

สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียแ่งมันสำหรับหลังควบคู่กับการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพ
ด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง



นางสาวอาทิตยา มิตรจิตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMUM CONDITIONS FOR CASSAVA WASTEWATER TREATMENT
AND BIOHYDROGEN PRODUCTION BY TWO-STAGE
DARK AND PHOTO FERMENTATION PROCESS



Miss Artitaya Mitjit

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง
ควบคู่กับการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการหมัก
สองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง

โดย

นางสาวอาทิตย์ยา มิตรจิตร

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

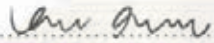
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์)


..... กรรมการ
(ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. สาโรช บุญกิจสมบัติ)

อาทิตยา มิตรจิตร : สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังควบคู่กับการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง. (OPTIMUM CONDITIONS FOR CASSAVA WASTEWATER TREATMENT AND BIOHYDROGEN PRODUCTION BY TWO-STAGE DARK AND PHOTO FERMENTATION PROCESS) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. วิบูลย์ลักษณะ ทุ่งรัมย์, 143 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง โดยให้ความสนใจกับสภาวะที่เหมาะสมต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนควบคู่ไปกับการบำบัดน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังที่มีค่าซีไอดีเริ่มต้น 5,000 มก./ล. ทำการเดินระบบต่อกันโดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ 2 ชนิด คือ หัวเชื้อผสมของจุลินทรีย์แบบไร้อากาศในการหมักแบบไม่ใช้แสงและหัวเชื้อผสมของจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสงในการหมักแบบใช้แสง ผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชและอุณหภูมิที่ทำให้กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีและมีศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพได้สูงสุด คือ พีเอชเท่ากับ 5 และอุณหภูมิเท่ากับ 55 °ซ โดยจะมีปริมาณไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 52.9 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีไอดี มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสียเท่ากับ 28.72 มล./ล.-ชม. และมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเท่ากับ 30.04% จากนั้นเมื่อผ่านน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการหมักแบบใช้แสง ผลการทดลองพบว่าในขั้นตอนการหมักแบบใช้แสงจะได้ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 5.5 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีไอดี มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสียเท่ากับ 1.07 มล./ล.-ชม. และมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเท่ากับ 17.89% ส่งผลให้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงแล้ว ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์และประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีรวมจากสองขั้นตอนมีค่าเท่ากับ 58.4 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีไอดี และ 47.94% ตามลำดับ โดยผลการทดลองยืนยันให้เห็นว่าการเดินระบบต่อกันด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพและบำบัดค่าซีไอดีของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังได้

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต อาทิตยา มิตรจิตร
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ทุ่งรัมย์
ปีการศึกษา 2553.....

5070646321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : CASSAVA WASTEWATER / WASTEWATER TREATMENT /
BIOHYDROGEN PRODUCTION / DARK FERMENTATION / PHOTO FERMENTATION

ARTITAYA MITJIT : OPTIMUM CONDITIONS FOR CASSAVA WASTEWATER
TREATMENT AND BIOHYDROGEN PRODUCTION BY TWO-STAGE DARK
AND PHOTO FERMENTATION PROCESS. ADVISOR : ASST.PROF.
WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D., 143 pp.

This research aims to study the efficiency of wastewater treatment and biohydrogen production from cassava wastewater by the two-stage dark and photo fermentation process. The batch experiments were conducted to investigate the optimum condition of pH and temperature for increasing hydrogen production efficiency from cassava wastewater in which COD concentration was about 5,000 mg/l., using anaerobic mixed cultures in dark fermentation and the photosynthetic bacteria in photo fermentation. The results showed that optimum pH and temperature for the maximum hydrogen production in dark fermentation was achieved at pH 5 and 55°C, providing the hydrogen yield of 52.9 ml H₂/gCOD. The maximum H₂ production rate per a liter of wastewater of 28.72 ml/L-hr and the efficiency of COD removal of 30.04%, respectively. Photo fermentation provided the hydrogen yield of 5.5 ml H₂/gCOD, the maximum H₂ production rate per a liter of wastewater of 1.07 ml/L-hr and the efficiency of COD removal of 17.89%, respectively. The overall efficiency of the two-stage dark and photo fermentation achieved the hydrogen yield of 58.4 ml H₂/gCOD and the COD removal of 47.94%. Our result suggested that using the two-stage process combining dark and photo fermentation might enhance the biohydrogen production and the COD removal efficiency.

Department : Environmental Engineering... Student's Signature Artitaya Mitjit
Field of Study : Environmental Engineering... Advisor's Signature Wiboonluk P.
Academic Year : 2010.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะ ฝั่งรัมย์ อาจารย์ที่
ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้สละเวลาคอยให้การอบรมสั่งสอน คำแนะนำ และแนวทางที่เป็นประโยชน์
ต่อการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยอย่างเต็มที่ในการทำวิทยานิพนธ์
เล่มนี้ตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิปเสนีย์ ประธานกรรมการสอบ
วิทยานิพนธ์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร. สาโรช บุญยกิจสมบัติ
กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้สละเวลาในการสอบวิทยานิพนธ์ และให้
คำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาคีวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการวิจัยและ
บัณฑิต รวมทั้งครูผู้ดูแลห้องปฏิบัติการของภาคีวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกๆ ท่านที่คอยให้
คำแนะนำเกี่ยวกับการทดลอง ตลอดจนขอขอบคุณพี่เหม้ม และศุภณีย์เชี่ยวชาญด้านขยะและของ
เสียอันตราย อาคารสีภาควิชา ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และให้คำปรึกษาใน
การใช้อุปกรณ์ต่างๆ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยบางส่วนจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย และทุนสนับสนุนเพิ่มเติมจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงาน
นโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบริษัท อุตสาหกรรมแป้งมันบ้านโป่ง จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ใน
การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย และ บริษัท เสริมสุข จำกัด (โรงงานปทุมธานี) ที่ให้ความอนุเคราะห์
หัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นเพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ภาคีวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่
ให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ให้กำเนิด อบรมสั่งสอน ให้การ
สนับสนุน และคอยช่วยเหลือ รวมทั้งเป็นกำลังใจในการศึกษา จนทำให้การทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้
ประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 อุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....	4
2.1.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังดิบ.....	5
2.1.2 น้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....	8
2.1.3 การจัดการของเสียที่เกิดจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....	9
2.2 กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ.....	10
2.2.1 กลไกการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....	11
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ.....	14
2.3 พลังงานทดแทนและพลังงานไฮโดรเจน.....	20
2.3.1 พลังงานทดแทนและแหล่งพลังงานทดแทน.....	20
2.3.2 พลังงานไฮโดรเจน.....	22
2.3.3 คุณสมบัติของไฮโดรเจน.....	23
2.3.4 เทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจน.....	23
2.3.5 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ.....	30
2.3.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ.....	32

	หน้า
2.3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์.....	40
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	41
2.4.1 การผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียแ่งมันสำปะหลัง.....	41
2.4.2 กระบวนการหมักแบบสองขั้นตอน.....	43
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	45
3.1 แผนการวิจัย.....	45
3.2 การเก็บตัวอย่างและการรักษาสภาพน้ำเสีย.....	47
3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	47
3.4 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์.....	49
3.4.1 ชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการหมัก.....	49
3.4.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	50
3.5 วิธีการทดลอง.....	51
3.5.1 การเตรียมน้ำเสียแ่งมันสำปะหลัง.....	51
3.5.2 การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์.....	51
3.5.3 การดำเนินการทดลอง.....	52
3.5.4 การเก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ.....	54
3.5.5 การวัดปริมาณและการเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ.....	55
3.6 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลอง.....	55
3.6.1 การวิเคราะห์กรดไขมันระเหยด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี.....	56
3.6.2 การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี.....	57
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	58
4.1 ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียและหัวเชื้อที่ใช้ในการศึกษา.....	59
4.1.1 ลักษณะสมบัติน้ำเสียแ่งมันสำปะหลัง.....	58
4.1.2 ลักษณะสมบัติของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบ.....	60
4.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสีย แ่งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง	63
4.2.1 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำในระหว่างการเดินระบบ..	63
4.2.2 ก๊าซชีวภาพและการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเดินระบบ.....	68

4.3 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจาก น้ำเสียแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและ ใช้แสง.....	74
4.3.1 สภาวะพีเอชที่เหมาะสม.....	74
4.3.2 สภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสม.....	85
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	95
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	95
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	96
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก.....	105
ภาคผนวก ก ผลการทดลองค่าซีไอดีและกรดไขมันระเหย.....	106
ภาคผนวก ข ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจน.....	119
ภาคผนวก ค กราฟสมการ Modifield Gompertz.....	136
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	143

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	จุดที่เกิดน้ำเสียในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....	9
2.2	ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....	9
2.3	ระดับความเป็นพิษของอื้ออนบวชนิดต่างๆ ตามระดับความเข้มข้น.....	18
2.4	ปริมาณการใช้พลังงานทดแทนภายในประเทศจำแนกตามประเภทพลังงาน.....	21
2.5	ตัวอย่างเวลากักพักทางศาสตร์ที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ จากน้ำเสียประเภทต่างๆ โดยใช้ถึงปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ.....	34
3.1	สรุปตัวแปรทั้งหมดที่ทำการศึกษานงานวิจัยนี้.....	48
3.2	พารามิเตอร์ จุดเก็บตัวอย่าง ความถี่ และวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง.....	55
3.3	รายละเอียดของอุปกรณ์และสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์กรดไขมันระเหย.....	56
3.4	รายละเอียดของอุปกรณ์และสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน	57
4.1	พารามิเตอร์เบื้องต้นของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง.....	59
4.2	พารามิเตอร์ต่างๆ ของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง.....	61
4.3	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยจากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	70
4.4	พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากราฟสมการ Modifield Gompertz ในกระบวนการ หมักสองขั้นตอน.....	73
4.5	ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	74
4.6	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยที่ค่าพีเอชต่างๆ จากกระบวนการหมัก สองขั้นตอน.....	80
4.7	พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากราฟสมการ Modifield Gompertz ที่ค่าพีเอชต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	82
4.8	ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์ที่ค่าพีเอชต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	83
4.9	การเปรียบเทียบไฮโดรเจนยิลด์จากสภาวะพีเอชในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยต่างๆ	84
4.10	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการ หมักสองขั้นตอน.....	90
4.11	พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากราฟสมการ Modifield Gompertz ที่ค่าอุณหภูมิ ต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	92
4.12	ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	93

ตารางที่

หน้า

4.13	การเปรียบเทียบไฮโดรเจนคลอไรด์จากสภาวะอุณหภูมิในงานวิจัยนี้กับงานวิจัย ต่างๆ.....	93
------	---	----



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังดิบ.....	5
2.2	ปฏิริยารีดอกซีในการบำบัดน้ำเสีย.....	11
2.3	ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการไร้อากาศ.....	11
2.4	การเปลี่ยนค่าพลังงานอิสระเมื่อความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าเปลี่ยนแปลง.....	17
2.5	การสังเคราะห์แสงทางชีวภาพโดยตรง.....	26
2.6	การสังเคราะห์แสงทางชีวภาพทางอ้อม.....	27
2.7	กระบวนการหมักแบบใช้แสง.....	28
2.8	กระบวนการหมักแบบไร้แสง.....	29
2.9	ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงซ้อนแบบไร้อากาศ.....	29
2.10	ปริมาณซีโอไลท์ที่เหลือจากกระบวนการหมักต่างๆ.....	30
2.11	การหาค่าสัมประสิทธิ์จากสมการ Modified Gompertz.....	41
3.1	แผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	46
3.2	ลำดับการติดตั้งถึงปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการหมักต่อสองขั้นตอน.....	49
3.3	รายละเอียดการเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์สำหรับถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการหมัก	50
3.4	หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	52
3.5	การควบคุมกระบวนการหมักให้อยู่ภายใต้สภาวะไม่ใช้แสงด้วยการควบคุม	
	พลาสติกดำตลอดเวลา.....	53
3.6	การควบคุมอุณหภูมิในการเดินระบบด้วยอ่างน้ำรับอุณหภูมิ.....	53
3.7	การควบคุมกระบวนการหมักให้อยู่ภายใต้สภาวะมีแสงด้วยการใช้หลอดไฟสอง	
	ตลอดเวลา.....	54
4.1	ลักษณะน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังการกรองของแข็งแขวนลอยออก	60
4.2	หัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ใช้การวิจัยก่อนและหลังการปรับสภาพด้วยการปั่น	
	หยาบและให้ความร้อน.....	61
4.3	หัวเชื้อผสมของจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสงเริ่มต้นที่ใช้ในงานวิจัย.....	63
4.4	การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอไลท์และประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไลท์จากกระบวนการ	
	หมักสองขั้นตอน.....	65

รูปที่		หน้า
4.5	ค่าพีเอชและปริมาณกรดไขมันระเหยจากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	67
4.6	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	69
4.7	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมจากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	72
4.8	ตัวอย่างกราฟที่สร้างจากสมการ Modifield Gompertz.....	73
4.9	การเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่ค่าพีเอชต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	75
4.10	ปริมาณกรดไขมันระเหยที่ค่าพีเอชต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	77
4.11	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่ค่าพีเอชต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	79
4.12	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ค่าพีเอชต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน	81
4.13	การเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	86
4.14	ปริมาณกรดไขมันระเหยที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน	87
4.15	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	89
4.16	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน.....	91

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาการขาดแคลนพลังงานส่งผลกระทบต่อทั่วโลก โดยแหล่งพลังงานส่วนใหญ่ได้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลซึ่งมีปริมาณจำกัดและกำลังจะหมดไปในอนาคต ประเทศไทยเป็นอีกประเทศหนึ่งที่ได้รับผลกระทบจากวิกฤตการณ์ดังกล่าวนี้ เนื่องจากแหล่งพลังงานส่วนใหญ่ที่ใช้ภายในประเทศได้จากการนำเข้ โดยพลังงานนำเข้ที่สำคัญ คือ น้ำมันเชื้อเพลิงประเภทต่างๆ ซึ่งมีอัตราความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อสถานการณ์น้ำมันในตลาดโลกเริ่มปรับตัวสูงขึ้น การนำเข้้ำมันเชื้อเพลิงในราคาแพงจึงส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสินค้าต่างๆ ทั้งในภาคอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมสูงขึ้นตามไปด้วย รัฐบาลจึงต้องหาแนวทางแก้ไขโดยหันมาให้ความสำคัญต่อการเตรียมพร้อมด้านพลังงาน ได้แก่ นโยบายการลดการใช้และประหยัดพลังงาน การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงาน รวมถึงการจัดการแหล่งพลังงานทดแทนเพื่อสำรองการใช้ภายในประเทศ โดยพลังงานไฮโดรเจนจัดเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจในการใช้เป็นพลังงานทดแทน เนื่องจากมีค่าพลังงานสูงและเป็นพลังงานที่สะอาด โดยผลจากการเผาไหม้จะได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันกระบวนการผลิตไฮโดรเจนสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การแยกก๊าซธรรมชาติด้วยไอน้ำ (Stream reforming) การแตกตัวของก๊าซธรรมชาติด้วยความร้อน (Thermal cracking) และการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) เป็นต้น แต่เนื่องจากการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการเหล่านี้จะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณมาก ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดสภาวะโลกร้อน อีกทั้งบางกระบวนการยังมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง จึงทำให้กระบวนการทางชีวภาพเป็นทางเลือกที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจน เพราะมีราคาถูกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังสามารถใช้ประโยชน์จากของเสียต่างๆ เพื่อเป็นวัตถุดิบในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพได้

การผลิตแ่งมันสำปะหลังเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการใช้น้ำปริมาณมากในขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการผลิต จึงส่งผลให้เกิดน้ำเสียที่มีค่าความสกปรกในรูปซีโอดีสูงปริมาณมาก โดยข้อมูลจากสำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน (2540) รายงานว่า น้ำเสียโรงงานแ่งมันสำปะหลังที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณ 5-10 เท่าของปริมาณวัตถุดิบ หรือ 30-50 เท่าของผลผลิตที่ผลิตได้ ลักษณะของน้ำเสียจะปนเปื้อนไปด้วยกากแ่ง จึงทำให้องค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตที่มีสารพิษปนเปื้อนอยู่น้อย ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการ

ผลิตไฮโดรเจนด้วยแนวทางชีวภาพผ่านกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง โดยกระบวนการนี้เป็นการทำงานร่วมกันของแบคทีเรีย 2 กลุ่ม ได้แก่ (1) แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดที่ย่อยสลายเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไปเป็นกรดไขมันระเหยและผลิตก๊าซไฮโดรเจนออกมาจากปฏิกิริยาชีวเคมีภายใต้สภาวะการหมักแบบไม่ใช้แสง (2) แบคทีเรียกลุ่มสังเคราะห์แสงที่จะย่อยสลายต่อโดยการเปลี่ยนโมเลกุลของกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักในขั้นตอนแรกให้เป็นก๊าซไฮโดรเจนอีกต่อหนึ่งภายใต้สภาวะที่มีแสงอย่างเพียงพอ ซึ่งผลที่เกิดขึ้นทำให้กระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงเป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่ควบคู่ไปกับการลดค่าความสกปรกในรูปซีโอดีของน้ำเสียลงได้

งานวิจัยนี้จึงสนใจทำการศึกษาถึงสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียแ่งมันสำปะหลัง โดยเปลี่ยนค่าความสกปรกในรูปซีโอดีให้เป็นก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการดังกล่าว โดยปัจจัยที่ให้ความสำคัญ คือ ผลของพีเอชและอุณหภูมิที่มีต่อทั้งประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของน้ำเสียและการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพที่เป็นผลพลอยได้ควบคู่กัน ซึ่งข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการบำบัดน้ำเสียโรงงานแ่งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักและการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพเพื่อนำไปใช้ประโยชน์เป็นพลังงานทดแทนต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีและศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพของน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง

1.2.2 เพื่อศึกษาผลของการแปรค่าพีเอชและอุณหภูมิในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีและศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพของน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง

1.2.3 เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดค่าซีโอดีและผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังจากการเดินระบบต่อเนื่องด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบแบทช์ (Batch reactor) จำนวน 2 ถัง เติมน้ำระบบกัน ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีการกำหนดขอบเขตของการวิจัยไว้ดังนี้

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำเสียจริงจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังบ้านโป่ง จำกัด จังหวัดราชบุรี

1.3.2 ถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 ใบ มีขนาดเท่ากันโดยเป็นแบบกวนผสมรูปทรงทำจากอะคริลิกใส ทรงกระบอกสูง 25 ซม. มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. คิดเป็นปริมาตรรวมเท่ากับ 3.5 ลิตร โดยใบแรกใช้ในปฏิกิริยาการหมักแบบไม่ใช้แสง ส่วนใบที่สองจะใช้ในปฏิกิริยาแบบใช้แสง

1.3.3 หัวเชื้อ (Seed) ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นหัวเชื้อผสมของจุลินทรีย์แบบไร้อากาศจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสพีของบริษัท เสริมสุข จำกัด (โรงงานปทุมธานี) ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการปั่นหยาบและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 30 นาที และหัวเชื้อผสมของจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสงยีสต์ไฮโดรไลโซของ บริษัท ไวท์เครน อะควาเรียม (ไทยแลนด์) จำกัด โดยใช้ในการเริ่มเดินระบบสำหรับถังปฏิกรณ์ใบที่หนึ่งและสอง ตามลำดับ

1.3.4 กระบวนการหมักทั้งสองขั้นตอนจะดำเนินการภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยถังปฏิกรณ์การหมักแบบไม่ใช้แสงจะถูกคลุมด้วยพลาสติกดำ ส่วนกระบวนการหมักแบบใช้แสงจะทำการส่องไฟที่ถังปฏิกรณ์เพื่อให้แสงสว่างตลอดเวลา

1.3.5 สภาวะที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ ค่าพีเอช 3 ค่า ไดแก๊ส 5 6 และ 7 และอุณหภูมิ 2 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิปานกลาง (35°C) และอุณหภูมิสูง (55°C) โดยจะทำการแปรค่าสภาวะดังกล่าวในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงเท่านั้น

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อให้ทราบถึงศักยภาพและความเป็นไปได้ในการบำบัดน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังควบคู่ไปกับการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง

1.4.2 เพื่อให้ได้ข้อมูลเบื้องต้นที่สามารถใช้เป็นแนวทางในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังเพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนในอนาคต

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลัง

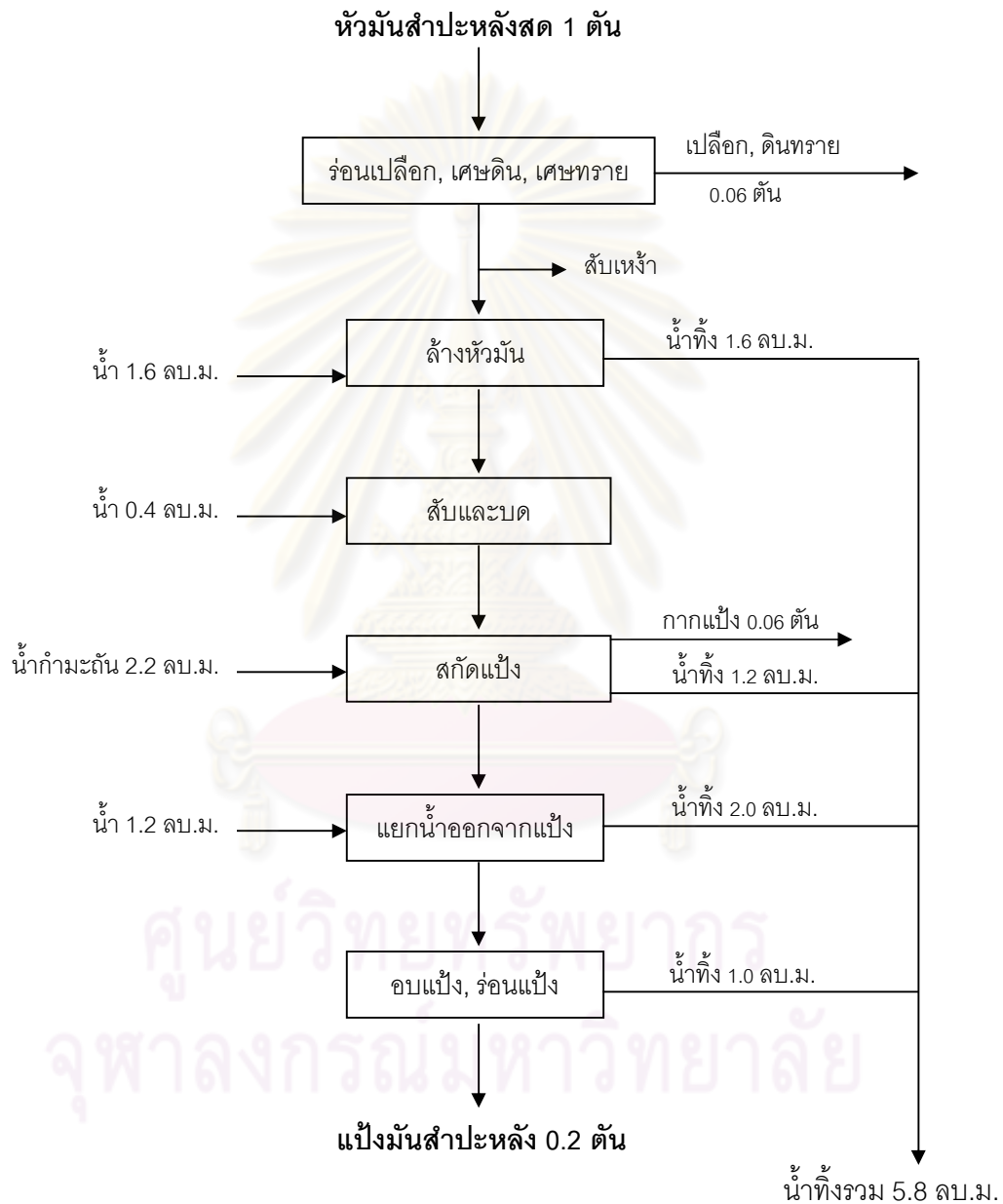
มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญมากชนิดหนึ่ง เป็นที่นิยมบริโภคในแถบแอฟริกา ละตินอเมริกา และแคริบเบียน รวมถึงบางส่วนของเอเชีย เพราะนอกจากจะสามารถบริโภคได้โดยตรงแล้ว ยังสามารถแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้อีกมากมาย โดยเมื่อเทคนิคการปลูกได้รับการพัฒนาทำให้ได้ผลผลิตต่อไร่เพิ่มมากขึ้น ผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลังจึงกลายเป็นสินค้าส่งออกที่สำคัญอย่างหนึ่งที่น่ารายได้เข้าประเทศเป็นจำนวนมาก สำหรับประเทศไทยมีการส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังในรูปแบบต่างๆ เช่น มันเส้น มันอัดเม็ด และแป้งมันสำปะหลัง มากกว่าความต้องการใช้ภายในประเทศ

จากกลุ่มประเทศที่เป็นแหล่งปลูกมันสำปะหลังที่สำคัญของโลก ประเทศไทยเป็นประเทศเดียวที่ใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมการผลิตแป้งมากที่สุด และจัดเป็นผู้ผลิตและส่งออกแป้งมันสำปะหลังรายใหญ่ที่สุดของโลก ซึ่งมีกำลังการผลิตประมาณ 3-5 ล้านตันต่อปี และมีเทคโนโลยีการผลิตแป้งมันสำปะหลังที่ทันสมัย ปัจจุบันประเทศไทยสามารถเพาะปลูกมันสำปะหลังได้ประมาณ 25 ล้านตันต่อปี ซึ่งมันสำปะหลังร้อยละ 50 จะถูกแปรรูปเป็นมันเส้นและมันอัดเม็ด ส่วนที่เหลือจะแปรรูปเป็นแป้งมันสำปะหลัง โดยผลิตภัณฑ์มันเส้นและมันอัดเม็ดส่วนใหญ่จะส่งออกไปจำหน่ายยังต่างประเทศ เช่น สหภาพยุโรป จีน เกาหลี ส่วนแป้งมันสำปะหลังจะส่งออกไปจำหน่ายยังประเทศญี่ปุ่น ไต้หวัน สหรัฐอเมริกา และสิงคโปร์ เป็นต้น (สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย, 2549)

ในอุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลังจะมีทั้งกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังดิบ (Native Starch) และแป้งมันสำปะหลังแปรรูป (Modified Starch) โดยแป้งมันสำปะหลังดิบจะเป็นวัตถุดิบให้กับกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูปอีกต่อหนึ่ง ในประเทศไทยโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังส่วนใหญ่จะเป็นโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังดิบ ซึ่งในกระบวนการผลิตมีการใช้น้ำจำนวนมาก ผลที่ตามมาคือ ก็ให้เกิดน้ำเสียในปริมาณมากและมีค่าความสกปรกสูง ซึ่งหากมีการระบายออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะก็จะก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้

2.1.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังดิบ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

รายละเอียดกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังดิบที่แสดงขั้นตอน วัตถุประสงค์ ผลิตภัณฑ์ และสมมูลที่ใช้ในกระบวนการผลิต แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังดิบ (คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อม โรงงานแป้งมันสำปะหลัง กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2542)

1. การจัดการหัวมันสำปะหลังสด

ในระหว่างการเก็บเกี่ยวเกษตรกรส่วนใหญ่มักจะกำจัดเศษเหง้าและเศษรากของหัวมันสำปะหลังที่ติดมาด้วยออกไปบางส่วน ซึ่งถือว่าเป็นผลดีต่อโรงงานเนื่องจากเศษของเหง้าและรากเหล่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องปอกเปลือก การขูด และบดหัวมันลดลง รวมถึงปริมาณกากแป้งที่จะต้องกำจัดอีกด้วย

2. การรับและตรวจสอบคุณภาพหัวมันสำปะหลัง

หลังจากหัวมันสำปะหลังถูกส่งมายังโรงงานและผ่านการชั่งน้ำหนัก รวมทั้งการทดสอบหาปริมาณแป้งโดยอาศัยหลักการลอยตัว (Buoyancy) ของวัตถุในของเหลวเพื่อตีราคาในการซื้อขายแล้ว หัวมันจะถูกนำมาเทรวมกันไว้บนลานวัตถุดิบเพื่อรอเข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งโดยทั่วไปหัวมันมักจะถูกส่งเข้าสู่กระบวนการผลิตภายใน 24 ชั่วโมงเพื่อป้องกันไม่ให้ปริมาณแป้งในหัวมันลดต่ำลง

3. การกำจัดเศษดินทรายและร่อนเปลือกหัวมันสำปะหลัง

หัวมันสำปะหลังจะเข้าสู่กระบวนการผลิต โดยเริ่มต้นด้วยการผ่านตะแกรงร่อนดินและทราย เพื่อกำจัดดินทรายที่ติดมากับหัวมันและทำให้เปลือกนอกของหัวมันหลุดออก

4. การล้างหัวมันสำปะหลัง

หลังจากร่อนเศษดินทรายและเปลือกนอกออกไปแล้ว หัวมันสำปะหลังจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องล้างหัวมันสำปะหลัง ซึ่งระหว่างการล้างเพียงนี้จะมีคนงานคอยเลือกสับเอาเหง้ามันสำปะหลังที่มีขนาดใหญ่ออกเพื่อลดภาระของเครื่องสับหัวมัน ส่วนการล้างหัวมันจะใช้วิธีฉีดน้ำพ่นเป็นฝอยเพื่อทำความสะอาดหัวมันที่ถูกปอกเปลือกแล้ว

5. การสับและโม่หัวมันสำปะหลัง

หัวมันสำปะหลังที่สะอาดจะถูกส่งไปยังเครื่องสับหัวมัน โดยใช้รางส่งตั้งด้วยโซ่ (Chain Conveyor) หรือบางโรงงานอาจใช้เครื่องตัดยกหัวมัน (Rasp Bucket Conveyor) เครื่องสับหัวมันจะสับหัวมันให้เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 1-2 นิ้ว แล้วชิ้นมันนี้จะตกเข้าสู่เครื่องโม่หัวมัน (Root Raspier) ซึ่งอยู่ด้านล่างทำให้ได้มันสำปะหลังชิ้นละเอียดยิ่งขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดแป้ง ขั้นตอนการผลิตนี้จะมีกรดไฮโดรไซยาเนอิกละลายอยู่ในน้ำแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิตจึงควรทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมคุณภาพสูงเพื่อป้องกันการเกิดสารประกอบเฟอร์โรไซยาไนด์ (Ferrocyanides) ซึ่งจะทำให้เกิดสีน้ำเงินขึ้นในแป้งมันสำปะหลัง

6. การสกัดแบ่ง

หลังจากได้มันบดละเอียด กากมันจะถูกเติมน้ำและนำเข้าสู่เครื่องสกัดแบ่ง เพื่อแยกเซลล์ลิวสและกากของสารอินทรีย์ต่างๆ ออกจากแบ่ง ในขั้นตอนนี้จะมีการเติมกรดกำมะถันลงไปด้วยเพื่อยับยั้งจุลินทรีย์ที่จะทำให้โมเลกุลของแบ่งเปลี่ยนเป็นกรดแลกติก ในการสกัดแบ่งโดยทั่วไปจะเป็นการสกัดแบบหลายครั้ง (Multi-Stage Extractor) โรงงานส่วนใหญ่จะใช้ชุดสกัด 3 ชุด แต่โรงงานขนาดใหญ่อาจใช้ชุดสกัดถึง 4 ชุดต่อเนื่องกัน โดยชุดแรกซึ่งเป็นการสกัดหยาบจะใช้ตะแกรงขนาด 60-80 เมช (Mesh) และชุดสุดท้ายจะเป็นการสกัดละเอียดโดยใช้ผ้ากรองขนาด 90 เมช การทำงานของเครื่องสกัดแบ่งทั้ง 2 ชนิดเป็นเครื่องแยกแบบหมุนเหวี่ยงใช้หลักของแรงหนีศูนย์กลาง ในขณะที่เครื่องหมุนจะมีมันสำปะหลังละเอียดและน้ำส่งเข้ามาอย่างสม่ำเสมอ น้ำที่ใช้ในการสกัดแบ่งนี้ก็กลายเป็นน้ำทิ้งจากการแยกแบ่งในขั้นตอนต่อไป

กากมันสำปะหลังจากขั้นตอนการสกัดแบ่งจะมีน้ำอยู่ปริมาณมากถึง 90-95 % และมีปริมาณแบ่งน้อยมาก กากมันสำปะหลังจะถูกแยกออกจากน้ำแบ่งเพื่อนำเข้าสู่เครื่องอัดกากและนำไปตากแดดเพื่อใช้ผสมเป็นอาหารสัตว์ต่อไป ส่วนน้ำแบ่งจากกระบวนการสกัดแบ่งจะมีความเข้มข้นประมาณ 3 โบรเม (1 โบรเม เท่ากับ 18 กก. แบ่งแห้งในน้ำ 1 ลบ.ม.) สำหรับสิ่งเจือปนอื่นๆ ทั้งที่ละลายน้ำ เช่น โปรตีน ไขมัน น้ำตาลที่เหลือ และสิ่งเจือปนที่ไม่ละลายน้ำ เช่น กากมันและเยื่อใย จะถูกกำจัดออกในขั้นตอนการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำแบ่งต่อไป

7. การแยกน้ำออกจากแบ่ง

เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี และปฏิกิริยาชีวเคมีจากจุลินทรีย์ซึ่งจะส่งผลให้คุณภาพของแบ่งลดลง การผลิตแบ่งมันปะหลังจึงต้องกระทำภายในเวลาอันสั้นที่สุดตั้งนั้นในขั้นตอนการเพิ่มความเข้มข้นของแบ่งจึงมักเป็นกระบวนการต่อเนื่อง ไม่มีถังพักเช่นเดียวกับขั้นตอนอื่นๆ น้ำแบ่งที่ถูกแยกออกจากกากมันสำปะหลังจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องแยกซึ่งอาจเป็นเครื่องแยกชนิดหมุนเหวี่ยง (Centrifugal Separators) หรือไฮโดรไซโคลน (Hydro Cyclone) โดยโรงงานส่วนใหญ่จะใช้เครื่องแยกชนิดหมุนเหวี่ยง และเพื่อให้ได้แบ่งที่มีคุณภาพดีจึงมักใช้เครื่องแยกแบบหมุนเหวี่ยงจำนวน 2 ชุด เพื่อแยกกากมันออกให้หมดและทำให้แบ่งเข้มข้นภายหลังการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำแบ่งจะได้น้ำแบ่งที่มีความเข้มข้นเพิ่มเป็น 20-22 โบรเม

8. การทำให้แบ่งแห้งและการบรรจุผลิตภัณฑ์

น้ำแบ่งจะถูกทำให้แห้งโดยใช้เครื่องเหวี่ยง (Centrifuge) ซึ่งจะทำได้แบ่งที่มีความชื้นประมาณ 32-38% หรืออีกทางเลือกของการทำให้น้ำแบ่งแห้ง คือ การใช้เครื่องกรองสุญญากาศ โดยจะได้แบ่งที่มีความชื้นประมาณ 40-45% แต่วิธีนี้ไม่นิยมใช้ในโรงงานผลิตแบ่งมันสำปะหลังในประเทศไทย เนื่องจากต้องมีค่าใช้จ่ายในการอบแบ่งแห้งเพิ่มขึ้น จากนั้นแบ่งจะถูก

พ่นเข้าสู่ท่อลมร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 200°ซ ความร้อนได้มาจากหม้อต้มน้ำมันร้อน (Hot Oil) เป่าเข้ามาด้วยความดันสูง ความแรงของลมจะพัดเอาแฉ่งขึ้นไปตามปล่องสูงแล้วตกลงมาสู่ไซโคลน (Cyclone) ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้แฉ่งแห้งเป็นช่วงเวลาดสั้นๆ เพื่อป้องกันการรวมตัวของแฉ่งเม็ดและเพื่อป้องกันการสลายตัวของแฉ่งอีกทางหนึ่ง

แฉ่งที่ได้จากไซโคลนจะเป็นแฉ่งที่แห้งและละเอียดแต่ยังร้อนอยู่ ซึ่งจะต้องทำให้เย็นโดยทันทีด้วยการใช้ไซโคลนเย็น ทั้งไซโคลนร้อนและไซโคลนเย็นจะต้องมีประสิทธิภาพในการแยกแฉ่งออกจากอากาศได้สูงถึง 99.95% แฉ่งที่ได้จะมีความชื้นอยู่ระหว่าง 12-13% ก่อนจะปล่อยออกสู่เครื่องร่อนแฉ่งและทำการบรรจุต่อไป อากาศเสียที่มีแฉ่งปนเปื้อนที่เกิดจากการไซโคลนร้อนและไซโคลนเย็นนี้จะถูกบำบัด และนำแฉ่งกลับมาสู่กระบวนการผลิตใหม่ด้วยถุงกรอง (Bag Filters) เพื่อให้อุณหภูมิของแฉ่งมีความสม่ำเสมอ แฉ่งที่แห้งแล้วจะถูกร่อนผ่านตะแกรงก่อนที่จะบรรจุลงสู่ไซโลเก็บแฉ่ง โดยส่วนใหญ่ไซโลจะมีขนาดใหญ่เพียงพอที่จะบรรจุแฉ่งที่เกิดจากกระบวนการผลิตใน 24 ชม. ได้ การบรรจุแฉ่งลงถุงของโรงงานที่มีขนาดเล็กจะใช้ระบบกึ่งอัตโนมัติ ส่วนโรงงานที่มีขนาดใหญ่จะใช้ระบบอัตโนมัติในการเปิดถุงและบรรจุแฉ่งลงถุง

2.1.2 น้ำเสียจากโรงงานผลิตแฉ่งมันสำปะหลัง

น้ำเสียจากโรงงานผลิตแฉ่งมันสำปะหลังส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต จากข้อมูลของสำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน (2540) พบว่าน้ำเสียของโรงงานผลิตแฉ่งมันสำปะหลังจะมีปริมาณ 5-10 เท่าของปริมาณวัตถุดิบ หรือ 30-50 เท่าของผลผลิตที่ผลิตได้ โดยจุดที่เกิดน้ำเสียแสดงดังตารางที่ 2.1 ซึ่งน้ำเสียที่เกิดขึ้นนอกจากจะมีปริมาณมากแล้วยังปนเปื้อนไปด้วยกากแฉ่งและสารอินทรีย์ในปริมาณที่ค่อนข้างสูง ดังแสดงลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสีย ในตารางที่ 2.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 จุดที่เกิดน้ำเสียในกระบวนการผลิตแบริ่งมันสำปะหลัง

จุดที่เกิด	ลักษณะน้ำเสีย	อัตราการเกิดต่อ ตันผลผลิต (ลบ.ม./ตัน)
1. เครื่องล้างหัวมัน	น้ำเสียปนเศษดินทราย และเปลือกมัน	1.6
2. เครื่องสกัด	น้ำเสียปนกากแบริ่ง	1.2
3. เครื่องแยก	น้ำเสียปนกากแบริ่ง	2.0
4. เครื่องสลัดแห้ง	น้ำเสียปนกากแบริ่ง	1.0

(ที่มา : คู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมแบริ่งมันสำปะหลัง กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

ตารางที่ 2.2 ลักษณะน้ำเสียจากกระบวนการผลิตแบริ่งมันสำปะหลัง

พารามิเตอร์	ค่าที่วัดได้
ซีไอดี (มก./ล.)	6,000-40,000
บีไอดี (มก./ล.)	3,000-15,000
ของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	2,000-10,000
ของแข็งละลายทั้งหมด (มก./ล.)	3,800
ความเป็นกรดและด่าง	6-8

(ที่มา : คู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมแบริ่งมันสำปะหลัง กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2551)

2.1.3 การจัดการของเสียที่เกิดจากโรงงานผลิตแบริ่งมันสำปะหลัง

1. เปลือกมัน เหง้ามัน เศษมัน และกากแบริ่ง

โรงงานผลิตแบริ่งมันสำปะหลังจะเกิดของเสียส่วนใหญ่เป็นพวกเปลือกมัน เหง้ามัน เศษมัน และกากแบริ่ง ซึ่งของเสียเหล่านี้จะมีการจำหน่ายให้กับเกษตรกรเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางการเกษตร เช่น ทำสารปรับปรุงสภาพดิน หมักทำปุ๋ย และใช้เป็นอาหารสัตว์

2. ตะกอนดินหรือทราย

ตะกอนดินหรือทรายจะเกิดจากกระบวนการล้างทำความสะอาดหัวมัน ซึ่งไม่มีอันตรายจะสามารถจัดการได้โดยนำไปฝังกลบตามหลักสุขาภิบาล

