเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 484 543 655 685 และ 1,055 มิลลิกรัมต่อลิตร มีกรดไขมันระเหยสะสมมากขึ้นโดยมีค่าเท่ากับ 59 50 135 120 และ 325 มิลลิกรัมต่อลิตร การขจัดอินทรีย์สารเป็นร้อยละ 78.27 81.39 89.31 83.53 และ 65.59 ตามลำดับ

4. การทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้ น้ำหมักจากกากมะเขือเทศป้อนเข้าถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน มีระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน และมีอัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 4.19 กรัมชีโอดีต่อลิตร ต่อวัน พบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.81 ลิตร ต่อลิตร โดยมีปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เป็นร้อยละ 88.81 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อพิจารณาจากปริมาณอินทรีย์สาร สารที่ป้อนเข้าถังปฏิกรณ์เป็น 0.19 ลิตรต่อกรัมชีโอดี ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อพิจารณาจากปริมาณอินทรีย์สารที่ถูกทำลายเป็น 0.49 ลิตร ต่อกรัมชีโอดี น้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์มี pH เท่ากับ 6.04 มี alkalinity เท่ากับ 864 มิลลิกรัมต่อลิตร มีกรดไขมันระเหยเท่ากับ 557 มิลลิกรัม ต่อลิตร การขจัดอินทรีย์สารเป็นร้อยละ 39.21

ตาราง 8(1) ความสัมพันธ์ ระหว่าง อัตราการป้อนอินทรีย์สาร ระยะเวลากับกัก การผลิตก๊าซชีวภาพ คุณภาพน้ำเสียที่ออกจาดังปฏิกรณ์ และการจัดอินทรีย์สาร

	ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) วัน				
	10	10	5	5	5
อัตราการป้อนอินทรีย์สาร (กรัมชีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน)	0.14	0.22	0.13	0.19	0.26
การผลิตก๊าซชีวภาพ					0.31
อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร ต่อลิตร)	0.06	0.10	0.04	0.08	0.12
ปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสมCH ₄ และ CO ₂ (ร้อยละ)	93.18	80.72	86.46	90.55	81.71
ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อกรัมชีโอดีที่เติม)	0.40	0.49	0.33	0.40	0.45
ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อกรัมชีโอดีที่ถูกทำลาย)	0.43	0.51	0.37	0.44	0.48
ลักษณะน้ำเสียที่ออกจาดังปฏิกรณ์					
pH	7.05	6.95	6.97	6.95	7.11
alkalinity (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	787	880	620	745	728
ปริมาณคาร์บอนทรีรี่ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	69	136	70	87	84
ร้อยละของการจัดอินทรีย์สาร	92.72	95.48	89.20	91.01	94.19
					93.62

ตาราง 8(2) ความสัมพันธ์ ระหว่าง อัตราการป้อนอินทรีย์สาร ระยะเวลากักเก็บกัก การผลิตก๊าซชีวภาพ คุณภาพน้ำเสียที่ออกจากร่างปฏิกรณ์ และการขจัดอินทรีย์สาร

	ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) วัน				
	2	2	2	2	1
อัตราการป้อนอินทรีย์สาร (กรัมชีโอต์ ต่อลิตร ต่อวัน)	0.15	0.27	0.67	0.88	4.19
การผลิตก๊าซชีวภาพ					
อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร ต่อลิตร)	0.05	0.11	0.27	0.31	0.81
ปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซผสม CH_4 และ CO_2 (ร้อยละ)	94.90	94.31	95.56	91.60	88.81
ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร ต่อกรัมชีโอต์ที่เติม)	0.36	0.41	0.40	0.36	0.19
ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร ต่อกรัมชีโอต์ที่ถูกทำลาย)	0.46	0.51	0.45	0.43	0.49
ลักษณะน้ำเสียที่ออกจากร่างปฏิกรณ์					
pH	7.13	7.01	6.64	6.72	6.04
alkalinity (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	484	543	655	685	1,055
ปริมาณคาร์บอนทรีย์ (มิลลิกรัม ต่อลิตร)	59	50	135	120	557
ร้อยละของการขจัดอินทรีย์สาร	78.27	81.39	89.31	83.53	39.21

สรุปอภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

สรุป และอภิปรายผล

การผลิตกรดอินทรีย์

การผลิตกรดอินทรีย์ โดยใช้กากมะเขือเทศผสมกับหัวเชื้อแบคทีเรียแล้วหมักในถังปฏิกรณ์ ให้มีระยะเวลาการหมักนาน 3 วัน พบว่า ถ้าเพิ่มปริมาณกากมะเขือเทศจะทำให้ปริมาณอินทรีย์สารในน้ำหมักสูงขึ้นด้วย โดยในการทดลองนี้พบว่า ถ้าใช้กากมะเขือเทศ 20 กรัม ต่อลิตร ผลที่ได้จะให้ปริมาณอินทรีย์สารสูงกว่าการใช้กากมะเขือเทศ 10 กรัม ต่อลิตร โดยที่ถ้าใช้กากมะเขือเทศ 20 กรัม ต่อลิตร จะให้น้ำหมักมี pH เฉลี่ยเท่ากับ 4.22 ปริมาณอินทรีย์สารในน้ำหมักที่กรองเอากากออกมีค่าเท่ากับ 2,817 มิลลิกรัมซีไอที ต่อลิตร น้ำหนักของกากจะลดลง ร้อยละ 12.74 ของของแข็งทั้งหมดหรือเท่ากับ ร้อยละ 12.15 ของของแข็งระเหย การเพิ่มปริมาณกากมะเขือเทศให้มากกว่า 20 กรัม ต่อลิตร อาจมีผลให้ pH ของน้ำหมักลดต่ำลง และอาจมีผลยับยั้งการเจริญของแบคทีเรียผลิตกรดอินทรีย์ได้ นอกจากนี้อาจทำให้การกวนผสมเป็นไปด้วยความยากลำบาก

การผลิตก๊าซชีวภาพ

การผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้น้ำหมักที่กรองได้จากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ บ้อนเข้าถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน โดยอัตราการบ้อนอินทรีย์สาร อยู่ระหว่าง 0.2-4.2 กรัม ซีไอที ต่อลิตร ต่อวัน ระยะเวลาเก็บกักอยู่ระหว่าง 1-2 วันจะให้ก๊าซชีวภาพ ที่มีปริมาณก๊าซมีเทนผสมอยู่ประมาณร้อยละ 88.02-95.56 ของปริมาณก๊าซผสมระหว่างก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ จะแปรตามอัตราการบ้อนอินทรีย์สาร เมื่อกำหนดให้มีระยะเวลาเก็บกักคงที่ เช่น การใช้อัตราการบ้อนอินทรีย์สารเป็น 1.7 กรัมซีไอที ต่อลิตร ต่อวัน จะได้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.54 ลิตร ต่อลิตร ต่อวัน และถ้าลดอัตราการบ้อนอินทรีย์สารลง อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพก็จะลดลงเช่นกัน ซึ่งผลที่ได้นี้คล้ายกับการทดลองของ ฮิลล์ และคิคสตรา (Hills and Dykstra, 1980) สำหรับการทดลองที่ใช้อัตราการบ้อนอินทรีย์สารระหว่าง 0.14-0.22 กรัมซีไอที ต่อลิตร ต่อวันการเพิ่มระยะเวลาเก็บกักให้นานขึ้นไม่ช่วยให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น แสดงว่าเชื้อจุลินทรีย์สาร ที่ผลิตก๊าซมีเทนในถังปฏิกรณ์มีการสะสมในปริมาณที่มากเกินไปสำหรับอินทรีย์สารที่บ้อน จึงสามารถย่อยสลายอินทรีย์สารและผลิตก๊าซ