3. น้ำเสีย

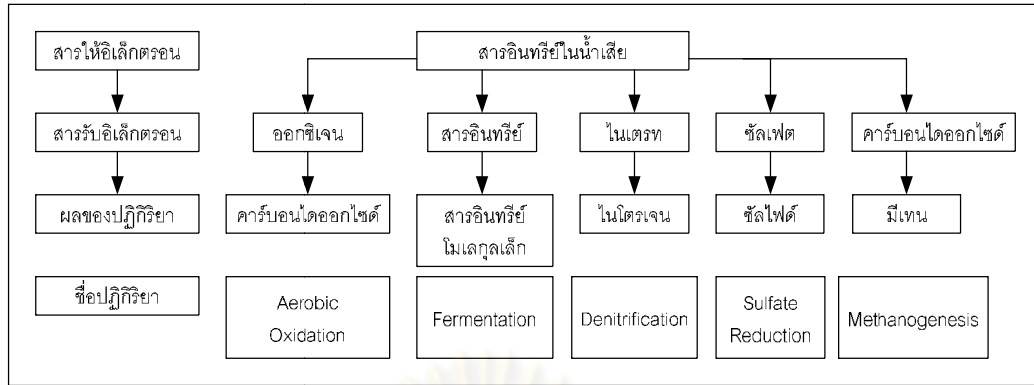
การบำบัดน้ำเสียจากระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

การบำบัดน้ำเสียขั้นต้น น้ำเสียจากขั้นตอนการล้างทำความสะอาดหัวมันสำปะหลังจะมีตะกอนหนักและของแข็งแขวนลอยสูง ทั้งเศษดินและเปลือกมันเป็นจำนวนมาก จึงต้องมีกระบวนการคัดแยกสารแขวนลอยเหล่านี้ให้มีปริมาณลดลง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะทำให้เป็นปอดตกตะกอน

การบำบัดน้ำเสียขั้นทุติยภูมิ น้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตของโรงงานแป้งมันสำปะหลังเป็นน้ำเสียที่สามารถย่อยสลายได้ การบำบัดน้ำเสียที่ใช้จึงควรเป็นระบบบำบัดทางชีวภาพ โดยโรงงานส่วนใหญ่จะเลือกใช้ระบบบำบัดแบบบ่อผิ้ว ซึ่งประกอบด้วยบ่อหลายบ่อเรียงต่อกัน ได้แก่ บ่อไร้อากาศ บ่อกึ่งไร้อากาศ บ่อปรับเสถียรภาพ และบ่อเติมอากาศ โดยน้ำเสียจะไหลจากบ่อหนึ่งไปยังอีกบ่อหนึ่งเพื่อให้สารแขวนลอยตกตะกอนแยกออกมา และเกิดกระบวนการบำบัดเพื่อกำจัดของแข็งซึ่งแขวนลอยและละลายอยู่ในน้ำเสีย สำหรับในปัจจุบันนอกจากระบบบำบัดแบบบ่อผิ้วแล้ว โรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังหลายแห่งในประเทศไทยได้มีการนำเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสีย ในรูปแบบของถังหมักไร้อากาศที่มีอัตราการย่อยสลายสูงระบบต่างๆ เข้ามาใช้งาน เนื่องจากประหยัดพื้นที่มีประสิทธิภาพสูง และได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ เช่น ระบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket ; UASB) โดยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะสามารถนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิตได้ เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายด้านเชื้อเพลิงในการผลิตได้อีกทางหนึ่ง ส่วนน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการหมักแล้วนั้นจะมีค่าความสกปรกน้อยลงในระดับหนึ่งจะถูกส่งไปบำบัดต่อยังระบบบำบัดน้ำเสียเดิม เช่น บ่อปรับเสถียร ต่อไป

2.2 กระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

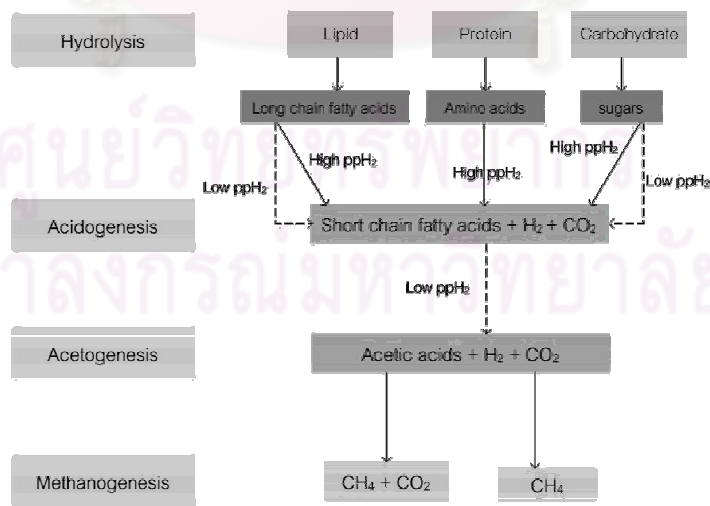
การย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสารให้อิเล็กตรอนและสารรับอิเล็กตรอนด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือรีดอกซ์ โดยสารอินทรีย์ในน้ำเสียซึ่งมีพลังงานสูงจะเป็นสารให้อิเล็กตรอนและใช้สารชนิดอื่นๆ เป็นสารรับอิเล็กตรอน ถ้าปฏิกิริยาเป็นแบบใช้อากาศ สารรับอิเล็กตรอนคือ ออกซิเจน แต่ถ้าสารรับอิเล็กตรอนคือ คาร์บอนไดออกไซด์ หรือสารอื่นๆ เช่น ไนเตรต ซัลเฟต ฯลฯ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบไร้อากาศ ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยารีดอกซ์ในการบำบัดน้ำเสีย (มันลิน ตันทูลเวรค์, 2542)

2.2.1 กลไกการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียเกิดจากการเปลี่ยนรูปสารโมเลกุลขนาดใหญ่และซับซ้อนที่อยู่ในน้ำเสียให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งต้องการจุลินทรีย์และเอนไซม์ที่ต่างกันหลายกลุ่มโดยขั้นตอนที่แตกต่างกันในถังหมักไร้อากาศจะเกิดจากสารตั้งต้นที่ต่างกัน ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ซึ่งกระบวนการแปลงรูปสารอินทรีย์ที่ต่างกันทั้ง 4 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรด (Acidogenesis) ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) และขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis) แสดงดังรูปที่ 2.3 และมีรายละเอียดดังนี้



หมายเหตุ: ppH_2 คือ Hydrogen partial pressure

รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยกระบวนการไร้อากาศ (Sam-soon และคณะ, 1987)

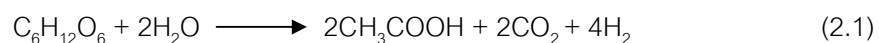
ขั้นตอนที่ 1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนที่สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่และซับซ้อน ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ถูกย่อยสลายให้กลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะมิโน น้ำตาล และกรดไขมันชนิดยาวตามลำดับ ขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นได้ภายนอกเซลล์แบคทีเรียโดยอาศัยเอนไซม์ที่ปลดปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ (Extracellular Enzyme) โดยการย่อยสลายดังกล่าวจะเกิดขึ้นจนกระทั่งสารอินทรีย์ที่ได้เล็กลงจนสามารถเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่เซลล์แบคทีเรียชนิดสร้างกรดได้ โดยขั้นตอนไฮโดรไลซิสนี้เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นค่อนข้างช้าและเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของปฏิกิริยา (Rate Limiting Step Reaction) โดยความเร็วของปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ พีเอช และพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น จึงมีผลทำให้เวลาที่ใช้ในการย่อยสลายสารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน

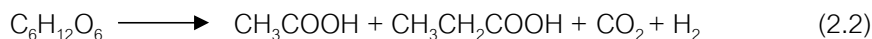
ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรด (Acidogenesis)

ในขั้นตอนนี้ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนที่ 1 จะถูกแบคทีเรียชนิดสร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์เพื่อใช้เป็นอาหารและถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid ; VFA) เช่น กรดอะซิติก กรดบิวทิริก กรดไพรูโพนิก เป็นต้น และได้เป็นก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ผ่านกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก โดยชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ ชนิดของสารตั้งต้น (Substrate) และความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน (Hydrogen Partial Pressure) ที่เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น กรดไขมันชนิดยาวจะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจนได้ภายใต้สภาวะที่ความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนมีค่าต่ำ แต่จะถูกย่อยสลายเป็นกรดบิวทิริกและกรดไพรูโพนิกเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูง โดยหากสารตั้งต้นเป็นสารประเภทน้ำตาลก็จะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะซิติก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านวิถีไกลโคไลซิส (Glycolysis) ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลต่ำ แต่ถ้าไฮโดรเจนมีความดันพาร์เชียลสูงผลผลิตที่ได้คือ กรดอะซิติก กรดไพรูโพนิก กรดบิวทิริก ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

สภาวะความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนต่ำ

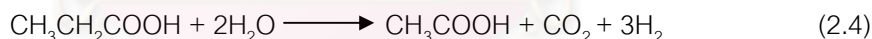
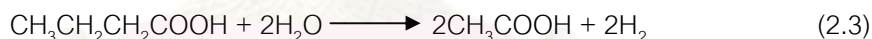


สภาวะความดันพาร์เซี่ยลของก๊าซไฮโดรเจนสูง



ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติกและกรดไขมันระเหยอื่นๆ

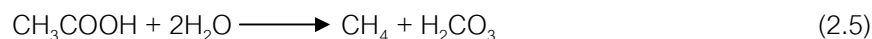
แบคทีเรียกลุ่มอะซิโตจีนิค (แบคทีเรียสร้างอะซิเตท) จะมีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวเชื่อมระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนนั้นจะต้องการสารอาหารที่เฉพาะเจาะจงมาก ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมธิลามีน (Methylamine) ส่วนกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม จะไม่สามารถใช้เป็นสารอาหารในการผลิตมีเทนได้ ดังนั้น ในกรณีที่กรดไขมันระเหยง่ายที่สร้างขึ้นยังอยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการย่อยสลายกรดอินทรีย์เหล่านั้นให้มีจำนวนอะตอมของคาร์บอนลดลง แบคทีเรียกลุ่มอะซิโตจีนิค (ที่ผลิตไฮโดรเจนได้ด้วย) จะมีความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมเหล่านี้ให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซี่ยลต่ำกว่า 10^{-3} บรรยากาศ และต่ำกว่า 10^{-4} บรรยากาศ สำหรับการย่อยสลายกรดบิวทิริก และกรดโพรไพโอนิก โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 2.3 และ 2.4 ตามลำดับ



ปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 3 นี้ จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซี่ยลต่ำเท่านั้น โดยกรดไขมันระเหยจะไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกได้ภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซี่ยลสูง

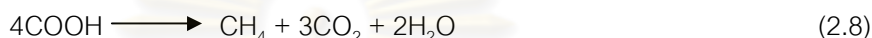
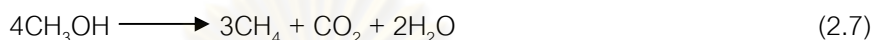
ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

กรดอะซิติกและไฮโดรเจนจะถูกแบคทีเรียสร้างมีเทนใช้เป็นสารอาหารได้ภายใต้สภาวะไร้อากาศอย่างเด็ดขาดและผลิตก๊าซมีเทนออกมา โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ 2.5 และ 2.6 ตามลำดับ





ส่วนกรดอินทรีย์ระเหยที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม จะไม่สามารถถูกเปลี่ยนเป็นมีเทนได้โดยตรง ต้องผ่านการย่อยสลายด้วยแบคทีเรียจนกลายเป็นกรดอะซิติกหรือไฮโดรเจนเสียก่อนจึงจะใช้ผลิตมีเทนได้ โดยนอกจากกรดอะซิติกและไฮโดรเจนแล้วยังมีสารตั้งต้นอย่างง่ายอีกเพียงไม่กี่ชนิดที่แบคทีเรียใช้ในการผลิตมีเทนได้ เช่น เมทานอล และกรดฟอร์มิก เป็นต้น โดยปฏิกิริยาการสร้างมีเทนจากสารทั้งสองนี้แสดงดังสมการที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ (กรมควบคุมมลพิษ, 2542)

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการย่อยสลายในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ มีดังนี้

1. อุณหภูมิ

อุณหภูมิจะมีผลอย่างมากต่อกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ โดยอัตราการเปลี่ยนรูปของกระบวนการหมักจะมีค่าสูงสุดระหว่าง 35 และ 40 °ซ สำหรับช่วงอุณหภูมิที่เป็นกลาง (Mesophilic) และประมาณ 55 °ซ สำหรับช่วงอุณหภูมิสูง (Thermophilic) ซึ่งการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปจะใช้เพียงช่วงอุณหภูมิปานกลางเท่านั้น (Henze และ Harremoes, 1983) จึงสามารถสรุปผลของอุณหภูมิที่มีต่อการหมักแบบไร้อากาศได้ดังนี้

(1) ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 30-40 °ซ

(2) สำหรับอุณหภูมิที่ต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมอัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์จะลดลงโดยประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ต่อ 1 °ซ ที่ลดลง และสอดคล้องกับสมการของอาเรเนียส (Arrhenius equation) ดังสมการที่ 2.9

$$r_t = r_{35} k^{(t-35)} \quad (2.9)$$

เมื่อ t = อุณหภูมิ (°ซ)

r_t, r_{35} = อัตราการย่อยสลายที่อุณหภูมิ t และ 35 °ซ ตามลำดับ

2. พีเอช

ค่าพีเอชและเสถียรภาพของพีเอชในถังปฏิกริยาไร้อากาศนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะการสร้างมีเทนจะเกิดที่อัตราสูงเมื่อพีเอชถูกควบคุมให้อยู่ในช่วงที่เป็นกลาง พีเอชที่ต่ำกว่า 6.3 หรือสูงกว่า 7.8 อัตราการผลิตมีเทนจะลดลง โดยกลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตกรดจะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชไม่ว่าสูงหรือต่ำเกินไปน้อยกว่าแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน จึงทำให้การสร้างกรดเกิดขึ้นได้มากกว่าการสร้างมีเทน ซึ่งมีผลทำให้เกิดการหมิ่นเปรี้ยวภายในถังปฏิกริยา ดังนั้นจึงควรควบคุมค่าพีเอชภายในถังปฏิกริยาให้เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทนนั้นคืออยู่ในช่วง 6.6 -7.4

3. กรดไขมันระเหย

การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของกรดไขมันระเหยจะมีผลกระทบต่อจุลินทรีย์ในระบบ เนื่องจากแบคทีเรียผลิตมีเทนจะไม่สามารถนำผลผลิตที่เกิดขึ้นจากแบคทีเรียสร้างกรดไปใช้ได้ทัน จึงส่งผลให้เกิดการสะสมตัวของกรดไขมันระเหย ทำให้พีเอชในระบบลดลงเรื่อยๆ จนอยู่ในช่วงที่ไม่เหมาะสมกับการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน จนในที่สุดอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้

4. สภาพต่าง

สภาพต่างภายในระบบของการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตที่เกิดมาจากการทำปฏิกริยาระหว่างแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต สภาพต่างนี้จะเป็นบัฟเฟอร์ที่ดีให้กับระบบ และช่วยรักษาค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรีย โดยทั่วไปอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยต่อสภาพต่างถ้ามีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่ามีกำลังบัฟเฟอร์สูง ระบบจะสามารถทำงานได้ดี ถ้ามีค่ามากกว่า 0.8 แสดงว่ามีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำ ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง และหากไม่แก้ไขระบบจะล้มเหลวได้

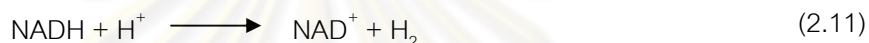
5. สารอาหาร

การบำบัดด้วยกระบวนการไร้อากาศมีข้อดีคือ มีปริมาณเซลล์จุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นน้อยกว่ากระบวนการแบบใช้อากาศ ดังนั้นจึงมีความต้องการธาตุอาหารเสริม เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสในปริมาณที่ต่ำกว่า โดยมีสัดส่วนความต้องการธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสำหรับจุลินทรีย์ในรูป COD:N:P เท่ากับ 150:1.1:0.2 และสำหรับธาตุอาหารบางชนิด แม้ว่าจุลินทรีย์

เหล่านี้จะมีความต้องการในปริมาณน้อย แต่ก็ขาดไม่ได้ มิฉะนั้นระบบจะไม่สามารถดำเนินไปได้ อย่างมีประสิทธิภาพ ธาตุดังกล่าว ได้แก่ เหล็ก โคบอลท์ นิกเกิล และซัลเฟอร์ แต่อย่างไรก็ดีการเติมธาตุอาหารเหล่านี้แก่แบคทีเรียในระบบอาจก่อให้เกิดปัญหาได้ ซึ่งเป็นผลมาจากซัลไฟด์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับธาตุโลหะต่างๆ และตกผลึกแยกออกจากน้ำได้ เช่น เหล็กรวมกับซัลไฟด์เป็นผลึกที่ไม่ละลายน้ำทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถนำไปใช้ได้ ปัจจุบันอาจประยุกต์ใช้วิธีการเติมสารสกัดจากยีสต์ (Yeast extract) ซึ่งมีธาตุอาหารสูงให้แก่ระบบโดยตรง

6. ผลของการสร้างไฮโดรเจน

ขั้นตอนต่างๆ ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศจะมีการผลิตไฮโดรเจนตลอดเวลา ซึ่งไฮโดรเจนนี้เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการปลดปล่อย H^+ ของ NADH ดังสมการที่ 2.11



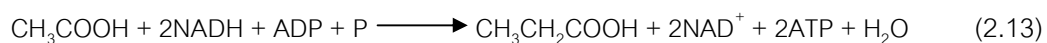
ซึ่งผลจากปฏิกิริยาดังกล่าวนี้นี้ ทำให้มี NAD^+ เหลือซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังสมการที่ 2.12



หากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้แบคทีเรียกลุ่มมีเทนที่ใช้ไฮโดรเจนได้ (Hydrogen Utilizing Methane bacteria) นำไฮโดรเจนไปใช้ในกระบวนการผลิตมีเทนจึงไม่เกิดการสะสมตัวของไฮโดรเจน ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนในระบบจึงมีค่าต่ำตลอดเวลา แต่ถ้าการทำลายไฮโดรเจนไม่เกิดขึ้นหรือไม่มีประสิทธิภาพ จะทำให้เกิดการสะสมตัวของไฮโดรเจนจนถึงจุดอิ่มตัว ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าสูง จะส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศในขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์ระเหย และขั้นตอนการสร้างกรดอะซิติก ดังนี้

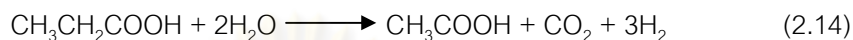
- ผลกระทบต่อการสร้างกรดอินทรีย์ระเหย

แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทนจะปลดปล่อย H^+ จาก NADH โดยการเปลี่ยนกรดไพรูวิกไปเป็นกรดโพสเฟอโนนิกภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนที่มีระดับสูงกว่า 10^{-4} บรรยากาศ ดังสมการที่ 2.13

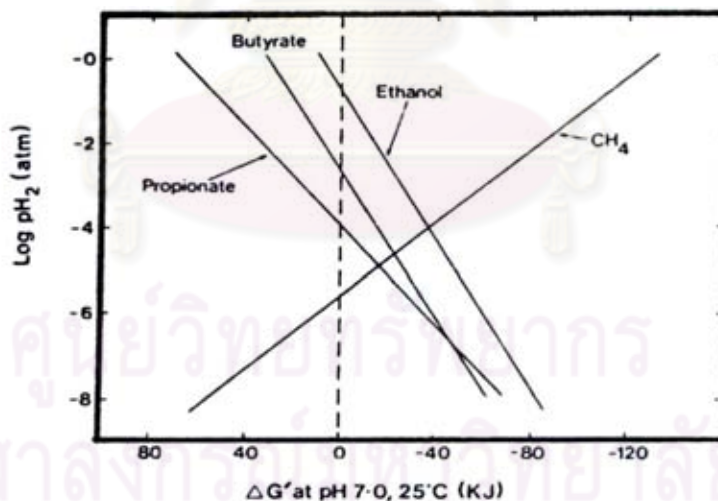


- ผลกระทบต่อการสร้างกรดอะซิติก

ในขั้นตอนการสร้างกรดซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนแปลงกรดอินทรีย์ระเหยที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ให้เป็นกรดอะซิติกโดยแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกและนำกรดอะซิติกที่ได้ไปใช้ในการสร้างมีเทนโดยปฏิกิริยา การเปลี่ยนกรดไพรไพโอนิกไปเป็นกรดอะซิติกแสดงดังสมการที่ 2.14



จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะพบว่าไฮโดรเจนเกิดขึ้น โดยหากไม่มีการกำจัดไฮโดรเจนออกจากระบบจะเกิดการสะสมตัวจนมีค่าความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนเปลี่ยนแปลงไป กรดไพรไพโอนิกจะไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติกได้ มีผลทำให้ค่าพลังงานอิสระเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เมื่อค่าความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูงกว่าความดันบรรยากาศจะทำให้กรดไพรไพโอนิกเกิดการสะสมตัวอยู่ภายในระบบ ส่งผลให้ค่าพีเอชของระบบมีค่าต่ำลงจนอยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และยังพบว่ากรดไพรไพโอนิกเป็นพิษต่อแบคทีเรียไร้อากาศเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 1,000 มก./ล.



รูปที่ 2.4 การเปลี่ยนค่าพลังงานอิสระเมื่อความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนมีค่าเปลี่ยนแปลง (McInerney และคณะ, 1980)

7. สารพิษ

น้ำเสียที่จะทำการบำบัดด้วยกระบวนการทางชีววิทยาไม่ควรมีสารพิษเจือปนอยู่ เนื่องจากสารพิษจะมีผลรบกวนการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ หรือยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ทำให้ระบบล้มเหลวได้ โดยความรุนแรงของสารพิษจะขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารพิษนั้นๆ ตัวอย่างสารที่มีความเป็นพิษต่อระบบได้แก่

- พิษของอิออนบวก และโลหะหนัก

อิออนบวกที่มีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ได้แก่ โซเดียม (Na^+) โพแทสเซียม (K^+) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) และแคลเซียม (Ca^{2+}) โดยอิออนบวกเหล่านี้ ถ้ามีในระดับความเข้มข้นที่พอเหมาะจะเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้ามีมากเกินไปจนเกินไปจะเป็นสารพิษ ปกติอิออนบวกที่มีวาเลนซ์สูงจะมีความเป็นพิษมากกว่าอิออนบวกที่มีวาเลนซ์ต่ำ ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ระดับความเป็นพิษของอิออนบวกชนิดต่างๆ ตามระดับความเข้มข้น

(McCarty, 1964 อ้างถึงใน ชำนาญ ภายประสิทธิ์, 2538)

ชนิดอิออนบวก	ความเข้มข้น (มก./ล.)		
	กระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งมาก
Na^+	100-200	3,500-5,500	8,000
K^+	200-400	2,500-4,500	12,000
Ca^+	100-200	2,500-4,500	8,000
Mg^+	75-150	1,000-1,500	3,000

พิษของอิออนบางชนิดจะสามารถลดความเป็นพิษลงได้เมื่ออยู่ร่วมกับธาตุอื่นๆ แต่ในทางตรงกันข้ามอาจจะมีความเป็นพิษมากขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกับอิออนชนิดอื่นได้เช่นเดียวกัน โดยอิออนของโลหะหนักที่มีผลต่อกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศมากที่สุด คือ Cu^{2+} ซึ่งความเป็นพิษอาจลดลงได้ถ้าน้ำเสียมีองค์ประกอบของซัลไฟด์พอเหมาะ เนื่องจากซัลไฟด์สามารถรวมตัวกับอิออนของโลหะหนักเกิดเป็นเกลือที่ไม่ละลายน้ำ แต่อย่างไรก็ตามโลหะหนักบางชนิดยังมีความจำเป็นสำหรับแบคทีเรียแม้จะมีความต้องการในปริมาณเพียงเล็กน้อยก็ตาม

- พิษของกรดอินทรีย์ระเหย

ในกรณีที่มีระบบมีกรดอินทรีย์ระเหยมากเกินไป เช่น ในสภาวะที่มีสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมาก แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดจะสร้างกรดอินทรีย์ระเหยออกมามาก โดยถ้าระบบมีกำลังของบัพเฟอร์ไม่เพียงพอจะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน

- พิษของแอมโมเนีย

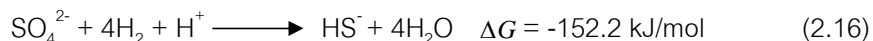
แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียมาจากการย่อยสลายโปรตีน โดยไนโตรเจนที่ปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และแอมโมเนีย (NH_3) โดยแอมโมเนียจะมีความเป็นพิษมากกว่าแอมโมเนียมไอออน แสดงดังสมการที่ 2.15



ปริมาณของแอมโมเนียมไอออนที่มีอยู่ในระบบจะขึ้นอยู่กับค่าพีเอช คือ ที่พีเอชประมาณ 7 จะมีแอมโมเนียประมาณ 1% และมีแอมโมเนียมไอออน 99% แต่ในกรณีที่ระบบมีพีเอชสูงขึ้นปริมาณของแอมโมเนียจะมากกว่าแอมโมเนียมไอออน ถ้าในระบบมีความเข้มข้นของแอมโมเนียมากกว่า 150 มก./ล. จะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ในขณะที่แบคทีเรียสามารถทนความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนได้สูงถึง 3,000 มก./ล. ดังนั้นการรักษาค่าพีเอชในระบบให้มีค่าประมาณ 7 หรือต่ำกว่าจะทำให้แอมโมเนียทั้งหมดอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออนซึ่งมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียน้อยกว่า

8. ผลของซัลเฟต

ซัลเฟตในน้ำเสียจะถูกแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate-Reducing Bacteria ; SRB) เช่น *Desulfovibrio sp.*, *Desulfotomaculum sp.* เปลี่ยนให้เป็นซัลไฟด์โดยการใช้เป็นสารรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย ดังสมการที่ 2.16



แบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตจะแย่งอาหารกับแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตจะสามารถใช้ซัลไฟด์และไฮโดรเจนเป็นสารอาหารได้ดีกว่า จึงทำให้สัดส่วนมีเทนในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในระบบลดลง นอกจากนี้การเกิดไฮโดรเจนซัลไฟด์ปริมาณมากอาจเป็นพิษกับแบคทีเรียในระบบได้ แต่ถ้าพิจารณาในแง่ของการใช้ไฮโดรเจนเป็นสารอาหาร

แบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตจะทำงานสัมพันธ์กับแบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจน ซึ่งจะช่วยให้ความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าต่ำเสมอ ส่งผลทำให้การสะสมตัวของก๊าซไฮโดรเจนลดลง ดังนั้นแบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟตจึงมีบทบาทต่อการสร้างกรดอินทรีย์ระเหย และมีผลกระทบต่อ การสร้างกรดอะซิติกจากกรดโพรไพโอนิกด้วย

9. อัตราการสะสมอินทรีย์

อัตราการสะสมอินทรีย์เป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ การตกตะกอนของจุลินทรีย์ และก๊าซที่เกิดขึ้นในระบบ โดยปกติแล้วน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบบำบัดควรมีอัตราการสะสมอินทรีย์ต่ำกว่าอัตราสูงสุดในการบำบัดสารอินทรีย์ของระบบ ถ้ามีอัตราการสะสมอินทรีย์สูงเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง หรืออาจทำให้ระบบล้มเหลวได้

2.3 พลังงานทดแทนและพลังงานไฮโดรเจน

ปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญและเป็นแรงขับเคลื่อนที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาประเทศทั้งในด้านเศรษฐกิจ ความมั่นคง และความเป็นอยู่ของประชากร เนื่องจากพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ โดยเฉพาะในด้านการดำรงชีวิตประจำวัน ด้านอุตสาหกรรม และการขนส่ง เป็นต้น โดยแหล่งพลังงานที่มนุษย์นำมาใช้กันอยู่ทุกวันนี้ส่วนใหญ่เป็นพลังงานที่ได้จากเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลซึ่งมีการสะสมอยู่ใต้ดินมานานหลายล้านปี และแหล่งพลังงานประเภทนี้เป็นประเภทที่ใช้แล้วหมดไป โดยจะต้องใช้เวลานานกว่าจะเกิดขึ้นมาใหม่ และจากการที่ทุกประเทศในโลกล้วนแต่มีความต้องการพลังงานที่สูงขึ้นในขณะที่พลังงานเชื้อเพลิงมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้ปัญหาด้านพลังงานกลายเป็นปัญหาสำคัญที่ทุกๆ ประเทศ ล้วนตระหนักและมีการเตรียมมาตรการเพื่อรองรับกับปัญหาที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

2.3.1 พลังงานทดแทนและแหล่งพลังงานทดแทน

จากรายงานสถิติพลังงานของประเทศไทยในปี 2553 พบว่า มีความต้องการใช้พลังงานโดยรวมสูงถึง 71,166 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ โดยคิดเป็นมูลค่าการใช้พลังงานรวมเท่ากับ 1,294 พันล้านบาท (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและการอนุรักษ์พลังงาน, 2553) ซึ่งการผลิตและการจัดหาพลังงานภายในประเทศมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ ทำให้ต้องมีการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก ถึงแม้ว่าจะมีการลดการนำเข้าน้ำมันดังกล่าวด้วยการ

นำพลังงานทดแทนจากแหล่งต่างๆ มาใช้มากขึ้น เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น รวมถึงการใช้พลังงานชีวมวลเพื่อลดสัดส่วนหรือทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ เช่น น้ำมันไบโอดีเซล แก๊สโซฮอล์ เป็นต้น โดยผลิตใช้เองภายในประเทศซึ่งสามารถลดการนำเข้าได้บางส่วน แต่จากจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นและกิจกรรมทางเศรษฐกิจทั้งจากภาคการขนส่ง ภาคพาณิชย์ และภาคอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวออกไป ยังคงทำให้ประเทศไทยมีความต้องการพลังงานเพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งหน่วยงานของภาครัฐได้ตระหนักถึงปัญหาและมีนโยบายที่จะส่งเสริมให้มีการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนในส่วนที่สามารถทดแทนได้ให้มากขึ้น รวมทั้งส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ๆ ในการผลิตพลังงานทดแทนให้มากขึ้น เพื่อที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ต่อไปในอนาคต โดยปริมาณการใช้พลังงานทดแทนภายในประเทศจำแนกตามประเภทพลังงานแสดงดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ปริมาณการใช้พลังงานทดแทนภายในประเทศจำแนกตามประเภทพลังงาน

การใช้พลังงานทดแทน	ปริมาณ (พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)			อัตราการ เปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)
	2551	2552	2553	
1. ไฟฟ้า (แสงอาทิตย์ ลม น้ำ ชีวมวล ชยะ และก๊าซชีวภาพ)	253	282	304	7.8
2. ความร้อน (แสงอาทิตย์ ชีวมวล ชยะ และก๊าซชีวภาพ)	3,306	3,357	4,443	24.9
3. เชื้อเพลิงชีวภาพ				
- เอทานอล	253	335	329	1.8
- ไบโอดีเซล	349	463	475	2.6
4. ก๊าซธรรมชาติสำหรับยานยนต์	654	1,260	1,597	26.7
รวม	4,815	5,897	7,148	21.2

(ที่มา: รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทยปี 2553 จากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน)

จากข้อมูลที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้นจะเห็นได้ว่าแหล่งพลังงานทดแทนกำลังจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการเป็นแหล่งพลังงานของโลกในไม่ช้า แต่การจะใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนประเภทใดนั้น ควรที่จะมีการพิจารณาถึงความเหมาะสมทั้งทางด้านเทคโนโลยีที่เอื้ออำนวย สภาพแวดล้อม รวมถึงทรัพยากรธรรมชาติที่มีในประเทศนั้นๆ ด้วย โดยการจัดหาแหล่งพลังงานทดแทนใหม่นี้ยังคงต้องมีการพิจารณาถึงผลกระทบในด้านต่างๆ โดยเฉพาะผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่กำลังเป็นปัญหาสำคัญของโลกควบคู่กันไปด้วย

2.3.2 พลังงานไฮโดรเจน

จากปัญหาด้านพลังงานที่ลดลงและปัญหาขยะและของเสียต่างๆ ที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ทำให้มีการนำของเสียมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการนำมาผลิตเป็นแหล่งพลังงานทดแทน ยกตัวอย่างเช่น การผลิตพลังงานชีวมวลด้วยการเผาไหม้โดยตรงของเสียต่างๆ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพื่อให้ได้ความร้อน หรือการผลิตก๊าซชีวภาพผ่านกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยวิธีนี้นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูงจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะช่วยบำบัดของเสียและได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ การนำขยะและของเสียต่างๆ มาผลิตเป็นแหล่งพลังงานทดแทนดังกล่าวจึงสามารถช่วยลดปริมาณของเสียและสร้างแหล่งพลังงานทดแทนได้ส่วนหนึ่ง แต่เนื่องจากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้นั้นเมื่อถูกนำไปใช้ก็ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ โดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทน เพราะก๊าซทั้งสองเป็นสาเหตุให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse effect) ด้วยเหตุนี้เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาในหลายๆ ประเทศจึงได้ให้ความสำคัญต่อการผลิตแหล่งพลังงานทดแทนที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยใช้เทคโนโลยีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซึ่งสามารถผลิตได้จากหลายกระบวนการรวมทั้งจากของเสียต่างๆ โดยจุดเด่นของก๊าซไฮโดรเจนที่แตกต่างจากก๊าซเชื้อเพลิงอื่นๆ คือ เป็นก๊าซที่ให้ค่าพลังงานความร้อนต่อหน่วยสูง และเมื่อเผาไหม้แล้วจะให้เพียงน้ำเป็นผลิตภัณฑ์โดยไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น เนื่องจากการที่ไม่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างโมเลกุลทำให้การใช้พลังงานจากก๊าซไฮโดรเจนไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงคาดการณ์กันว่าในอนาคตพลังงานจากก๊าซไฮโดรเจนจะเป็นแหล่งพลังงานสำคัญที่จะเข้ามาทดแทนพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงได้

2.3.3 คุณสมบัติของไฮโดรเจน

ไฮโดรเจน (Hydrogen ; H_2) เป็นธาตุที่เบาที่สุดและปรากฏอยู่มากที่สุดในจักรวาล โดยมีอยู่ประมาณ 1 ใน 3 ของวัตถุทั้งหมด ไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบของน้ำที่เป็นปัจจัยสำคัญของสิ่งมีชีวิตบนโลก มีอยู่ในสารประกอบอินทรีย์ทุกตัวและในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ไฮโดรเจนจะอยู่ในรูปโมเลกุลและมีทั่วไปตามธรรมชาติ ในบรรยากาศจะพบไฮโดรเจนอยู่ประมาณ 0.07% ส่วนบนพื้นผิวโลกจะพบอยู่ประมาณ 0.14%

ไฮโดรเจนสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เนื่องจากมีค่าพลังงานต่อน้ำหนักสูงสุดในบรรดาเชื้อเพลิงที่มีอยู่ โดยมีค่าพลังงาน 122 กิโลจูล/กรัม หรือคิดเป็น 3 เท่าของน้ำมัน ซึ่งถือได้ว่าเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูง และจัดว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม เพราะเป็นเชื้อเพลิงชนิดเดียวที่ไม่มีโมเลกุลของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ทำให้หลังการเผาไหม้ระหว่างไฮโดรเจนกับอากาศจะได้พลังงาน (ในรูปของพลังงานความร้อน) และน้ำเป็นผลิตภัณฑ์หลัก จึงไม่มีการปลดปล่อยมลพิษอากาศที่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพอนามัยของมนุษย์ นอกจากนี้ไฮโดรเจนยังสามารถนำไปเป็นวัตถุดิบในเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) โดยเมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วจะเกิดเป็นน้ำและพลังงาน (ในรูปของพลังงานไฟฟ้า) ซึ่งประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงไฮโดรเจนเป็นพลังงานไฟฟ้านั้นมีค่าสูงกว่าอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าแบบอื่นๆ มาก โดยนอกจากเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดแล้ว ไฮโดรเจนยังถือว่าเป็นเชื้อเพลิงหมุนเวียน (Renewable fuel) ที่ใช้แล้วได้กลับคืนมา เนื่องจากวัตถุดิบในการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) คือน้ำ เมื่อนำไฮโดรเจนไปใช้งานในการเผาไหม้หรือในเซลล์เชื้อเพลิงแล้วก็จะได้ผลิตภัณฑ์น้ำกลับคืนมา ด้วยเหตุนี้จึงทำให้พลังงานไฮโดรเจนได้รับการคาดหวังและยอมรับว่าจะเป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่สำคัญอย่างมากในอนาคต

2.3.4 เทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจน

การผลิตไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากหลายกระบวนการทั้งวิธีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี ตามแหล่งที่มีดังนี้คือ

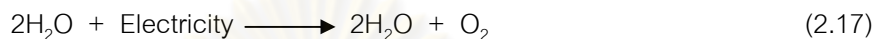
1. การผลิตไฮโดรเจนจากน้ำและสารเคมีที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ

การผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้มาจากแนวคิดที่ว่าไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบของสารเคมีหลายชนิดรวมทั้งน้ำซึ่งมีอยู่ทั่วไปในโลก จากการที่โครงสร้างของน้ำประกอบไปด้วย

ไฮโดรเจน 2 อะตอม และออกซิเจน 1 อะตอม ดังนั้นหากสามารถแยกไฮโดรเจนและออกซิเจนออกจากกันได้ก็จะทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนออกมา โดยวิธีการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำมีหลายวิธี คือ

- การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis)

เป็นการแยกน้ำให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไป ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาดังสมการ 2.17



โดยในกระบวนการนี้ก๊าซไฮโดรเจนที่แยกออกมาจะถูกเก็บไว้ที่ขั้วลบหรือแคโทด ส่วนก๊าซออกซิเจนจะถูกเก็บไว้ที่ขั้วบวกหรือแอโนด ข้อดีของการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการนี้คือ จะทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์มาก แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตจึงทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงมาก

- การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าจากแสง (Photoelectrolysis)

เป็นการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำโดยใช้หลักการเดียวกับการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าด้วยวิธีปกติ แต่มีการใช้แสงอาทิตย์แทนกระแสไฟฟ้าที่ต้องผ่านเข้าไป โดยจะมีการใช้สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ดูดซึมพลังงานแสงอาทิตย์ไว้จนเกิดเป็นขั้วไฟฟ้า (Electrode) ขึ้น ตัวอย่างการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการนี้ได้แก่ Photobiological splitting, Photoelectrochemical splitting

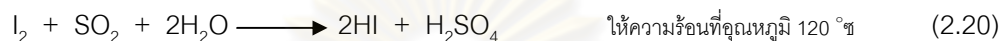
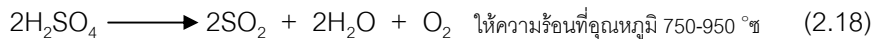
- การแยกน้ำโดยใช้ความร้อน (Thermal decomposition)

เป็นการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 2,200-3,000°ซ ในการแยกก๊าซไฮโดรเจนออกจากโมเลกุลของน้ำ

- กระบวนการแยกทางเคมีด้วยความร้อนสูง (Thermochemical)

เป็นกระบวนการที่ใช้ปฏิกิริยาเคมีด้วยความร้อนสูงในการแยกก๊าซไฮโดรเจนออกจากโมเลกุลของสารประกอบเคมี ซึ่งสามารถผลิตได้จากหลายกระบวนการแตกต่างกันออกไปตามชนิดของสารประกอบเคมีที่ใช้ในการผลิต และหลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาทั้งหมดแล้วจะได้สารตั้งต้นกลับคืนมา ยกเว้นโมเลกุลของน้ำซึ่งจะมีการแตกตัวเป็นก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ได้แก่ กระบวนการซีเรียม-คลอรีน (Cerium-chlorine cycle) กระบวนการเหล็กออกไซด์ (Iron oxide

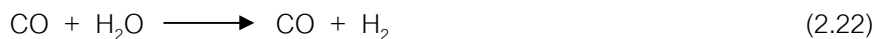
(Fe₃O₄/FeO) cycle) กระบวนการสังกะสี-สังกะสีออกไซด์ (Zinc-zinc oxide (Zn/ZnO) cycle) กระบวนการซัลเฟอร์-ไอโอดีน (Sulfur-iodine (S-I) cycle) เป็นต้น โดยตัวอย่างของกระบวนการซัลเฟอร์-ไอโอดีน ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการใช้กันมากกระบวนการหนึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยา 3 ขั้นตอน ดังสมการที่ 2.18, 2.19 และ 2.20 ตามลำดับ