เก็บกัก 1-2 วัน ทำให้กรดอินทรีย์ที่เหลืออยู่ในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์จะมีอยู่ในความเข้มข้นที่ต่างกันจนมีผลต่อ pH ของน้ำเสียนั้น ซึ่งผลการทดลองนี้แตกต่างจากการทดลองของ ฮิลลส์ และ คิคสตรา ที่ใช้ระยะเวลาเก็บกักนานกว่ามาก ทำให้การสะสมของกรดอินทรีย์มีน้อยลงซึ่งเป็นผลให้ pH ของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์มีค่าค่อนข้างเป็นกลางอยู่ระหว่าง 6.9-7.3

- การขจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน จะเป็นปฏิกายกลับกับ อัตราการบ้อนอินทรีย์สาร โดยที่อัตราการบ้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 0.2 กรัมชีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน การขจัดอินทรีย์สารจะมีค่าร้อยละ 79.83 ที่อัตราการบ้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 1.7 กรัมชีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน การขจัดอินทรีย์สารจะมีค่าร้อยละ 65.59 และที่อัตราการบ้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 4.2 กรัมชีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน การขจัดอินทรีย์สารจะมีค่าเป็นร้อยละ 39.21

ข้อเสนอแนะ

1. การทดลองนี้ ได้วางแผนการทดลอง โดยใช้ระยะเวลาเก็บกัก 10 5 และ 2 วัน เมื่ออัตราการบ้อนอินทรีย์สารสูงเท่ากับ 1.7 กรัมชีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน ใช้ระยะเวลาเก็บกัก 2 วัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ระบบยังอาจจะรับอัตราการบ้อนอินทรีย์สารที่สูงกว่าเดิมได้อีกหรืออาจจะลดระยะเวลาเก็บกักลงได้ ดังนั้นจึงได้ลดระยะเวลาเก็บกักลงเหลือ 1 วัน โดยมีอัตราการบ้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 4.2 กรัมชีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน ผลปรากฏว่าได้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 0.81 ลิตร ต่อลิตร ต่อวัน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อเทียบกับอินทรีย์สารที่บ้อน มีค่าลดลงเหลือ 0.19 ลิตร ต่อกรัมชีโอดี แต่ประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อเทียบกับอินทรีย์สารที่ถูกทำลายมีค่าเท่ากับ 0.49 ลิตร ต่อกรัมชีโอดี ซึ่งไม่ต่ำไปกว่าการทดลองอื่นๆ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น มีส่วนประกอบเป็นมีเทนอยู่ร้อยละ 88.81 และมีการขจัดอินทรีย์สารในถังปฏิกรณ์เท่ากับร้อยละ 39.21 ความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ในถังปฏิกรณ์ยังไม่ต่ำมาก โดยน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์มีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 557 มิลลิกรัม ชีโอดี ต่อลิตร และมีค่า alkalinity เท่ากับ 864 มิลลิกรัม ต่อลิตร อัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ต่อปริมาณ alkalinity เท่ากับ 0.64 แสดงให้เห็นว่า ถังปฏิกรณ์นี้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ที่อัตราการบ้อนอินทรีย์สาร 4.2 กรัมชีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน หมักได้นานถึง 20 วัน โดยระบบไม่ล้มเหลว และความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์ยังไม่ต่ำมากเกินไป ดังนั้นควรจะได้มีการศึกษาต่อไป เช่น ทดลองใช้อัตราการบ้อนอินทรีย์สาร 4.2

ชีวภาพได้ก็ จนทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพแปรตามอัตราการป้อนอินทรีย์สาร และระยะเวลา การหมักที่นานขึ้นจะไม่ช่วยให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองนี้ต่างจากการทดลอง ของ ฮิลล์ และคิสตรา ที่พบว่า การเพิ่มระยะเวลาเก็บกักให้นานขึ้นจะช่วยให้อัตราการผลิต ก๊าซชีวภาพมากขึ้น ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากการทดลองแบบขั้นตอนเดียว และ ประสิทธิภาพใน การทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนต่ำ และต้องใช้เวลาในการเก็บกักนานขึ้น ในงานวิจัยนี้ เป็นการทดลองแบบสองขั้นตอน มีอัตราการป้อนอินทรีย์สารอยู่ในช่วงต่ำกว่า และระยะเวลา เก็บกักสั้นกว่า การทดลองของ ฮิลล์ และคิสตรามาก ทำให้เห็นผลของระยะเวลาเก็บกักต่อ การผลิตก๊าซชีวภาพไม่ชัดเจน คุณภาพน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน เมื่อใช้อัตราการ ป้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 4.2 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน ใช้ระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน จะมีค่า pH เท่ากับ 6.04 ค่า alkalinity เท่ากับ 864 มิลลิกรัม ต่อลิตร ปริมาณกรดอินทรีย์มีค่าเท่ากับ 557 มิลลิกรัม ต่อลิตร และการขจัดอินทรีย์สารมีค่าเป็นร้อยละ 39.21 แต่ถ้าใช้อัตราการป้อน อินทรีย์สารเป็น 1.7 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน จะดีที่สุด ก็จะได้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่า กับ 0.54 ลิตร ต่อลิตร ต่อวัน ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.30 ลิตร ต่อกรัมซีโอดี ที่ป้อน หรือ 0.46 ลิตร ต่อกรัมซีโอดีที่ถูกทำลาย คุณภาพน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน มี pH 6.07 ปริมาณกรดอินทรีย์เท่ากับ 325 มิลลิกรัม ต่อลิตร และปริมาณ alkalinity เท่ากับ 1,055 มิลลิกรัม ต่อลิตร ซึ่งมีปริมาณสูงพอที่จะรักษาความเป็นบัฟเฟอร์ของน้ำหมักในถังปฏิกรณ์ ไว้ได้ และเมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ต่อปริมาณ alkalinity พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.31 ซึ่งเป็นค่าที่ยังแสดงความเป็นบัฟเฟอร์อยู่สูง

pH ของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน จะมีค่าต่ำลง เมื่อมีอัตราการป้อน อินทรีย์สารสูงขึ้น เนื่องจากการสะสมของอินทรีย์สารซึ่งน่าจะเป็นกรดอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ผลิต ก๊าซมีเทน เช่น ถ้าใช้อัตราการป้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 0.2 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน ปริมาณ กรดอินทรีย์ในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์จะมีค่าเท่ากับ 54 มิลลิกรัม ต่อลิตร น้ำเสียมี pH เท่ากับ 7.07 ถ้าใช้อัตราการป้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 0.8 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน ปริมาณกรดอินทรีย์ ในน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์จะมีค่าเท่ากับ 128 มิลลิกรัม ต่อลิตร น้ำเสียมี pH เท่ากับ 6.68 และถ้าใช้อัตราการป้อนอินทรีย์สารเท่ากับ 1.7 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน ปริมาณกรดอินทรีย์ใน น้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์จะมีค่าสูงขึ้นเป็น 325 มิลลิกรัม ต่อลิตร น้ำเสียมี pH เท่ากับ 6.07 เป็นต้น แสดงว่าแม้จะมีเชื้อจุลินทรีย์ผสมที่ผลิตก๊าซมีเทนในถังปฏิกรณ์ปริมาณที่มากพอจนทำให้อัตรา การผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารสูงขึ้นก็ตาม แต่การทดลองนี้ใช้ระยะเวลา

กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน แต่ให้ระยะเวลาเก็บกักเป็น 2 วัน หรือถ้าต้องการอัตราการบ่อนอินทรีย์สารสูงกว่า 5.0 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 1 วัน โดยไม่ให้ระบบล้มเหลวอาจต้องทดลองโดยการเติมสารเคมี เช่น $\text{Ca}(\text{OH})_2$ หรือ NaOH ลงไปเพื่อเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์ให้กับน้ำหมักในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน

2. ในการทดลองครั้งนี้ วัสดุที่ใช้ตรึงจุลินทรีย์ ในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนทำด้วยท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.2 เซนติเมตร ยาวประมาณ 50 เซนติเมตร สอดบรรจุอัดแน่นไว้ในถังปฏิกรณ์ที่ทำด้วยท่อพีวีซีขนาดใหญ่ ในแนวตามยาวของท่อ โดยไม่ได้ตัดวัสดุที่ใช้ตรึงให้เป็นท่อนเล็กๆ เพื่อเพิ่มพื้นที่การเกาะของจุลินทรีย์ ทำให้เกิดผลเสียต่อการผลิตก๊าซชีวภาพคือถ้าบ่อนอินทรีย์สารเข้าถังปฏิกรณ์เร็ว อินทรีย์สารบางส่วนจะไหลผ่านท่อวัสดุตรึงท่อใดท่อนหนึ่งอย่างรวดเร็ว ทำให้อินทรีย์สารมีเวลาสัมผัสกับจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์สั้นมาก ซึ่งจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบการหมักลดลง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้จะแปรปรวน แต่ข้อดีคือช่วยลดปัญหาการอุดตันของของเสียในถังปฏิกรณ์ การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบจะดีขึ้น ถ้าได้มีการพัฒนาวัสดุตรึงให้มีพื้นที่ผิวสำหรับให้จุลินทรีย์เกาะจับมากขึ้นและมีลักษณะโปร่งกลวงเพื่อป้องกันการตกค้าง และสะสมของอินทรีย์สาร

3. การทดลองหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนพบว่า สามารถขจัดกากมะเขือเทศได้ประมาณร้อยละ 20 ของของแข็งทั้งหมด กากส่วนที่เหลืออาจเป็นพวก เซลลูโลสที่ย่อยยาก หรือลิกนินจากส่วนของเมล็ด หากสนใจที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการขจัดกากสูงขึ้น ก็น่าจะทำการศึกษาวิจัยต่อไป โดยคำนึงถึงผลที่ได้ทั้งสองอย่าง คือประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ และการขจัดกาก แต่ในสภาวะปัจจุบันเราอาจจะคำนึงถึงการขจัดกากโดยการนำมาใช้เลี้ยงสัตว์ เพราะน่าจะเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดเพราะสามารถเปลี่ยนกากอินทรีย์สารไปเป็นสารอาหารพวก โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตในรูปของเนื่อสัตว์ที่จะนำมาใช้เป็นอาหารของมนุษย์ได้

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กรมส่งเสริมการเกษตร. สถิติการปลูกพืชผักรายพืช. หน้า 43. กรุงเทพฯ : กองแผนงานและโครงการพิเศษ, 2530.
- . สถิติการปลูกพืชผักรายพืช. หน้า 37. กรุงเทพฯ : กองแผนงานและโครงการพิเศษ, 2531-2532.
- . ปริมาณและมูลค่าการส่งออกพืชผัก. หน้า 3. กรุงเทพฯ : กองแผนงานและโครงการพิเศษ, 2528-2532.
- เกษม พิสิท. การผลิตมะเขือเทศส่งโรงงาน. หน้า 60-67. กรุงเทพฯ : สมาคมการค้าปุ๋ยและธุรกิจเกษตรไทย, 2531
- ทรัพย์ วิจิตรธรรม. การผลิตก๊าซชีวภาพอย่างต่อเนื่อง โดยการตรึงกลุ่มเซลล์ของแบคทีเรีย ไวในเครื่องปฏิกรณ์แบบขึ้นกรอง. วิทยานิพนธ์ วศ.ม. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, 2528. อัดสำเนา
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. คู่มือวิเคราะห์น้ำทิ้ง. กรุงเทพฯ : สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.
- Albertson, O.E. "Ammonia Nitrogen and the Anaerobic Environment," Journal Water Pollution Control Federation. 33 : 978-995; 1961.
- APHA. AWWA. WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. New York : 16 th ED., 1985.
- Daguw, R.R., R.L. Hopkins and R.W. Tonn. "Digestion Fundamentals Applied to Digester Recover - Two Case. Studies." Journal Water Pollution Control Federation. 42 : 1667-1675; 1970.
- Ebbing, D.D. General Chemistry. Boston : Houghton Mifflin Company, 1984.
- Ghosh, S., A. Sajjad and M.P. Henry. "Two-stage up flow Anaerobic Digestion of Concentration Sludge," Biotechnology and Bioengineering Symposium. 13 : 351-370 : 1983.
- Hills. D.J. and D.W. Roberts. "Conversion of Tomato Peach and Honeydew Solid Waste in Methane Gas," Transaction on American Society of Agricultural Engineering. 25 : 820-826; 1982.
- Hills, D.J. and S. Dykstra. "Anaerobic Digestion of Cannery Tomato Solid Wastes," Journal of the Environmental Engineering Division. 106 : 257-266; 1980.