โดยทั่วไปการแยกน้ำด้วยความร้อนและการแยกสารเคมีด้วยความร้อนจะมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่ากระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า เนื่องจากมีการใช้พลังงานความร้อนในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยตรง ส่วนกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเป็นการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า จากนั้นจึงใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนอีกครั้งหนึ่ง การเปลี่ยนรูปพลังงานหลายขั้นตอนเช่นนี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานต่ำลงและทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงอีกด้วย โดยการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงทั้งจากการแยกน้ำและการแยกสารเคมีจะมีความคุ้มค่ามากขึ้นเมื่อใช้พลังงานนิวเคลียร์ในการให้ความร้อนโดยการผลิตร่วมกับการผลิตไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้มีค่าใช้จ่ายต่อหน่วยต่ำกว่าการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าถึงร้อยละ 60 (OECD-NEA, 2000 อ้างถึงใน Forsberg, 2003)

2. การผลิตไฮโดรเจนจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

ในปัจจุบันพบว่าก๊าซไฮโดรเจนที่ถูกนำมาใช้กว่าร้อยละ 90 เป็นไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเป็นกระบวนการที่นำเอาก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเชื้อเพลิง และถ่านหิน หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ มาใช้ในการผลิต โดยวิธีที่ใช้มีหลายวิธี เช่น การแยกก๊าซธรรมชาติหรือก๊าซมีเทนโดยใช้ไอน้ำ การแตกตัวของก๊าซธรรมชาติโดยใช้ความร้อน การออกซิไดซ์ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเชื้อเพลิง และถ่านหิน และการใช้กระบวนการไพโรไลซิสหรือแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหิน เป็นต้น โดยส่วนใหญ่วิธีที่นิยมใช้คือ การแยกก๊าซธรรมชาติหรือก๊าซมีเทนโดยใช้ไอน้ำ ซึ่งในกระบวนการนี้ใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 700-1,000 °C ทำปฏิกิริยากับก๊าซธรรมชาติหรือมีเทนโดยใช้เงินเกิดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลผลิตจะได้ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา (วิทยา ยงเจริญ, 2547) ตัวอย่างของปฏิกิริยาแสดงดังสมการที่ 2.21 และ 2.22 ตามลำดับ



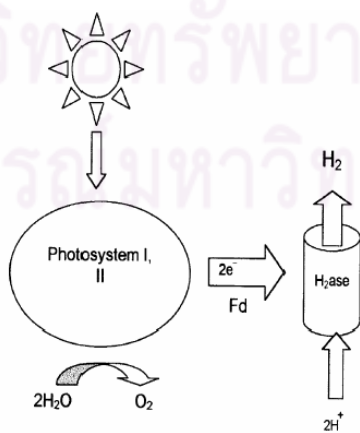
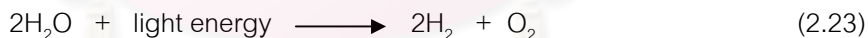
อย่างไรก็ตาม การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีผลกระทบที่สำคัญคือ ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศมากขึ้นหากไม่มีการกำจัดที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพ โดยก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากกระบวนการนี้ทุก 1 ตัน จะมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกปล่อยออกมาจากการผลิตถึง 10 ตันด้วยกัน (Maddy และคณะ, 2003 อ้างถึงใน Aceves-Lara และคณะ, 2008)

3. การผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีทางชีวภาพ

การผลิตไฮโดรเจนโดยวิธีทางชีวภาพสามารถแบ่งได้ออกเป็น 4 วิธี (Hallenbeck และ Benemann, 2002 ; Manish และ Banerjee, 2008) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

- การสังเคราะห์แสงทางชีวภาพโดยตรง (Direct biophotolysis)

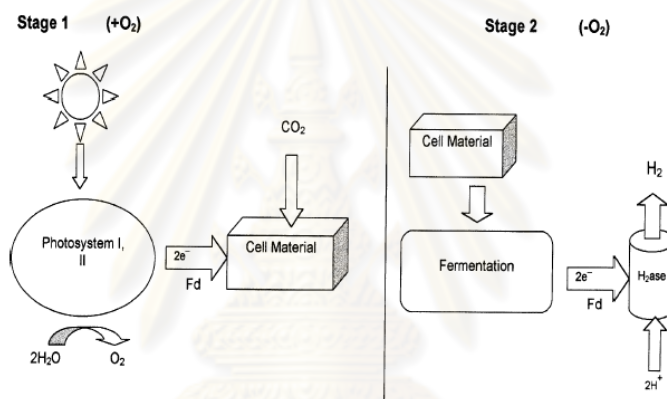
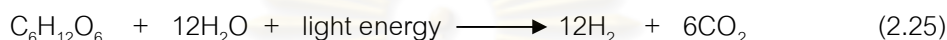
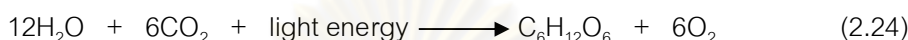
การผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้จะพบได้ในการสังเคราะห์แสงของพืชและสาหร่าย ซึ่งจะใช้พลังงานความร้อนในการเปลี่ยนสารตั้งต้นให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน ดังแสดงในสมการที่ 2.23 และรูปที่ 2.5 การสังเคราะห์แสงด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีความดันพาร์เชียลของออกซิเจนเข้าใกล้ 1 บรรยากาศ



รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์แสงทางชีวภาพโดยตรง

- การสังเคราะห์แสงทางชีวภาพทางอ้อม (Indirect biophotolysis)

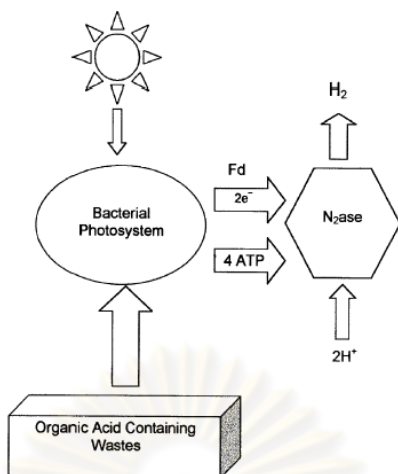
กระบวนการนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.6 คือ การแยกก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนควบคู่ไปกับการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยไซยาโนแบคทีเรียจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน ในขั้นตอนแรกจะเป็นการแยกก๊าซออกซิเจนออกจากด้วยไซยาโนแบคทีเรีย ดังสมการที่ 2.24 จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะเข้าสู่กระบวนการหมักเพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนดังแสดงในสมการที่ 2.25



รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์แสงทางชีวภาพทางอ้อม

- กระบวนการหมักแบบใช้แสง (Photo fermentation)

จัดเป็นกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยแบคทีเรียชนิดสังเคราะห์แสง (Photosynthetic bacteria) ซึ่งเป็นแบคทีเรียชนิดโฟโตเฮเทอโรโทรฟ (Photoheterotrophs) ที่สังเคราะห์แสงแบบไม่ผลิตออกซิเจน แบคทีเรียชนิดนี้สามารถใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน และใช้สารอินทรีย์ เช่น กรดอินทรีย์ กรดไขมันระเหย แอลกอฮอล์ รวมทั้งคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ เป็นแหล่งของคาร์บอน โดยแบคทีเรียจะใช้กรดอินทรีย์ต่างๆ เช่น กรดอะซิติก เป็นตัวให้อิเล็กตรอน และส่งต่อไปยังเอนไซม์ไนโตรจีเนสด้วยเฟอเรดอกซิน (Ferredoxin) จากนั้นเอนไซม์ไนโตรจีเนสจะทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นเพื่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน โดยอาศัยพลังงานภายนอกเป็นตัวกระตุ้น ดังสมการที่ 2.26 และรูปที่ 2.7



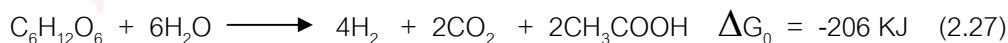
รูปที่ 2.7 กระบวนการหมักแบบใช้แสง

แบคทีเรียที่พบในปฏิกริยานี้ ได้แก่ *Rhodobacter spheroids*, *Rhodobacter capsulatus*, *Rhodovulum sulfidophilum* และ *Rhodospseudomonas palustris* เป็นต้น



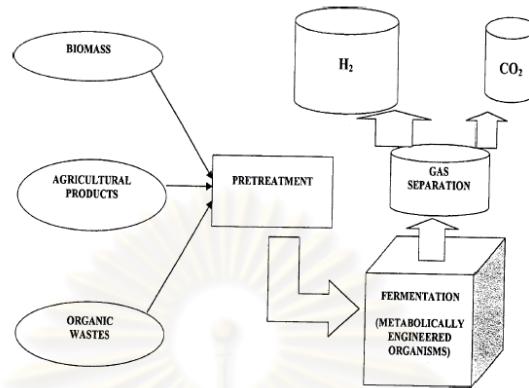
- กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง (Dark fermentation)

การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไร้แสง ดังแสดงในสมการที่ 2.27 เมื่อใช้กลูโคสเป็นสารตั้งต้น กลูโคสจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดไพรูวิก โดยมีโคเอนไซม์ Nicotinamide adinine dinucleotide (NAD) เป็นพาหะของอิเล็กตรอนและเมื่อรับอิเล็กตรอนแล้วจะกลายเป็น NADH ส่วนกรดไพรูวิกที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับ NAD^+ กลายเป็นอะซีติลโคเอและมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นด้วย หลังจากนั้นอะซีติลโคเอจึงจะทำปฏิกิริยาต่อ เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้กรดไขมันระเหยชนิดต่างๆ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอลกอฮอล์ แบคทีเรียที่พบในปฏิกริยานี้ ได้แก่ *Enterobacter sp.*, *Bacillus sp* และ *Clostridium sp.* เป็นต้น



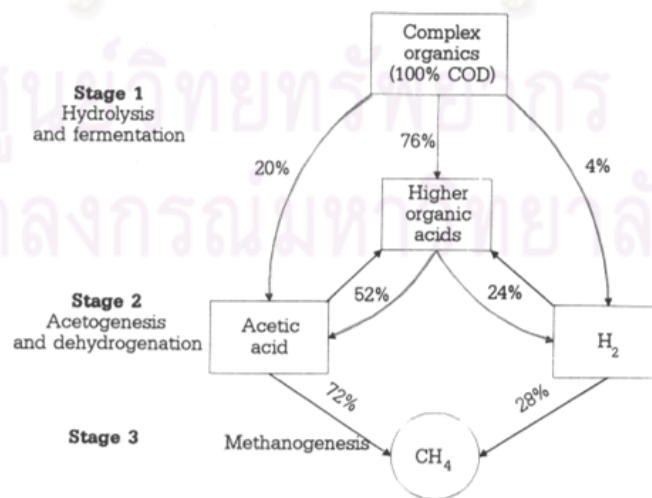
การผลิตไฮโดรเจนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักที่สภาวะไร้แสง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ โดยไฮโดรเจนจะถูกผลิตขึ้นในขั้นตอนของไฮโดรไลซิสและการสร้างกรด นอกจากนี้ยังมีผลผลิตอื่นๆ เช่น

คาร์บอนไดออกไซด์ แอลกอฮอล์ และกรดไขมันระเหย ซึ่งผลผลิตเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ต่อไปในขั้นตอนการสร้างมีเทน โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศแสดงได้ดังรูปที่ 2.8

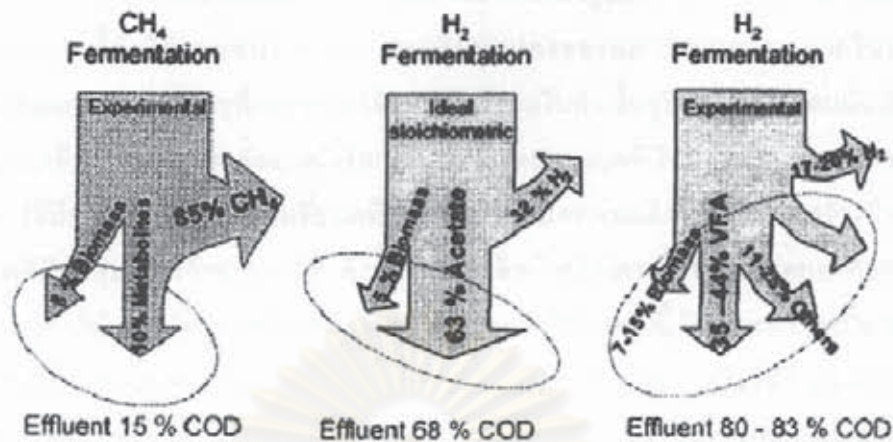


รูปที่ 2.8 กระบวนการหมักแบบไร้แสง

McCarty (1981) ได้รายงานว่าการผลิตไฮโดรเจนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงซ้อนในกระบวนการไร้อากาศจะทำให้ค่าซีโอดีเปลี่ยนแปลงน้อยหรือเพียงประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่ไม่มีการย่อยสลายเป็นกรดอินทรีย์ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยยืนยันได้จากสัดส่วนซีโอดีที่เหลือจากกระบวนการหมักแบบต่างๆ ดังรูปที่ 2.10 นั่นคือ การผลิตไฮโดรเจนที่ผ่านกระบวนการหมักจะมีซีโอดีคงเหลือในน้ำทิ้งสูงถึง 80-83% โดยเป็นองค์ประกอบของชีวมวล 7-15% กรดอินทรีย์ระเหย 35-44% และอื่นๆ 11-25% โดยซีโอดีจะถูกใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเพียง 17-20%



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงซ้อนแบบไร้อากาศ (McCarty, 1981)



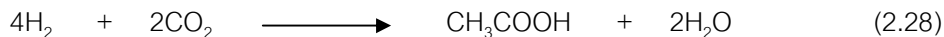
รูปที่ 2.10 ปริมาณซีโอดีที่เหลือจากกระบวนการหมักต่างๆ

2.3.5 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ

ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศนั้นการที่จะได้กรดไขมันระเหยง่ายชนิดใดเป็นผลิตภัณฑ์ นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์หรือซับสเตรทและความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนแล้ว สิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา คือ ชนิดของจุลินทรีย์ภายในระบบ ดังจะเห็นได้จากแบคทีเรียสร้างกรดบางกลุ่มในจีนัส *Clostridium* เพียงกลุ่มเดียวสามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายถึง 17 ชนิด และยังไม่นับรวมถึงแบคทีเรียสร้างกรดกลุ่มจีนัสอื่นๆ อีกหลายกลุ่ม ซึ่งได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาค้นคว้าการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากแบคทีเรียกลุ่มจีนัสต่างๆ โดยใช้เชื้อบริสุทธิ์ (Pure culture) เช่น *Enterobacter* *Bacillus* และ *Clostridium* เป็นต้น ซึ่งการใช้เชื้อบริสุทธิ์ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพมีข้อดีคือ สามารถเลือกชนิดและสายพันธุ์ที่มีความเหมาะสมทั้งกับสภาวะการทำงานและชนิดของซับสเตรทนั้นๆ ได้ และยังให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนหรือไฮโดรเจนยิลด์สูงอีกด้วย แต่มีข้อเสียคือ มีความไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบการผลิตจริงซึ่งมีขนาดใหญ่ และยังคงมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมต่ำโดยอาจจะต้องใช้เวลาในการปรับตัวนานพอสมควร นอกจากนี้ยังอาจจะไม่สามารถแข่งขันกับเชื้อชนิดอื่นๆ ที่อาจมีการปนเปื้อนเข้ามาในระบบได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อซับสเตรทเป็นสารอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเชื้อบริสุทธิ์จะมีความจำเพาะเจาะจงกับซับสเตรทที่ใช้ในการเลี้ยงเชื้อเพียงบางชนิดเท่านั้น ดังนั้นการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผสมจากแหล่งธรรมชาติหรือจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย

โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำไปใช้กับระบบการผลิตซึ่งมีขนาดใหญ่และต้องใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จำนวนมาก นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมภายในระบบที่นอกเหนือออกไปจากสภาวะที่เหมาะสมได้ อย่างไรก็ตามในหัวเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผสมนั้นประกอบไปด้วยแบคทีเรียหลายชนิด ทั้งแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งจะส่งผลทำให้มีการนำก๊าซไฮโดรเจนที่แบคทีเรียผลิตก๊าซไฮโดรเจนผลิตไปใช้ในการสร้างก๊าซมีเทนโดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนได้ ดังนั้นในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยอาศัยการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศนั้นจะต้องมีการยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มนี้ โดยการบำบัดเบื้องต้นก่อนนำไปใช้หรือการควบคุมสภาวะแวดล้อมและปัจจัยต่างๆ ของระบบ หรือใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันเพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนซึ่งมีความอ่อนไหวต่อสภาวะแวดล้อมมากกว่าแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจนชนิดอื่นอยู่แล้ว โดยวิธีที่ใช้ในการบำบัดหรือเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นมีหลายวิธี ได้แก่ การให้ความร้อนแก่หัวเชื้อ (Heat treatment) การปรับสภาพหัวเชื้อให้มีค่าพีเอชเป็นกรด (Acidic treatment) การเติมสารเคมี (Chemical treatment) เป็นต้น โดยการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและค่อนข้างมีประสิทธิภาพ

ผลจากการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นจะทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนถูกกำจัดออกไปและทำให้ได้หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ประกอบไปด้วยแบคทีเรียกลุ่มสร้างสปอร์อันมีแบคทีเรียกลุ่มจิ้นัส *Clostridium* กลายเป็นแบคทีเรียกลุ่มหลัก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแบคทีเรียสร้างกรดและสามารถสร้างก๊าซไฮโดรเจนได้ ตัวอย่างของแบคทีเรียกลุ่มนี้ ได้แก่ *C. butyricum*, *C. acidisoli*, *C. tyrobutylicum* และ *C. acetobutyricum* (Ueno และคณะ, 2001; Hawkes และคณะ, 2002; Fang และคณะ, 2002 อ้างถึงใน Kim และคณะ, 2006) เป็นต้น โดยแบคทีเรียเหล่านี้จะมีการสร้างสปอร์ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต เช่น สภาวะที่มีอุณหภูมิที่สูงเกินไป สภาวะที่มีสารเคมีที่เป็นพิษ หรือเมื่อขาดสารอาหารที่จำเป็น เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามแบคทีเรียชนิดนี้มีข้อจำกัดคือ มีความอ่อนไหวต่อสภาวะแวดล้อมที่ไม่คงที่และมีความต้องการแบบจำเพาะเจาะจงในการงอกของสปอร์ (Spore germination) อีกด้วย (Labbe และ Remi Shih, 1997 อ้างถึงใน Hawkes และคณะ, 2002) นอกจากนี้ภายในหัวเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่ผ่านการบำบัดหัวเชื้อจะมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและผลิตก๊าซไฮโดรเจนแล้ว ภายในหัวเชื้อจุลินทรีย์ยังมีแบคทีเรียที่สร้างสปอร์ชนิดอื่นอาศัยอยู่ด้วย เช่น แบคทีเรียกลุ่มสร้างซิติคบางชนิด ได้แก่ *C. scatologen*, *C. magnum*, *C. coccooides*, *Sporomusa ovata* (Mitchell, 2001 อ้างถึงใน Kim และคณะ, 2006) เป็นต้น โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะมีการนำก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ไปใช้ในการสร้างกรดอะซิติค ดังสมการที่ 2.28 ซึ่งจะมีผลทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ลดลง



นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียที่เรียกลู่มที่ผลิตแลกเตทซึ่งมีทั้งชนิดที่สร้างสปอร์ได้ เช่น *Bacillus racemilacticus* และที่ไม่สร้างสปอร์ เช่น *Lactobacillus paracasei* (Hyronimus และคณะ, 2000; Noike และคณะ, 2002 อ้างถึงใน Kim และคณะ, 2006) ซึ่งจะคอยแข่งขันกับแบคทีเรียที่เรียกลู่มที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนในการนำซับสเตรทไปใช้ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาจะไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น ดังสมการ



จึงจะเห็นได้ว่า การบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นนั้นสามารถกำจัดแบคทีเรียที่เรียกลู่มสร้างก๊าซมีเทนออกไปได้ แต่ไม่สามารถกำจัดแบคทีเรียที่เรียกลู่มสร้างสปอร์ชนิดอื่นนอกเหนือไปจากแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ ดังนั้นจึงควรที่จะมีการใช้สภาวะต่างๆ ในการทำงานเพื่อควบคุมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่เรียกลู่มนี้ด้วย เช่น เวลาพักทางเซลล์ศาสตร์ อุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบ เป็นต้น นอกจากการมีแบคทีเรียที่เรียกลู่มสร้างกรดอะซิติกและแบคทีเรียที่ผลิตแลกเตทภายในระบบจะเป็นผลทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนลดลงแล้ว แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนเองยังสามารถผลิตแอลกอฮอล์ เอทานอล บิวทานอล และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบในสภาวะที่ไม่เหมาะสม ยกตัวอย่างเช่น การมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ในขณะที่ระบบมีปริมาณเหล็กและฟอสฟอรัสจำกัด หรือมีเวลาพักทางเซลล์ศาสตร์ ค่าพีเอชและอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม (Hawkes และคณะ, 2002) การมีความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนสูง (Adum, 1990 อ้างถึงใน Liu และคณะ, 2006) เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนลดลงได้ และจากงานวิจัยที่ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยใช้การทดลองแบบแบทช์พบว่า เมื่อแบคทีเรียมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงที่มีการเจริญเติบโตแบบคงที่หรือในช่วงปลายของ Log phase แบคทีเรียจะมีการผลิตแอลกอฮอล์แทนการผลิตกรดและก๊าซไฮโดรเจนอีกด้วย (Lay, 2000)

2.3.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

โดยปัจจัยหลักๆ ที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ จำแนกออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ปัจจัยด้านการควบคุมระบบ (Operating factors) และปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental factors) มีรายละเอียดดังนี้

ปัจจัยด้านการควบคุมระบบ

อัตราภาระสารอินทรีย์ (Organic loading)

อัตราภาระสารอินทรีย์เป็นปัจจัยทางด้านการทำงานที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยตรงและยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะในระบบ เช่น ค่าพีเอช และเวลากักพักทางชลศาสตร์อีกด้วย ดังนั้นระบบควรที่จะมีอัตราภาระสารอินทรีย์ที่มีความเหมาะสมกับชนิดของซบสเตรทและสถานะการเดินระบบ ซึ่งในการปรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ทำได้โดยการเปลี่ยนอัตราการไหลของของเสียที่ไหลที่เข้าระบบ หรือการปรับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เข้าระบบโดยการเจือจางน้ำเสียให้มีค่าต่ำลงหรือเพิ่มขึ้น

เวลากักพักทางชลศาสตร์ (Hydraulic retention time, HRT) และเวลากักพักตะกอน (Solid retention time, SRT)

เวลากักพักทางชลศาสตร์เป็นค่าที่บ่งบอกถึงระยะเวลาที่น้ำเสียอยู่ระบบเพื่อให้แบคทีเรียมีระยะเวลาในการสัมผัสกับน้ำเสียที่เพียงพอที่จะเกิดกระบวนการเมทาบอลิซึมและย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ ระยะเวลาที่แบคทีเรียต้องการในการสัมผัสกับน้ำเสียนั้นมีค่าแตกต่างกัน โดยขึ้นอยู่กับชนิดของซบสเตรทว่ามีความซับซ้อนเพียงใด ซบสเตรทที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น กลูโคส กรดไขมันระเหยและแอลกอฮอล์ จะสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่าซบสเตรทพวก คาร์โบไฮเดรต ไขมัน รวมไปถึงน้ำเสียขุ่นข้นและขยะขุ่นซึ่งมีความซับซ้อนของโครงสร้างมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้แบคทีเรียต้องการเวลากักพักทางชลศาสตร์เพื่อสัมผัสและย่อยสลายเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

ส่วนเวลากักพักตะกอนเป็นค่าที่บ่งบอกถึงระยะเวลาที่แบคทีเรียจะคงอยู่ในระบบเพื่อที่จะเจริญเติบโตและเพิ่มเซลล์ใหม่จนมีจำนวนเพียงพอที่จะเป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นในระบบ (Predominant) สำหรับแบคทีเรียในระบบแบบไร้อากาศนั้นอัตราการผลิตมวลจุลินทรีย์ที่ต่ำและเจริญเติบโตช้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน ดังนั้นระบบควรที่จะมีเวลากักพักตะกอนที่นานเท่าที่จะทำได้เพื่อรักษามวลจุลินทรีย์ไว้ในระบบ

เวลากักพักทางชลศาสตร์มีความสัมพันธ์กับการเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่นานจะทำให้แบคทีเรียมีระยะเวลาในการสัมผัสและย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ปฏิบัติการย่อยสลายสามารถดำเนินต่อไปจนถึงขั้นของการผลิตก๊าซมีเทน ดังนั้นในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จึงมีการออกแบบให้ระบบมีเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่สั้น เพื่อให้ปฏิบัติการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ในขั้นแรกๆ เท่านั้น ช่วยลดโอกาสการนำก๊าซไฮโดรเจนไปใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มที่บริโภคก๊าซไฮโดรเจน ทำให้ไฮโดรเจนยิลด์ที่ได้จากปฏิกริยา

มีค่าสูงขึ้น สิ่งที่ต้องพิจารณาในการออกแบบเวลากักพักทางชลศาสตร์คือ ความซับซ้อนของน้ำเสียหรือของเสียที่ทำการบำบัด ชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ (เชื้อบริสุทธ์/เชื้อผสม) และสภาพแวดล้อมที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและเมทาบอลิซึมของแบคทีเรีย เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น ตัวอย่างเวลากักพักทางชลศาสตร์ของน้ำเสียที่เหมาะสมจากการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบกวนผสมหมุน แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียประเภทต่างๆ โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบกวนผสมหมุน

ชนิดของน้ำเสีย	อุณหภูมิ (°ซ)	ค่าพีเอช	เวลากักพักชลศาสตร์ที่เหมาะสม (ชม.)	งานวิจัยอ้างอิง
กลูโคส	40	6.0-7.0	6	Wu และคณะ (2008)
แป้ง	35	5.3	12	Arooj และคณะ (2008)
ตะกอนเบียร์	37	5.5	18	Fan และคณะ (2006)

การกวนผสม (Mixing)

การกวนผสมภายในระบบมีผลต่อการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยจะช่วยให้มีการสัมผัสกันระหว่างซับสเตรทและเชื้อจุลินทรีย์มากขึ้น จึงส่งผลทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังช่วยให้มีการกระจายเชื้อจุลินทรีย์ภายในระบบให้มีลักษณะที่สม่ำเสมอกันทั่วทั้งถังปฏิกิริยา ช่วยป้องกันการจับตัวกันเป็นก้อนของของเสียภายในถังหมักซึ่งจะทำให้การย่อยสลายเป็นไปได้ยาก และสามารถป้องกันการสะสมของสารอินทรีย์ในบางบริเวณของถัง โดยการกวนผสมนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกวนโดยใช้เครื่องมือ (Mechanical) การใช้ของเหลวหมุนเวียนเข้าระบบ (Liquid circulation) การอัดพ่นก๊าซเข้าที่ทางด้านล่างของถังปฏิกิริยา (Compressed air) เป็นต้น แต่มีข้อควรระวังคือ จะต้องเป็นการกวนแบบช้าและไม่ก่อให้เกิดความปั่นป่วน (Turbulent) ภายในระบบ

ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental factor)

อุณหภูมิ (Temperature)

โดยทั่วไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งรวมไปถึงปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิตหรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาทางชีวเคมีอีกด้วย ปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศมีอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องโดยมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของแบคทีเรียภายในระบบ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแบคทีเรียมีแนวโน้มที่จะมีกระบวนการเมแทบอลิซึมสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นด้วย แต่เนื่องจากแบคทีเรียแต่ละชนิดมีความชอบอุณหภูมิในช่วงที่แตกต่างกัน ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมกับชนิดของแบคทีเรียจึงมีความสำคัญเช่นเดียวกัน การเดินระบบที่ช่วงอุณหภูมิต่างๆ อาจมีข้อจำกัดอันเนื่องมาจากสภาพอากาศในพื้นที่ที่แตกต่างกัน ในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำอาจจะต้องมีการให้ความร้อนแก่ระบบทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากต้องการเดินระบบที่อุณหภูมิสูงกว่าสภาพอากาศมากๆ ซึ่งจะทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากขึ้นจนอาจเกิดความไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ได้ ซึ่งอาจมีการใช้ทางเลือกอื่นโดยการเดินระบบที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่ต้องการ แต่ให้มีการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ภายในระบบให้สูงขึ้นกว่าปกติ เพื่อให้มีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์เท่ากันหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ต้องการมากที่สุด (Speece, 1996) สำหรับประเทศไทยซึ่งมีสภาพอากาศค่อนข้างร้อนและมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 20-35 °C จึงมีความเหมาะสมในการเดินระบบโดยใช้อุณหภูมิในช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) โดยไม่จำเป็นต้องให้อุณหภูมิเพิ่มแก่ระบบแต่อย่างใด

สำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพนั้นพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยจากงานวิจัยที่ทำการศึกษเพื่อเปรียบเทียบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียประเภทแป้งที่อุณหภูมิแตกต่างกันด้วยระบบแบบที่ละเท โดยทำการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพที่ได้จากน้ำเสียที่อุณหภูมิ 37 และ 55 °C พบว่าที่อุณหภูมิ 55 °C สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากกว่าที่อุณหภูมิ 37 °C โดยมีไฮโดรเจนยิลด์ 78 มล./ก.ของแป้ง ในขณะที่อุณหภูมิ 37 °C มีไฮโดรเจนยิลด์ 47 มล./ก.ของแป้ง (Zhang และคณะ, 2003) นอกจากนี้ในระบบแบบต่อเนื่อง Ueno และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากของเสียจากบ้านเรือนโดยให้อุณหภูมิของระบบเท่ากับ 60 °C พบว่ามีไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 46.3 มล./ก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด โดยมีค่ามากกว่าก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากของเสียชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิ 37 °C อยู่เท่ากับร้อยละ 4.67 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 43.0 มล./ก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด นอกจากนี้ช่วงอุณหภูมิดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังได้มีการทำการวิจัยการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยใช้อุณหภูมิสูงกว่าช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) หรือที่เรียกกว่า ช่วงไฮเปอร์

เทอร์โมฟิลิก (Hyperthermophilic) โดย Kotsopoulos และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากเศษเนื้อหมูที่อุณหภูมิ 70 °ซ โดยใช้เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 24 ชม. มีอัตราการระบวรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 24.9 ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/วัน หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์จากถังผลิตก๊าซมีเทนที่มีการควบคุมอุณหภูมิของระบบอยู่ในช่วงมีไซฟิติก (35 °ซ) และไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน พบว่าระบบมีไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 3.65 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่เข้าระบบโดยไม่มีการควบคุมค่าพีเอชภายในระบบ สำหรับการเดินระบบที่ช่วงไฮเปอร์เทอร์โมฟิลิกมีข้อดีคือ แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนไม่สามารถอาศัยอยู่ได้เนื่องจากมีอุณหภูมิค่อนข้างสูง และยังทำให้ระบบมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงขึ้น แต่มีข้อเสียหลักๆ คือ ต้องใช้พลังงานในการให้ความร้อนแก่ระบบมาก เช่นเดียวกัน ซึ่งการเดินระบบโดยใช้อุณหภูมิในช่วงนี้จะมีความเหมาะสมกับระบบการผลิตที่มีพลังงานความร้อนเป็นผลพลอยได้จากการผลิตอยู่แล้วจึงจะมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

จากข้อมูลข้างต้นนอกจากอุณหภูมิจะมีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนแล้ว อุณหภูมิที่มีค่าสูงยังสามารถลดความดันของพาร์เซียลของก๊าซไฮโดรเจนโดยจะช่วยให้ก๊าซไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในน้ำมีการกระจายไปสู่ชั้นอากาศมากขึ้น ช่วยป้องกันการผลิตกรดไพรโอไนคและทำให้การย่อยสลายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Hawkes และคณะ, 2002)

ค่าพีเอช

ค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อระบบบำบัดแบบไร้อากาศ โดยทั่วไปค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 6.8-7.4 (Grady และคณะ, 1999) สำหรับถังหมักกรดของระบบบำบัดไร้อากาศแบบสองขั้นตอน ซึ่งแบคทีเรียส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดจะมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 3.5-6.5 โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2543) การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมีผลโดยตรงต่อกระบวนการเมทาบอลิซึมของแบคทีเรีย หากมีค่าต่ำหรือสูงเกินกว่าค่าที่เหมาะสมมากเกินไปจะทำให้แบคทีเรียเจริญเติบโตได้ไม่เต็มที่ไปจนถึงถูกยับยั้งการเจริญเติบโตและไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ภายในระบบได้ในที่สุด นอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีความสัมพันธ์กับปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบ โดยหากระบบได้รับสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบเพิ่มขึ้นด้วย และส่งผลทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงได้ ดังนั้นระบบบำบัดแบบไร้อากาศจึงควรมีสภาพค่าพีเอชที่เพียงพอเพื่อที่จะได้รองรับการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากเกินไป ในการปรับค่าพีเอชของระบบทำได้โดยการปรับปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบและการเติมสารเคมี เช่น ปูนขาว (CaO) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2HCO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมไบคาร์บอเนต

(NaHCO_3) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าพีเอชนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงภายหลังจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยอื่นเรียบร้อยแล้วค่าพีเอชจึงจะมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลง ดังนั้นในการควบคุมดูแลระบบบำบัดแบบไร้อากาศนั้นควรที่จะมีการตรวจสอบปัจจัยอื่นๆ ร่วมด้วยเพื่อให้การดำเนินการแก้ไขสามารถทำได้อย่างทันที่

แบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไร้อากาศมีความอ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนนั้นมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมาก รวมถึงค่าพีเอชของระบบ ในขณะที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดนั้นมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้มากกว่า ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจึงได้ใช้ความแตกต่างข้อนี้มาใช้ในเดินระบบเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน โดยการควบคุมค่าพีเอชให้มีค่าค่อนข้างเป็นกรดอยู่ในช่วง 4.0-6.5 ซึ่งค่าพีเอชเท่าใดจึงจะเหมาะสมนั้นยังไม่ทราบแน่ชัด ซึ่งในปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพที่ค่าพีเอชต่างๆ ซึ่งพบว่าค่าพีเอชต่างกันไปตามชนิดของซับสเตรท สภาพะการทำงาน และสภาพแวดล้อมของระบบ โดย Van Ginkel และ Logan (2005) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากกลูโคสโดยใช้เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 10 ชม. ที่อุณหภูมิ 30°C ทำการเปรียบเทียบค่าพีเอชในช่วง 4.5-6.0 พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมคือที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5.5 โดยมีไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดคือ 2.5 มิลไฮโดรเจน/มิลของเฮกไซส ส่วน Chou และคณะ (2008) ทำการศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดสูง โดยทำการทดลองแบบที่ละเทที่อุณหภูมิ 40°C พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6.0 โดยมีไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 13.0 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด

สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

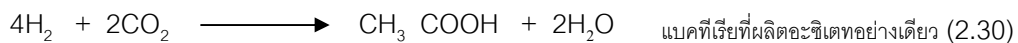
สภาพความเป็นด่างเป็นค่าที่แสดงถึงกำลังบัฟเฟอร์ (Buffer capacity) ในการรองรับปริมาณกรดไขมันระเหยภายในระบบ ระบบที่มีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำเมื่อปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นสูงจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชอย่างรวดเร็วและส่งผลต่อระบบได้ สภาพด่างที่มีความสำคัญในระบบแบบไร้อากาศคือ สภาพด่างในรูปไบคาร์บอเนต (Bicarbonate alkalinity) โดยสำหรับระบบแบบไร้อากาศ ค่าสภาพด่างในรูปไบคาร์บอเนตนี้จะไม่มีความเหมาะสมตายตัว เนื่องจากค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ภายในระบบ สารอินทรีย์ที่เข้าระบบมีความเข้มข้นมากนอกจากจะมีปริมาณกรดไขมันระเหยเกิดขึ้นมากแล้วยังมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์มากด้วย ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชได้ ดังนั้นเพื่อให้ระบบสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้ในการควบคุมดูแลระบบจึงควรที่จะมีการพิจารณาถึงอัตราส่วนของปริมาณกรดไขมันระเหยและ

สภาพต่างในรูปไบคาร์บอเนตในหน่วย มก./ล.ของกรดอะซิติก ต่อ มก./ล.ของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งโดยทั่วไประบบบำบัดแบบไร้อากาศควรที่จะมีอัตราส่วนของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายและสภาพต่างในรูปไบคาร์บอเนตที่น้อยกว่า 0.4 และไม่ควรมากกว่า 0.8 เนื่องจากที่อัตราส่วนมากกว่านี้จะทำให้ระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำ เมื่อมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มอีกเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้ค่าพีเอชของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้

ความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนไฮโดรไลซิสไปจนถึงขั้นตอนสร้างกรดอะซิติกจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทนโดยแบคทีเรียกลุ่มที่มีการบริโภคก๊าซไฮโดรเจน (H_2 -consuming bacteria) และกลุ่มไฮโดรจีโนฟิลิกเมทาโนเจน (Hydrogenophilic methanogens) ในขั้นตอนของการสร้างก๊าซมีเทน ทำให้ความดันพาร์เชียลของก๊าซทั้งสองชนิดลดลงและมีค่าไม่สูงจนเกินไป แต่ในระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่มีการขาดสมดุลระหว่างแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนถูกยับยั้งการทำงานหรือไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในระบบจะทำให้ความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้มีกรดโพไฟโอนิกและกรดไขมันระเหยง่ายอื่นๆ สะสมอยู่ในระบบจนระบบมีค่าพีเอชต่ำและทำให้ระบบล้มเหลวได้ในที่สุด (มันลิน ตัณฑุลเวศม์, 2542) ความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยชี้บ่งถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบแบบไร้อากาศได้

สำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยระบบแบบไร้อากาศนั้น มีการควบคุมสภาวะต่างๆ เพื่อป้องกันไม่ให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนเจริญเติบโตได้ภายในระบบ จึงทำให้ความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงซึ่งไม่เป็นผลดีต่อระบบเช่นเดียวกัน โดยหากมีความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนสูงถึงค่าค่าหนึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนวิถีทางจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และกรดไขมันระเหยต่างๆ ไปเป็นการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นแทน เช่น แลกเตต เอทานอล อะซิโตน หรืออะลานีน (Alanine) (Adum, 1990 อ้างถึงใน Liu และคณะ, 2006) และความดันพาร์เชียลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีค่าสูงเกินไปยังมีผลต่อระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ โดยแบคทีเรียที่ผลิตอะซิเตทอย่างเดียวยังจะมีการนำเอาก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ร่วมกันในการผลิตกรดอะซิติกเมื่อมีการเจริญเติบโตแบบอโตโทรฟิก ดังสมการที่ 2.30



นอกจากนี้แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนที่บริเวณก๊าซไฮโดรเจนยังสามารถผลิตก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ดังสมการที่ 2.31



ผลการทำงานของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มจะส่งผลทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีค่าลดลง ดังนั้นการกำจัดทั้งก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินออกจากระบบเพื่อให้มีความดันพาร์เชียลต่ำลงจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาที่เกิดจากแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มดังกล่าวเกิดขึ้นได้ การลดการสะสมของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำได้โดยอาศัยการรวมผสมภายในระบบ การใช้ก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน หรือก๊าซชนิดอื่นๆ เป่าเข้าไปภายในถังหมัก หรือใช้ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากระบบแบบไร้อากาศนำมาหมุนเวียนเข้าสู่ระบบอีกครั้งเพื่อไล่ก๊าซทั้งสองชนิดออกจากระบบ

ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอนเกิดขึ้น ส่วนปฏิกิริยารีดักชันเป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) จึงเป็นปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการให้และรับอิเล็กตรอนของสารในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนของตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนนั้นมีค่าที่เกี่ยวข้องคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เป็นค่าที่มีความเฉพาะตัวในแต่ละสาร เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันจะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชันหรือค่าไออาร์พีจึงหมายถึง ค่าความต่างศักย์ในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากตัวให้อิเล็กตรอนไปยังตัวรับอิเล็กตรอน ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ นั้นมีปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันเข้ามาเกี่ยวข้องโดยเฉพาะการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศซึ่งมีขั้นตอนการย่อยสลายหลายขั้นตอน ค่าไออาร์พีสามารถแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบว่าเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่และสามารถบ่งบอกถึงขั้นของการย่อยสลายภายในระบบได้ ในการวัดค่าไออาร์พีจะมีค่าอยู่ในช่วง -1,400 ถึง +1,400 มิลลิโวลต์ โดยสัญลักษณ์เครื่องหมายลบหน้าตัวเลขของค่าที่วัดได้แสดงถึงว่าสารนั้นมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่าการรับอิเล็กตรอน ในทางกลับกันสัญลักษณ์เครื่องหมายบวกหน้าตัวเลขแสดงถึงว่าสารนั้นมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนมากกว่าที่จะให้อิเล็กตรอน

ระบบบำบัดแบบไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพที่ดีโดยทั่วไปควรมีค่าไออาร์พีอยู่ในช่วง -300 ถึง -500 มิลลิโวลต์ หากระบบบำบัดแบบไร้อากาศมีค่าเป็นบวกมากๆ จะแสดงถึงการมีสารรับอิเล็กตรอนอยู่ในระบบ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าอาจมีการรั่วบริเวณรอยต่อของถังและอุปกรณ์ต่างๆ หรืออาจเกิดจากข้อผิดพลาดที่ทำให้มีสารที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง

ก๊าซออกซิเจนอยู่ภายในระบบได้ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบและแก้ไขโดยทันทีเพราะหากปล่อยทิ้งไว้จะส่งผลทำให้แบคทีเรียชนิดไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาดไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ และส่งผลให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้อากาศไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ในที่สุด สำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพนั้นเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายในช่วงแรกของปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ดังนั้นค่าไออาร์พีจึงอาจมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่มีค่าเป็นลบต่ำกว่าระบบแบบไร้อากาศทั่วไป ซึ่งค่าดังกล่าวมีผลต่อชนิดของกรดไขมันระเหยง่ายและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้อีกด้วย (Cohen, 1982 อ้างถึงใน Hawkes และคณะ, 2002)

2.3.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ (Khanal และคณะ, 2004)

ปริมาณไฮโดรเจนสะสมจากชุดการทดลองแบบแบทช์จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการ Modified Gompertz ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังสมการที่ 2.32 ซึ่งเมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาจัดรูปเพื่อเปรียบเทียบกับสมการ Modified Gompertz จะสามารถหาสัมประสิทธิ์ของระยะเวลาการเกิดก๊าซเริ่มต้น (Lag time) ศักยภาพการเกิดก๊าซไฮโดรเจน และอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดได้ดังแสดงในรูปที่ 2.11

$$H_{(t)} = P \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_m e}{P} (\lambda - 1) + 1 \right] \right\} \quad (2.32)$$

เมื่อ $H_{(t)}$ = ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)

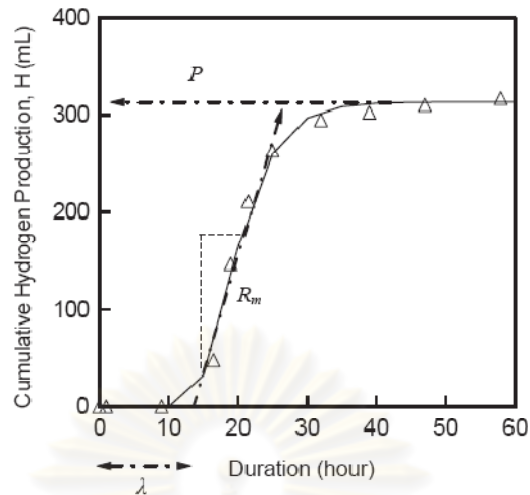
P = ศักยภาพการเกิดก๊าซไฮโดรเจน (มล.)

R_m = อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด (มล./ชม.)

e = 2.71828

λ = ระยะเวลาเกิดก๊าซเริ่มต้น (ชม.)

T = เวลา (ชม.)



รูปที่ 2.11 การหาค่าสัมประสิทธิ์จากสมการ Modified Gompertz (Khanal และคณะ, 2004)

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 การผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง

Reungsang และคณะ (2004) ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้เงื่อนไขในการผลิตที่ต่างกัน 3 แบบ ได้แก่

1. ใช้กลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศอย่างเดียว
2. ใช้จุลินทรีย์ผสมระหว่างกลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศกับเชื้อ *Rhodospirillum rubrum*
3. ใช้ระบบแบบสองขั้นตอน โดยใช้กลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศก่อนแล้วตามด้วยเชื้อ

Rhodospirillum rubrum

จากการทดลองพบว่า การผลิตไฮโดรเจนโดยใช้กลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศเพียงอย่างเดียวจะสามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงสุดที่อุณหภูมิ 55 °ซ และพีเอชเท่ากับ 5 โดยไฮโดรเจนที่ผลิตได้เท่ากับ 71.3 มล./ก.ซีโอดี ส่วนการผลิตไฮโดรเจนด้วยจุลินทรีย์ผสมระหว่างกลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศกับเชื้อ *Rhodospirillum rubrum* จะช่วยเพิ่มผลผลิตของไฮโดรเจนขึ้น 2.1 เท่าจากปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากการใช้กลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศที่อุณหภูมิ 30 °ซ และพีเอชเท่ากับ 7 และการใช้ระบบแบบสองขั้นตอนที่ใช้เชื้อ *Rhodospirillum rubrum* ตามหลังจากการใช้กลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศที่อุณหภูมิ 30 °ซ และพีเอชเท่ากับ 7 จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนสะสมที่ผลิตได้เท่ากับ 67 มล./ก.ซีโอดี

Khanal และคณะ (2004) ศึกษาผลของพีเอชและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นต่อการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากการหมักน้ำเสียน้ำตาลซูโครสและน้ำเสียแป้งมัน โดยทำการทดลองที่พีเอช 4.5-6.5 พบว่า การทดลองที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.5 จะมีศักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 214 และ 125 มล./ก.ซีไอดีสำหรับน้ำเสียน้ำตาลซูโครสและน้ำเสียแป้งมัน ตามลำดับ โดยแสดงอัตราการผลิตก๊าซน้อยกว่าที่พีเอชอื่นแต่มีระยะเวลาการเกิดก๊าซนานที่สุด และเมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักซึ่งได้แก่ กรดไขมันระเหยจำพวก กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก และกรดบิวทริก พบว่า เมื่ออัตราส่วนระหว่างกรดอะซิติกและกรดบิวทริก (HAc/HBu) มีค่าลดลงจะทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเริ่มมีค่าคงที่และลดต่ำลงในที่สุด ซึ่งสันนิษฐานได้ว่ากรดบิวทริกเป็นตัวยับยั้งการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

Sangyoka และคณะ (2006) ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดยการทำงานร่วมกันของกลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศและเชื้อ *Rhodospirillum rubrum* โดยศึกษาถึงผลของพีเอช แหล่งของไนโตรเจน ตัวตั้งออกซิเจน การเขย่า และสภาวะของแสง ซึ่งในการทดลองกลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศจะทำหน้าที่ผลิตกรดอินทรีย์ และเชื้อ *Rhodospirillum rubrum* จะเปลี่ยนกรดอินทรีย์ให้เป็นไฮโดรเจน จากการทดลองพบว่าสามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงสุดเท่ากับ 343 มล./ก.ซีไอดี ที่พีเอชเท่ากับ 7 โดยใช้แอมโมเนียมฟอสเฟตเป็นแหล่งไนโตรเจน มีแบคทีเรียสายพันธุ์ *Enterobacter aerogenes* เป็นตัวตั้งออกซิเจน ภายใต้สภาวะที่มีการเขย่าและไม่มีแสง

สุภาภรณ์ ศุภวิทยานันท์ (2551) ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ชนิด ได้แก่ น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซีอิ๊วโกแลต และน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว โดยใช้กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงในถังปฏิกรณ์แบบกวนผสมหมุน และใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ไร้อากาศจากระบบยูเอเอสบีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 105 °ซ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อควบคุมให้มีจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตไฮโดรเจนเป็นหลัก จากการทดลองพบว่า น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังมีศักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด ด้วยการเดินระบบที่สภาวะพีเอชเท่ากับ 6 และอุณหภูมิ 50 °ซ โดยมีปริมาณไฮโดรเจนยิลด์ที่ผลิตได้เท่ากับ 32 มล./ก.ซีไอดี

2.4.2 กระบวนการหมักแบบสองขั้นตอน

Tao และคณะ (2007) ศึกษาการเพิ่มผลผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการผลิตไฮโดรเจนจากซูโครสด้วยกระบวนการหมักแบบสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและแบบใช้แสง พบว่ากระบวนการหมักแบบใช้แสงที่ใช้ *Rhodobacter sphaeroides* SH2C เป็นจุลินทรีย์ในระบบสามารถช่วยเพิ่มผลผลิตของไฮโดรเจนและลดปริมาณกรดไขมันระเหยที่เกิดจากปฏิกิริยาการหมักแบบไม่ใช้แสงได้ โดยปริมาณไฮโดรเจนสูงสุดที่ผลิตได้จากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงมีค่าเท่ากับ 3.67 โมลไฮโดรเจน/โมลซูโครส กรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นกรดบิวทริกและกรดอะซิติก และเมื่อนำมาดำเนินการต่อด้วยกระบวนการหมักแบบใช้แสงที่อุณหภูมิ 30 °C พีเอชเท่ากับ 7 และความเข้มแสง 4000 ลักซ์ พบว่า *Rhodobacter sphaeroides* SH2C จะสามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยให้กลายเป็นไฮโดรเจนได้ โดยปริมาณผลผลิตไฮโดรเจนรวมจะเพิ่มขึ้นเป็น 6.63 โมลไฮโดรเจน/โมลซูโครส ส่วนกรดไขมันระเหยหลังจากที่ผ่านกระบวนการหมักแบบสองขั้นตอนแล้วก็จะพบแต่กรดอะซิติก กรดไฟโพรออนิก แต่ไม่พบกรดบิวทริก

Chen และคณะ (2008) ศึกษาการใช้กระบวนการหมักแบบสองขั้นตอนต่อเนื่องแบบไม่ใช้แสงและแบบใช้แสงเพื่อเพิ่มปริมาณผลผลิตไฮโดรเจนจากซูโครสและลดค่าซีไอดีในน้ำที่ออกจากระบบ โดยในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงจะควบคุมโดยใช้ *Clostridium pasteurianum* CH_4 เป็นจุลินทรีย์ในระบบ สำหรับผลผลิตไฮโดรเจนสูงสุดที่ได้เท่ากับ 3.80 โมลไฮโดรเจน/โมลซูโครส และกรดไขมันระเหยที่พบในน้ำที่ออกจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงจะประกอบไปด้วย กรดบิวทริกและกรดอะซิติก ที่จะถูกใช้ต่อไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการหมักแบบใช้แสงที่ใช้ *Rhodospseudomonas palustris* WP3-5 เป็นจุลินทรีย์ในระบบ น้ำที่จะเข้าสู่กระบวนการหมักแบบใช้แสงจะถูกดำเนินการต่อเนื่องด้วยการใช้น้ำที่ออกจากกระบวนการหมักแบบใช้แสงที่มีระยะเวลาพักน้ำ (HRT) 96 ชั่วโมง กระบวนการหมักแบบใช้แสงจะถูกควบคุมที่อุณหภูมิ 32 °C และพีเอชเท่ากับ 7.1 ผลจากการผ่านกระบวนการหมักแบบใช้แสงจะทำให้ปริมาณผลผลิตไฮโดรเจนรวมจะเพิ่มขึ้นเป็น 10.02 โมลไฮโดรเจน/โมลซูโครส และมีประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดีได้ทั้งหมด 72 %

จากการศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. การผลิตไฮโดรเจนจากระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงด้วยกลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศจะสามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงสุดเมื่อควบคุมระบบที่อุณหภูมิสูง และพีเอชที่เป็นกรดเล็กน้อย
2. กระบวนการหมักแบบสองขั้นตอนที่มีการใช้กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงและตามด้วยกระบวนการหมักแบบใช้แสงจะสามารถเพิ่มปริมาณผลผลิตไฮโดรเจนได้มากกว่าการใช้กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงเพียงอย่างเดียว
3. กระบวนการหมักแบบสองขั้นตอนแบบใช้แสงและแบบไม่ใช้แสงมีประสิทธิภาพในการช่วยลดค่าซีไอดีที่เกิดขึ้นจากกรดไขมันระเหยชนิดต่างๆ ในระบบได้



ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

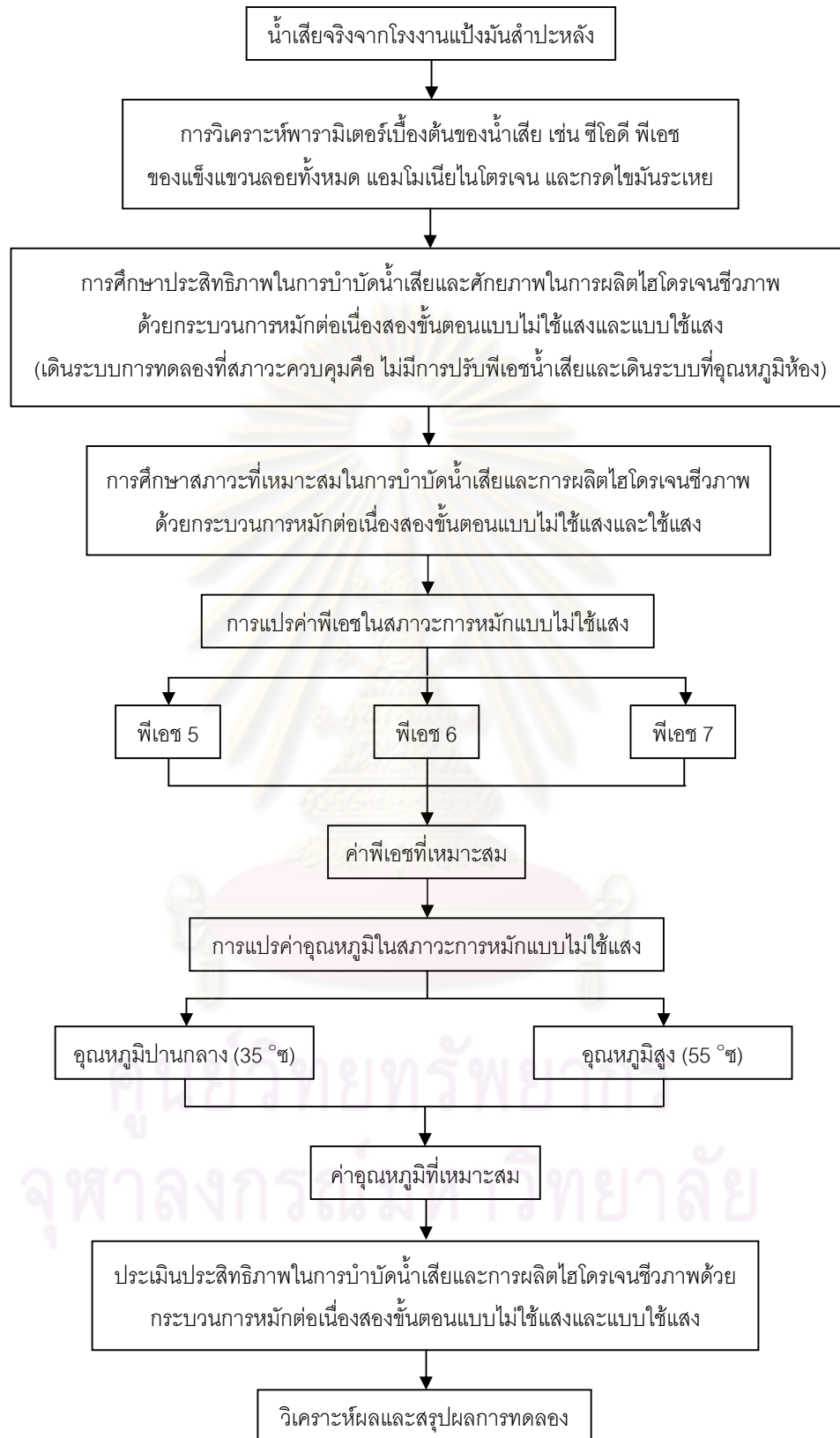
งานวิจัยนี้เป็นการทดลองแบบแบบทวิในระดับห้องปฏิบัติการ ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดค่าซีโอดีควบคู่ไปกับการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพของ น้ำเสียแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงและกระบวนการหมักแบบใช้แสง ที่ทำงานต่อเนื่องกัน โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

การทดลองส่วนที่ 1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อให้ทราบลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสีย ได้แก่ ซีโอดี พีเอช ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด แอมโมเนียไนโตรเจน และกรดไขมันระเหย และการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีและศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกจะเป็นกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง ส่วนขั้นตอนที่สองเป็นกระบวนการหมักแบบใช้แสง

การทดลองส่วนที่ 3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง โดยเป็นการศึกษาผลของการแปรค่าพีเอชและอุณหภูมิในขั้นตอนการหมักแบบไม่ใช้แสงต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีและการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพ ซึ่งสภาวะที่ทำการทดลอง ได้แก่ พีเอช 3 ค่า คือ 5 6 และ 7 และอุณหภูมิ 2 ระดับ คือ อุณหภูมิปานกลาง (35 °ซ) และอุณหภูมิสูง (55 °ซ)

โดยแผนผังสรุปขั้นตอนการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังสรุปขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 การเก็บตัวอย่างและการรักษาสภาพน้ำเสีย

น้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง บริษัทอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังบ้านโป่ง จำกัด จังหวัดราชบุรี โดยทำการเก็บตัวอย่างแบบจ้วง (Grab Sampling) จากจุดปล่อยน้ำเสียสุดท้ายของโรงงานก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย โดยบรรจุน้ำเสียในภาชนะสำหรับเก็บตัวอย่าง จากนั้นเก็บรักษาตัวอย่างโดยแช่เย็นในน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 4 °ซ ก่อนนำมาวิเคราะห์หองค์ประกอบเบื้องต้นของน้ำเสียทันทีภายใน 24 ชม. และทำการเติมกรดซัลฟูริกให้มีพีเอชต่ำกว่า 2 เพื่อยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียและคงสภาพน้ำเสียไม่ให้เปลี่ยนแปลงก่อนการทดลอง โดยน้ำเสียจะถูกเก็บรักษาไว้ในตู้แช่เย็นที่มีการปรับอุณหภูมิเท่ากับ 4 °ซ ตลอดเวลา

3.3 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปรต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ได้แก่ ตัวแปรอิสระ ตัวแปรควบคุม และตัวแปรตาม ดังตารางที่ 3.1 โดยการทดลองนี้จะศึกษาผลของตัวแปรอิสระ คือ พีเอชและอุณหภูมิ ต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงเท่านั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 สรุปตัวแปรทั้งหมดที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. พีเอช	- 5.6 และ 7
2. อุณหภูมิ	- 35 และ 55 °ซ
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<i>กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง</i>	
1. ปริมาตรถังปฏิกรณ์	- 3.5 ลิตร
2. ชนิดและองค์ประกอบของน้ำเสีย	- น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง
3. ปริมาณน้ำเสีย	- 2.7 ลิตร
4. หัวเชื้อเริ่มต้น	- หัวเชื้อจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ
5. ปริมาณหัวเชื้อเริ่มต้น	- ค่าของแข็งแขวนลอยประมาณ 23,000-25,000 มก./ล.
6. ซีไอดีน้ำเสียเข้า	- ประมาณ 5,000 มก./ล.
7. สภาวะในการทดลอง	- ไร้อากาศ
8. ปริมาณแสงสว่าง	- ไม่ได้รับแสง (อยู่ในที่มืด)
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
<i>กระบวนการหมักแบบใช้แสง</i>	
1. ปริมาตรถังปฏิกรณ์	- 3.5 ลิตร
2. ชนิดและองค์ประกอบของน้ำเสีย	- น้ำที่ออกจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง
3. ปริมาณน้ำเสีย	- ปริมาณน้ำที่ออกจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง
4. หัวเชื้อเริ่มต้น	- หัวเชื้อผสมของจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสง
5. ปริมาณหัวเชื้อเริ่มต้น	- ค่าของแข็งแขวนลอยประมาณ 1,000-1,500 มก./ล.
6. ซีไอดีน้ำเสียเข้า	- ซีไอดีน้ำที่ออกจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง
7. สภาวะในการทดลอง	- ไร้อากาศ
8. ปริมาณแสงสว่าง	- ความเข้มแสง 4,000 – 6,000 ลักซ์
ตัวแปรตาม	วิธีวิเคราะห์ / เครื่องมือวิเคราะห์
1. องค์ประกอบของน้ำเสีย ได้แก่ ซีไอดี พีเอช	- Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1992)
2. ปริมาณกรดไขมันระเหย (ในรูปอะซิติก)	- Titration method
3. ชนิดและปริมาณกรดไขมันระเหย	- Gas Chromatography
4. ปริมาณก๊าซชีวภาพรวม	- หลักการแทนที่น้ำในกระบอกตวงที่บรรจุน้ำที่มีพีเอชต่ำกว่า 2
5. องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ	- Gas Chromatography
6. ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน	- Gas Chromatography

3.4 เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

3.4.1 ชุดอุปกรณ์สำหรับกระบวนการหมัก

ถังปฏิกรณ์

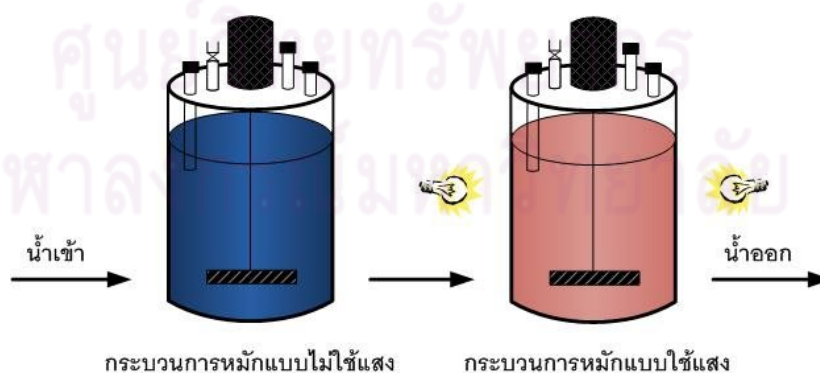
เป็นถังทรงกระบอกจำนวน 2 ถัง ทำจากอะคริลิกใสที่มีฝาปิดสนิทและมีแผ่นยางป้องกันการรั่วซึม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ซม. สูง 25 ซม. ปริมาตรความจุ 3.5 ลิตร ด้านบนของถังจะติดตั้งมอเตอร์เพื่อหมุนใบพัดสแตนเลสในการกวนน้ำเสีย โดยมีช่องเปิดด้านบนสำหรับใช้ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย เก็บตัวอย่างก๊าซ วัดปริมาตรก๊าซ และเป็นจุดปล่อยก๊าซ

อุปกรณ์เก็บก๊าซ

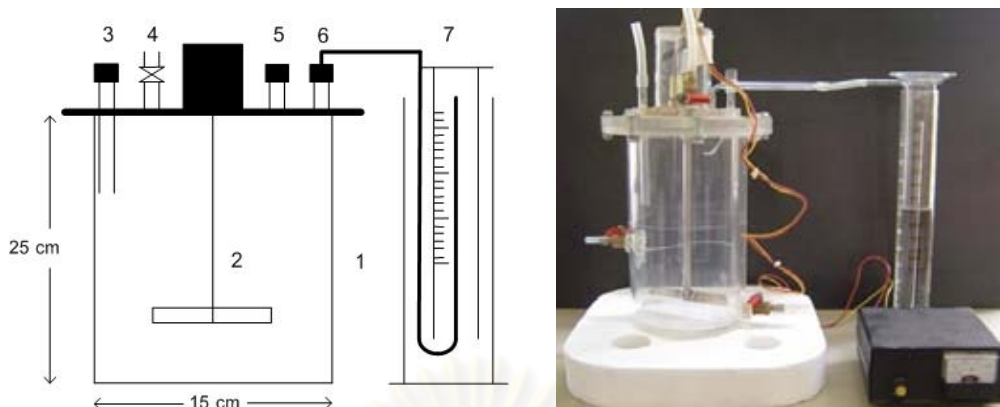
- การวัดปริมาตรก๊าซรวมจะใช้หลักการแทนที่น้ำในกระบอกตวงที่บรรจุด้วยน้ำที่มีการปรับพีเอชต่ำกว่า 2 เพื่อป้องกันการละลายน้ำของก๊าซต่างๆ ที่ออกจากถังปฏิกรณ์ โดยจดบันทึกปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นทุกวัน

- การเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อนำไปวิเคราะห์ชนิดและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพจะใช้เข็มสองปลาย เก็บตัวอย่างจากจุดเก็บตัวอย่างก๊าซและบรรจุในหลอดเก็บเลือดสุญญากาศ ก่อนส่งทำการวิเคราะห์ทันที

โดยลำดับการติดตั้งถังปฏิกรณ์และรายละเอียดการเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์สำหรับงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 โดยถังปฏิกรณ์ใบแรกจะเป็นชุดบำบัดด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง และใบที่สองจะเป็นชุดบำบัดแบบใช้แสง ที่เดินระบบต่อเนื่องกัน



รูปที่ 3.2 ลำดับการติดตั้งถังปฏิกรณ์สำหรับกระบวนการหมักสองขั้นตอน



รูปที่ 3.3 รายละเอียดการเชื่อมต่อชุดอุปกรณ์สำหรับถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการหมัก โดยประกอบด้วย 1. ถังปฏิกรณ์ 2. ไบโกลวน 3. จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย 4. จุดปล่อยก๊าซ 5. จุดเก็บตัวอย่างก๊าซ 6. จุดวัดปริมาตรก๊าซ และ 7. อุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซ

3.4.2 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ชุดเครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
2. เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
3. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
4. ตู้อบความร้อน (Oven)
5. ปั๊มดูดสูญญากาศ (Vacuum Pump) พร้อมชุดกรอง
6. กระจาดกรอง GF/C 0.45 ไมครอน เส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 ซม.
7. โถดูดความชื้น (Dessiccator) พร้อมสารดูดความชื้น
8. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water Bath)
9. หม้อนึ่งอัดความดัน (Autoclave)
10. เครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography)

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมไดโครเมต 0.1 นอร์มัล
2. สารละลายเฟอร์โรซีนอินดิเคเตอร์
3. สารละลายกรดซัลฟูริก
4. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.1 นอร์มัล

5. กรดซัลฟูริก
6. กรดเกลือ
7. สารละลายฟอสฟอริกแอซิด

3.5 วิธีการทดลอง

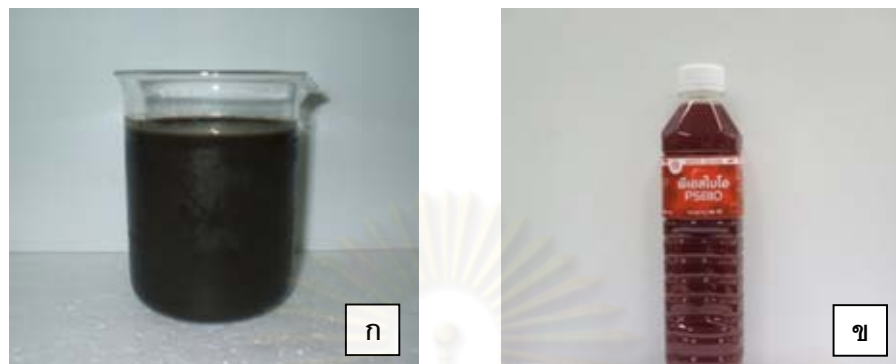
3.5.1 การเตรียมน้ำเสียแบ่งมันสำปะหลัง

น้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังที่เก็บตัวอย่างแบบจ้วงจากจุดปล่อยน้ำเสียสุดท้ายก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน และเก็บรักษาไว้ในตู้แช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C จะถูกนำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นของน้ำเสีย ได้แก่ ซีโอดี พีเอช ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด แอมโมเนียไนโตรเจน และกรดไขมันระเหย จากนั้นจะทำการกรองด้วยกระดาษกรองเพื่อแยกเอาของแข็งแขวนลอยออกและเจือจางน้ำเสียให้มีค่าซีโอดีเริ่มต้นประมาณ 5,000 มก./ล. ทำการปรับอัตราส่วน COD : N : P ให้เท่ากับ 150 : 1.1 : 0.2 และเติมสารละลายธาตุอาหารต่างๆ เพื่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Logan และคณะ, 2002) ปริมาตร 50 มล. ซึ่งประกอบไปด้วย KH_2PO_4 1,000 มก./ล. $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 100 มก./ล. NaCl 100 มก./ล. $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 10 มก./ล. $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 10 มก./ล. $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 15 มก./ล. $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 400 มก./ล. และ FeCl_2 2.78 มก./ล.

3.5.2 การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้เริ่มต้นเดินระบบกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงเป็นหัวเชื้อจากระบบยูเอเอสบีของบริษัท เสริมสุข จำกัด ที่นำมาเลี้ยงให้คุ้นชินกับน้ำเสียแบ่งมันสำปะหลังเป็นเวลา 3 เดือน โดยเริ่มต้นจากการใช้น้ำเสียที่มีค่าซีโอดีประมาณ 1,000 มก./ล. และเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าซีโอดีประมาณ 5,000 มก./ล. จากนั้นจึงนำหัวเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าวไปปรับสภาพด้วยแรงกลและความร้อน โดยทำการบ่มหยาบให้หัวเชื้อที่มีลักษณะเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์แตกออกแล้วนำไปให้ความร้อนด้วยหม้อนิ่งอัดความดัน (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 30 นาที ส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงจะเป็นหัวเชื้อผสมของจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสงยีสต์ฟอสโฟโบไอ จากบริษัท ไวท์เครน อะควาเรียม (ไทยแลนด์) จำกัด

โดยหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสง และใช้แสงแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบกระบวนการหมักสองขั้นตอน โดย (ก) หัวเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง (ข) หัวเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบใช้แสง

3.5.3 การดำเนินการทดลอง

กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง

เริ่มต้นเดินระบบด้วยการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการปรับสภาพแล้วปริมาณ 300 มล. และน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังที่ทำการเจือจางและเติมธาตุอาหารลงในถังปฏิกรณ์ จากนั้นปิดฝาถังและไล่อากาศภายในถังด้วยก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 15 นาที เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะไร้อากาศ จากนั้นเชื่อมต่อถังปฏิกรณ์เข้ากับอุปกรณ์เก็บก๊าซและควบคุมให้อยู่ภายใต้สภาวะการหมักแบบไม่ใช้แสงด้วยการคลุมพลาสติกสีดำตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง จะทำการทดลองโดยการแปรค่าพีเอชและอุณหภูมิในระบบ

- พีเอช

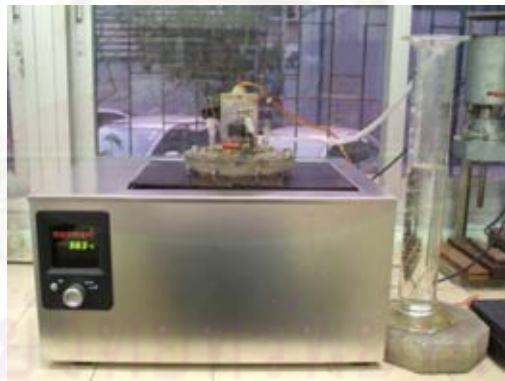
การทดลองหาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมจะดำเนินการโดยแปรค่าพีเอชในระบบแตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 5 6 และ 7 ทำการทดลองโดยปรับพีเอชภายในถังหมักด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 6 นอร์มัล เพื่อให้ได้ค่าพีเอชตามที่ต้องการ และเติมสารละลายบัฟเฟอร์เพื่อช่วยควบคุมค่าพีเอชในระบบตลอดการทดลอง

- อุณหภูมิ

การทดลองหาสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมจะดำเนินการโดยควบคุมอุณหภูมิในระหว่างการเดินระบบแตกต่างกัน 2 ระดับ คือ 35 และ 55 °ซ ทำการทดลองโดยแช่ชุดถังหมักลงในอ่างน้ำปรับอุณหภูมิที่มีการควบคุมอุณหภูมิตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.5 การควบคุมกระบวนการหมักให้อยู่ภายใต้สภาวะไม่ใช้แสงด้วยการคลุมพลาสติก
ดำตลอดเวลา

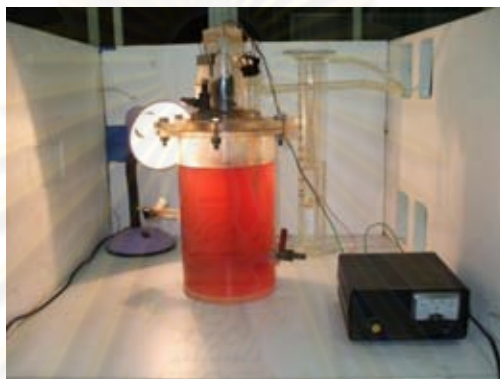


รูปที่ 3.6 การควบคุมอุณหภูมิในการเดินระบบด้วยอ่างน้ำปรับอุณหภูมิ

กระบวนการหมักแบบใช้แสง

น้ำทิ้งที่ออกจากถังปฏิกรณ์ที่เดินระบบภายใต้สภาวะการหมักแบบไม่ใช้แสงเมื่อสิ้นสุดการทดลองจะถูกตั้งทิ้งไว้ให้เกิดการแยกชั้น แล้วจึงกรองน้ำส่วนใสด้วยกระดาษกรองเพื่อให้ได้เป็นน้ำเสียเริ่มต้นสำหรับกระบวนการหมักแบบใช้แสง โดยน้ำเสียดังกล่าวจะนำมาวิเคราะห์ค่าซีไอดีและพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนเข้าระบบ

เติมหัวเชื้อผสมของจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสงปริมาณ 300 มล. และน้ำเสียส่วนใสที่ผ่านการกรองลงในถังปฏิกรณ์ จากนั้นทำการปรับพีเอชในถังหมักให้เท่ากับ 7 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 6 นอร์มัล ปิดฝาถังแล้วทำการไล่อากาศเพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะไร้อากาศ เชื่อมต่อดังปฏิกรณ์เข้ากับอุปกรณ์เก็บก๊าซเช่นเดียวกับกระบวนการหมักในขั้นตอนแรก โดยควบคุมกระบวนการหมักให้เกิดขึ้นภายใต้สภาวะมีแสงด้วยการใช้หลอดไฟส่องเพื่อให้แสงสว่างตลอดเวลาที่ความเข้มแสง 4,000 - 6,000 ลักซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การควบคุมกระบวนการหมักให้อยู่ภายใต้สภาวะมีแสงด้วยการใช้หลอดไฟส่องตลอดเวลา

3.5.4 การเก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อการวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

การเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากถังปฏิกรณ์เพื่อนำไปวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ทางคุณภาพน้ำ ดำเนินการโดยใช้กระบอกฉีดยาขนาด 50 มล. ดูดน้ำเสียส่วนใสจากช่องเปิดสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่อยู่บริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์ โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียหลังจากปิดการทำงานของไบโอกวนแล้วเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้หัวเชื้อจุลินทรีย์ตกตะกอน

3.5.5 การวัดปริมาณและการเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการเดินระบบการทดลองจะทำการตรวจวัดปริมาณที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน โดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำในกระบอกตวงที่บรรจุด้วยน้ำที่มีการปรับค่าพีเอชต่ำกว่า 2 โดยบันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันในรูปของปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมหรือปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด (Total gas) ที่มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

การเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพทำได้โดยการใช้เข็มสองปลายเสียบเข้ากับช่องสำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซบริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์ โดยปล่อยให้ก๊าซในถังหมักระบายออกสู่ครุแล้วจึงนำหลอดเก็บเลือดสูญญากาศเสียบเข้าที่ปลายเข็มอีกด้านหนึ่ง ทิ้งไว้จนก๊าซเข้าไปเต็มหลอดเก็บก๊าซจึงดึงหลอดเก็บก๊าซและเข็มสองปลายออก โดยต้องระวังไม่ให้เกิดการปนเปื้อนอากาศเข้าไปในหลอดเก็บก๊าซ จากนั้นจึงนำส่งตัวอย่างก๊าซชีวภาพเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีต่อไป

3.6 วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลอง

พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ในการวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำและก๊าซชีวภาพ โดยรายละเอียดของพารามิเตอร์ทั้งหมดที่ทำการวิเคราะห์ในช่วงระยะเวลาการเดินระบบทั้งในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงและแบบใช้แสงแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ จุดเก็บตัวอย่าง ความถี่ และวิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

ตัวอย่าง	พารามิเตอร์	จุดเก็บตัวอย่าง			ความถี่
		น้ำเข้า	น้ำในระบบ	ก๊าซ	
น้ำเสีย	1. ซีไอดี	✓	✓		ทุกวัน
	2. พีเอช			✓	ทุกวัน
	3. ปริมาณกรดไขมันระเหย			✓	ทุกวัน
ก๊าซชีวภาพ	1. ปริมาณก๊าซชีวภาพ			✓	ทุกวัน
	2. องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ			✓	ทุกวัน
	3. ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน			✓	ทุกวัน

3.6.1 การวิเคราะห์กรดไขมันระเหยด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี

การวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันระเหยด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี ทำได้โดยนำน้ำตัวอย่างที่จะทำการวิเคราะห์มากรองด้วยกระดาษกรอง GF/C 0.45 ไมครอน แล้วนำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้วปริมาตร 2 มล. ใส่ในขวดตัวอย่าง ทำการปรับสภาพด้วยกรดออกซาลิก (Oxalic Acid) ให้ได้ความเข้มข้นที่ 0.3 โมลาร์ จากนั้นปิดขวดตัวอย่างด้วยฝาขวดที่เป็นอลูมิเนียม ซึ่งชนิดของกรดไขมันระเหยที่จะทำการวิเคราะห์ คือ กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดโพรไพโอนิก ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$) และกรดบิวทิริก ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$) โดยรายละเอียดของอุปกรณ์และสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 รายละเอียดของอุปกรณ์และสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์กรดไขมันระเหย

อุปกรณ์และสภาวะในการวิเคราะห์	รายละเอียด
ข้อมูลเฉพาะของอุปกรณ์วิเคราะห์	- เครื่อง Gas Chromatography ยี่ห้อ AGILENT รุ่น 6890N - FID Detector
ข้อมูลเฉพาะของคอลัมน์	- ยี่ห้อ HP-INOWAX ชนิด Polyethylene Glycol - ความยาว 30 เมตร - เส้นผ่านศูนย์กลาง 320 ไมโครเมตร - ชั้นฟิล์มหนา 0.25 ไมโครเมตร
สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์*	- Carrier gas: Helium - Injector temperature: 260 °C - Temperature program set: 80-260 °C for 20 min - Detector : FID at 260 °C - Injection volume : 1 µl

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.6.2 การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี

การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในตัวอย่างก๊าซชีวภาพจะทำการส่งตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซ ณ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยรายละเอียดของอุปกรณ์และสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของอุปกรณ์และสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน

อุปกรณ์และสภาวะในการวิเคราะห์	รายละเอียด
ข้อมูลเฉพาะของอุปกรณ์วิเคราะห์	- เครื่อง Gas Chromatography MODEL TRACE GC ยี่ห้อ THERMO FINNIGAN - TCD Detector
ข้อมูลเฉพาะของคอลัมน์	- SHIN CARBON (2 m. x 1/8")
สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์*	- Carrier gas : Nitrogen flow rate 25ml/min - Injector temperature : 120 °C - Temperature program set 80-130 °C for 20 min - Detector : TCD at 150 °C - Injection volume : 1 ml

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนแรกเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังเพื่อให้ทราบลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสีย โดยทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ซีโอดี พีเอช ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด แอมโมเนียไนโตรเจน และกรดไขมันระเหย ซึ่งผลจากการวิเคราะห์จะนำมาใช้เป็นข้อมูลในการเตรียมน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง และการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะภายนอกและพารามิเตอร์เบื้องต้นต่างๆ ของหัวเชื้อ ได้แก่ พีเอช ซีโอดี และของแข็งระเหยได้

การทดลองส่วนที่สองเป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียแ่งมันสำปะหลังที่มีการกรองเอาของแข็งแขวนลอยบางส่วนออกและเจือจางให้มีค่าซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 5,000 มก./ล. เริ่มต้นกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงด้วยหัวเชื้อจุลินทรีย์ไร้อากาศจากระบบยูเอเอสพีของ บริษัท เสริมสุข จำกัด (โรงงานปทุมธานี) ที่นำมาปรับสภาพด้วยการปั่นหยابและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 105 °ซ เป็นเวลา 30 นาที โดยตลอดระยะเวลาการทดลองหมักแบบไม่ใช้แสงนี้จะไม่มีการปรับและควบคุมค่าพีเอชภายในระบบ จากนั้นเมื่อสิ้นสุดการทดลองน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงจะถูกนำมากรองด้วยกระดาษกรองและใช้น้ำเสียส่วนใสเป็นสารตั้งต้นในการเดินระบบด้วยกระบวนการหมักแบบใช้แสงด้วยหัวเชื้อผสมของจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสงยี่ห้อพีเอสไบโอของบริษัท ไร่ที่โครน อะควาเรียม (ไทยแลนด์) จำกัด โดยในขั้นตอนการหมักแบบใช้แสงนี้จะทำการควบคุมค่าพีเอชในระบบเท่ากับ 7 ตลอดการทดลอง