- Hill, D.J. and D. Nakano. "Effect of Particle Size on Anaerobic of Tomato Solid Wastes, " Agricultural Waste. 10 : 285-295; 1984.
- Jeris, J.S. and P.L. McCarty. "Biochemistry of Methane Fermentation Using C₁₄ Tracers, " Journal Water Pollution Control Federation. 37 : 178; 1965.
- Kirsch, E.G. and R.M. Sykes. "Anaerobic Digestion in Biological Waste Treatment, " Progress in Industrial Microbiology. 9; 1971.
- Koster, I.W. "Liquefaction and Acidogenesis of Tomatoes in an Anaerobic Two-Phase Solid Waste Treatment system, " Agricultural Wastes. 11 : 241-252; 1984.
- Kotze, J.P., P.G. Thiel and W.H.J. Hattingh. "Anaerobic Digestion II. the Characterization and Control of Anaerobic Digestion. " Water Research. 3 : 1969.
- Lane, A.G. "Laboratory Scale Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Solid Waste, " Biomass. 5 : 245-159; 1984.
- Lo, K.V., P.H. Liao and N.R. Ballery. "Two-Phase Mesophilic Anaerobic Digestion of Screened Dairy Manure Using Conventional and Fixed-Film Reactors." Agricultural Waste. 17 : 279-291; 1986.
- Lettinga, G. and Others. "Use of Up flow-Sludge Blanket (USB) Reactor Concept for Biological Waste Water Treatment, Especially for Anaerobic Treatment." Biotechnology and Bioengineering. 22 : 699; 1980.
- Maly, J. and H. Fadrus. "Influence of Temperature on Anaerobic Digestion," Journal Water Pollution Control Federation. 43 : 641; 1971.
- Mandels, M. and D. Sternberg. "Recent Advances in Cellulase Technology, " Journal of Fermentation Technology. 54 : 267-286; 1976.
- McCarty, P.L. "Anaerobic Waste Treatment Fundamentals, Part I, Chemistry and Microbiology, " Public Works. 95 : 107; 1964.A.
- _____. "Anaerobic Waste Treatment Fundamentals, Part II, Environmental Requirements and Control, " Public Works. 95 : 123; 1964.B.
- Nemerow, N.L. Industrial Water Pollution. Philippines, Addison-Wesley Publishing Company, 1978.

- Ono, H. "Discussion to Utilization of Materials Derived from Treatment of Wastes From Molasses Distilleries by T.R. Bhaskaran," Advances in Water Pollution Research. 2 : 102; 1965.
- Sarada, R. and K. Nand. "Start-up of Anaerobic Digestion of Tomato-Processing Wastes for Methane Generation," Biological Wastes. 30 : 231-237; 1989.
- Sanders, F. A. and D.E. Bloodgood. "The Effect of Nitrogen to Carbon Ratio on Anaerobic Decomposition." Journal Water Pollution Control Federation. 37 ; 1965.
- Stafford, D.A., R. Horton and D. Hawkes. "Energy from Biomass by Anaerobic Digestion," The WATT comomittee on energy. 26-33; 1979.
- Tanticharoen, M. General Microbiological Principles. First ASEAN Seminer-Workshop on Biogas Technology, Philippines : 12; 1981.
- Tanticharoen, M., N. Supajunya and S. Bhumiratana. "Two-Stage Anaerobic digestion of Solid pineapple wastes," Biogas Technic, Proc. 2 nd ASEAN, Work. 1-4; 1984.
- TATA Energy Research Institute. Biogas Technology. India TATA Energy Documentation and information Centre, : 5-13; 1985.

ภาคผนวก

ตาราง 9 ผลการทดลองเสถียรภาพชีวมวล จากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ โดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาเป็นวัฏ (HRT.) 1 วัน อัตราการไหลเฉลี่ยที่สาร 4.19 กรัมต่อลิตร ต่อวัน

Date	Influent Characteristics			Effluent Characteristics			Gas Production							
	OLR (gCOD/l.d)	I-COD (mg/l)	pH	I-COD (mg/l)	R-COD (%)	pH	I-alk (mg/l)	VFA (mg/l)	I-gas (l/d)	air:CH ₄ :CO ₂	%CH ₄ in CH ₄ +CO ₂	Vg/Vr (l/l)	vg/CODa (l/gCOD)	Vg/CODd (l/gCOD)
1.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.605	-	-	0.72	-	-
2.	4.18	4,644.4	4.24	2,936.5	36.77	5.98	695	450	1.740	-	-	0.78	0.19	0.52
3.	4.00	4,434.7	4.17	2,756.7	37.84	5.85	750	495	1.685	-	-	0.76	0.19	0.50
4.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.810	1.08:1:0.04	95.78	0.82	-	-
5.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.830	-	-	0.82	-	-
6.	4.48	4,975.0	4.24	2,832.0	43.08	5.80	895	675	2.050	-	-	0.92	0.21	0.49
7.	4.18	4,642.2	4.43	2,919.6	37.11	5.70	950	858	1.940	0.84:1:0.10	90.75	0.87	0.21	0.57
8.	4.22	4,686.9	4.31	2,886.0	38.42	6.18	880	525	1.930	-	-	0.87	0.21	0.55
9.	4.21	4,675.3	4.31	2,799.4	40.12	6.35	820	420	1.900	-	-	0.85	0.20	0.50
10.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.750	-	-	0.79	-	-
11.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.890	-	-	0.85	-	-

ตาราง 9 ผลการทดลองเสถียรภาพของน้ำหมักจากน้ำผักกาดเขียวปลีในถังปฏิกรณ์ผลึกน้ำแข็ง ภายใต้สภาวะการหมักแบบอวกาศสองชั้นตอน ระยะเวลาดำเนินการ (HRT.) 1 วัน (ต่อ)

Date	Influent Characteristics			Effluent Characteristics			Gas Production							
	OLR	T-COD	pH	T-COD	R-COD	pH	T-alk	VFA	I-gas	air:CH ₄ :CO ₂	%CH ₄ in	Vg/Vr	vg/CODa	Vg/CODd
	(gCOD/l.d)	(mg/l)		(mg/l)	(%)		(mg/l)	(mg/l)	(l/d)		CH ₄ +CO ₂	(l/l)	(l/gCOD)	(l/gCOD)
12.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.730	-	-	0.78	-	-
13.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.790	-	-	0.81	-	-
14.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.890	-	-	0.85	-	-
15.	4.04	4,478.7	4.34	2,647.8	40.88	6.40	1,060	473	1.770	-	-	0.80	0.20	0.50
16.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.790	-	-	0.81	-	-
17.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.770	-	-	0.80	-	-
18.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.600	0.57:1:0.13	88.18	0.72	-	-
19.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.780	-	-	0.80	-	-
20.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.745	0.92:1:0.24	80.52	0.79	-	-
Mean	4.19	4,648	4.29	2,825	39.21	6.04	865	557	1.800	-	88.81	0.81	0.19	0.49