การทดลองส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง ทำการทดลองโดยแปรเปลี่ยนค่าพีเอชและอุณหภูมิในการเดินระบบการหมักแบบไม่ใช้แสง โดยผลการทดลองหาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมจะถูกนำไปใช้เป็นค่าพีเอชภายในระบบของการทดลองเพื่อหาสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งจะทำการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิภายในระบบให้แตกต่างกัน 2 ระดับ คือ อุณหภูมิปานกลาง (35 °ซ) และ อุณหภูมิสูง (55 °ซ) เพื่อหาสภาวะที่สามารถบำบัดน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังและผลิตไฮโดรเจนชีวภาพได้สูงสุด

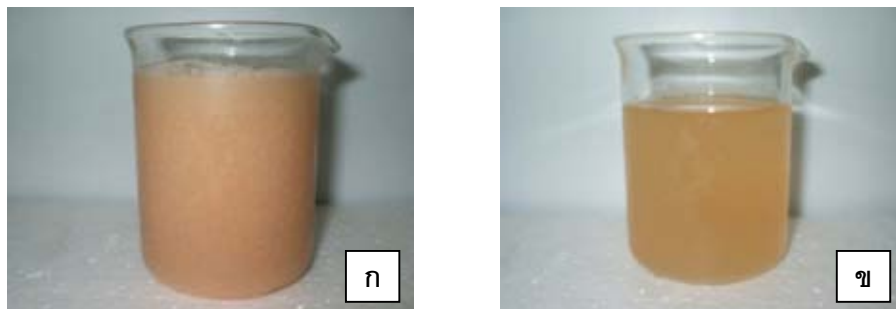
4.1 ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียและหัวเชื้อที่ใช้ในการศึกษา

4.1.1 ลักษณะสมบัติน้ำเสียแ่งมันสำปะหลัง

ตัวอย่างน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียจริงที่ทำการเก็บตัวอย่างจากท่อรวบรวมน้ำเสียก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดของบริษัท อุตสาหกรรมแ่งมันสำปะหลังบ้านโป่ง จำกัด จังหวัดราชบุรี แล้วนำมาศึกษาลักษณะสมบัติของน้ำเสียด้วยการวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นต่างๆ เป็นจำนวน 3 ครั้ง โดยลักษณะสมบัติต่างๆ ของน้ำเสียที่วิเคราะห์ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 ผลการทดลองพบว่า น้ำเสียจากกระบวนการผลิตแ่งมันสำปะหลังมีสีเหลืองขุ่นและมีกากตะกอนแป้งปนเปื้อนอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้น้ำเสียมีค่าความสกปรกในรูปสารอินทรีย์สูง โดยมีค่าซีโอดีประมาณ $20,281 \pm 781$ มก./ล. มีค่าพีเอชค่อนข้างต่ำหรือมีสภาพเป็นกรดเท่ากับ 5.6 และมีค่าของแข็งแขวนลอยประมาณ $10,991 \pm 226$ มก./ล. จึงต้องมีขั้นตอนการกรองแยกของแข็งแขวนลอยบางส่วนออกก่อนนำไปใช้ในการทดลอง ซึ่งลักษณะน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังก่อนและหลังขั้นตอนการกรองแสดงดังรูปที่ 4.1 โดยน้ำเสียที่ผ่านการกรองแล้วจะไม่มีของแข็งแขวนลอยที่เป็นตะกอนแป้งปนเปื้อน ทำให้น้ำเสียมีลักษณะใสขุ่นและมีสีจางลง

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์เบื้องต้นของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแ่งมันสำปะหลัง

พารามิเตอร์	หน่วย	ปริมาณ	
		ก่อนการกรอง	หลังการกรอง
ซีโอดีทั้งหมด	มก./ล.	$20,281 \pm 781$	$10,164 \pm 554$
พีเอช	-	5.60	5.60
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	มก./ล.	$10,991 \pm 226$	-
แอมโมเนียไนโตรเจน	มก./ล.	246 ± 11	234 ± 23
กรดไขมันระเหย	มก.อะซิติก/ล.	485 ± 43	469 ± 37



รูปที่ 4.1 ลักษณะน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังการกรองของแข็งแขวนลอยออก
โดย (ก) น้ำเสียแป้งมันสำปะหลังก่อนการกรอง
(ข) น้ำเสียแป้งมันสำปะหลังหลังการกรอง

4.1.2 ลักษณะสมบัติของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบ

กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเดินระบบการหมักแบบไม่ใช้แสง เป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดไร้อากาศแบบยูเอเอสพีของบริษัท เสริมสุข จำกัด (โรงงานปทุมธานี) ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ดกลม ผิวเรียบลื่น มีสีดำอมน้ำตาล แต่ละเม็ดมีขนาดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เหล่านี้จะถูกนำมาผ่านการปรับสภาพด้วยการบั่นหยาบและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 30 นาที (สุภาภรณ์ ศุภวิทยาภินันท์, 2551) เพื่อยับยั้งและทำลายจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนและคัดแยกให้เหลือเพียงกลุ่มจุลินทรีย์สร้างสปอร์ที่ทนความร้อนสูง เนื่องจากมีรายงานว่า แหล่งของจุลินทรีย์ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนภายใต้สภาวะไร้อากาศนั้น ต้องอาศัยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างสปอร์ที่ทนทานต่อสภาพแวดล้อมที่รุนแรง เช่น ทนต่อความร้อนสูง และสภาวะค่าพีเอชที่เป็นกรด-ด่างรุนแรง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ สภาวะดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang และคณะ (2008) ที่ทำการกำจัดจุลินทรีย์กลุ่มอื่นที่ไม่ต้องการด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 104 °C เป็นเวลา 15-120 นาที โดยรูปที่ 4.2 แสดงหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ใช้การวิจัยก่อนและหลังการปรับสภาพด้วยการบั่นหยาบและให้ความร้อน

ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์ทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพด้วยการให้ความร้อนพบว่า หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อนมีค่าซีโอดีและของแข็งระเหยได้ค่อนข้างสูง โดยมีค่าประมาณ 69,700 และ 63,300 มก./ล. ตามลำดับ ส่วนหัวเชื้อที่ผ่านการให้ความร้อนแล้วนั้น พบว่า หัวเชื้อจุลินทรีย์มีค่าซีโอดีและของแข็งระเหยได้ลดต่ำลงเล็กน้อย โดยมีค่าลดลงเหลือประมาณ 61,200 และ 55,000 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของหัวเชื้อจุลินทรีย์แสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 หัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ใช้การวิจัยก่อนและหลังการปรับสภาพด้วยการบ่มหมักและให้ความร้อน โดย (ก) หัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนการปรับสภาพ (ข) หัวเชื้อจุลินทรีย์หลังการปรับสภาพ

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ต่างๆ ของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	หน่วย	ผลการวิเคราะห์		
		หัวเชื้อการหมักแบบไม่ใช้แสง		หัวเชื้อการหมักแบบใช้แสง
		ก่อนให้ความร้อน	หลังให้ความร้อน	
พีไอเอช	-	7.60	8.30	8.00
ซีโอดี	มก./ล.	69,700	61,200	3,800
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	มก./ล.	-	-	1,000
ของแข็งระเหยได้	มก./ล.	63,300	55,000	4,300

กระบวนการหมักแบบใช้แสง

หัวเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบใช้แสงเป็นหัวเชื้อผสมของจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสงยีสต์ไฟเอสไปโอ จากบริษัท ไวท์เครน อะควาเรียม (ไทยแลนด์) จำกัด ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งผู้ผลิตระบุว่า เป็นจุลินทรีย์ชนิดไร้อากาศที่วางจำหน่ายเพื่อใช้สำหรับควบคุมคุณภาพน้ำในบ่อเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยมีคุณสมบัติในการย่อยสลายสารอินทรีย์จากการขับถ่ายของเสียของสัตว์น้ำ และลดปริมาณแอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรทในน้ำได้ ซึ่งจากลักษณะของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่าพบว่า เป็นของเหลวใส มีสีแดงเนื่องจากตะกอนที่แขวนลอยอยู่ ซึ่งสีแดงของหัวเชื้อจุลินทรีย์คาดว่าน่าจะเกิดจากการเจริญของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมกัมมะถัน ที่สามารถเจริญได้ดีภายใต้สภาวะแบบเฮเทอโรโทรฟที่ไม่มีอากาศและมีแสง ตัวอย่างของแบคทีเรียกลุ่มนี้ได้แก่ แบคทีเรียสกุล *Rhodospirillum*, *Rhodobacter*, *Rhodopseudomonas* และ *Rhodocyclus* ซึ่งนิยมนำมาใช้ในการบำบัดของเสียต่างๆ (สุรอรรด ศุภจัตุรัส, 2548) โดยมีรายงานการวิจัยของ Sawada และคณะ (1977) ที่นำแบคทีเรียสังเคราะห์แสง *R. Capsulata* มาบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานฆ่าสัตว์ในสภาพไร้อากาศและมีแสง พบว่าสามารถลดค่าบีโอดีจาก 3,030 มก./ล. เหลือ 140 มก./ล. นอกจากนี้แบคทีเรียชนิดสังเคราะห์แสงยังสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ เช่น คาร์โบไฮเดรต กรดไขมัน ระยะเวลา เพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารภายในเซลล์ โดยจะใช้สารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนและส่งต่อไปยังเอนไซม์ไนโตรจีเนสด้วยเฟอเรดอกซิน (Ferredoxin) จากนั้นเอนไซม์ไนโตรจีเนสจะทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นเพื่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน โดยอาศัยพลังงานภายนอกเป็นตัวกระตุ้น (Das และ Veziroglu, 2001)

ผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสงพบว่า มีค่าพีเอชเท่ากับ 8 ซึ่งมีลักษณะเป็นต่างเล็กน้อย และมีค่าของแข็งระเหยได้ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง เนื่องจากหัวเชื้อจุลินทรีย์มีลักษณะเป็นน้ำใสและค่อนข้างเจือจาง โดยผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของหัวเชื้อจุลินทรีย์แสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.3 หัวเชื้อผสมของจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสงเริ่มต้นที่ใช้ในงานวิจัย

4.2 ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง

การทดลองในส่วนนี้เป็นการเดินระบบการหมักน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง โดยให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดี ปริมาณกรดไขมันระเหย ปริมาณก๊าซชีวภาพ สัดส่วนองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ และปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น รวมถึงการวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพในระบบ

4.2.1 การเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำในระหว่างการเดินระบบ

ซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี

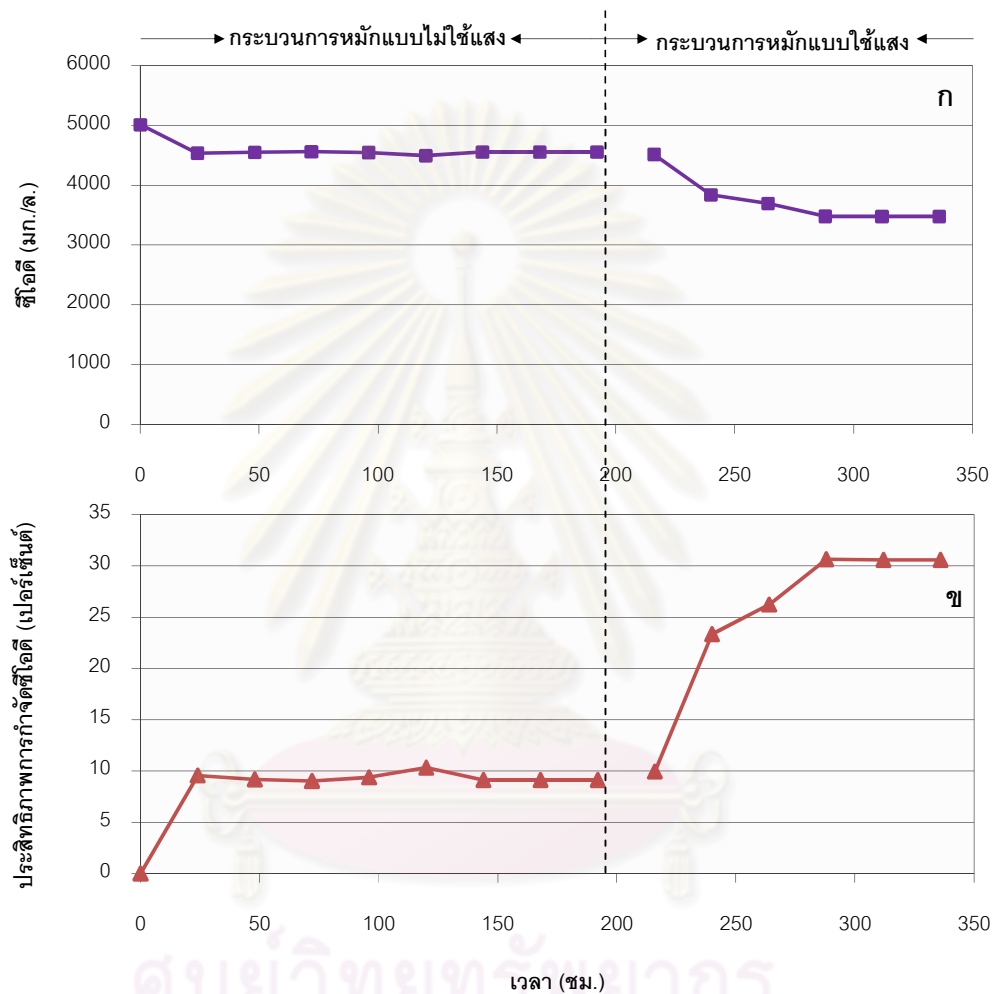
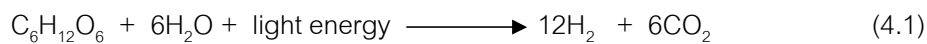
น้ำเสียแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการกรองของแข็งแขวนลอยออกแล้วจะถูกนำมาเจือจางให้มีค่าซีไอดีเริ่มต้นประมาณ 5,000 มก./ล. ก่อนเข้าสู่การหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง โดยการวิเคราะห์ค่าซีไอดีในน้ำออกจากการหมักแต่ละขั้นตอนจะใช้น้ำเสียที่ถูกกรองเอาตะกอนจุลินทรีย์ออกก่อนด้วยกระดาษกรอง จึงทำให้ค่าซีไอดีในการทดลองหมายถึงค่าซีไอดีกรอง โดยผลการทดลองรูปที่ 4.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีจากกระบวนการหมักทั้งสองขั้นตอน พบว่า กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงสามารถบำบัดค่าซีไอดีของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังให้เหลือ 4,496 มก./ล. โดยคิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดซีไอดีเท่ากับ 10.31% และหลังจากผ่านน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการหมักแบบใช้แสงแล้วพบว่า ซีไอดี

ของน้ำเสียมีค่าลดลงเหลือ 3,477 มก./ล. จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีรวมสองขั้นตอนมีค่าเท่ากับ 33.64 %

จากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่ากระบวนการหมักที่เกิดขึ้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีน้อยมาก ซึ่งเป็นผลมาจากหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนให้เหลือเพียงจุลินทรีย์กลุ่มสร้างสปอร์ที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้เท่านั้น และประกอบกับน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังเป็นน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ซับซ้อน อาจทำให้จุลินทรีย์ใช้เป็นสารอาหารในการเจริญเติบโตได้ยาก อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังมีความเหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพ (Reungsang และคณะ, 2004) โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นการย่อยสลายแบบไร้อากาศผ่านขั้นตอนไฮโดรไลซิสและการสร้างกรด ซึ่งคาร์โบไฮเดรตจะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำตาล และน้ำตาลที่เกิดขึ้นจะถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตกรดไขมันระเหยและก๊าซไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาชีวเคมีในขั้นตอนการสร้างกรด (มันลิน ตันจุลเวศม์, 2542) กระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์น้อยมาก นั่นคือ ลดลงประมาณ 24% ในรูปของซีโอดี โดยซีโอดีที่หายไปนั้นจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นกรดไขมันระเหยและไฮโดรเจน (Metcalf และ Eddy, 2004) ทำให้น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการหมักยังมีสารอินทรีย์คงเหลืออยู่ในปริมาณสูงและเพียงพอที่จะใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการอื่นๆ ต่อไป ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Oh และ Logan (2005) ที่รายงานว่าน้ำทิ้งจากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหารจะยังคงมีปริมาณสารอินทรีย์เหลืออยู่ถึงประมาณ 80-90% ซึ่งสามารถนำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะใบเดียวได้

สำหรับในกระบวนการหมักแบบใช้แสงพบว่า มีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังที่ออกจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงได้ ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของแบคทีเรียชนิดสังเคราะห์แสงที่ใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ โดยแบคทีเรียชนิดสังเคราะห์แสงนี้จะสามารถใช้สารอินทรีย์ในน้ำเสียเพื่อเป็นแหล่งอาหารภายในเซลล์ และใช้แสงเป็นแหล่งพลังงานเพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายดังสมการที่ 4.1 ทำให้น้ำเสียมีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งผลที่เกิดขึ้นเป็นไปตามรายงานการวิจัยที่พบว่า แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมกำมะถันสามารถย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนได้ จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสีย โดยจะช่วยลดค่าซีโอดีในน้ำเสียได้ถึง 20-99% นอกจากนี้ยังช่วยลดแอมโมเนียและไนเตรตที่เป็นปัญหาในการบำบัดน้ำเสียได้อีกด้วย (สุรอรทด ศุภจตุรัส, 2548) จากผลการทดลองในกระบวนการหมักแบบใช้แสงที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของจากรวรรณ (2532) ที่รายงานว่า แบคทีเรียชนิดสังเคราะห์แสงสามารถบำบัดน้ำทิ้งจาก

โรงงานแป่งมันสำปะหลังได้โดยมีประสิทธิภาพในการลดค่าซีไอดีในน้ำเสียได้มากถึง 94.4% เมื่อใช้แบคทีเรียเป็นหัวเชื้อในปริมาณ 10%



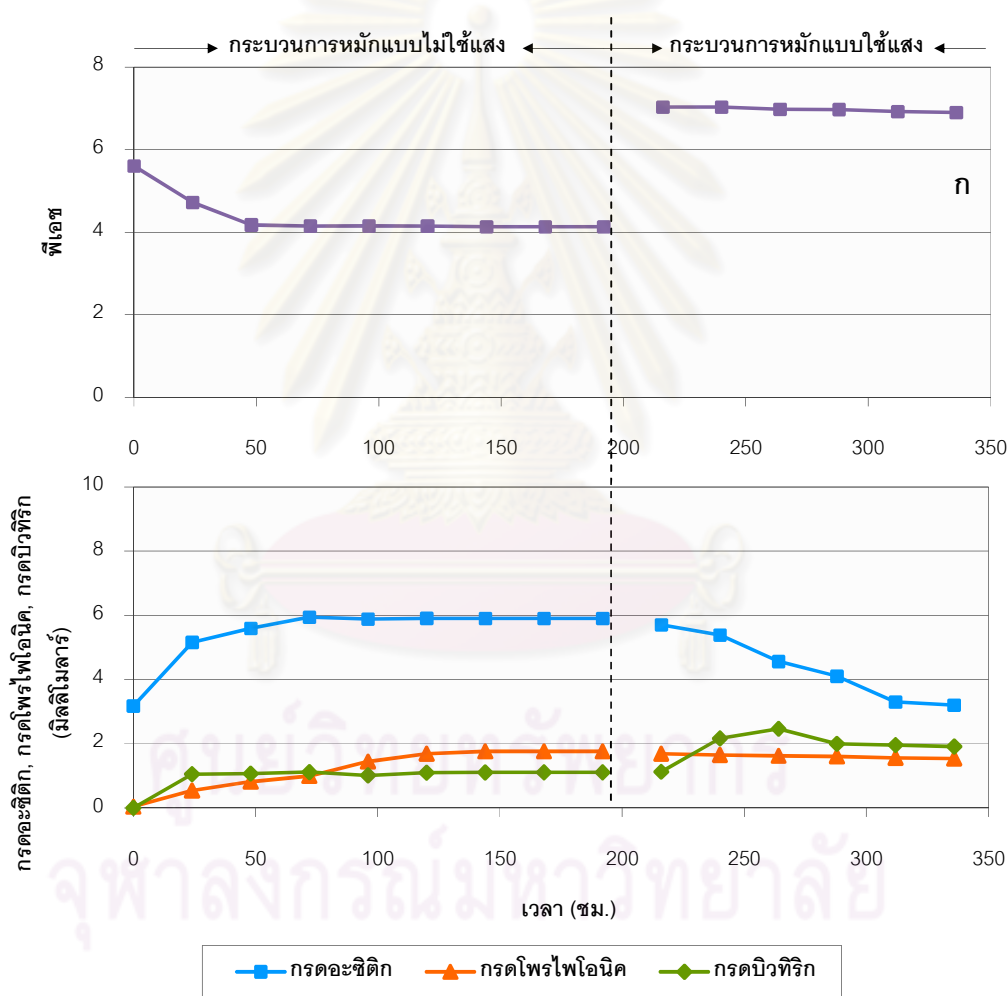
รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีจากกระบวนการหมักสองขั้นตอน โดย (ก) ค่าซีไอดี (ข) ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี

พีเอชและปริมาณกรดไขมันระเหย

กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงเป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียชนิดสร้างกรด โดยปฏิกิริยาการย่อยสลายจะทำให้เกิดกรดไขมันระเหยและก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในภายในระบบ ซึ่งชนิดของกรดไขมันระเหยจะประกอบไปด้วย กรดอะซิติก กรดไพรูโพนิก และกรดบิวทิริก เป็นต้น จากรูปที่ 4.5 พบว่า การหมักแบบไม่ใช้แสงจะทำให้พีเอชของระบบมีค่าลดต่ำลง โดยลดจากพีเอช 5.6 ซึ่งเป็นพีเอชแรกเข้าของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังไปอยู่ที่พีเอชประมาณ 4 และเกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยภายในระบบ คือ กรดอะซิติกและกรดบิวทิริกจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นจากช่วงเวลาเริ่มต้นเดินระบบไปจนถึงเวลาประมาณ 72 และ 20 ชม. แล้วหลังจากนั้นกรดไขมันระเหยทั้งสองชนิดจะเข้าสู่สภาวะคงตัว ส่วนกรดไพรูโพนิกนั้นจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นตลอดระยะเวลาการทดลอง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชและปริมาณกรดไขมันระเหยดังกล่าวเป็นผลเนื่องมาจากการสะสมตัวที่มากขึ้นของไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาชีวเคมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นกรดไขมันระเหย จึงมีผลทำให้เกิดสภาวะความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนสูงในระบบ โดยความดันพาร์เซียลไฮโดรเจนที่สูงนี้จะส่งผลต่อการทำงานของแบคทีเรียสร้างกรดในขั้นตอนการสร้างกรดไขมันระเหย คือ แบคทีเรียจะปลดปล่อย H^+ ออกจาก NADH โดยการเปลี่ยนกรดไพรูวิกให้ไปเป็นกรดไพรูโพนิก นอกจากนี้ยังส่งผลยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียสร้างอะซิเตทในขั้นตอนการสร้างกรดอะซิติก ทำให้ไม่สามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม ซึ่งได้แก่ กรดไพรูโพนิก และกรดบิวทิริก ไปเป็นกรดอะซิติกได้จนเกิดการสะสมตัวอยู่ภายในระบบ จึงส่งผลให้พีเอชของระบบมีค่าต่ำลงจนอยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและการผลิตก๊าซชีวภาพอีกต่อไป (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542) ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ballongue และคณะ (1987) ที่รายงานว่าการสะสมตัวของกรดไขมันระเหยปริมาณมากจนทำให้ภายในระบบมีค่าพีเอชต่ำกว่า 4.5 นั้น จะทำให้กระบวนการสร้างกรดที่มีการผลิตกรดอะซิติกเปลี่ยนไปสร้างผลิตภัณฑ์อื่นๆ แทน เช่น กรดบิวทิริก หรือเอทานอล ซึ่งจะส่งผลยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีรายงานอีกว่าการเพิ่มขึ้นของความดันพาร์เซียลไฮโดรเจนในระบบยังเป็นสาเหตุหนึ่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนจากการสร้างก๊าซไฮโดรเจนและกรดไขมันระเหยไปเป็นการสร้างเอทานอลในกระบวนการสร้างกรด ซึ่งมีผลทำให้การผลิตก๊าซชีวภาพของจุลินทรีย์มีปริมาณลดลง (Lay, 2000)

หลังจากนั้นจึงเข้าสู่ขั้นตอนของการหมักแบบใช้แสง ซึ่งจะมีการควบคุมค่าพีเอชภายในระบบให้อยู่ที่ประมาณ 7 ตลอดการทดลอง ผลการทดลองพบว่า ปริมาณกรดไขมันระเหยมีการเปลี่ยนแปลงไป คือ กรดอะซิติกและกรดไพรูโพนิกจะมีปริมาณลดลง ส่วนกรดบิวทิริกมีปริมาณเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากช่วงเวลาเริ่มเดินระบบไปจนถึงเวลาประมาณ 48 ชั่วโมง แล้วจากนั้น

จึงมีปริมาณลดลงแล้วเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยปริมาณกรดไขมันระเหยที่ลดลงไปภายในระบบเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสงที่สามารถใช้กรดไขมันระเหยไปเป็นแหล่งคาร์บอนและเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (Das และ Veziroglu, 2001) ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Su และคณะ (2009) ที่ศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงร่วมกับแบบใช้แสง โดยพบว่า กรดไขมันระเหยในน้ำทิ้งที่ออกจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดอะซิติกและกรดบิวทิริก จะถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการหมักแบบใช้แสง จึงทำให้ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำทิ้งมีปริมาณลดลง



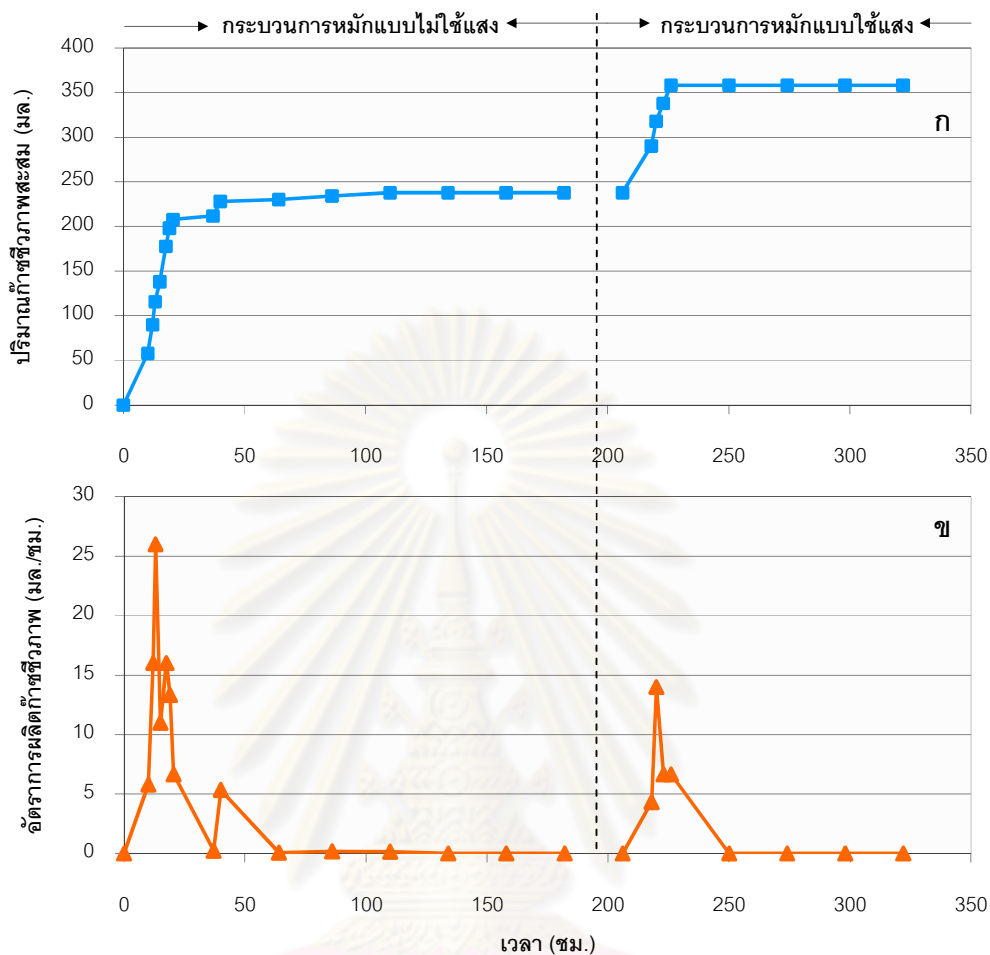
รูปที่ 4.5 ค่าพีเอชและปริมาณกรดไขมันระเหยจากกระบวนการหมักสองขั้นตอน โดย (ก) พีเอช (ข) ปริมาณกรดไขมันระเหย

4.2.2 ก๊าซชีวภาพและการเปลี่ยนแปลงในระหว่างการเดินระบบ

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงแสดงดังรูปที่ 4.6 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการผลิตก๊าซชีวภาพในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงจะเริ่มขึ้นหลังการเดินระบบเป็นเวลา 10 ชม. โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 238 มล. ภายในช่วงเวลาประมาณ 110 ชม. ส่วนอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นเดินระบบไปจนถึงเวลาประมาณ 20 ชม. จากนั้นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งไม่มีการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นอีกในระบบ โดยอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดมีค่าเท่ากับ 26 มล./ชม. ที่เวลาประมาณ 13 ชม. ซึ่งผลที่ได้มีความแตกต่างกับงานวิจัยของ สุภาภรณ์ ศุภวิทยานันท์ (2551) ที่รายงานว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดจากการหมักไร้อากาศแบบไม่ใช้แสงของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังและหัวเชื้อจุลินทรีย์ไร้อากาศในระบบปริมาณ 30% โดยปริมาตรมีค่าเท่ากับ 293 มล. ในช่วงชั่วโมงที่ 28 ซึ่งผลที่เกิดขึ้นอาจเนื่องมาจากปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์ในระบบที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ปริมาตร 300 มล. หรือคิดเป็นประมาณ 10 % โดยปริมาตรในระบบ จึงทำให้มีความสามารถในผลิตก๊าซชีวภาพได้น้อยกว่าและมีระยะเวลาการเพิ่มสูงสุดของก๊าซชีวภาพที่ช้ากว่าค่อนข้างมาก

ส่วนในขั้นตอนการหมักแบบใช้แสงการผลิตก๊าซชีวภาพจะเริ่มเกิดขึ้นที่เวลาใกล้เคียงกับการหมักแบบไม่ใช้แสง คือ ประมาณ 12 ชม. แต่จะมีระยะเวลาในการเกิดก๊าซชีวภาพสั้นกว่าและมีปริมาณก๊าซชีวภาพน้อยกว่า โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 120 มล. ภายในเวลาประมาณ 20 ชม. และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 14 มล./ชม. ที่เวลาประมาณ 28 ชม. ซึ่งหลังจากการหมักแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงแล้วพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมรวมจากทั้งสองขั้นตอนจะมีค่าเท่ากับ 358 มล. จากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่า ก๊าซชีวภาพที่ถูกผลิตขึ้นจากกระบวนการหมักแบบใช้แสงมีปริมาณน้อย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้เริ่มต้นเดินระบบเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์แบบผสมที่เจือจางและมีความเข้มข้นต่ำ แต่สารอินทรีย์และกรดไขมันระเหยที่เข้าระบบมีปริมาณสูง จึงทำให้จุลินทรีย์ที่ยังไม่ได้มีการปรับตัวให้คุ้นชินกับน้ำเสียไม่สามารถเจริญเติบโตได้ นอกจากนี้ยังเป็นผลจากสภาพแวดล้อมอื่นๆ ที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เช่น อุณหภูมิที่สูงเกินไปเนื่องจากความร้อนจากแสงไฟที่ส่องให้กับถังปฏิกรณ์ หรือองค์ประกอบที่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ เป็นต้น



รูปที่ 4.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักสองขั้นตอนโดย (ก) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ข) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงพบว่า ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมักทั้งสองขั้นตอนมีองค์ประกอบของก๊าซไม่แตกต่างกัน โดยจะประกอบไปด้วย ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซชนิดอื่นๆ ซึ่งก๊าซชนิดอื่นๆ ที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซยังตรวจไม่พบก๊าซมีเทนในตัวอย่างก๊าซชีวภาพจากระบบทั้งภายใต้สภาวะการหมักแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง จึงสามารถยืนยันได้ว่าการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงด้วยความร้อนสามารถยับยั้งและทำลายจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนได้ ซึ่งสัดส่วนของ

องค์ประกอบก๊าซชีวภาพในตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่ทำการเก็บ ณ ช่วงเวลาต่างกันจะมีสัดส่วนที่แตกต่างกันเล็กน้อย จึงสามารถคิดเป็นค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพแต่ละชนิดได้ดังตารางที่ 4.3 โดยในการหมักแบบไม่ใช้แสงจะพบก๊าซไฮโดรเจนในระบบประมาณ 33.65 % และพบก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซอื่นๆ ประมาณ 3.3 และ 64.70 % ตามลำดับ ส่วนในกระบวนการหมักแบบใช้แสง สัดส่วนปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆ ในระบบมีความคล้ายคลึงกับในการหมักแบบไม่ใช้แสงโดยมีค่าเท่ากับ 31.97 2.4 และ 66.10 % ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองในกระบวนการหมักทั้งสองขั้นตอนจะเห็นได้ว่า สัดส่วนของก๊าซอื่นๆ ในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพจะมีปริมาณมากกว่าก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสัดส่วนปริมาณที่มากนี้อาจเกิดจากในระบบมีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้นจากปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน (Sulfate reduction) เพราะน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังก่อนที่จะนำมาใช้ในการทดลองจะมีการเติมกรดซัลฟูริกลงไปเพื่อรักษาสภาพน้ำเสีย หรืออาจเกิดจากก๊าซอาร์กอนที่ถูกใช้เพื่อไล่อากาศภายในถังปฏิกรณ์ก่อนเริ่มเดินระบบ

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยจากกระบวนการหมักสองขั้นตอน

กระบวนการหมัก	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (%)		
	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ก๊าซอื่นๆ
ไม่ใช้แสง	33.65	3.30	64.70
ใช้แสง	31.97	2.40	66.10

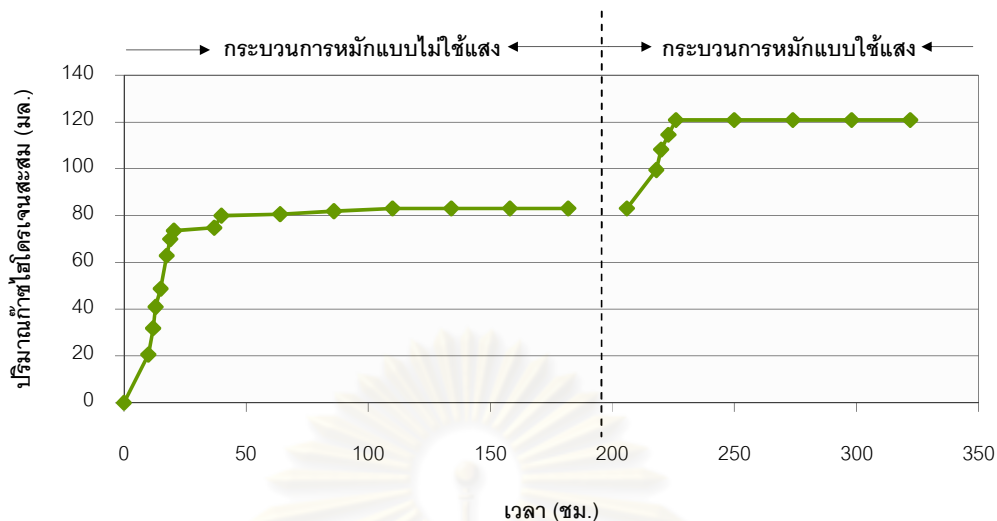
ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมและการวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมจากการหมักน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงแสดงได้ดังรูปที่ 4.7 โดยพบว่า กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนสะสมได้เท่ากับ 83 มล. ซึ่งการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในระบบจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลาประมาณ 20 ชม. หลังจากนั้นจึงเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยแล้วเข้าสู่สภาวะคงตัวไป ส่วนในขั้นตอนของการหมักแบบใช้แสง ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมมีค่าเท่ากับ 38 มล. โดยการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะคล้ายคลึงกับในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง คือ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 20 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงไม่มีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นอีกในระบบ

จากผลการทดลองพบว่า การผลิตก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากกลไกการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดที่สามารถใช้สารอินทรีย์ในน้ำเสียเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของสุภาภรณ์ ศุภวิทยาภินันท์ (2551) ที่รายงานว่า การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักไร้อากาศแบบไม่ใช้แสงจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใน 24 ชั่วโมงแรกหลังจากเดินระบบและจากนั้นการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว

การเดินระบบด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมภายในระบบไปจนไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนชีวภาพที่ผลิตได้ลดลง โดยปริมาณไฮโดรเจนชีวภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างในการเดินระบบ ได้แก่ ค่าพีเอช อุณหภูมิ ความดันพาร์เชียลไฮโดรเจน และปริมาณกรดไขมันระเหย ซึ่งความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนและปริมาณกรดไขมันระเหยเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพของจุลินทรีย์ โดยความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนที่สูงกว่า 10^{-3} และ 10^{-4} บรรยากาศในระบบจะส่งผลให้เกิดการสะสมตัวของกรดโพสไฟฟอนิกและกรดบิวทริก จนไปยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพ (มันลิน ตันทูลเวศม์, 2542) ซึ่งจากการสังเกตปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงกรดไขมันระเหยภายในระบบในรอบที่ 4.5 จะพบว่า มีความสอดคล้องกัน คือ ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาที่ปริมาณกรดอะซิติกและกรดบิวทริกเพิ่มสูงขึ้นในระบบ แต่หลังจากที่กรดไขมันระเหยทั้งสองชนิดเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วมีการเพิ่มสูงขึ้นของกรดโพสไฟฟอนิก ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้นอีกเพียงเล็กน้อยไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามทฤษฎีที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวนั้นเกิดจากความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนและปริมาณกรดไขมันระเหยที่สูงเกินไปในระบบ

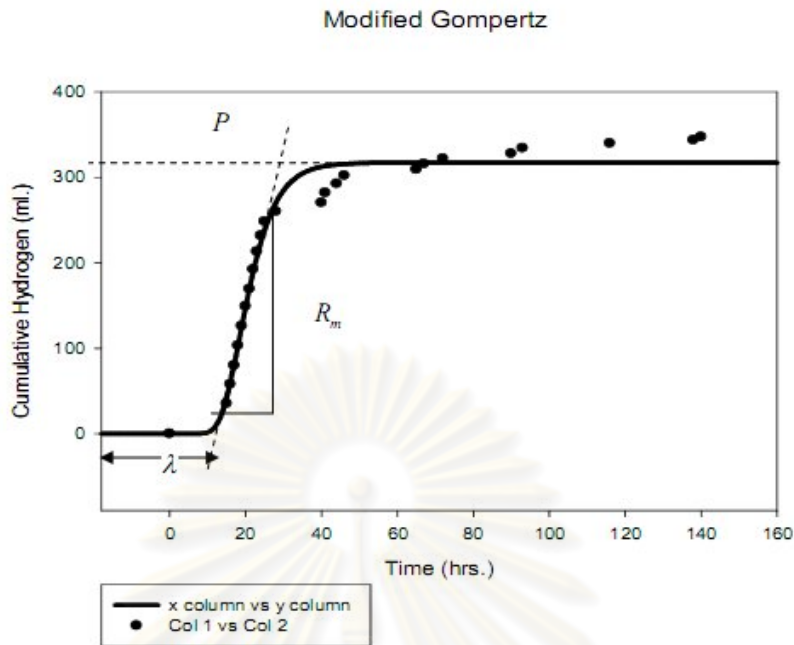
ส่วนในขั้นตอนการหมักแบบใช้แสง ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีปริมาณน้อยและหมดไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งผลที่ได้อาจเนื่องมาจากหัวเชื้อจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสงที่ใช้เป็นหัวเชื้อแบบผสมที่มีความเข้มข้นต่ำ จึงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพลดลง นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากสภาพแวดล้อมอื่นๆ ที่ไม่เหมาะสมต่อการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพของจุลินทรีย์ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้นในหัวข้อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่า น้ำทิ้งที่ออกจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงสามารถนำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพได้ โดยหัวเชื้อจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสงที่ใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์สายพันธุ์บริสุทธิ์ เช่น *Rhodospseudomonas palustris* (Su และคณะ, 2009)



รูปที่ 4.7 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมจากกระบวนการหมักสองขั้นตอน

การวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ของการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยจุลินทรีย์สามารถทำได้จากการเปรียบเทียบข้อมูลปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นต่อเวลากับสมการ Modifield Gompertz ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดโดยใช้โปรแกรม Sigmaplot 10 แล้วจึงนำไปสร้างเป็นกราฟสมการเพื่อหาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุด (Maximum cumulative H_2 production) อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด (Maximum H_2 production rate) จากความชันของกราฟ และระยะเวลาเกิดก๊าซเริ่มต้น (Lag time) ได้จากจุดตัดแกน X โดยกราฟดังกล่าวแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 จากนั้นจึงนำอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดมาเทียบกับปริมาณน้ำเสียแบ่งมันสำปะหลังที่เข้าระบบเพื่อหาอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสีย

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากกราฟที่สร้างจากสมการ Modifield Gompertz และอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสีย แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงจะมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดเท่ากับ 81 มล. มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 4.33 มล./ชม. มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสียเท่ากับ 1.44 มล./ล.-ชม. โดยปริมาณชีโอดีที่เข้าระบบเท่ากับ 15.04 กรัม และมีระยะเวลาในการเกิดก๊าซเริ่มต้นเท่ากับ 11.57 ชม. ส่วนในขั้นตอนของการหมักแบบใช้แสง พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จะมีค่าน้อยกว่าในการหมักแบบไม่ใช้แสง โดยมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดเท่ากับ 38 มล. มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 2.87 มล./ชม. มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสียเท่ากับ 1.15 มล./ล.-ชม. โดยปริมาณชีโอดีที่เข้าระบบเท่ากับ 13.50 กรัม และมีระยะเวลาในการเกิดก๊าซเริ่มต้นเท่ากับ 11.51 ชม.



รูปที่ 4.8 ตัวอย่างกราฟที่สร้างจากสมการ Modified Gompertz

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากกราฟสมการ Modified Gompertz ในกระบวนการหมักสองขั้นตอน

กระบวนการหมัก	พารามิเตอร์			
	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุด, P (มล.)	อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด, R_m (มล./ชม.)	อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสีย (มล./ล.-ชม.)	ระยะเวลาเกิดก๊าซเริ่มต้น, λ (ชม.)
	ไม่ใช้แสง	81	4.33	1.44
ใช้แสง	38	2.87	1.15	11.51

สำหรับปริมาณไฮโดรเจนยิลด์ (Hydrogen yield) ในกระบวนการหมักแต่ละขั้นตอนสามารถคำนวณได้จากปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นในระบบต่อจำนวนกรัมซีโอดีของน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังที่เข้าระบบ ผลการทดลองปริมาณไฮโดรเจนยิลด์ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงมีค่ามากกว่ากระบวนการหมักแบบใช้แสง โดยมีค่าเท่ากับ 5.5 และ 2.8 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีโอดี ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน

กระบวนการหมัก	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน สะสม (มล.)	ชีโอดีที่เข้าระบบ (กรัม)	ไฮโดรเจนยิลด์ (มล.ไฮโดรเจน/ก.ชีโอดี)
ไม่ใช้แสง	83	15.04	5.5
ใช้แสง	38	13.50	2.8

4.3 สภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียแ่ง มันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง

การทดลองในส่วนนี้เป็นการเดินระบบเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียและผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง โดยสภาวะที่ทำการศึกษา คือ พีเอช 3 ค่า ได้แก่ 5 6 และ 7 และอุณหภูมิ 2 ระดับ ได้แก่ อุณหภูมิปานกลาง (35 °ซ) และอุณหภูมิสูง (55 °ซ) ซึ่งจะทำการแปรค่าในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงเท่านั้น

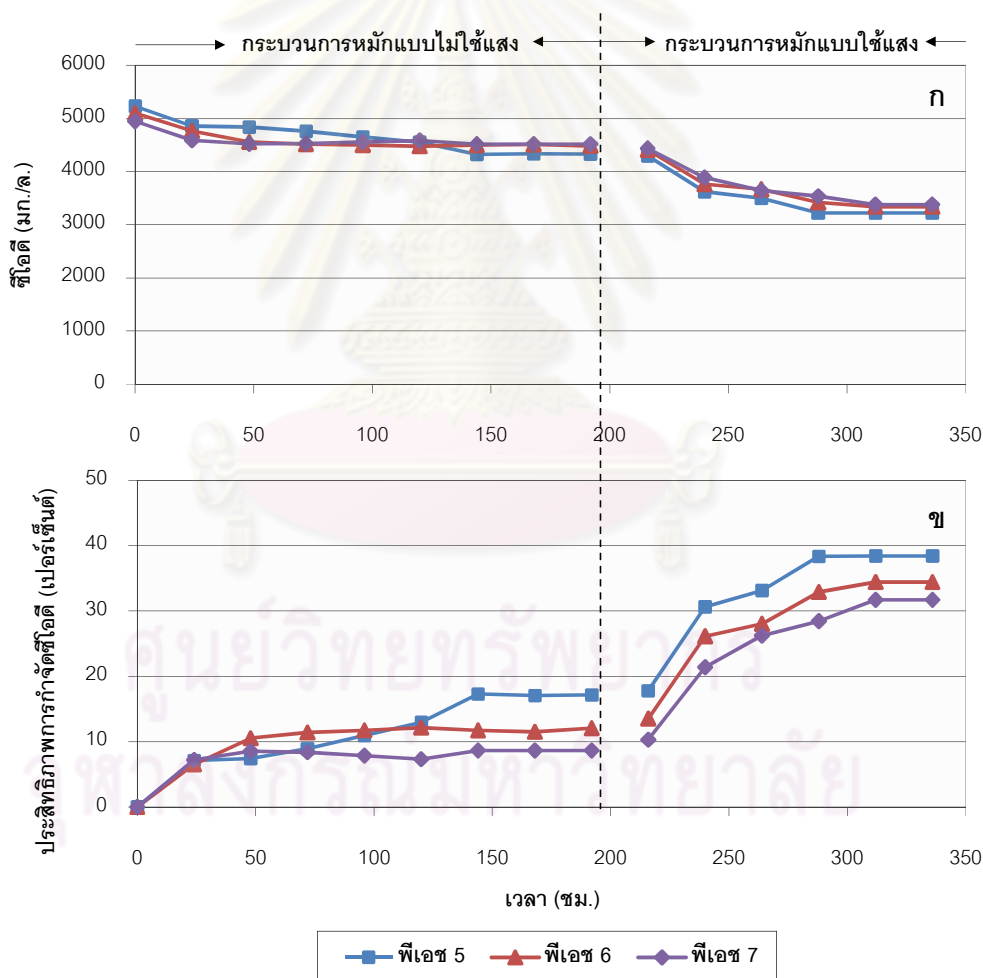
4.3.1 สภาวะพีเอชที่เหมาะสม

ชีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี

การเปลี่ยนแปลงค่าชีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีที่ค่าพีเอชต่างๆ ในกระบวนการหมักทั้งสองขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 4.9 จากผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 5 มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังได้สูงที่สุด โดยมีค่าชีโอดีในน้ำเสียลดลงเหลือ 4,321 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีเท่ากับ 17.35 % รองลงมาคือ ชุดการทดลองพีเอชเท่ากับ 7 และชุดการทดลองพีเอชเท่ากับ 6 ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีเท่ากับ 13.57 และ 12.18 % ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีในการทดลองนี้มาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีในการทดลองที่ไม่มีการควบคุมค่าพีเอชจะพบว่า การทดลองที่มีการควบคุมค่าพีเอชในระบบส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีของน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังดีกว่า เนื่องจากไม่เกิดสภาวะการลดต่ำลงของค่าพีเอชเพราะการสะสมตัวของไฮโดรเจนและกรดไขมันระเหย (มันซิน ตัณพลเวศม์, 2542) ส่วนในการหมักแบบใช้แสงพบว่า ในแต่ละชุดการทดลองมีความสามารถในการกำจัดค่าชีโอดีในน้ำเสียได้ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงสุดในชุดการทดลองน้ำออกที่พีเอชเท่ากับ 5 คือ มีค่าชีโอดีลดเหลือ 3,218 มก./ล. ซึ่งผลที่ได้

มีความคล้ายคลึงกับการทดลองส่วนที่สอง เนื่องจากในระบบมีการควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ที่ประมาณ 7 ตลอดการทดลองเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงทำให้เมื่อผ่านกระบวนการหมักทั้งสองขั้นตอนแล้วประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีรวมจากชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 5 มีค่าเท่ากับ 38.45%

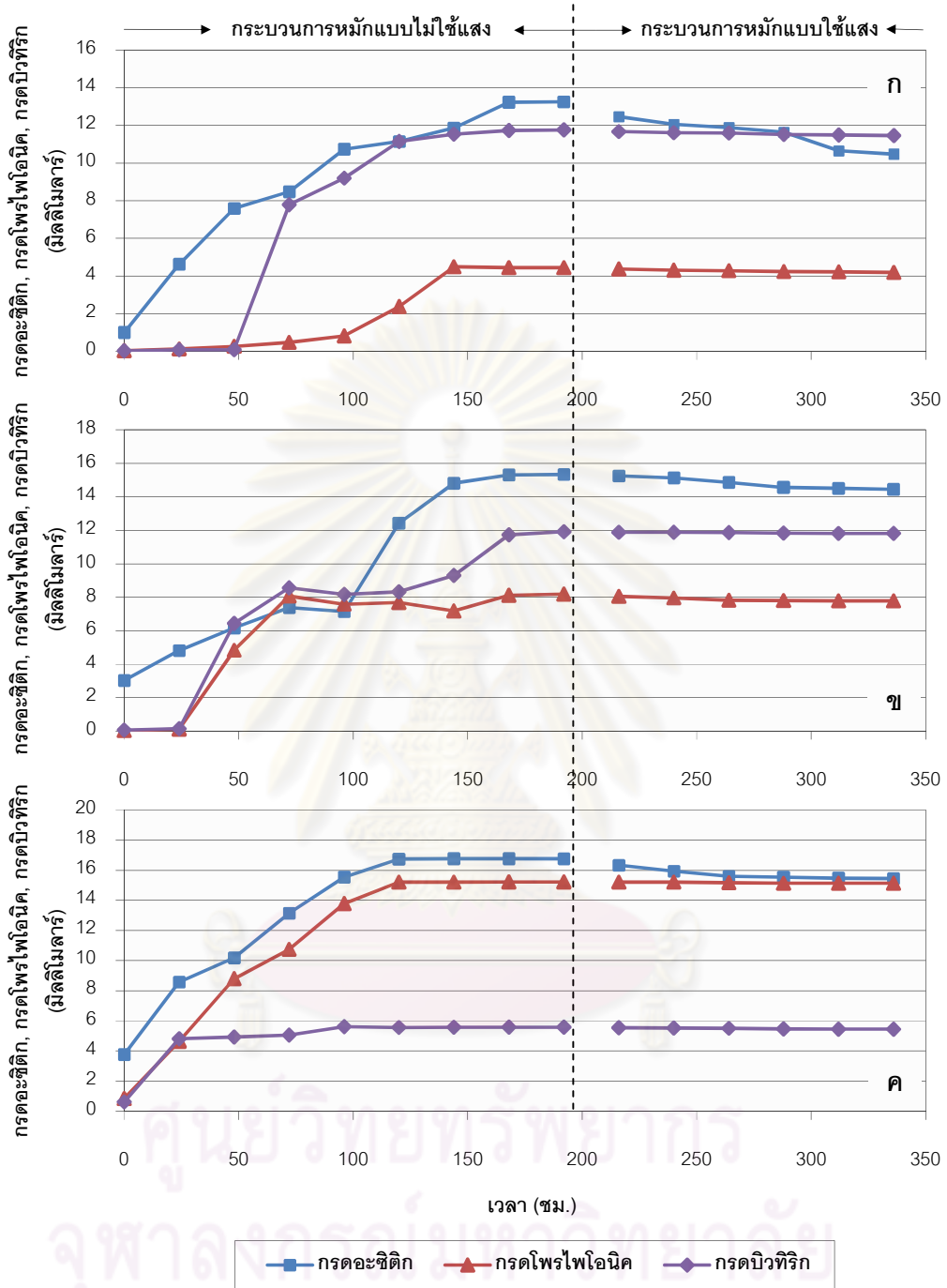
จากผลการทดลองในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงแสดงให้เห็นว่า การควบคุมค่าพีเอชในระบบให้เท่ากับ 5 ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดค่าซีโอดีสูงสุด ซึ่งเป็นผลจากค่าพีเอชดังกล่าวอยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ไร้อากาศผ่านกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง ซึ่งผลที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยที่ระบุไว้ว่า พีเอชในช่วง 5-6 จะทำให้จุลินทรีย์ไร้อากาศสามารถใช้สารอินทรีย์ในระบบเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีของระบบเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย (Fang และคณะ, 2002 ; Khanal และคณะ, 2004 และ Lay และคณะ, 1999)



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีที่ค่าพีเอชต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน โดย (ก) ค่าซีโอดี (ข) ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

ปริมาณกรดไขมันระเหย

ปริมาณกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นภายในระบบที่ค่าพีเอชต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 4.10 จากผลการทดลองพบว่า ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่ค่าพีเอชต่างๆ มีปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตลอดระยะเวลาที่เดินระบบ โดยในช่วงเริ่มต้นจะเป็นการเพิ่มขึ้นของกรดอะซิติก แต่หลังจากที่มีการเดินระบบไปสักระยะเวลาจึงมีการเพิ่มขึ้นตามมาของกรดไพรูโพนิกและกรดบิวทิริกในระบบ ซึ่งในแต่ละชุดการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยแต่ละชนิดแตกต่างกันออกไป โดยในชุดการทดลองพีเอชเท่ากับ 5 ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีและสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดจะมีการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันระเหยในระบบดังนี้ คือ พบกรดอะซิติกปริมาณมากที่สุด รองลงคือ กรดบิวทิริก โดยที่กรดไขมันระเหยทั้งสองชนิดมีปริมาณไม่แตกต่างกันมากนัก ส่วนที่พบน้อยที่สุดคือ กรดไพรูโพนิก ซึ่งมีปริมาณน้อยกว่ากรดไขมันระเหยอีกสองชนิดค่อนข้างมาก ส่วนการเริ่มเกิดขึ้นของกรดไขมันระเหยแต่ละชนิดในระบบมีความแตกต่างกันออกไป โดยกรดอะซิติกจะมีการเพิ่มขึ้นตั้งแต่เริ่มเดินระบบ แต่สำหรับกรดไพรูโพนิกและกรดบิวทิริกจะเริ่มเกิดขึ้นในระบบเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 50 ชม. ซึ่งเมื่อนำการเปลี่ยนแปลงนี้ไปเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมในระบบจะพบว่ามีความสอดคล้องกัน โดยการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของกรดอะซิติกและการเริ่มเกิดขึ้นของกรดไพรูโพนิกและบิวทิริกจะเป็นช่วงเวลาที่มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในระบบเช่นเดียวกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณกรดไขมันระเหยที่เพิ่มสูงขึ้นในระบบเป็นผลมาจากจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตเป็นก๊าซไฮโดรเจน นอกจากนี้จากการทดลองยังสังเกตได้อีกว่า การควบคุมค่าพีเอชในระบบให้เท่ากับ 5 จะทำให้ระบบสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุด เนื่องจากเป็นค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง และไม่มีการยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์จากการสะสมตัวของกรดไพรูโพนิก ส่วนในกระบวนการหมักแบบใช้แสงพบว่า ชุดการทดลองน้ำออกพีเอชเท่ากับ 5 มีการลดลงของปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบมากที่สุด โดยส่วนใหญ่เป็นการลดลงของกรดอะซิติก เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสงใช้เป็นอาหารภายในเซลล์และผลิตเป็นก๊าซไฮโดรเจนออกมา ส่งผลให้ซีโอดีของน้ำเสียแ่งมีค่าลดลง



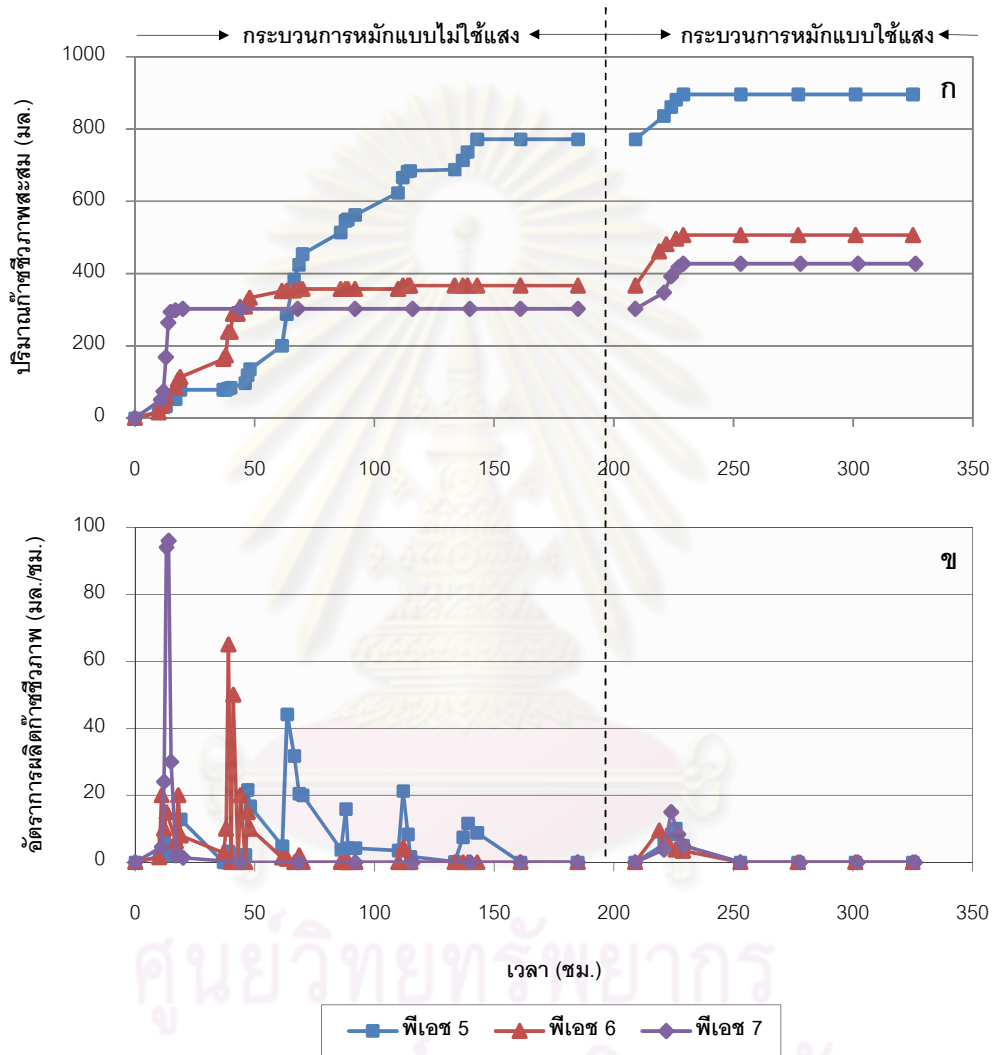
รูปที่ 4.10 ปริมาณกรดไขมันระเหยที่ค่าพีเอชต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน โดย (ก) พีเอช 5 (ข) พีเอช 6 (ค) พีเอช 7

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบการหมักสองขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 4.11 โดยพบว่า ชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 5 มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดและมีระยะเวลาในการเกิดก๊าซชีวภาพยาวนานที่สุด โดยปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมีค่าสูงถึง 772 มล. ภายในเวลา 143 ชม. และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 44.17 มล./ชม. ที่เวลาประมาณ 63 ชม. รองลงมา คือ ชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 6 และพีเอชเท่ากับ 7 ซึ่งมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 366 และ 302 มล. ตามลำดับ โดยในชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 6 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด คือ 65.80 มล./ชม. ที่เวลาประมาณ 39 ชม. และในชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 7 มีค่าเท่ากับ 96.00 มล./ชม. ที่เวลาประมาณ 14 ชม. ส่วนในขั้นตอนของการหมักแบบใช้แสง จากผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองน้ำออกที่พีเอช 6 จะมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 146 มล. ภายในเวลา 20 ชม. และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 9.50 มล./ชม. ที่เวลาประมาณ 10 ชม. รองลงมา คือ ชุดการทดลองน้ำออกพีเอช 5 และชุดการทดลองน้ำออกพีเอช 7 ซึ่งมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 124 และ 125 มล. ตามลำดับ โดยอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดในแต่ละชุดการทดลองมีค่าดังนี้ คือ 10.00 มล./ชม. ที่เวลาประมาณ 17 ชม. ในชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 6 และ 15.00 มล./ชม. ที่เวลาประมาณ 15 ชม. ในชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 7

เมื่อเปรียบเทียบพฤติกรรมของการเกิดก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่พีเอชต่างๆ ในระบบการหมักแบบไม่ใช้แสงแล้วจะพบว่า ในชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 5 มีการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซชีวภาพช้ากว่าชุดการทดลองที่ค่าพีเอชอื่นๆ โดยเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 40 ชม. ซึ่งการเพิ่มขึ้นช้าของปริมาณก๊าซชีวภาพนี้เกิดจากการที่จุลินทรีย์ต้องปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ เนื่องจากการควบคุมค่าพีเอชภายในระบบให้ต่ำกว่าชุดการทดลองอื่นๆ แต่หลังจากที่จุลินทรีย์สามารถทำการปรับตัวได้แล้ว ปริมาณก๊าซชีวภาพจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 143 ชม. ซึ่งผลที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาในการเริ่มเกิดก๊าซชีวภาพที่ช้าและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่ต่ำกว่าของชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 5 เมื่อเทียบกับชุดการทดลองที่ค่าพีเอชอื่นๆ นั้นไม่มีผลต่อปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม เนื่องจากในระบบมีระยะเวลาในการเกิดก๊าซชีวภาพที่ยาวนานพอ ซึ่งมีความแตกต่างกับชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 7 ที่มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงถึง 96.00 มล./ชม. แต่เนื่องจากมีระยะเวลาในการเกิดก๊าซชีวภาพเพียง 14 ชม. จึงส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้มีค่าน้อยกว่าในชุดการทดลองที่ค่าพีเอชอื่นๆ นอกจากนี้ จากการสังเกตพฤติกรรมของการเกิดก๊าซชีวภาพยังพบอีกว่า ในชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 5 จะมีลักษณะการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซชีวภาพในระบบเป็นขั้นบันไดที่เวลา

ประมาณ 12 ถึง 62 ชม. และที่เวลาประมาณ 70 และ 134 ชม. ซึ่งผลที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากการที่ในระบบมีการเกิดก๊าซชีวภาพปริมาณมากและน้อยสลับกันไปในช่วงเวลาดังกล่าว โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นน้อยนั้นอาจเป็นผลมาจากการหยุดเดินระบบเพื่อปรับค่าพีเอชที่ลดต่ำลงให้กลับมามีค่าที่ประมาณ 5 เนื่องจากการเพิ่มสูงขึ้นของปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบ



รูปที่ 4.11 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่ค่าพีเอชต่างๆ จากการบวมการหมักสองขั้นตอนโดย (ก) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ข) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพแต่ละชนิดในกระบวนการหมักแบบสองขั้นตอนที่สภาวะพีเอชต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.6 จากผลการทดลองพบว่า ในขั้นตอนการหมักแบบไม่ใช้แสง ที่ชุดการทดลองพีเอชเท่ากับ 5 และ 6 มีองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน โดยมีก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณมากที่สุด ซึ่งมีค่าอยู่ที่ประมาณ 68.08 และ 69.85 % ตามลำดับ โดยสัดส่วนของก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณมากนี้เกิดจากการควบคุมค่าพีเอชในระบบให้อยู่ในช่วง 5-6 ซึ่งเป็นช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง (Khanal และคณะ, 2004) ส่วนชุดการทดลองที่มีสัดส่วนก๊าซไฮโดรเจนในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพน้อยที่สุด คือ ชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 7 โดยมีปริมาณเท่ากับ 55.00% ซึ่งผลที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากค่าพีเอชในระบบไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรด จึงทำให้จุลินทรีย์ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้น้อยลง และเมื่อผ่านน้ำเสียเข้าสู่ขั้นตอนการหมักแบบใช้แสงแล้วพบว่า สัดส่วนก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยแต่ละชุดการทดลอง น้ำออกพีเอชต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 32 – 35 %

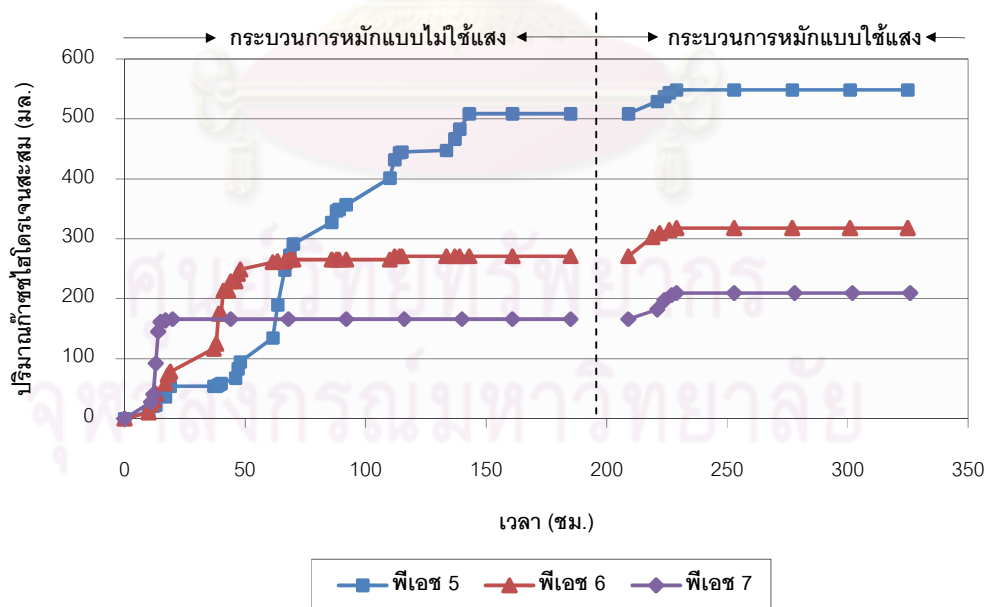
ตารางที่ 4.6 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยที่ค่าพีเอชต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน

กระบวนการหมัก	สภาวะ	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ก๊าซอื่นๆ
ไม่ใช้แสง	พีเอช 5	68.08	1.23	30.68
	พีเอช 6	69.85	1.13	29.08
	พีเอช 7	55.00	0.50	44.50
ใช้แสง	น้ำออก พีเอช 5	32.02	2.60	65.38
	น้ำออก พีเอช 6	33.40	2.90	63.70
	น้ำออก พีเอช 7	35.00	3.20	61.80

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมและการวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักสองขั้นตอนแสดงได้ดังรูปที่ 4.12 จากผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 5 จะมีความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากที่สุด โดยมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมเท่ากับ 509 มล. รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 6 ที่มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมเท่ากับ 271 มล. ส่วนชุดการทดลองที่มีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้น้อยที่สุด คือ ชุดการทดลองที่พีเอชเท่ากับ 7 ซึ่งมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมเท่ากับ 166 มล. และเมื่อเข้าสู่ขั้นตอนการหมักแบบใช้แสงแล้ว พบว่า ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ได้จากแต่ละชุดการทดลองจะมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงสุดในชุดการทดลองที่น้ำออกพีเอชเท่ากับ 6 ซึ่งมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมเท่ากับ 47 มล.

จากผลการทดลองปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงแสดงให้เห็นว่า ค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพภายใต้สภาวะการหมักแบบไม่ใช้แสง คือ พีเอชเท่ากับ 5 ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Lay (2000) ที่รายงานไว้ที่พีเอชเท่ากับ 5 มีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียแป้งสังเคราะห์ได้สูงสุด นอกจากนี้ยังมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khanal และคณะ, (2004) ที่รายงานไว้ว่า การควบคุมค่าพีเอชในระบบให้อยู่ที่ประมาณ 5.5 จะสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากซูโครสได้สูงสุด



รูปที่ 4.12 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ค่าพีเอชต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน

การวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สภาวะพีเอชต่างๆ ในกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและแบบใช้แสงสามารถแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.7 จากผลการทดลองพบว่า ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง ชุดการทดลองที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 จะมีศักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุด โดยมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดเท่ากับ 513 มล. มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 28.51 มล./ชม. มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสียเท่ากับ 9.50 มล./ล.-ชม. โดยปริมาณชีโอดีที่เข้าระบบเท่ากับ 15.68 กรัม และมีระยะเวลาในการเกิดก๊าซเริ่มต้นเท่ากับ 61.50 ชม. ซึ่งระยะเวลาในการเกิดก๊าซเริ่มต้นที่ยาวนานนี้เกิดจากการที่จุลินทรีย์ต้องใช้เวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ของระบบที่มีค่าพีเอชต่ำ โดยผลที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kapdan และ Kargi (2006) ที่รายงานว่า หากค่าพีเอชของระบบอยู่ในช่วง 4-5 อาจทำให้จุลินทรีย์มีช่วงเวลาในการปรับตัวยาวนานถึง 72 ชม. ส่วนในขั้นตอนการหมักแบบใช้แสงศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจะมีค่าสูงสุดในชุดการทดลองน้ำออกพีเอช 6 โดยมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดเท่ากับ 46.90 มล. มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 3.90 มล./ชม. มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสียเท่ากับ 1.56 มล./ล.-ชม. โดยที่ปริมาณชีโอดีเข้าระบบมีค่าเท่ากับ 11.19 กรัม และมีระยะเวลาในการเกิดก๊าซเริ่มต้นเท่ากับ 6.43 ชม.

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากการกราฟสมการ Modifield Gompertz ที่ค่าพีเอชต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน

กระบวนการหมัก	สภาวะ	พารามิเตอร์			
		ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุด, P (มล.)	อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด, R_m (มล./ชม.)	อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสีย (มล./ล.-ชม.)	ระยะเวลาเกิดก๊าซเริ่มต้น, λ (ชม.)
ไม่ใช้แสง	พีเอช 5	513	28.51	9.50	61.50
	พีเอช 6	273	15.30	5.10	24.55
	พีเอช 7	168	1.13	0.38	12.24
ใช้แสง	น้ำออก	39	3.23	1.29	10.85
	พีเอช 5				
	น้ำออก	47	3.90	1.56	6.43
	พีเอช 6				
	น้ำออก	44	2.47	0.99	12.11
	พีเอช 7				

ตารางที่ 4.8 แสดงปริมาณไฮโดรเจนยิลด์ที่ได้จากกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงที่ค่าพีเอชต่างๆ จากผลการทดลองพบว่า ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง ชุดการทดลองที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5 จะได้ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์สูงสุด โดยมีปริมาณเท่ากับ 32.5 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีโอดี ส่วนในขั้นตอนของการหมักแบบใช้แสงชุดการทดลองที่ได้ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์มากที่สุด คือ ชุดการทดลองน้ำออกพีเอช 6 ซึ่งมีปริมาณไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 4.2 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีโอดี และเมื่อนำปริมาณไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดที่ได้จากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงในการทดลองหาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมไปเปรียบเทียบกับปริมาณไฮโดรเจนยิลด์ที่ได้จากสารอินทรีย์ชนิดอื่นในงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมาดังในตารางที่ 4.9 จะพบว่า ไฮโดรเจนยิลด์จากงานวิจัยนี้มีค่าสูงสุดเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Reungsang และคณะ (2004) และ สุภาภรณ์ ศุภวิทยาภินันท์ (2551) ที่มีการใช้น้ำเสียแ่งมันสำปะหลังเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนเช่นเดียวกัน แต่จะมีค่าน้อยกว่ามากเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ใช้ชนิดของสารอินทรีย์ต่างออกไป นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าพีเอชที่ทำให้ได้ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดในงานวิจัยนี้จะมีค่าต่ำกว่าพีเอชที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยอื่นๆ ซึ่งจะอยู่ในช่วง 5.5-7.0 ยกเว้นในงานวิจัยของ Khanal และคณะ (2004) ที่จะมีค่าพีเอชต่ำกว่า คือ 4.5

ตารางที่ 4.8 ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์ที่ค่าพีเอชต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน

กระบวนการหมัก	สภาวะ	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)	ซีโอดีที่เข้าระบบ (กรัม)	ไฮโดรเจนยิลด์ (มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีโอดี)
ไม่ใช้แสง	พีเอช 5	509	15.68	32.5
	พีเอช 6	271	15.29	17.7
	พีเอช 7	166	14.83	11.2
ใช้แสง	น้ำออก	40	10.80	3.7
	พีเอช 5			
	น้ำออก	47	11.19	4.2
	พีเอช 6			
	น้ำออก	44	11.29	3.9
	พีเอช 7			

ตารางที่ 4.9 การเปรียบเทียบไฮโดรเจนยิลด์จากสภาวะพีเอชในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยต่างๆ

ประเภทน้ำเสีย	สภาวะที่ทำการทดลอง	ไฮโดรเจนยิลด์ (มล./ก.ซีไอดี)	งานวิจัยอ้างอิง
น้ำตาลชูโครส	พีเอช 4.5	214	Khanal และคณะ, 2004
น้ำเสียแป้งสังเคราะห์	พีเอช 4.5	125	Khanal และคณะ, 2004
เศษอาหาร	พีเอช 5.5	100	Chen และคณะ, 2006
น้ำเสียอุตสาหกรรมแปรรูปแอปเปิ้ล	พีเอช 6.1	100	Van Ginkel และคณะ, 2005
น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตลูกกวาด	พีเอช 6.1	110	Van Ginkel และคณะ, 2005
น้ำเสียอุตสาหกรรมแปรรูปมันฝรั่ง	พีเอช 6.1	100	Van Ginkel และคณะ, 2005
น้ำเสียชุมชน	พีเอช 6.1	40	Van Ginkel และคณะ, 2005
น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง	พีเอช 7.0	28	Reungsang และคณะ, 2004
น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง	พีเอช 6.0	17	สุภาภรณ์ ศุภวิทยานันท์, 2551
น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง	พีเอช 5.0	32	งานวิจัยนี้

สรุปผลการทดลองหาสภาวะพีเอชที่เหมาะสม

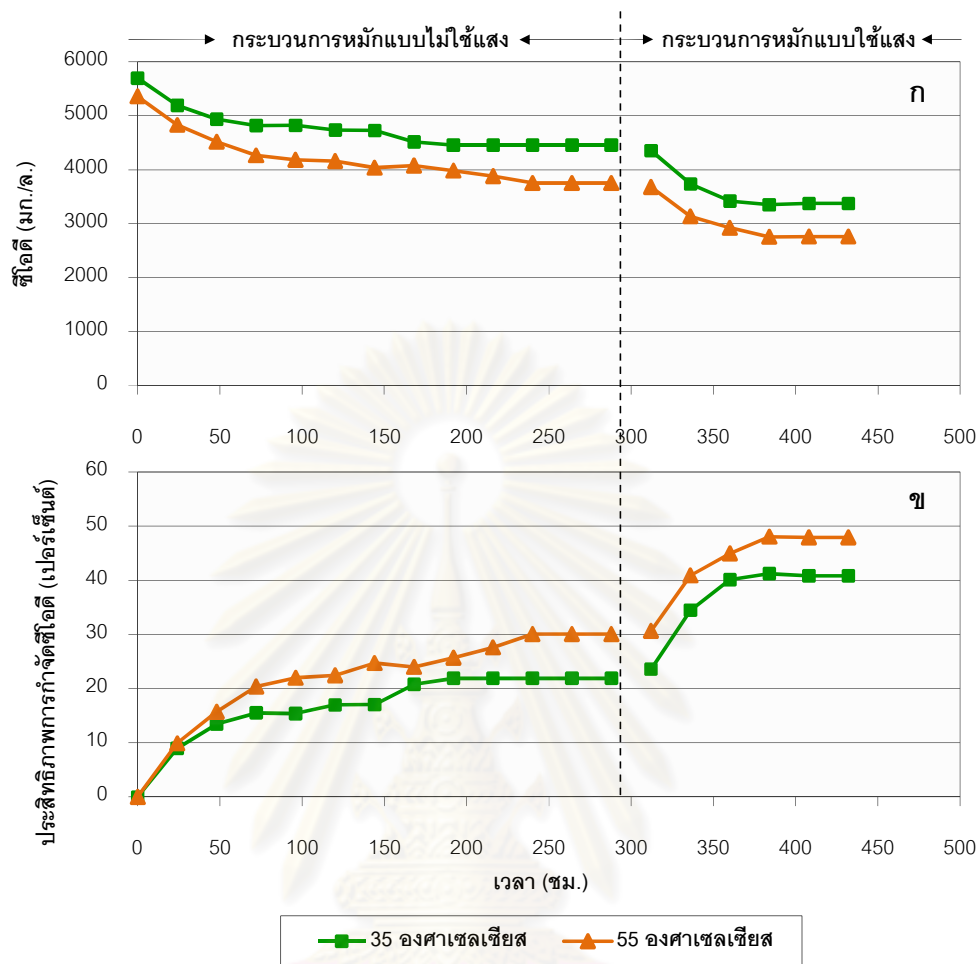
จากการทดลองหาสภาวะพีเอชที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง และผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่มีการควบคุมค่าพีเอชในระบบเท่ากับ 5 จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีและผลิตไฮโดรเจนได้สูงที่สุด โดยจะมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเท่ากับ 17.35% มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสียเท่ากับ 9.50 มล./ล.-ชม. และได้ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 32.5 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีไอดี ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เลือกพีเอชเท่ากับ 5 นี้ไปใช้ในการควบคุมระบบของการทดลองหาสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อไป

4.3.2 สภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสม

ชีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี

การเปลี่ยนแปลงค่าชีโอดีและประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีที่ค่าอุณหภูมิ 35 และ 55 °ซ ในกระบวนการหมักทั้งสองขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 4.13 จากผลการทดลองพบว่า ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่มีการควบคุมค่าพีเอชในระบบเท่ากับ 5 ที่อุณหภูมิ 55 °ซ สามารถบำบัดค่าชีโอดีของน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังได้ดีกว่าอุณหภูมิ 35 °ซ โดยมีค่าชีโอดีในน้ำเสียลดลงเหลือ 3,750 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีเท่ากับ 30.04% ส่วนที่อุณหภูมิ 35 °ซ ประสิทธิภาพในการกำจัดชีโอดีจะมีค่าเท่ากับ 21.89% ซึ่งมีความมากกว่าในชุดการทดลองพีเอชเท่ากับ 5 ที่ดำเนินการทดลองที่อุณหภูมิห้อง และเมื่อผ่านเข้าสู่ขั้นตอนการหมักแบบใช้แสงพบว่า ในชุดการทดลองน้ำออกที่อุณหภูมิ 35 และ 55 °ซ มีความสามารถในการลดค่าชีโอดีได้ใกล้เคียงกัน โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีเท่ากับ 22.54 และ 24.92% ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้เหมือนกับในการทดลองส่วนที่สองและการทดลองหาสภาวะพีเอชที่เหมาะสม ดังนั้นจึงทำให้เมื่อสิ้นสุดจากการทดลองการหมักแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงแล้วพบว่า ที่อุณหภูมิ 55 °ซ สามารถลดค่าชีโอดีในน้ำเสียให้ลดลงเหลือ 2,763 มก./ล. คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีรวมสองขั้นตอนเท่ากับ 47.93%

จากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่าการเดินระบบที่อุณหภูมิ 35 °ซ มีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าชีโอดีในน้ำเสียได้ดีกว่าการเดินระบบที่อุณหภูมิห้อง เนื่องจากอุณหภูมิสูงกว่าและไม่มีเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในระบบจากช่วงเวลากลางวันและกลางคืนที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน จึงส่งผลให้การทำงานของจุลินทรีย์ในระบบมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น ส่วนการเดินระบบที่อุณหภูมิ 55 °ซ จะมีประสิทธิภาพสูงสุดในการบำบัดค่าชีโอดีของน้ำเสียเมื่อเทียบกับการเดินระบบที่อุณหภูมิ 35 °ซ และอุณหภูมิห้อง เนื่องจากอุณหภูมิ 55 °ซ เป็นค่าอุณหภูมิที่อยู่ในช่วงอุณหภูมิสูง (Thermophilic) ซึ่งจะมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบ โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาในปฏิกิริยาชีวเคมีของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย จึงส่งผลให้จุลินทรีย์มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบได้มากขึ้น (Speece, 1996)