ตาราง 10 ผลการทดลองผลผลิตก๊าซมีเทน จานวนตัวนักกานะเชื้อเพลิงในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน โดยการประมวลการหมักแบบเปิดอากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาเก็บกัก (HRT.) 2 วัน อัตราการให้อาหารมีสาร 0.15 กรัมชีโอคิต ต่อลิตร ต่อวัน

Date	Influent Characteristics			Effluent Characteristics				Gas Production						
	OLR	I-COD	pH	I-COD	R-COD	pH	I-alk	VFA	I-gas	air:CH ₄ :CO ₂	%CH ₄ in	Vg/Vr	vg/CODa	Vg/CODd
	(gCOD/l.d)	(mg/l)		(mg/l)	(%)		(mg/l)	(mg/l)	(l/d)		CH ₄ +CO ₂	(l/l)	(l/gCOD)	(l/gCOD)
1.	0.14	315.4	5.17	60.3	80.88	7.14	480	75	0.125	-	-	0.06	0.40	0.49
2.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.125	-	-	0.06	-	-
3.	0.15	322.7	4.79	59.1	81.69	7.11	480	75	0.130	-	-	0.06	0.40	0.49
4.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.100	3.37:1:0.02	97.71	0.05	-	-
5.	0.16	361.9	4.63	95.2	73.68	7.19	505	50	0.100	1.22:1:0.08	92.29	0.05	0.28	0.38
6.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.135	-	-	0.06	-	-
7.	0.15	334.9	4.55	75.5	77.47	7.06	470	35	0.120	-	-	0.05	0.36	0.46
8.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.115	2.87:1:0.06	94.69	0.05	-	-
Mean	0.15	334	4.79	73	78.27	7.13	480	59	0.119		94.90	0.05	0.36	0.46

ตาราง 11 ผลการทดลองผลิตก๊าซมีเทน จากน้ำหมักขยะเชื้อเพลิงในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน โดยกระบวนการหมักแบบอัดอากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาเก็บกัก (HRT.) 2 วัน อัตราการย่อยสลายมีสาร 0.27 กรัมที่โอดี ต่อลิตร ต่อวัน

Influent Characteristics				Effluent		Characteristics			Gas Production					
Date	OLR	I-COD	pH	I-COD	R-COD	pH	I-alk	VFA	I-gas	air:CH ₄ :CO ₂	%CH ₄ in CH ₄ +CO ₂	Vg/Vr	vg/CODa	Vg/CODd
	(gCOD/ld)	(mg/l)		(mg/l)	(%)		(mg/l)	(mg/l)	(l/d)			(l/l)	(l/gCOD)	(l/gCOD)
1.	0.26	580.7	4.61	171.6	70.46	7.01	450	50	0.275	-	-	0.12	0.47	0.67
2.	0.27	589.9	4.26	114.7	80.56	7.21	555	45	0.245	-	-	0.11	0.42	0.52
3.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.265	-	-	0.12	-	-
4.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.255	2.50:1:0.03	97.33	0.11	-	-
5.	0.26	571.9	4.54	79.8	73.68	86.85	625	65	0.230	-	-	0.10	0.40	0.46
6.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.225	5.04:1:0.08	92.60	0.10	-	-
7.	0.28	616.6	4.70	73.0	88.20	6.95	540	38	0.235	-	-	0.11	-	-
8.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.215	0.73:1:0.08	93.00	0.10	-	-
Mean	0.27	590	4.62	110	81.39	7.01	543	50	0.243	-	94.31	0.11	0.41	0.51

ตาราง 12 ผลการทดลองเสถียรภาพ จากน้ำทิ้งภาคเหนือเพื่อใช้ในการปฏิบัติการเสถียรภาพ โดยระบบการหมักแบบเอาน้ำอากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาดำเนินการ (HRT.) 2 วัน อัตราการให้อาหาร 0.67 กรัมชีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน

Influent Characteristics			Effluent Characteristics			Gas Production								
Date	OLR	I-COD	pH	I-COD	R-COD	pH	I-alk	VFA	I-gas	air:CH ₄ :CO ₂	%CH ₄ in	Vg/Vr	vg/CODa	Vg/CODd
	(gCOD/l.d)	(mg/l)		(mg/l)	(%)		(mg/l)	(mg/l)	(l/d)		CH ₄ +CO ₂	(l/l)	(l/gCOD)	(l/gCOD)
1.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.600	-	-	0.27	-	-
2.	0.67	1,489.8	4.25	208.2	86.03	6.63	640	145	0.590	-	-	0.27	0.40	0.46
3.	0.67	1,485.6	4.26	110.2	92.58	6.65	670	125	0.625	-	-	0.28	0.42	0.45
4.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.570	5.82:1:0.05	95.56	0.26	-	-
Mean	0.67	1,488	4.26	159	89.31	6.64	655	135	0.596	-	95.56	0.27	0.40	0.45

ตาราง 13 ผลการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ จากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ โดยกระบวนการหมักแบบอัดอากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาเก็บก๊าซ (HRT.) 2 วัน อัตราการไหลเฉลี่ยที่สาร 0.88 กรัม/ลิตร ต่อวัน

Date	Influent Characteristics				Effluent Characteristics				Gas Production			
	OLR	I-COD (mg/l)	pH	I-COD (mg/l)	R-COD (%)	pH	I-alk (mg/l)	VFA (mg/l)	I-gas (l/d)	air:CH ₄ :CO ₂ (l/l)	%CH ₄ in CH ₄ +CO ₂ (l/l)	Vg/CODa Vg/CODd (l/gCOD) (l/gCOD)
1.	0.89	1,981.6	4.21	313.4	84.19	6.77	660	115	0.720	-	0.32	0.36 0.43
2.	0.87	1,935.6	4.09	331.8	82.84	6.67	710	125	0.700	1.70:1:0.05	94.79	0.32 0.36 0.43
3.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.650	-	0.29	- -
4.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.690	1.92:1:0.13	88.41	0.31 - -
Mean	0.88	1,959	4.15	333	83.53	6.72	685	120	0.690	-	91.60	0.31 0.36 0.43

ตาราง 14 ผลการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ จากน้ำหมักกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ โดยกระบวนการหมักแบบถังอากาศสองชั้นแบบ ระบบเวลาเก็บกัก (HRT.) 2 วัน อัตราการให้อาหาร 1.7 กรัมชีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน

Date	Influent Characteristics			Effluent Characteristics			Gas Production						
	OLR (gCOD/l.d)	T-COD (mg/l)	pH	T-COD (mg/l)	R-COD (%)	pH	T-alk (mg/l)	VFA (mg/l)	I-gas (l/d)	air:CH ₄ :CO ₂ (1/1)	%CH ₄ in CH ₄ +CO ₂ (1/1)	vg/CODa (1/gCOD)	Vg/CODd (1/gCOD)
1.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.090	-	-	0.49	-
2.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.135	-	-	0.51	-
3.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.160	-	-	0.52	-
4.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.320	-	-	0.59	-
5.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.300	-	-	0.59	-
6.	1.89	4,206.6	4.47	1,402.2	66.67	6.02	1,030	270	1.250	-	-	0.56	0.45
7.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.220	-	-	0.55	-
8.	1.75	3,883.6	4.56	1,267.3	67.37	6.17	1,100	345	1.180	-	-	0.53	0.45
9.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.270	-	-	0.57	-
10.	1.76	3,904.1	4.41	1,344.0	65.57	6.10	1,080	375	1.180	-	-	0.53	0.46
11.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.260	-	-	0.57	-

ตาราง 15 ผลการทดลองเสถียรภาพชีวภาพจากน้ำเสียจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ระยะเวลาดำเนินการ (HRT.) 5 วัน

Influent Characteristics			Effluent Characteristics		Gas Production								
Date	OLR (gCOD/l.d)	I-COD (mg/l)	pH	I-COD (mg/l)	R-COD (%)	pH	I-alk (mg/l)	VFA (mg/l)	I-gas (l/d)	air:CH ₄ :CO ₂ (1/1)	%CH ₄ in CH ₄ +CO ₂ (1/1)	vg/CODa (1/gCOD)	Vg/CODd (1/gCOD)
1.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.080	-	-	0.04	-
2.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.080	-	-	0.04	-
3.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.120	-	-	0.05	-
4.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.110	-	-	0.05	-
5.	0.13	738.1	4.51	85.7	88.39	6.96	635	75	0.110	-	-	0.05	0.37
6.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.123	0.40:1:0.12	89.09	0.06	-
7.	0.13	732.1	4.53	83.0	88.66	6.94	620	58	0.085	-	-	0.04	0.29
8.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.115	-	-	0.55	-
9.	0.14	762.4	4.28	72.3	90.52	7.02	605	77	0.060	-	-	0.03	0.20
10.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.100	3.97:1:0.19	83.83	0.05	-
Mean	0.13	744	4.44	83	89.20	6.97	620	70	0.098	-	86.46	0.04	0.33
													0.37

ตาราง 16 ผลการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ จากน้ำผสมกากมะเขือเทศในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ โดยกระบวนการหมักแบบอเนกอากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาเก็บก๊าซ (HRT.) 5 วัน อัตราการให้อาหาร 0.19 กรัมชีโอกลิตต่อลิตร ต่อวัน

Date	Influent Characteristics			Effluent Characteristics			Gas Production							
	OLR	I-COD	pH	I-COD	R-COD	pH	I-alk	VFA	I-gas	air:CH ₄ :CO ₂	%CH ₄ in	Vg/Vr	vg/CODa	Vg/CODd
	(gCOD/l.d)	(mg/l)		(mg/l)	(%)		(mg/l)	(mg/l)	(l/d)		CH ₄ +CO ₂	(l/l)	(1/gCOD)	(1/gCOD)
1.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.200	-	-	0.09	-	-
2.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.175	-	-	0.08	-	-
3.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.145	-	-	0.07	-	-
4.	0.19	1,072.5	4.11	100.8	90.60	7.02	785	120	0.150	-	-	0.07	0.35	0.39
5.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.160	-	-	0.07	-	-
6.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.170	-	-	0.08	-	-
7.	0.19	1,057.6	4.05	96.2	90.91	6.95	740	80	0.180	-	-	0.08	0.43	0.47
8.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.175	0.55:1:0.15	86.74	-	-	-
9.	0.19	1,076.6	4.11	90.9	91.56	6.89	710	60	0.175	-	-	0.08	0.41	0.45
10.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.170	-	94.36	0.08	-	-
Mean	0.19	1,069	4.09	96	91.02	6.95	745	87	0.170	-	90.55	0.08	0.40	0.44

ตาราง 17 ผลการทดลองผลตกตะกอน จากน้ำหมักกานะเชื้อเห็ดในถังปฏิกรณ์ผลตกตะกอน โดยการควบคุมการหมักแบบอัตโนมัติของถังหมัก (HRT.) 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.26 กรัมซีไอดี ต่อลิตร ต่อวัน

Influent Characteristics				Effluent		Characteristics			Gas Production					
Date	OLR	I-COD	pH	I-COD	R-COD	pH	I-alk	VFA	I-gas	air:CH ₄ :CO ₂	%CH ₄ in	Vg/Vr	vg/CODa	Vg/CODd
	(gCOD/l.d)	(mg/l)		(mg/l)	(%)		(mg/l)	(mg/l)	(l/d)		CH ₄ +CO ₂	(1/l)	(1/gCOD)	(1/gCOD)
1.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.245	-	-	0.11	-	-
2.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.245	-	-	0.11	-	-
3.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.240	-	-	0.11	-	-
4.	0.26	1,469.3	4.37	83.3	94.33	6.98	730	100	0.265	-	-	0.12	0.45	0.48
5.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.270	0.76:1:0.32	76.01	0.12	-	-
6.	0.25	1,413.8	4.24	81.9	94.21	7.29	735	75	0.230	-	-	0.10	0.41	0.44
7.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.285	-	-	0.13	-	-
8.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.268	-	-	0.12	-	-
9.	0.25	1,407.5	4.29	84.0	94.03	7.06	720	77	0.275	-	-	0.12	0.49	0.52
10.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.250	2.09:1:0.14	87.40	0.11	-	-
Mean	0.26	1,439	4.30	83	94.19	7.11	728	84	0.257	-	81.71	0.12	0.45	0.48

ตาราง 18 ผลการทดลองเสถียรภาพชีวภาพ จากน้ำขี้ไก่กานจะเชื้อเพลิงในถังปฏิกรณ์ผลึกน้ำขี้ไก่กาน โดยกระบวนการหมักแบบแอโรบิกสองขั้นตอน ระยะเวลาเก็บกัก (HRT.) 5 วัน
อัตราการให้อาหาร 0-31 กรัมที่ไอดี ต่อลิตร ชั่วโมง

Date	Influent Characteristics			Effluent Characteristics			Gas Production							
	OLR	T-COD	pH	I-COD	R-COD	pH	I-alk	VFA	I-gas	air:CH ₄ :CO ₂	%CH ₄ in CH ₄ +CO ₂	Vg/Vr	vg/CODa	Vg/CODd
	(gCOD/l.d)	(mg/l)		(mg/l)	(%)		(mg/l)	(mg/l)	(l/d)		(l/l)	(l/l)	(l/gCOD)	(l/gCOD)
1.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.295	-	-	0.13	-	-
2.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.295	-	-	0.13	-	-
3.	0.30	1,661.9	4.22	101.1	93.92	6.40	670	95	0.305	-	-	0.14	0.46	0.49
4.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.310	-	-	0.14	-	-
5.	0.29	1,637.2	4.39	90.2	94.49	6.89	760	60	0.315	4.82:1:0.05	95.5	0.14	0.48	0.51
6.	0.31	1,730.2	4.40	113.5	93.44	6.74	760	55	0.275	-	-	0.12	0.40	0.43
7.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.275	-	-	0.12	-	-
8.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.295	-	-	0.13	-	-
9.	0.32	1,774.3	4.21	129.0	92.73	7.33	730	95	0.285	-	-	0.13	0.40	0.43
10.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.295	1.07:1:0.21	82.63	0.13	-	-
Mean	0.31	1,701	4.31	109	93.62	6.84	730	76	0.295	-	89.07	0.13	0.43	0.46

ตาราง 19 ผลการทดลองผลิตก๊าซชีวภาพ จากน้ำคอกหมูและเชื้อเพลิงในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ โดยกระบวนการหมักแบบอัดอากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาเก็บกัก (HRT.) 10 วัน อัตราการป้อนเป็นปริมาตร 0.14 ลิตรต่อชั่วโมง

Influent Characteristics				Effluent Characteristics			Gas Production							
Date	OLR	I-COD	pH	I-COD	R-COD	pH	I-alk	VFA	I-gas	air:CH ₄ :CO ₂	%CH ₄ in CH ₄ +CO ₂	Vg/Vr	vg/CODa	Vg/CODd
	(gCOD/l.d)	(mg/l)		(mg/l)	(%)		(mg/l)	(mg/l)	(l/d)			(l/l)	(l/gCOD)	(l/gCOD)
1.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.127	-	-	0.06	-	-
2.	0.14	1,576.4	4.36	236.9	91.31	7.17	805	55	0.125	-	-	0.06	0.40	0.44
3.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.110	-	-	0.05	-	-
4.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.105	-	-	0.05	-	-
5.	0.14	1,572.3	4.68	123.3	92.16	7.16	805	50	0.120	-	-	0.05	0.38	0.41
6.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.110	-	-	0.05	-	-
7.	0.14	1,576.4	4.33	113.3	92.81	6.96	780	60	0.132	-	-	0.06	0.42	0.45
8.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.085	-	-	0.06	-	-
9.	0.14	1,527.1	4.30	110.3	92.77	7.02	785	60	0.135	-	-	0.06	0.44	0.47
10.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.125	-	-	0.06	-	-
11.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.140	-	-	0.06	-	-

ตาราง 19 ผลการทดลองผลิตก๊าซมีเทน จากน้ำหมักกานะเชื้อเห็ดในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน โดยกระบวนการหมักแบบไฮโดรไลติก (HRT.) 10 วัน (ต่อ)

Date	Influent Characteristics			Effluent Characteristics			Gas Production							
	OLR (gCOD/l.d)	I-COD (mg/l)	pH	I-COD (mg/l.)	R-COD (%)	pH	I-alk (mg/l)	VFA (mg/l)	I-gas (l/d)	air:CH ₄ :CO ₂	%CH ₄ in CH ₄ +CO ₂	Vg/Vr (1/1)	vg/CODa (1/gCOD)	Vg/CODd (1/gCOD)
12.	0.14	1,576.4	4.27	113.3	92.81	7.01	775	60	0.140	-	-	0.06	0.44	0.47
13.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.155	4.73:1:0.07	93.47	0.07	-	-
14.	0.14	1,602.0	4.24	92.2	94.24	6.95	785	70	0.128	-	-	0.06	0.40	0.42
15.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.110	-	-	0.05	-	-
16.	0.14	1,504.9	4.22	116.5	92.26	7.09	775	115	0.145	-	-	0.07	0.48	0.52
17.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.130	-	-	0.06	-	-
18.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.115	-	-	0.05	-	-
19.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.125	-	-	0.06	-	-
20.	0.14	1,602.0	4.23	106.8	93.33	7.05	785	70	0.136	*	*	0.06	0.42	0.45
Mean	0.14	1,567	4.33	114	92.72	7.05	789	69	0.125	-	93.18	0.06	0.40	0.43

ตาราง 20 ผลการทดลองผลดีน้ำที่เพิ่ม จากน้ำหมักถั่วเขียวเพื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนในน้ำหมัก โดยกระบวนการหมักแบบแอโรบิก (HRT.) 10 วัน
อัตราการให้อาหารสัตว์ 0.22 กรัมต่อลิตร ต่อวัน

Influent Characteristics				Effluent Characteristics			Gas Production							
Date	OLR (gCOD/l.d)	T-COD (mg/l)	pH	I-COD (mg/l)	R-COD (%)	pH	I-alk (mg/l)	VFA (mg/l)	I-gas (l/d)	air:CH ₄ :CO ₂	%CH ₄ in CH ₄ +CO ₂	Vg/Vr (l/l)	vg/CODa (1/gCOD)	Vg/CODd (1/gCOD)
1.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.240	-	-	0.11	-	-
2.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.250	-	-	0.11	-	-
3.	0.23	2,553.2	4.05	88.7	96.53	6.89	880	70	0.270	-	-	0.12	0.53	0.55
4.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.240	-	-	0.11	-	-
5.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.165	-	-	0.07	-	-
6.	0.22	2,487.6	4.18	104.5	95.80	7.00	860	623	0.205	1.50:1:0.23	81.41	0.09	0.41	0.43
7.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.195	-	-	0.09	-	-
8.	0.23	2,543.6	4.07	115.0	95.48	6.97	860	140	0.210	-	-	0.09	0.41	0.43
9.	0.21	2,315.3	4.00	113.3	95.11	6.89	880	75	0.145	-	-	0.07	0.31	0.33
10.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.220	-	-	0.10	-	-
11.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.215	-	-	0.10	-	-

ตาราง 20 ผลการทดลองผลิตก๊าซมีเทน จากน้ำหมักถั่วเขียวเพื่อเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทน โดยการบ่มการหมักแบบอากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาเก็บก๊าซ (HRT.) 10 วัน (ต่อ)

Date	Influent Characteristics			Effluent Characteristics			Gas Production							
	OLR	I-COD (mg/l)	pH	I-COD (mg/l)	R-COD (%)	pH	I-alk (mg/l)	VFA (mg/l)	I-gas (1/d)	air:CH ₄ :CO ₂	%CH ₄ in CH ₄ +CO ₂	Vg/Vr (1/l)	vg/CODa (1/gCOD)	Vg/CODd (1/gCOD)
12.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.205	-	-	0.09	-	-
13.	0.21	2,367.1	4.34	115.9	95.10	6.79	910	165	0.245	-	-	0.11	0.52	0.55
14.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.235	-	-	0.11	-	-
15.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.230	-	-	0.10	-	-
16.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.230	-	-	0.10	-	-
17.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.200	-	-	0.09	-	-
18.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.180	-	-	0.08	-	-
19.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.185	-	-	0.08	-	-
20.	0.20	2,198.1	4.14	115.9	94.73	7.14	890	105	0.200	1.37:1:0.25	80.03	0.09	0.45	0.48
Mean	0.22	2,411	4.13	109	95.48	6.95	880	136	0.213	-	80.72	0.10	0.49	0.51

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ	นายวิบูลย์	ชื่อสกุล	นุชประมูล
เกิดวันที่	15	เดือน	เมษายน
สถานที่เกิด			พุทธศักราช 2499
สถานที่อยู่ปัจจุบัน			อำเภอบางบ่อ จังหวัดสมุทรปราการ
			บ้านเลขที่ 191/7 ซอยสวนอ้อย
			ถนนเพชรเกษม แขวงบางหว้า
			เขตภาษีเจริญ กรุงเทพฯ 10160
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน			หัวหน้าแผนกชั้นสูตรโรค
สถานที่ทำงานปัจจุบัน			แผนกชั้นสูตรโรค
			กองการแพทย์
			การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
			บางกรวย นนทบุรี

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2521	วท.บ (เทคนิคการแพทย์) จากมหาวิทยาลัยมหิดล
พ.ศ. 2534	วท.ม (เคมีชีวภาพ) จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

การหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน

บทคัดย่อ
ของ
วิบูลย์ นุชประมูล

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกเคมีชีวภาพ

มีนาคม 2535

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการหมักกากมะเขือเทศแบบอวกาศสองชั้นตอน และทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง จากการทดลองพบว่า ในขั้นตอนการหมักเพื่อผลิตกรดอินทรีย์ โดยใช้กากมะเขือเทศในน้ำเข้มข้น 10 และ 20 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน น้ำหมักที่กรองได้มีปริมาณอินทรีย์สารเฉลี่ยเท่ากับ 1,754 และ 2,817 มิลลิกรัม ซีโอดีต่อลิตร pH เท่ากับ 4.30 และ 4.22 การขจัดกากคึกเป็นร้อยละ 20.23 และ 12.74 ของของแข็งทั้งหมด หรือเท่ากับร้อยละ 19.61 และ 12.15 ของของแข็งระเหยตามลำดับ

ขั้นตอนการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทน ได้ศึกษาหาอัตราการป้อนอินทรีย์สารที่เหมาะสม โดยศึกษาผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สารต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (V_g/V_r) ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (V_g/COD_a และ V_g/COD_d) ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย (VFA) ปริมาณ alkalinity และ pH ของน้ำหมักที่ได้ปริมาณของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทน และการขจัดอินทรีย์สารในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน พบว่า เมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารสูงขึ้น จะทำให้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงขึ้น V_g/COD_a มีค่าลดลง แต่ไม่มีผลต่อ V_g/COD_d ปริมาณ alkalinity ของน้ำหมักที่ได้จะเปลี่ยนไปเมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารสูงกว่า 1.7 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน และ pH ของน้ำหมักจะลดลงและเริ่มคงที่เมื่ออัตราการป้อนอินทรีย์สารสูงกว่า 1.7 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสะสมในถังปฏิกรณ์มากขึ้น การขจัดอินทรีย์สารจะลดลงแต่ไม่มีผลต่อปริมาณของก๊าซมีเทน ในก๊าซผสมระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทน โดยได้ปริมาณก๊าซมีเทน ร้อยละ 88.02 ถึง 94.60

การศึกษาผลระยะเวลาเก็บกัก ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ พบว่า เมื่อใช้น้ำหมักที่มีความเข้มข้นของอินทรีย์สารประมาณ 1.5 กรัม ซีโอดี ต่อลิตรป้อน โดยมีระยะเวลาเก็บกักลดลงจาก 10 วัน เป็น 5 และ 2 วัน จะทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น คือเพิ่มจาก 0.06 ลิตรต่อลิตร เป็น 0.13 และ 0.27 ลิตรต่อลิตร pH ของน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ลดลงจาก 7.05 เป็น 6.98 และ 6.64 ตามลำดับ แต่ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและการขจัดอินทรีย์สาร

ถังปฏิกรณ์ที่ใช้สามารถทนต่อการหมัก ที่มีระยะเวลาเก็บกักเพียง 1 วันได้ โดยทดลอง
นาน 20 วัน มีอัตราการบ่อนอินทรีย์สารเป็น 4.2 กรัมซีโอดี ต่อลิตร ต่อวัน จะได้อัตราการ
ผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 0.81 ลิตร ต่อลิตร และน้ำเสียที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนมี
pH เท่ากับ 6.04 ค่า alkalinity เท่ากับ 864 มิลลิกรัม ต่อลิตร ปริมาณกรดไขมัน
ระเหยมีค่าเท่ากับ 557 มิลลิกรัม ต่อลิตร การขจัดอินทรีย์สารมีค่าเป็นร้อยละ 39.21

TWO-STAGE ANAEROBIC FERMENTATION OF TOMATO SOLID WASTE

AN ABSTRACT

BY

VIBOUL NUCHPRAMOOL

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

March 1992

This research was carried out to study the biogas production from two-stage anaerobic digestion of tomato solid waste. The experiments were performed at ambient temperature. The tomato solid waste suspension at the concentrations of 10 and 20 g per liter was fermented in the acidogenic stage with 3-day hydraulic retention time. The results showed that the filtered liquor contained an organic contents in the average of 1,754 and 2,817 mg COD per litre, pH values of 4.30 and 4.22. The solid waste destruction was 20.23 and 12.74% of the total solid or 19.61 and 12.15% of the volatile solid, respectively.

The experiments in the methanogenic stage were carried out to study the effect of organic loading rates on gas production rate (V_g/V_r), the efficiency of gas production (V_g/COD_a and V_g/COD_d), the amount of volatile fatty acid (VFA), alkalinity and pH of effluent, methane content in the combined gases between carbondioxide and methane and also the organic destruction. It was found that when increasing organic loading rates, the rates of gas production increased, V_g/COD_a decreased, the amount of volatile fatty acid increased and the pH of the effluent decreased and the organic destruction decreased. It was noticeable that when the organic loading rate was more than 1.7 g COD/litre/day, the alkalinity of effluent varied and pH values became constant. An increase in organic loading rate had little if any effect on V_g/COD_d and also methane content, which in the ranges of 88.02 to 94.60 in the combined gases between carbondioxide and methane.

In addition, the effect of hydraulic retention time on gas production was investigated. It was shown that when the fermented liquor containing 1.5 g COD/litre was fed into methane reactor with decreasing the hydraulic retention times from 10 to 5 and 2 days, the gas production increased from 0.06 to 0.13 and 0.27 litre/litre, pH of the effluent decreased from 7.05 to 6.98 and 6.64, respectively. The decrease in hydraulic retention time did not affect the efficiency of gas production and organic destruction.

However, the system in methane reactor could tolerate the fermentation of 1 day hydraulic retention time with the organic loading rate of 4.2 g COD/litre/day. The maximum gas production was obtained at the rate of 0.81 litre/litre. The effluent had pH value of 6.04, the alkalinity content of 864 mg/litre and the volatile fatty acid content of 557 mg/litre. The organic destruction was 39.21%.