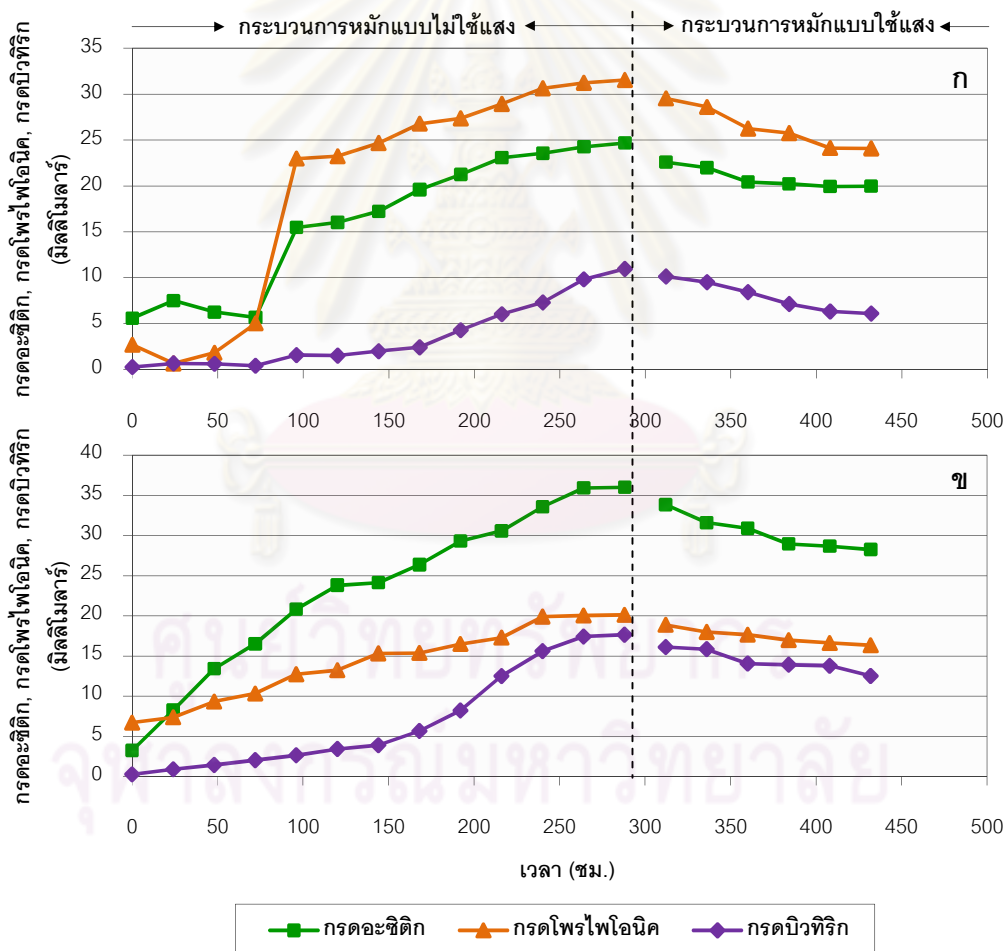


รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดีและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน โดย (ก) ค่าซีไอดี (ข) ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดี

ปริมาณกรดไขมันระเหย

ปริมาณกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นภายในระบบที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากการเดินระบบกระบวนการหมักสองขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 4.14 จากผลการทดลองพบว่า ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่มีการควบคุมค่าพีเอชในระบบเท่ากับ 5 ปริมาณกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นในระบบของแต่ละชุดการทดลองมีค่าสูง โดยปริมาณกรดไขมันระเหยจากการเดินระบบที่อุณหภูมิ 35 และ 55 °ซ จะมีปริมาณสูงกว่าชุดการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้นของจุลินทรีย์ เนื่องจากการควบคุมสภาวะอุณหภูมิในระบบให้มีค่าสูงขึ้นกว่าอุณหภูมิห้อง และเมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันระเหยจากการเดินระบบด้วยสภาวะอุณหภูมิทั้งสองค่าจะพบว่า ที่อุณหภูมิ 55 °ซ จะมีปริมาณกรดไขมันระเหยมากกว่า โดยมี

ปริมาณกรดอะซิติกที่สูงที่สุด รองลงมา คือ กรดโพไฟไอนิกและกรดบิวทริก ตามลำดับ ส่วนที่ อุณหภูมิ 35 °ซ ชนิดของกรดไขมันระเหยที่พบมากที่สุด คือ กรดโพไฟไอนิก โดยผลที่เกิดขึ้นนี้ มีความสอดคล้องกับปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ผลิตได้ในระบบ คือ การเดินระบบที่อุณหภูมิ 55 °ซ จะทำให้ได้กรดอะซิติกเป็นกรดไขมันระเหยหลักในระบบ จึงส่งผลให้ได้ปริมาณก๊าซ ไฮโดรเจนมากกว่า เนื่องจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เปลี่ยนไปเป็น น้ำตาล และเปลี่ยนรูปจากน้ำตาลไปเป็นกรดอะซิติกนั้นจะให้ก๊าซไฮโดรเจนจำนวน 4 โมล ออกมา จากปฏิกิริยาชีวเคมี ซึ่งมากกว่าการเปลี่ยนรูปน้ำตาลไปเป็นกรดบิวทริกที่ให้ก๊าซไฮโดรเจนเพียง 1 โมล (มันลิน ตันซูลเวสม์, 2542) ส่วนในกระบวนการหมักแบบใช้แสงพบว่า ชุดการทดลองน้ำ ออกที่อุณหภูมิ 35 และ 55 °ซ จะมีการลดลงของปริมาณกรดไขมันระเหยในระบบคล้ายคลึงกัน โดยกรดไขมันระเหยทั้งสามชนิดมีค่าลดลงในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน

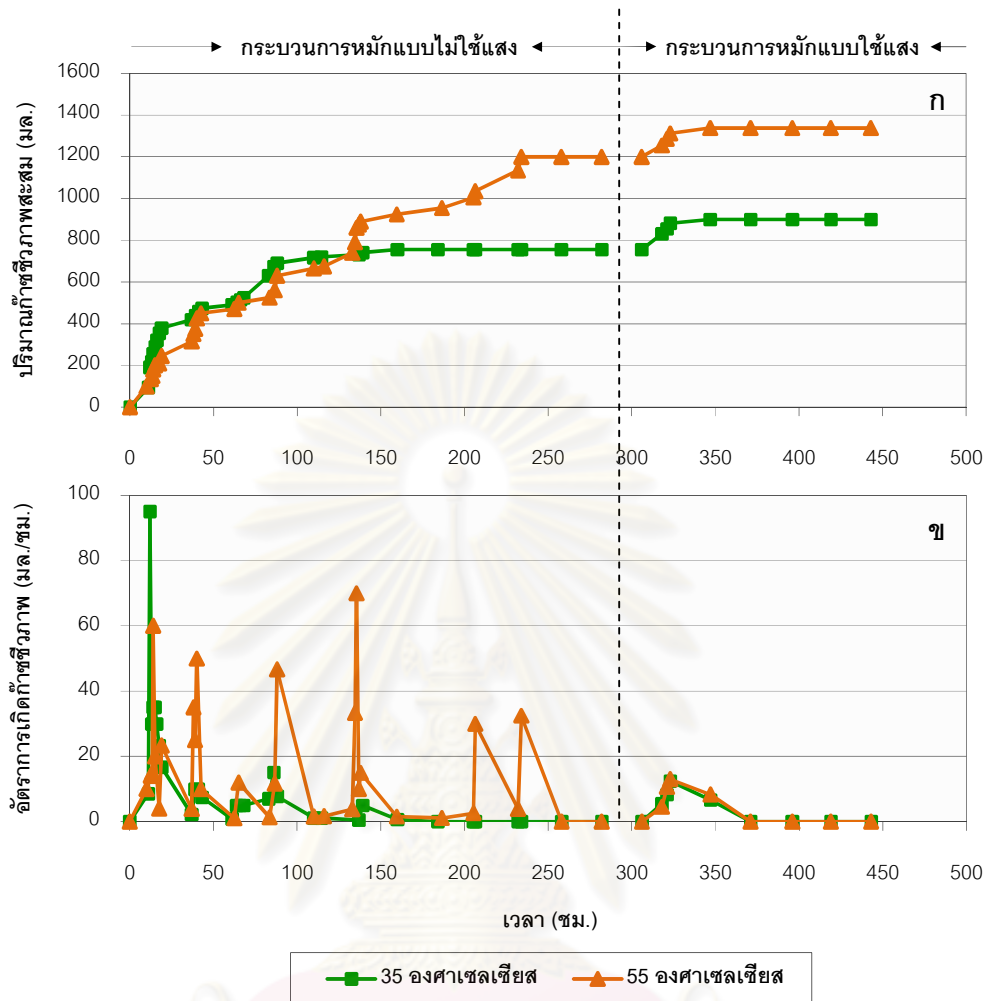


รูปที่ 4.14 ปริมาณกรดไขมันระเหยที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน โดย (ก) อุณหภูมิ 35 °ซ (ข) อุณหภูมิ 55 °ซ

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยพบว่า ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่มีการควบคุมค่าพีเอชในระบบเท่ากับ 5 ชุดการทดลองที่อุณหภูมิ 55 °ซ จะมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมากกว่าและมีระยะเวลาในการเกิดก๊าซชีวภาพยาวนานกว่าชุดการทดลองที่อุณหภูมิ 35 °ซ โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 1,200 มล. ภายในเวลา 234 ชม. หลังจากเดินระบบ และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 70.00 มล./ชม. ที่เวลาประมาณ 135 ชม. ส่วนชุดการทดลองที่อุณหภูมิ 35 °ซ มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 757 มล. ภายในเวลา 160 ชม. และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 95.00 มล./ชม. ที่เวลาประมาณ 12 ชม. ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในระบบจะทำให้กระบวนการหมักเพิ่มสูงขึ้นในเซลล์จุลินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น จึงเป็นผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542) นอกจากนี้จากการทดลองยังพบอีกว่า พฤติกรรมในการเกิดก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองทั้งสองอุณหภูมิมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเพิ่มขึ้นแบบขั้นบันไดในช่วงเวลาเริ่มเดินระบบไปจนถึงเวลาที่ปริมาณก๊าซชีวภาพเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว ซึ่งเป็นผลจากการหยุดเดินระบบเพื่อปรับค่าพีเอชเช่นเดียวกับชุดการทดลองพีเอชเท่ากับ 5 ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม

ส่วนในขั้นตอนของการหมักแบบใช้แสง จากผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองน้ำออกที่อุณหภูมิ 35 °ซ และ 55 °ซ จะมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมใกล้เคียงกัน โดยชุดการทดลองน้ำออกที่อุณหภูมิ 35 °ซ มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเท่ากับ 135 มล. ภายในเวลา 20 ชม. และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 12.50 มล./ชม. ที่เวลาประมาณ 17 ชม. ส่วนชุดการทดลองน้ำออกที่อุณหภูมิ 55 °ซ จะมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมากกว่า โดยมีค่าเท่ากับ 138 มล. ภายในเวลา 20 ชม. และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 13.00 มล./ชม. ที่เวลาประมาณ 17 ชม. ซึ่งผลที่ได้มีความคล้ายคลึงกับปริมาณก๊าซชีวภาพและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักแบบใช้แสงในการทดลองส่วนที่สองและการทดลองหาสภาวะพีเอชที่เหมาะสม



รูปที่ 4.15 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอนโดย (ก) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ข) อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ค่าเฉลี่ยขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพในกระบวนการหมักสองขั้นตอนที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.10 โดยในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในชุดการทดลองอุณหภูมิที่ 55 °ซ จะมีสัดส่วนของก๊าซไฮโดรเจนมากกว่าชุดการทดลองอุณหภูมิที่ 35 °ซ โดยมีค่าเท่ากับ 70.82% และ 68.16% ตามลำดับ ซึ่งผลดังกล่าวอาจเกิดจากสภาวะอุณหภูมิสูงภายในระบบทำให้จุลินทรีย์สามารถเจริญเติบโตได้ดีและมีกระบวนการเมทาบอลิซึมภายในเซลล์เพิ่มสูงขึ้นจึงเป็นผลให้สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากขึ้นตามไปด้วย

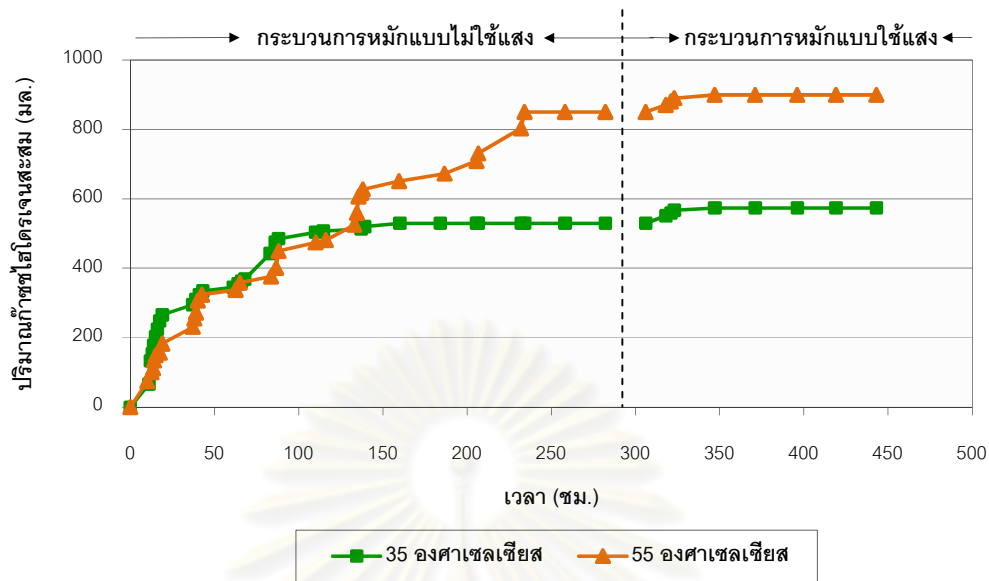
สำหรับในกระบวนการหมักแบบใช้แสงจะพบสัดส่วนก๊าซไฮโดรเจนโดยเฉลี่ยในชุดการทดลองน้ำออกที่อุณหภูมิ 55 มากกว่า 35 °ซ โดยมีค่าเท่ากับ 37.20% และจากการสังเกตสัดส่วนก๊าซไฮโดรเจนในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ได้จากน้ำออกของสภาวะอุณหภูมิทั้งสองค่าจะพบว่า มีความคล้ายคลึงกับในการทดลองส่วนที่สองหาสภาวะพีเอชที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.10 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน

กระบวนการหมัก	สภาวะ	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	ก๊าซอื่นๆ
ไม่ใช้แสง	35 °ซ	68.16	4.70	26.14
	55 °ซ	70.82	4.74	20.43
ใช้แสง	น้ำออก	32.80	3.50	63.70
	35 °ซ			
	น้ำออก	37.20	4.10	58.70
	55 °ซ			

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมและการวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักสองขั้นตอนที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.16 จากการทดลองพบว่า ชุดการทดลองที่อุณหภูมิ 55 °ซ มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมมากกว่าชุดการทดลองที่อุณหภูมิ 35 °ซ ค่อนข้างมาก โดยมีค่าเท่ากับ 850 มล. โดยที่อุณหภูมิ 35 °ซ มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมเท่ากับ 530 มล. ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีความสอดคล้องกับงานวิจัย Reungsang และคณะ (2004) ที่พบว่า การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังด้วยจุลินทรีย์ผสมแบบไม่ใช้อากาศจะมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ค่าอุณหภูมิ 55 °ซ ดังนั้น จากผลการทดลองข้างต้นจึงแสดงให้เห็นว่า สภาวะอุณหภูมิสูง (Thermophilic) มีความเหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพมากกว่าอุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic) ส่วนในการทดลองการหมักแบบใช้แสง ผลการทดลองพบว่า ชุดการทดลองน้ำออกที่อุณหภูมิ 55 °ซ จะให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนมากกว่าน้ำออกที่อุณหภูมิ 35 °ซ โดยมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมเท่ากับ 51 มล. ซึ่งปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ได้มีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับทุกชุดการทดลองในกระบวนการหมักแบบใช้แสงทั้งในการทดลองส่วนที่สองและการทดลองหาสภาวะพีเอชที่เหมาะสม



รูปที่ 4.16 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน

การวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สภาวะอุณหภูมิต่างๆ ในกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและแบบใช้แสงสามารถแสดงพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.11 จากการทดลองพบว่า ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง ชุดการทดลองที่อุณหภูมิ 55 °ซ มีศักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุด โดยมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดเท่ากับ 918 มล. มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 86.16 มล./ชม. มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสียเท่ากับ 28.72 มล./ล.-ชม. โดยปริมาณชีโอดีที่เข้าระบบเท่ากับ 16.08 กรัม และมีระยะเวลาในการเกิดก๊าซเริ่มต้นเท่ากับ 66.59 ชม. ส่วนชุดการทดลองที่อุณหภูมิ 35 °ซ มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดเท่ากับ 535 มล. มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 36.37 มล./ชม. มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสียเท่ากับ 12.12 มล./ล.-ชม. โดยปริมาณชีโอดีที่เข้าระบบเท่ากับ 17.10 กรัม และมีระยะเวลาในการเกิดก๊าซเริ่มต้นเท่ากับ 19.58 ชม. จากผลการทดลองสังเกตได้ว่า การเดินระบบการหมักแบบไม่ใช้แสงด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °ซ จะทำให้ระบบมีระยะเวลาในการเกิดก๊าซเริ่มต้นที่ยาวนานกว่าการเดินระบบที่อุณหภูมิ 35 °ซ ค่อนข้างมาก โดยระยะเวลาที่นานนั้นอาจมีสาเหตุมาจากการที่จุลินทรีย์ในระบบต้องใช้เวลาในการปรับตัวเข้าสู่สภาวะอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าเดิม ซึ่งผลที่เกิดขึ้นมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Reungsang และคณะ (2004) ที่พบการปรับตัวของจุลินทรีย์ที่นานขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของระบบการหมักแบบไม่ใช้แสงด้วยน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง ส่วนในขั้นตอนการหมักแบบใช้แสงศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจะมีค่าสูงสุดในชุดการทดลองน้ำออก

ที่อุณหภูมิ 55 °ซ โดยมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดเท่ากับ 52 มล. มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 3.21 มล./ชม. มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสียเท่ากับ 1.07 มล./ล.-ชม. โดยปริมาณซีโอดีที่เข้าระบบเท่ากับ 9.20 กรัม และมีระยะเวลาในการเกิดก๊าซเริ่มต้นเท่ากับ 11.97 ชม.

ตารางที่ 4.11 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่ได้จากกราฟสมการ Modifield Gompertz ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน

กระบวนการหมัก	สภาวะ	พารามิเตอร์			
		ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุด, P (มล.)	อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด, R_m (มล./ชม.)	อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสีย (มล./ล.-ชม.)	ระยะเวลาเกิดก๊าซเริ่มต้น, λ (ชม.)
ไม่ใช้แสง	35 °ซ	535	36.37	12.12	19.58
	55 °ซ	918	86.16	28.72	66.59
ใช้แสง	น้ำออก	45	3.39	1.13	11.20
	35 °ซ				
	น้ำออก	52	3.21	1.07	11.97
	55 °ซ				

ตารางที่ 4.12 แสดงปริมาณไฮโดรเจนยิลด์ที่ได้จากกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากการทดลองพบว่า ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง ชุดการทดลองที่อุณหภูมิ 55 °ซ มีปริมาณไฮโดรเจนยิลด์สูงสุด โดยมีปริมาณเท่ากับ 52.9 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีโอดี ส่วนชุดการทดลองที่อุณหภูมิ 35 °ซ ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์มีค่าเท่ากับ 31.0 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีโอดี ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิ 55 °ซ เป็นค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2003) ที่ทำการเปรียบเทียบก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากแป้งในน้ำเสียที่อุณหภูมิ 37 และ 55°ซ พบว่า ที่อุณหภูมิ 55°ซ สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากกว่าที่อุณหภูมิ 37 °ซ โดยมีไฮโดรเจนยิลด์ 78 มล./ก.ของแป้ง และเมื่อผ่านเข้าสู่ขั้นตอนของการหมักแบบใช้แสงพบว่า ชุดการทดลองที่อุณหภูมิ 55°ซ จะปริมาณไฮโดรเจนยิลด์มากกว่าอุณหภูมิ 35°ซ โดยมีปริมาณไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 5.5 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีโอดี

การเปรียบเทียบปริมาณไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดที่ได้จากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงในการทดลองหาสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมกับปริมาณไฮโดรเจนยิลด์จากการหมักแบบไม่ใช้แสงที่สภาวะอุณหภูมิสูงในงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมาแสดงดังตารางที่ 4.13 โดยจะพบว่า ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์ที่ได้จากงานวิจัยนี้จะมีค่าน้อยกว่าปริมาณไฮโดรเจนยิลด์ในงานวิจัยอื่นๆ ยกเว้นในงานวิจัยของ สุภาภรณ์ ศุภวิทยาภินันท์ (2551) ที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวนั้นจะมีปริมาณไฮโดรเจนยิลด์มากกว่า

ตารางที่ 4.12 ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์ที่ค่าอุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการหมักสองขั้นตอน

กระบวนการหมัก	สภาวะ	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)	ซีโอดีที่เข้าระบบ (กรัม)	ไฮโดรเจนยิลด์ (มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีโอดี)
ไม่ใช้แสง	35 °ซ	530	17.10	31.0
	55 °ซ	850	16.08	52.9
ใช้แสง	น้ำออก	44	10.89	4.0
	35 °ซ			
	น้ำออก	51	9.20	5.5
	55 °ซ			

ตารางที่ 4.13 การเปรียบเทียบไฮโดรเจนยิลด์จากสภาวะอุณหภูมิในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยต่างๆ

ประเภทน้ำเสีย	สภาวะที่ทำการทดลอง	ไฮโดรเจนยิลด์ (มล./ก.ซีโอดี)	งานวิจัยอ้างอิง
น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง	พีเอช 7.0	71	Reungsang และคณะ, 2004
น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง	55 °ซ		
น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง	พีเอช 6.0	32	สุภาภรณ์ ศุภวิทยาภินันท์, 2551
น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว	50 °ซ		
น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซีอกโกแลต	พีเอช 6.0	41	สุภาภรณ์ ศุภวิทยาภินันท์, 2551
น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซีอกโกแลต	50 °ซ		
น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง	พีเอช 6.0	72	สุภาภรณ์ ศุภวิทยาภินันท์, 2551
น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง	50 °ซ		
น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง	พีเอช 5.0	53	งานวิจัยนี้
น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง	55 °ซ		

สรุปผลการทดลองหาสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสม

จากการทดลองหาสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังและผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง พบว่า การเดินระบบในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงด้วยการควบคุมอุณหภูมิที่ 55°C จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีและผลิตไฮโดรเจนชีวภาพได้สูงที่สุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเท่ากับ 30.04% มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดต่อลิตรน้ำเสียเท่ากับ 28.72 มล./ล.-ชม. และได้ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 52.9 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีไอดีที่เข้าระบบ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังควบคู่ไปกับการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงคือ พีเอชเท่ากับ 5 และอุณหภูมิ 55°C ซึ่งมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและปริมาณไฮโดรเจนยิลด์รวมทั้งสองขั้นตอนเท่ากับ 47.94% และ 58.4 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีไอดี ตามลำดับ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังควบคู่ไปกับการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง โดยทำการศึกษาถึงผลของพีเอชและอุณหภูมิในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงต่อประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีและการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพ ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 กระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีและผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังได้ โดยผลจากการเดินระบบช่วงแรกภายใต้สภาวะที่ไม่มีการปรับค่าพีเอชของน้ำเสียและทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องพบว่า กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเท่ากับ 10.31% และมีปริมาณไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 5.5 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีไอดีที่เข้าระบบ ส่วนกระบวนการหมักแบบใช้แสงทำให้ระบบมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเพิ่มขึ้นเป็น 33.64% และมีปริมาณไฮโดรเจนยิลด์รวมเท่ากับ 8.3 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีไอดีที่เข้าระบบ

5.1.2 จากการเดินระบบด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงพบว่า น้ำเสียที่ออกจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงจะมีปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มมากขึ้น แต่หลังจากผ่านน้ำเสียเข้าสู่ขั้นตอนการหมักแบบใช้แสงแล้วพบว่า ปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียดังกล่าวมีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักแบบใช้แสงมีประสิทธิภาพช่วยลดปริมาณกรดไขมันระเหยในน้ำเสียที่ผ่านจากการหมักแบบไม่ใช้แสงได้

5.1.3 ในการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังและการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพโดยการแปรค่าพีเอชและอุณหภูมิในขั้นตอนกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงพบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีและผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจะมีค่าสูงสุดที่พีเอชเท่ากับ 5 โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีเท่ากับ 17.35% และสามารถผลิตไฮโดรเจนยิลด์ได้เท่ากับ 32.5 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีไอดีที่เข้าระบบ ส่วนสภาวะอุณหภูมิที่เหมาะสมพบว่า ที่อุณหภูมิ 55°C มีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีไอดีและผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพได้สูงสุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีและปริมาณไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 30.04% และ 52.9 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีไอดีที่เข้าระบบ ตามลำดับ

5.1.4 สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียแ่งมันสำปะหลังควบคู่ไปกับการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง คือ พีเอชเท่ากับ 5 และอุณหภูมิ 55°C ซึ่งเป็นสภาวะที่ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดค่าซีโอดีและมีศักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุด โดยประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและปริมาณไฮโดรเจนยิลด์รวมทั้งสองขั้นตอนมีค่าเท่ากับ 47.94% และ 58.4 มล.ไฮโดรเจน/กรัมซีโอดีที่เข้าระบบ ตามลำดับ

5.1.5 กระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพได้แต่ไม่มีความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ เนื่องจากการเดินระบบการหมักแบบไม่ใช้แสงที่อุณหภูมิสูงจะต้องมีค่าใช้จ่ายในการควบคุมอุณหภูมิ ส่วนในกระบวนการหมักแบบใช้แสงจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการให้แสงสว่างกับจุลินทรีย์ที่ทำงานอยู่ในระบบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำงานวิจัยพบประเด็นที่น่าสนใจและควรมีการศึกษาผลของปัจจัยอื่นๆ เพิ่มเติมเพื่อใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนแบบไม่ใช้แสงและใช้แสงดังนี้

5.2.1 ทดลองทำการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่มีขนาดโมเลกุลต่างกัน เช่น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว น้ำตาลโมเลกุลคู่ เป็นต้น หรือการทดลองผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียชนิดอื่นๆ ด้วยกระบวนการหมักสองขั้นตอนต่อเนื่องแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง

5.2.2 ศึกษาผลของปัจจัยอื่นๆ เช่น แหล่งของไนโตรเจน การกวนผสม และสารอาหารต่างๆ เป็นต้น ในการบำบัดน้ำเสียและผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง

5.2.3 ศึกษาชนิดของจุลินทรีย์ชนิดสังเคราะห์แสงสายพันธุ์อื่นๆ หรือทดลองใช้จุลินทรีย์สายพันธุ์บริสุทธิ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบใช้แสง

5.2.4 ศึกษาผลของปัจจัยอื่นๆ เช่น สารอาหาร ปริมาณกรดไขมันระเหย ปริมาณจุลินทรีย์และปริมาณแสงสว่าง เป็นต้น ในการบำบัดน้ำเสียและผลิตไฮโดรเจนชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบใช้แสง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมควบคุมมลพิษ. 2542. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. กรุงเทพฯ: กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. พลังงานไฮโดรเจน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=246> [2552, ธันวาคม 19]

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. รายงานสถิติพลังงานของประเทศไทยปี 2553. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.dede.go.th/dede/images/stories/pre_stat_53_1.pdf [2554, เมษายน 26]

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2551. คู่มือการกำกับดูแลโรงงานอุตสาหกรรมแบ่งมันสำปะหลัง. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บริษัท ดี เอ็ม พรินติ้ง จำกัด.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2542. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมโรงงานแบ่งมันสำปะหลัง. กรุงเทพฯ.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2543. วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสีย. เล่ม 4.

จารุวรรณ หวะสุวรรณ . 2532. การกำจัดและการใช้ประโยชน์จากน้ำทิ้งโรงงานแบ่งมันสำปะหลังโดยใช้แบคทีเรียสังเคราะห์แสงร่วมกับ heterotrophic bacteria. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ชำนาญ ภายประสิทธิ์. 2538. การใช้ยูเอเอสบีในการบำบัดน้ำเสียเข้มข้นสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ธรรมบุญ ศรีทะวงศ์. พลังงานไฮโดรเจนจากน้ำด้วยแสงอาทิตย์และตัวเร่ง. [ออนไลน์].
แหล่งที่มา: <http://web.bangmod.ac.th/homeworkhelper/FileLink.asp?LinkID=244>
[2551, กุมภาพันธ์14]

นเรศ สัตยารักษ์ และคนอื่นๆ. 2549. ทิศทางพลังงานไทย. กรุงเทพฯ: สำนักงานประชาสัมพันธ์
กระทรวงพลังงาน.

มันสิน ตันฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1.
กรุงเทพฯ: บริษัท แชน.อี.68 คอนซัลติงเอ็นจิเนียรส์ จำกัด.

ลานนา ใจทาหลี. 2552. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากเศษอาหารโดยการหมักแบบไร้
ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิทยา ยงเจริญ. ไฮโดรเจนพลังงานในอนาคต. วารสารพลังงาน 5 (2547): 1-10

ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ และ มานิจ ทองประเสริฐ. 2552. ไฮโดรเจน : เชื้อเพลิงสำหรับอนาคต.
วิศวกรรมสาร. 62, 1 (มกราคม-กุมภาพันธ์) : 23-29

สมาคมแก๊สธรรมชาติแห่งประเทศไทย. 2549. รายงานสถานการณ์เศรษฐกิจแก๊สธรรมชาติในประเทศไทย.
กรุงเทพฯ.

สุภาภรณ์ ศุภวิทยานันท์. 2551. การผลิตไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียอุตสาหกรรม
อาหาร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุภาภรณ์ ศุภวิทยานันท์. 2551. การศึกษาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียจาก
กระบวนการผลิตแก๊สธรรมชาติโดยกระบวนการหมักแบบใช้แสงและกระบวนการหมัก
ไร้แสง. เอกสารรวมบทความวิชาการการประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่
13. 14-16 พฤษภาคม 2551. ณ โรงแรมจอมเทียน ปาล์มบีช พัทยา.

สุรอรรถ ศุภจัตุรัส. 2548. แบบคที่เรียสั่งเคราะห์แ่งง. สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน. 2540. แบ่งมันสำปะหลัง แบ่งมันดัดแปร และแบ่งมันแปรรูป. คู่มือการจัดการสิ่งแวดล้อมอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.

ภาษาอังกฤษ

Aceves-Lara, C.A., Latrille, E., Buffiere, P., Bernet, N., and Steyer, J.P. 2008. Experimental determination by principal component analysis of a reaction pathway of biohydrogen production by anaerobic fermentation. Chemical Engineering and Processing. 47: 1968-1975.

APHA, AWWA, WEF, 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC.

Arooj, M.F., Han, S.K., Kim, S.H., Kim, D.H., and Shin, H.S. 2008. Continuous biohydrogen production in a CSTR using starch as a substrate. International Journal of Hydrogen Energy. 33: 3289-3294.

Ballongue, J., Maison, E., Amine, J., Petitdemange, H., and Gay, R. 1987. Inhibitor effects of products of metabolism on growth of *Clostridium acetobutylicum*. Appl. Microbiol. Biotechnol. 26: 568-573.

Bartacek, J., and Zabranska, J. 2004. Biohydrogen production from phytomass. Young Researchers Conference 2004. pp. 121-138, Wageningen, The Netherlands.

Bartacek, J., Zabranska, J., and Lens, Piet N.L. 2007. Developments and constraints in fermentative hydrogen production. Biofuels Bioproduction & Biorefining. 1: 201-204.

- Chen, Y., Yang, M., Yeh, K., Liu, C., and Chang, J. 2008. Biohydrogen production using sequential two-stage dark and photo fermentation processes. Hydrogen Energy. 33: 4755-4762.
- Chen, W.H., Chen, S.Y, Khanal, S.K, and Sung, S. 2006. Kinetic study of biological hydrogen production by anaerobic fermentation. International Journal of Hydrogen Energy. 31: 2170-2178.
- Chou, C.H., Wang, C.W., Huang, C.C., and Lay, J.J. 2008. Pilot study of the influence of stirring and pH on anaerobes converting high-solid organic wastes to hydrogen. International Journal of Hydrogen Energy. 33: 1550-1558.
- Das, D., and Veziroglu, T.N. 2001. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. International Journal of Hydrogen Energy. 26: 18-38.
- Fan, K.S., Kan, N.R., and Lay, J.J. 2006. Effect of hydraulic retention time on anaerobic hydrogenesis in CSTR. Bioresource Technology. 97: 84-89.
- Fang, HHP., Li, C., and Zhang, T. 2006. Acidophilic biohydrogen production from rice slurry. International Journal of Hydrogen Energy. 31: 683-692.
- Fang, HHP., and Liu, H. 2002. Effect of pH on hydrogen production from glucose by a mixed culture. Bioresource Technology. 82: 87-93.
- Forsberg, C.W. Hydrogen futures and technologies [online]. 2003 Available from: <http://web.mit.edu/hmtl/WWW/papres/FORSBRG.pdf> [2008, January 28]
- Grady, C.P.L., Jr., Daigger, G.T., and Lim, H.C. 1999. Biological wastewater Treatment. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc.

- Hallenbeck, P.C., and Benemann, J.R. 2002. Biological hydrogen production: fundamentals and limiting process. Hydrogen Energy. 27: 1185-1193.
- Hawkes, F.R., Dinsdele, R., Hawkes, D.L., and Hassy, I. 2002. Sustainable fermentative hydrogen production: challenges for process optimisation. International Journal of Hydrogen Energy. 27: 1339-1347.
- Henze, M., and Harremoës, P. 1983. Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors: a literature review. Wat.Sci.Tech. 15: 1-101.
- Kapdan, I.K., and Kargi, F. 2006. Bio-hydrogen production from waste materials. Enzyme and Microbial Technology. 38: 569-582.
- Khanal, S.K., Chen, W.H., and Sung, S. 2004. Biological hydrogen production: effects of pH and intermediate products. International Journal of Hydrogen Energy. 29: 1123-1131.
- Kim, S.H., Han, S.K., and Shin, H.S. 2006. Effect of substrate concentration on hydrogen production and 16S rDNA-based analysis of the microbial community in a continuous fermenter. Process Biochemistry. 41: 199-207.
- Kotsopoulos, T.A., Fotidis, I.A., Tsolakis, N., and Martzopoulos, G.G. 2009. Biohydrogen production from pig slurry in a CSTR reactor system with mixed cultures under hyper-thermophilic temperature (70 °C). Biomass and Bioenergy. 33: 1168-1174.
- Lay, J.J. 2000. Modeling and optimization of anaerobic digested sludge converting starch to hydrogen. Biotechnol Bioeng. 68: 269-278.

- Levin, D.B., Pitt, L., and Love, M. 2004. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. International Journal of Hydrogen Energy. 29: 173-185.
- Liu, D., Liu, D.P., Zeng, R.J., and Angelidaki, I. 2006. Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process. Water Res. 40: 2230-2236.
- Logan, B.E., Oh, S.E, and Van Ginkel, S.W. 2002. Bio-hydrogen production measured in batch anaerobic respirometers. Environmental Science and Technology. 36: 2530-2535.
- Manish, S., and Banerjee, R. 2008. Comparison of biohydrogen production processes. Hydrogen Energy. 33: 279-286.
- McCarty, P.L. 1964. Anaerobic Waste Treatment Fundamentals. Public Works.
- McInerney, M.J., Bryant, M.P., and Stafford, D.A. 1980. Metabolic Stage and Energetics of Microbial Anaerobic Digestion. Applied Science Publishers.
- Metcalf and Eddy. 2004. Wastewater Engineering : Treatment and Reuse. 4th edition. New York: McGraw-Hill.
- Oh, S.E., and Logan, B.E. 2005. Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies. Water Research. 39: 4673-4682.

- Reungsang, A., Sangyoka, S., Imai, T., and Chaiprasert, P. 2004. Biohydrogen production from cassava starch manufacturing wastewater. Proceeding of JGSSE and Kyoto University Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment. pp. 319-324, 1-3 December 2004, Hilton Hua Hin Resort & Spa, Hua Hin, Thailand. Vol.1.
- Sam-Soon, Plans., Loewenthal, RE., Dold, PL., and Marais, GVR. 1987. Hypothesis for pelletisation in the upflow anaerobic sludge bed reactor. Water SA. 13 (2): 69-80.
- Sangyoka, S., Reungsang, A., and Imai, T. 2006. Factors affecting hydrogen production from cassava starch wastewater by a combination of anaerobic mixed culture and photosynthetic bacteria. Thai Journal of Biotechnology. 7: 60-67.
- Sawada, H., and Rogers, P.L. 1977. Photosynthetic bacteria in waste treatment : pure culture studies with *Rhodopseudomonas capsulata*. Journal of Fermentation Technology. 55: 297-310.
- Speece, R.E. 1996. Anaerobic Biotechnology for industrial wastewaters. Nashville, Tennessee: Archae Press.
- Su, H., Cheng, J., Zhou, J., Song, W., and Cen, K. 2009. Improving hydrogen production from cassava starch by combination of dark and photo fermentation. International Journal of Hydrogen Energy. 34: 1780-1786.
- Tao, Y., Chen, Y., Wu, Y., He., Y and Zhou, Z. 2007. High hydrogen yield from a two-step process of dark- and photo-fermentation of sucrose. Hydrogen Energy. 32: 200-206.

- Ueno, Y., Fukui, H., and Goto, M. 2007. Operation of a two-stage fermentation process producing hydrogen and methane from organic waste. Environ. Sci. Technol. 41: 1413-1419.
- Ueno, Y., Haruta, S., Ishii, M., and Igarashi, Y. 2001. Microbial community in anaerobic hydrogen-producing microflora enriched from sludge compost. Appl. Microbiol. Biotechnol. 57: 555 – 562.
- Van Ginkel, S., Oh, S.E., and Logan, B. 2005. Biohydrogen gas production from food processing and domestic wastewater. International Journal of Hydrogen Energy. 30: 1535-1542.
- Van Ginkel, S., and Logan, B. 2005. Increased biological hydrogen production with reduced organic loading. Water Res. 39: 3819-3826.
- Wang, B., Wan, W., and Wang, J. 2008. Inhibitory effect of ethanol, acetic acid, propionic acid and butyric acid on fermentative hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy. 33: 7013-7019.
- Wu, S.Y., Hung, C.H., Lin, C.Y., Lin, P.J., Lee, K.S., Lin, C.N., Chang, F.Y., and Chang, J.S. 2008. HRT-dependent hydrogen production and bacterial community structure of mixed anaerobic microflora in suspended, granular and immobilized sludge systems using glucose as the carbon substrate. International Journal of Hydrogen Energy. 33: 1542-1549.
- Zhang, T., Liu, H., and Fang HHP. 2003. Biohydrogen production from starch in wastewater under thermophilic conditions. J. Environ Manag. 69: 149-156.
- Zhang, Z.P., Show, K.Y., Tay, J.H., Liang, D.T., Lee, D.J., and Jiang, W.J. 2006. Effect of hydraulic retention time on biohydrogen production and anaerobic microbial community. Process Biochemistry. 41: 2118-2123.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการทดลองค่าซีไอดีและกรดไขมันระเหย

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองค่าซีไอดีและปริมาณกรดไขมันระเหยในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง

วันที่	จำนวน (ชม.)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)	กรดอะซิติก (มิลลิโมลาร์)	กรดไพรูโวนิก (มิลลิโมลาร์)	กรดบิวทิริก (มิลลิโมลาร์)
16/09/53	0	5013	3.18	0.04	0.00
17/09/53	24	4533	5.15	0.54	1.05
18/09/53	48	4553	5.59	0.81	1.07
19/09/53	72	4560	5.94	0.99	1.11
20/09/53	96	4543	5.89	1.44	1.01
21/09/53	120	4496	5.90	1.69	1.09
22/09/53	144	4556	5.90	1.76	1.10
23/09/53	168	4556	5.90	1.76	1.10
24/09/53	192	4556	5.90	1.76	1.10

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองค่าซีไอดีและปริมาณกรดไขมันระเหยในกระบวนการหมักแบบใช้แสง

วันที่	จำนวน (ชม.)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)	กรดอะซิติก (มิลลิโมลาร์)	กรดโพไพโรนิก (มิลลิโมลาร์)	กรดบิวทิริก (มิลลิโมลาร์)
25/09/53	0	4514	5.70	1.69	1.13
26/09/53	24	3843	5.39	1.65	2.16
27/09/53	48	3698	4.56	1.62	2.47
28/09/53	72	3477	4.11	1.60	2.00
29/09/53	96	3480	3.30	1.56	1.95
30/09/53	120	3480	3.20	1.53	1.91

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองค่าซีไอดีและปริมาณกรดไขมันระเหยในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5

วันที่	จำนวน (ชม.)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)	กรดอะซิติค (มิลลิโมลาร์)	กรดไพรูวอิก (มิลลิโมลาร์)	กรดบิวทิริก (มิลลิโมลาร์)
06/07/53	0	5228	1.00	0.05	0.03
07/07/53	24	4854	4.63	0.14	0.10
08/07/53	48	4840	7.60	0.28	0.10
09/07/53	72	4760	8.48	0.48	7.79
10/07/53	96	4654	10.73	0.82	9.20
11/07/53	120	4548	11.14	2.38	11.15
12/07/53	144	4321	11.87	4.49	11.54
13/07/53	168	4334	13.22	4.45	11.72
14/07/53	192	4329	13.25	4.45	11.76

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองค่าซีไอดีและปริมาณกรดไขมันระเหยในกระบวนการหมักแบบใช้แสงที่นำออกค่าพีเอชเท่ากับ 5

วันที่	จำนวน (ชม.)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)	กรดอะซิติค (มิลลิโมลาร์)	กรดโพไพโรนิก (มิลลิโมลาร์)	กรดบิวทิริก (มิลลิโมลาร์)
15/07/53	0	4295	12.46	4.37	11.67
16/07/53	24	3624	12.06	4.31	11.61
17/07/53	48	3495	11.87	4.29	11.59
18/07/53	72	3220	11.64	4.24	11.52
19/07/53	96	3218	10.65	4.22	11.49
20/07/53	120	3218	10.46	4.19	11.46

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองค่าซีไอดีและปริมาณกรดไขมันระเหยในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6

วันที่	จำนวน (ชม.)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)	กรดอะซิติก (มิลลิโมลาร์)	กรดโพรไพโอนิค (มิลลิโมลาร์)	กรดบิวทิริก (มิลลิโมลาร์)
06/07/53	0	5097	3.04	0.04	0.06
07/07/53	24	4763	4.82	0.12	0.15
08/07/53	48	4558	6.17	4.84	6.43
09/07/53	72	4514	7.38	8.06	8.55
10/07/53	96	4497	7.15	7.59	8.17
11/07/53	120	4476	12.41	7.68	8.32
12/07/53	144	4498	14.81	7.17	9.29
13/07/53	168	4509	15.29	8.12	11.72
14/07/53	192	4481	15.33	8.19	11.91

ตารางที่ ก-6 ผลการทดลองค่าซีไอดีและปริมาณกรดไขมันระเหยในกระบวนการหมักแบบใช้แสงที่นำออกค่าพีเอชเท่ากับ 6

วันที่	จำนวน (ชม.)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)	กรดอะซิติก (มิลลิโมลาร์)	กรดโพรไพโอนิค (มิลลิโมลาร์)	กรดบิวทิริก (มิลลิโมลาร์)
15/07/53	0	4406	15.26	8.05	11.88
16/07/53	24	3764	15.12	7.96	11.88
17/07/53	48	3667	14.86	7.82	11.85
18/07/53	72	3418	14.55	7.80	11.82
19/07/53	96	3340	14.51	7.79	11.82
20/07/53	120	3340	14.44	7.78	11.81

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-7 ผลการทดลองค่าซีไอดีและปริมาณกรดไขมันระเหยในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7

วันที่	จำนวน (ชม.)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)	กรดอะซิติก (มิลลิโมลาร์)	กรดโพรไพโอนิค (มิลลิโมลาร์)	กรดบิวทิริก (มิลลิโมลาร์)
11/10/53	0	4946	3.76	0.84	0.62
12/10/53	24	4587	8.57	4.63	4.80
13/10/53	48	4522	10.19	8.79	4.92
14/10/53	72	4530	13.14	10.75	5.04
15/10/53	96	4556	15.53	13.78	5.61
16/10/53	120	4582	16.74	15.21	5.57
17/10/53	144	4517	16.75	15.21	5.59
18/10/53	168	4517	16.75	15.21	5.58
19/10/53	192	4517	16.76	15.22	5.57

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-8 ผลการทดลองค่าซีไอดีและปริมาณกรดไขมันระเหยในกระบวนการหมักแบบใช้แสงที่นำออกค่าพีเอชเท่ากับ 7

วันที่	จำนวน (ชม.)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)	กรดอะซิติก (มิลลิโมลาร์)	กรดโพรไพโอนิค (มิลลิโมลาร์)	กรดบิวทิริก (มิลลิโมลาร์)
20/10/53	0	4435	16.33	15.21	5.53
21/10/53	24	3886	15.93	15.19	5.52
22/10/53	48	3647	15.60	15.15	5.51
23/10/53	72	3539	15.54	15.13	5.46
24/10/53	96	3376	15.45	15.12	5.44
25/10/53	120	3376	15.45	15.12	5.44

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-9 ผลการทดลองค่าซีไอดีและปริมาณกรดไขมันระเหยในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่อุณหภูมิ 35 °ซ

วันที่	จำนวน (ชม.)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)	กรดอะซิติก (มิลลิโมลาร์)	กรดโพรไพโอนิก (มิลลิโมลาร์)	กรดบิวทิริก (มิลลิโมลาร์)
16/09/53	0	5701	5.61	2.68	0.28
17/09/53	24	5190	7.51	0.65	0.69
18/09/53	48	4933	6.26	1.82	0.64
19/09/53	72	4816	5.68	5.02	0.42
20/09/53	96	4824	15.48	22.98	1.59
21/09/53	120	4733	16.02	23.22	1.52
22/09/53	144	4730	17.23	24.66	2.00
23/09/53	168	4517	19.59	26.77	2.43
24/09/53	192	4453	21.24	27.34	4.30
25/09/53	216	4453	23.07	28.92	6.04
26/09/53	240	4453	23.54	30.62	7.31
27/09/53	264	4453	24.25	31.21	9.83
28/09/53	288	4453	24.67	31.52	10.97

ตารางที่ ก-10 ผลการทดลองค่าซีไอดีและปริมาณกรดไขมันระเหยในกระบวนการหมักแบบใช้แสงน้ำออกที่อุณหภูมิ 35 °ซ

วันที่	จำนวน (ชม.)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)	กรดอะซิติก (มิลลิโมลาร์)	กรดโพไพโรนิก (มิลลิโมลาร์)	กรดบิวทริก (มิลลิโมลาร์)
29/09/53	0	4357	22.58	29.52	10.13
30/09/53	24	3737	21.98	28.59	9.52
01/10/53	48	3416	20.43	26.23	8.44
02/10/53	72	3352	20.23	25.74	7.14
03/10/53	96	3375	19.93	24.13	6.33
04/10/53	120	3375	19.96	24.08	6.11

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-11 ผลการทดลองค่าซีไอดีและปริมาณกรดไขมันระเหยในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่อุณหภูมิ 55 °ซ

วันที่	จำนวน (ชม.)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)	กรดอะซิติก (มิลลิโมลาร์)	กรดโพรไพโอนิก (มิลลิโมลาร์)	กรดบิวทิริก (มิลลิโมลาร์)
24/10/53	0	5360	3.23	6.69	0.26
25/10/53	24	4830	8.22	7.35	0.89
26/10/53	48	4518	13.41	9.31	1.43
27/10/53	72	4268	16.51	10.32	2.03
28/10/53	96	4182	20.83	12.72	2.63
29/10/53	120	4157	23.81	13.23	3.42
30/10/53	144	4036	24.12	15.31	3.88
31/10/53	168	4074	26.36	15.37	5.66
01/11/53	192	3983	29.31	16.50	8.20
02/11/53	216	3880	30.58	17.29	12.49
03/11/53	240	3750	33.57	19.90	15.59
04/11/53	264	3750	35.94	20.03	17.40
05/11/53	288	3750	36.00	20.12	17.64

ตารางที่ ก-12 ผลการทดลองค่าซีไอดีและปริมาณกรดไขมันระเหยในกระบวนการหมักแบบใช้แสงน้ำออกที่อุณหภูมิ 55 °ซ

วันที่	จำนวน (ชม.)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)	กรดอะซิติค (มิลลิโมลาร์)	กรดโพไพโรนิก (มิลลิโมลาร์)	กรดบิวทริก (มิลลิโมลาร์)
05/11/53	0	3680	33.84	18.86	16.10
06/11/53	24	3136	31.59	17.97	15.84
07/11/53	48	2920	30.90	17.64	14.05
08/11/53	72	2756	28.95	16.96	13.90
09/11/53	96	2763	28.65	16.60	13.76
10/11/53	120	2763	28.25	16.32	12.50

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข

ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-1 ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
16/09/53	0	0	0	0.00	0.00	0.00
17/09/53	10	58	58	5.80	35.34	20.50
17/09/53	12	32	90	16.00	35.34	31.81
	13	26	116	26.00	35.34	40.99
	15	22	138	11.00	35.34	48.77
	17	40	178	16.00	35.34	62.91
	19	20	198	13.33	35.34	69.97
	20	10	208	6.67	35.34	73.51
18/09/53	37	4	212	0.24	31.97	74.79
	40	16	228	5.33	31.97	79.90
19/09/53	64	2	230	0.08	31.97	80.54
20/09/53	86	4	234	0.18	31.97	81.82
21/09/53	110	4	238	0.17	31.97	83.10
22/09/53	134	0	238	0.00	0.00	83.10
23/09/53	158	0	238	0.00	0.00	83.10
24/09/53	182	0	238	0.00	0.00	83.10

ตารางที่ ข-2 ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบใช้แสง

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
25/09/53	0	0	0	0.00	0.00	0.00
26/09/53	12	52	52	4.33	31.50	16.38
26/09/53	14	28	80	14.00	31.50	25.20
	17	20	100	6.67	31.50	31.50
	20	20	120	6.67	31.50	37.80
27/09/53	44	0	120	0.00	0.00	37.80
28/09/53	68	0	120	0.00	0.00	37.80
29/09/53	92	0	120	0.00	0.00	37.80
30/09/53	116	0	120	0.00	0.00	37.80

ตารางที่ ข-3 ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
06/07/53	0	0	0	0.00	0.00	0.00
07/07/53	10	17	17	1.70	69.90	11.88
07/07/53	12	13	30	6.50	69.90	20.97
	13	2	32	2.00	69.90	22.37
	17	20	52	5.00	69.90	36.35
	19	26	78	12.80	69.90	54.24
08/07/53	37	0	78	0.00	71.90	54.24
	38	0	78	0.00	71.90	54.24
	39	3	81	3.33	71.90	56.64
	40	3	84	2.50	71.90	58.43
	46	13	97	2.08	71.90	67.42
	47	22	119	21.66	71.90	83.00
	48	17	136	16.66	71.90	94.97
09/07/53	61.5	65	201	4.81	61.60	135.01
	63.5	88	289	44.17	61.60	189.43
	66.5	95	384	31.67	61.60	247.95

ตารางที่ ข-3 (ต่อ) ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
	68.5	40	424	20.42	61.60	273.10
	70	30	454	20.00	61.60	291.58
10/07/53	86	60	514	3.75	60.00	327.58
	88	32	546	15.84	60.00	346.58
	89	4	550	4.16	60.00	349.07
	92	12	562	4.17	60.00	356.57
11/07/53	110	62	624	3.43	72.30	401.15
	112	43	667	21.25	72.30	431.88
	114	17	684	8.34	72.30	443.93
	115	2	686	1.66	72.30	445.13
12/07/53	133.5	2	688	0.18	72.80	447.56
	137	26	714	7.38	72.80	466.36
	139	23	737	11.67	72.80	483.35
	143	35	772	8.75	72.80	508.83
13/07/53	161	0	772	0.00	0.00	508.83
14/07/53	185	0	772	0.00	0.00	508.83

ตารางที่ ข-4 ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบใช้แสงที่น้ำออกค่าพีเอชเท่ากับ 5

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
15/07/53	0	0	0	0.00	0.00	0.00
16/07/53	12	64	64	5.33	32.02	20.49
16/07/53	15	25	89	8.33	32.02	28.50
	17	20	109	10.00	32.02	34.90
	20	15	124	5.00	32.02	39.70
17/07/53	44	0	124	0.00	0.00	39.70
18/07/53	68	0	124	0.00	0.00	39.70
19/07/53	92	0	124	0.00	0.00	39.70
20/07/53	116	0	124	0.00	0.00	39.70

ตารางที่ ข-5 ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
06/07/53	0.0	0	0	0.00	0.00	0.00
07/07/53	10.0	15	15	1.50	69.10	10.37
07/07/53	11.0	20	35	20.00	69.10	24.19
	12.0	10	45	10.00	69.10	31.10
	13.0	15	60	15.00	69.10	41.46
	17.0	25	85	6.25	69.10	58.74
	18.0	20	105	20.00	69.10	72.56
	19.0	8	113	8.00	69.10	78.08
08/07/53	37.0	50	163	2.78	77.60	116.88
	38.0	10	173	10.00	77.60	124.64
	39.0	65	238	65.00	77.60	175.08
	40.0	0	238	0.00	77.60	175.08
	41.0	50	288	50.00	77.60	213.88
	43.0	0	288	0.00	77.60	213.88
	44.0	20	308	20.00	77.60	229.40
	46.0	0	308	0.00	77.60	229.40

ตารางที่ ข-5 (ต่อ) ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
	47	15	323	15.00	77.60	241.04
	48	10	333	10.00	77.60	248.80
09/07/53	61.5	18	351	1.33	68.00	261.04
	63.5	2	353	1.00	68.00	262.40
	66.5	0	353	0.00	68.00	262.40
	68.5	4	357	2.00	68.00	265.12
	70	0	357	0.00	68.00	265.12
10/07/53	86	0	357	0.00	64.70	265.12
	88	0	357	0.00	64.70	265.12
	89	0	357	0.00	64.70	265.12
	92	0	357	0.00	64.70	265.12
11/07/53	110	0	357	0.00	65.70	265.12
	112	9	366	4.50	65.70	271.04
	114	0	366	0.00	65.70	271.04
	115	0	366	0.00	65.70	271.04
12/07/53	133.5	0	366	0.00	65.70	271.04

ตารางที่ ข-6 ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบใช้แสงที่น้ำออกค่าพีเอชเท่ากับ 6

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
15/07/53	0	0	0	0.00	0.00	0.00
16/07/53	10	95	95	9.50	33.40	31.73
16/07/53	13	20	115	6.67	33.40	38.41
	17	15	130	3.75	33.40	43.42
	20	10	140	3.33	33.40	46.76
17/07/53	44	0	140	0.00	0.00	46.76
18/07/53	68	0	140	0.00	0.00	46.76
19/07/53	92	0	140	0.00	0.00	46.76
20/07/53	116	0	140	0.00	0.00	46.76

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-7 ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่ค่าพีเอชเท่ากับ 7

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
11/10/53	0	0	0	0.00	0.00	0.00
12/10/53	11	50	50	4.55	55.00	27.50
12/10/53	12	24	74	24.00	55.00	40.70
	13	94	168	94.00	55.00	92.40
	14	96	264	96.00	55.00	145.20
	15	30	294	30.00	55.00	161.70
	17	4	298	2.00	55.00	163.90
	20	4	302	1.33	55.00	166.10
13/10/53	44	0	302	0.00	0.00	166.10
14/10/53	68	0	302	0.00	0.00	166.10
15/10/53	92	0	302	0.00	0.00	166.10
16/10/53	116	0	302	0.00	0.00	166.10
17/10/53	140	0	302	0.00	0.00	166.10

ตารางที่ ข-8 ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบใช้แสงที่นำออกค่าพีเอชเท่ากับ 7

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
20/10/53	0	0	0	0.00	0.00	0.00
21/10/53	12	45	45	3.75	35.00	15.75
21/10/53	15	45	90	15.00	35.00	31.50
	18	25	115	8.33	35.00	40.25
	20	10	125	5.00	35.00	43.75
22/10/53	44	0	125	0.00	0.00	43.75
23/10/53	68	0	125	0.00	0.00	43.75
24/10/53	92	0	125	0.00	0.00	43.75
25/10/53	116	0	125	0.00	0.00	43.75

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-9 ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่อุณหภูมิ 35 °ซ

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
16/09/53	0	0	0	0.00	0.00	0.00
17/09/53	11	95	95	8.64	70.00	66.50
17/09/53	12	95	190	95.00	70.00	133.00
	13	30	220	30.00	70.00	154.00
	14	35	255	35.00	70.00	178.50
	15	35	290	35.00	70.00	203.00
	16	30	320	30.00	70.00	224.00
	18	35	355	23.33	70.00	248.50
	19	25	380	16.67	70.00	266.00
18/09/53	37	40	420	2.22	72.40	294.96
	39	20	440	10.00	72.40	309.44
	41	20	460	10.00	72.40	323.92
	43	15	475	7.50	72.40	334.78
19/09/53	61	15	490	0.83	68.60	345.07
	64	15	505	5.00	68.60	355.36
	66	10	515	5.00	68.60	362.22

ตารางที่ ข-9 (ต่อ) ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่อุณหภูมิ 35 °ซ

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
	68	10	525	5.00	68.60	369.08
20/09/53	83	105	630	7.00	70.30	442.90
	86	46	676	15.17	70.30	474.88
	88	16	691	7.75	70.30	485.78
21/09/53	110	26	717	1.16	70.30	503.70
	115	5	722	1.11	70.30	507.22
22/09/53	137	10	732	0.44	64.50	513.67
	139	10	742	5.00	64.50	520.12
23/09/53	160	15	757	0.71	64.50	529.79
24/09/53	184	0	757	0.00	0.00	529.79

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-10 ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบใช้แสงน้ำออกที่อุณหภูมิ 35 °ซ

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
29/09/53	0	0	0	0.00	0.00	0.00
30/09/53	12	65	65	5.42	32.80	21.32
01/10/53	15	25	90	8.33	32.80	29.52
	17	25	115	12.50	32.80	37.72
	20	20	135	6.67	32.80	44.28
02/10/53	44	0	135	0.00	0.00	44.28
03/10/53	68	0	135	0.00	0.00	44.28
04/10/53	92	0	135	0.00	0.00	44.28
05/10/53	116	0	135	0.00	0.00	44.28

ตารางที่ ข-11 ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่อุณหภูมิ 55 °ซ

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
24/10/53	0	0	0	0.00	0.00	0.00
25/10/53	10	100	100	10.00	74.60	74.60
	13	35	135	14.00	74.60	100.71
	14	15	150	15.00	74.60	111.90
	14	30	180	60.00	74.60	134.28
	15	20	200	20.00	74.60	149.20
	18	10	210	4.00	74.60	156.66
	19	35	245	23.33	74.60	182.77
26/10/53	37	70	315	3.89	68.90	231.00
	38	35	350	35.00	68.90	255.12
	39	25	375	25.00	68.90	272.34
	40	50	425	50.00	68.90	306.79
	43	25	450	10.00	68.90	324.02
27/10/53	63	20	470	1.00	68.90	337.80
	65	30	500	12.00	68.90	358.47
28/10/53	84	25	525	1.35	70.30	376.04

ตารางที่ ข-11 (ต่อ) ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงที่อุณหภูมิ 55 °ซ

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
	87	35	560	11.67	70.30	400.65
	88	70	630	46.67	70.30	449.86
29/10/53	110	35	665	1.59	70.30	474.46
	116	10	675	1.67	70.30	481.49
30/10/53	133	65	740	3.82	67.80	525.56
	135	50	790	33.33	67.80	559.46
	136	70	860	70.00	67.80	606.92
	137	15	875	10.00	67.80	617.09
	138	15	890	15.00	67.80	627.26
31/10/53	160	35	925	1.63	67.80	650.99
01/11/53	187	30	955	1.11	72.50	672.74
02/11/53	206	50	1005	2.63	72.50	708.99
	207	30	1035	30.00	72.50	730.74
03/11/53	232	100	1135	3.92	72.50	803.24
	234	65	1200	32.50	72.50	850.37
04/11/53	258	0	1200	0.00	0.00	850.37

ตารางที่ ข-12 ผลการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบใช้แสงน้ำออกที่อุณหภูมิ 55 °ซ

วันที่	จำนวน (ชม.)	ก๊าซชีวภาพ (มล.)	ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ (มล./ชม.)	ไฮโดรเจน (%)	ก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)
05/11/53	0	0	0	0.00	0.00	0.00
06/11/54	12	55	55	4.58	37.20	20.46
	15	32	87	10.67	37.20	32.36
	17	26	113	13.00	37.20	42.04
	20	25	138	8.33	37.20	51.34
07/11/53	44	0	138	0.00	0.00	51.34
08/11/53	68	0	138	0.00	0.00	51.34
09/11/53	93	0	138	0.00	0.00	51.34
10/11/53	116	0	138	0.00	0.00	51.34



ภาคผนวก ค

กราฟสมการ Modified Gompertz

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Dark Fermentation

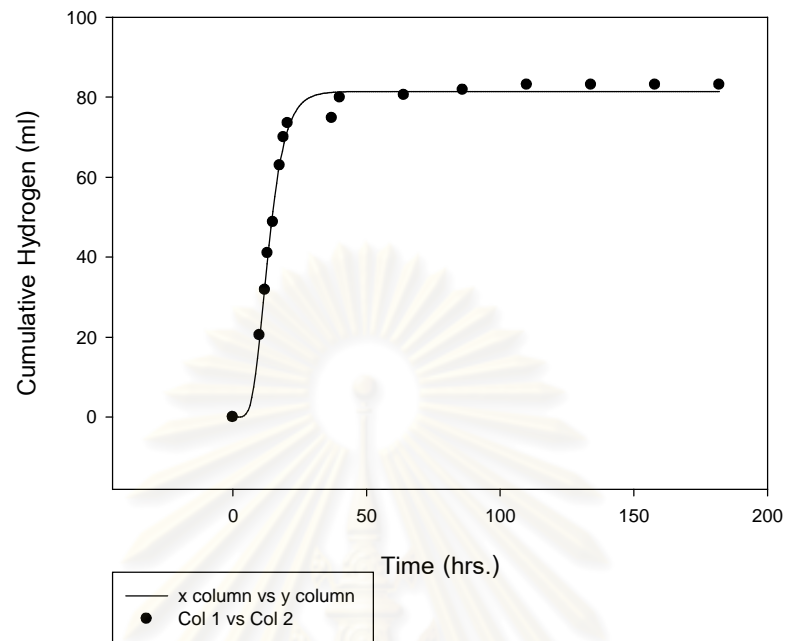
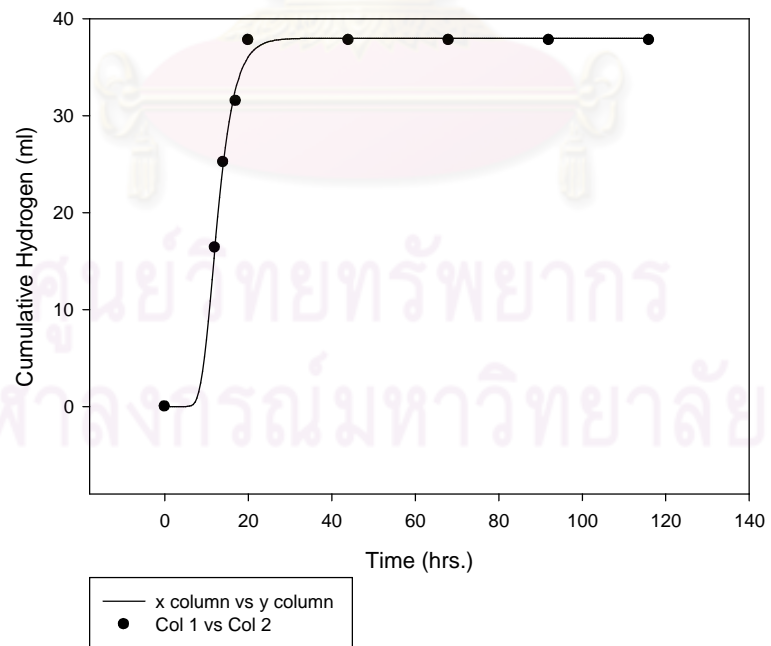


Photo Fermentation



Dark Fermentation at pH 5

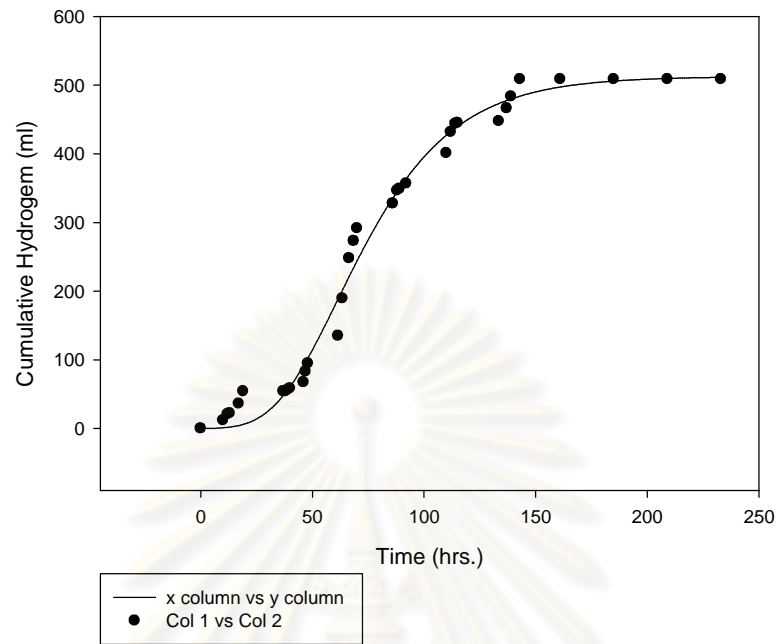
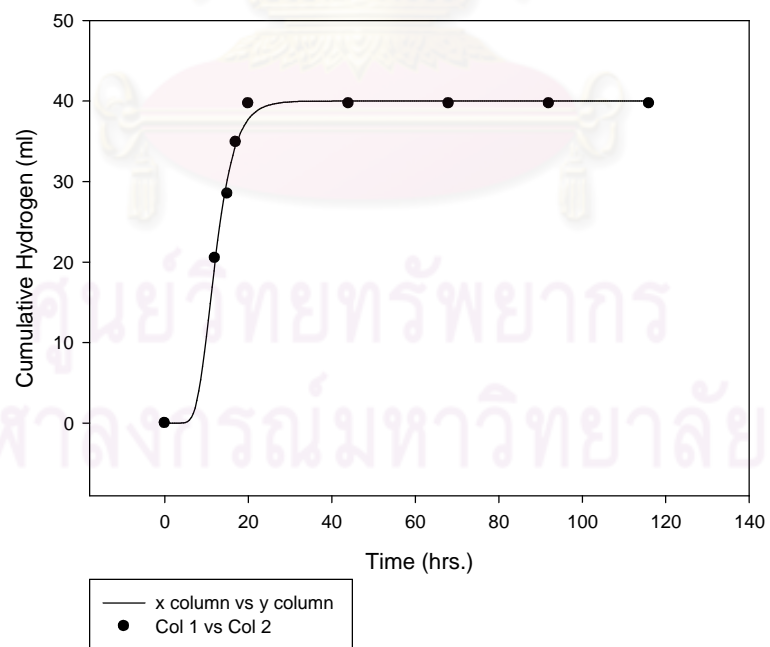


Photo Fermentation at pH 5



Dark Fermentation at pH 6

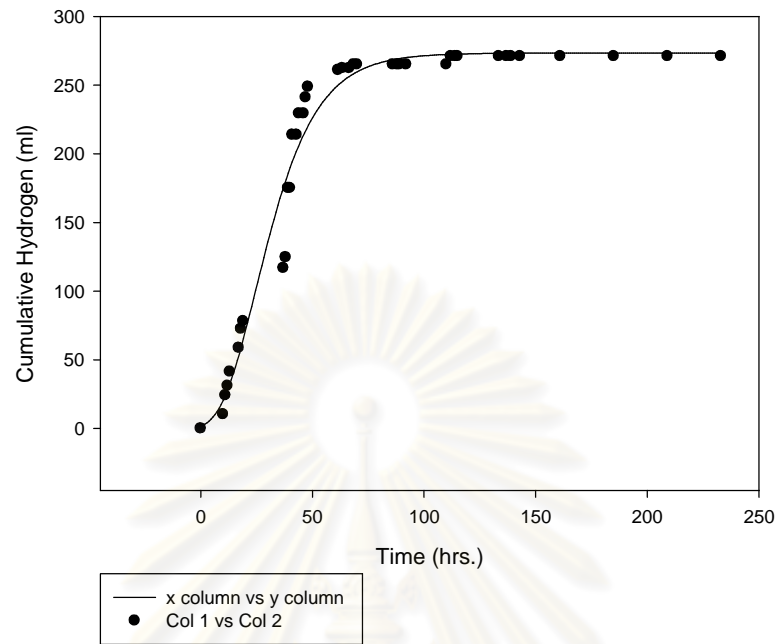
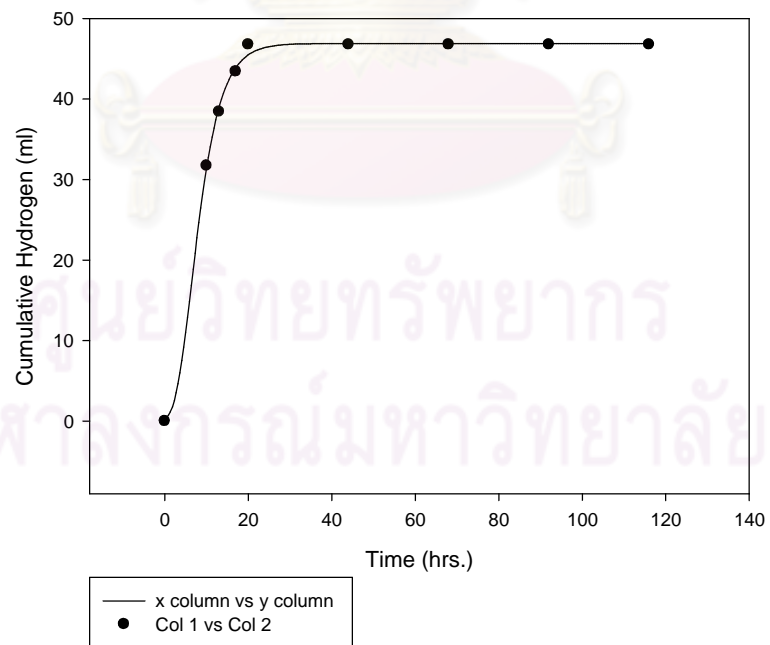


Photo Fermentation at pH 6



Dark Fermentation at pH 7

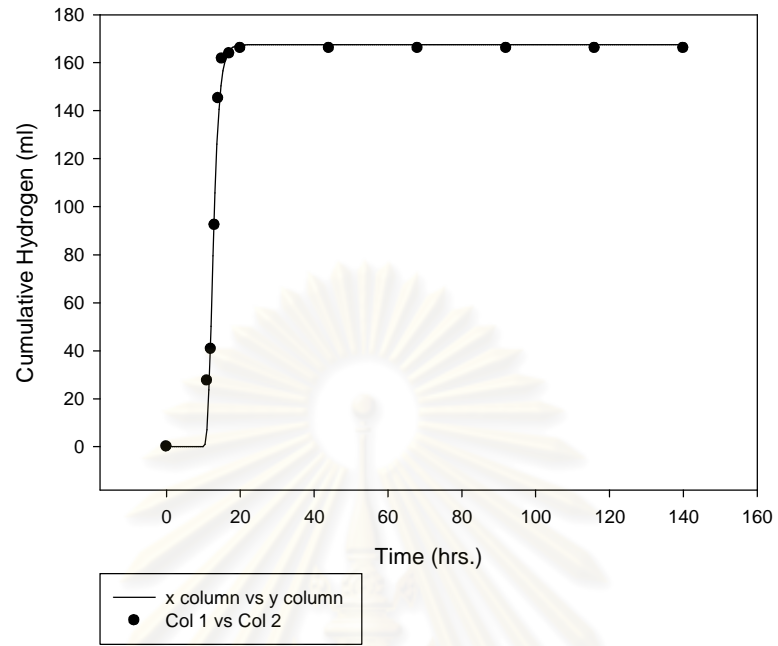
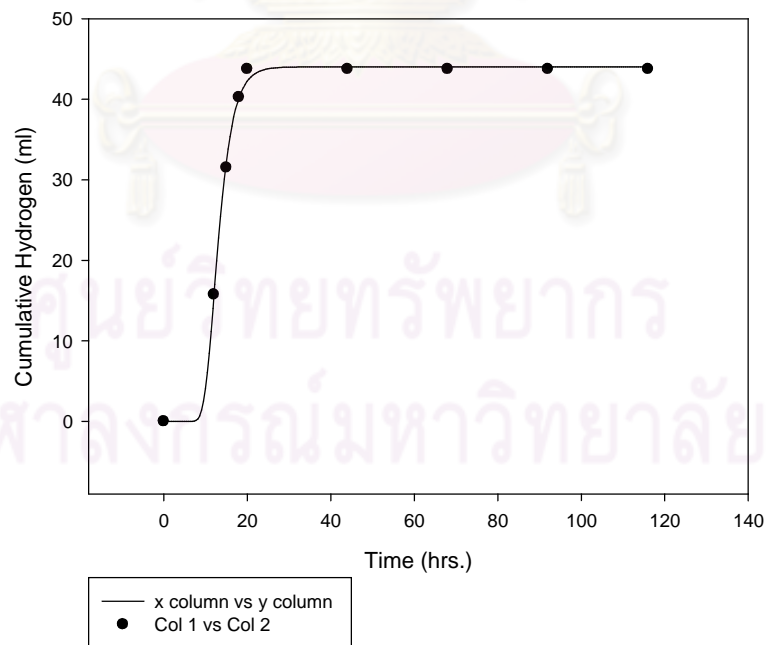


Photo Fermentation at pH 7



Dark Fermentation at Temp 35 °C

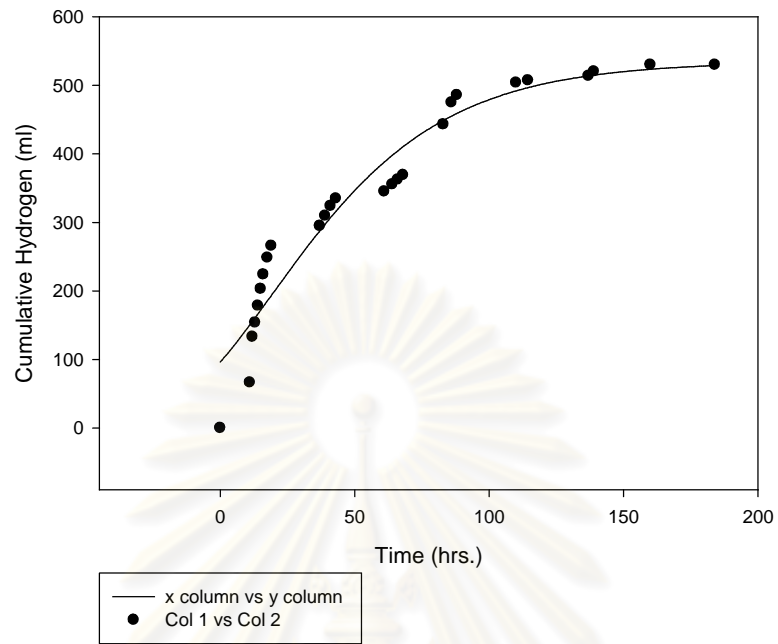
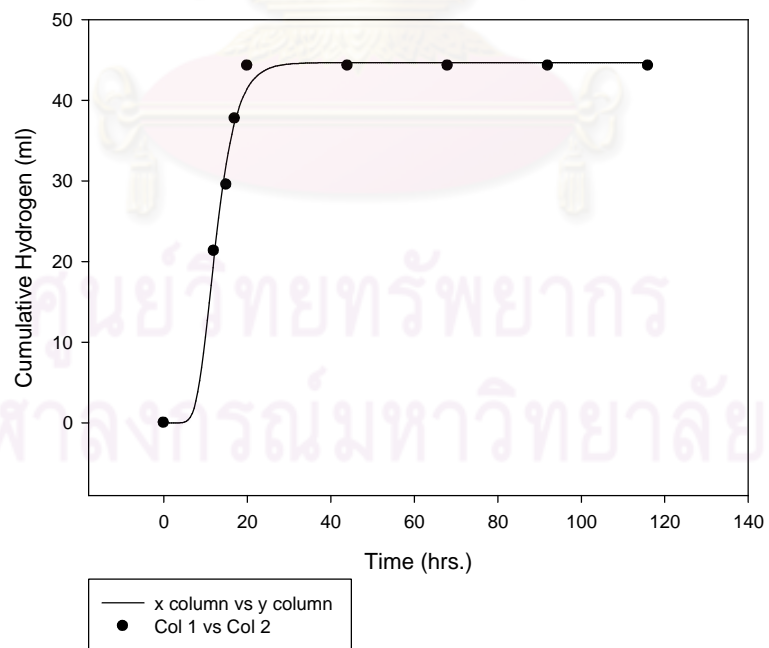


Photo Fermentation at Temp 35 °C



Dark Fermentation at Temp 55 °C

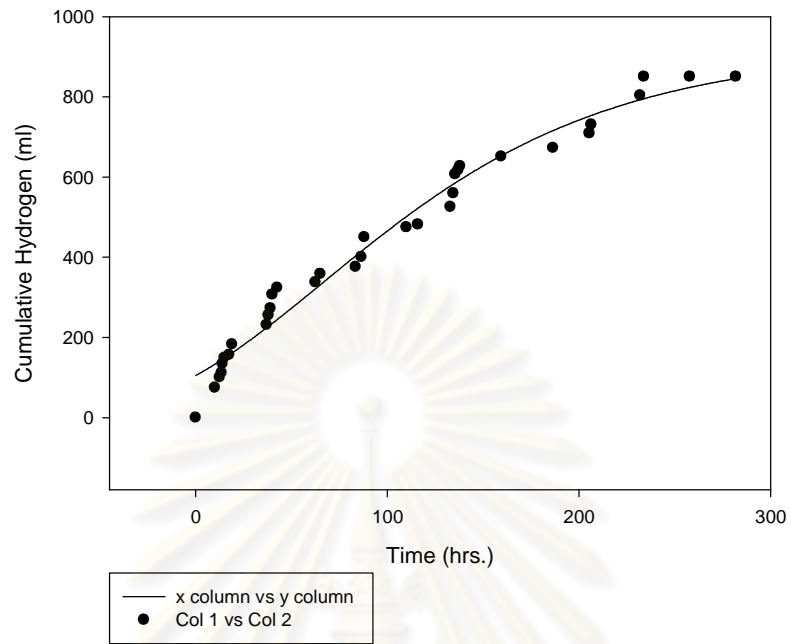
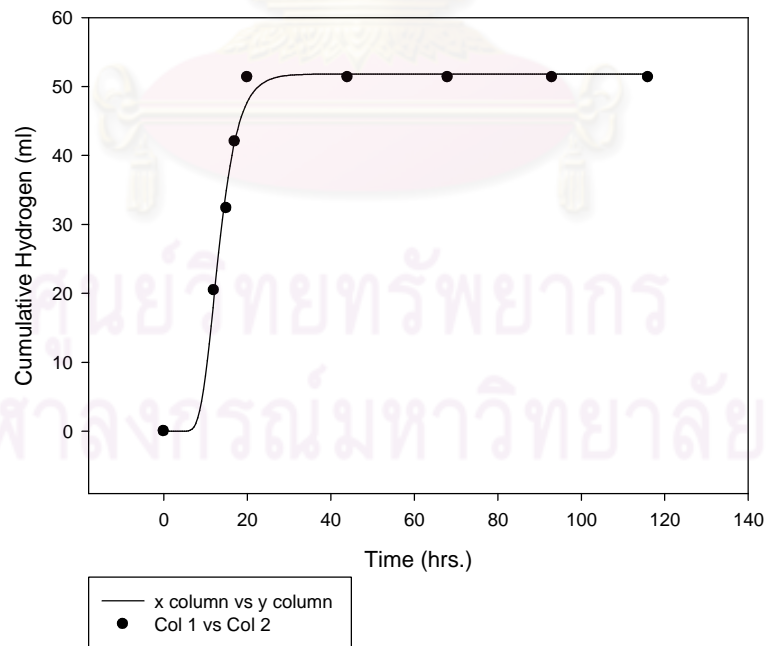


Photo Fermentation at Temp 55 °C



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอาทิตยา มิตรจิตร เกิดเมื่อวันที่ 3 พฤศจิกายน พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนหัวหิน เมื่อปี พ.ศ. 2546 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาตรีในสาขาวิชาสาธารณสุขศาสตร์ เอกอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จนสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ในปีการศึกษา 2549 จากนั้นจึงได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี 2550 และได้มีผลงานวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่เรื่อง “การผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง ด้วยกระบวนการหมักต่อเนื่องแบบไม่ใช้แสงและใช้แสง” ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 10 ที่จัดขึ้นโดยสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย ณ โรงแรมบีพีสมิหลา บีชแอนดีร์สอร์ท จังหวัดสงขลา ระหว่างวันที่ 23-25 มีนาคม พ.ศ. 2554

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย