

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากเศษอาหารโดยการหมักแบบไร้ออกซิเจน



นางสาวลลนา ใจทาลี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

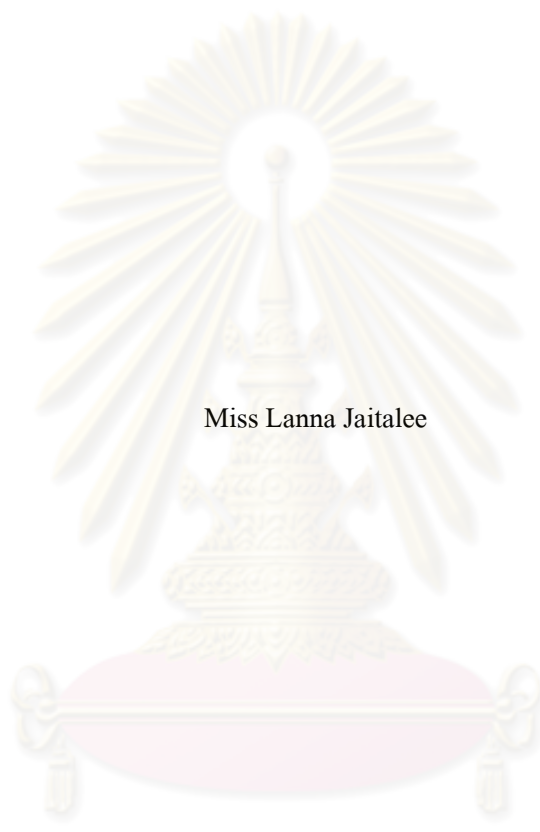
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIOHYDROGEN PRODUCTION FROM FOOD WASTE
BY ANAEROBIC FERMENTATION



Miss Lanna Jaitalee

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากเศษอาหารโดยการหมัก
แบบไร้ออกซิเจน

โดย

นางสาวลานนา ใจทาสี

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

อาจารย์ ดร. สมชาย คารารัตน์


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

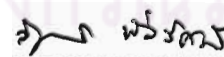

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชเรศ ศรีสถิตย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ขวาลภาฤทธิ์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(อาจารย์ ดร. สมชาย คารารัตน์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณะ ฟุ้งรัมย์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญศรี วัลลະณูณ)

ลานนา ใจทาลี : การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากเศษอาหารโดยการหมักแบบ
ไร้ออกซิเจน (BIOHYDROGEN PRODUCTION FROM FOOD WASTE BY ANAEROBIC
FERMENTATION) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์,
อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : อาจารย์ ดร. สมชาย คารารัตน์, 221 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพและผลของปัจจัยที่มี
ต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จำพวกเศษผักจากตลาดสด โดย
ศึกษาผลของความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้น 3 ค่า ได้แก่ ร้อยละ 2 3 และร้อยละ 5 ด้วย
การทดลองแบบที่ละเทโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ขนาด 1.45 ลิตร จำนวน 3 ถัง ที่มีการ
ควบคุมค่าพีเอชคงที่เท่ากับ 5.5 และทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ผลการทดลองพบว่าชุดการ
ทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3 มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสม
และไฮโดรเจนยิลด์สูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 459.7 มล. และ 15.3 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ที่เข้าระบบ
ตามลำดับ ก๊าซชีวภาพมีองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับร้อยละ 30.9 โดยไม่พบ
องค์ประกอบของก๊าซมีเทนตลอดการทดลอง เมื่อศึกษาผลของเวลากักพักทางศาสตร์โดยใช้
ระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนที่ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ขนาด 1.45 ลิตร
จำนวน 2 ถัง โดยเป็นถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและมีเทนอย่างละ 1 ถัง น้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซ
ไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทนเพื่อบำบัดมลสารที่เหลืออยู่ให้มีค่าลดลง ซึ่งจากการ
ปรับเปลี่ยนเวลากักพักทางศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 3 และ 2 วัน โดยให้เวลา
กักพักทางศาสตร์ของถังหมักก๊าซมีเทนคงที่เท่ากับ 15 วัน เติกระบบที่อุณหภูมิห้องและควบคุม
ค่าพีเอชของถังหมักทั้ง 2 ถังให้เท่ากับ 5.5 และ 7.0-8.0 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าถังหมักก๊าซ
ไฮโดรเจนมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีทั้งหมด ซีโอดีกรอง ของแข็งและของแข็งระเหยได้ทั้งหมด
อยู่ในช่วงร้อยละ 14.95-25.97 10.51-32.78 38.57-52.76 และ 48.53-63.26 ตามลำดับ องค์ประกอบ
ของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพอยู่ในช่วง 17.21-20.34 องค์ประกอบหลักของกรดไขมันระเหย
ง่ายทั้งหมดในน้ำเสียคือกรดอะซิติกและบิวไทรริกซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 25.12-50.14 และ 16.49-
38.68 ตามลำดับ โดยพบว่าเมื่อเวลากักพักทางศาสตร์ลดลงมีผลทำให้ไฮโดรเจนยิลด์เพิ่มขึ้นและ
ที่เวลากักพักทางศาสตร์เท่ากับ 2 วัน มีไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 15.03 มล./ก.ของแข็ง
ระเหยได้ที่ถูกกำจัด ถังหมักก๊าซมีเทนในแต่ละชุดการทดลองมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนและ
มีเทนยิลด์อยู่ในช่วง 66.79-70.52 และ 34.42-114.06 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ที่ถูกกำจัด ตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่อนิสิต.....ลานนา ใจทาลี.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....ลายมือชื่ออ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา.....2552.....ลายมือชื่ออ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

4970538821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : BIOHYDROGEN / VEGETABLE WASTE / MARKET WASTE / ORGANIC WASTE / CONTINUOUS STIRRED-TANK REACTERS

LANNA JAITLEE : BIOHYDROGEN PRODUCTION FROM FOOD WASTE BY ANAEROBIC FERMENTATION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. ORATHAI CHAVALPARIT, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : SOMCHAI DARARAT, Ph.D., 221 pp.

This research aim to studied the biohydrogen production from vegetable based fresh market waste by anaerobic fermentation in batch and continuous experiments. The batch tests were conducted at the three substrate concentrations of 2, 3 and 5% TVS under the room temperature and pH 5.5 to evaluate the effect on biohydrogen production using the three continuous stirred-tank reactors (CSTRs). The results showed the optimum initial substrate concentration was found to be 3% TVS, giving the highest hydrogen accumulation and hydrogen yield of 459.7 ml and 15.3 ml/g TVS added, respectively. The biogas had a hydrogen content of 30.9% and no methane was detected along the experiment. The effect of the hydraulic retention time (HRT) on biohydrogen fermentation was investigated by varying HRT of 5, 3 and 2 days using two-stage fermentation process with the combined of acidogenic bioreactor (pH 5.5) and methanogenic bioreactor (constant HRT of 15 days, pH 7.0-8.0). The liquid effluent from the first-stage was stabilized in following the second-stage methanogenic bioreactor. The results showed at all HRT of acidogenic bioreactor, the total COD, soluble COD, TS and TVS removal efficiencies ranged from 14.95-25.97%, 10.51-32.78%, 38.57-52.76% and 48.53-63.26%, respectively. The biogas had a hydrogen content in ranged 17.21-20.34% and the major of the volatile fatty acid were acetic acid (50.14-25.12%) and butyric acid (16.49-38.68%). The results suggest when the HRT shorten from 5, 3 and 2 days, the hydrogen yield increased and reached a high level of 15.03 ml/g TVS removed at HRT of 2 days, additional the methane yield obtained from methanogenic bioreactor ranged from 34.42-114.06 ml/g TVS with 66.79-70.52% of methane content in the biogas.

Department : ...Environmental Engineering...	Student's Signature : <u>Lanna Jaitalee</u>
Field of Study : .Environmental Engineering..	Advisor's Signature : <u>[Signature]</u>
Academic Year :2009.....	Co-Advisor's Signature : <u>[Signature]</u>

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่งสำหรับเมตตาจิตที่ท่านอาจารย์ได้ให้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ตลอดการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม อาจารย์ ดร.สมชาย คารารัตน์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ รวมทั้งถ่ายทอดประสบการณ์ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งตลอดการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. ธารศ ศรีสถิตย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ ฟิงรัมย์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เพ็ญศรี วัฒนฉญาณ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา คำแนะนำและความช่วยเหลือตลอดการศึกษาและทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยทุกท่านที่ได้ให้การช่วยเหลือ อำนวยความสะดวกและเอื้อเฟื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ตลอดระยะเวลาของการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณเพื่อนๆ ทั้งเพื่อนในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เพื่อนร่วมโครงการภาคบัณฑิต เพื่อนร่วมสถาบันฯ สำหรับมิตรภาพที่ดี ความช่วยเหลือ คำปรึกษาและกำลังใจที่มีให้ผู้ทำวิทยานิพนธ์เสมอมา

ขอขอบคุณผู้จัดการและแม่ค้าตลาดสดทรัพย์จันทร์ผ้านทุกท่านในการเอื้อเฟื้อข้อมูลเพื่อใช้ในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้

ขอขอบพระคุณครูห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ได้กรุณาให้ความรู้ ความช่วยเหลือเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือวิเคราะห์และอุปกรณ์ต่างๆ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ได้อำนวยความสะดวกด้านเอกสารต่างๆ ทำให้การทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนจากทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและการสนับสนุนด้านเครื่องมือและอุปกรณ์จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ผู้ทำวิทยานิพนธ์ต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้ด้วย

สุดท้ายนี้บุคคลที่ผู้ทำวิทยานิพนธ์อยากจะขอขอบพระคุณอย่างสูงสุดคือ บิดามารดาและครอบครัวของผู้ทำวิทยานิพนธ์ สำหรับความรักความเอาใจใส่ การเลี้ยงดูและอบรมสั่งสอน รวมทั้งการส่งเสริมในทุกด้านแก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งช่วยเหลือ สนับสนุนและให้กำลังใจที่มีค่าอันยิ่งใหญ่แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์ให้สามารถทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนสำเร็จลุล่วง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 แหล่งพลังงานและพลังงานทดแทน.....	5
2.1.1 ปัญหาสิ่งแวดล้อมและผลกระทบจากการใช้พลังงานเชื้อเพลิง.....	6
2.1.2 พลังงานทดแทนจากขยะและพลังงานจากก๊าซไฮโดรเจน.....	6
2.2 ขยะชุมชนในประเทศไทย.....	8
2.2.1 สถานการณ์ปริมาณขยะชุมชน.....	8
2.2.2 องค์ประกอบของขยะชุมชน.....	8
2.3 ไฮโดรเจน.....	10
2.3.1 ลักษณะสมบัติของไฮโดรเจน.....	10
2.3.2 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซไฮโดรเจน.....	11
2.3.2.1 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำและสารเคมี ที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ.....	11
2.3.2.2 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน....	13
2.3.2.3 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีทางชีวภาพ.....	14
2.4 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน.....	16

2.4.1 ประเภทระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน.....	17
2.4.1.1 ระบบบำบัดแบบชั้นตอนเดียว.....	17
2.4.1.2 ระบบบำบัดแบบสองชั้นตอน.....	19
2.4.2 แบบที่เรียที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน.....	20
2.4.2.1 แบบที่เรียที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน.....	20
2.4.2.2 แบบที่เรียที่สร้างก๊าซมีเทน.....	26
2.4.3 ขั้นตอนของการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน.....	27
2.4.3.1 ไฮโดรไลซิส.....	27
2.4.3.2 การสร้างกรด.....	28
2.4.3.3 การสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ.....	28
2.4.3.4 การสร้างก๊าซมีเทน.....	28
2.4.4 ตัวอย่างผลของความดันพาร์เซียลของก๊าซไฮโดรเจน	
ที่มีต่อการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายจากกลูโคส.....	30
2.4.4.1 ความดันพาร์เซียลของก๊าซไฮโดรเจนต่ำ.....	30
2.4.4.2 ความดันพาร์เซียลของก๊าซไฮโดรเจนสูง.....	31
2.5 การประยุกต์ใช้การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนในการผลิตก๊าซ	
ไฮโดรเจนชีวภาพ.....	34
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบ	
ไร้ออกซิเจน.....	40
2.6.1 ปัจจัยด้านการทำงาน.....	40
2.6.2 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม.....	42
2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	57

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	71
3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	74
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	75
3.3.1 ชุดระบบแบบกวนสมบูรณ์.....	75
3.3.1.1 รายละเอียดของอุปกรณ์ในชุดระบบแบบกวนสมบูรณ์.....	77
3.3.2 อุปกรณ์ในการเตรียมขยะสังเคราะห์และหัวเชื้อจุลินทรีย์.....	80

4.3.3	ชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้ เริ่มต้นเท่ากับ 5.....	111
4.3.4	เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากชุดการทดลองที่มีร้อยละความ เข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ.....	115
4.4	ผลการทดลองที่ 2 การศึกษาผลของเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่มีต่อ ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสด	119
4.4.1	การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารในระหว่างการผลิต ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสดด้วยระบบ ต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน.....	119
4.4.2	การศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจาก ขยะอินทรีย์จากตลาดด้วยระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน.....	127
4.4.3	สภาวะการทำงานของระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนในการผลิต ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสด.....	141
4.4.3.1	กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด.....	141
4.4.3.2	สภาพต่างทั้งหมด.....	148
4.4.3.3	สัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมด.....	150
4.4.3.4	ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน.....	151
4.4.3.5	อุณหภูมิ.....	152
4.4.3.6	ค่าพีเอช.....	154
4.4.4	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะ อินทรีย์จากตลาดสดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมัก ก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	156
4.5	ศักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสด โดยการหมักแบบไร้ออกซิเจน.....	161
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ		
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	162
5.1.1	การทดลองที่ 1.....	162
5.1.2	การทดลองที่ 2.....	163
5.2	ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้.....	163

5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติม.....	164
รายการอ้างอิง.....	165
ภาคผนวก.....	172
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	173
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	221



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 2.1	พลังงานและก๊าซที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ.....	7
ตารางที่ 2.2	ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน.....	17
ตารางที่ 2.3	ลักษณะสมบัติของแบคทีเรียบางกลุ่มในجنัส <i>Clostridium</i>	24
ตารางที่ 2.4	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซิสและเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง.....	27
ตารางที่ 2.5	การผลิตกรดไขมันระเหยง่ายจากกลูโคสที่ความดันพาร์เซียลของ ก๊าซไฮโดรเจนสูงและผลกระทบต่อระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน.....	33
ตารางที่ 2.6	ตัวอย่างของวิธีการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นที่ใช้ในการผลิต ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยใช้ระบบแบบไร้ออกซิเจน.....	38
ตารางที่ 2.7	ตัวอย่างเวลากักพักทางพลศาสตร์ที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ชีวภาพจากน้ำเสียประเภทต่างๆ โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์.....	41
ตารางที่ 2.8	ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย.....	42
ตารางที่ 2.9	องค์ประกอบของเซลล์แบคทีเรีย.....	48
ตารางที่ 2.10	ความเข้มข้นของไอออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีผลกระตุ้นและยับยั้ง แบคทีเรีย.....	51
ตารางที่ 2.11	ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากกลูโคส	53
ตารางที่ 2.12	ความเข้มข้นของไอออนของโลหะหนักที่มีผลยับยั้งแบคทีเรีย 50% ของถังย่อยไร้ออกซิเจน.....	54
ตารางที่ 2.13	ความเข้มข้นของซัลไฟด์และผลที่มีต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบ ไร้ออกซิเจน.....	55
ตารางที่ 3.1	รายละเอียดของการดำเนินงานวิจัย.....	72
ตารางที่ 3.2	ตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัย.....	74
ตารางที่ 3.3	อุปกรณ์ในชุดระบบแบบกวนสมบูรณ์.....	75
ตารางที่ 3.4	รายละเอียดของการทดลองแบบที่ละเท่าในการทดลองที่ 1.....	83
ตารางที่ 3.5	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์และความถี่ในการวิเคราะห์ของตัวอย่างน้ำเสีย และก๊าซชีวภาพ.....	88
ตารางที่ 3.6	วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในตัวอย่างน้ำเสียและก๊าซชีวภาพ.....	89
ตารางที่ 4.1	องค์ประกอบของขยะอินทรีย์จำพวกเศษผักจากตลาดสด.....	92
ตารางที่ 4.2	ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของขยะอินทรีย์สังเคราะห์ก่อนการเจือจาง	93

ตารางที่ 4.3	ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของหัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนและหลังการบำบัดด้วยความร้อน.....	95
ตารางที่ 4.4	อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์ด้วยความร้อนในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยใช้ระบบแบบไร้ออกซิเจนในงานวิจัยต่างๆ.....	101
ตารางที่ 4.5	ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของขยะอินทรีย์สังเคราะห์ภายหลังการเจือจางให้มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ.....	102
ตารางที่ 4.6	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนและค่าที่ได้จากกราฟที่สร้างจากสมการ Gompertz ที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2.....	103
ตารางที่ 4.7	สรุปค่าที่ได้จากการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ในชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2.....	105
ตารางที่ 4.8	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนและค่าที่ได้จากกราฟที่สร้างจากสมการ Gompertz ที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3.....	107
ตารางที่ 4.9	สรุปค่าที่ได้จากการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ในชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3.....	109
ตารางที่ 4.10	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนและค่าที่ได้จากกราฟที่สร้างจากสมการ Gompertz ที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 5.....	112
ตารางที่ 4.11	สรุปค่าที่ได้จากการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ในชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 5.....	113
ตารางที่ 4.12	เปรียบเทียบปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนและค่าที่ได้จากกราฟที่สร้างจากสมการ Gompertz ที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ.....	116
ตารางที่ 4.13	เปรียบเทียบไฮโดรเจนยิลด์ที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ.....	116
ตารางที่ 4.14	เปรียบเทียบไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดที่ได้จากของเสียชนิดต่างๆ จากการทดลองแบบทีละเทและใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์แบบผสม.....	118
ตารางที่ 4.15	สรุปค่าซีไอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีทั้งหมดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ..	121

ตารางที่ 4.16	สรุปค่าซีไอคิกรองและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอคิกรองโดยเฉลี่ยที่สภาวะ คงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	122
ตารางที่ 4.17	สรุปปริมาณของแข็งทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด โดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจนต่างๆ.....	124
ตารางที่ 4.18	สรุปปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็ง ระเหยได้ทั้งหมดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.. ..	126
ตารางที่ 4.19	สรุปอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพทั้งหมดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพัก ทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	127
ตารางที่ 4.20	สรุปร้อยละองค์ประกอบของก๊าซแต่ละชนิดในก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ย ที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ....	129
ตารางที่ 4.21	สรุปอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของ เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ	131
ตารางที่ 4.22	สรุปปริมาณก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อกรัมซีไอคิทั้งหมด ที่ถูกกำจัดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของ ถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	133
ตารางที่ 4.23	สรุปปริมาณก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อกรัมซีไอคิกรอง ที่ถูกกำจัดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของ ถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	135
ตารางที่ 4.24	สรุปปริมาณก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งทั้งหมด ที่ถูกกำจัดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของ ถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	137
ตารางที่ 4.25	สรุปปริมาณก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยได้ ที่ถูกกำจัดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของ ถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	139
ตารางที่ 4.26	เปรียบเทียบไฮโดรเจนและมีเทนยิลด์ที่ได้จากการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจาก ของเสียต่างๆ ด้วยระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน.....	141
ตารางที่ 4.27	สรุปปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพัก ทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	142

ตารางที่ 4.28	สรุปร้อยละองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	146
ตารางที่ 4.29	สรุปสภาพต่างทั้งหมด โดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	149
ตารางที่ 4.30	สรุปสัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	150
ตารางที่ 4.31	สรุปค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชันของระบบที่เวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	152
ตารางที่ 4.32	สรุปค่าอุณหภูมิของระบบที่เวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	153
ตารางที่ 4.33	สรุปค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	154

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 สัดส่วนของขยะที่จัดเก็บได้ทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2552.....	8
รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของขยะมูลฝอยที่จัดเก็บได้ในเขตกรุงเทพมหานคร.....	9
รูปที่ 2.3 ถังย่อยแบบแยกเชื้อแบบไร้ออกซิเจนที่มีการใช้ค่าพีเอชเป็นตัวกำหนด และควบคุมชนิดของแบคทีเรีย.....	19
รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการย่อยสลายไขมัน โปรตีนและคาร์โบไฮเดรตแบบไร้ออกซิเจน.....	29
รูปที่ 2.5 การย่อยสลายกลูโคสที่สภาวะความดันพาร์เซียลของก๊าซไฮโดรเจนต่ำและสูง.....	32
รูปที่ 2.6 ความเข้มข้นของสารอาหารต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของแบคทีเรีย.....	50
รูปที่ 2.7 ผลของค่าพีเอชและอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณของแอมโมเนียอิสระ.....	52
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	73
รูปที่ 3.2 การติดตั้งอุปกรณ์และลักษณะของระบบแบบกวนสมบูรณ์ที่ใช้ในการทดลอง แบบทีละเท.....	76
รูปที่ 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ของระบบแบบกวนสมบูรณ์ที่ใช้ในการทดลองต่อเนื่อง แบบสองขั้นตอน.. ..	76
รูปที่ 3.4 ลักษณะของระบบแบบกวนสมบูรณ์ที่ใช้ในการทดลองต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน..	77
รูปที่ 3.5 ลักษณะของถังหมักแบบกวนสมบูรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	78
รูปที่ 3.6 ลักษณะของชุดอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ.....	79
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมขยะอินทรีย์สังเคราะห์.....	81
รูปที่ 3.8 การหาช่วง lag phase ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดและอัตราการผลิต ก๊าซไฮโดรเจนจากกราฟที่สร้างจากสมการ Gompertz.....	85
รูปที่ 3.9 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียและก๊าซชีวภาพสำหรับการทดลองที่ 1.....	87
รูปที่ 3.10 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียและก๊าซชีวภาพสำหรับการทดลองที่ 2.....	87
รูปที่ 4.1 ลักษณะของขยะที่เกิดขึ้นในตลาดสดที่ใช้เป็นกรณีศึกษา.....	91
รูปที่ 4.2 ลักษณะของขยะสังเคราะห์ที่ผ่านการเตรียมที่ใช้ในการทดลอง.....	93
รูปที่ 4.3 หัวเชื้อจุลชีพแบบเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง.....	94
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะ โครงสร้างและแบคทีเรีย ที่พบภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองก่อนการบำบัดด้วยความร้อน...	97
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะ โครงสร้างและแบคทีเรียที่ พบภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองภายหลังการบำบัดด้วยความร้อน	99

รูปที่ 4.6	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะ โครงสร้างและแบคทีเรียที่พบภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองที่มีการบดละเอียดร่วมกับการบำบัดด้วยความร้อน.....	100
รูปที่ 4.7	กราฟที่ได้จากสมการ Gompertz และร้อยละประกอบของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2.....	103
รูปที่ 4.8	ผลการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2.....	106
รูปที่ 4.9	กราฟที่ได้จากสมการ Gompertz และร้อยละประกอบของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3.....	108
รูปที่ 4.10	ผลการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3.....	110
รูปที่ 4.11	กราฟที่ได้จากสมการ Gompertz และร้อยละประกอบของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 5.....	112
รูปที่ 4.12	ผลการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 5.....	114
รูปที่ 4.13	เปรียบเทียบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมและร้อยละประกอบของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ.....	117
รูปที่ 4.14	เปรียบเทียบค่าที่ได้จากกราฟที่สร้างจากสมการ Gompertz และไฮโดรเจนยึดของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ.....	117
รูปที่ 4.15	ลักษณะของน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทน.....	119
รูปที่ 4.16	ซีโอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีทั้งหมดที่เวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	121
รูปที่ 4.17	ซีโอดีกรองและประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกรองที่เวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	123
รูปที่ 4.18	ของแข็งทั้งหมดที่เวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	124
รูปที่ 4.19	ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่เวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	125

รูปที่ 4.20 ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่เวลาพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	126
รูปที่ 4.21 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	128
รูปที่ 4.22 ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซแต่ละชนิดของก๊าซชีวภาพในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ	130
รูปที่ 4.23 อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนที่เวลาพักทางชลศาสตร์ต่างๆ.....	131
รูปที่ 4.24 อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนของถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	132
รูปที่ 4.25 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อชีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัดที่เวลาพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	133
รูปที่ 4.26 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อชีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัดในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	134
รูปที่ 4.27 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อชีโอดีกรองที่ถูกกำจัดที่เวลาพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	135
รูปที่ 4.28 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อชีโอดีกรองที่ถูกกำจัดในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	136
รูปที่ 4.29 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดที่เวลาพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	137
รูปที่ 4.30 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	138
รูปที่ 4.31 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อของแข็งระเหยได้ที่ถูกกำจัดที่เวลาพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	139
รูปที่ 4.32 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อของแข็งระเหยได้ที่ถูกกำจัดในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	140

รูปที่ 4.33	ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่เวลากักพักทางศาสตร์ของถึงหมัก ก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	143
รูปที่ 4.34	ร้อยละองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิดที่เวลากักพัก ทางศาสตร์ของถึงหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	147
รูปที่ 4.35	ร้อยละองค์ประกอบและอัตราส่วนของกรดบิวไทริกและกรดอะซิติกในถึงหมัก ก๊าซไฮโดรเจนที่เวลากักพักทางศาสตร์ต่างๆ.....	148
รูปที่ 4.36	สภาพต่างทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางศาสตร์ของถึงหมัก ก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	149
รูปที่ 4.37	สัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดที่เวลากักพัก ทางศาสตร์ของถึงหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	151
รูปที่ 4.38	ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชันของระบบที่เวลากักพักทางศาสตร์ ของถึงหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	152
รูปที่ 4.39	ค่าอุณหภูมิของระบบที่เวลากักพักทางศาสตร์ของถึงหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ	153
รูปที่ 4.40	ค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางศาสตร์ของถึงหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	155
รูปที่ 4.41	ลักษณะน้ำเสียในถึงหมักก๊าซไฮโดรเจนที่เวลากักพักทางศาสตร์ ของถึงหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 1 วัน.....	155
รูปที่ 4.42	เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทนและปริมาณก๊าซ ต่อกรัมของซัสเตรทที่เวลากักพักทางศาสตร์ของถึงหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ..	157
รูปที่ 4.43	เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดมลสารที่เวลากักพักทางศาสตร์ของถึงหมัก ก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	159
รูปที่ 4.44	เปรียบเทียบสภาวะการทำงานของระบบที่เวลากักพักทางศาสตร์ของถึงหมัก ก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ.....	160
รูปที่ 4.45	สมดุลมวลสารของระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนที่ใช้ในการทดลอง.....	161

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหามลพิษต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน เช่น ปัญหาโลกร้อน ปัญหาโอโซนในชั้นบรรยากาศ ถูกทำลาย ล้วนเกิดจากการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงจำพวกถ่านหินและน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ มากเกินไป เมื่อเผาไหม้แล้วทำให้เกิดมลสารต่างๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ เป็นต้น ซึ่งในอดีตโลกสามารถสลายมลพิษให้ลดลงได้เองด้วยกระบวนการทางธรรมชาติ (self-purification) แต่เมื่อประชากรมีจำนวนเพิ่มขึ้นทำให้การใช้ทรัพยากรต่างๆ เพิ่มขึ้นด้วยและก่อให้เกิดมลพิษจนกระบวนการทางธรรมชาติไม่สามารถจะสลายมลพิษต่างๆ ได้ทันทำให้เกิดปัญหามลพิษต่างๆ ขึ้น นอกจากนี้ในปัจจุบันแหล่งพลังงานเหล่านี้เริ่มมีจำนวนลดลงและมีราคาสูงขึ้นตามลำดับ

ปัญหาที่กำลังประสบอยู่ในปัจจุบันสำหรับประเทศไทยคือ ปัญหาด้านพลังงานที่มีไม่เพียงพอต่อการผลิตและบริโภคภายในระบบเศรษฐกิจ โดยในปี 2549 ประเทศไทยต้องพึ่งพาพลังงานประเภทต่างๆ จากต่างประเทศโดยเฉพาะน้ำมันเชื้อเพลิงถึงร้อยละ 63.2 ของความต้องการใช้พลังงานทั้งหมดของประเทศ ซึ่งคาดว่าความต้องการในการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงอาจมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเป็นร้อยละ 64.1 ของความต้องการใช้พลังงานทั้งหมดของประเทศในปี 2554 (กระทรวงพลังงาน, สำนักนโยบายและแผนพลังงาน, 2551) ทำให้หลายหน่วยงานให้ความสำคัญต่อการเตรียมพร้อมด้านพลังงาน การจัดหาแหล่งพลังงานธรรมชาติ การเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ประโยชน์จากพลังงานภายในประเทศรวมทั้งการใช้พลังงานทดแทนอย่างจริงจัง โดยรัฐบาลได้กำหนดเป้าหมายที่จะเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนประเภทพลังงานหมุนเวียนที่ไม่ใช่พลังงานดั้งเดิม (traditional energy) จากร้อยละ 10.8 เป็นร้อยละ 12.2 ในปี 2554 รวมถึงได้กำหนดยุทธศาสตร์ในการส่งเสริม การจัดหาและการใช้พลังงานทดแทนอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเร่งสำรวจพัฒนาและจัดหาแหล่งพลังงานทดแทน รวมทั้งสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ เพื่อการประหยัดพลังงานให้มากขึ้น (กระทรวงพลังงาน, สำนักนโยบายและแผนพลังงาน, 2551)

พลังงานทดแทนจากก๊าซไฮโดรเจนเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาด เมื่อเผาไหม้จะให้ น้ำ เป็นผลิตภัณฑ์จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถผลิตได้จากหลายกระบวนการ เช่น การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis) กระบวนการแยกสารเคมีความร้อนสูง (Thermochemical process) การแยกก๊าซธรรมชาติหรือก๊าซมีเทนโดยใช้ไอน้ำ (Steam reforming) การแตกตัวของก๊าซธรรมชาติโดยใช้ความร้อน (Thermal

cracking) เป็นต้น แต่เนื่องจากในระหว่างการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการเหล่านี้สามารถจะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซที่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศชนิดอื่นๆ ได้ อีกทั้งบางกระบวนการยังมีค่าใช้จ่ายในการผลิตค่อนข้างสูง จึงได้มีการพัฒนากระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากของเสียต่างๆ โดยกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน โดยนอกจากจะเป็นการบำบัดของเสียแล้วยังสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้อีกด้วย จึงถือเป็นการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรอย่างคุ้มค่า ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีความสนใจเกี่ยวกับกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากขยะอินทรีย์ประเภทเศษอาหารซึ่งเป็นของเสียที่มีสัดส่วนมากถึงร้อยละ 43 ของขยะชุมชนที่เกิดขึ้นในเขตกรุงเทพมหานครและเป็นองค์ประกอบหลักของขยะชุมชนที่เกิดขึ้นทั่วประเทศ (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมมลพิษ, 2548) โดยแหล่งที่ก่อให้เกิดของเสียประเภทนี้เป็นจำนวนมากคือ บ้านพักอาศัย ร้านค้าและตลาดสด (Panate, 2005) ซึ่งจากลักษณะของขยะอินทรีย์ที่มีความชื้นสูงจึงก่อให้เกิดปัญหาในการจัดเก็บ การขนส่งและการกำจัด แต่เนื่องจากของเสียประเภทนี้มีปริมาณสารอินทรีย์สูงและสามารถย่อยสลายได้ง่าย ดังนั้นการกำจัดของเสียเหล่านี้โดยนำมาผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจึงมีความเหมาะสมเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ขยะอินทรีย์บางชนิดยังมีสารอาหารที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียอยู่แล้วจึงไม่จำเป็นต้องเติมสารอาหารให้แก่ระบบอีกด้วย

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษาองค์ประกอบขยะอินทรีย์จากตลาดสดและทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพซึ่งได้แก่ ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นและเวลากักพักทางคลศาสตร์ที่เหมาะสม เพื่อที่จะสามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยไปใช้เป็นแนวทางในการกำจัดขยะอินทรีย์และผลิตเป็นแหล่งพลังงานทดแทนต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 ศึกษาอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสด
- 1.2.2 ศึกษาผลของร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยใช้ขยะอินทรีย์จากตลาดสด
- 1.2.3 ศึกษาผลของเวลากักพักทางคลศาสตร์ที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยใช้ขยะอินทรีย์จากตลาดสด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องและวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ โดยใช้วิธีทางสถิติ โดยมีขอบเขตของงานวิจัยดังนี้คือ

1.3.1 ขยะอินทรีย์ประเภทเศษอาหารที่ใช้ในการทดลองเป็นขยะอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบเช่นเดียวกันกับขยะอินทรีย์ในตลาดสด โดยในการศึกษาครั้งนี้จะใช้ข้อมูลจากตลาดสดทรัพย์สินจันทร์ (ตลาดสดตลาดพร้าวสะพาน 2) เป็นกรณีศึกษา โดยขยะที่ใช้จะเป็นเศษผักสดที่ผ่านการเตรียมโดยการบดละเอียดและกรองเพื่อให้มีขนาดไม่เกิน 2 มิลลิเมตร และมีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของขยะก่อนที่จะนำมาใช้ในการทดลอง

1.3.2 การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

- 1) การทดลองแบบทีละเท (Batch) โดยใช้ระบบถังหมักแบบกวนสมบูรณ์ (continuous stirred tank reactor, CSTR) ทำการปรับเปลี่ยนร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้น 3 ค่า คือ ร้อยละ 2 3 และร้อยละ 5 ตามลำดับ
- 2) การทดลองต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน โดยใช้ระบบถังหมักแบบกวนสมบูรณ์ที่ประกอบด้วยถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนอย่างละ 1 ถัง ทำการปรับเปลี่ยนเวลากักพักทางศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจน 3 ค่า คือ 5 3 และ 2 วัน ตามลำดับ น้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนจะมีการป้อนเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทน โดยใช้เวลากักพักทางศาสตร์ของถังหมักก๊าซมีเทนคงที่เท่ากับ 15 วัน

1.3.3 หัวเชื้อจุลินทรีย์ (seed sludge) ที่ใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์จากจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตน้ำอัดลม ซึ่งจะมีการเตรียมหัวเชื้อก่อนนำมาใช้ในการทดลองโดยการบำบัดเบื้องต้น (pre-treatment) ด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดแบคทีเรียชนิดที่สร้างก๊าซมีเทน

1.3.4 พารามิเตอร์ที่ตรวจวิเคราะห์ ได้แก่ ค่าซีโอดีทั้งหมด ค่าซีโอดีกรอง ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิด ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด สภาพต่างทั้งหมด ค่าพีเอช อุณหภูมิ ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (oxidation-reduction potential, ORP) รวมทั้งปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการทดลอง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงความเป็นไปได้และความเหมาะสมในการใช้ของเสียประเภทขยะอินทรีย์จากตลาดสดมาใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ
2. ทราบถึงปัจจัยเริ่มต้นอันได้แก่ ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นและเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากของเสียประเภทขยะอินทรีย์จากตลาดสด เพื่อนำไปใช้เป็นแนวทางในการกำจัดและผลิตเป็นพลังงานทดแทนในอนาคต



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แหล่งพลังงานและพลังงานทดแทน

แหล่งพลังงานที่มนุษย์นำมาใช้กันอยู่ทุกวันนี้ส่วนใหญ่เป็นแหล่งพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานดั้งเดิมที่มีการสะสมมานานหลายร้อยล้านปีในรูปของน้ำมันเชื้อเพลิงและถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งแหล่งพลังงานเหล่านี้มีแต่ใช้แล้วหมดไปโดยจะต้องใช้เวลานานกว่าจะเกิดขึ้นมาใหม่ และจากการที่ทุกประเทศในโลกล้วนแล้วแต่มีความต้องการพลังงานที่สูงขึ้นในขณะที่พลังงานเชื้อเพลิงเหล่านี้มีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่อง ทำให้ปัญหาด้านพลังงานกลายเป็นปัญหาที่สำคัญที่ทุกๆ ประเทศล้วนแต่ตระหนักและมีการเตรียมมาตรการเพื่อรองรับกับปัญหาที่จะเกิดขึ้นในอนาคต

สำหรับประเทศไทยมีความต้องการใช้พลังงานโดยรวมสูงถึง 80.331 ล้านตันเทียบเท่าน้ำมันดิบต่อปี (กระทรวงพลังงาน, สำนักนโยบายและแผนพลังงาน, 2551) ซึ่งการผลิตและการจัดหาภายในประเทศมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ ทำให้ต้องมีการนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก ถึงแม้ว่าจะมีการลดการนำเข้าดังกล่าวด้วยการนำพลังงานทดแทนจากแหล่งต่างๆ มาใช้มากขึ้น เช่น พลังงานจากลม พลังงานจากน้ำ พลังงานแสงจากอาทิตย์ เป็นต้น รวมไปถึงการผลิตพลังงานเชื้อเพลิงชนิดใหม่ขึ้นมาเพื่อลดสัดส่วนหรือทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงที่ต้องใช้ เช่น น้ำมันไบโอดีเซล แก๊สโซฮอล์ เป็นต้น โดยผลิตใช้เองภายในประเทศซึ่งสามารถลดการนำเข้าได้บางส่วน แต่จากจำนวนประชากรที่เพิ่มมากขึ้นและกิจกรรมทางเศรษฐกิจทั้งจากภาคขนส่ง ภาคพาณิชย์และภาคอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวออกไป ยังคงทำให้ประเทศไทยมีความต้องการพลังงานที่เพิ่มสูงขึ้นตามลำดับ ซึ่งหน่วยงานของภาครัฐได้ตระหนักถึงปัญหาและมีนโยบายที่จะส่งเสริมให้มีการเพิ่มสัดส่วนการใช้พลังงานทดแทนในส่วนที่สามารถทดแทนได้ให้มากขึ้น รวมทั้งส่งเสริมการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ๆ ในการผลิตแหล่งพลังงานทดแทนให้มากขึ้น เพื่อที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ให้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ต่อไปในอนาคต

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าแหล่งพลังงานทดแทนกำลังจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการเป็นแหล่งพลังงานของโลกในไม่ช้า แต่การจะใช้พลังงานจากแหล่งพลังงานทดแทนประเภทใดนั้น ควรที่จะมีการพิจารณาถึงความเหมาะสมทั้งด้านเทคโนโลยีที่เอื้ออำนวย สภาพแวดล้อม รวมถึงทรัพยากรธรรมชาติที่มีในประเทศนั้นๆ ด้วย โดยการจัดหาแหล่งพลังงานทดแทนใหม่นี้ยังคงต้องมีการพิจารณาถึงผลกระทบในด้านต่างๆ โดยเฉพาะผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่กำลังเป็นปัญหาสำคัญของโลกควบคู่กันไปด้วย

2.1.1 ปัญหาสิ่งแวดล้อมและผลกระทบจากการใช้พลังงานเชื้อเพลิง

จำนวนประชากรที่เพิ่มสูงขึ้นในหลายประเทศทำให้มีการบริโภคทรัพยากรต่างๆ เพิ่มมากขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาด้านทรัพยากรที่ลดน้อยลงไปโดยเฉพาะอย่างยิ่งทรัพยากรด้านพลังงาน นอกจากนี้ปัญหาที่หลายๆ ประเทศกำลังให้ความสำคัญมากที่สุดเนื่องจากส่งผลกระทบเป็นวงกว้างไปทั่วโลกคือ ปัญหาโลกร้อน (Global warming) ซึ่งส่งผลกระทบให้เห็นแล้วในปัจจุบันคือ การที่มีสภาพอากาศที่แปรปรวน อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น การที่ระดับน้ำในทะเลเพิ่มสูงขึ้นจากการที่น้ำแข็งขั้วโลกละลาย เป็นต้น โดยปัญหาโลกร้อนเป็นผลมาจากการมีก๊าซเรือนกระจก (Green house gas) ในชั้นบรรยากาศมากเกินไป ตัวอย่างของก๊าซเรือนกระจก ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซมีเทน ก๊าซไนตรัสออกไซด์ เป็นต้น โดยก๊าซเหล่านี้สามารถเกิดขึ้นได้จากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงต่างๆ ที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของมนุษย์ในทุกภาคส่วนซึ่งล้วนแต่จะต้องมีการนำน้ำมันเชื้อเพลิงมาใช้ทั้งสิ้น

2.1.2 พลังงานทดแทนจากขยะและพลังงานจากก๊าซไฮโดรเจน

จากปัญหาด้านพลังงานที่ลดลงและปัญหาขยะต่างๆ ที่เกิดขึ้นในปัจจุบัน ทำให้มีการนำขยะมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการผลิตเป็นแหล่งพลังงานทดแทน ยกตัวอย่างเช่น การผลิตเป็นพลังงานชีวมวลด้วยการเผาไหม้โดยตรงโดยใช้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งเป็นการนำของเสียต่างๆ ที่สามารถเผาไหม้ได้รวมไปถึงของเสียและวัสดุเหลือใช้จากการเกษตรมาใช้ในการผลิต การผลิตก๊าซชีวภาพโดยเป็นการนำของเสียหรือน้ำเสียมาผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้การย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูงจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งจะช่วยบำบัดของเสียก่อนการบำบัดด้วยวิธีการอื่นๆ และได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้อีกด้วย การนำขยะมาผลิตเป็นแหล่งพลังงานทดแทนดังกล่าวจึงสามารถช่วยลดปริมาณของเสียและสร้างแหล่งพลังงานทดแทนได้ส่วนหนึ่ง แต่ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการผลิตที่ไม่ได้มีการนำไปใช้จำเป็นที่จะต้องมีการกำจัดอย่างถูกต้องเพื่อไม่ให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทน (ทั้งที่ยังไม่ได้นำไปใช้และที่มีการนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานแล้ว เนื่องจากเมื่อเผาไหม้แล้วจะให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น) ซึ่งก๊าซทั้งสองชนิดนี้เป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญที่พบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีอัตราเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ยในช่วงปี ค.ศ. 1996-2006 ถึง 1.93 ส่วนในล้านส่วน (part per million, ppm) ต่อปี และ 2.8 ส่วนในพันล้านส่วน (part per billion, ppb) ต่อปี ในปี ค.ศ. 1995-2005 สำหรับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซมีเทน ตามลำดับ (กรมอุตุฯ, 2551) จะเห็นได้ว่าการสร้างแหล่งพลังงานและการนำมาใช้สามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ทั้งทางตรงและทางอ้อมในขณะเดียวกันปัญหาสิ่งแวดล้อมก็ยิ่งทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น ด้วยเหตุนี้เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาใน

หลายๆ ประเทศจึงได้ให้ความสำคัญต่อการผลิตแหล่งพลังงานทดแทนที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยใช้เทคโนโลยีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซึ่งสามารถผลิตได้จากหลายกระบวนการรวมทั้งจากของเสียต่างๆ ได้อีกด้วย จุดเด่นของก๊าซไฮโดรเจนที่แตกต่างจากก๊าซเชื้อเพลิงอื่นๆ คือ เป็นก๊าซที่ให้พลังงานความร้อนต่อหน่วยสูง และจากการที่ไม่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบในโครงสร้างโมเลกุลจึงทำให้เมื่อเผาไหม้แล้วจะให้เพียงน้ำเป็นผลิตภัณฑ์โดยไม่มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ทำให้การใช้พลังงานจากก๊าซไฮโดรเจนไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีการคาดการณ์กันว่าในอนาคตพลังงานจากก๊าซไฮโดรเจนจะเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญที่จะเข้ามาทดแทนพลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงได้ โดยพลังงานและปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงต่างๆ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พลังงานและก๊าซที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

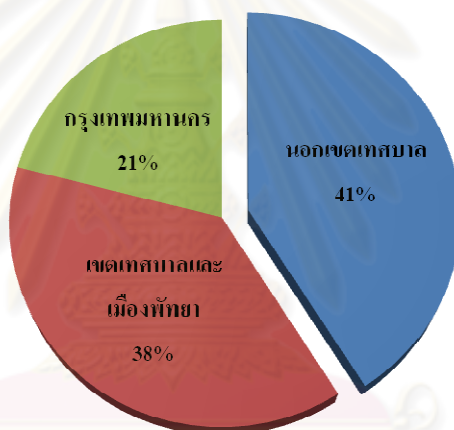
(คัดแปลงจาก ฌาลิสสา ยูวอมรพิทักษ์, 2549)

ชนิดของเชื้อเพลิง	พลังงานต่อน้ำหนัก (ค่าต่ำสุดโดยประมาณ) (เมกะจูล/กก.)	พลังงานต่อปริมาตร (โดยประมาณ) (เมกะจูล/ล.)	ปริมาณคาร์บอนที่ ปลดปล่อย (กก.ของ คาร์บอน/กก.ของเชื้อเพลิง)
ก๊าซไฮโดรเจน	122	2	0
ไฮโดรเจนเหลว	122	8.5	0
ถ่านหิน (แอนทราไซต์)	15-19	-	0.5
ถ่านหิน (ซับบิทูมินัส)	27-30	-	0.7
ก๊าซธรรมชาติ	33-50	9	0.46
น้ำมันปิโตรเลียม	40-43	31.5	0.86
น้ำมันดีเซล	42.8	35	0.9
ไบโอดีเซล	37	33	0.5
เอทานอล	21	23	0.5
ถ่านไม้	30	-	0.5
เศษพืชผลทางการเกษตร	10-17	-	0.5

2.2 ขยะชุมชนในประเทศไทย

2.2.1 สถานการณ์ปริมาณขยะชุมชน

จากสถิติปริมาณขยะชุมชนในแต่ละปีพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมมลพิษ, 2550, 2552; Panate, 2005) โดยในส่วนของขยะชุมชนพบว่า มีแหล่งกำเนิดมาจากเมืองใหญ่ๆ ทั้งในเขตกรุงเทพมหานครและเขตเทศบาลซึ่งรวมไปถึงเมืองพัทยามากที่สุด โดยมีปริมาณรวมกันแล้วมากถึงร้อยละ 59 ของขยะชุมชนที่เกิดขึ้นทั่วประเทศ (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมมลพิษ, 2552) เนื่องจากประชากรที่มีเป็นจำนวนมากและพฤติกรรมกรบริโภคภายในสังคมที่มีความแตกต่างจากเขตนอกเทศบาล โดยสัดส่วนของขยะที่จัดเก็บได้ทั่วประเทศแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 สัดส่วนของขยะที่จัดเก็บได้ทั่วประเทศ ปี พ.ศ. 2552

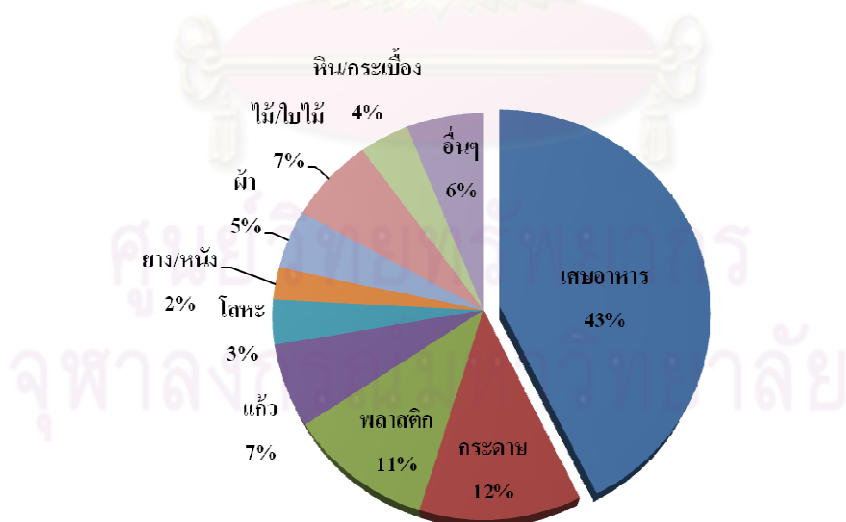
(ดัดแปลงจาก กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมมลพิษ, 2552)

2.2.2 องค์ประกอบของขยะชุมชน

เมื่อศึกษาถึงองค์ประกอบของขยะมูลฝอยที่มาจากชุมชนพบว่า ส่วนใหญ่เป็นขยะที่มาจากการบริโภคและกิจกรรมการดำรงชีวิต โดยมีองค์ประกอบของขยะประเภทเศษอาหารเป็นปริมาณมากถึงร้อยละ 43 ของขยะชุมชนที่เกิดขึ้นทั่วประเทศ (กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมมลพิษ, 2548) ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแหล่งที่เกิดขยะประเภทเศษอาหารแหล่งใหญ่ๆ มาจากบ้านพักอาศัย ร้านค้าและตลาดสด เป็นต้น ขยะประเภทเศษอาหารที่มาจากบ้านพักอาศัยจะเป็นขยะที่เหลือจากการบริโภค เศษอาหาร เศษผักและผลไม้ต่างๆ เป็นต้น ส่วนขยะที่มาจากร้านค้าและตลาดสดจะเป็นเศษพืชผลการเกษตรทั้งเป็นส่วนใหญ่และส่วนที่เน่าเสีย

เศษอาหาร เป็นต้น ลักษณะของขยะประเภทนี้เป็นขยะที่มีปริมาณความชื้นค่อนข้างสูง มีน้ำหนักมากและมักเกิดน้ำชะขยะจากบริเวณแหล่งพักขยะเพื่อรอการจัดเก็บ ซึ่งทำให้เกิดปัญหาในการจัดเก็บและการขนส่ง แต่อย่างไรก็ตามจากการที่ขยะประเภทนี้มีปริมาณสารอินทรีย์ค่อนข้างสูงและสามารถย่อยสลายได้ง่าย (Mohan และคณะ, 2009) แนวทางการกำจัดจึงมีความเหมาะสมในการกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพ เช่น การทำปุ๋ยหมัก การย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน การฝังกลบ เป็นต้น

ในการรองรับสถานการณ์พลังงานในอนาคตสำหรับประเทศไทยควรที่จะมีการนำขยะเหล่านี้ซึ่งเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในแต่ละวันมาใช้ให้เกิดประโยชน์โดยการผลิตเป็นแหล่งพลังงานทดแทนให้มากขึ้น โดยเฉพาะการผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากขยะเหล่านี้ยังมีปริมาณสารอินทรีย์ที่คงเหลือในเนื้อขยะค่อนข้างสูง จึงควรที่จะนำสารอินทรีย์ที่เหลือมาผลิตเป็นก๊าซเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีมูลค่าและใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่ยั่งยืนต่อไปแทนการทิ้งไปโดยเปล่าประโยชน์ ซึ่งถึงแม้ว่าการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนในปัจจุบันยังเป็นเรื่องที่ยังอยู่ในระหว่างการทดลองศึกษาความเป็นไปได้ในหลายๆ ประเทศ แต่อย่างไรก็ตามก็ได้มีงานวิจัยต่างๆ ที่ทำการศึกษาทั้งศักยภาพในการผลิตจากของเสียชนิดต่างๆ รวมถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องอย่างต่อเนื่อง ซึ่งคาดว่าจะสามารถนำมาใช้กับของเสียจริงอย่างเป็นรูปธรรมได้ในอนาคต สำหรับประเทศไทยซึ่งมีองค์ประกอบของขยะที่เป็นขยะอินทรีย์สูง จึงควรที่จะมีการศึกษาถึงความเหมาะสมของและความเป็นไปได้ในการนำขยะเหล่านี้มาใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพเพื่อเป็นแนวทางในการรับมือกับปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม ปัญหามลพิษและปัญหาด้านพลังงานในอนาคตต่อไป

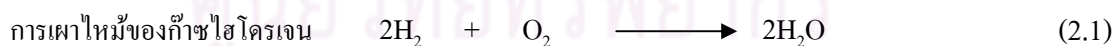


รูปที่ 2.2 องค์ประกอบของขยะมูลฝอยที่จัดเก็บได้ในเขตกรุงเทพมหานคร
(ดัดแปลงจาก กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมมลพิษ, 2548)

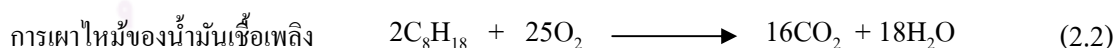
2.3 ไฮโดรเจน

2.3.1 ลักษณะสมบัติของไฮโดรเจน (U.S. Department of energy, 2001)

ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่มีอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติ โดยเป็นธาตุที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตเนื่องจากเป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ต่างๆ และเป็นธาตุที่เป็นองค์ประกอบของน้ำซึ่งมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้ในบรรยากาศยังประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจนอยู่ประมาณร้อยละ 0.00001 หรือ 0.1 ส่วนในล้านส่วนอีกด้วย ไฮโดรเจนหนึ่งอะตอมประกอบด้วยโปรตอน นิวตรอนและอิเล็กตรอนเช่นเดียวกับธาตุทั่วไป โดยจำนวนของนิวตรอนในอะตอมของไฮโดรเจนจะมีค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของไอโซโทป (isotope) ซึ่งไอโซโทปของไฮโดรเจนที่พบว่ามีอยู่ตามธรรมชาติในปัจจุบันมีอยู่ 3 ไอโซโทป ได้แก่ ไฮโดรเจนหรือโปรเทียม (ประกอบด้วย 1 โปรตอน) ดิวเทอเรียม (ประกอบด้วย 1 โปรตอนและ 1 นิวตรอน) และตรีเทียม (ประกอบด้วย 1 โปรตอนและ 2 นิวตรอน) โดยไฮโดรเจนที่พบอยู่มากในโลกจะอยู่ในรูปโปรเทียมซึ่งมีอยู่ประมาณร้อยละ 99.98 ของไฮโดรเจนที่มีอยู่ในโลกทั้งหมด และจากการที่มีอิเล็กตรอนวงนอกเพียง 1 ตัวทำให้ไฮโดรเจนมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยาและมักมีการรวมตัวกันเป็นโมเลกุลในรูปของก๊าซไฮโดรเจนที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศมาตรฐาน ซึ่งก๊าซไฮโดรเจนนี้มีลักษณะสมบัติคือไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและสามารถติดไฟได้เมื่อมีความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 4-75 ในอากาศ ก๊าซไฮโดรเจนมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลสูงเมื่อเทียบกับก๊าซชนิดอื่นที่มีมวลโมเลกุลเท่ากันหรือสูงกว่าโดยจะต้องใช้พลังงานในการสลายพันธะเท่ากับ 436 กิโลจูล/โมล และเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนมีมวลโมเลกุลที่ต่ำจึงทำให้เมื่อเผาไหม้แล้วจะให้พลังงานต่อมวลน้ำหนักรวมสูงกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ โดยปฏิกิริยาการเผาไหม้ของก๊าซไฮโดรเจนและออกเทน (octane) ซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่องค์ประกอบในน้ำมันเชื้อเพลิงดังสมการ 2.1 และ 2.2



พลังงานในการสลาย-สร้างพันธะ 872 498 1,856 (กิโลจูล/โมล)



พลังงานในการสลาย-สร้างพันธะ 19,726 12,450 25,696 16,704 (กิโลจูล/โมล)

จากสมการที่ 2.1 จะเห็นได้ว่า การเผาไหม้ของก๊าซไฮโดรเจนจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาเท่ากับ 486 กิโลจูล/โมล หรือคิดเป็นพลังงานที่ปลดปล่อยต่อมวลเท่ากับ 121.5 กิโลจูล/กรัม และจากสมการที่ 2.2 น้ำมันเชื้อเพลิงมีการปลดปล่อยพลังงานเท่ากับ 10,224 กิโลจูล/โมล หรือคิด

เป็นพลังงานที่ปลดปล่อยต่อมวลเท่ากับ 44.8 กิโลจูล/กรัม ซึ่งจะเห็นได้ว่าพลังงานที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้ของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าสูงกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงถึง 2.7 เท่า

2.3.2 เทคโนโลยีการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

การผลิตไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากหลายกระบวนการทั้งวิธีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธีตามแหล่งที่มาได้ดังนี้คือ

2.3.2.1 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำและสารเคมีที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบ

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้มาจากแนวคิดที่ว่าไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบของสารเคมีหลายชนิดรวมทั้งน้ำซึ่งมีอยู่ทั่วไปในโลก จากการที่โครงสร้างของน้ำประกอบไปด้วยไฮโดรเจน 2 อะตอมและออกซิเจน 1 อะตอม ดังนั้นหากสามารถแยกไฮโดรเจนและออกซิเจนออกจากกันได้ก็จะทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนออกมา การใช้น้ำซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในโลกและไม่มีวันหมดไปในการผลิตจึงทำให้สามารถสร้างก๊าซไฮโดรเจนได้อย่างไม่จำกัดทราบเท่าที่มีปัจจัยอื่นๆ เอื้ออำนวย โดยวิธีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำมีหลายวิธี ตัวอย่างวิธีที่มีการใช้กันมากคือ

1) การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis)

เป็นการแยกน้ำให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไป ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาดังสมการ 2.3



โดยในกระบวนการนี้ก๊าซไฮโดรเจนที่แยกออกมาจะถูกเก็บไว้ในถังหรือแควหรือแคโทด ส่วนก๊าซออกซิเจนจะถูกเก็บไว้ในถังหรือแอโนด ข้อดีของการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการนี้คือ จะทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์มาก แต่มีข้อเสียคือต้องใช้พลังงานไฟฟ้าในกระบวนการผลิตจึงทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงมากในปัจจุบัน โดยในการให้พลังงาน 1 บีทียูมีค่าใช้จ่ายเป็น 10 เท่าของการใช้ก๊าซธรรมชาติและเป็น 3 เท่าของการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง (U.S.EIA, 2006)

2) การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าจากแสง (Photoelectrolysis)

เป็นการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำโดยใช้หลักการเดียวกันกับการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าด้วยวิธีปกติ แต่มีการใช้แสงอาทิตย์แทนกระแสไฟฟ้าที่ต้องผ่านเข้าไป โดยจะมีการใช้

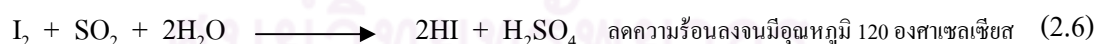
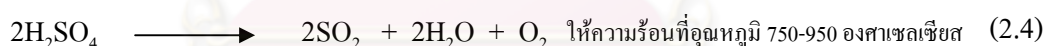
สารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ดูดซึมพลังงานจากแสงอาทิตย์ไว้จนเกิดเป็นขั้วไฟฟ้า (electrode) ขึ้น

3) การแยกน้ำโดยใช้ความร้อน (Thermal decomposition)

เป็นการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงประมาณ 2,200-3,000 องศาเซลเซียส ในการแยกก๊าซไฮโดรเจนจากโมเลกุลของน้ำ

4) กระบวนการแยกสารเคมีความร้อนสูง (Thermochemical)

เป็นกระบวนการที่ใช้ปฏิกิริยาเคมีความร้อนสูงในการแยกก๊าซไฮโดรเจน ออกจากโมเลกุลของสารประกอบเคมี ซึ่งสามารถผลิตได้จากหลายกระบวนการแตกต่างกันออกไป ตามชนิดของสารประกอบเคมีที่ใช้การผลิต และหลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาทั้งหมดแล้วจะได้สารตั้งต้นกลับคืนมา ยกเว้นโมเลกุลของน้ำซึ่งจะมีการแตกตัวเป็นก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งกระบวนการเหล่านี้ ได้แก่ กระบวนการซีเรียม-คลอรีน (Cerium-Chlorine (Ce-Cl) cycle) กระบวนการเหล็กออกไซด์ (Iron oxide (Fe₃O₄/FeO) cycle) กระบวนการสังกะสี-สังกะสีออกไซด์ (Zinc-zinc oxide (Zn/ZnO) cycle) กระบวนการซัลเฟอร์-ไอโอดีน (Sulfur-iodine (S-I) cycle) เป็นต้น โดยตัวอย่างของกระบวนการซัลเฟอร์-ไอโอดีนซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการใช้กันมากกระบวนการหนึ่ง ประกอบด้วยปฏิกิริยา 3 ขั้นตอน ดังสมการ



โดยทั่วไปการแยกน้ำด้วยความร้อนและกระบวนการแยกสารเคมีความร้อนสูงจะมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่ากระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า เนื่องจากจะมีการใช้พลังงานความร้อนในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยตรง ส่วนกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเป็นการเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้าจากนั้นจึงใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนอีกครั้งหนึ่ง การเปลี่ยนรูปพลังงานหลายขั้นตอนเช่นนี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการส่งผ่านพลังงานต่ำลงและทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงอีกด้วย (Forsberg, 2003) โดยการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงทั้งจากการแยกน้ำโดยใช้ความร้อนและกระบวนการแยกสารเคมีความร้อนสูงจะมีความคุ้มค้ำมากขึ้นเมื่อใช้พลังงานนิวเคลียร์ในการให้ความร้อนโดยการผลิตร่วมกับการผลิตไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้มีค่าใช้จ่ายต่อ

หน่วยต่ำกว่าการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าถึงร้อยละ 60 (OECD-NEA, 2000 อ้างถึงใน Forsberg, 2003)

5) วิธีการอื่นๆ

นอกจากวิธีที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ก๊าซไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากน้ำและสารเคมีด้วยวิธีอื่นๆ ได้อีก เช่น การผลิตก๊าซไฮโดรเจนร่วมกับการผลิตสารเคมี (chemical production) การแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่สภาวะความดันสูง (high pressure electrolysis) เป็นต้น

2.3.2.2 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

ในปัจจุบันพบว่าก๊าซไฮโดรเจนที่ถูกนำมาใช้ในโลกว่าร้อยละ 90 เป็นก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นจากสารประกอบไฮโดรคาร์บอน (Maddy และคณะ, 2003 อ้างถึงใน Aceves-Lara และคณะ, 2008) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีการนำเอาก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเชื้อเพลิงและถ่านหิน หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ มาใช้ในการผลิต โดยวิธีที่ใช้มีหลายวิธี เช่น การแยกก๊าซธรรมชาติหรือก๊าซมีเทนโดยใช้ไอน้ำ การแตกตัวของก๊าซธรรมชาติโดยใช้ความร้อน การออกซิไดซ์ก๊าซธรรมชาติ น้ำมันเชื้อเพลิงและถ่านหิน การใช้กระบวนการไพโรไลซิสหรือแก๊สซิฟิเคชันของถ่านหิน เป็นต้น โดยส่วนใหญ่วิธีที่นิยมใช้คือการแยกก๊าซธรรมชาติหรือก๊าซมีเทนโดยใช้ไอน้ำ ซึ่งในกระบวนการนี้จะเป็นการใช้ไอน้ำที่อุณหภูมิ 700-1,100 องศาเซลเซียส ทำปฏิกิริยากับก๊าซธรรมชาติหรือก๊าซมีเทน โดยใช้นิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ผลผลิตจะได้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา (วิทยา ขงเจริญ, 2547) ตัวอย่างของการแยกก๊าซมีเทนโดยใช้ไอน้ำ ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8



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

2.3.2.3 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีทางชีวภาพ

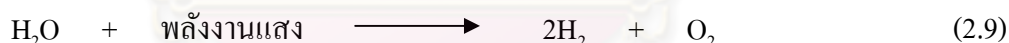
นอกจากก๊าซไฮโดรเจนจะสามารถผลิตได้จากน้ำ สารเคมีและสารประกอบของไฮโดรคาร์บอนแล้ว ก๊าซไฮโดรเจนยังสามารถผลิตได้จากสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ เช่น พืช สาหร่าย และแบคทีเรีย โดยอาศัยกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ ซึ่งการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีทางชีวภาพนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธีหลักๆ ดังนี้คือ

1) กระบวนการไบโอโฟโตไลซิส (Biophotolysis)

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเซลล์สิ่งมีชีวิตที่มีการใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน ตัวอย่างของสิ่งมีชีวิตกลุ่มนี้ ได้แก่ สาหร่ายสีเขียว (green algae) และสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue-green algae) หรือไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacteria) เป็นต้น โดยกระบวนการไบโอโฟโตไลซิสสามารถแบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ ดังนี้คือ

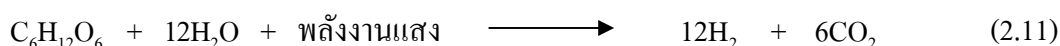
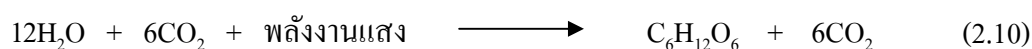
(1) กระบวนการไบโอโฟโตไลซิสทางตรง (Direct Biophotolysis)

เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายสีเขียว ซึ่งจะมีการใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน โดยสาหร่ายชนิดผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ด้วยกระบวนการนี้ที่รู้จักกันดีคือ *Chlamydomonas reinhardtii* (Das และ Veziroglu, 2008) ซึ่งจะมีการใช้แสงเป็นแหล่งพลังงานในการแยกน้ำให้เป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังสมการ 2.9



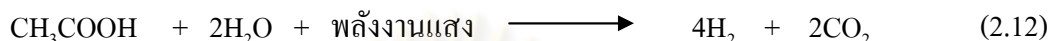
(2) กระบวนการไบโอโฟโตไลซิสทางอ้อม (Indirect Biophotolysis)

เป็นกระบวนการที่ใช้แสงเป็นแหล่งพลังงานและใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งของคาร์บอนในการผลิตกลูโคสจากน้ำ และจากนั้นจึงเปลี่ยนกลูโคส (แหล่งของคาร์บอนลำดับที่ 2) และน้ำ เป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน โดยใช้แสงเป็นแหล่งพลังงานอีกครั้งหนึ่ง กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีมักพบในการสังเคราะห์แสงของสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหรือไซยาโนแบคทีเรีย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้ดังสมการ 2.10 และ 2.11



2) การหมักในที่มีแสงสว่าง (Photo-fermentation)

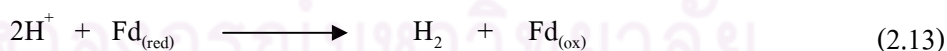
เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยแบคทีเรียที่มีสังเคราะห์แสงได้ (Photosynthesis bacteria) ซึ่งจะมีการใช้สารประกอบหรือสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก น้ำและแสงในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้เอนไซม์ไฮโดรจีเนส (hydrogenase) โดยตัวอย่างของปฏิกิริยาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของแบคทีเรียที่เรียกลุ่ม Purple non-sulfur bacteria ดังสมการ 2.12



การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีทางชีวภาพด้วยวิธีที่ต้องมีแสงเข้าร่วมในปฏิกิริยามีข้อจำกัดคือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง จึงจำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมความเข้มของแสงให้มีค่าคงที่ตลอดกระบวนการ ไม่เช่นนั้นแล้วจะมีผลทำให้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีปริมาณไม่คงที่ตามไปด้วย อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนต่ำโดยมีค่าอยู่ที่ประมาณร้อยละ 1-5 (Das และ Veziroglu, 2008)

3) การหมักในที่มีมืด (Dark-fermentation)

เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อนำไปใช้ของแบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ต้องการออกซิเจน (anaerobic bacteria) และสำหรับบางชนิดจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้โดยไม่ต้องใช้แสง ซึ่งเริ่มจากขั้นตอนการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นกรดไพรูวิกและจากกรดไพรูวิกเป็นอะซีติลโคเอ โดยในระหว่างขั้นตอนนี้จะมีตัวรับอิเล็กตรอนคือ NAD^+ หรือ FAD^+ ($\text{Fd}_{(\text{ox})}$) เข้ามารับอิเล็กตรอนและโปรตอนที่เกิดขึ้น และกลายเป็น NADH และ FADH_2 ($\text{Fd}_{(\text{red})}$) ตามลำดับ ซึ่งจะต้องมีการฟื้นฟูอำนาจให้กลับเป็นไป NAD^+ หรือ FAD^+ อีกครั้งปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิเล็กตรอนและโปรตอนออกมา ดังสมการ



สำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยการหมักในที่มีมืดนั้นสามารถผลิตได้จากสารอินทรีย์หลายชนิดทั้งสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ไปจนถึงสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก จึงสามารถนำไปใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากของเสียต่างๆ ได้อีกด้วย อีกทั้งยังให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนค่อนข้างสูงและคงที่ การเดินระบบสามารถทำได้ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายต่ำกว่าวิธีอื่นๆ

เนื่องจากใช้พื้นที่น้อยและไม่ต้องการการบำรุงรักษามากนัก (Zaborsky, 1998; Hallenbeck และ Benemann, 2002; Levin, Pitt และ Love, 2004 อ้างถึงใน Mathews และ Wang, 2009) แต่อาจมีข้อจำกัดอยู่บ้างในเรื่องของความสามารถในการนำซบสเตรทไปใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการใช้เชื้อจุลินทรีย์ชนิดผสม (Mix cultures) ในการผลิต เนื่องจากแบคทีเรียแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการนำซบสเตรทไปใช้แตกต่างกัน และในกรณีที่ใช้ของเสียในการผลิต ชนิดของซบสเตรทซึ่งเป็นองค์ประกอบในของเสียนั้นก็มีความยากง่ายในการย่อยสลายแตกต่างกันด้วยซึ่งมีผลต่อการนำไปใช้ของแบคทีเรียเช่นเดียวกัน

2.4 การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

การบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนเป็นระบบที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาเนื่องจากมีข้อได้เปรียบมากกว่าการบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนหลายประการทั้งค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและสามารถรองรับความเข้มข้นของน้ำเสียได้ในช่วงที่ค่อนข้างกว้าง โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนในปัจจุบันได้มีการนำมาใช้เป็นระบบในการบำบัดตะกอนน้ำเสียหรือสลัดจ์ (sludge) โดยเป็นกระบวนการที่ใช้ทำลายสารอินทรีย์ในตะกอนน้ำเสียให้มีปริมาณลดลงเพื่อนำไปกำจัดต่อไป และใช้เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นที่ใช้ลดความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้ลดน้อยลงก่อนที่จะบำบัดต่อด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบใช้ออกซิเจนต่อไป ซึ่งจะช่วยประหยัดพลังงานและสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้มาก แต่อย่างไรก็ตามในการนำระบบแบบไร้ออกซิเจนมาใช้ควรที่จะมีการพิจารณาถึงความเหมาะสมของลักษณะน้ำเสีย สภาพแวดล้อมและปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการบำบัดร่วมด้วย โดยข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนดังตารางที่ 2.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ข้อดีและข้อเสียของระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน

ข้อดี	ข้อเสีย
<p>1. เกิดมวลตะกอนจุลินทรีย์น้อยมากจึงไม่เป็นการบ่อบำบัดตะกอนหลังการบำบัด</p> <p>2. ไม่ต้องใช้พลังงานจำนวนมากในการเติมอากาศและได้ก๊าซชีวภาพไว้ใช้เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนภายในระบบทำให้สามารถประหยัดพลังงานในการบำบัดน้ำเสียได้มากขึ้น</p> <p>3. สามารถใช้บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงได้</p> <p>4. ระบบสามารถรับอัตราการสารอินทรีย์ได้สูง</p>	<p>1. ใช้เวลาค่อนข้างนานในการเริ่มต้นระบบ (start up) เพื่อสร้างมวลจุลินทรีย์</p> <p>2. ระบบต้องมีกำลังบัฟเฟอร์ (buffer capacity) สูงเพื่อรองรับไม่ให้ค่าพีเอชของระบบลดต่ำลงมากเกินไปจากการสร้างกรดไขมันระเหยภายในระบบ</p> <p>3. เกิดกลิ่นเหม็นจากก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ เมื่อรวมตัวกับน้ำจะเกิดเป็นกรด เกิดการกัดกร่อนท่อและอุปกรณ์ต่างๆ ได้</p> <p>4. มีความอ่อนไหวต่อสารพิษที่เข้ามาในระบบ</p> <p>5. มีความอ่อนไหวต่ออุณหภูมิที่มีค่าลดลงต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส โดยจะส่งผลทำให้อัตราการบำบัดน้ำเสียมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว (Metcalf และ Eddy, 2004)</p> <p>6. ในเขตที่มีสภาพภูมิอากาศหนาวเย็น อาจจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการให้ความร้อนแก่ระบบ</p> <p>7. คุณภาพน้ำที่ออกจากระบบยังไม่ได้มาตรฐานน้ำทิ้ง จึงต้องมีการบำบัดต่อด้วยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนต่อไป</p>

<p>5. มี ความ ต้องการ สารอาหารต่ำ กว่าระบบเดิม อากาศ</p> <p>6. ระบบ ตอบสนองต่อ สารอินทรีย์ได้ ไวหลังจาก หยุดเติม สารอินทรีย์</p> <p>7. ต้องการการ บำรุงรักษา น้อยกว่าระบบ อื่นๆ</p>	
---	---

2.4.1 ประเภทระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน

ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนสามารถแบ่งได้ตามจำนวนถังปฏิกริยา ได้เป็น 2 แบบ คือ

2.4.1.1 ระบบบำบัดแบบขั้นตอนเดียว (Single-stage reactor) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549)

ระบบบำบัดแบบขั้นตอนเดียวเป็นระบบที่มีกระบวนการบำบัดแบบไร้ออกซิเจนเกิดขึ้นภายในถังปฏิกริยาเพียงถังเดียว เป็นระบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชนต่างๆ ระบบบำบัดแบบขั้นตอนเดียวประกอบด้วยระบบหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดมีความเหมาะสมต่อประเภทและปริมาณของน้ำเสียที่แตกต่างกันออกไป ตัวอย่างของชนิดของระบบบำบัดแบบขั้นตอนเดียว ได้แก่

1) บ่อแอนแอโรบิกหรือบ่อหมิ่น (Anaerobic Ponds)

บ่อชนิดนี้มีลักษณะเป็นบ่อดินขนาดใหญ่ที่มีความลึกประมาณ 3-4 เมตร

เป็นบ่อเปิดโล่ง ไม่มีฝาปิด เป็นระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนที่สามารถเดินระบบได้ง่าย แต่มีข้อเสียคือ ต้องใช้พื้นที่ในการก่อสร้างจำนวนมาก

2) ถังย่อยสลายแบบธรรมดา (Conventional Anaerobic Digester)

เป็นระบบที่ประกอบด้วยถังปฏิกริยาที่มีฝาปิดและมีทางระบายก๊าซออกจากระบบ เป็นระบบที่นิยมใช้ในการบำบัดสลัดจ์ที่เกิดจากระบบเติมอากาศ ระบบถังย่อยสลายสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ถังย่อยชนิดอัตราจำกัดต่ำ (Low Rate Anaerobic Digester) และถังย่อยชนิดอัตราจำกัดสูง (High Rate Anaerobic Digester) โดยทั้งสองชนิดมีข้อแตกต่างกันคือ ถังย่อยชนิดอัตราจำกัดต่ำจะไม่มีกวนและควบคุมอุณหภูมิ แต่ในถังย่อยชนิดอัตราจำกัดสูงจะมีการกวนและควบคุมอุณหภูมิเพื่อให้อัตราการบำบัดเพิ่มสูงขึ้น

3) ถังกรองไร้อากาศ (Anaerobic Filter)

เป็นถังปฏิกริยาที่มีการบรรจุวัสดุตัวกลางขนาดประมาณ 1.5-2.0 นิ้ว ลงไปในถังเพื่อให้เป็นที่เกาะยึดของแบคทีเรียภายในระบบ จะมีการไหลของน้ำจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน เพื่อให้ น้ำท่วมวัสดุตัวกลางอยู่ตลอดเวลา น้ำที่ได้จากถังกรองจะมีความใสโดยไม่ต้องใช้ถังตกตะกอน แต่มีข้อเสียคือ ต้องบำรุงรักษาตัวกลางอย่างสม่ำเสมอเพื่อไม่ให้เกิดการอุดตันและจะต้องมีการกระจายน้ำเข้าระบบอย่างสม่ำเสมอเพื่อไม่ให้ตัวกลางแห้ง

4) ระบบยูเอเอสบี

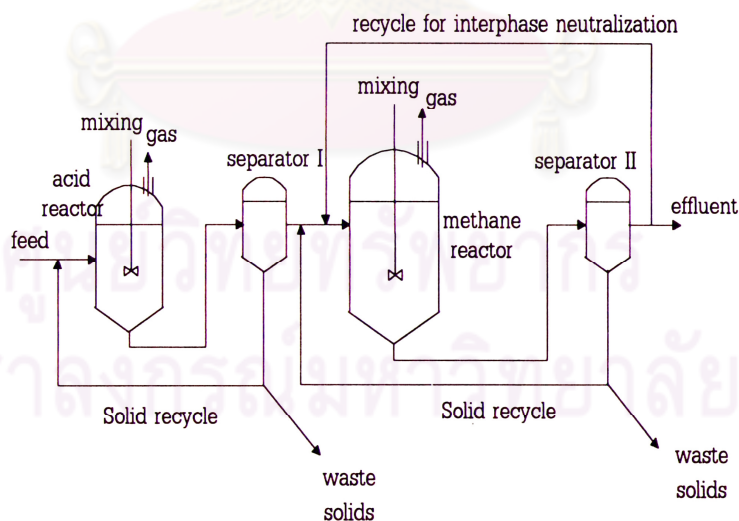
เป็นระบบที่ประยุกต์มาจากถังกรองไร้อากาศโดยที่จะมีการไหลของน้ำจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบน แบคทีเรียภายในระบบจะมีการจับตัวกันเป็นเม็ดแทนการใช้วัสดุตัวกลางซึ่งจะทำให้เสียปริมาตรภายในถังและสิ้นเปลืองในการซื้อวัสดุตัวกลาง ระบบนี้มีข้อดีคือ สามารถป้องกันการหลุดออกจากระบบของแบคทีเรียได้เนื่องจากมีลักษณะเป็นเม็ดและมีน้ำหนักมาก แต่มีข้อเสียคือ การเลี้ยงตะกอนให้เป็นเม็ดทำได้ยากและต้องใช้ความรู้เฉพาะด้าน

5) ระบบอื่นๆ

นอกจากระบบที่ได้กล่าวไปแล้ว ยังมีระบบอื่นๆ ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน ซึ่งได้แก่ ระบบแผ่นหมุนชีวภาพไร้ออกซิเจน (Anaerobic Rotating Biological Contactor, AnRBC) ถังย่อยแบบสัมผัส (Anaerobic Contact) เป็นต้น

2.4.1.2 ระบบบำบัดแบบสองขั้นตอน (Two-stage reactor)

ระบบบำบัดแบบสองขั้นตอนหรือถังย่อยแบบแยกเชื้อแบบไร้ออกซิเจน เป็นถังย่อยที่พัฒนามาจากถังย่อยสลัดจ์แบบธรรมดา โดยเกิดจากแนวคิดที่ต้องการแยกขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนออกจากกันเพื่อให้ระบบบำบัดสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากภายในถังย่อยแบบไร้ออกซิเจนทั่วไปจะประกอบด้วยแบคทีเรียหลายกลุ่มอาศัยอยู่ด้วยกัน โดยแบคทีเรียแต่ละกลุ่มนั้นต่างก็มีความต้องการสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน การแยกแบคทีเรียแต่ละกลุ่มออกจากกัน โดยใช้ค่าพีเอชหรือปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิ (Chu และคณะ, 2008; Lee และคณะ, 2009) เวลาพักพักตะกอน (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549; Liu และคณะ, 2006) เป็นต้น เป็นตัวกำหนดชนิดของแบคทีเรียภายในถังจะช่วยให้แบคทีเรียแต่ละกลุ่มสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพและยังช่วยให้การควบคุมดูแลระบบทำได้ง่ายขึ้นอีกด้วย (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542) จากรูปที่ 2.3 แสดงรูปถังย่อยแบบแยกเชื้อแบบไร้ออกซิเจนที่มีการใช้ค่าพีเอชเป็นตัวกำหนดและควบคุมชนิดของแบคทีเรีย โดยหลักการการทำงานของถังย่อยแบบแยกเชื้อชนิดนี้คือ จะมีการแบ่งถังย่อยออกเป็น 2 ถังได้แก่ ถังหมักกรดและถังหมักก๊าซมีเทน สารอินทรีย์ที่เข้าระบบจะถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดไขมันชนิดต่างๆ ภายในถังหมักกรดซึ่งมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 4–6.5 จากนั้นน้ำเสียที่ออกจากถังหมักกรดจะเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทนเพื่อเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายให้เป็นก๊าซมีเทนต่อไป ค่าพีเอชของถังหมักก๊าซมีเทนจะอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนเหมือนในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนทั่วไปคือ 6.5–8.2



รูปที่ 2.3 ถังย่อยแบบแยกเชื้อแบบไร้ออกซิเจนที่มีการใช้ค่าพีเอชเป็นตัวกำหนด และควบคุมชนิดของแบคทีเรีย (มันสิน ตันจุลเวศม์, 2542)

ในปัจจุบันระบบไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอนยังมีการนำมาใช้ไม่แพร่หลายมากนักเนื่องจากต้องใช้ความรู้และความเข้าใจพอสมควรในการเดินระบบให้มีสถานะที่

เหมาะสมกับชนิดของแบคทีเรีย และอีกสาเหตุหนึ่งคือความคิดที่ว่าราคาค่าก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบแบบสองชั้นตอนหรือแบบแยกเขื่อนนั้นสูงกว่าระบบแบบทั่วไป (Choi และคณะ, 1997; De Baere, 2000 อ้างถึงใน Liu และคณะ, 2006) อย่างไรก็ตามหากระบบชนิดนี้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพที่มีค่าฮิลด์สูงกว่าหรือให้พลังงานที่สูงกว่าระบบแบบธรรมดาทดแทนค่าใช้จ่ายดังกล่าวได้ก็ถือว่ามีความคุ้มค่าในการเลือกใช้ระบบชนิดนี้ (Lee และคณะ, 2009)

เมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียหรือของเสียอย่างจริงจัง ซึ่งในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพนี้ น้ำที่ออกจากระบบยังคงมีปริมาณมลสารค่อนข้างสูงและมีความจำเป็นที่จะต้องบำบัดต่อด้วยระบบอื่น การนำเอาระบบแบบสองชั้นตอนมาใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจึงถือว่ามีความเหมาะสมเพราะก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซที่ให้พลังงานต่อหน่วยและมีมูลค่าค่อนข้างสูงโดยมีราคาเท่ากับ 5 ดอลลาร์สหรัฐ/กก. (CPCB, 2000; Logan, 2008 อ้างถึงใน Mohan และคณะ, 2009) สามารถทดแทนในส่วนของค่าก่อสร้างและค่าใช้จ่ายในการเดินระบบแบบสองชั้นตอนได้ โดยจากงานวิจัยของ Liu และคณะ (2006) พบว่าในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะจากห้องครัวด้วยระบบแบบสองชั้นตอน นอกจากจะผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ในปริมาณสูงแล้ว ระบบชนิดนี้ยังมีค่าฮิลด์ของก๊าซมีเทนสูงกว่าในระบบแบบชั้นตอนเดียวถึงร้อยละ 21 อีกด้วย

2.4.2 แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน (มันสิน ตันทุลเวศม์, 2542)

แบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนสามารถแบ่งตามผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ คือ

2.4.2.1 แบคทีเรียที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน

แบคทีเรียชนิดไม่สร้างก๊าซมีเทนมีความสำคัญต่อระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนเป็นอย่างมาก โดยจะทำหน้าที่ในการสร้างซับสเตรทที่แบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทนสามารถนำไปใช้ได้ด้วยการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนน้อยกว่า 2 อะตอม แบคทีเรียชนิดนี้มีหลายชนิดทั้งแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาดและแบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนได้บ้าง แต่ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาด แบคทีเรียชนิดนี้จะเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนตั้งแต่ขั้นตอนไฮโดรไลซิสไปจนถึงขั้นตอนการสร้างกรดอะซิติก จึงสามารถแบ่งแบคทีเรียชนิดนี้ออกเป็น 2 ชนิดคือ

1) แบคทีเรียที่สร้างกรดไขมันระเหยง่าย (Acidogenic bacteria)

แบคทีเรียกลุ่มนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนกรดไขมัน กรดอะมิโนและน้ำตาล ที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซิสให้เป็นกรดไขมันชนิดสั้น (คาร์บอนไม่เกิน 6 อะตอม) ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น เอทานอล บิวทานอล อะซิโตน (acetone) เป็นต้น กรดไขมันชนิดสั้นที่ได้จากปฏิกิริยามีหลายชนิด เช่น กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทริกและกรดฟอร์มิก เป็นต้น แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนนี้มีแบคทีเรียกลุ่ม *Clostridium* เป็นแบคทีเรียกลุ่มหลักและยังมีกลุ่ม *Propionibacterium* อยู่ด้วย (กรมควบคุมมลพิษ, 2546) ปฏิกิริยาการย่อยสลายน้ำตาลกลูโคสของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดสามารถดังสมการ 2.15-2.18

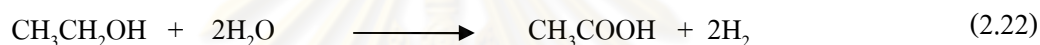
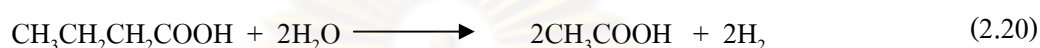


2) แบคทีเรียที่สร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (Acedogenic bacteria)

แบคทีเรียชนิดนี้จะทำหน้าที่ย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ก๊าซไฮโดรเจน เมทานอลและเมทิลลามีน แบคทีเรียกลุ่มนี้มีความสำคัญในการสร้างสมดุลระหว่างผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน โดยการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายชนิดอื่นให้เป็นกรดอะซิติกเพื่อให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนสามารถนำไปใช้ได้ซึ่งจะช่วยลดปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในระบบ โดยหากมีกรดไขมันระเหยง่ายสะสมมากเกินไปจะทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงและเกิดการยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนรวมทั้งแบคทีเรียชนิดอื่นได้ ในการย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายชนิดอื่นให้เป็นกรดอะซิติกนั้นได้รับผลโดยตรงจากความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจน โดยสามารถเกิดขึ้นได้ภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และสำหรับสลายกรดโพรไพโอนิกให้เป็นกรดอะซิติกจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามชั้นสเตรทที่ใช้ดังนี้ คือ

(1) แบคทีเรียสร้างอะซิเตทที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ (Hydrogen producing bacteria)

ทำหน้าที่ย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมและเอทานอลให้เป็นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นนี้หากมีการสะสมมากเกินไปจนมีความดันพาร์เซียของก๊าซไฮโดรเจนสูงจะส่งผลให้การสร้างกรดอะซิติกไม่สามารถทำได้ แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนจึงมีบทบาทในการลดก๊าซไฮโดรเจนโดยเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน จึงอาจกล่าวได้ว่าแบคทีเรียทั้งสองชนิดมีการอาศัยแบบให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน ตัวอย่างของปฏิกิริยาการย่อยสลายดังสมการ 2.19-2.22



(2) แบคทีเรียผลิตอะซิเตทอย่างเดียว (Homoacetogenic bacteria)

เป็นแบคทีเรียที่สามารถผลิตกรดอะซิติกได้เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในปฏิกิริยาแต่จะมีการใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและมีการใช้แหล่งพลังงานจากสารอนินทรีย์คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาผลิตเป็นกรดอะซิติกภายใต้การเจริญเติบโตแบบออโตโทรฟิก (autotrophic) และยังสามารถใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนให้อิเล็กตรอนและรับอิเล็กตรอนภายใต้การเจริญเติบโตแบบเฮเทอโรโทรฟิก (Heterotrophic) หรือเรียกว่าการหมัก (fermentation) ปฏิกิริยาการย่อยสลายทั้ง 2 แบบ ดังสมการ 2.23 และ 2.24



ในกลุ่มของแบคทีเรียที่ไม่สร้างก๊าซมีเทนทั้งแบคทีเรียสร้างกรดไขมันระเหยง่ายและแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติก มีแบคทีเรียจีส Clostridium เป็นกลุ่มหลักซึ่งประกอบไปด้วยแบคทีเรียจำนวนมากหลายชนิด แต่ละชนิดก็มีกระบวนการเมตาบอลิซึมหลายแบบด้วยกันทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนการสร้างกรดและการสร้างกรดอะซิติกมีหลายชนิดด้วย โดยลักษณะสมบัติของตัวอย่างแบคทีเรียในกลุ่มจีส Clostridium แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ลักษณะสมบัติของแบคทีเรียบางกลุ่มในจีนัส *Clostridium* (ตัดแปลงจาก Madigan และคณะ, 1997 อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

ลักษณะสำคัญ	ผลผลิตและลักษณะอื่น																ชนิดของแบคทีเรีย ในจีนัส <i>Clostridium</i>	
	กรดไขมันระเหยง่าย							แอลกอฮอล์			CO ₂	H ₂	ผลิตภัณฑ์อื่นๆ					
	พอร์เมท	แคตเชน	บิวไทเรท	อะซิเตท	ไพโรไพโอเนท	วาเลอเรท	ซัสติเนท	อื่นๆ	เอทานอล	บิวทานอล			ไพโรพานอล	อะซิโตน	เอทิลอะซิเตท	ฟิริน		อื่นๆ
1. ย่อยคาร์โบไฮเดรท ย่อยเซลลูโลสได้		/		/			/		/			/	/					<i>C. cellobioparum</i> <i>C. thermocellum</i>
ย่อยน้ำตาล, แป้งและ เปกติน (pectin) ได้ บางชนิดตรึงไนโตรเจนได้			/	/	/		/		/	/	(iso-)	/	/	/				<i>C. butyricum</i> <i>C. acetobutylicum</i> <i>C. pasteurianum</i> <i>C. perfringens</i> <i>C. thermosulfurogenes</i>
ย่อยน้ำตาลให้เป็นกรดอะซิติก ได้ (ผลิตอะซิเตทจาก CO ₂)				/														<i>C. aceticum</i> <i>C. thermoaceticum</i> <i>C. formicoaceticum</i>
ย่อยเฉพาะ pentoses หรือ methylpentoses				/	/				/	(n-)		/	/					<i>C. methylpentosum</i>

ตารางที่ 2.3 ลักษณะสมบัติของแบคทีเรียบางกลุ่มในจีส Clostridium (ตัดแปลงจาก Madigan และคณะ, 1997 อ้างถึงใน กรมควบคุมมลพิษ, 2546) (ต่อ)

ลักษณะสำคัญ	ผลผลิตและลักษณะอื่น																ชนิดของแบคทีเรีย ในจีส Clostridium	
	กรดไขมันระเหยง่าย								แอลกอฮอล์			CO ₂	H ₂	ผลิตภัณฑ์อื่นๆ				
	ฟอร์เมท	แลคเตท	บิวไทเรท	อะซิเตท	โพรไพโอเนท	วาโลเลท	ซัลลิตเนท	อื่นๆ	เอทานอล	บิวทานอล	โพรพานอล			อะซิโตน	เอโททอกซิน	พิวรีน		อเมโมเน
2. ข่อยโปรตีนและ กรดอะมิโนได้				/				/				/	/			/	<i>C. sporogenes</i> <i>C. tetani</i> <i>C. botulinum</i> <i>C. tetanomorphum</i>	
อาจข่อยน้ำตาลได้			/	/											/		<i>C. propionicum</i>	
ข่อยสารประกอบที่มี คาร์บอน 3 อะตอม				/	/							/					<i>C. bifementans</i>	
3. ข่อยคาร์โบไฮเดรท หรือกรดอะมิโนได้	/		/	/		/											<i>C. acidurici</i> <i>C. kluveri</i>	
4. ข่อยพิวรีน (Purine) ได้				/								/			/	/		
5. ข่อยเอทานอลให้เป็น กรดไขมันได้ (ใช้อะซิเตทเป็น สารรับอิเล็กตรอน)																		

หมายเหตุ: iso-, n- = ชนิดของโครงสร้างโมเลกุล

2.4.2.2 แบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน

เป็นแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนจะเป็นแบคทีเรียชนิดไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาด สามารถเจริญเติบโตได้ช้าเนื่องจากมีความต้องการสารอาหารที่เฉพาะเจาะจง นอกจากนี้ยังมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อม เช่น การมีปริมาณออกซิเจนเพียงเล็กน้อยในระบบ หรือการมีค่าพีเอชที่อยู่นอกช่วง 6.8-9.2 ชั้นสเตรทที่แบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนส่วนใหญ่สามารถใช้ได้ ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กรดฟอร์มิก เป็นต้น

จากการที่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแบคทีเรียที่ไม่สร้างก๊าซมีเทนมีมากมายหลายชนิดทั้งที่เป็นกรดอินทรีย์และสารอินทรีย์อื่นๆ แต่เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนไม่สามารถนำมาใช้ได้ทั้งหมด ทำให้มีสารอินทรีย์บางชนิดที่ไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนได้เกิดการตกค้างอยู่ในระบบจึงเป็นสาเหตุให้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนไม่สามารถลดปริมาณซีโอดีของน้ำเสียให้มีค่าต่ำมากๆ ได้ ต้องมีการบำบัดต่อด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนเพื่อให้ค่าซีโอดีลดต่ำลงจนได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้ง แบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนสามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ

1) แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนที่บริโภคเฉพาะก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogenotrophic methanogen)

แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนที่บริโภคเฉพาะก๊าซไฮโดรเจน หรือเรียกอีกอย่างว่า Hydrogen utilizer เป็นพวกที่สร้างก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะใช้พลังงานจากก๊าซไฮโดรเจนและใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ดังสมการ



นอกจากนี้ยังสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นชั้นสเตรทได้โดยการเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เสียก่อน ดังสมการ



2) แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนที่บริเวณเฉพาะอะซิเตท (Acetoclastic methanogen)

แบคทีเรียชนิดนี้เป็นแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนจากการแตกตัวของกรดอะซิติก ดังสมการ



3) แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนที่บริเวณได้ทั้งก๊าซไฮโดรเจนและอะซิเตท (Hydrogenotrophic/Acetoclastic methanogen)

แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนที่บริเวณได้ทั้งก๊าซไฮโดรเจนและอะซิเตทเป็นแบคทีเรียที่สามารถใช้ได้ทั้งก๊าซไฮโดรเจนและอะซิเตทในการผลิตก๊าซมีเทน แต่จะสามารถใช้ก๊าซไฮโดรเจนได้ดีกว่า

2.4.3 ขั้นตอนของการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน

2.4.3.1 ไฮโดรไลซิส

ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนของการเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น ไขมัน โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต ให้มีโมเลกุลขนาดเล็กลงโดยใช้เอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาออกเซลล์ โดยเอนไซม์นี้จะมีเฉพาะเจาะจงต่อสารชนิดนั้นๆ ดังตารางที่ 2.4 ผลจากขั้นตอนนี้จะได้สารโมเลกุลขนาดเล็กที่ละลายน้ำได้ เช่น กรดไขมันชนิดยาว กรดอะมิโน และน้ำตาล ซึ่งแบคทีเรียสามารถนำเข้าสู่ภายในเซลล์เพื่อย่อยสลายในขั้นตอนต่อไป ขั้นตอนนี้จะดำเนินไปได้ค่อนข้างช้าจึงเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของปฏิกิริยา ทำให้เวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์แต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

ตารางที่ 2.4 ผลผลิตขั้นต้นที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซิสและเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง

ประเภทของสารอินทรีย์	เอนไซม์	ผลผลิตขั้นต้น
ไขมัน	ไลเปส, เอสเตอเรส	กรดไขมันชนิดยาว (คาร์บอน > 12 อะตอมขึ้นไป)
โปรตีน	โปรตีเอส	กรดอะมิโน
คาร์โบไฮเดรต	อะไมเลส	น้ำตาล

2.4.3.2 การสร้างกรด (Acidogenesis)

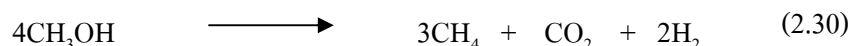
ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับแบคทีเรียสร้างกรด โดยจะมีการนำสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กเข้าสู่ภายในเซลล์และย่อยสลายกลายเป็นกรดไขมันระเหยชนิดสั้น (คาร์บอนไม่เกิน 6 อะตอม) เช่น กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทริก เป็นต้น นอกจากนี้ผลของปฏิกิริยาจะได้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาด้วย ชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของซับสเตรทและความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจน ยกตัวอย่างเช่นในการย่อยสลายน้ำตาลกลูโคส 1 โมลภายใต้สภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนต่ำจะได้กรดอะซิติก 2 โมล แต่ภายใต้สภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนสูงจะได้กรดอะซิติก 1 โมลและกรดบิวไทริกหรือกรดโพรไพโอนิก 1 โมล เป็นต้น ส่วนการย่อยสลายกรดไขมันและกรดอะมิโนจะได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันออกไปดังรูปที่ 2.4

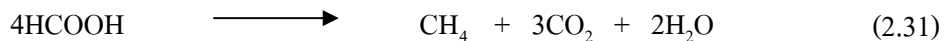
2.4.3.3 การสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่นๆ (Acetogenesis)

ในขั้นตอนนี้แบคทีเรียกลุ่มอะซิโตจีนิคหรือแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดอะซิติกจะทำหน้าที่เปลี่ยนกรดไขมันระเหยชนิดสั้นที่ได้จากขั้นตอนการสร้างกรดให้เป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน โดยขั้นตอนนี้มีความสำคัญในการเชื่อมต่อระหว่างขั้นตอนการสร้างกรดและขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนไม่สามารถใช้สารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมได้ จึงต้องมีการเปลี่ยนกรดไขมันชนิดอื่นให้เป็นกรดอะซิติกเสียก่อน นอกจากนี้สารอินทรีย์ชนิดอื่นที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนสามารถนำไปใช้ได้ ได้แก่ กรดฟอร์มิก ก๊าซไฮโดรเจน เมทานอลและเมทิลลามีน (methylamine) เป็นต้น

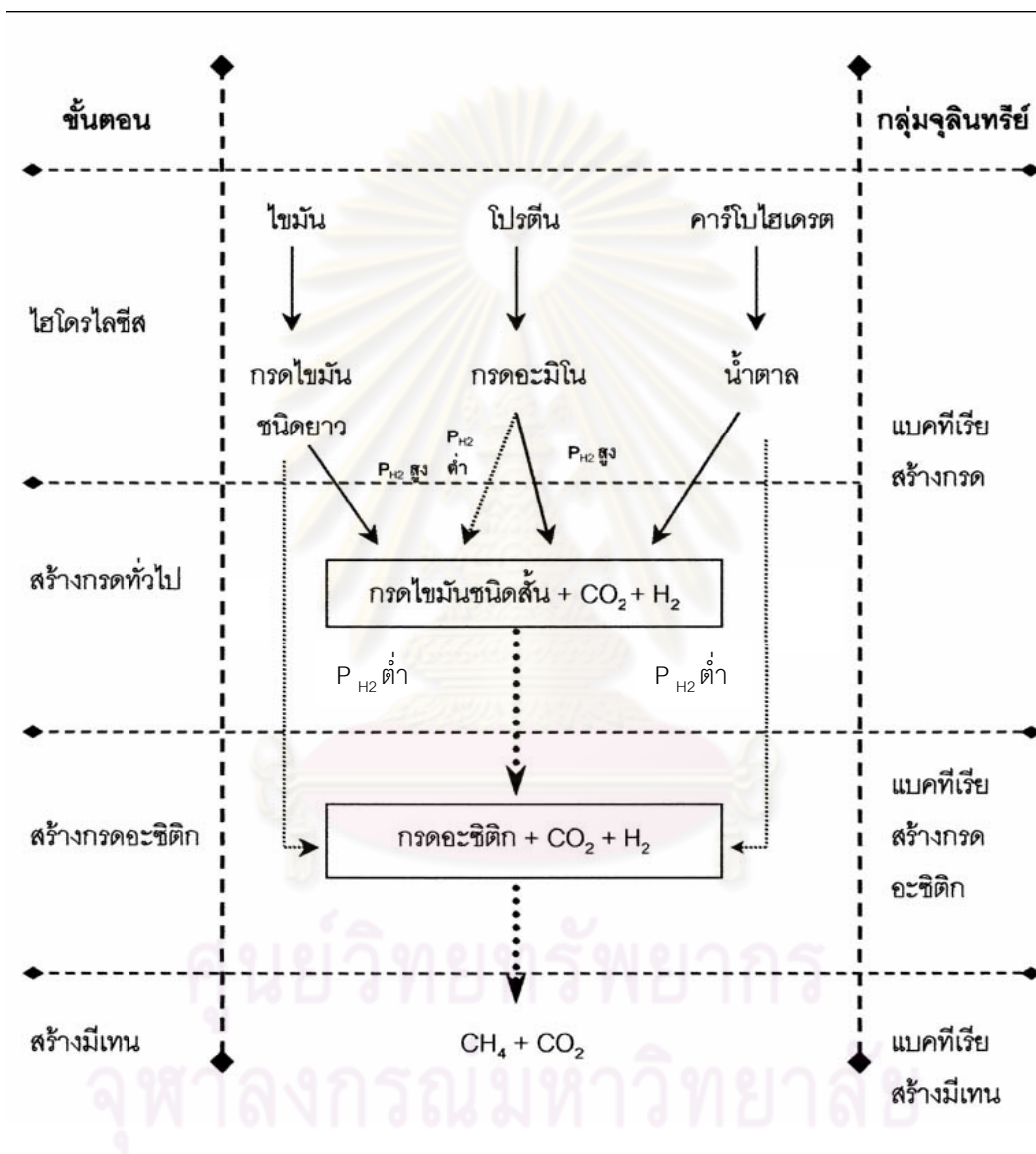
2.4.3.4 การสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนจะเปลี่ยนกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจน รวมถึงเมทานอล กรดฟอร์มิกและสารอินทรีย์อื่นๆที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนสามารถนำมาใช้ได้ ที่ได้จากขั้นตอนการย่อยสลายทั้งหมดข้างต้นให้เป็นก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอย่างเด็ดขาด ดังสมการ





ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนทั้ง 4 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการย่อยสลายไขมัน โปรตีนและคาร์โบไฮเดรตแบบไร้ออกซิเจน (Sam-Soon และคณะ, 1987)

2.4.4 ตัวอย่างผลของความดันพาร์เซิลของก๊าซไฮโดรเจนที่มีต่อการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายจากกลูโคส (มันสิน ดัชนีอุตสาหกรรม, 2542)

2.4.4.1 ความดันพาร์เซิลของก๊าซไฮโดรเจนต่ำ

ภายหลังจากขั้นตอนไฮโดรไลซิสได้เป็นกลูโคสซึ่งมีโมเลกุลขนาดเล็กแล้ว แบคทีเรียที่ไม่สร้างก๊าซมีเทนจะดูดซึมกลูโคสเข้าไปในเซลล์และย่อยสลายโดยใช้วิถีทางแบบ EMP (Embden-Meyerhof pathway) โดยกลูโคสจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นกรดไพรูวิก ดังสมการที่ 2.32



จากสมการ กลูโคส 1 โมลจะได้กรดไพรูวิก 2 โมล ATP 2 โมลและ NADH 2 โมล โดยมีโคเอนไซม์ NAD^+ เป็นเอนไซม์ที่มีความสำคัญในการเป็นตัวพาหะของอิเล็กตรอนและไฮโดรเจนโดยจะกลายเป็น NADH จากนั้นจะมีการฟื้นฟูอำนาจของ NAD^+ ใหม่เพื่อเป็นตัวพาหะในการขนส่งอิเล็กตรอนต่อไปโดยการปลดปล่อยโปรตอนออกมดั่งสมการที่ 2.33



ถ้าก๊าซไฮโดรเจนที่อยู่ในอากาศเหนือน้ำมีความดันพาร์เซิลต่ำจนทำให้ไฮโดรเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะหนีจากน้ำสู่บรรยากาศได้ง่ายทำให้ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่วนก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะถูกแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนชนิดที่เป็นผู้บริโภคนำไปสร้างก๊าซมีเทน ดังสมการที่ 2.34



กรดไพรูวิกที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นอะซีทิลโคเอนไซม์ โดยมี NAD^+ ทำหน้าที่เป็นตัวพาหะของอิเล็กตรอนเช่นเดิม และหลังจากนั้นอะซีทิลโคเอนไซม์จะถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซีติกพร้อมกับการสร้าง ATP ดังสมการ





เมื่อรวมสมการการย่อยสลายกลูโคสจะได้ว่ากลูโคส 1 โมลให้กรดอะซิติก 2 โมล คาร์บอนไดออกไซด์ 2 โมล ก๊าซไฮโดรเจน 4 โมลและ ATP 4 โมล ดังสมการที่ 2.37



2.4.4.2 ความดันพาร์เซิลของไฮโดรเจนสูง

เมื่อมีการสะสมตัวของก๊าซไฮโดรเจนจนมีค่าสูง การปลดปล่อยโปรตอนออกจาก NADH ด้วยวิธีปกติจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ แบคทีเรียที่ไม่สร้างก๊าซมีเทนจึงต้องใช้วิธีการอื่นในการฟื้นฟูอำนาจของ NADH โดยใช้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเองควบคู่กับการเปลี่ยน NADH เป็น NAD^+ ดังสมการที่ 2.38



กรดไพรูวิกที่เกิดจากปฏิกิริยาการย่อยสลายกลูโคส 1 โมลสามารถใช้ปลดปล่อยโปรตอนออกจาก NADH ได้ 2 โมล ส่วนที่เหลืออีก 1 โมลจะถูกย่อยสลายเป็นอะซิทีลโคเอ ดังสมการที่ 2.39

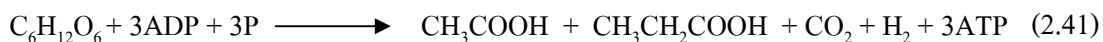


การฟื้นฟูอำนาจให้กับ NADH จากขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับความดันพาร์เซิลของก๊าซไฮโดรเจน ถ้าความดันพาร์เซิลของไฮโดรเจนต่ำ การปลดปล่อยโปรตอนจาก NADH จะใช้วิธีปกติ แต่ถ้าความดันพาร์เซิลของไฮโดรเจนยังมีค่าสูง การปลดปล่อยโปรตอนจะต้องเกิดขึ้นควบคู่กับการเปลี่ยนอะซิทีลโคเอให้เป็นกรดอะซิติก ดังสมการที่ 2.40

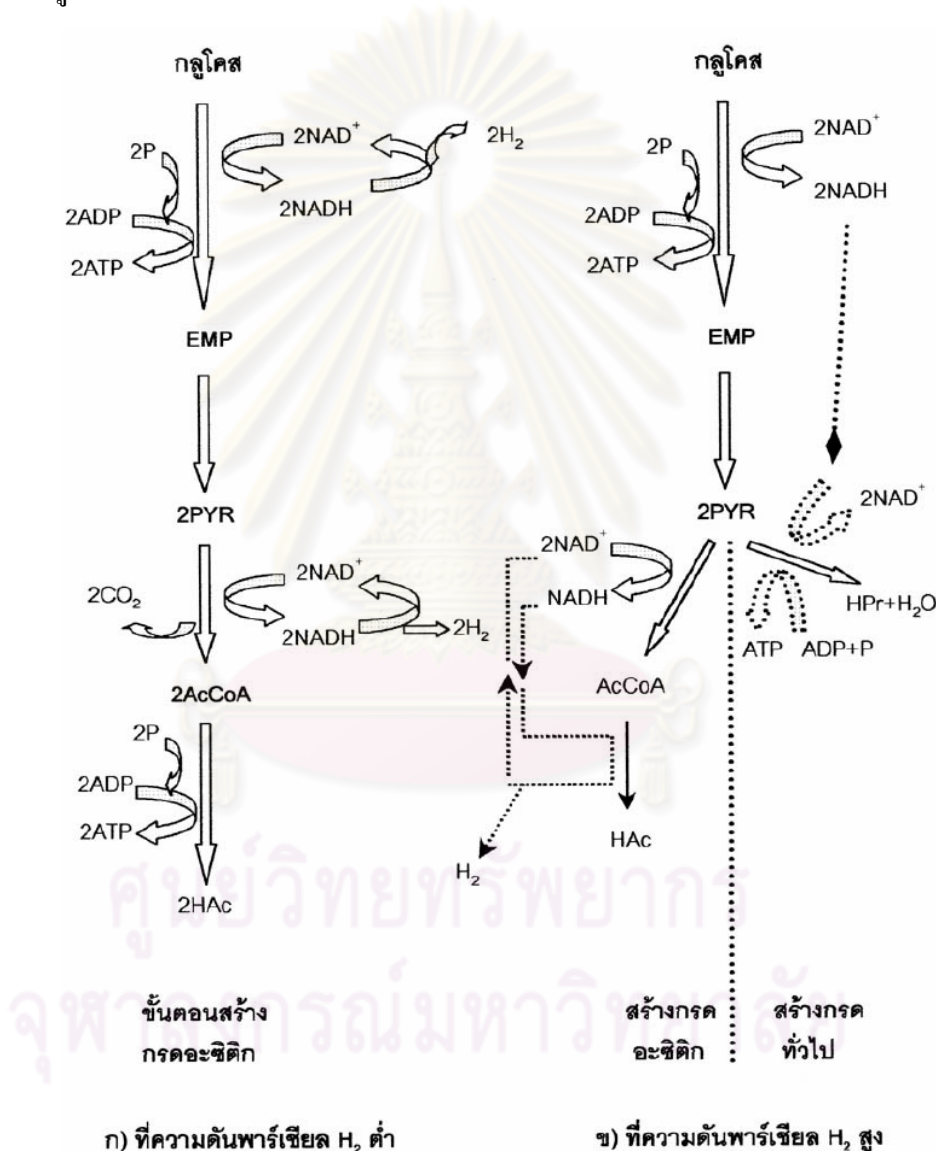


ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ความดันพาร์เซิลของไฮโดรเจนต่ำกลูโคส 1 โมลจะให้ ATP 4 โมลและกรดอะซิติก 2 โมลโดยไม่มีกรดไพรูโพนิกเกิดขึ้น แต่ที่ความดันพาร์เซิลของก๊าซ

ไฮโดรเจนมีค่าสูงจะได้ ATP 3 โมล กรดอะซิติกและกรดไพรูโพนิกอย่างละ 1 โมล สมการการย่อยสลายกลูโคสภายใต้ความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนสูง ดังสมการที่ 2.41



การย่อยสลายกลูโคสที่ความดันความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนต่ำและสูงแสดงดังรูปที่ 2.5 และตารางที่ 2.5



หมายเหตุ : EMP = Embden-Meyerhof pathway, PYR = กรดไพรูวิก, AcCoA = อะซิติลโคเอ, HAc = กรดอะซิติก, HPr = กรดไพรูโพนิก

รูปที่ 2.5 การย่อยสลายกลูโคสที่สภาวะความดันพาร์เซียลของก๊าซไฮโดรเจนต่ำและสูง (Sam-Soon และคณะ, 1987)

ตารางที่ 2.5 การผลิตกรดไขมันระเหยง่ายจากกลูโคสที่ความดันพาร์เซิลของก๊าซไฮโดรเจนสูงและผลกระทบต่อระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน

ขั้นตอน		
<p>การสร้างกรดไพรูวิกจากน้ำตาลกลูโคส : $C_6H_{12}O_6 + 2NAD^+ + 2ADP + 2P \longrightarrow 2CH_3COCOOH + 2NADH + 2ATP$ ผลผลิตขั้นต้น : PYR 1 โมลและ ATP 2 โมล</p>		
สภาวะปกติ	สภาวะที่มีความดันพาร์เซิลของ H ₂ สูง	
	ปฏิกิริยา	ผลกระทบ
<p>การฟื้นอำนาจของ NADH : $2NADH + H^+ \longrightarrow 2NAD^+ + 2H_2$ $2CH_3COCOOH + 2NAD^+ \longrightarrow 2CH_3CoA + 2CO_2 + 2NADH$ ผลผลิตขั้นต้น : CO₂ 2 โมลและ H₂ 4 โมล</p>	<p>การฟื้นอำนาจของ NADH : $CH_3COCOOH + 2NADH + ADP + P \longrightarrow CH_3CH_2COOH + 2NAD^+ + ATP + H_2O$ $CH_3COCOOH + NAD^+ \longrightarrow CH_3CoA + CO_2 + NADH$ ผลผลิตขั้นต้น : HPr 1 โมล, CO₂ 1 โมลและ ATP 1 โมล</p>	<p>1. การสร้าง VFA เกิดปัญหาในการฟื้นอำนาจให้แก่ NAD⁺ โดยไม่สามารถปลดปล่อย H⁺ ออกจาก NADH ได้ จึงต้องใช้วิธีการอื่นโดยมีการฟื้นอำนาจให้แก่ NAD⁺ เกิดขึ้นพร้อมกับการผลิต HPr</p>
<p>$2CH_3CoA + 2ADP + 2P \longrightarrow 2CH_3COOH + 2ATP$ ผลผลิตขั้นต้น : HAc 2 โมลและ ATP 2 โมล</p>	<p>$CH_3CoA + NADH \longrightarrow CH_3COOH + H_2 + NAD^+$ ผลผลิตขั้นต้น : HAc 1 โมลและ H₂ 1 โมล</p>	
<p>ผลผลิตขั้นต้นรวม : HAc 2 โมล, CO₂ 2 โมล, H₂ 4 โมลและ ATP 4 โมล</p>	<p>ผลผลิตขั้นต้นรวม : HAc 1 โมล, HPr 1 โมล, CO₂ 1 โมล, H₂ 1 โมลและ ATP 3 โมล</p> <p>เพิ่มเติม ในกรณีที่ความดันพาร์เซิลของ H₂ ลดต่ำลง PYR จะเปลี่ยนเป็น HAc โดยใช้ปฏิกิริยาในสภาวะปกติและ HPr จะเปลี่ยนเป็น HAc ดังสมการ $CH_3CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$ จากสมการ H₂ ที่เกิดขึ้นหากไม่สามารถกำจัดออกไปจากระบบจะทำให้เกิดการสะสมทำให้ความดันพาร์เซิลเพิ่มสูงขึ้นอีก และในที่สุดจะไม่สามารถเปลี่ยน HPr เป็น HAc ได้</p>	<p>2. การสร้าง HAc HPr ที่เกิดขึ้นจะต้องมีการเปลี่ยนเป็น HAc เพื่อให้แบคทีเรียสามารถนำไปใช้ผลิต CH₄ ต่อไป ไม่เช่นนั้นแล้วจะเกิดการสะสมอยู่ในระบบ ซึ่งจะส่งผลดังนี้คือ</p> <ul style="list-style-type: none"> - มีการสะสมของ VFA มากเกินไปทำให้ค่า pH ของระบบลดต่ำลง - HPr มีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบ <p>การเปลี่ยน HPr เป็น HAc จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อความดันพาร์เซิล H₂ ลดต่ำลง ($\leq 9 \times 10^{-3}$ บรรยากาศ) เท่านั้น</p>

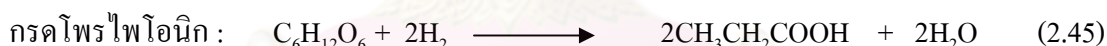
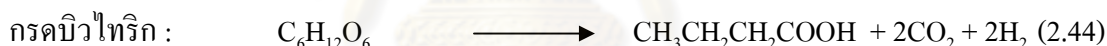
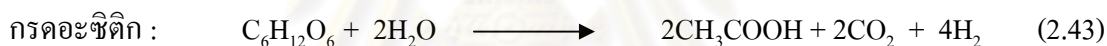
หมายเหตุ : PYR = กรดไพรูวิก, HAc = กรดอะซิติก, HPr = กรดโพรไพโอนิก

2.5 การประยุกต์ใช้การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ

ก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการสร้างกรดและสร้างกรดอะซิติกจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน โดยเกิดจากการปลดปล่อย H^+ ออกจาก NADH เพื่อให้คืนกลับไปเป็น NAD^+ อีกครั้ง ซึ่ง NAD^+ นี้จะทำหน้าที่ในการเป็นพาหะของอิเล็กตรอนที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นกรดไขมันระเหยง่ายชนิดต่างๆ โดยปฏิกิริยาการปลดปล่อย H^+ ออกจาก NADH ดังสมการที่ 2.42



ผลรวมของปฏิกิริยาจะได้กรดไขมันระเหยง่าย ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยชนิดของกรดไขมันระเหยง่ายที่ได้จะมีความแตกต่างกันออกไปตามชนิดของสารอินทรีย์และความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจน โดยตัวอย่างของปฏิกิริยาการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายจากกลูโคส ดังสมการที่ 2.43-2.45



นอกจากปฏิกิริยาข้างต้นแล้ว ในระหว่างขั้นตอนนี้ยังอาจเกิดผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ ได้อีก เช่น กรดมาลิก หรือเอทานอล (Mohanakrishna และคณะ, 2010) ซึ่งจะไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น ดังสมการ



ชนิดของกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นมีความสำคัญต่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ดังจะเห็นได้จากปฏิกิริยาการย่อยสลายกลูโคสในสมการที่ 2.43 และ 2.44 โดยหากปฏิกิริยาได้กรดอะซิติกเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะได้ก๊าซไฮโดรเจนทั้งหมด 4 โมล ต่อกลูโคส 1 โมล และหากปฏิกิริยาได้กรดบิวไทริกเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะได้ก๊าซไฮโดรเจนทั้งหมด 2 โมล ต่อกลูโคส 1 โมล ซึ่งจะ

เห็นได้ว่าปฏิกิริยาที่ได้กรดอะซิติกเป็นผลิตภัณฑ์จะได้จำนวนโมลของก๊าซไฮโดรเจนมากกว่า จึงมีการสันนิษฐานว่าในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพนั้นควรที่ได้กรดอะซิติกเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายมากกว่ากรดบิวไทริก และมีหลายงานวิจัยที่ได้มีการพิจารณาอัตราส่วนระหว่างกรดอะซิติกและกรดบิวไทริก (acetate/butyrate ratio) ที่เกิดขึ้นในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยพบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนมีการแปรผันโดยตรงกับอัตราส่วนระหว่างกรดอะซิติกและกรดบิวไทริก และยังสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ (Khanal และคณะ, 2004; Van Ginkel และ Logan, 2005; Liu และคณะ, 2006) และในขณะเดียวกันก็มีงานวิจัยที่พบว่า ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนมีการแปรผันโดยตรงกับอัตราส่วนของกรดบิวไทริกและกรดอะซิติก (butyrate/acetate ratio) เช่นเดียวกัน (Cohen, 1982 อ้างถึงใน Hawkes และคณะ, 2002; Han และ Shin, 2004; Kim, Han และ Shin, 2006; Zhang และคณะ, 2006; Fang และ Liu, 2002; Hassy และคณะ, 2003 อ้างถึงใน Hawkes และคณะ, 2007; Arooj และคณะ, 2008) โดยอัตราส่วนดังกล่าวมีความผันแปรขึ้นอยู่กับชนิดของซับสเตรท ค่าพีเอชและอุณหภูมิของระบบ (Lee และคณะ, 2009) ซึ่งถึงแม้ว่าความสัมพันธ์ของทั้งอัตราส่วนระหว่างกรดอะซิติกและกรดบิวไทริก และอัตราส่วนของกรดบิวไทริกและกรดอะซิติกกับปริมาณก๊าซไฮโดรเจนนั้นยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ละลายน้ำที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ (soluble metabolite products) ซึ่งได้แก่ กรดไขมัน ระเหยง่าย แอลกอฮอล์ อะซิโตนและผลิตภัณฑ์อื่นๆ เป็นต้น ควรที่จะมีกรดไขมันระเหยง่ายทั้งสองชนิดนี้เป็นองค์ประกอบหลัก เนื่องจากจะสามารถแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการย่อยสลายได้เป็นไปได้ในแนวทางที่ถูกต้องและแสดงถึงประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้

การที่จะได้กรดไขมันระเหยง่ายชนิดใดเป็นผลิตภัณฑ์นั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์หรือซับสเตรทและความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนแล้ว สิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาก็คือ ชนิดของแบคทีเรียภายในระบบ ดังจะเห็นได้จากแบคทีเรียสร้างกรดบางกลุ่มในجنัส *Clostridium* เพียงกลุ่มเดียว สามารถให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายถึง 17 ชนิด ดังตารางที่ 2.3 ยังไม่รวมถึงแบคทีเรียสร้างกรดกลุ่มجنัสอื่นๆ อีกหลายกลุ่ม ซึ่งได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากแบคทีเรียกลุ่มجنัสต่างๆ โดยใช้เชื้อบริสุทธิ์ (pure culture) เช่น *Enterobacter* (Tanisho, Kamiya และ Wakao, 1989; Rachman และคณะ, 1998; Kumar และ Das, 2000 อ้างถึงใน Fang, Li และ Zhang, 2006; Kapdan และ Kargi, 2006; Yokoi และคณะ, 1995 อ้างถึงใน Pan และคณะ, 2008), *Bacillus* (Kalia, Jain และ Kumar, 1994 อ้างถึงใน Kim และคณะ, 2006; Kotay และ Das, 2007 อ้างถึงใน Pan และคณะ, 2008) เป็นต้น ซึ่งการใช้เชื้อบริสุทธิ์ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพมีข้อดีคือ สามารถเลือกชนิดและสายพันธุ์ที่มีความเหมาะสมทั้งกับสภาวะการทำงานและชนิดของซับสเตรทนั้นๆ ได้ และยังให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนหรือไฮโดรเจนอิเล็กต์สูงอีกด้วย แต่มีข้อเสียคือ มีความไม่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้กับระบบการผลิตจริงซึ่งมีขนาดใหญ่ และยังมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมต่ำโดย

อาจจะต้องใช้เวลาในการปรับตัวนานพอสมควร นอกจากนี้ยังอาจจะไม่สามารถแข่งขันกับเชื้อชนิดอื่นๆ ที่อาจมีการปนเปื้อนเข้ามาในระบบได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อซับซ้อนเป็นสารอินทรีย์ที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเชื้อบริสุทธิ์จะมีความจำเพาะเจาะจงกับซับซ้อนที่ใช้ในการเลี้ยงเชื้อเพียงบางชนิดเท่านั้น ดังนั้นการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ผสมจากแหล่งธรรมชาติหรือจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำไปใช้กับระบบการผลิตซึ่งมีขนาดใหญ่และต้องใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จำนวนมาก นอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมภายในระบบที่นอกเหนือออกไปจากสภาวะที่เหมาะสมได้ อย่างไรก็ตาม ในหัวเชื้อจุลินทรีย์ผสมนั้นประกอบไปด้วยแบคทีเรียหลายชนิด ทั้งแบคทีเรียที่สร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งจะส่งผลทำให้มีการนำก๊าซไฮโดรเจนที่แบคทีเรียผลิตก๊าซไฮโดรเจนผลิตไปใช้ในการสร้างก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนได้ ดังนั้นในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยอาศัยการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนนั้นจะต้องมีการยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มนี้ โดยการบำบัดเบื้องต้นก่อนนำไปใช้หรือการควบคุมสภาวะแวดล้อมและปัจจัยต่างๆ ของระบบ หรือใช้ทั้งสองวิธีร่วมกัน เพื่อป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนซึ่งมีความอ่อนไหวต่อสภาวะแวดล้อมมากกว่าแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจนชนิดอื่นอยู่แล้ว โดยวิธีที่ใช้ในการบำบัดหรือเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นมีหลายวิธี ได้แก่ การให้ความร้อนแก่หัวเชื้อ (heat treatment) การปรับสภาพหัวเชื้อให้มีค่าพีเอชเป็นกรด (acidic treatment) การเติมสารเคมี (chemical treatment) เป็นต้น โดยการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและค่อนข้างมีประสิทธิภาพ ตัวอย่างของการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์ด้วยวิธีต่างๆ ดังตารางที่ 2.6

ผลจากการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นจะทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนถูกกำจัดออกไปและทำให้ได้หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ประกอบไปด้วยแบคทีเรียกลุ่มสร้างสปอร์อันมีแบคทีเรียกลุ่มจีสต์ *Clostridium* กลายเป็นแบคทีเรียกลุ่มหลัก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นแบคทีเรียสร้างกรดและสามารถสร้างก๊าซไฮโดรเจนได้ ตัวอย่างของแบคทีเรียกลุ่มนี้ได้แก่ *C. butyricum*, *C. acidisoli*, *C. tyrobutylicum* และ *C. acetobutyricum* (Ueno, Otauka และ Morimoto, 2001; Hawkes และคณะ, 2002; Fang, Liu และ Zhang, 2002 อ้างถึงใน Kim และคณะ, 2006) เป็นต้น โดยแบคทีเรียเหล่านี้จะมีการสร้างสปอร์ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต เช่น สภาวะที่มีอุณหภูมิที่สูงเกินไป สภาวะที่มีสารเคมีที่เป็นพิษ หรือเมื่อขาดสารอาหารที่จำเป็น เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม แบคทีเรียชนิดนี้มีข้อจำกัดคือ มีความอ่อนไหวต่อสภาวะแวดล้อมที่ไม่คงที่และมีความต้องการแบบจำเพาะเจาะจงในการงอกของสปอร์ (spore germination) อีกด้วย (Labbe และ Remi Shih, 1997 อ้างถึงใน Hawkes และคณะ, 2002) นอกจากนี้ภายในหัวเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนที่ผ่านการบำบัดหัวเชื้อจะมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและผลิตก๊าซไฮโดรเจนแล้ว ภายในหัวเชื้อจุลินทรีย์ยังมี

แบคทีเรียที่สร้างสปอร์ชนิดอื่นอาศัยอยู่ด้วย เช่น แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดอะซิติกบางชนิด ได้แก่ *C. scatologen*, *C. magnum*, *C. coccoides*, *Sporomusa ovata* (Mitchell, 2001 อ้างถึงใน Kim และคณะ, 2006) เป็นต้น โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะมีการนำก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ไปใช้ในการสร้างกรดอะซิติก ดังสมการที่ 2.48 ซึ่งจะมีผลทำให้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ลดลง



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



จึงจะเห็นได้ว่า การบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นนั้นสามารถกำจัดแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนออกไปได้ แต่ไม่สามารถกำจัดแบคทีเรียกลุ่มสร้างสปอร์ชนิดอื่นนอกเหนือไปจากแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ ดังนั้นจึงควรที่จะมีการใช้สภาวะต่างๆ ในการทำงานเพื่อควบคุมการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มนี้ด้วย เช่น เวลาพักทางชลศาสตร์ อุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบ เป็นต้น นอกจากการมีแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดอะซิติกและแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตแลกเตทภายในระบบจะเป็นผลทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนลดลงแล้ว แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนเองยังสามารถผลิตแอลกอฮอล์ เอทานอล บิวทานอล และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบในสภาวะที่ไม่เหมาะสม ยกตัวอย่างเช่น การมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงในขณะที่ระบบมีปริมาณเหล็กและฟอสฟอรัสจำกัด หรือมีเวลาพักทางชลศาสตร์ ค่าพีเอชและอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม (Hawkes และคณะ, 2002) การมีความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนสูง (Adum, 1990 อ้างถึงใน Liu และคณะ, 2006) เป็นต้น ซึ่งจะส่งผลให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนลดลงได้ และจากงานวิจัยที่ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยใช้การทดลองแบบที่ละเหยพบว่า เมื่อแบคทีเรียมีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นจนถึงช่วงที่มีการเจริญเติบโตแบบคงที่หรือในช่วงปลายของ log phase แบคทีเรียจะมีการผลิตแอลกอฮอล์แทนการผลิตกรดและก๊าซไฮโดรเจนอีกด้วย (Lay และคณะ, 1999 อ้างถึงใน Hawkes และคณะ, 2002)

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างของวิธีการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นที่ใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยใช้ระบบแบบไร้ออกซิเจน

วิธีการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์	วิธีการ	ชนิดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน	ชนิดของชั้นสเตรท	สภาวะของระบบ		ไฮโดรเจนยึด / อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน	งานวิจัยอ้างอิง
				อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าพีเอช		
การให้ความร้อน	- อบไอน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	ทีละเท	ข้าวบดเหลว	37	4.5	346 มล./ก.คาร์โบไฮเดรต	Fang และคณะ (2006)
	- ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	ทีละเท	กลูโคส	41	5.5	167 โมลไฮโดรเจน/โมลกลูโคส	Mu และคณะ (2006)
	- ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง	ทีละเท	ขยะอินทรีย์	40	6.0	13 มล./ก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด	Chou และคณะ (2008)
	- ต้มให้เดือด เป็นเวลา 5 ชั่วโมง	ทีละเท	แป้งสาลี	37	7.0	57.1 มล./ก.ของแป้ง	Argun และคณะ (2008)
	- ให้ความร้อนด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	ถังกรองสัมผัสแบบไร้ออกซิเจน	เปลือกขุ่น	อุณหภูมิห้อง	5.1±0.2	0.4 ล./ก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด	Vijayaraghavan, Admad และ Ibrahim (2006)
	- ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง	ระบบต่อเนื่องโดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบ CSTR (HRT = 10 ชั่วโมง)	กลูโคส	37	5.5±0.05	1.95 โมลไฮโดรเจน/โมลกลูโคส	Zhang และคณะ (2006)

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างของวิธีการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นที่ใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยใช้ระบบแบบไร้ออกซิเจน (ต่อ)

วิธีการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์	วิธีการ	ชนิดของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจน	ชนิดของชั้นสเตรท	สภาวะของระบบ		ไฮโดรเจนยิลด์ / อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน	งานวิจัยอ้างอิง
				อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าพีเอช		
การให้ความร้อน	- อบแห้งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที	ระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน (HRT = 1.9 วัน) ระบบต่อเนื่องโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR (HRT = 12 ชั่วโมง)	เศษอาหาร	55±0.5	5.0-5.7	11.1 ล.ไฮโดรเจน/ล.น้ำเสีย (2.5 โมลไฮโดรเจน/โมลเฮกโซส)	Lee และคณะ (2009)
	- ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที		ซูโครส	35±1	5.4±0.1		1.22 โมลไฮโดรเจน/โมลเฮกโซส
การปรับค่าพีเอชให้เป็นกรด	- ปรับค่าพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 3.0-4.0 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.1 นอร์มัล	Fixed-bed (HRT = 2 ชั่วโมง)	ซูโครส	35	6.7	0.415 ล.ไฮโดรเจน/ล.น้ำเสีย-ชั่วโมง	Chang, Lee และ Lin (2002)
การใช้หลายวิธีร่วมกัน	- ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 3.0 ด้วยกรดฟอสฟอริก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเติม BESA 0.2 ก./ล. เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	ทีละเท	เศษผัก	32	6.0	24.1 มล.โมล/วัน	Mohanakrishna และคณะ (2010)
	- ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 3.0 ด้วยกรดฟอสฟอริก เป็นเวลา 24 ชั่วโมง	ระบบต่อเนื่องโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบเอสบีอาร์ (HRT = 24 ชั่วโมง)	น้ำเสียชุมชน	อุณหภูมิห้อง (29±2)	6.0±0.1	1.105 มล. โมล/ลบ.ม.-นาที	Mohan, Babu และ Sarma (2007)

หมายเหตุ : HRT = เวลาพักทางชลศาสตร์ (hydraulic retention time), BESA = 2-bromoethane sulphonic acid sodium salt solution (BrCH₂CH₂SO₃Na)

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน

2.6.1 ปัจจัยด้านการทำงาน (Operating factor)

1) อัตราภาระสารอินทรีย์ (Organic loading)

อัตราภาระสารอินทรีย์เป็นปัจจัยทางด้านการทำงานที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยตรงและยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสถานะในระบบ เช่น ค่าพีเอชและเวลากักพักทางชลศาสตร์อีกด้วย ดังนั้นระบบควรที่จะมีอัตราภาระสารอินทรีย์ที่มีความเหมาะสมกับชนิดของขั้วสเตรทและสถานะการเดินระบบ ซึ่งในการปรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ทำได้โดยการเปลี่ยนอัตราการไหลของของเสียที่ไหลที่เข้าระบบ หรือการปรับความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ โดยการเจือจางน้ำเสียให้มีค่าต่ำลงหรือเพิ่มขึ้น

2) เวลากักพักทางชลศาสตร์ (hydraulic retention time, HRT) และเวลากักพักตะกอน (solid retention time, SRT)

เวลากักพักทางชลศาสตร์เป็นค่าที่บ่งบอกถึงระยะเวลาที่น้ำเสียอยู่ระบบเพื่อให้แบคทีเรียมีระยะเวลาในการสัมผัสกับน้ำเสียที่เพียงพอที่จะเกิดกระบวนการเมทาบอลิซึมและย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ ระยะเวลาที่แบคทีเรียต้องการในการสัมผัสกับน้ำเสียนั้นมีค่าแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับชนิดของขั้วสเตรทที่มีความซับซ้อนเพียงใด ขั้วสเตรทที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น กลูโคส กรดไขมันระเหยง่ายและแอลกอฮอล์ จะสามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่าขั้วสเตรทพวกคาร์โบไฮเดรตไขมัน รวมไปถึงน้ำเสียขุมหมและขยะขุมชนซึ่งมีความซับซ้อนของโครงสร้างมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะทำให้แบคทีเรียต้องการเวลากักพักทางชลศาสตร์เพื่อสัมผัสและย่อยสลายเพิ่มมากขึ้นด้วย

เวลากักพักตะกอนเป็นค่าที่บ่งบอกถึงระยะเวลาที่แบคทีเรียจะคงอยู่ในระบบเพื่อที่จะเจริญเติบโตและเพิ่มเซลล์ใหม่จนมีจำนวนเพียงพอที่จะเป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นในระบบ (predominant) สำหรับแบคทีเรียในระบบแบบไร้ออกซิเจนนั้นมีอัตราการผลิตมวลจุลชีพที่ต่ำและเจริญเติบโตช้าโดยเฉพาะอย่างยิ่งแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน ดังนั้นระบบควรที่จะมีเวลากักพักตะกอนที่นานเท่าที่จะทำได้เพื่อรักษามวลจุลชีพไว้ภายในระบบ

เวลากักพักทางชลศาสตร์มีความสัมพันธ์กับการเกิดก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ โดยเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่นานจะทำให้แบคทีเรียมีระยะเวลาในการสัมผัสและย่อยสลายสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ปฏิริยาการย่อยสลายสามารถดำเนินต่อไปจนถึงขั้นของการผลิตก๊าซมีเทน ดังนั้นในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจึงมีการออกแบบให้ระบบมีเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่สั้น เพื่อให้ปฏิริยาการย่อยสลายเกิดขึ้นได้ในขั้นแรกๆ เท่านั้น ช่วยลดโอกาสการนำก๊าซไฮโดรเจนไปใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มที่บริโภคก๊าซไฮโดรเจนทำให้ไฮโดรเจนยึดที่ได้จากปฏิริยามีค่าสูงขึ้น

สิ่งที่ควรพิจารณาในการออกแบบเวลากักพักทางชลศาสตร์คือ ความซับซ้อนของน้ำเสียหรือของเสียที่ทำการบำบัด ชนิดของเชื้อจุลชีพ (เชื้อบริสุทธิ์/เชื้อผสม) และสภาพแวดล้อมที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและเมทาบอลิซึมของแบคทีเรีย เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น ตัวอย่างของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของน้ำเสียที่เหมาะสมที่ได้จากการทำการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์ ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียประเภทต่างๆ โดยใช้ถังปฏิกิริยาแบบกวนสมบูรณ์

ชนิดของน้ำเสีย	อุณหภูมิของระบบ	ค่าพีเอชของระบบ	เวลากักพักทางชลศาสตร์ที่เหมาะสม	งานวิจัยอ้างอิง
กลูโคส	40	6.0-7.0	6 ชั่วโมง	Wu และคณะ (2008)
แป้ง	35	5.3	12 ชั่วโมง	Arooj และคณะ (2008)
ตะกอนเบียร์	37	5.5	18 ชั่วโมง	Fan, Kan และ Lay (2006)

3) การกวนผสม (mixing)

การกวนผสมภายในระบบมีผลต่อการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน โดยจะช่วยให้มีการสัมผัสกันระหว่างซับสเตรทและเชื้อจุลชีพมากขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีขึ้นด้วย นอกจากนี้ยังช่วยให้มีการกระจายเชื้อจุลชีพภายในระบบให้มีลักษณะที่สม่ำเสมอกันทั่วทั้งถังปฏิกิริยา ช่วยป้องกันการจับตัวกันเป็นก้อนของของเสียภายในถังหมักซึ่งจะทำให้การย่อยสลายเป็นไปได้ยาก และสามารถป้องกันการสะสมของสารอินทรีย์ในบางบริเวณของถัง โดยการกวนผสมนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การกวนโดยใช้เครื่องมือ (mechanical) การใช้ของเหลวหมุนเวียนเข้าระบบ (liquid circulation) การอัดพ่นก๊าซเข้าที่ทางด้านล่างของถังปฏิกิริยา (compressed air) เป็นต้น แต่มีข้อควรระวังคือ จะต้องเป็นการกวนแบบช้าและไม่ก่อให้เกิดความปั่นป่วน (turbulent) ภายในระบบ

2.6.2 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (environmental factor)

1) อุณหภูมิ (temperature)

โดยทั่วไปอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งรวมไปถึงปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิตหรือที่เรียกว่า ปฏิกิริยาทางชีวเคมีอีกด้วย ปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในการบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกซิเจนมีอุณหภูมิเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมของแบคทีเรียภายในระบบ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแบคทีเรียมีแนวโน้มที่จะมีกระบวนการเมแทบอลิซึมสูงขึ้นซึ่งจะส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นด้วย แต่เนื่องจากแบคทีเรียแต่ละชนิดมีความชอบอุณหภูมิในช่วงที่แตกต่างกัน ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมกับชนิดของแบคทีเรียจึงมีความสำคัญเช่นเดียวกัน อุณหภูมิที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ดังตารางที่ 2.8 แบคทีเรียกลุ่มที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาดและกลุ่มที่อยู่ได้ทั้งในสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจนส่วนใหญ่มีความชอบอุณหภูมิในช่วงมีโซฟิลิกและเทอร์โมฟิลิกมากกว่าช่วงไซโคฟิลิก

ตารางที่ 2.8 ช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (ดัดแปลงจาก Metcalf และ Eddy, 2004)

ชนิดของช่วงอุณหภูมิ	ช่วงอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิที่เหมาะสม (องศาเซลเซียส)
ไซโคฟิลิก	10-30	12-18
มีโซฟิลิก	20-50	25-40
เทอร์โมฟิลิก	35-75	55-65

การเดินระบบในช่วงอุณหภูมิต่างๆ อาจมีข้อจำกัดอันเนื่องมาจากสภาพอากาศในพื้นที่ที่แตกต่างกัน ในพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำอาจจะต้องมีการให้ความร้อนแก่ระบบทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งหากต้องการเดินระบบที่อุณหภูมิสูงกว่าสภาพอากาศมากๆ ซึ่งจะทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากจนอาจเกิดความไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ได้ ซึ่งอาจมีการใช้ทางเลือกอื่น โดยการเดินระบบที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่ต้องการ แต่ให้มีการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ภายในระบบให้สูงขึ้นกว่าปกติ เพื่อให้มีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์เท่ากันหรือใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ต้องการมากที่สุด (Speece, 1996) สำหรับประเทศไทยซึ่งมีสภาพอากาศค่อนข้างร้อนและมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 20-35 องศาเซลเซียส จึงมีความเหมาะสมในการเดินระบบโดยใช้อุณหภูมิในช่วงมีโซฟิลิกโดยไม่จำเป็นต้องให้อุณหภูมิเพิ่มแก่ระบบแต่อย่างใด

สำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพนั้นพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยจากงานวิจัยที่ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียประเภทแป้งที่อุณหภูมิแตกต่างกันด้วยระบบแบบที่ละเท โดยทำการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพที่ได้จากน้ำเสียที่อุณหภูมิ 37 และ 55 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากกว่าที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยมีไฮโดรเจนยิลด์ 78 มล./ก.ของแป้ง ในขณะที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสมีไฮโดรเจนยิลด์ 47 มล./ก.ของแป้ง (Zhang, Liu และ Fang, 2003) นอกจากนี้ในระบบแบบต่อเนื่อง Ueno, Fukui และ Goto (2007) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากของเสียจากบ้านเรือน โดยให้อุณหภูมิของระบบเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส พบว่ามีไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 46.3 มล./ก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด โดยมีค่ามากกว่าก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากของเสียชนิดเดียวกันที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสอยู่เท่ากับร้อยละ 4.67 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 43.0 มล./ก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด

นอกจากช่วงอุณหภูมิดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังได้มีการทำการวิจัยการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยใช้อุณหภูมิสูงกว่าช่วงเทอร์โมฟิลิกหรือที่เรียกว่า ช่วงไฮเปอร์เทอร์โมฟิลิก (hyper-thermophilic) โดย Kotsopoulos และคณะ (2009) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากเศษเนื้อหมูที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลากักพักทางคลศาสตร์เท่ากับ 24 ชั่วโมง มีอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 24.9 ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/วัน หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์จากถังผลิตก๊าซมีเทนที่มีการควบคุมอุณหภูมิของระบบอยู่ในช่วงมีโซฟิลิก (35 องศาเซลเซียส) และไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน พบว่าระบบมีไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 3.65 มล./ก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่เข้าระบบโดยไม่มีการควบคุมค่าพีเอชภายในระบบ สำหรับการเดินระบบที่ช่วงไฮเปอร์เทอร์โมฟิลิกมีข้อดีคือ แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนไม่สามารถอาศัยอยู่ได้ เนื่องจากมีอุณหภูมิก่อนข้างสูง และยังทำให้ระบบมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์และอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงขึ้น แต่มีข้อเสียหลักๆ คือ ต้องใช้พลังงานในการให้ความร้อนแก่ระบบมากเช่นเดียวกัน ซึ่งการเดินระบบโดยใช้อุณหภูมิในช่วงนี้จะมีความเหมาะสมกับระบบการผลิตที่มีพลังงานความร้อนเป็นผลพลอยได้จากการผลิตอยู่แล้วจึงจะมีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์

จากข้อมูลข้างต้นนอกจากอุณหภูมิจะมีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนแล้ว อุณหภูมิที่มีค่าสูงยังสามารถลดความดันของพาร์เซียลของก๊าซไฮโดรเจนโดยจะช่วยให้ก๊าซไฮโดรเจนที่ละลายอยู่ในน้ำมีการกระจายไปสู่ชั้นอากาศมากขึ้น ช่วยป้องกันการผลิตกรดโพรไพโอนิกและทำให้การย่อยสลายเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Hawkes และคณะ, 2002)

2) ค่าพีเอช

ค่าพีเอชเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน โดยทั่วไปค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 6.8-7.4 (Grady, Daigger และ Lim, 1999) สำหรับถังหมักกรดของระบบบำบัดไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน ซึ่งแบคทีเรียส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดจะมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 3.5-6.5 โดยทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำเสีย (เกรียงศักดิ์ อุดมสิน โรจน์, 2543) การเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชมีผลโดยตรงต่อกระบวนการเมทาบอลิซึมของแบคทีเรีย หากมีค่าต่ำหรือสูงเกินกว่าค่าที่เหมาะสมมากเกินไปจะทำให้แบคทีเรียเจริญเติบโตได้ไม่เต็มที่ไปจนถึงถูกยับยั้งการเจริญเติบโตและไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ภายในระบบได้ในที่สุด

นอกจากนี้ค่าพีเอชยังมีความสัมพันธ์กับปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในระบบโดยหากระบบได้รับสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจะทำให้ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในระบบเพิ่มขึ้นด้วย และส่งผลทำให้ค่าพีเอชของระบบลดลงได้ ดังนั้นระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนจึงควรมีสภาพค่าพีเอชเพียงพอเพื่อที่จะได้รองรับการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากเกินไป ในการปรับค่าพีเอชของระบบทำได้โดยการปรับปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบและการเติมสารเคมี เช่น ปูนขาว (CaO) โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2HCO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าพีเอชนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงภายหลังจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยอื่นเรียบร้อยแล้วค่าพีเอชจึงจะมีการเพิ่มขึ้นหรือลดลง ดังนั้นในการควบคุมดูแลระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนนั้นควรที่จะมีการตรวจสอบปัจจัยอื่นๆ ร่วมด้วย เพื่อให้การดำเนินการแก้ไขสามารถทำได้อย่างทันทั่วถึง

แบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนมีความอ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนนั้นมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมาก รวมถึงค่าพีเอชของระบบ ในขณะที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดนั้นมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้มากกว่า ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจึงได้ใช้ความแตกต่างข้อนี้มาใช้ในเค้นระบบเพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน โดยการควบคุมค่าพีเอชให้มีค่าค่อนข้างเป็นกรดอยู่ในช่วง 4.0-6.5 ซึ่งค่าพีเอชเท่าใดจึงจะเหมาะสมนั้นยังไม่ทราบแน่ชัด ซึ่งในปัจจุบันได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพที่ค่าพีเอชต่างๆ ซึ่งพบว่าค่าแตกต่างกันไปตามชนิดของซับสเตรท สภาพการทำงาน และสภาพแวดล้อมของระบบ โดย Van Ginkel และ Logan (2005) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากกลูโคสโดยใช้เวลากักพักทางเซลล์เท่ากับ 10 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำการเปรียบเทียบค่าพีเอชในช่วง 4.5-6.0 พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมคือที่ค่าพีเอชเท่ากับ 5.5 โดยมีไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดคือ 2.5 โมลไฮโดรเจน/โมลของเฮกโซส และ Chou และคณะ (2008) ทำการศึกษา

ผลของค่าพีเอชที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์ที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดสูง โดยใช้การทดลองแบบที่ละเทีที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมคือที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6.0 โดยมีไฮโดรเจนยึดเท่ากับ 13.0 มล./ก. ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด

3) สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

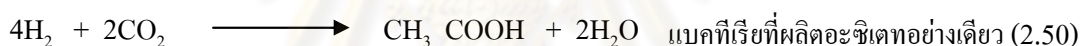
สภาพความเป็นด่างเป็นค่าที่แสดงถึงกำลังบัฟเฟอร์ (buffer capacity) ในการรองรับปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายภายในระบบ ระบบที่มีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำเมื่อปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มขึ้นสูงจะส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชอย่างรวดเร็วและส่งผลกระทบต่อระบบได้ สภาพด่างที่มีความสำคัญในระบบแบบไร้ออกซิเจนคือ สภาพด่างในรูปไบคาร์บอเนต (bicarbonate alkalinity) โดยสำหรับระบบแบบไร้ออกซิเจนค่าสภาพด่างในรูปไบคาร์บอเนตนี้จะไม่ช่วงที่เหมาะสมตายตัว เนื่องจากค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดและความเข้มข้นของสารอินทรีย์ภายในระบบ สารอินทรีย์ที่เข้าระบบมีความเข้มข้นมากนอกจากจะมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายเกิดขึ้นมากแล้ว ยังมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์มากด้วย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชได้ ดังนั้นเพื่อให้ระบบสามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้ ในการควบคุมดูแลระบบจึงควรที่จะมีการพิจารณาถึงอัตราส่วนของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายและสภาพด่างในรูปไบคาร์บอเนต ในหน่วย มก./ล.ของกรดอะซิติก ต่อ มก./ล.ของแคลเซียมคาร์บอเนต ซึ่งโดยทั่วไประบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนควรที่จะมีอัตราส่วนของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายและสภาพด่างในรูปไบคาร์บอเนตที่น้อยกว่า 0.4 และไม่ควรมากกว่า 0.8 เนื่องจากที่อัตราส่วนมากกว่านี้จะทำให้ระบบมีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำ เมื่อมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มอีกเพียงเล็กน้อยก็ทำให้ค่าพีเอชของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้

4) ความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (H_2 and CO_2 partial pressure)

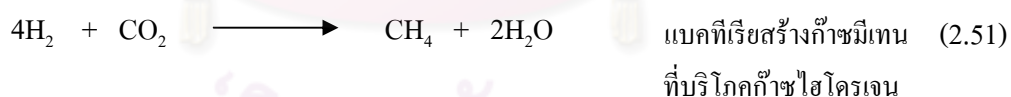
ในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนไฮโดรไลซิสไปจนถึงขั้นตอนสร้างกรดอะซิติกจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่มที่มีการบริโภคก๊าซไฮโดรเจน (H_2 -consuming bacteria) และกลุ่มไฮโดรจีโนฟิลิกเมทาโนเจน (hydrogenophilic methanogens) ในขั้นตอนของการสร้างก๊าซมีเทน ทำให้ความดันพาร์เชียลของก๊าซทั้งสองชนิดลดลงและมีค่าไม่สูงจนเกินไป แต่ในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนที่มีการขาดสมดุลระหว่างแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนถูกยับยั้งการทำงานหรือไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในระบบจะทำให้ความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้มี

กรดโพสไฟโอนิกและกรดไขมันระเหยง่ายอื่นๆ สะสมอยู่ในระบบจนระบบมีค่าพีเอชต่ำและทำให้ระบบล้มเหลวได้ในที่สุด (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542) ความดันพาร์เซียลของก๊าซไฮโดรเจนจึงเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยชั่งถึงประสิทธิภาพการทำงานของระบบแบบไร้ออกซิเจนได้ (ดูเพิ่มเติมในหัวข้อ 2.4.4)

สำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยระบบแบบไร้ออกซิเจนนั้น มีการควบคุมสภาวะต่างๆ เพื่อป้องกันไม่ให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนเจริญเติบโตได้ภายในระบบ จึงทำให้ความดันพาร์เซียลของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงซึ่งไม่เป็นผลดีต่อระบบเช่นเดียวกัน โดยหากมีความดันพาร์เซียลของก๊าซไฮโดรเจนสูงถึงค่าค่าหนึ่งจะมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนวิถีทางจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และกรดไขมันระเหยต่างๆ ไปเป็นการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นแทน เช่น แลกเตต เอทานอล อะซิโตน หรืออะลานีน (alanine) (Adum, 1990 : 219-237 อ้างถึงใน Liu และคณะ, 2006) และความดันพาร์เซียลของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีค่าสูงเกินไปยังมีผลต่อระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ โดยแบคทีเรียที่ผลิตอะซิเตทอย่างเดียวยังจะมีการนำเอาก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปใช้ร่วมกันในการผลิตกรดอะซิติกเมื่อมีการเจริญเติบโตแบบอโตโทรฟิก ดังสมการ



นอกจากนี้แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนที่บริโกลก๊าซไฮโดรเจนยังสามารถผลิตก๊าซมีเทนจากก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ ดังสมการ



ผลการทำงานของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มจะส่งผลทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีค่าลดลง ดังนั้นการกำจัดทั้งก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนเกินออกจากระบบเพื่อให้ความดันพาร์เซียลต่ำลงจึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยจะช่วยป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาที่เกิดจากแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มดังกล่าวเกิดขึ้นได้ การลดการสะสมของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถทำได้โดยอาศัยการปั่นกวภายในระบบ การใช้ก๊าซไนโตรเจนหรือก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซอาร์กอน หรือก๊าซชนิดอื่นๆ เป่าเข้าไปภายในถังหมัก หรือใช้ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากระบบแบบไร้ออกซิเจนนำมาหมุนเวียนเข้าสู่ระบบอีกครั้งเพื่อไล่ก๊าซทั้งสองชนิดออกจากกระบวน จากผลของความดันพาร์เซียลของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาถึงผลของการลดความดันพาร์เซียลของก๊าซทั้งสองชนิดที่มีผลต่อการผลิต

ก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ โดย Tanisho, Kuromota และ Kadokura (1998) รายงานว่า การกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเพิ่มไฮโดรเจนยิลด์ได้ โดยจากการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยใช้กากน้ำตาลเป็นซับสเตรท พบว่าเมื่อมีการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ก๊าซอาร์กอนไล่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากระบบ พบว่าสามารถเพิ่มไฮโดรเจนยิลด์จาก 0.52 โมลไฮโดรเจน/โมลกลูโคสเป็น 1.09 โมลไฮโดรเจน/โมลกลูโคสได้ นอกจากนี้ Hussy และคณะ (2005) ได้รายงานว่าการใช้ก๊าซไนโตรเจนเป่าเข้าไปในระบบสามารถลดความดันของก๊าซทั้งสองชนิดลงได้ และมีผลทำให้ปริมาณไฮโดรเจนยิลด์ที่ได้จากการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากซูโครสเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 66 หรือจาก 1.0 โมลไฮโดรเจน/โมลเฮกโซส เป็น 1.7 โมลไฮโดรเจน/โมลเฮกโซส อีกด้วย

5) ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน

ปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอนเกิดขึ้น ส่วนปฏิกิริยารีดักชันเป็นปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) จึงเป็นปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการให้และรับอิเล็กตรอนของสาร ในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนของตัวให้อิเล็กตรอนนั้นมีค่าที่เกี่ยวข้องคือ ค่าศักย์ไฟฟ้าครึ่งเซลล์ เป็นค่าที่มีความเฉพาะตัวในแต่ละสาร เมื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันจะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนเกิดเป็นความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้น

ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชันหรือค่าโออาร์พีจึงหมายถึง ค่าความต่างศักย์ในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนจากตัวให้อิเล็กตรอนไปยังตัวรับอิเล็กตรอน ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ นั้นมีปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยเฉพาะการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนซึ่งมีขั้นตอนการย่อยสลายหลายขั้นตอน ค่าโออาร์พีสามารถแสดงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบว่าเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่และสามารถบ่งบอกถึงขั้นของการย่อยสลายภายในระบบได้ ในการวัดค่าโออาร์พีจะมีค่าอยู่ในช่วง $-1,400$ ถึง $+1,400$ มิลลิโวลต์ โดยสัญลักษณ์เครื่องหมายลบหน้าตัวเลขของค่าที่วัดได้แสดงถึงว่าสารนั้นมีความสามารถในการให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่าการรับอิเล็กตรอน ในทางกลับกันสัญลักษณ์เครื่องหมายบวกหน้าตัวเลขแสดงถึงว่าสารนั้นมีความสามารถในการรับอิเล็กตรอนมากกว่าที่จะให้อิเล็กตรอน

ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนที่มีประสิทธิภาพที่ดีโดยทั่วไปควรมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง -300 ถึง -500 มิลลิโวลต์ หากระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนมีค่าเป็นบวกมากๆ จะแสดงถึงการมีสารรับอิเล็กตรอนอยู่ภายในระบบ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าอาจมีการรั่วบริเวณรอยต่อของถังและอุปกรณ์ต่างๆ หรืออาจเกิดจากข้อผิดพลาดที่ทำให้มีสารที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งก๊าซออกซิเจนอยู่ภายในระบบได้ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการตรวจสอบและแก้ไขโดยทันที

เพราะหากปล่อยทิ้งไว้จะส่งผลทำให้แบคทีเรียชนิดไม่ต้องการออกซิเจนอย่างเด็ดขาดไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ และส่งผลให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนไม่สามารถดำเนินต่อไปได้ในที่สุด สำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพนั้นเนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายในช่วงแรกของปฏิกิริยาการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน ดังนั้นค่าโออาร์พีจึงอาจมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงที่มีค่าเป็นลบต่ำกว่าระบบแบบไร้ออกซิเจนทั่วไป ซึ่งค่าดังกล่าวมีผลต่อชนิดของกรดไขมันระเหยง่ายและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้อีกด้วย (Cohen, 1982 อ้างถึงใน Hawkes และคณะ, 2002)

6) สารอาหาร (nutrient)

เนื่องจากแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนมีการสร้างเซลล์เพียงร้อยละ 4-10 ของค่าซีโอดีที่ถูกนำไปใช้ (Grady และคณะ, 1999) ทำให้มีความต้องการสารอาหารน้อยมากเมื่อเทียบกับแบคทีเรียในระบบเติมอากาศ ซึ่งถึงแม้จะต้องการในปริมาณไม่มากนักแต่หากแบคทีเรียไม่ได้รับสารอาหารที่เพียงพอแล้วก็สามารถส่งผลให้ระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนไม่สามารถดำเนินต่อไปได้เช่นเดียวกัน จากโครงสร้างของมวลแบคทีเรีย $C_5H_7O_2N$ หรือ $C_{60}H_{87}O_{23}N_{12}P$ (เมื่อรวมฟอสฟอรัส) จึงจะเห็นได้ว่านอกจากแบคทีเรียจะต้องการคาร์บอนจากสารอินทรีย์แล้ว แบคทีเรียยังต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ นอกจากนี้ยังมีสารอาหารอื่นๆ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเซลล์แบคทีเรีย ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 องค์ประกอบของเซลล์แบคทีเรีย (Metcalf และ Eddy, 2004)

ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	ร้อยละของน้ำหนักแห้ง	ธาตุที่เป็นองค์ประกอบ	ร้อยละของน้ำหนักแห้ง
คาร์บอน	50.0	โซเดียม	1.0
ออกซิเจน	22.0	แคลเซียม	0.5
ไนโตรเจน	12.0	แมกนีเซียม	0.5
ไฮโดรเจน	9.0	คลอไรด์	0.5
ฟอสฟอรัส	2.0	เหล็ก	0.2
ซัลเฟอร์	1.0	ธาตุชนิดอื่นๆ	0.3
โพแทสเซียม	1.0		

จากข้อมูลข้างต้น จึงสามารถแบ่งสารอาหารที่แบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนต้องการออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. สารอาหารหลัก (macronutrient) เป็นสารอาหารที่แบคทีเรียต้องการในปริมาณมากและขาดไม่ได้ ได้แก่ คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P)
2. สารอาหารรอง (micronutrient) เป็นสารอาหารที่แบคทีเรียต้องการในปริมาณเพียงเล็กน้อยแต่จะขาดไม่ได้ ได้แก่ ซัลเฟอร์ (S) โพแทสเซียม (K) โซเดียม (Na) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) และเหล็ก (Fe)

นอกจากนี้ยังมีธาตุอาหารจำเป็นชนิดอื่นๆ เช่น สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) โคบอลต์ (Co) นิกเกิล (Ni) โมลิบดีนัม (Mo) เซเลเนียม (Sn) เป็นต้น ในการเติมสารอาหารให้แก่แบคทีเรีย โดยทั่วไปมีการกำหนดเป็นค่าซีโอดีที่เข้าระบบต่อปริมาณไนโตรเจนต่อปริมาณฟอสฟอรัสหรือ COD : N : P หรือกำหนดเป็นอัตราส่วนของ COD : N : P : Fe โดยระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนควรมีอัตราส่วนของ COD : N : P เท่ากับ 100 : 2 : 0.4 (Metcalf และ Eddy, 2004) หรืออย่างน้อยที่สุดควรมีค่าเท่ากับ 150 : 1.1 : 0.2

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างหนึ่งในการเติมสารอาหารให้กับแบคทีเรียคือ ความสามารถในการนำไปใช้ได้ทางชีววิทยา (bioavailability) โดยทั่วไปสารอาหารที่แบคทีเรียสามารถนำไปใช้ได้ดีที่สุดในรูปไอออนที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น Ca^{2+} Mg^{2+} Ni^{2+} Cu^{+} เป็นต้น ในบางครั้งมีการเติมสารอาหารที่แบคทีเรียต้องการไปแล้วแต่แบคทีเรียยังมีการขาดสารอาหารเหล่านั้นอยู่ ซึ่งมีสาเหตุมาจากสารอาหารเหล่านั้นอยู่ในรูปที่แบคทีเรียไม่สามารถนำไปใช้ได้ เช่น มีการตกตะกอนในรูปโลหะหรือโลหะคีเลต (Speece, 1996) ในการป้องกันการตกตะกอนของโลหะนั้นทำได้ยากและมีปัจจัยเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ค่าพีเอช อุณหภูมิ เป็นต้น ผลงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนจึงได้มีการเติมสารอาหารให้แก่แบคทีเรียให้มากเกินไปเพื่อให้แน่ใจว่าแบคทีเรียจะไม่ขาดสารอาหารที่สำคัญและมีผลต่อการเดินระบบได้ (Hawkes และคณะ, 2007) การแก้ไขการขาดสารอาหารที่มีสาเหตุมาจากการตกตะกอนของในรูปสารประกอบของโลหะสามารถทำได้โดยการเติมอีสต์เอ็กซ์แทรกต์ ซึ่งเป็นอาหารที่อุดมไปด้วยธาตุและสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียต้องการในปริมาณเล็กน้อยแต่จำเป็น โดยเติมในอัตราไม่ต่ำกว่า 1.5 กก./ลบ.ม. ของน้ำเสีย (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

7) สารพิษ (Toxic substance)

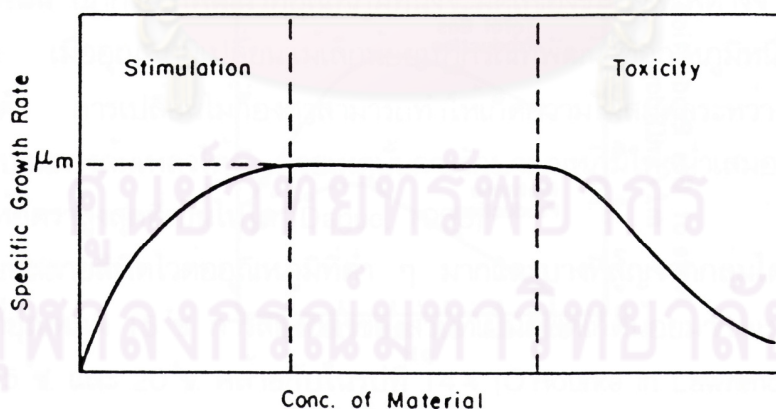
(1) ความเป็นพิษ (toxicity)

แบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนประกอบด้วยแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและสร้างก๊าซมีเทน แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนนั้นมีความอ่อนไหวต่อสภาวะการ

ทำงานและสภาพแวดล้อมมาก ต่างจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดซึ่งประกอบไปด้วยแบคทีเรียที่สร้างสปอร์เป็นส่วนใหญ่โดยสามารถสร้างสปอร์เมื่ออยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตหรือเจริญเติบโตได้ แต่อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นของสารที่ก่อความเป็นพิษสูงย่อมเกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างกรดได้เช่นกัน การเดินระบบโดยเฝ้าระวังไม่ให้มีสารที่อาจก่อให้เกิดความเป็นพิษภายในระบบมากเกินไปจะช่วยให้แบคทีเรียทั้งสองกลุ่มสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้และทำให้ระบบบำบัดดำเนินต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

(2) ระดับที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ

สารที่ก่อความเป็นพิษต่อแบคทีเรียไม่จำเป็นต้องเป็นสารพิษเสมอไป สารอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อแบคทีเรียที่ความเข้มข้นหนึ่ง อาจก่อให้เกิดความเป็นพิษหากมีความเข้มข้นในระดับสูงได้ จากรูปที่ 2.6 อธิบายถึงระดับความเข้มข้นของสารต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (specific growth rate) ของแบคทีเรีย โดยเมื่อความเข้มข้นของสารที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียเพิ่มขึ้น อัตราการเติบโตจำเพาะจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าอัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุด (maximum specific growth rate, μ_m) ช่วงความเข้มข้นนั้นเรียกว่า ช่วงกระตุ้น (stimulatory region) และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นไปอีกจะเข้าเขตที่ไม่มีผลกระทบที่เห็นได้แต่ในที่สุดจะถึงค่าค่าหนึ่งที่อัตราการเติบโตจำเพาะเริ่มลดลง เกิดจุดที่มีความเป็นพิษเกิดขึ้นและความเข้มข้นใดๆ ที่มากกว่านี้เรียกว่าเป็นพิษ และความรุนแรงของพิษจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น (McCarty, 1964 อ้างถึงใน ชีวะ เกรอต, 2539)



รูปที่ 2.6 ความเข้มข้นของสารอาหารต่ออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของแบคทีเรีย

(3) สารที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ

1. ไอออนประจุบวกของโลหะเบา (light metal cation) ไอออนบวกที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เช่น Ca^{2+} Mg^{2+} K^+ Na^+ เป็นต้น โดยมีผลกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียหากมีความเข้มข้นที่เหมาะสม และอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียที่ความเข้มข้นสูงๆ ได้ ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ความเข้มข้นของไอออนประจุบวกของโลหะเบาที่มีผลกระตุ้นและยับยั้งแบคทีเรีย (McCarty, 1964 อ้างถึงใน เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2543)

ชนิดของไอออนบวก	ระดับความเข้มข้น (มก./ล.)		
	ช่วงกระตุ้น	ช่วงยับยั้ง	ช่วงก่อให้เกิดความเป็นพิษ
Ca^{2+}	100-200	2,500-4,500	8,000
Mg^{2+}	75-150	1,000-15,000	3,000
K^+	200-400	2,500-4,500	12,000
Na^+	100-200	3,500-5,500	8,000

นอกจากความเข้มข้นของไอออนประจุบวกของโลหะเบาแล้วสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงอีกอย่างหนึ่งคือ หากมีไอออนประจุบวกของโลหะเบาสองชนิดในระบบอาจทำให้ระดับความเป็นพิษเปลี่ยนแปลงไปใน 2 ลักษณะดังนี้คือ

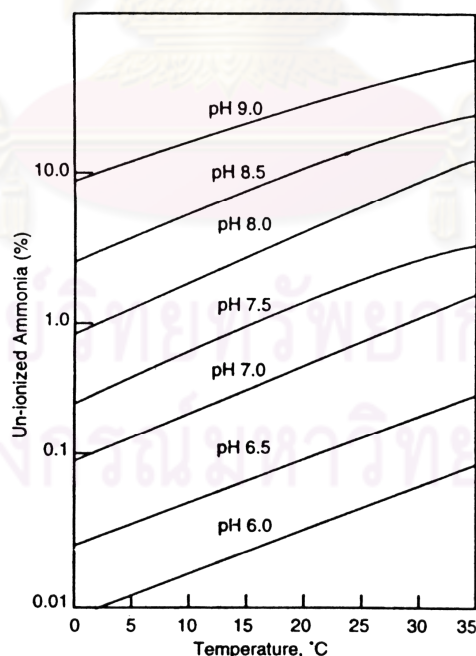
- 1) มีฤทธิ์เสริมกัน (synergism) โดยไอออนประจุบวกชนิดหนึ่งมีผลทำให้ไอออนประจุบวกอีกชนิดมีระดับความเป็นพิษรุนแรงขึ้น หรือมีการแสดงความเป็นพิษเฉพาะตัวของไอออนประจุบวกทั้งสองชนิด
- 2) มีฤทธิ์หักล้างกัน (antagonism) โดยไอออนประจุบวกชนิดหนึ่งมีผลทำให้ระดับความเป็นพิษของไอออนประจุบวกอีกชนิดลดลง หรือถ้ามีไอออนประจุบวกชนิดหนึ่งในระดับที่กระตุ้นแบคทีเรียแล้วส่งผลทำให้ผลของความเป็นพิษของไอออนประจุบวกอีกชนิดลดลง

2. แอมโมเนีย (ammonia, NH₃) แอมโมเนียในน้ำเสี้ยวจะอยู่ในรูปของ

แอมโมเนียมไอออน (ammonium ion, NH₄⁺) และแอมโมเนียอิสระ (free-ammonia) แหล่งของแอมโมเนียมาจากน้ำเสี้ยวจากโรงงานหรืออุตสาหกรรมบางประเภท เช่น อุตสาหกรรมอาหาร โรงฆ่าสัตว์ ฟาร์มปศุสัตว์ เป็นต้น หรือเกิดจากการย่อยสลายโปรตีน ยูเรีย (urea) และสารอินทรีย์อื่นๆ ที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ สมการการแตกตัวเป็นไอออนของแอมโมเนียเป็นสมการที่ผันกลับได้ โดยขึ้นอยู่กับค่าพีเอช เมื่อค่าพีเอชต่ำกว่าหรือเท่ากับ 7.2 แอมโมเนียเกือบทั้งหมดจะอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน ดังสมการที่ 2.52



นอกจากนี้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้แอมโมเนียทั้งหมดอยู่ในรูปแอมโมเนียอิสระมากขึ้น ดังรูปที่ 2.7 ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้การบำบัดน้ำเสี้ยวที่มีแอมโมเนียสูงภายใต้สภาวะอุณหภูมิในช่วงเทอร์โมฟิลิกทำได้ยากกว่าการใช้อุณหภูมิในช่วงมีโซฟิลิก (Harris และ Dague, 1993; Angelidaki และ Ahring, 1994; Mackie และ Bryant, 1995; Mashad และคณะ, 2004; Bocher และคณะ, 2008 อ้างถึงใน Garcia และ Angenent, 2009)



รูปที่ 2.7 ผลของค่าพีเอชและอุณหภูมิที่มีต่อปริมาณของแอมโมเนียอิสระ

(US EPA Report, 1976 อ้างถึงใน Speece, 1996)

แอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100 มก./ล.-ไนโตรเจน สามารถก่อความเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ แต่แอมโมเนียไอออนจะก่อให้เกิดความเป็นพิษได้ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 7,000-9,000 มก./ล. ในระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจน แอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่ำจะเป็นประโยชน์ในการกระตุ้นการเจริญเติบโตและการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของแบคทีเรีย แต่เมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงขึ้นถึงระดับหนึ่งจะเกิดการยับยั้งเกิดขึ้น จากงานวิจัยของ Wang, Wan และ Wang (2009) พบว่าแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 10-100 มก./ล. สามารถกระตุ้นการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของแบคทีเรีย แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นไปจนถึง 10,000 มก./ล. จะมีผลยับยั้งแบคทีเรียทำให้การผลิตก๊าซไฮโดรเจนลดลง ดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ความเข้มข้นของแอมโมเนียที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากกลูโคส (ดัดแปลงจาก Wang และคณะ, 2009)

ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มก./ล.)	ประสิทธิภาพร้อยละการย่อยสลายสารอินทรีย์	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)	ไฮโดรเจนยิลด์ (มล./ก.ของกลูโคส)	ผลที่มีต่อแบคทีเรีย
0	77.9	150.1	192.7	ช่วงกระตุ้น
10	96.9	215.9	222.9	
20	97.1	218.8	225.2	
50	97.2	255.8	263.0	
100	97.5	291.4	298.8	
200	97.4	267.7	275.0	ช่วงปรับตัวให้ทนต่อการยับยั้ง
500	97.2	237.3	244.1	
1,000	96.4	201.2	208.8	
2,000	97.6	180.6	185.1	
5,000	95.4	139.9	146.6	ช่วงยับยั้ง
10,000	46.8	31.4	67.1	

การควบคุมปริมาณแอมโมเนียอิสระสามารถทำได้โดยการควบคุมค่าพีเอชไม่ให้มากกว่า 7.2 และการเดินระบบที่อุณหภูมิต่ำ แต่ทั้งนี้ควรพิจารณาถึงความเหมาะสมต่อระบบเนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำนั้นจะมีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่ำลงด้วย

3. โลหะหนัก (heavy metal) โลหะหนักที่ความเข้มข้นต่ำๆ เป็นประโยชน์ต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแต่หากมีความเข้มข้นสูงมากเกินไปจะมีผลยับยั้งแบคทีเรียได้ โดยโลหะหนักแต่ละชนิดมีความสามารถในการยับยั้งที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ความเข้มข้นของไอออนของโลหะหนักที่มีผลยับยั้งแบคทีเรีย 50% (half maximal inhibitory concentration, IC_{50}) ของถัวย่อยไร้ออกซิเจน (Mosey และ Hughes, 1975 อ้างถึงใน Grady และคณะ, 1999)

ไอออนของโลหะหนัก	ความเข้มข้น (มก./ล.)
Fe^{2+}	1-10
Zn^{2+}	10^{-4}
Cd^{2+}	10^{-7}
Cu^+	10^{-12}
Cu^{2+}	10^{-16}

จากตารางจะเห็นได้ว่า เฟอร์รัสไอออนเป็นไอออนของโลหะที่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่ำที่สุด รองลงมาคือ ไอออนของสังกะสี แคดเมียมและทองแดง ตามลำดับ โดยทั่วไปซัลไฟด์ในระบบสามารถรวมตัวกับโลหะหนักแล้วตกตะกอนในรูปโลหะซัลไฟด์ทำให้ปริมาณโลหะหนักในระบบลดลงได้เอง แต่ในบางครั้งปริมาณซัลไฟด์มีไม่มากพอที่จะเกิดการตกตะกอนได้ ซึ่งสามารถแก้ไขโดยการเติมซัลไฟด์เพิ่มลงไปในระบบ โดยจากตารางที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าเฟอร์รัสไอออนมีความเป็นพิษต่ำกว่าไอออนของโลหะอื่นๆ การเติมเฟอร์รัสซัลไฟด์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการเพิ่มซัลไฟด์ในปริมาณที่เพียงพอที่จะให้เกิดการตกตะกอนโดยส่งผลกระทบต่อระบบน้อย ส่วนเฟอร์รัสซัลไฟด์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาจะสามารถตกตะกอนร่วมกับคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) ได้เองที่ค่าพีเอชมากกว่าหรือเท่ากับ 6.4

4. **ซัลไฟด์ (sulfide)** ซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 100 มก./ล. สามารถยับยั้งและเกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ดังตารางที่ 2.13

ตารางที่ 2.13 ความเข้มข้นของซัลไฟด์และผลที่มีต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน

ความเข้มข้นของซัลไฟด์ (มก./ล.)	การยับยั้งที่มีต่อแบคทีเรีย
100	ทนต่อการยับยั้งได้โดยมีการปรับตัวเพียงเล็กน้อย หรือไม่จำเป็นต้องมีการปรับตัว
100-200	อาจจะทนต่อการยับยั้งได้โดยมีการปรับตัว
>200	ยับยั้งอย่างรุนแรง

นอกจากนี้ซัลไฟด์ยังสามารถอยู่ในรูปของไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide, H₂S) ได้โดยรวมตัวกับไฮโดรเจนไอออน ดังสมการที่ 2.53



โดยที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์จะสามารถเปลี่ยนกลับไปซัลไฟด์ได้ที่ค่าพีเอชมากกว่า 7.0 ดังสมการ

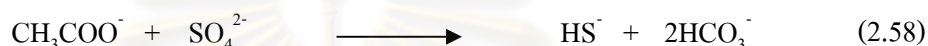


ไฮโดรเจนซัลไฟด์มีลักษณะสมบัติเป็นกรดอ่อน ละลายน้ำได้และสามารถเคลื่อนผ่านชั้นน้ำไปสู่ชั้นอากาศ ทำให้ก๊าซที่ได้จากระบบไร้ออกซิเจนมีความสามารถในการกัดกร่อน การกำจัดซัลไฟด์ออกจากระบบสามารถทำได้โดยใช้วิธีเดียวกับการกำจัดโลหะหนัก โดยการเติมเฟอร์รัสซัลไฟด์เพื่อให้เกิดการตกตะกอนในรูปโลหะซัลไฟด์ สารประกอบของซัลไฟด์อีกตัวหนึ่งที่สำคัญคือ ซัลเฟต (sulfate ion, SO₄²⁻) โดยซัลเฟตไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียโดยตรง แต่จะทำให้แบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวซิง (sulfate-reducing bacteria) มีการแข่งขันกับแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนในการรับอิเล็กตรอนเพื่อรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นซัลไฟด์ ดังสมการ

แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน



แบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวิง



จากสมการที่ 2.57 และ 2.58 จะเห็นได้ว่าแบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวิงมีการนำก๊าซไฮโดรเจนไปใช้โดยก๊าซไฮโดรเจนทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนและซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน การมีซัลเฟตภายในระบบจึงส่งผลเสียต่อการบำบัดแบบไร้ออกซิเจน ดังนี้คือ

1. สำหรับระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนทั่วไป หรือในถังผลิตก๊าซมีเทนในระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน แบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวิงจะมีการนำอิเล็กตรอนไปใช้ทำให้มีอิเล็กตรอนเหลือไม่เพียงพอต่อการนำอิเล็กตรอนไปใช้ผลิตก๊าซมีเทนของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน ดังนั้นเพื่อป้องกันการแข่งขันระหว่างแบคทีเรียทั้งสองกลุ่มนี้ ระบบควรที่จะมีอัตราส่วนของค่าซีโอดีที่เข้าระบบต่อปริมาณซัลเฟต ($\text{COD}/\text{SO}_4^{2-}$) มากพอที่จะให้มีอิเล็กตรอนเหลือสำหรับการผลิตก๊าซมีเทน

2. สำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะถูกแบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวิงนำไปใช้ในการรีดิวซ์ซัลเฟตทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรเจนยิลต์ลดลงได้

5. สารพิษชนิดอื่นๆ นอกจากคั้งที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีสารพิษชนิดอื่นที่อาจก่อความเป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบแบบไร้ออกซิเจน โดยเฉพาะกับแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนซึ่งมีความอ่อนไหวมาก เช่น การมีออกซิเจนภายในระบบ การมีสารอนินทรีย์บางชนิด เช่น 2-bromoethane sulphonic acid ($\text{BrCH}_2\text{CH}_2\text{SO}_3$, BES) คลอโรฟอร์ม คาร์บอนเตตระคลอไรด์ อะเซติลีน หรือเอธิลีน เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2546)

2.7 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากของเสียประเภทต่างๆ

Kim, Han และ Shin (2004) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะจำพวกเศษอาหารร่วมกับตะกอนน้ำเสียชุมชน โดยใช้การทดลองแบบที่ละเทะที่มีการใช้หัวเชื้อจุลินชีพที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที และมีการควบคุมอุณหภูมิและค่าพีเอชในแต่ละชุดการทดลองให้มีค่าเท่ากับ 35 องศาเซลเซียส และ 6.0 ตามลำดับ ทำการทดลองโดยให้ปริมาณของแฉะระเหยได้ทั้งหมดเริ่มต้นแตกต่างกันตั้งแต่ร้อยละ 0.5-50 และมีอัตราส่วนของเศษอาหารและตะกอนน้ำเสียชุมชนเท่ากับ 0 : 100 ไปจนถึง 100 : 0 จากผลการทดลอง ในชุดการทดลองที่ไม่มีการผสมกันระหว่างเศษอาหารและตะกอนน้ำเสียชุมชนพบว่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจำเพาะที่ได้จากเศษอาหารมีค่าสูงกว่าตะกอนน้ำเสียชุมชน และในชุดการทดลองที่มีการเติมน้ำเสียชุมชนพบว่าเมื่อมีอัตราส่วนของตะกอนน้ำเสียเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจำเพาะเพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดเมื่ออัตราส่วนของเศษอาหารและตะกอนน้ำเสียเท่ากับ 87 : 13 โดยมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจำเพาะเท่ากับ 122.9 มล./ก.ซีโอดี แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสารอาหารประเภทไนโตรเจนให้แก่ระบบด้วยการเติมตะกอนน้ำเสียชุมชนลงในเศษอาหารสามารถเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจำเพาะได้ นอกจากนี้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายพบว่า มีอะซิเตทและบิวไทเรทเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งแสดงถึงการมีแบคทีเรียกลุ่มจีส *Clostridium* เป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นที่อยู่ในหัวเชื้อจุลินชีพที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนได้อีกด้วย

Van Ginkel, Oh และ Logan (2005) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียจากโรงงานที่มีกระบวนการแปรรูปอาหาร 4 โรงงาน ได้แก่ โรงงานแปรรูปแอปเปิล โรงงานแปรรูปมันฝรั่งและโรงงานทำของหวานอีก 2 โรงงาน โดยใช้การทดลองแบบที่ละเทะที่มีความเข้มข้นของค่าซีโอดีเท่ากับ 9 21 0.6 และ 20 ก.ซีโอดี/ล. ตามลำดับ ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของการเติมสารอาหารที่ประกอบด้วยไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและธาตุอาหารอื่นๆ ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากน้ำเสียจากการแปรรูปแอปเปิล มันฝรั่งและน้ำเสียจากโรงงานทำของหวาน 2 แห่ง ทั้งที่มีการเติมและไม่เติมสารอาหารมีค่าเท่ากับ 0.7-0.9 0.1 0.4-2.0 และ 2.1-2.8 ล.ไฮโดรเจน/ล.น้ำเสีย ตามลำดับ ซึ่งมีปริมาณมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากน้ำเสียชุมชน (0.01 ล.ไฮโดรเจน/ล.น้ำเสีย) ที่สภาวะการทดลองเดียวกัน เนื่องจากน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารจะมีปริมาณคาร์โบไฮเดรทและสารอินทรีย์ต่างๆ สูงกว่าน้ำเสียชุมชนมาก นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อมีการเติมสารอาหารลงไปสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและการกำจัดซีโอดีได้อีกด้วย ยกเว้นน้ำเสียจาก

กระบวนการแปรรูปมันฝรั่งที่การเติมสารอาหารไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพพบว่าในทุกชุดการทดลอง องค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับร้อยละ 60 โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอคืออยู่ในช่วงร้อยละ 5-11

Gomez และคณะ (2006) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะชุมชนและของเสียจากโรงฆ่าสัตว์โดยระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน ทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างการใช้ขยะชุมชนเพียงอย่างเดียวและการใช้ขยะชุมชนผสมกับของเสียจากโรงฆ่าสัตว์ โดยมีการควบคุมค่าไออาร์พีของระบบและเวลากักพักทางชลศาสตร์แตกต่างกัน 2 ค่า คือ -250 -350 มิลลิโวลต์ และ 3 5 วัน ตามลำดับ มีการควบคุมค่าพีเอชของระบบให้อยู่ในช่วง 5.0-6.0 และใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน จากผลการทดลองพบว่า การใช้ขยะจากชุมชนผสมกับของเสียจากโรงฆ่าสัตว์สามารถเพิ่มไฮโดรเจนยิลด์ให้มีค่าสูงขึ้นจาก 62.1 นอร์มัล มล./ก.ของแข็งระเหยได้ที่ถูกกำจัด เป็น 71.3 นอร์มัล มล./ก.ของแข็งระเหยได้ที่ถูกกำจัด โดยระบบที่มีเวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 3 วันนั้นพบว่ามีค่าไฮโดรเจนยิลด์สูงกว่าระบบที่มีเวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 วัน และค่าไออาร์พีจะมีผลต่อระบบในชุดการทดลองที่ไม่มีการผสมน้ำเสียชุมชนเท่านั้น โดยเมื่อค่าไออาร์พีของระบบเท่ากับ -350 มิลลิโวลต์จะมีไฮโดรเจนยิลด์สูงกว่าระบบที่มีค่าไออาร์พีเท่ากับ -250 มิลลิโวลต์ สำหรับระบบที่มีเวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 วัน กลับพบว่าให้ผลการทดลองในทางตรงกันข้ามคือ ค่าไออาร์พีจะมีผลต่อไฮโดรเจนยิลด์เฉพาะในชุดการทดลองที่มีการผสมน้ำเสียชุมชน โดยเมื่อค่าไออาร์พีของระบบเท่ากับ -250 มิลลิโวลต์จะมีไฮโดรเจนยิลด์สูงกว่าระบบที่มีค่าไออาร์พีเท่ากับ -350 มิลลิโวลต์ นอกจากนี้ในช่วง 5 วันแรกที่เริ่มการทดลอง พบว่าถึงผลิตก๊าซไฮโดรเจนมีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงถึงร้อยละ 45 หลังจากนั้นจึงค่อยๆ ลดลงและไม่สามารถตรวจพบได้ในที่สุด แสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนในหัวเชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาวะดังกล่าว เนื่องจากมีเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่สั้น รวมทั้งมีค่าพีเอชและค่าไออาร์พีของระบบที่ไม่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโต

Liu และคณะ (2006) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนจากของเสียจากบ้านเรือนโดยใช้ระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนที่ประกอบด้วยถังปฏิกิริยา 2 ถัง ทำการทดลองเพื่อหาศักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนจากของเสียจากบ้านเรือน และทำการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้จากระบบแบบสองขั้นตอนและปริมาณก๊าซที่ได้จากถังผลิตก๊าซมีเทนแบบขั้นตอนเดียว จากผลการทดลองพบว่าถึงผลิตก๊าซไฮโดรเจนสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ 43 มล./ก. ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด และถึงผลิตก๊าซมีเทนสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 500 มล./ก. ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด ซึ่งพบว่ามีปริมาณสูงกว่าปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้จากถังผลิตก๊าซมีเทนแบบขั้นตอนเดียวถึงร้อยละ 21 เมื่อทดลองเป่าก๊าซมีเทนเข้าไปในถังผลิตก๊าซไฮโดรเจน

พบว่าสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ให้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นถึงร้อยละ 88 เนื่องมาจากก๊าซที่เป่าเข้าไปจะช่วยลดความดันพาร์เชียลของก๊าซไฮโดรเจนภายในระบบทำให้อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงขึ้นได้ นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองแบบที่ละเทเพื่อหาค่าพีเอชที่เหมาะสม โดยใช้หัวเชื้อจุลชีพที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และมีการควบคุมค่าพีเอชที่แตกต่างกันในช่วง 3.5-8.5 พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมคือช่วง 5.0-5.5 โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้นาน 90 ชั่วโมง โดยไม่พบองค์ประกอบก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ ในชุดการทดลองที่มีการควบคุมค่าพีเอชเท่ากับ 7.5 มีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นสูงที่สุดเมื่อเวลาผ่านไป 113 ชั่วโมง และชุดการทดลองที่มีการควบคุมค่าพีเอชในช่วง 3.5-4.5 พบว่าไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น เนื่องจากแบคทีเรียทั้งกลุ่มที่สร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มอื่นๆ ถูกยับยั้งการเจริญเติบโต ซึ่งการทดลองแบบที่ละเทนี้แสดงให้เห็นว่าการใช้หัวเชื้อแบบจุลชีพที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนได้ ควรที่จะมีการควบคุมสภาวะอื่นๆร่วมด้วยโดยเฉพาะการควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

Wang, Lin และ Chang (2006) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากซูโครสและของเสียจากสับประคโดยใช้การทดลองแบบที่ละเท ทำการทดลองโดยใช้หัวเชื้อจุลชีพจากตะกอนน้ำเสียชุมชนที่ผ่านการปรับสภาพเป็นกรดและเติมลงในถังปฏิบัติการแบบต่อเนื่องที่มีเวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 6-12 ชั่วโมง เพื่อให้เชื้อจุลชีพมีการปรับตัวก่อนที่จะนำมาใช้ในการทดลอง ในการทดลองมีการปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเริ่มต้นของชุดการทดลองที่มีซูโครสเป็นขั้วสเตรทให้มีค่าแตกต่างกันตั้งแต่ 5.5-8.5 และเติมบัฟเฟอร์ต่างกัน 2 ชนิดคือ ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (phosphate buffer) และไบคาร์บอเนตบัฟเฟอร์ (bicarbonate buffer) และทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นของซูโครสที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของซูโครสในช่วง 10-30 ก.ซีไอดี/ล. จากผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 7.5 มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 313 มล. โดยอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรเจนยิลด์มีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อค่าพีเอชของชุดการทดลองสูงขึ้นจาก 5.5-7.5 และค่อยๆ ลดลงเมื่อเพิ่มค่าพีเอชจาก 7.5 เป็น 8.5 โดยมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดเท่ากับ 745 มล./ชั่วโมง/ล. และ 2.46 โมลไฮโดรเจน/โมลซูโครส ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าชนิดของบัฟเฟอร์มีผลต่ออัตราส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน (CO_2/H_2 ratio) ในก๊าซชีวภาพ โดยในชุดการทดลองที่มีการเติมฟอสเฟตบัฟเฟอร์พบว่ามีอัตราส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนอยู่ในช่วง 0.77-1.23 ส่วนในชุดการทดลองที่มีการเติมคาร์บอเนตบัฟเฟอร์นั้น พบว่ามีอัตราส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนสูงกว่าโดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.50-2.33 ซึ่งอัตราส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนนี้จะมีผลต่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้อีกด้วย เมื่อทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของซูโครสที่มี

ผลต่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของซูโครสเพิ่มขึ้นมีผลทำให้อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรเจนยิลด์เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซูโครสจนถึง 30 ก.ซีโอดี/ล. กลับพบว่าเมื่ออัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรเจนยิลด์ลดลง อันเป็นผลมาจากความเข้มข้นของซับสเตรทที่สูงมากเกินไปจนมีผลยับยั้งแบคทีเรียภายในระบบ อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ 745 มล./ชั่วโมง/ล. (ที่ความเข้มข้นของซูโครสเท่ากับ 20 ก.ซีโอดี/ล.) และ 2.44 โมลไฮโดรเจน/โมลซูโครส (ที่ความเข้มข้นของซูโครสเท่ากับ 10 ก.ซีโอดี/ล.) ตามลำดับ และเมื่อทำการทดลองใช้ของเสียจากสับปะรดในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน พบว่าไฮโดรเจนยิลด์ที่ได้จากการทดลองมีค่าค่อนข้างสูงโดยมีค่าเท่ากับ 5.29 มิลลิโมล/ก.ซีโอดี ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการใช้ซูโครสเป็นซับสเตรทที่ความเข้มข้นเท่ากับ 30 ก.ซีโอดี/ล. (5.27 มิลลิโมล/ก.ซีโอดี) ของเสียจากสับปะรดจึงมีความเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นซับสเตรทในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพในระบบแบบต่อเนื่องได้ต่อไป

Vijayaraghavan, Ahmad และ Soning (2007) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากของเสียพวกเปลือกผลไม้โดยใช้ระบบถังกรองสัมผัสแบบไร้ออกซิเจน (anaerobic contact filter) ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นทั้งหมด 3 ค่า คือ 46 66 และ 84 ก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/ล. ใช้ระยะเวลาพักทางจุลศาสตร์แตกต่างกัน ตั้งแต่ 3 ถึง 18 วัน และใช้มูลวัวที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงเป็นหัวเชื้อจุลชีพ พบว่าเมื่อความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นจะมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาพักทางจุลศาสตร์เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นด้วย โดยหากต้องการให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 60 ขึ้นไประยะเวลาพักทางจุลศาสตร์ที่เหมาะสมจะมีค่าเท่ากับ 10 13 และ 18 วัน สำหรับความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นทั้งหมดเท่ากับ 46 66 และ 84 ก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/ล. ตามลำดับ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ยที่ระยะเวลาพักทางจุลศาสตร์สูงกว่า 5 วันมีค่าเท่ากับ 0.75 ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัด

Mohan และคณะ (2009) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะจำพวกเศษผักจากตลาดสดโดยใช้การทดลองแบบที่ละเท ทำการทดลองเปรียบเทียบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากเศษผักที่มีและไม่มีเยื่อผักผสมอยู่ที่ภาวะบรรทุกระบบอินทรีย์แตกต่างกันตั้งแต่ 4.4-57.6 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. โดยใช้หัวเชื้อจุลชีพจากระบบยูเอเอสบี (upflow anaerobic sludge blanket, UASB) ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ร่วมกับการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพให้มีสภาพเป็นกรดโดยมีค่าพีเอชเท่ากับ 3.0 และใช้สารเคมีคือ 2-bromoethane sulphonic acid sodium salt solution ($\text{BrCH}_2\text{CH}_2\text{SO}_3\text{Na}$, BESA) ในการยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน โดยในการทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลองให้มีค่าเท่ากับ 32 องศา

เซลเซียสและปรับค่าพีเอชเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ 6.0 จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนมีความสัมพันธ์กับการระบรทุกสารอินทรีย์และลักษณะของเศษผัก โดยพบว่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดในชุดการทดลองที่ไม่มีเชื้อผักผสมอยู่มีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่มีเชื้อผัก โดยมีค่าเท่ากับ 23.96 มิลลิโมล/วัน ที่การระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 30.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. และ 22.46 มิลลิโมล/วัน ที่การระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 32.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าชุดการทดลองที่ไม่มีเชื้อผักผสมอยู่มีองค์ประกอบของกรดอะซิติก กรดบิวไทริกและกรดโพรไพโอนิกในน้ำเสี้ยวที่การระบรทุกสารอินทรีย์แต่ละค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 51.69-77.28 0-38.0 และร้อยละ 1.10-4.22 ตามลำดับ โดยไม่พบองค์ประกอบของเอทานอลในน้ำเสี้ยว สำหรับชุดการทดลองที่มีเชื้อผักผสมอยู่มีองค์ประกอบของกรดอะซิติก กรดบิวไทริกและกรดโพรไพโอนิกอยู่ในช่วงร้อยละ 36.71-60.36 2.16-24.82 และร้อยละ 6.63-23.31 ตามลำดับ โดยพบว่ามีองค์ประกอบของเอทานอลในน้ำเสี้ยวสูงถึงร้อยละ 13.08-31.36 ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ในชุดการทดลองที่ไม่มีเชื้อผักผสมอยู่มีสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยจากการที่มีกรดอะซิติกและกรดบิวไทริกเป็นองค์ประกอบหลักโดยมีกรดโพรไพโอนิกเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าขั้นตอนการสร้างกรดในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนดำเนินไปได้ด้วยดี ส่งผลให้การผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

Mohanakrishna และคณะ (2010) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะจำพวกเศษผักจากตลาดสดร่วมกับน้ำเสี้ยวชุมชนโดยใช้การทดลองแบบที่ละเท ทำการทดลองเปรียบเทียบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากชุดการทดลองที่มีเชื้อผักผสมอยู่ที่มีการเติมน้ำเสี้ยวและไม่มีการเติมน้ำเสี้ยวชุมชน โดยใช้ค่าการระบรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกันตั้งแต่ 5.2-40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. และชุดการทดลองที่ไม่มีเชื้อผักผสมอยู่ที่มีการเติมน้ำเสี้ยวและไม่มีการเติมน้ำเสี้ยวชุมชนที่ค่าการระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 5.2-40.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. หัวเชื้อจุลชีพที่ใช้ในการทดลองเป็นหัวเชื้อจุลชีพจากระบบยูเอสบีที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ร่วมกับการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพให้มีสภาพเป็นกรด โดยมีค่าพีเอชเท่ากับ 3.0 และใช้ BESA เป็นสารเคมีที่ใช้ในการยับยั้งแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน โดยในการทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิของชุดการทดลองให้มีค่าเท่ากับ 32 องศาเซลเซียส และปรับค่าพีเอชเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ 6.0 ซึ่งจากผลการทดลองก่อนที่จะมีการเติมน้ำเสี้ยวชุมชนพบว่า ชุดการทดลองที่ไม่มีเชื้อผักมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดเท่ากับ 24.1 มิลลิโมล/วัน ที่การระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 19.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. และ 33.5 มิลลิโมล ตามลำดับ โดยมีค่าสูงกว่าในชุดการทดลองที่มีเชื้อผักซึ่งมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดเท่ากับ 22.4 มิลลิโมล/วัน ที่การระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 19.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม. และ 26.8 มิลลิโมล ตามลำดับ ภายหลังจากทดลองเติมน้ำเสี้ยวชุมชนพบว่าสามารถเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมในชุดการ

ทดลองที่มีเชื้อผักและไม่มีเชื้อผักได้ถึงร้อยละ 51.1 และร้อยละ 55.3 ตามลำดับ การเติมน้ำเสียชุมชนยังสามารถรักษาสภาพต่างทั้งหมดภายในระบบไม่ให้มีค่าต่ำเกินไปและอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยไม่ต้องมีการเติมกรดหรือด่างเพิ่มให้กับระบบ ค่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากระบบในชุดการทดลองที่มีเชื้อผักและไม่มีเชื้อผักอยู่ในช่วง 4.3-6.9 และ 4.6-6.8 ตามลำดับ นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำเสียที่ออกจากระบบพบว่ามีกรดอะซิติกและกรดบิวไทริกเป็นองค์ประกอบหลัก แสดงให้เห็นถึงการสร้างกรดในขั้นตอนการสร้างกรดสามารถดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีองค์ประกอบของกรดโพโรไพโอนิกในชุดการทดลองที่มีเชื้อผักและไม่มีเชื้อผักอยู่ในช่วงร้อยละ 22.1-38.7 และร้อยละ 0-22.0 ตามลำดับ ดังนั้นการใช้เศษผักที่ไม่มีเชื้อผักผสมอยู่ร่วมกับน้ำเสียชุมชนจึงสามารถสร้างสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพได้มากกว่าการใช้เศษผักที่มีเชื้อผักผสมอยู่ในสภาวะการทดลองเดียวกัน

2) ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ

Khanal และคณะ (2004) ทำการศึกษาเรื่องผลของค่าพีเอชและผลิตภัณฑ์ละลายน้ำที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากชูโครสและแป้ง โดยใช้การทดลองแบบที่ละเทะที่มีการควบคุมอุณหภูมิของแต่ละชุดการทดลองให้มีค่าเท่ากับ 37 องศาเซลเซียส และใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการทดลองโดยการควบคุมค่าพีเอชในแต่ละชุดการทดลองแตกต่างกันตั้งแต่ 4.5-6.5 จากผลการทดลองพบว่า ค่าพีเอชมีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนทั้งในชุดการทดลองที่มีชูโครสและแป้งเป็นขั้วสเตรท แต่จะมีผลต่อชุดการทดลองที่มีแป้งเป็นขั้วสเตรทมากกว่าเนื่องจากชูโครสสามารถย่อยสลายได้ง่ายและถูกแบคทีเรียนำไปใช้ได้เร็ว ในขณะที่การย่อยสลายแป้งจะต้องมีการไฮโดรไลซิสให้เป็นน้ำตาลเสียก่อน โดยที่ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4.5 มีไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดคือ 214.0 มล./ก.ชีโอดี และ 125.0 มล./ก.ชีโอดี เมื่อใช้ชูโครสและแป้งเป็นขั้วสเตรทตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาช่วง lag phase กลับพบว่าที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4.5 มีช่วง lag phase ที่นานกว่าค่าพีเอชอื่นๆ อันเป็นผลเนื่องมาจากแบคทีเรียต้องมีการปรับตัวที่สภาวะนั้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อเวลาผ่านไปชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นต่ำจะมีการลดลงของค่าพีเอชอย่างรวดเร็วเนื่องจากการที่แบคทีเรียถูกยับยั้งการเจริญเติบโต สำหรับชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 5.5-5.7 นั้นมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจำเพาะสูงสุดและมีการลดลงของค่าพีเอชของระบบช้ากว่าในชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 4.5 ดังนั้นค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากชูโครสและแป้งในการทดลองนี้คือค่าพีเอชที่อยู่ในช่วง 5.5-5.7

Van Ginkel และ Logan (2005) ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราภาระสารอินทรีย์ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยใช้ระบบแบบต่อเนื่อง ทำการแปรผันภาระสารอินทรีย์ที่เข้าระบบตั้งแต่ 0.5-18.9 ก./ชั่วโมง โดยการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นกลูโคสที่เข้าระบบให้อยู่ในช่วง 2.5-10 ก.ซีโอดี/ล. และใช้เวลาพักทางชลศาสตร์แตกต่างกันตั้งแต่ 1-10 ชั่วโมง โดยในการทดลองมีการใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีการควบคุมอุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบให้มีค่าเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส และ 5.5 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าทั้งอัตราภาระสารอินทรีย์ ความเข้มข้นกลูโคสและเวลากักทางชลศาสตร์ล้วนแต่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยเมื่อพิจารณาแยกกันระหว่างความเข้มข้นกลูโคสและเวลากักทางชลศาสตร์พบว่าความเข้มข้นกลูโคสมีผลต่อไฮโดรเจนยิลด์มากกว่าเวลากักทางชลศาสตร์ โดยเมื่อลดความเข้มข้นกลูโคสลงจาก 10 ก.ซีโอดี/ล. ไปจนกระทั่งเหลือความเข้มข้นเท่ากับ 2.5 ก.ซีโอดี/ล. พบว่าไฮโดรเจนยิลด์มีการเพิ่มขึ้นจาก 1.8 เป็น 2.6 โมลไฮโดรเจน/โมลกลูโคส หรือมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 44.44 ในขณะที่การเพิ่มเวลากักทางชลศาสตร์จาก 1 ชั่วโมง เป็น 10 ชั่วโมง พบว่าไฮโดรเจนยิลด์มีการเพิ่มขึ้นจาก 1.9 เป็น 2.4 โมลไฮโดรเจน/โมลกลูโคส ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 26.30 ซึ่งการลดความเข้มข้นของกลูโคสและเพิ่มเวลากักทางชลศาสตร์นี้มีผลทำให้อัตราภาระสารอินทรีย์มีค่าลดลงด้วย ดังนั้นจากผลการทดลองดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่า การลดอัตราภาระสารอินทรีย์สามารถเพิ่มไฮโดรเจนยิลด์ได้ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราภาระสารอินทรีย์มีผลต่อจำนวนเชื้อแบคทีเรียในระบบ โดยเมื่ออัตราภาระสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจากการปรับความเข้มข้นของกลูโคสให้มีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นที่เวลากักทางชลศาสตร์เท่ากับ 10 ชั่วโมง พบว่ามีผลทำให้จำนวนเชื้อแบคทีเรียเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการที่แบคทีเรียมีเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในระบบเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการเจริญเติบโตและเพิ่มจำนวนมากขึ้น แต่เมื่อลดเวลากักทางชลศาสตร์ลงจนเหลือ 1 ชั่วโมงที่ความเข้มข้นของกลูโคสเท่ากัน กลับพบว่ามิผลทำให้แบคทีเรียถูกชะล้างออกจากระบบ (wash out) จากการที่มีเวลากักทางชลศาสตร์ที่ต่ำเกินไป

Kim และคณะ (2006) ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของซับสเตรทที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพด้วยระบบแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR และใช้ชูโครสเป็นซับสเตรท ทำการทดลองโดยใช้เวลากักทางชลศาสตร์เท่ากับ 12 ชั่วโมง และใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที มีการควบคุมอุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบให้มีค่าเท่ากับ 35 ± 1 องศาเซลเซียส และ 5.4 ± 0.1 ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้นของชูโครสเท่ากับ 30 ก.ซีโอดี/ล. มีไฮโดรเจนยิลด์ อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจำเพาะสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.09 โมลไฮโดรเจน/โมลเฮกโซสที่เข้าระบบหรือ 1.22 โมลไฮโดรเจน/โมลเฮกโซสที่ถูกกำจัด 7.65 ล.ไฮโดรเจน/ล.น้ำเสีย-วัน

และ 3.80 ล./ก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด-วัน ตามลำดับ และเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพพบว่า มีองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนเท่ากับร้อยละ 62.5 และร้อยละ 0.06 ตามลำดับ นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ชนิดของเชื้อแบคทีเรียภายในระบบที่ความเข้มข้นนี้พบว่า มีแบคทีเรียกลุ่มจีส Clostridium เป็นแบคทีเรียกลุ่มหลัก เมื่อทำการทดลองลดความเข้มข้นของซูโครสที่เข้าระบบให้มีค่าต่ำกว่า 20 ก.ซีโอดี/ล. พบว่าระบบมีไฮโดรเจนยึดลดลง ร่วมกับการลดลงอย่างมีนัยสำคัญของอัตราส่วนระหว่างบิวไทเรทและอะซิเตทอีกด้วย เมื่อทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างไฮโดรเจนยึดและอัตราส่วนระหว่างบิวไทเรทและอะซิเตท พบว่ามีความสัมพันธ์กันโดยตรง โดยเมื่ออัตราส่วนระหว่างบิวไทเรทและอะซิเตทสูงจะมีผลทำให้ไฮโดรเจนยึดเพิ่มสูงขึ้นด้วย ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างบิวไทเรทและอะซิเตทจึงสามารถบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ นอกจากนี้ที่ความเข้มข้นของซูโครสต่ำกว่า 20 ก.ซีโอดี/ล. ยังพบว่า มีแบคทีเรียชนิด Clostridium scatologens ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่มีการผลิตอะซิเตทจากการบริโภคก๊าซไฮโดรเจนอีกด้วย จากผลการทดลองดังกล่าวจึงสามารถสรุปได้ว่า การบำบัดหัวเชื้อจุลชีพด้วยความร้อนก่อนการทดลองเพียงอย่างเดียวสามารถกำจัดแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนได้ แต่ไม่สามารถกำจัดแบคทีเรียกลุ่มสปอร์อื่นๆ ที่มีการบริโภคก๊าซไฮโดรเจนได้ ดังนั้นจึงควรที่มีการควบคุมสภาวะและปัจจัยต่างๆ ในการเดินระบบร่วมกันในการป้องกันและกำจัดแบคทีเรียกลุ่มนี้ด้วย

Lin และ Chen (2006) ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของซัลเฟตที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากซูโครสด้วยการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ในการทดลองมีการควบคุมอุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบให้มีค่าเท่ากับ 35 องศาเซลเซียสและ 6.7 ตามลำดับ และใช้เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 12 ชั่วโมง ทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นของซัลเฟตในช่วงตั้งแต่ 500-3,000 มก./ล. จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณซัลเฟตเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ค่อยๆ ลดลง โดยการเปลี่ยนวิถีกระบวนการเมตาบอลิซึมของเชื้อจุลชีพจากการหมักบิวไทเรทเป็นเอทานอลและก่อให้เกิดการยับยั้งขึ้นที่ความเข้มข้นของซัลเฟตสูงสุดคือ 3,000 มก./ล. ซึ่งพบว่าเมื่ออัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนลดลงถึงร้อยละ 63.93 (จาก 269.2 มิลลิโมล/ล.-วัน ที่ความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 0 มก./ล. เหลือ 97.1 มิลลิโมล/ล.-วัน ที่ความเข้มข้นของซัลเฟตเท่ากับ 3,000 มก./ล.) นอกจากนี้ที่ความเข้มข้นดังกล่าวได้ทำการทดลองลดค่าพีเอชของระบบให้มีค่าเท่ากับ 5.5 พบว่าระบบมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจากอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดที่ค่าพีเอช 6.7 ถึงร้อยละ 40 ซึ่งเป็นผลมาจากการมีค่าพีเอชที่ต่ำทำให้แบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิิวซึ่งถูกยับยั้งการเจริญเติบโตและส่งผลทำให้แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนเข้ามามีอิทธิพลแทนที่ภายในระบบ

Mu และคณะ (2006) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากกลูโคสโดยใช้การทดลองแบบที่ละเทเพื่อเปรียบเทียบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากชุดการทดลองที่มีการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงมีโซฟิลิกแตกต่างกันตั้งแต่ 33-41 องศาเซลเซียส โดยใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน 85 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และมีการควบคุมค่าพีเอชให้มีค่าเท่ากับ 5.5 ตลอดการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 33 เป็น 41 องศาเซลเซียส มีผลทำให้อัตราการย่อยสลายกลูโคส ไฮโดรเจนยิลด์และปริมาณของแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 97.6 ± 2.6 ถึงร้อยละ 98.9 ± 2.5 0.97-1.67 โมลไฮโดรเจน/โมลกลูโคส และ 0.70-1.14 ก./ล. ตามลำดับ แต่สำหรับอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจำเพาะพบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 33 เป็น 39 องศาเซลเซียส และหลังจากนั้นพบว่ามีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 41 องศาเซลเซียส นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันระเหย แอลกอฮอล์และผลิตภัณฑ์อื่นๆ ในน้ำเสีย พบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณอะซิเตทและบิวไทเรทเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ปริมาณของอะซิโตนและเอทานอลมีค่าลดลงซึ่งแสดงให้เห็นถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อแบคทีเรียโดยมีผลทำให้กระบวนการเมตาบอลิซึมของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

Wang และ Zhao (2009) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะจำพวกเศษอาหารด้วยระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนที่ประกอบด้วยถังปฏิกรณ์แบบทรงกระบอกหมุนไร้ออกซิเจน (anaerobic rotating drum) และถังปฏิกรณ์แบบ CSTR สำหรับถังผลิตก๊าซไฮโดรเจนและมีเทน ตามลำดับ ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลของอัตราการสารอินทรีย์และเวลากักพักตะกอนที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน โดยถังผลิตก๊าซไฮโดรเจนมีการปรับเปลี่ยนอัตราการสารอินทรีย์และเวลากักพักตะกอนให้มีค่าแตกต่างกันอยู่ในช่วง 15.10-37.75 กก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/ลบ.ม.-วัน และ 96-240 ชั่วโมง ตามลำดับ และทำการปรับเปลี่ยนอัตราการสารอินทรีย์และเวลากักพักตะกอนในถังผลิตก๊าซมีเทนให้มีค่าแตกต่างกันอยู่ในช่วง 2.94-8.15 กก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/ลบ.ม.-วัน และ 16-40 วัน ตามลำดับ โดยหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน และมีการควบคุมอุณหภูมิของระบบให้มีค่าเท่ากับ 40 ± 2 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการสารอินทรีย์ภายในถังผลิตก๊าซไฮโดรเจนมีผลทำให้ไฮโดรเจนยิลด์ของระบบมีค่าลดลงจาก 0.071 ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (อัตราการสารอินทรีย์เท่ากับ 15.10 กก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/ลบ.ม.-วัน) เป็น 0.049 ลบ.ม./กก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (อัตราการสารอินทรีย์เท่ากับ 37.75 กก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/ลบ.ม.-วัน) และอัตราการสารอินทรีย์ที่มีค่าสูงยังมีผลทำให้เวลากักพักตะกอนของระบบมีค่าต่ำลงซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ลดลง อันเนื่องมาจากการที่แบคทีเรียถูกชะล้างออกจากระบบเร็วกว่าเวลาที่ต้องใช้ในขั้นตอนไฮโดรไลซิส

ซึ่งขั้นตอนนี้ต้องใช้เวลาานกว่าขั้นตอนการย่อยสลายอื่นๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเศษอาหาร ซึ่งประกอบไปด้วยสารอินทรีย์หลายชนิดที่มีโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อน นอกจากนี้ยังพบว่าเวลากักพักตะกอนมีผลต่อไฮโดรเจนยิลด์อย่างมีนัยสำคัญเมื่อมีการเพิ่มเวลากักพักตะกอนจาก 120 ชั่วโมง (0.054 ลบ.ม./กก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด) เป็น 160 ชั่วโมง (0.065 ลบ.ม./กก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด) ซึ่งเป็นเวลากักพักตะกอนที่ได้จากอัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 30.20 และ 22.65 กก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า อัตราภาระสารอินทรีย์และเวลากักพักตะกอนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากเศษอาหารในการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 22.65 กก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/ลบ.ม.-วัน และ 160 ชั่วโมง ตามลำดับ สำหรับถึงผลิตก๊าซมีเทนนั้น พบว่ามีอัตราภาระสารอินทรีย์และเวลากักพักตะกอนที่เหมาะสมเท่ากับ 4.61 กก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/ลบ.ม.-วัน และ 26.67 วัน ตามลำดับ จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพที่ได้จากถึงผลิตก๊าซไฮโดรเจนพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 29.42-30.86 โดยไม่พบองค์ประกอบของก๊าซมีเทน สำหรับถึงผลิตก๊าซมีเทนพบว่ามีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 64.33-71.48 นอกจากนี้ยังพบว่าความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradability) ของถึงถึงผลิตก๊าซไฮโดรเจนและมีเทนมีค่าเท่ากับร้อยละ 5.78 และร้อยละ 82.18 ตามลำดับ

Zhang และคณะ (2006) ทำการศึกษาผลของเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากกลูโคสและจำนวนของเชื้อจุลินทรีย์ด้วยระบบแบบต่อเนื่อง โดยใช้ถึงปฏิกิริยาแบบ CSTR ที่มีเวลากักพักทางชลศาสตร์อยู่ในช่วง 8-12 ชั่วโมง และใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 98 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง มีการควบคุมอุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบให้คงที่ที่ 37 องศาเซลเซียส และ 5.5 ± 0.05 โดยในช่วงแรกของการทดลองมีการเดินระบบโดยใช้เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 8 ชั่วโมง จากนั้นจึงค่อยๆ เพิ่มเวลากักพักทางชลศาสตร์จนระบบมีเวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 12 ชั่วโมง จากผลการทดลองพบว่าที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 8 ชั่วโมง มีไฮโดรเจนยิลด์และอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 1.62 โมลไฮโดรเจน/โมล กลูโคส และ 6.08 ล.ไฮโดรเจน/ล.น้ำเสีย-วัน ตามลำดับ และยังพบว่าน้ำเสียที่ออกจากระบบมีองค์ประกอบของโพรวไฟโอเนทเท่ากับร้อยละ 8.92 เมื่อทดลองลดเวลากักพักทางชลศาสตร์ลงจาก 8 ชั่วโมง เหลือ 6 ชั่วโมง พบว่าค่าไฮโดรเจนยิลด์และอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนมีการเพิ่มขึ้นเป็น 1.88 โมลไฮโดรเจน/โมลกลูโคส และ 7.77 ล.ไฮโดรเจน/ล.น้ำเสีย-วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าระบบมีปริมาณโพรวไฟโอเนทลดลงเหลือเพียงร้อยละ 0.34 ซึ่งเป็นผลมาจากการที่แบคทีเรียที่ผลิตโพรวไฟโอเนทถูกล้างออกจากระบบ หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มเวลากักพักทางชลศาสตร์เป็น 8 10 และ 12 ชั่วโมง พบว่าสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดกลูโคสจากร้อย

ละ 77.8 (เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 8 ชั่วโมง) เป็นร้อยละ 99.44 (เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 12 ชั่วโมง) ได้ และหลังจากที่มีการกำจัดแบคทีเรียที่ผลิตโพไฟโอเนทออกจากระบบแล้วมีผลทำให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นจาก 1.62 เป็น 1.93 โมลไฮโดรเจน/โมลกลูโคส ที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากันคือ 8 ชั่วโมงอีกด้วย จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายและผลิตภัณฑ์อื่นๆ ในน้ำเสียที่ออกจากระบบพบว่า มีอะซิเตทและบิวไทเรทเป็นองค์ประกอบหลักในทุกการทดลอง ซึ่งสามารถแสดงถึงการมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ จากผลการทดลองจึงสามารถสรุปได้ว่า การลดเวลากักพักทางชลศาสตร์มีผลทำให้ปริมาณกรดโพไฟโอเนกซึ่งมีความเป็นพิษต่อระบบลดลงและส่งผลทำให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์เพิ่มขึ้นได้

Chu และคณะ (2008) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะจำพวกเศษอาหารโดยใช้ระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนที่มีการเวียนตะกอนจากถังผลิตก๊าซมีเทนไปยังถังผลิตก๊าซไฮโดรเจน สำหรับถังผลิตก๊าซไฮโดรเจนทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ที่มีเวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 1.3 วัน อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 38.4 กก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/ลบ.ม.-วัน มีการควบคุมอุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบให้มีค่าเท่ากับ 55 องศาเซลเซียส และ 5.5 ตามลำดับ สำหรับถังผลิตก๊าซมีเทนทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ CSTR ที่มีการเติมวัสดุตัวกลางเพื่อใช้เป็นตัวกลางในการเกาะติดของแบคทีเรีย และใช้เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 วัน อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 6.6 กก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/ลบ.ม.-วัน มีการควบคุมอุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบให้มีค่าเท่ากับ 35 องศาเซลเซียสและ 7.0 ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าที่สภาวะคงตัวถังผลิตก๊าซไฮโดรเจนสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 10.4 ล.ไฮโดรเจน/ล.น้ำเสีย-วัน โดยมีองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วงร้อยละ 52-56 และร้อยละ 41-47 ตามลำดับ โดยไม่พบองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพและระบบมีไฮโดรเจนซัลไฟด์เท่ากับ 205 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ที่เข้าระบบ เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายพบว่า มีกรดอะซิติกและบิวไทริกเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงการมีสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้นอกจากนี้การเวียนตะกอนจากถังผลิตก๊าซมีเทนกลับเข้าสู่ถังผลิตก๊าซไฮโดรเจนยังช่วยปรับค่าพีเอชของระบบไม่ให้มีค่าต่ำเกินไปได้โดยไม่ต้องมีการเติมสารเคมีประเภท่างเพื่อปรับค่าพีเอชสำหรับถังผลิตก๊าซมีเทนสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 4.7 ล./ล.น้ำเสีย-วัน โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่ในช่วงร้อยละ 70-80 และร้อยละ 20-29 ตามลำดับ คิดเป็นยิลด์ของก๊าซมีเทนเท่ากับ 464 มล./ก.ของของแข็งระเหยได้ที่เข้าระบบ ดังนั้นจากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า การควบคุมค่าพีเอชให้เหมาะสมสำหรับแบคทีเรียแต่ละกลุ่ม (กลุ่มสร้างกรด/กลุ่มสร้างก๊าซมีเทน) ร่วมกับการควบคุมค่าอุณหภูมิโดยใช้อุณหภูมิในช่วงเทอร์โมฟิลิก

สำหรับถึงผลิตก๊าซไฮโดรเจนสามารถช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนภายในถังผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้

Lee และคณะ (2008) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะจำพวกเศษผักจากห้องครัวโดยใช้การทดลองแบบที่ละเทเพื่อเปรียบเทียบค่าพีเอชที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ทำการทดลองโดยใช้ชุดการทดลอง 4 ชุดที่มีค่าพีเอชที่แตกต่างกัน 4 ค่าคือ ค่าพีเอชเท่ากับ 5.5 6.0 6.5 และ 7.0 ในแต่ละชุดการทดลองใช้ปริมาณขยะต่อปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นเท่ากับ 10 ก.ซีโอดี/ก.ของของแข็งแขวนลอยระเหยได้ และมีการควบคุมค่าอุณหภูมิของระบบอยู่ในช่วงเทอร์โมฟิลิก (55 องศาเซลเซียส) ผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 6.0 มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจำเพาะสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 0.48 มิลลิโมล/ก.ของของแข็งแขวนลอยระเหยได้/ชั่วโมง และชุดการทดลองที่มีไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดคือ ชุดการทดลองที่มีค่าพีเอชเท่ากับ 7.0 โดยมีค่าเท่ากับ 0.57 มิลลิโมล/ก. ซีโอดี ในทั้ง 4 ชุดการทดลองมีองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพอยู่ในช่วงร้อยละ 40-73 และเมื่อทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายและชนิดของแบคทีเรียในระบบ พบว่าภายในระบบมีแบคทีเรียกลุ่มจีส *Clostridium* เป็นแบคทีเรียกลุ่มหลักโดยชนิดที่พบ ได้แก่ *C. aldrichii*, *C. cellobioparum*, *C. termitidis* และ *C. formicoaceticum* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สามารถผลิตกรดอะซิติก กรดบิวไทริกและก๊าซไฮโดรเจนจากคาร์โบไฮเดรตหรือเซลลูโลสได้ ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายในน้ำเสียที่ออกจากระบบซึ่งพบว่ามีกรดบิวไทริกเป็นองค์ประกอบหลัก

Lin, Chang และ Hung (2008) ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากแป้งโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์แบบผสม ทำการทดลองที่ละเทและแบบต่อเนื่องโดยใช้สัจจากโรงบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตกระดาษที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อน 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที ในการทดลองแบบที่ละเทมีการปรับเปลี่ยนค่าพีเอชของระบบในช่วง 5.0-7.0 โดยใช้ความเข้มข้นของแป้งแตกต่างกันตั้งแต่ 5-60 ก.ซีโอดี/ล. ผลการทดลองพบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมคือค่าพีเอชเท่ากับ 5.5 โดยมีไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 1.1 โมลไฮโดรเจน/โมลเฮกโซส และอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน 10.4 มิลลิโมล/ล.-ชั่วโมง และพบว่าความเข้มข้นของแป้งเริ่มต้นที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 20 ก.ซีโอดี/ล. สำหรับการทดลองแบบต่อเนื่องนั้นทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนเวลากักพักทางชลศาสตร์ตั้งแต่ 2-12 ชั่วโมง มีการควบคุมค่าพีเอชของระบบคงที่ที่ 5.5 จากผลการทดลองพบว่าระบบมีเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่เหมาะสมคือ 4 ชั่วโมง โดยมีไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดเท่ากับ 1.5 โมลไฮโดรเจน/โมลเฮกโซส และมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดคือ 450 มล./ล.-วัน

Pakarinen, Lehtomaki และ Rintala (2008) ทำการศึกษาผลของหัวเชื้อจุลินทรีย์ ค่าพีเอช อุณหภูมิและอัตราส่วนของปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดของซบัสเตรทต่อปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากหญ้าที่ใช้เป็นอาหารสัตว์ โดยทำการทดลองแบบที่ละเทและใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการบำบัดความร้อนโดยการต้มให้เดือด เป็นเวลา 30 นาที ที่มาจาก 2 แหล่งคือ หัวเชื้อจุลินทรีย์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลวัวและจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน ทำการทดลองเปรียบเทียบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นโดยมีการปรับเปลี่ยนค่าพีเอช อุณหภูมิและอัตราส่วนของปริมาณของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดของซบัสเตรทต่อปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่แตกต่างกัน พบว่าหัวเชื้อจุลินทรีย์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลวัวสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากหญ้าดังกล่าวได้ ในขณะที่หัวเชื้อจุลินทรีย์จากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนนั้นพบว่าไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น และพบว่าไฮโดรเจนยึดที่ได้จากการทดลองมีค่าสูงสุดเมื่ออุณหภูมิของระบบมีค่าเท่ากับ 70 องศาเซลเซียส (16 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด) รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส (7.2 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด) และที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (3.2 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด) ตามลำดับ โดยที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้นานที่สุด (25 วัน) ระบบมีค่าพีเอชที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 5.0-6.0 ส่วนที่ค่าพีเอชเท่ากับ 4.0 นั้นพบว่าไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นเนื่องจากแบคทีเรียถูกยับยั้งการทำงาน ส่วนอัตราส่วนของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดของซบัสเตรทและหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 2.0

Valdez-Vazquez และ Poggi-Varaldo (2009) ทำการศึกษาผลของสภาพต่างทั้งหมดและปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากของเสียอินทรีย์ที่มีลักษณะสมบัติเป็นของเสียที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดสูง (มากกว่าร้อยละ 20 ขึ้นไป) โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องที่มีการเติมซบัสเตรทสัปดาห์ละ 2 ครั้ง และมีการควบคุมอุณหภูมิของระบบให้อยู่ในช่วงเทอร์โมฟิลิก (55 ± 1 องศาเซลเซียส) ทำการทดลองโดยใช้การทดลองทั้งหมด 12 ชุดการทดลองที่มีปริมาณของแข็งที่เข้าระบบแตกต่างกันตั้งแต่ร้อยละ 20.9-35.1 และมีอัตราส่วนระหว่างสภาพต่างทั้งหมดในรูปฟอสเฟตบัพเฟอร์ต่อปริมาณซบัสเตรท (ก.ฟอสเฟต/ก.น้ำหนักแห้ง) อยู่ในช่วง 0.15-0.45 โดยของเสียที่ใช้เป็นขยะอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของกระดาษร้อยละ 40 และเศษอาหารร้อยละ 60 จากผลการทดลองพบว่าปริมาณของแข็งที่เข้าระบบและอัตราส่วนระหว่างสภาพต่างทั้งหมดต่อปริมาณซบัสเตรทที่มีค่าสูงมีผลทำให้การผลิตก๊าซไฮโดรเจนลดลง โดยปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรเจนยึดสูงสุดที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 463.7 นอร์มัล มล./กก.-วัน และ 54.8 นอร์มัล มล./ก.ของแข็งระเหยได้ที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากชุดการทดลองที่มีปริมาณของแข็งที่เข้าระบบเท่ากับร้อยละ 20.9 และมีอัตราส่วนระหว่างสภาพต่างทั้งหมดต่อปริมาณซบัสเตรทเท่ากับ 0.25 (เทียบเท่ากับ 0.11 ก.แคลเซียมคาร์บอเนต/ก.น.น.แห้งของซบัสเตรท) จากการทดลองทั้ง 12 ชุดพบว่าค่าพีเอชของระบบขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างสภาพต่างทั้งหมดต่อ

ปริมาณซับสเตอร์ทเพียงอย่างเดียวโดยไม่ขึ้นกับปริมาณของแข็งที่เข้าระบบ โดยหากระบบมีกำลังบัฟเฟอร์มากพอจะสามารถรักษาค่าพีเอชของระบบให้คงที่ได้แม้ว่าปริมาณของแข็งที่เข้าระบบจะมีค่าสูงขึ้นก็ตาม ในการรักษาค่าพีเอชของระบบให้มีค่าอยู่ในช่วง 5.56-5.95 ซึ่งเป็นค่าที่ให้ไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดนั้น ควรที่จะมีการควบคุมอัตราส่วนระหว่างสภาพต่างทั้งหมดต่อปริมาณซับสเตอร์ทให้อยู่ในช่วง 0.15-0.30 และยังพบว่าเมื่อมีการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายและผลิตภัณฑ์ที่เป็นตัวทำลายสูง เช่น เมทานอล เอทานอล บิวทานอล เป็นต้น ระบบจะมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้สูงด้วย แต่ไม่มีผลต่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรเจนยิลด์ที่ได้ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เมื่อระบบมีปริมาณของแข็งที่เข้าระบบและมีอัตราส่วนระหว่างสภาพต่างทั้งหมดต่อปริมาณซับสเตอร์ทสูง การกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ นั้นจะเป็นการย่อยสลายและผลิตเป็นตัวทำลายต่างๆ แทนการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายและก๊าซไฮโดรเจน

โดยสรุปแล้ว งานวิจัยนี้ได้อ้างอิงงานวิจัยต่างๆ เกี่ยวกับสถานะเริ่มต้นในการทดลองและสถานะการทำงานของระบบ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างมากในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ดังนี้คือ

1. สถานะเริ่มต้นในการทดลอง โดยได้อ้างอิงงานวิจัยของ Kim และคณะ (2004) และ Kim และคณะ (2006) เกี่ยวกับการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์เบื้องต้นเพื่อกำจัดแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน ซึ่งใช้อุณหภูมิในการให้ความร้อนอยู่ในช่วง 90-100 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลา 10 นาที ซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนไม่สูงมากนักด้วยระยะเวลาสั้นๆ สามารถกำจัดแบคทีเรียกลุ่มนี้ได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้ใช้อุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส โดยทำการปรับเพิ่มระยะเวลาของการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยให้เป็น 15 นาที เพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของหัวเชื้อที่ใช้ในการทดลอง

2. สถานะการทำงานของระบบ ได้แก่ ค่าพีเอชและเวลากักพักทางชลศาสตร์ ในส่วนของค่าพีเอชได้อ้างอิงงานวิจัยของ Liu และคณะ (2006) และ Lin และคณะ (2008) ซึ่งพบว่าพีเอชที่มีความเหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 5.5-5.7 และ 5.5 ตามลำดับ สำหรับเวลากักพักทางชลศาสตร์ในการทดลองแบบต่อเนื่องได้อ้างอิงงานวิจัยของ Gomez และคณะ (2006) ที่ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากขยะชุมชนด้วยระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน โดยใช้เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 และ 3 วัน ซึ่งพบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนอยู่ในเกณฑ์ดีและมีสถานะที่เหมาะสมที่จะสามารถป้องกันการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนภายในระบบได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการควบคุมค่าพีเอชของการทดลองทั้งการทดลองแบบทีละเทและการทดลองแบบต่อเนื่อง (ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน) ให้คงที่เท่ากับ 5.5 และใช้เวลากักพักทางชลศาสตร์ในการทดลองแบบต่อเนื่องเท่ากับ 5 3 และ 2 วัน ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์สังเคราะห์ที่มีองค์ประกอบเช่นเดียวกับของเสียประเภทขยะอินทรีย์ในตลาดสดในย่านชุมชนของกรุงเทพมหานคร ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้ข้อมูลจากตลาดสดทรัพย์สินทร์พื้นที่เป็นกรณีศึกษา โดยงานวิจัยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

- 1) การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสด โดยทำการทดลองแบบที่ละเทด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์จำนวน 3 ถัง ทำการปรับเปลี่ยนร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้น 3 ค่า คือ ร้อยละ 2 3 และร้อยละ 5 ตามลำดับ
- 2) การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสด โดยใช้ระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนซึ่งประกอบด้วยถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์จำนวน 2 ถังคือ ถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทน ในการทดลองจะทำการเดินระบบโดยใช้ขยะที่มีความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ได้จากการทดลองที่ 1 ป้อนเข้าสู่ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งจะทำให้การปรับเปลี่ยนเวลากักพักทางชลศาสตร์ 3 ค่า คือ 5 3 และ 2 วัน ตามลำดับ จากนั้นน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทน ซึ่งจะมีการควบคุมเวลากักพักทางชลศาสตร์ให้มีค่าคงที่ที่ 15 วันในทุกชุดการทดลอง

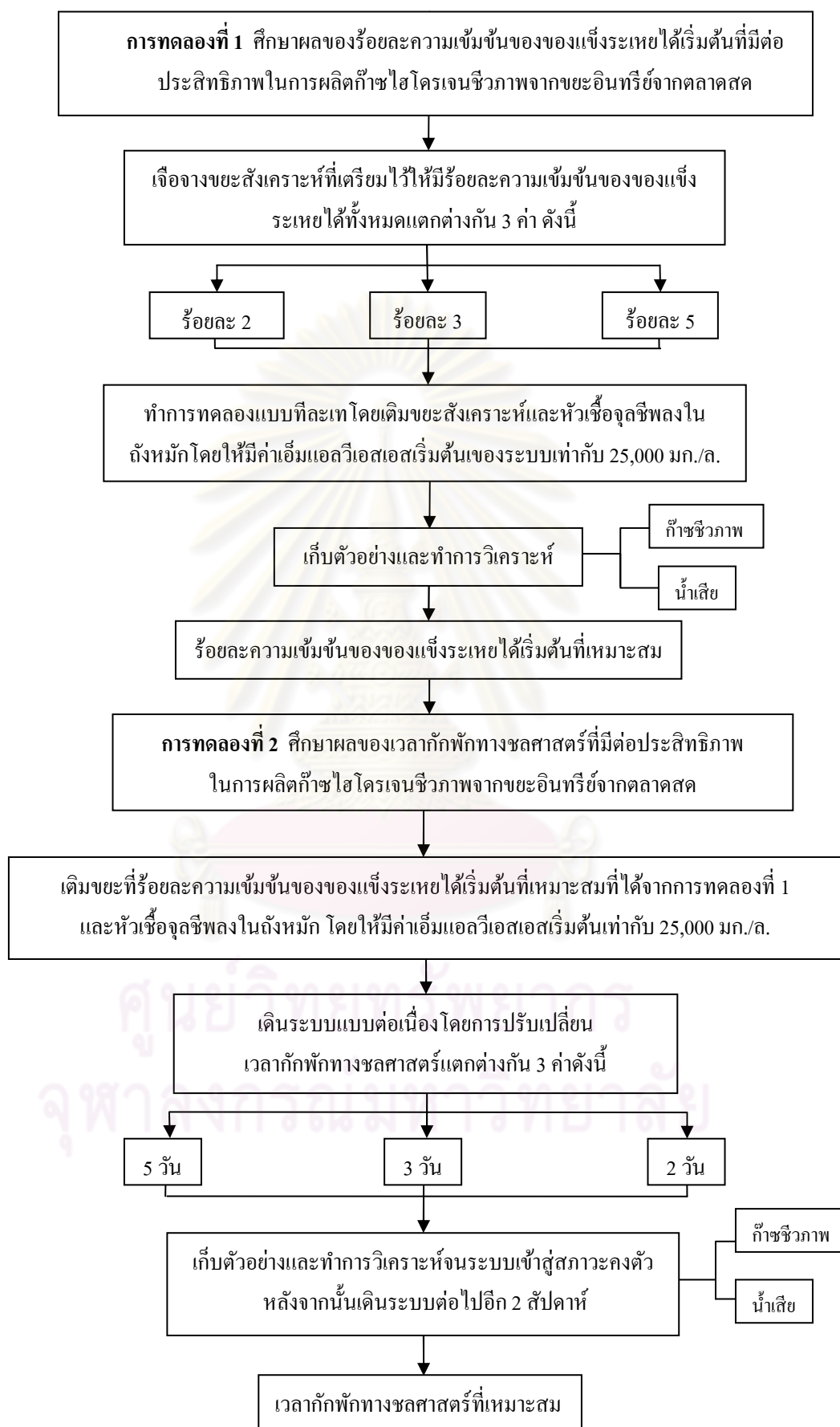
ขยะสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองจะมีการเตรียมโดยการบดละเอียดและกรองด้วยตะแกรงเพื่อให้มีขนาดไม่เกิน 2 มิลลิเมตร ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างขยะและหัวเชื้อจุลินทรีย์ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีขึ้น หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองจะมีการบำบัดเบื้องต้นด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนและแบคทีเรียชนิดที่ไม่สร้างสปอร์อื่นๆ โดยมีรายละเอียดและขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังแสดงในตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของการดำเนินงานวิจัย

ถึงปฏิบัติการ	ร้อยละความเข้มข้นของ ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด ^๓	เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ (วัน)	จำนวนรอบของการป้อน น้ำเสียต่อวัน
การทดลองที่ 1			
ถึงหมักก๊าซไฮโดรเจน 1	5	-	-
ถึงหมักก๊าซไฮโดรเจน 2	3	-	-
ถึงหมักก๊าซไฮโดรเจน 3	2	-	-
การทดลองที่ 2			
<u>การเดินระบบช่วงที่ 1</u>			
ถึงหมักก๊าซไฮโดรเจน	จากการทดลองที่ 1	5	6 (1.27 ล./ชั่วโมง)
ถึงหมักก๊าซมีเทน	-	15	3 (0.13 ล./ชั่วโมง)
<u>การเดินระบบช่วงที่ 2</u>			
ถึงหมักก๊าซไฮโดรเจน	จากการทดลองที่ 1	3	6 (1.27 ล./ชั่วโมง)
ถึงหมักก๊าซมีเทน	-	15	3 (0.13 ล./ชั่วโมง)
<u>การเดินระบบช่วงที่ 3</u>			
ถึงหมักก๊าซไฮโดรเจน	จากการทดลองที่ 1	2	6 (1.27 ล./ชั่วโมง)
ถึงหมักก๊าซมีเทน	-	15	3 (0.13 ล./ชั่วโมง)

หมายเหตุ: ^๓ ได้จากการวิเคราะห์ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมดในขณะน้ำหนัก 100 กรัม (น้ำหนักเปียก) และเจือจางให้ได้ค่าตามที่ต้องการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ในงานวิจัยนี้มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 3 ตัวแปร ได้แก่ ตัวแปรต้น ตัวแปรคงที่ และตัวแปรตาม โดยในการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 มีตัวแปรที่ทำการศึกษาดังแต่เริ่มต้นเดินระบบจนระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในงานวิจัย

การทดลองที่	ตัวแปรต้น	ตัวแปรคงที่	ตัวแปรตาม
1	<p>การศึกษาผลของร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสด โดยการปรับเปลี่ยนร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นที่เข้าระบบดังนี้</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) ร้อยละ 2 2) ร้อยละ 3 3) ร้อยละ 5 	<ul style="list-style-type: none"> - องค์ประกอบของขยะ - ปริมาณทำงานของถังหมักเท่ากับ 1.45 ลิตร - ค่าเอ็มแอลวีเอสเอสของหัวเชื้อจุลชีพเริ่มต้นเท่ากับ 25,000 มก./ล. - ค่าพีเอชเริ่มต้นและในระหว่างการทดลองเท่ากับ 5.5 - ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 	<ul style="list-style-type: none"> - ค่าซีไอดีทั้งหมด - ค่าซีไอดีละลาย - ของแข็งทั้งหมด - ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด - ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด - องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิด^๑ - ปริมาณก๊าซชีวภาพ
2	<p>การศึกษาผลของเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่มีต่อประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสดโดยใช้ระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน ทำการปรับเปลี่ยนเวลากักพักทางชลศาสตร์ของระบบดังนี้</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 5 วัน 2) 3 วัน 3) 2 วัน 	<ul style="list-style-type: none"> - องค์ประกอบของขยะ - ปริมาณทำงานของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนเท่ากับ 1.45 ลิตร - ค่าเอ็มแอลวีเอสเอสของหัวเชื้อจุลชีพเริ่มต้นเท่ากับ 25,000 มก./ล. - เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซมีเทนเท่ากับ 15 วัน - ค่าพีเอชของระบบเท่ากับ 5.5 ตลอดการทดลอง - ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง 	<ul style="list-style-type: none"> - องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ - สภาพต่างทั้งหมด - ค่าพีเอช - อุณหภูมิ - ค่าไออาร์พี

หมายเหตุ: ^๑ ทำการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิด ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทริก กรดวาเลอริกและกรดคาโปรอิก ซึ่งจะทำการวิเคราะห์เฉพาะในการทดลองที่ 2

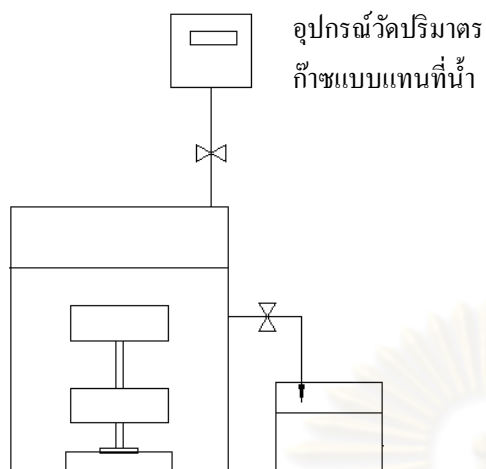
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 ชุดระบบแบบกวนสมบูรณ์

ชุดระบบแบบกวนสมบูรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 1 และ 2 ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 3.3 และมีลักษณะและการติดตั้งอุปกรณ์ของระบบแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 3.3 และ 3.4

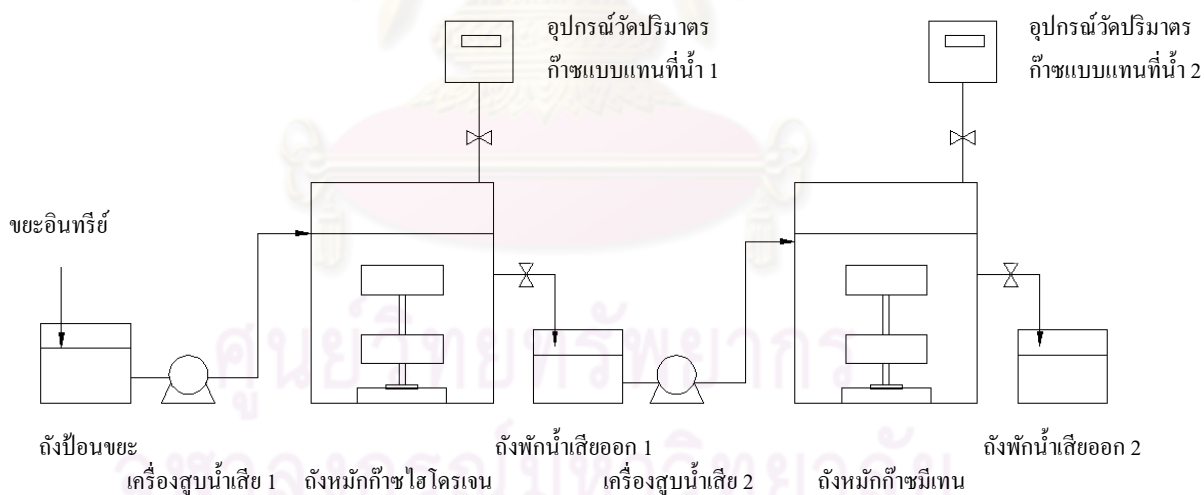
ตารางที่ 3.3 อุปกรณ์ในชุดระบบแบบกวนสมบูรณ์

การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2
<p>ชุดระบบแบบกวนสมบูรณ์ 1 ชุด ประกอบด้วย</p> <ul style="list-style-type: none"> - ถังหมักก๊าซไฮโดรเจนจำนวน 1 ถัง - ชุดควบคุมความเร็วของใบพัด (stirrer) จำนวน 1 ชุด - ชุดอุปกรณ์วัดและควบคุมค่าพีเอช (pH controller) จำนวน 1 ชุด - ชุดอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ (gas counter) จำนวน 1 เครื่อง - ถังพักน้ำเสียออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจน จำนวน 1 ถัง 	<p>ชุดระบบแบบกวนสมบูรณ์ 1 ชุด ประกอบด้วย</p> <ul style="list-style-type: none"> - ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน จำนวน 1 ถัง - ถังหมักก๊าซมีเทน จำนวน 1 ถัง - เครื่องสูบน้ำเสีย (pump) จำนวน 2 เครื่อง - ชุดควบคุมความเร็วของใบพัด จำนวน 2 ชุด - ชุดอุปกรณ์วัดและควบคุมค่าพีเอช (สำหรับถังหมักก๊าซไฮโดรเจน) จำนวน 1 ชุด - ชุดอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ จำนวน 2 เครื่อง - เครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้า (magnetic stirrer) จำนวน 1 เครื่อง - ถังป้อนขยะ จำนวน 1 ถัง - ถังพักน้ำเสียออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนอย่างละ 1 ถัง

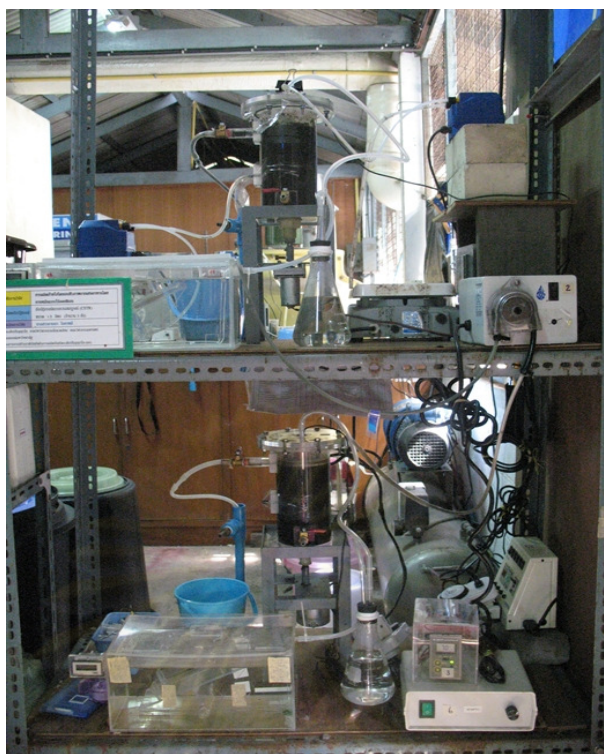


ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน ถังพักน้ำเสียออก

รูปที่ 3.2 การติดตั้งอุปกรณ์และลักษณะของระบบแบบกวนสมบูรณ์ที่ใช้ในการทดลองแบบทีละเท



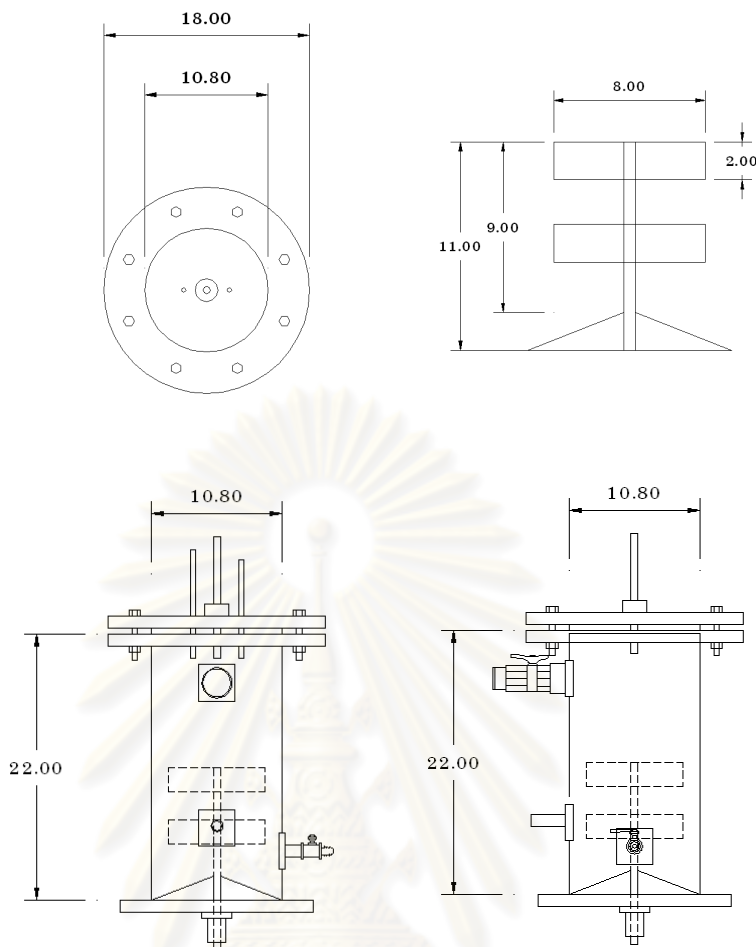
รูปที่ 3.3 การติดตั้งอุปกรณ์ของระบบแบบกวนสมบูรณ์ที่ใช้ในการทดลองต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน



รูปที่ 3.4 ลักษณะของระบบแบบกวนสมบูรณ์ที่ใช้ในการทดลองต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน

3.3.1.1 รายละเอียดของอุปกรณ์ในชุดระบบแบบกวนสมบูรณ์

1) ถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน เป็นถังหมักแบบกวนสมบูรณ์ ปริมาตรทำงาน 1.45 ลิตร ลักษณะเป็นถังหมักทรงกระบอกทำด้วยอะคริลิกใสความหนา 0.5 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในถังเท่ากับ 10.8 เซนติเมตรและมีความลึกเท่ากับ 22 เซนติเมตร ด้านบนของถังปฏิกริยาจะมีท่อก๊าซและท่อป้อนขยะเข้าระบบทำด้วยอะคริลิกใสเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เซนติเมตร ภายในถังหมักจะมีใบพัดที่ใช้ในการกวนซึ่งจะมีลักษณะเป็นแกนเหล็กกลมที่ติดกับใบกวน 2 ใบอยู่ตรงบริเวณด้านล่างของถังซึ่งการกวนของใบพัดนี้จะถูกควบคุมความเร็วด้วยชุดควบคุมความเร็วของใบพัด ลักษณะและขนาดของถังหมักแบบกวนสมบูรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ลักษณะของถังหมักแบบกวนสมบูรณ์ที่ใช้ในการทดลอง
(แสดงขนาดในหน่วยเซนติเมตร)

2) ถังป้อนขยะ เป็นถังที่ใช้ในการพักขยะเพื่อรอการป้อนเข้าสู่ระบบ โดยในการทดลองนี้จะใช้ปั๊มเกอร์ขนาด 2 ลิตรแทนถังป้อนขยะ ซึ่งจะมีการกวนเพื่อให้ขยะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการควบคุมความเร็วของการกวนให้มีค่าเท่ากับ 100 รอบ/นาที และมีการตั้งเวลาให้ทำงานเฉพาะในช่วงที่มีการป้อนขยะเข้าสู่ระบบโดยใช้เครื่องตั้งเวลา (timer)

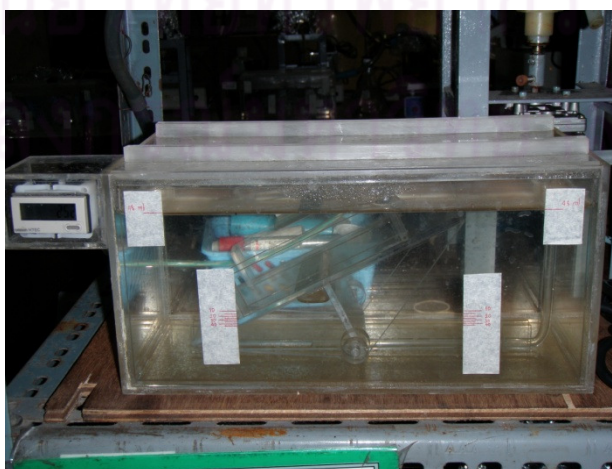
3) ถังพักน้ำเสียออกจากระบบ ใช้ในการรองรับน้ำเสียที่ออกจากระบบ และเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ และใช้ในการพักน้ำเสียเพื่อป้อนเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทนในการทดลองที่ 2 โดยจะใช้ถังพลาสติกขนาด 2 ลิตร รองรับน้ำเสียบริเวณทางน้ำออกของถังหมัก

4) เครื่องสูบน้ำเสีย เครื่องสูบน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้จะเป็นเครื่องสูบน้ำเสียชนิดรีดสาย (Peristaltic pump) ที่มีการปรับเทียบเครื่อง (calibration) ให้มีอัตราการไหลตามที่ต้องการ โดยจะถูกควบคุมการทำงานด้วยเครื่องตั้งเวลาและเครื่องพีแอลซี (programmable logic controller, PLC)

5) ชุดควบคุมความเร็วของใบพัด เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมความเร็วของใบพัดให้มีค่าคงที่สามารถปรับความเร็วได้ตามความต้องการ โดยในการทดลองนี้จะใช้ความเร็วในการหมุนของใบพัดเท่ากับ 100 รอบ/นาที

6) ชุดอุปกรณ์วัดและควบคุมค่าพีเอช เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมค่าพีเอชของถังหมักก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งจะต่อเข้ากับอุปกรณ์อีก 2 ชนิดคือ หัวโพรบวัดค่าพีเอชที่ติดตั้งอยู่บริเวณฝาด้านบนของถังหมักและเครื่องสูบลำโพงที่ใช้ในการปรับพีเอช โดยเครื่องสูบลำโพงจะทำการสูบลำโพงเข้าระบบเมื่อพีเอชของระบบที่วัดได้มีค่าต่ำหรือสูงไปจากค่าที่กำหนด ซึ่งในการทดลองนี้จะมีการควบคุมค่าพีเอชของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนให้คงที่ 5.5 ตลอดการทดลอง

7) ชุดอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซแบบแทนทีน้ำ เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดปริมาตรปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ซึ่งจะทำด้วยอะคริลิกใสรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าและมีหน้าปิดบอกตัวเลขเป็นดิจิตอลโดยมีลักษณะดังรูปที่ 3.6 มีหลักการทำงานคือ จะใช้วิธีการนับจำนวนการพลิกกลับของอุปกรณ์ที่อยู่ใต้น้ำเมื่อถูกดันด้วยก๊าซ โดยก่อนการใช้งานจะต้องมีการปรับเทียบปริมาตรที่ใช้ในการดันอุปกรณ์ให้พลิกกลับด้วยการใช้เข็มฉีดยาดูดอากาศให้ได้ปริมาตรก๊าซที่แน่นอนในหน่วยมิลลิลิตร จากนั้นฉีดเข้าสู่ท่อ นำก๊าซของเครื่องจนเกิดการพลิกกลับและทำซ้ำจนได้ปริมาตรก๊าซที่คงที่ ซึ่งจากการปรับเทียบนี้จะได้จำนวนปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นต่อการพลิกกลับของอุปกรณ์ 1 ครั้ง เพื่อนำไปใช้ในการคำนวณปริมาตรก๊าซชีวภาพต่อวันต่อไป



รูปที่ 3.6 ลักษณะของชุดอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซแบบแทนทีน้ำ

3.3.2 อุปกรณ์ในการเตรียมขยะสังเคราะห์และหัวเชื้อจุลินทรีย์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมขยะสังเคราะห์ประกอบด้วยเครื่องบดละเอียด ตะแกรง U.S. Mesh No.10 สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้เตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์ประกอบด้วยเตาให้ความร้อน (hot plate) บีกเกอร์ เทอร์โมมิเตอร์และนาฬิกาจับเวลา

3.3.3 เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในน้ำเสียและ ก๊าซชีวภาพ

ประกอบไปด้วยเครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมีต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์น้ำเสียและก๊าซชีวภาพ

3.4 วิธีดำเนินการทดลอง

3.4.1 การเตรียมขยะอินทรีย์สังเคราะห์

ขยะที่ใช้ในการทดลองจะเป็นขยะสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นในห้องปฏิบัติการโดยใช้ ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาองค์ประกอบของขยะจากตลาดสดในกรุงเทพมหานครที่ได้ทำการคัดเลือก ให้เป็นตัวแทนในการศึกษา โดยในขั้นแรกจะทำการศึกษาองค์ประกอบของขยะจากตลาดสดด้วยการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์องค์ประกอบของขยะ หลังจากนั้นจะทำการคัดเลือกเฉพาะขยะ อินทรีย์บางประเภทที่มีองค์ประกอบมากที่สุด 5 อันดับแรกมาใช้เป็นข้อมูลในการเตรียมขยะ อินทรีย์สังเคราะห์ที่จะใช้ในการทดลอง และเพื่อให้ขยะสังเคราะห์มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน รวมทั้งเพื่อให้ง่ายต่อการย่อยสลาย ดังนั้นจะต้องมีการเตรียมโดยการหั่น บดให้ละเอียดด้วยเครื่อง บดละเอียดและกรองด้วยตะแกรง U.S. Mesh No.10 เพื่อให้มีขนาดไม่เกิน 2 มิลลิเมตร โดยขั้นตอน การเตรียมขยะสังเคราะห์สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6

ขยะสังเคราะห์ที่ผ่านการเตรียมแล้ว หากไม่ได้นำไปใช้ในการทดลองทันทีจะต้อง นำไปเก็บไว้ในตู้เย็นที่อุณหภูมิไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส และไม่เก็บไว้นานเกินไปโดยจะมีการ เตรียมใหม่ทุกๆ 5 วัน เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของลักษณะสมบัติของขยะที่อาจเกิดขึ้นได้ ขยะ ที่เตรียมไว้แล้วส่วนหนึ่งจะมีการนำไปวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพ โดยวิเคราะห์ พารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้คือ

- ค่าซีไอดีทั้งหมด
- ค่าซีไอดีละลาย
- ปริมาณของแข็งทั้งหมด

- ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด
- ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัส
- ค่าพีเอช



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเตรียมขยะอินทรีย์สังเคราะห์

3.4.2 การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอสบีของโรงงานผลิตน้ำอัดลมแห่งหนึ่ง โดยจะมีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้นเช่นเดียวกับการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของขยะสังเคราะห์ และมีการเตรียมก่อนที่จะนำมาใช้ในการทดลองโดยการผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์กับน้ำเสียสังเคราะห์ในอัตราส่วน 3 : 1 ซึ่งน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้จะมีการเติมสารอาหารชนิดต่างๆ ที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยมีความเข้มข้นในหน่วยมก./ล. ดังนี้คือ $\text{AlCl}_3(\text{H}_2\text{O})_6$ 0.5; H_3BO_3 0.5; KI 10; $\text{CuCl}_2(\text{H}_2\text{O})_2$ 0.5; $\text{MnCl}_2(\text{H}_2\text{O})_4$ 0.5; $\text{NaMoO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$ 0.5; Na_2SeO_3 0.5; NH_4VO_3 0.5; $\text{NaWO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$ 0.5; $\text{FeCl}_2(\text{H}_2\text{O})_4$ 40; $\text{CoCl}_2(\text{H}_2\text{O})_6$ 10; $\text{NiCl}_2(\text{H}_2\text{O})_6$ 0.5; ZnCl_2 0.5; NH_4Cl 400; $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 80; $(\text{NaPO}_3)_6$ 10; $\text{Na}_2\text{S}(\text{H}_2\text{O})$, 300; KCl 400; $\text{CaCl}_2(\text{H}_2\text{O})_2$ 50; $\text{MgSO}_4(\text{H}_2\text{O})_7$, 400; Cysteine 10 และ NaHCO_3 6,000 มก./ล. (Speece, 1996) จากนั้นจึงนำมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที เพื่อกำจัดแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนออกไปเหลือแต่แบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่สามารถสร้างสปอร์ได้เมื่ออยู่ในที่ที่มีสภาวะที่ไม่เหมาะสม และ

หลังจากให้ความร้อนแล้วจะมีการทิ้งไว้ให้เย็นก่อนที่จะเก็บไว้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพให้มีลักษณะสมบัติใกล้เคียงกัน นำหัวเชื้อจุลชีพ ส่วนหนึ่งมาทำการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีและกายภาพ และทำการวิเคราะห์ลักษณะ โครงสร้างภายในหัวเชื้อที่ผ่านการให้ความร้อนเปรียบเทียบกับหัวเชื้อที่ไม่ผ่านการให้ความร้อน ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscopy, SEM)

3.4.3 การดำเนินการทดลอง

3.4.3.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้ เริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์ จากตลาดสด

1) ทำการทดลองแบบที่ละเทในถังหมักแบบกวนสมบูรณ์จำนวน 3 ถัง โดย นำขยะสังเคราะห์ที่เตรียมไว้มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้ เริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 2 3 และร้อยละ 5 ตามลำดับ นำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ เพื่อใช้ในการพิจารณาปริมาณสารอาหารที่ต้องเติมลงไปเพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ของแบคทีเรีย โดยให้มีอัตราส่วนของค่าซีไอดี : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส : เหล็ก เท่ากับ 100 : 5 : 1 : 0.33 โดยใช้สารละลายยูเรีย (NH_2CONH_2) เป็นแหล่งของไนโตรเจน ใช้สารละลายได โพแทสเซียมฟอสเฟต (K_2HPO_4) เป็นแหล่งของฟอสฟอรัส และใช้สารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์เตตระไฮเดรต ($\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) เป็นแหล่งของเหล็ก

2) เติมขยะสังเคราะห์ที่เจือจางเรียบร้อยแล้วและหัวเชื้อจุลชีพลงในถังหมัก ทั้ง 3 ถัง โดยให้มีค่าเอ็มแอลวีเอสเอสของเชื้อจุลชีพเริ่มต้นเท่ากับ 25,000 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมที่ทำให้แบคทีเรียสามารถปรับตัวได้อย่างรวดเร็วและสามารถคงปริมาณเชื้อแบคทีเรียไว้ หากเกิดความเป็นพิษขึ้นภายในระบบ (Speece, 1996) จะได้อัตราความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นที่เข้าระบบดังนี้

- ถังหมักที่ 1 ร้อยละ 2
- ถังหมักที่ 2 ร้อยละ 3
- ถังหมักที่ 3 ร้อยละ 5

หลังจากเติมขยะสังเคราะห์และหัวเชื้อจุลชีพลงในถังหมักแล้วจึงผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ปิดฝาถังหมักและใช้ก๊าซไนโตรเจนไล่ก๊าซออกซิเจนออกจากถังเป็นเวลา 15 นาที เพื่อปรับสภาพภายในถังปฏิกิริยาให้เป็นแบบไร้ออกซิเจน จากนั้นจึงปรับค่าพีเอชเริ่มต้น

และในระหว่างการทดลองให้เท่ากับ 5.5 โดยใช้กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้นอย่างละ 2 นอร์มัล ซึ่งรายละเอียดต่างๆ ของการทดลองที่ 1 แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของการทดลองแบบทีละเทในการทดลองที่ 1

พารามิเตอร์	รายละเอียดการทดลอง
ปริมาตรทำงาน	1.45 ลิตร
ปริมาตรช่องว่างเหนือน้ำ	0.57 ลิตร
ปริมาตรรวม	2.0 ลิตร
ปริมาตรขยะ	0.78 ลิตร
ปริมาตรหัวเชื้อจุลชีพ	0.67 ลิตร ^๓
ค่าพีเอชเริ่มต้น	5.5
อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง	อุณหภูมิห้อง

หมายเหตุ: ^๓ ได้จากการกำหนดค่าเอ็มแอลวีเอสเอสเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ 25,000 มก./ล.

3) เก็บข้อมูลโดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากจุดเก็บตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์ค่าซีโอดีทั้งหมด ค่าซีโอดีกรอง ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ สภาพด่างทั้งหมด ค่าพีเอช อุณหภูมิ ค่าไออาร์พี และทำการเก็บข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อนำไปวิเคราะห์หองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลองจะมีการหาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาโดยพิจารณาหองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นใหม่และองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนที่อยู่เดิมบริเวณช่องว่างเหนือน้ำด้านบนของถังหมัก หรือบริเวณ headspace โดยใช้สมการที่ 3.1

$$V_{H_2, i} = V_{H_2, i-1} + V_w C_{H_2, i} + V_{G, i} C_{H_2, i} - V_{G, i-1} C_{H_2, i-1} \quad (3.1)$$

เมื่อ	$V_{H_2, i}$	=	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่วัดได้ ณ เวลาปัจจุบัน (i), มล.
	$V_{H_2, i-1}$	=	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่วัดได้เมื่อครั้งก่อนหน้า (i-1), มล.
	V_w	=	ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่วัดได้จากการแทนที่น้ำ, มล.
	$V_{G, i}$	=	ปริมาณก๊าซชีวภาพบริเวณช่องว่างเหนือน้ำด้านบนของถังหมัก ณ เวลาปัจจุบัน, มล.
	$V_{G, i-1}$	=	ปริมาณก๊าซชีวภาพบริเวณเหนือน้ำด้านบนของถังหมักเมื่อครั้งก่อนหน้า, มล.

$$C_{H_2, i} = \text{องค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพที่วัดได้ ณ เวลาปัจจุบัน}$$

$$C_{H_2, i-1} = \text{องค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพที่วัดได้ เมื่อครั้งก่อนหน้า}$$

ข้อมูลที่ได้จากสมการ 3.1 จะถูกนำมาวิเคราะห์หาค่าข้อมูลและสร้างกราฟจากสมการ Gompertz ดังแสดงในสมการที่ 3.2 โดยใช้ฟังก์ชัน Solver ใน Microsoft Excel จากนั้นจะทำการหาช่วง lag phase ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดและอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกราฟดังรูปที่ 3.7 และคำนวณเป็นค่าไฮโดรเจนยิลด์โดยใช้สมการที่ 3.3

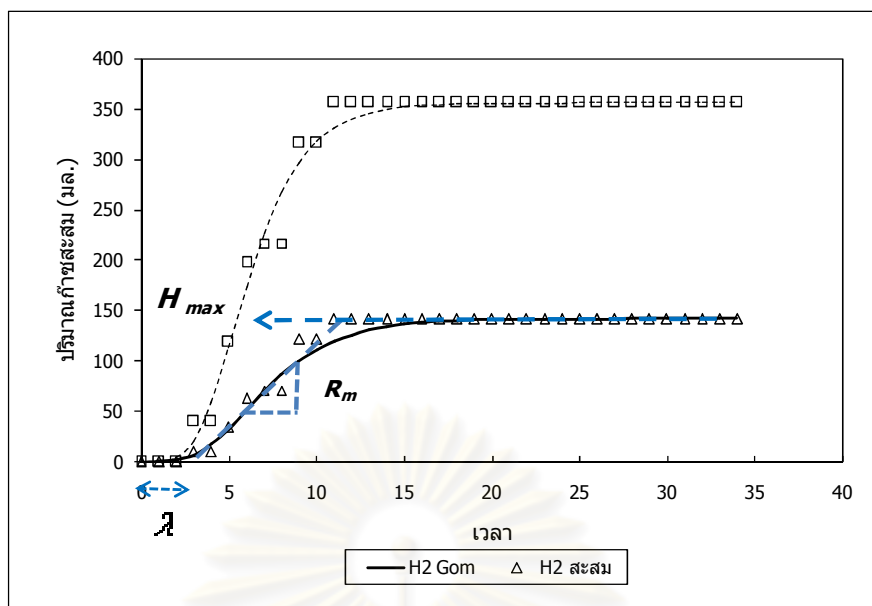
$$H(t) = H_{\max} \exp\left\{-\exp\left[\frac{R_m * e}{H_{\max}}(\lambda - t) + 1\right]\right\} \quad (3.2)$$

เมื่อ $H(t)$ = ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เวลา t , มล.
 H_{\max} = ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุด, มล.
 R_m = อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน, มล./ชั่วโมง หรือ มล./วัน
 λ = ช่วง lag phase, ชั่วโมง หรือวัน
 t = ช่วงเวลาที่เก็บข้อมูล
 e = 2.71828

ค่าไฮโดรเจนยิลด์ที่ได้จากการทดลองสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$Y_{H_2} = \frac{n_{H_2}}{W_g (TVS_i)} \quad (3.3)$$

เมื่อ n_{H_2} = จำนวนโมลของก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลอง
 W_g = น้ำหนักของขยะอินทรีย์, กรัม, หรือ มก.
 TVS_i = ความเข้มข้นของขยะอินทรีย์ ณ เวลาเริ่มต้นของการทดลอง, ก./ล. หรือ มก./ล.



รูปที่ 3.8 การหาช่วง lag phase ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดและอัตราการผลิต
ก๊าซไฮโดรเจนจากกราฟที่สร้างจากสมการ Gompertz

3.4.3.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของเวลากักพักทางจุลศาสตร์ที่มีต่อประสิทธิภาพ การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสด

1) ทำการทดลองแบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนโดยเติมขยะสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองที่ 1 และเติมหัวเชื้อจุลชีพโดยให้มีค่าเอ็มแอลวีเอสเอสเริ่มต้นเท่ากับ 25,000 มก./ล. ลงในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนในชุดระบบแบบกวนสมบูรณ์ต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนทั้ง 2 ชุด และสำหรับถังหมักก๊าซมีเทนจะทำการเติมหัวเชื้อจุลชีพที่ไม่ผ่านการให้ความร้อนลงไปโดยให้มีค่าเอ็มแอลวีเอสเอสเริ่มต้นของระบบเท่ากับ 25,000 มก./ล. เช่นเดียวกัน

2) เติกระบบโดยใช้เวลากักพักทางจุลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนแตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 5 3 และ 2 วัน ตามลำดับในการทดลองจะมีการควบคุมค่าพีเอชของระบบถังหมักก๊าซไฮโดรเจนให้คงที่ที่ 5.5 โดยใช้กรดซัลฟูริกและโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นอย่างละ 2 นอร์มัล

3) เก็บข้อมูลโดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากจุดเก็บตัวอย่าง เพื่อวิเคราะห์ค่าซีไอดีทั้งหมด ค่าซีไอดีกรอง ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ สภาพค่างทั้งหมด องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิด ค่าพีเอช อุณหภูมิ ค่าไออาร์พี และทำการเก็บข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นและเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อ

นำไปวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากระบบเข้าสู่สถานะคงตัว โดยพิจารณาจากระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจนคงที่และทำการเก็บข้อมูลต่อไปอีก 2 สัปดาห์

3.5 การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ผล

3.5.1 การเก็บตัวอย่าง

1) การเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากถังหมัก

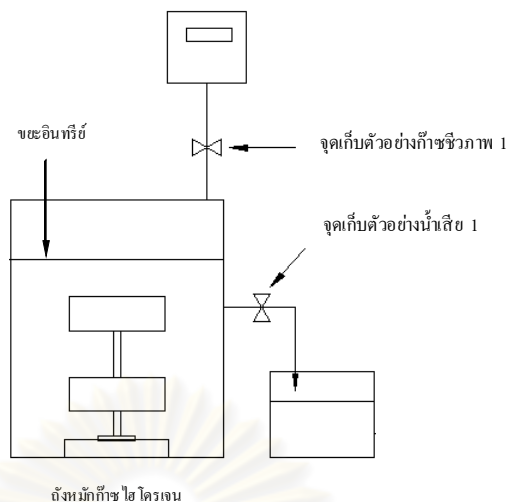
การเก็บตัวอย่างน้ำเสียจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากจุดเก็บตัวอย่าง 3 จุด ได้แก่ จุดเก็บน้ำเสียบริเวณถังป้อนขยะเข้าระบบ จุดเก็บน้ำเสียบริเวณถังพักน้ำเสียออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทน โดยจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียแต่ละจุดแสดงดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 ซึ่งในแต่ละจุดทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียปริมาณประมาณ 100 มิลลิลิตร โดยในการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 ทำการเก็บตัวอย่างจากจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียดังนี้

- การทดลองที่ 1 เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย 1
- การทดลองที่ 2 เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย 1 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย 2 และจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย 3

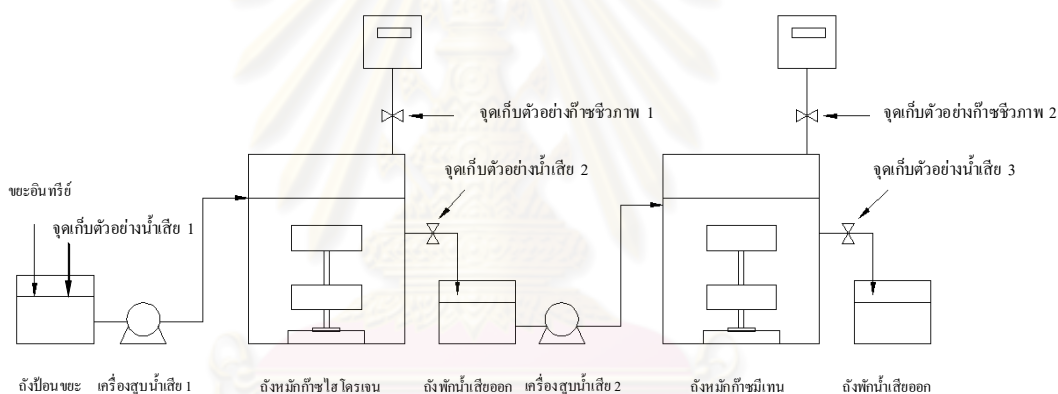
2) การเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ

ทำการเก็บข้อมูลปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวัน โดยดูจำนวนการพลิกกลับของอุปกรณ์จากตัวเลขบนหน้าปัดดิจิทัลของชุดอุปกรณ์วัดปริมาณก๊าซแบบแทนที่น้ำ จากนั้นจึงทำการคำนวณปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นต่อวัน โดยใช้จำนวนการพลิกกลับของอุปกรณ์ต่อวัน คูณด้วยปริมาตรก๊าซที่ทำให้เกิดการพลิกกลับ 1 ครั้ง (จากการเปรียบเทียบ) ส่วนการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจะทำการเก็บตัวอย่างก๊าซจากจุดเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพ 2 จุดดังรูปที่ 3.9 และ 3.10 โดยใช้ถุงเก็บตัวอย่างก๊าซและจากนั้นจะนำไปวิเคราะห์ต่อไป โดยในการเก็บตัวอย่างก๊าซในแต่ละการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

- การทดลองที่ 1 เก็บตัวอย่างก๊าซจากจุดเก็บก๊าซชีวภาพ 1
- การทดลองที่ 2 เก็บตัวอย่างก๊าซจากจุดเก็บก๊าซชีวภาพ 1 และ 2



รูปที่ 3.9 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียและก๊าซชีวภาพสำหรับการทดลองที่ 1



รูปที่ 3.10 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียและก๊าซชีวภาพสำหรับการทดลองที่ 2

3.1.1 วิธีการวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์ข้อมูลทำโดยบันทึกปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน นำตัวอย่างก๊าซชีวภาพมาวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ ส่วนตัวอย่างน้ำเสียจากจุดเก็บตัวอย่างน้ำเสียทั้ง 3 จุด นำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ โดยความถี่ในการวิเคราะห์และวิธีวิเคราะห์ของตัวอย่างน้ำเสียและก๊าซชีวภาพสามารถแสดงดังตารางที่ 3.5 และ 3.6

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์และความถี่ในการวิเคราะห์ของตัวอย่างน้ำเสียและก๊าซชีวภาพ

การทดลองที่	จุดเก็บตัวอย่าง	พารามิเตอร์	ความถี่ในการวิเคราะห์
1	จุดเก็บน้ำเสีย 1	ค่าซีโอดีทั้งหมด ค่าซีโอดีกรอง ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ สภาพต่างทั้งหมด	สัปดาห์ละ 3 ครั้ง
		ค่าพีเอช อุณหภูมิ ค่าไออาร์พี	ทุกวัน
	จุดเก็บตัวอย่าง ก๊าซชีวภาพ 1	ปริมาณก๊าซชีวภาพ องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	ทุกวัน
2	จุดเก็บน้ำเสีย 1 2 และ 3	ค่าซีโอดีทั้งหมด ค่าซีโอดีกรอง ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่าย แต่ละชนิด ⁿ ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหยได้ สภาพต่างทั้งหมด	สัปดาห์ละ 3 ครั้ง
		ค่าพีเอช อุณหภูมิ ค่าไออาร์พี	ทุกวัน
	จุดเก็บตัวอย่าง ก๊าซชีวภาพ 1 และ 2	ปริมาณก๊าซชีวภาพ	ทุกวัน
		องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	- สัปดาห์ละ 2 ครั้ง (สำหรับถังหมักก๊าซไฮโดรเจน) - สุ่มตรวจวัด (สำหรับถังหมักก๊าซมีเทน)

หมายเหตุ: ⁿ ทำการวิเคราะห์เฉพาะในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

ตารางที่ 3.6 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในตัวอย่างน้ำเสียและก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์ / เครื่องมือวิเคราะห์
ปริมาณไนโตรเจนในขยะสังเคราะห์	วิธีแมคโครเดาห์ลไนโตรเจน
ปริมาณฟอสฟอรัสในขยะสังเคราะห์	วิธีแวนาโด โมลิบโดฟอสฟอริกแอซิด
ปริมาณเหล็กทั้งหมดในขยะสังเคราะห์	เครื่องอินดักทีฟลี คัพเพิลด์ พลาสมา สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
โครงสร้างภายในของหัวเชื้อจุลินทรีย์	กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน
ค่าซีไอดีทั้งหมด	วิธีรีฟลักซ์แบบปิด
ค่าซีไอดีกรอง	วิธีรีฟลักซ์แบบปิด
ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด	วิธีไทเทรต
องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิด	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ⁿ
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	ระเหยด้วยถ้วยกระเบื้องที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส และชั่งน้ำหนัก
ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด	เผาที่อุณหภูมิ 550±0.5 องศาเซลเซียสและชั่งน้ำหนัก
สภาพค่างทั้งหมด	วิธีไทเทรต
ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน	เครื่องวัดพีเอช (เชื่อมต่อกับหัวตรวจวัดชนิด ORP)
อุณหภูมิ	เทอร์โมมิเตอร์
ค่าพีเอช	เครื่องวัดพีเอช
ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด	ชุดอุปกรณ์วัดปริมาตรก๊าซแบบแทนที่น้ำ
องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ⁿ

หมายเหตุ:

ⁿ เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น 2010

ต่อกับเครื่องตรวจวัดชนิด Flame Ionization Detector (FID) โดยใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นก๊าซตัวพา

ใช้คอลัมน์ชนิด FFAP เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.53 มม. ยาว 10 ม.

อุณหภูมิของเครื่องตรวจวัดและคอลัมน์เท่ากับ 250 และ 150 องศาเซลเซียส

ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 1 ไมโครลิตร

^u เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ยี่ห้อ Varian รุ่น CP 3800

ต่อกับเครื่องตรวจวัดชนิด Thermal Conductivity Detector (TCD) โดยใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นก๊าซตัวพา

ใช้คอลัมน์ชนิด Capillary column อุณหภูมิของเครื่องตรวจวัดและคอลัมน์เท่ากับ 80 และ 35 องศาเซลเซียส

ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์เท่ากับ 0.5 มล.

วิธีการและเทคนิคในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ เป็นไปตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard methods for examination of water and wastewater (อรรถีย์ ชาวลาภาฤทธิ์, 2545; American Public Health Association, 1995)

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและอภิปรายผล

4.1 ขยะอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

4.1.1 องค์ประกอบของขยะอินทรีย์จากตลาดสด

ขยะอินทรีย์จากตลาดสดส่วนใหญ่เป็นขยะเปียกที่มีเปอร์เซ็นต์ความชื้นค่อนข้างสูง ซึ่งจากการเก็บข้อมูลของขยะจากตลาดสดทรัพย์สินจันทร์ผืน ซึ่งเป็นตลาดสดที่ได้เลือกเป็นกรณีศึกษา ในงานวิจัยนี้พบว่ามัลักษณะของขยะที่เกิดขึ้นดังรูปที่ 4.1 และจากการศึกษาพบว่าองค์ประกอบของขยะที่เกิดขึ้นในแต่ละวันนั้น ส่วนใหญ่เป็นพวกเศษพืชผักต่างๆ ซึ่งมีปริมาณที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยมีขยะที่เป็นพวกเศษผลไม้และเศษเนื้อสัตว์อยู่บ้างแต่มีปริมาณที่ไม่มากนักเนื่องจากมักจะมีการขายไปก่อนที่จะเน่าเสียและผลไม้ที่วางขายบางส่วนจะเป็นผลไม้ที่ผ่านการตัดแต่งมาเรียบร้อยแล้ว ส่วนเศษเนื้อสัตว์นั้นจะมีการรับซื้อไปใช้ประโยชน์เป็นอาหารเลี้ยงสัตว์อีกทางหนึ่ง โดยขยะอินทรีย์จำพวกเศษผักที่เกิดขึ้นจะเป็นส่วนของผักที่เน่าเสีย ส่วนที่ไม่ได้ใช้ประโยชน์หรือเป็นส่วนของใบที่เหี่ยว ช้ำ หรือเริ่มเป็นสีเหลืองก็จะมีการเด็ดทิ้งออกไป

จากการสุ่มตัวอย่างขยะอินทรีย์จำพวกเศษผักมา 5 เ่ง โดยมีน้ำหนักรวมเท่ากับ 50 กิโลกรัม นำมาเทรวมกันและแยกผักชนิดต่างๆ ออกจากกันแล้วชั่งน้ำหนัก พบว่ามีองค์ประกอบดังตารางที่ 4.1 ซึ่งพบว่าองค์ประกอบหลักของขยะจำพวกเศษอาหารจากตลาดสดประกอบด้วยเศษผักชนิดต่างๆ ได้แก่ ผักกาดขาว กะหล่ำดอก กะหล่ำปลี ใบคะน้า ผักกาดหอม โดยมีอัตราส่วนเท่ากับ ร้อยละ 31.4 22.2 14.4 12.2 และ 9.0 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อรวมทั้ง 5 ชนิดคิดเป็นปริมาณสูงถึงร้อยละ 89.2 ของขยะอินทรีย์จำพวกเศษผักทั้งหมด ดังนั้นในการทดลองนี้จึงพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบหลัก 5 ชนิดของขยะอินทรีย์จำพวกเศษผักจากตลาดดังกล่าวข้างต้นมาเป็นตัวแทนการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 ลักษณะของขยะที่เกิดขึ้นในตลาดสดที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบของขยะอินทรีย์จำพวกเศษผักจากตลาดสด

ชนิดของผัก	น้ำหนัก (กก.)	ร้อยละของผักแต่ละชนิด
ผักกาดขาว	15.70	31.4
กะหล่ำดอก	11.10	22.2
กะหล่ำปลี	7.20	14.4
ใบคะน้า	6.10	12.2
ผักกาดหอม	4.50	9.0
ก้านมะเขือเปราะ	1.60	3.2
ผักบุ้ง	1.15	2.3
หัวปลี	1.10	2.2
ถั้วผักยาว	0.60	1.2
ต้นหอม	0.55	1.1
กึ้นข่า	0.40	0.8
รวม	50	100

4.1.2 ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของขยะอินทรีย์

ขยะสังเคราะห์ที่ผ่านการบดละเอียดและกรองเรียบรื้อแล้วจะได้ขยะสังเคราะห์ที่มีลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลวดังรูปที่ 4.2 ซึ่งจะมีเชื้อผักปะปนอยู่กับน้ำผัก เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพพบว่ามีปริมาณความชื้นอยู่สูงถึงร้อยละ 94.0 และส่วนที่เหลือจะเป็นของแข็งโดยพบว่ามีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 5.9 ในส่วนที่เป็นของแข็งทั้งหมดนี้มีส่วนที่เป็นของแข็งระเหยได้เท่ากับร้อยละ 5.02 เมื่อคิดเป็นสัดส่วนของสารอินทรีย์พบว่ามีค่าค่อนข้างสูงโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 85.0 นอกจากนี้ยังพบว่ามีค่าซีโอดีทั้งหมด ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และเหล็กเท่ากับ 69,720 มก./ล. ร้อยละ 0.28 ร้อยละ 0.039 และต่ำกว่าร้อยละ 0.001 ตามลำดับ ซึ่งจากการที่ขยะสังเคราะห์มีสัดส่วนของสารอินทรีย์สูงจึงคาดว่าน่าจะมีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนสำหรับการทดลองนี้ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการที่ประกอบไปด้วยเศษผักจึงทำให้มีปริมาณไนโตรเจนฟอสฟอรัสและเหล็กไม่สูงมากนักจึงอาจจะต้องมีการเติมสารอาหารเพิ่มเติมเพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของขยะอินทรีย์สังเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ลักษณะของขยะสังเคราะห์ที่ผ่านการเตรียมที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของขยะอินทรีย์สังเคราะห์ก่อนการเจือจาง

พารามิเตอร์	ร้อยละ โดยน้ำหนักเปียก
ปริมาณความชื้น	94.0
ของแข็งทั้งหมด	5.9
ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด	5.02
สัดส่วนของสารอินทรีย์ ⁿ	85.0
ปริมาณไนโตรเจน	0.28
ปริมาณฟอสฟอรัส	0.039
ปริมาณเหล็ก	≤ 0.001
ซีโอดีทั้งหมด (มก./ล.)	69,720
ซีโอดีกรอง (มก./ล.)	39,540
ค่าพีเอช	5.09

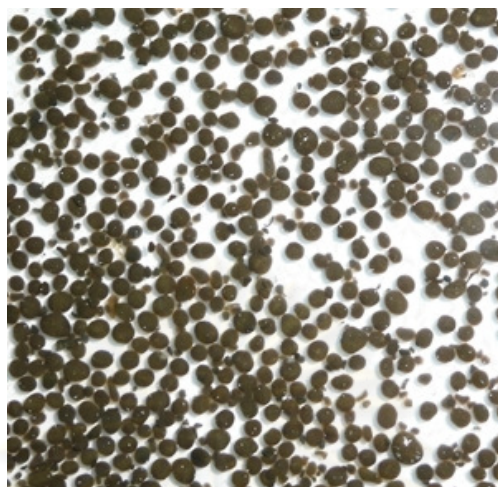
หมายเหตุ: ⁿ (ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด/ของแข็งทั้งหมด)* 100

4.2 หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

4.2.1 ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของหัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์แบบเม็ดตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบยูเอสบีจากโรงงานผลิตน้ำอัดลมแห่งหนึ่ง ซึ่งเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีลักษณะเป็น

เม็ดกลม ผิวเรียบลื่นสีดำอมน้ำตาลและมีรูปร่างค่อนข้างสมบูรณ์ โดยแต่ละเม็ดจะมีขนาดที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 หัวเชื้อจุลชีพแบบเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากหัวเชื้อจุลชีพที่ใช้เป็นหัวเชื้อจุลชีพแบบเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งอาจมีผลทำให้การให้ความร้อนแก่เม็ดตะกอนชั้นในและชั้นนอกเป็นไปได้โดยไม่ทั่วถึงรวมทั้งการมีลักษณะเป็นเม็ดดังกล่าวอาจมีผลทำให้ค่าพีเอชของหัวเชื้อจุลชีพแต่ละบริเวณมีค่าแตกต่างกันได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้วิธีการเตรียมหัวเชื้อจุลชีพโดยการบดละเอียดก่อนที่จะนำไปบำบัดด้วยความร้อน โดยขั้นนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของหัวเชื้อจุลชีพทั้งในหัวเชื้อจุลชีพแบบเม็ดตะกอนและในหัวเชื้อจุลชีพที่มีการนำไปบดละเอียดก่อนที่จะนำไปให้ความร้อนเพื่อศึกษาถึงผลของลักษณะหัวเชื้อจุลชีพดังกล่าวอีกด้วย

ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของหัวเชื้อจุลชีพทั้งก่อนและหลังการให้ความร้อนโดยการวิเคราะห์ค่าซีโอดีทั้งหมด ค่าเอ็มแอลวีเอสเอสและค่าพีเอช พบว่าหัวเชื้อจุลชีพที่ยังไม่ผ่านการให้ความร้อนมีค่าซีโอดีและค่าเอ็มแอลวีเอสเอสค่อนข้างสูงเนื่องจากประกอบไปด้วยแบคทีเรียจำนวนมาก ส่วนหัวเชื้อที่ผ่านการให้ความร้อนก่อนนำไปใช้ในการทดลองนั้นพบว่าหัวเชื้อจุลชีพมีค่าซีโอดีลดต่ำลงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการลดลงของแบคทีเรียบางชนิดที่ไม่สามารถทนต่อความร้อนได้และตายไปในที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าหัวเชื้อจุลชีพที่มีการบดละเอียดก่อนการบำบัดด้วยความร้อนมีค่าซีโอดีและค่าเอ็มแอลวีเอสเอสต่ำกว่าหัวเชื้อจุลชีพที่ไม่ได้บดละเอียดซึ่งอาจเป็นผลมาจากการบดละเอียดที่ทำให้การให้ความร้อนเป็นไปได้ทั่วถึงมากยิ่งขึ้น โดยผลจากการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของหัวเชื้อจุลชีพแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของหัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนและหลังการบำบัดด้วยความร้อน

พารามิเตอร์	ผลการวิเคราะห์		
	ก่อนการบำบัดด้วยความร้อน	หลังการบำบัดด้วยความร้อน	
		เม็ดตะกอนจุลินทรีย์	เม็ดตะกอนบดละเอียด
ซีไอดีทั้งหมด (มก./ล.)	70,230	67,150	61,875
เอ็มแอลวีเอสเอส (มก./ล.)	63,267	60,800	54,000
พีเอส	7.56	8.15	8.20

นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายในหัวเชื้อจุลินทรีย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนทั้งในหัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนและหลังการบำบัดด้วยความร้อนเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะโครงสร้างและแบคทีเรียที่พบ ซึ่งจะทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงภายในหัวเชื้อจุลินทรีย์ได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น พบว่ามีผลการศึกษาแบ่งตามหัวเชื้อจุลินทรีย์ก่อนและหลังการบำบัดด้วยความร้อนดังนี้คือ

1) ลักษณะของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองก่อนการบำบัดด้วยความร้อน

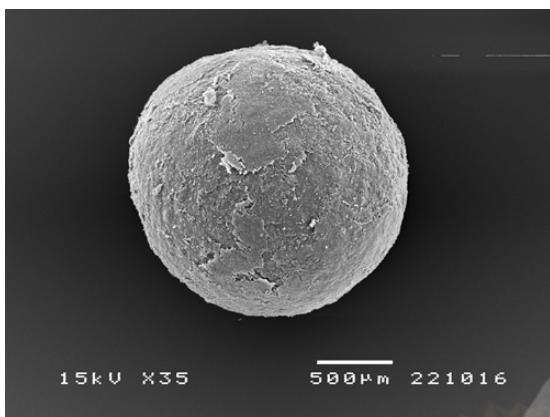
เมื่อทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน พบว่าเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองก่อนการบำบัดด้วยความร้อนมีลักษณะโครงสร้างทางกายภาพและกลุ่มของแบคทีเรียที่พบจากการส่องตรวจวัดตามบริเวณจุดต่างๆ ของเม็ดตะกอนดังนี้คือ

(1) **ผิวด้านนอก** เมื่อส่องเม็ดตะกอนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนที่กำลังขยาย 35 เท่า (500 ไมโครเมตร) พบว่าเม็ดตะกอนมีลักษณะกลม ผิวด้านนอกมีลักษณะค่อนข้างเรียบและยังไม่พบแบคทีเรียกลุ่มใดบริเวณพื้นผิวเนื่องจากกำลังขยายที่ใช้ยังมีค่าต่ำกว่าจะเห็นกลุ่มของแบคทีเรียได้ โดยมีลักษณะโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์แสดงดังรูปที่ 4.4 (ก) เมื่อใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (5 ไมโครเมตร) พบกลุ่มแบคทีเรียซึ่งมีรูปร่างแตกต่างกันหลายกลุ่ม เช่น แบคทีเรียกลุ่มเส้นใย (filamentous) แบคทีเรียรูปท่อน (rod shape) โดยพบทั้งที่มีลักษณะเป็นท่อนยาวและท่อนสั้นดังรูปที่ 4.4 (ข)

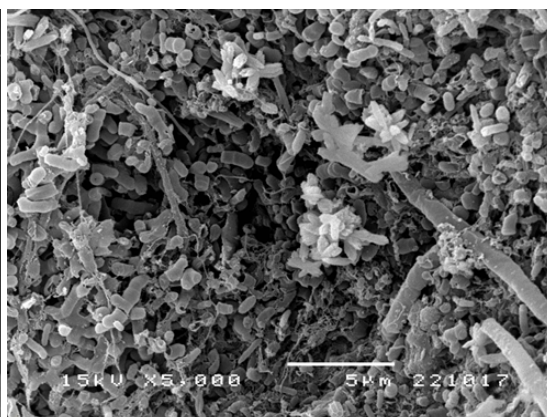
(2) โครงสร้างภายใน เมื่อนำเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มาผ่ากึ่งกลางตามแนวขวางแล้ว ต่อด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยาย 35 เท่า พบว่าโครงสร้างภายในของเม็ดตะกอนมีลักษณะเป็น ชั้นหลายชั้นติดต่อกันโดยมีความหนาแน่นค่อนข้างมากตลอดทั้งชั้นในและชั้นนอกของเม็ดตะกอน ดังรูปที่ 4.4 (ค) เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 5,000 เท่า พบว่าทั้งบริเวณผิวชั้นนอกและผิวชั้นในมี แบคทีเรียหลายกลุ่มอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น โดยมีแบคทีเรียกลุ่มเด่นคือ แบคทีเรียที่มีรูปร่างเป็นท่อน สั้นปลายเรียวและปลายตัด โดยมีแบคทีเรียรูปท่อนยาวและแบคทีเรียกลุ่มเส้นใยอาศัยอยู่บ้างเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.4 (ง) และ 4.4 (จ) โดยแบคทีเรียรูปท่อนยาวที่พบทั้งผิวด้านนอกและโครงสร้างภายในของ เม็ดตะกอนสันนิษฐานได้ว่าอาจจะเป็นแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนกลุ่มจีโนส *Methanosaeta* (Madigan และคณะ, 1997)



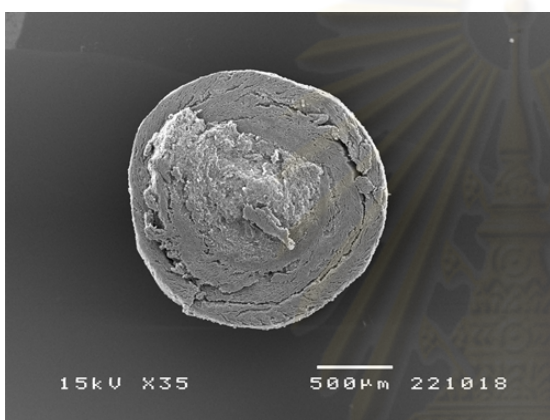
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



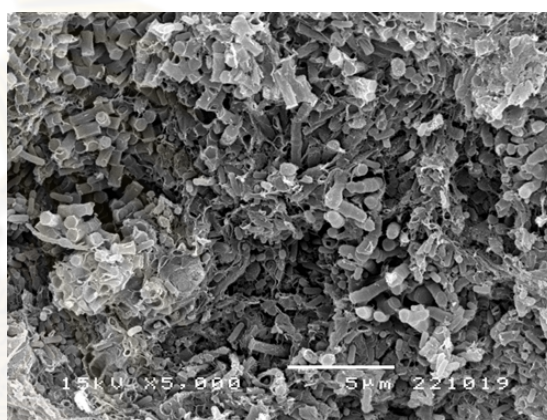
(ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 35 เท่า



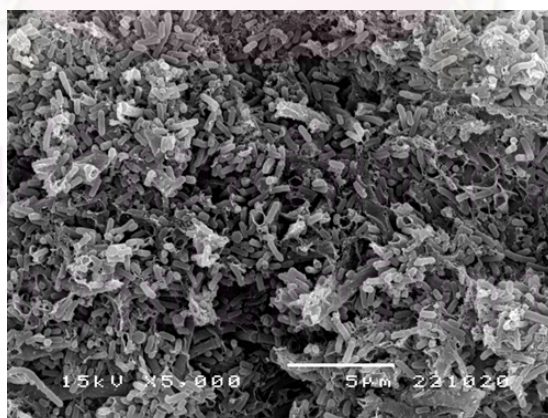
(ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงแบคทีเรียที่พบบริเวณผิวด้านนอกที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



(ค) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อผ่ากึ่งกลางตามแนวขวางที่กำลังขยาย 35 เท่า



(ง) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงแบคทีเรียที่พบบริเวณผิวด้านนอกเมื่อผ่ากึ่งกลางตามแนวขวางที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



(จ) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงแบคทีเรียที่พบบริเวณผิวด้านในเมื่อผ่ากึ่งกลางตามแนวขวางที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะ โครงสร้างและแบคทีเรียที่พบภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองก่อนการบำบัดด้วยความร้อน

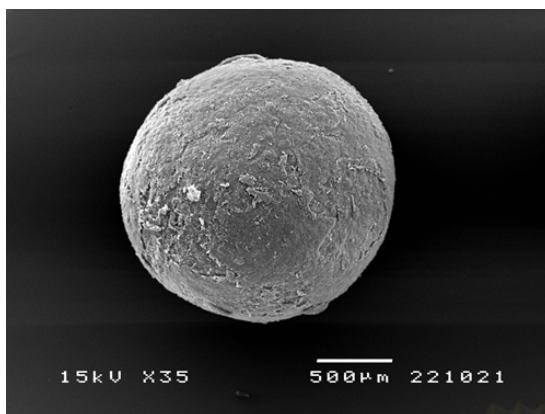
2) ลักษณะของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองหลังการบำบัดด้วยความร้อน

หลังจากการบำบัดด้วยความร้อนทิ้งไว้ในที่อุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 สัปดาห์ และนำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนโดยทำการศึกษาทั้งในเม็ดตะกอนที่มีการบดละเอียดและไม่มี การบดละเอียดก่อนการให้ความร้อน พบว่าเม็ดตะกอนที่ไม่มี การบดละเอียดมีลักษณะ โครงสร้างทางกายภาพและกลุ่มแบคทีเรียที่พบดังนี้

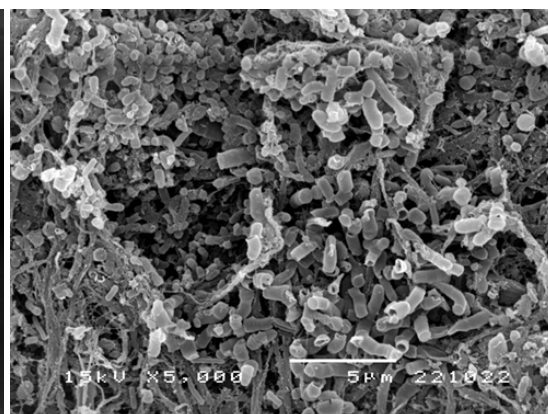
(1) **ผิวด้านนอก** เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนโดยใช้กำลังขยาย 35 เท่า พบว่ามีลักษณะโดยทั่วไปเป็นเช่นเดียวกันกับลักษณะของเม็ดตะกอนก่อนการบำบัดด้วยความร้อน คือมีลักษณะเป็นเม็ดกลม ผิวนเรียบ ดังรูปที่ 4.5 (ก) และเมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 5,000 เท่า พบว่ามีแบคทีเรียกลุ่มที่มีรูปร่างเป็นท่อนสั้นอาศัยอยู่ทั่วไป โดยพบซากของแบคทีเรียอยู่บ้างซึ่งสังเกตได้จากการมีลักษณะกลวงของโครงสร้างภายในของแบคทีเรียทั้งแบคทีเรียกลุ่มเส้นใยและกลุ่มท่อนยาวที่ คาดว่าอาจจะเป็นแบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทนกลุ่มจีส *Methanosaeta* ดังรูปที่ 4.5 (ข)

(2) **โครงสร้างภายใน** เมื่อนำเม็ดตะกอนจุลินทรีย์มาผ่ากึ่งกลางตามแนวขวางแล้วส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่ กำลังขยาย 35 เท่า พบว่ามีลักษณะโดยทั่วไปเป็นเช่นเดียวกันกับลักษณะของเม็ดตะกอนก่อนการบำบัดด้วยความร้อนดังรูปที่ 4.5 (ค) เมื่อเพิ่มกำลังขยายเป็น 5,000 เท่า พบว่ามีแบคทีเรียที่เป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นคือ แบคทีเรียรูปท่อนสั้นดังรูปที่ 4.5 (ง) ซึ่งจากลักษณะรูปร่างของแบคทีเรียคาดว่าอาจจะเป็นแบคทีเรียกลุ่มจีส *Clostridium* ซึ่งเป็นแบคทีเรียกลุ่มไม่ต้องการออกซิเจนที่มีรูปร่างเป็นท่อนและสามารถสร้างสปอร์ได้ (นันทนา อรุณฤกษ์, 2549) นอกจากนี้เมื่อศึกษาลักษณะโครงสร้างบริเวณผิวนั้นพบว่ามีแบคทีเรียกลุ่มไดอะซีตอยู่ โดยพบว่ามีเพียงซากของแบคทีเรียที่ คาดว่า จะเป็นแบคทีเรียกลุ่มไม่สร้างสปอร์ที่ตายแล้วเท่านั้นอันเป็นผลมาจากการให้ความร้อนดังรูปที่ 4.5 (จ)

สำหรับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่มีการบดละเอียดก่อนการให้ความร้อน พบว่ามีแบคทีเรียรูปท่อนสั้นที่คาดว่าอาจจะเป็นแบคทีเรียกลุ่มจีส *Clostridium* เป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นที่พบอยู่ โดยทั่วไปดังรูปที่ 4.6



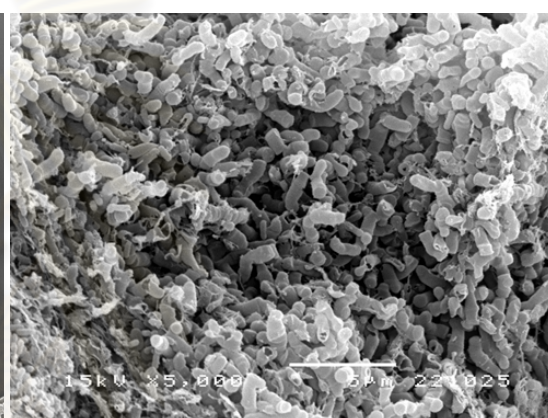
ก) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 35 เท่า



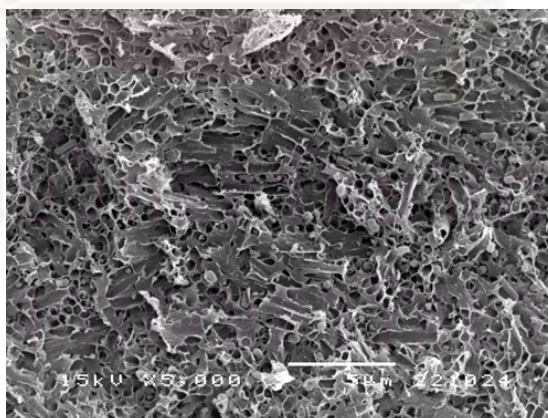
ข) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงแบคทีเรียที่พบบริเวณผิวด้านนอกที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



ค) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เมื่อผ่ากึ่งกลางตามแนวขวางที่กำลังขยาย 35 เท่า

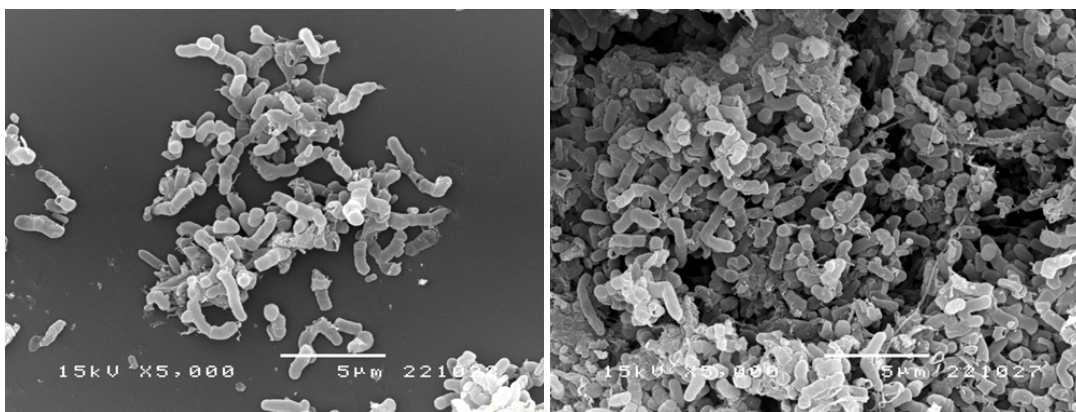


ง) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงแบคทีเรียที่พบบริเวณผิวด้านนอกเมื่อผ่ากึ่งกลางตามแนวขวางที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

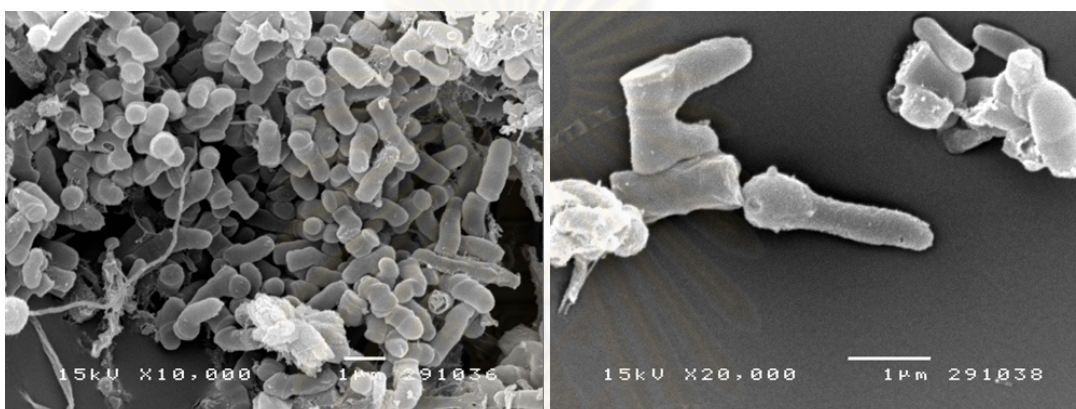


จ) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงแบคทีเรียที่พบบริเวณผิวด้านในเมื่อผ่ากึ่งกลางตามแนวขวางที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะ โครงสร้างและแบคทีเรียที่พบภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองภายหลังการบำบัดด้วยความร้อน



ก) (ซ้าย) และ ข) (ขวา) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงแบคทีเรียที่พบทั่วไปที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



ค) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงแบคทีเรียที่พบทั่วไปที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ง) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงแบคทีเรียที่พบทั่วไปที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแสดงลักษณะ โครงสร้างและแบคทีเรียที่พบภายในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองที่มีการบดละเอียดร่วมกับการบำบัดด้วยความร้อน

จากการศึกษาลักษณะ โครงสร้างภายในหัวเชื้อจุลินทรีย์และแบคทีเรียที่พบสามารถสรุปได้ว่า การบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาทีสามารถกำจัดแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนและแบคทีเรียที่ไม่สร้างสปอร์อื่นๆ ส่งผลทำให้แบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สามารถสร้างสปอร์ได้อย่างเช่น *Clostridium* กลายเป็นแบคทีเรียกลุ่มเด่นได้ นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบกับการบำบัดหัวเชื้อด้วยความร้อนในงานวิจัยอื่นๆ ซึ่งมีการใช้อุณหภูมิและเวลาแตกต่างกันตั้งแต่ 100-105 องศาเซลเซียส และ 30 นาที-5 ชั่วโมงตามลำดับ ดังตารางที่ 4.4 พบว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนในงานวิจัยนี้ถึงแม้จะมีการให้ความร้อนโดยใช้เวลาไม่มากนักแต่สามารถให้ประสิทธิภาพในการกำจัดแบคทีเรียที่ไม่ต้องการได้เช่นเดียวกันโดยไม่ต้องให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่าหรือใช้เวลาในการให้ความร้อนนานซึ่งจะทำให้ต้องสิ้นเปลืองพลังงานในการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.4 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์ด้วยความร้อนในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยใช้ระบบแบบไร้ออกซิเจนในงานวิจัยต่างๆ

อุณหภูมิ / เวลาในการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์	ชนิดของระบบ	ชนิดของชั้นสเตรท	สภาวะของระบบ		งานวิจัยอ้างอิง
			อุณหภูมิ	ค่าพีเอช	
- อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส / 30 นาที	ทีละเท	ข้าวบดเหลว	37	4.5	Fang และคณะ (2006)
- ต้มเดือด / 5 ชั่วโมง	ทีละเท	แป้งสาลี	37	7.0	Argun และคณะ (2008)
- อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส / 1 ชั่วโมง	ถังกรองสัมผัสแบบไร้ออกซิเจน	เปลือกขานุน	อุณหภูมิห้อง	5.1	Vijayaraghavan, Admad และ Ibrahim (2006)
- อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส / 15 นาที	ทีละเท / ถังปฏิกริยาแบบกวนสมบูรณ์ต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน	ขยะอินทรีย์	อุณหภูมิห้อง	5.5	งานวิจัยนี้

4.3 ผลการทดลองที่ 1 การศึกษาผลของร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสด

ในการทดลองที่ 1 นี้เป็นการศึกษาผลของร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสดโดยใช้การทดลองแบบทีละเท ซึ่งจะนำขยะอินทรีย์สังเคราะห์ที่เตรียมไว้มาเจือจางให้ได้ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นแตกต่างกัน 3 ค่าคือ ร้อยละ 2 3 และ 5 หรือ 20 30 และ 50 ก./ล. ตามลำดับ โดยจากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพพบว่ามีลักษณะต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และเนื่องจากขยะสังเคราะห์ที่ผ่านการเจือจางแล้วยังมีค่าซีโอดีที่ค่อนข้างสูง จึงต้องมีการเติมไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและเหล็กในการปรับอัตราส่วนของซีโอดี : ไนโตรเจน : ฟอสฟอรัส : เหล็ก ให้มีอัตราส่วนที่ต้องการคือ 100 : 5 : 1 : 0.33 เพื่อให้มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มไม่ต้องการออกซิเจน นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีและกายภาพของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้กล่าวมาแล้วจึงได้พิจารณาเลือกใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่มีการบดละเอียดร่วมกับบำบัดด้วยความร้อนมาใช้ในการทดลองเพื่อให้การควบคุมค่าพีเอชและสภาวะของหัวเชื้อจุลินทรีย์เป็นไปอย่างทั่วถึงและมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันมากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.5 ลักษณะสมบัติทางเคมีและกายภาพของขยะอินทรีย์สังเคราะห์ภายหลังจากการเจือจางให้มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ

พารามิเตอร์	ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้น		
	2	3	5
ปริมาณความชื้น (ร้อยละ โดยน้ำหนักเปียก)	97.60	96.50	94.10
ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ โดยน้ำหนักเปียก)	2.35	3.53	5.88
ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (ร้อยละ โดยน้ำหนักเปียก)	2.0	3.0	5.0
สัดส่วนของสารอินทรีย์	85.0	85.0	85.0
ปริมาณไนโตรเจน (ร้อยละ โดยน้ำหนักเปียก)	0.13	0.16	0.28
ปริมาณฟอสฟอรัส (ร้อยละ โดยน้ำหนักเปียก)	0.018	0.024	0.039
ปริมาณเหล็ก (ร้อยละ โดยน้ำหนักเปียก)	≤ 0.001	≤ 0.001	≤ 0.001
ซีไอดีทั้งหมด (มก./ล.)	46,875	54,375	69,375
ซีไอดีกรอง (มก./ล.)	16,875	21,375	38,438
ค่าพีเอช	4.87	4.88	5.03

สำหรับผลการทดลองในการทดลองที่ 1 แสดงผลการทดลองแยกตามชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้เพื่อพิจารณาเลือกร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่องในการทดลองที่ 2 ต่อไป ซึ่งจากการศึกษาผลของร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นทั้ง 3 ค่าพบว่ามีการศึกษาดังนี้คือ

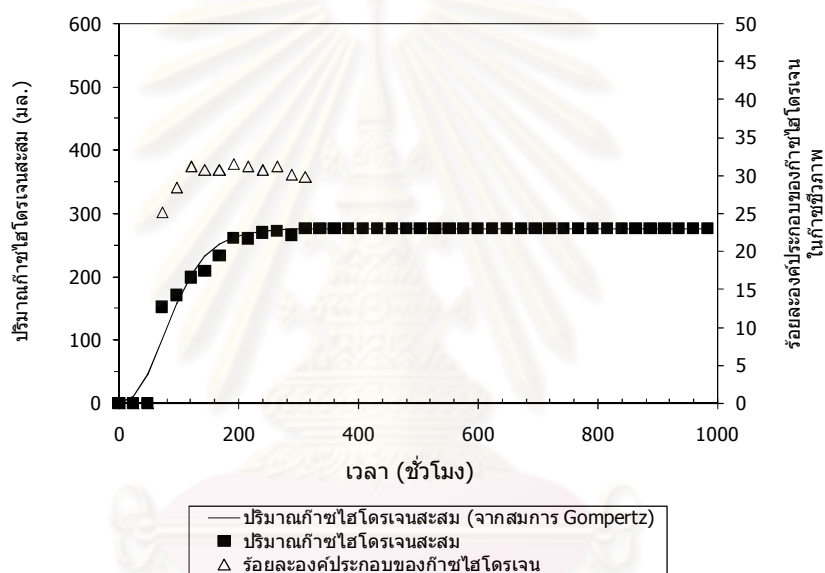
4.3.1 ชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2

ผลการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่วงที่มีการผลิตก๊าซชีวภาพและภายหลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพในชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2 พบว่าชุดการทดลองนี้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพนับจากเริ่มต้นการทดลองได้เป็นเวลา 312 ชั่วโมงหรือเท่ากับ 13 วัน ซึ่งจากกราฟที่ได้จากสมการ Gompertz พบว่าที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2 มีช่วง lag time ที่เบคทีเรียใช้ในการปรับตัวก่อนการย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตก๊าซชีวภาพเป็นเวลา 30.5 ชั่วโมง โดยมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2.5 มล./ชั่วโมง และมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดเท่ากับ 276.5 มล. ดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนและค่าที่ได้จากกราฟ ที่สร้างจากสมการ Gompertz ที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนโดยเฉลี่ย	ค่าที่ได้จากกราฟ			R ²
		ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุด (มล.)	อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (มล./ชม.)	ช่วง lag phase (ชม.)	
921.2	30.1	276.5	2.5	30.5	0.9736

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมและร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจน



รูปที่ 4.7 กราฟที่ได้จากสมการ Gompertz และร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนในแก๊สชีวภาพของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2

เมื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดมลสารภายในถังหมักในส่วน of ค่าซีโอดี พบว่ามีค่าที่ค่อนข้างผันแปรและไม่มีความสัมพันธ์กับเวลาและการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของชุดการทดลอง ซึ่งอาจเนื่องมาจากการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยการหมักแบบไร้ออกซิเจนเป็นผลมาจากการสร้างกรดในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน จึงทำให้มีการลดลงของค่าซีโอดีเพียงเล็กน้อยประกอบกับการใช้การทดลองแบบที่ละเทจึงเป็นผลทำให้ผลการทดลองไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดีได้อย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Van Ginke, Oh และ Logan (2005) ซึ่งทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารและน้ำเสียชุมชนโดยใช้การทดลองแบบที่ละเทที่พบว่าค่าซีโอดีไม่มีความสัมพันธ์กับก๊าซ

ไฮโดรเจนที่ผลิตได้ของชุดการทดลองและยังพบว่าค่าซีไอดีที่วิเคราะห์ได้บางส่วนเป็นผลมาจากสารบางชนิดที่แบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายได้อีกด้วย ทั้งนี้ค่าซีไอดีบางส่วนยังอาจเป็นผลมาจากหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่มีปริมาณมากจึงทำให้มีบางส่วนที่ออกมาพร้อมกับตัวอย่างน้ำเสียที่นำมาวิเคราะห์ผลการทดลองในส่วนของปริมาณของแฉะทั้งหมดพบว่ามีค่าลดลงเพียงเล็กน้อยในช่วงที่มีการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดเท่ากับ 5.51 ซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณของแฉะที่น้อยกว่าในชุดการทดลองอื่นๆ ทำให้ไม่สามารถสังเกตผลได้อย่างชัดเจน สำหรับปริมาณของแฉะระเหยได้ทั้งหมดพบว่ามีค่าลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดลอง โดยปริมาณของแฉะระเหยได้ทั้งหมดมีค่าลดลงจาก 37,100 มก./ล. ก่อนเริ่มต้นการทดลองเหลือ 21,350 มก./ล. หลังจากการผลิตก๊าซชีวภาพยุติลงหรือมีประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแฉะระเหยได้ทั้งหมดเท่ากับ 15.75 และหลังจากนั้นพบว่าปริมาณของแฉะระเหยได้ทั้งหมดมีปริมาณที่ค่อนข้างผันแปรและไม่มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในช่วงวันที่ 30-41 ของการทดลอง ซึ่งการที่ของแฉะระเหยได้ทั้งหมดมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดลองที่มีการผลิตก๊าซเกิดขึ้นนั้นเนื่องมาจากการที่แบคทีเรียภายในระบบได้มีการนำสารอินทรีย์ในส่วนที่สามารถย่อยสลายได้ง่ายมาใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพทำให้ปริมาณของแฉะระเหยได้ทั้งหมดภายในถังหมักลดลง ส่วนสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากที่เหลืออยู่ภายในถังหมักที่ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายมากขึ้นจะถูกแบคทีเรียย่อยสลายในเวลาต่อมา และในการย่อยสลายขั้นสุดของบางชนิดแบคทีเรียยังต้องมีการปรับตัวให้สามารถนำสารอินทรีย์ส่วนดังกล่าวไปใช้อีกด้วย นอกจากนี้จากผลการทดลองจะเห็นว่าค่าของแฉะระเหยได้ทั้งหมดสำหรับการทดลองนี้สามารถบอกถึงแนวโน้มของการกำจัดมลสารภายในระบบได้ดีกว่าค่าซีไอดี เนื่องจากค่าซีไอดีเป็นผลมาจากสารที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ด้วยโพแทสเซียมไดโครเมตซึ่งจะรวมไปถึงส่วนที่แบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายได้ด้วย ดังนั้นค่าของแฉะระเหยได้ทั้งหมดจึงเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์สำหรับขยะอินทรีย์ในการทดลองนี้ได้ดีกว่าค่าซีไอดี

ผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายและสภาพต่างทั้งหมด พบว่ากรดไขมันระเหยง่ายมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายของขยะก่อนเริ่มต้นการทดลอง (2,542 มก./ล. กรดอะซิติก) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3,636 มก./ล. กรดอะซิติก ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์และสร้างกรดของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดภายในระบบ สำหรับสภาพต่างทั้งหมดนั้นพบว่ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามระยะเวลาของการทดลองและมีค่าสูงกว่าสภาพต่างทั้งหมดในขยะก่อนเริ่มต้นการทดลอง (2,083 มก./ล. หินปูน) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3,137 มก./ล. หินปูน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเติมสารเคมีประเภทต่างเพิ่มเข้าไปในระบบเพื่อควบคุมค่าพีเอชในระหว่างการทดลอง สำหรับผลการศึกษาพารามิเตอร์ที่ใช้ในการตรวจสอบสถานะการทำงานของระบบอื่นๆ ในส่วนของค่าพีเอชในระบบพบว่าค่าพีเอชโดยเฉลี่ยในขณะที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียมีค่าเท่ากับ 5.48 ซึ่งลดต่ำลงเล็กน้อยจึงได้ทำการเติมด่างเพิ่มเข้า

ไปในระบบเพื่อให้มีค่าพีเอชเท่ากับค่าที่ควบคุมคือ ค่าพีเอชเท่ากับ 5.5 และในส่วนของอุณหภูมิภายในระบบพบว่ามีอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำที่ใช้อ้างอิงเล็กน้อย โดยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ในชุดการทดลองนี้แสดงดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.7 สรุปค่าที่ได้จากการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ในชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2

พารามิเตอร์	ก่อนเริ่มต้นการทดลอง ^ก (มก./ล.)	ปริมาณหลังการทดลอง (มก./ล.)		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด	
		หลังการผลิตก๊าซชีวภาพ	สิ้นสุดการทดลอง	หลังการผลิตก๊าซชีวภาพ	สิ้นสุดการทดลอง
ซีโอดีทั้งหมด	49,697	37,500	32,000	24.54	35.61
ซีโอดีกรองของแข็งทั้งหมด	14,545	11,250	14,667	22.66	NA ^ข
ของแข็งทั้งหมด	52,600	49,700	46,200	5.51	12.17
ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด	37,100	21,350	22,900	15.75	NA
กรดไขมันระเหยง่าย ^ค (มก./ล. กรดอะซิติก)	2,542	3,636		-	-
สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล. หินปูน)	2,083	3,137		-	-
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ^ง	33.00	32.88		-	-
ค่าพีเอช	5.50	5.48		-	-

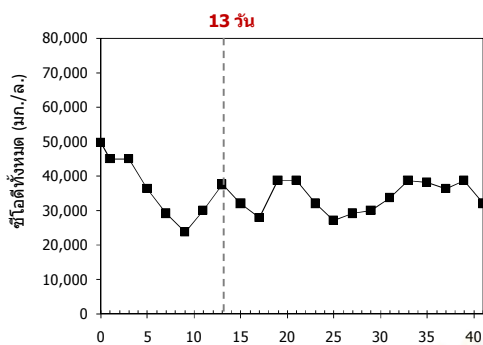
หมายเหตุ:

^ก ขยะอินทรีย์สังเคราะห์+หัวเชื้อจุลินทรีย์ ; ^ข ไม่สามารถวิเคราะห์ได้

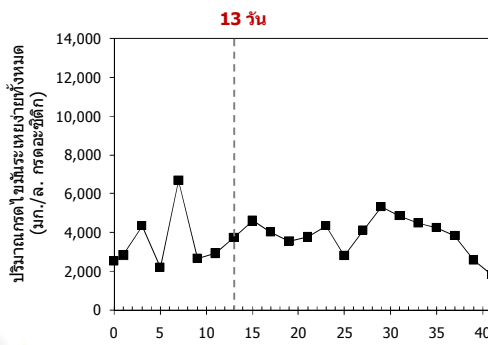
^ค ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย สภาพต่างทั้งหมด อุณหภูมิและค่าพีเอชแสดงเป็นค่าเฉลี่ยตั้งแต่เริ่มต้นการทดลองจนถึงสิ้นสุดการทดลอง

^ง อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิของน้ำอ้างอิงโดยเฉลี่ยเท่ากับ 33.29 และ 31.35 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

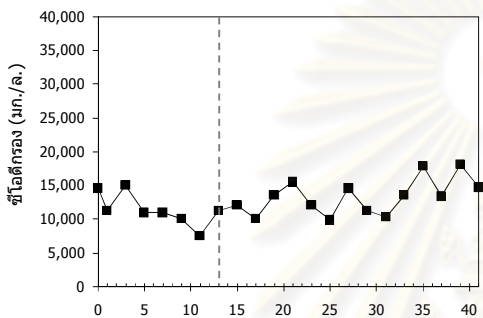
ซีไอดีทั้งหมด



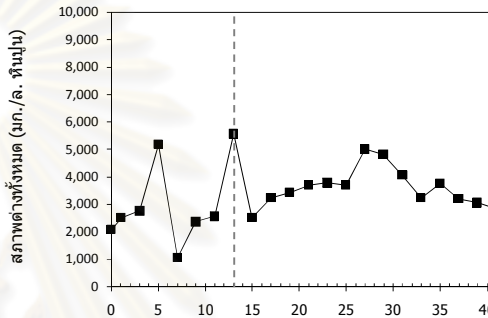
กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด



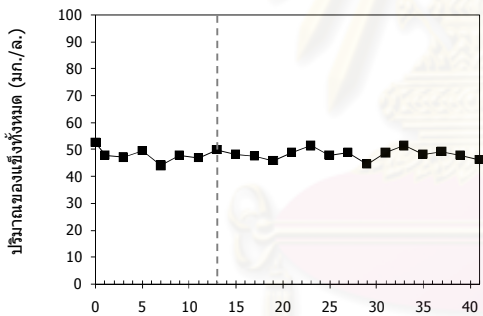
ซีไอดีกรอง



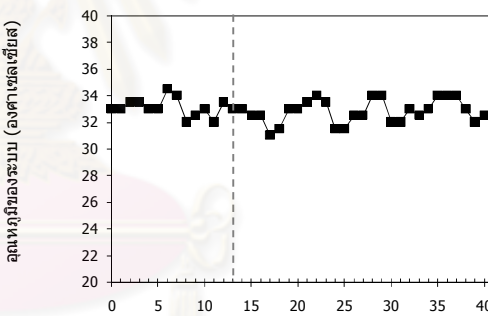
สภาพต่างทั้งหมด



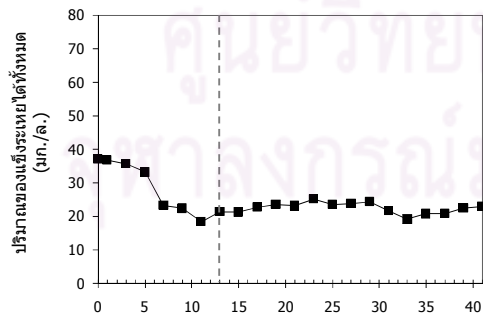
ของแข็งทั้งหมด



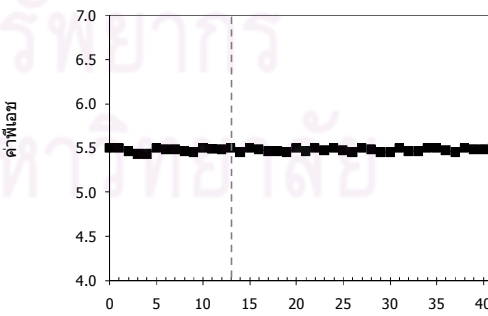
อุณหภูมิ



ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด



ค่าพีเอช



เวลา (วัน)

รูปที่ 4.8 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2

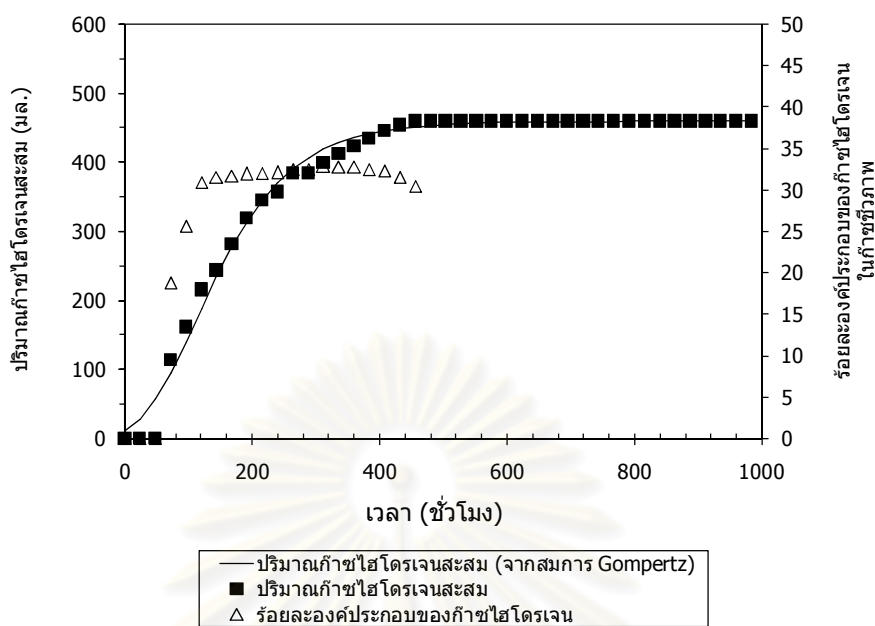
4.3.2 ชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3

ผลการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ในชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3 พบว่ามีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมเท่ากับ 459.7 มล. ซึ่งมีปริมาณที่สูงกว่าชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2 และยังมีช่วง lag time ก่อนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สั้นกว่าอีกด้วยโดยพบว่ามีค่าเท่ากับ 25.7 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการมีสภาวะที่เหมาะสมของระบบจึงมีผลทำให้แบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตและย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว แต่การย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตก๊าซไฮโดรเจนในชุดการทดลองนี้กลับเป็นไปอย่างช้าๆ โดยมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2.0 มล./ชั่วโมง ซึ่งมีค่าต่ำกว่าชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2 แสดงให้เห็นว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ไม่มีความสัมพันธ์กับอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของชุดการทดลอง เมื่อรวมระยะเวลาตั้งแต่เริ่มต้นการทดลองจนถึงเมื่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนยุติลงของชุดการทดลองนี้พบว่ามีค่าเท่ากับ 456 ชั่วโมงหรือเท่ากับ 19 วัน โดยผลการทดลองในส่วนของก๊าซชีวภาพแสดงดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.8 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนและค่าที่ได้จากกราฟที่สร้างจากสมการ Gompertz ที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนโดยเฉลี่ย	ค่าที่ได้จากกราฟ			R ²
		ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุด (มล.)	อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (มล./ชม.)	ช่วง lag phase (ชม.)	
1,489.2	30.9	459.7	2.0	25.7	0.9902

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมและร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจน



รูปที่ 4.9 กราฟที่ได้จากสมการ Gompertz และร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดมลสาร ในส่วนของค่าซีโอดีพบว่า มีลักษณะเช่นเดียวกับชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2 โดยมีค่าที่ค่อนข้างผันแปรและไม่มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น สำหรับปริมาณของแข็งทั้งหมดพบว่ามีปริมาณลดลงในช่วงที่มีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและลดลงอีกเล็กน้อยจนเกือบคงที่ในเวลาต่อมา โดยมีประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข็งทั้งหมดตั้งแต่เริ่มต้นการทดลองจนถึงเมื่อการผลิตก๊าซชีวภาพยุติลงเท่ากับ 26.94 ซึ่งมีค่าสูงกว่าในชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2 สำหรับปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมดพบว่ามีปริมาณลดลงตามระยะเวลาของการทดลอง โดยมีประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข็งระเหยได้เท่ากับร้อยละ 30.60

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายและสภาพต่างทั้งหมดในชุดการทดลองนี้พบว่าการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกับชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2 โดยมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นจากปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายและสภาพต่างทั้งหมดในขณะก่อนเริ่มต้นการทดลอง โดยกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5,188 มก./ล. กรดอะซิติก เป็น 6,730 มก./ล. กรดอะซิติก (โดยเฉลี่ย) และสภาพต่างทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 2,067 มก./ล. หินปูน เป็น 3,779 มก./ล. หินปูน (โดยเฉลี่ย) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพีเอชมีค่าลดลงและอุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นจากชุดการทดลองที่มีร้อยละความ

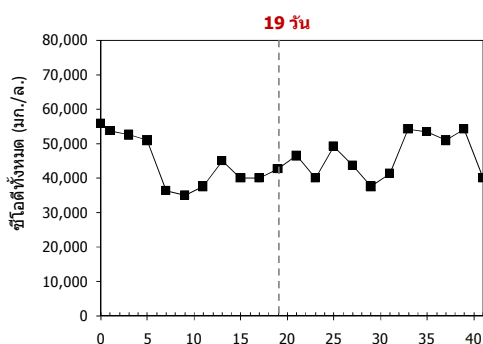
เข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2 เล็กน้อยโดยมีค่าเท่ากับ 33.07 และ 5.47 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่มีค่าสูงและเกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมที่เพิ่มขึ้นของแบคทีเรียภายในระบบ โดยผลการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.9 สรุปค่าที่ได้จากการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ในชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3

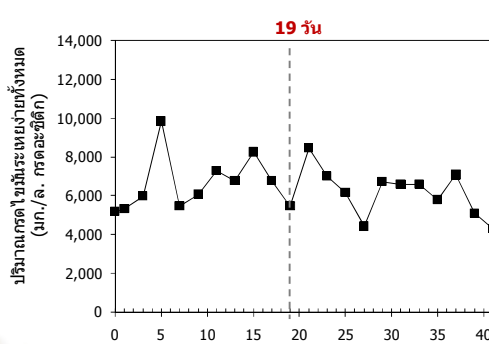
พารามิเตอร์	ก่อนเริ่มต้น การทดลอง (มก./ล.)	ปริมาณหลังการทดลอง (มก./ล.)		ประสิทธิภาพ ร้อยละการกำจัด	
		หลังการผลิต ก๊าซชีวภาพ	สิ้นสุดการ ทดลอง	หลังการผลิต ก๊าซชีวภาพ	สิ้นสุดการ ทดลอง
ซีโอดีทั้งหมด	55,758	42,581	32,000	23.63	28.26
ซีโอดีกรอง	18,182	17,419	21,333	4.19	NA
ของแข็งทั้งหมด	65,770	48,050	41,000	26.94	37.66
ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด	48,630	33,750	32,700	30.60	32.76
กรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. กรดอะซิติก)	5,188	6,730		-	-
สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล. หินปูน)	2,067	3,779		-	-
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	33.00	33.07		-	-
ค่าพีเอช	5.50	5.47		-	-

ศูนย์วิทยาศาสตร์พยากรณ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

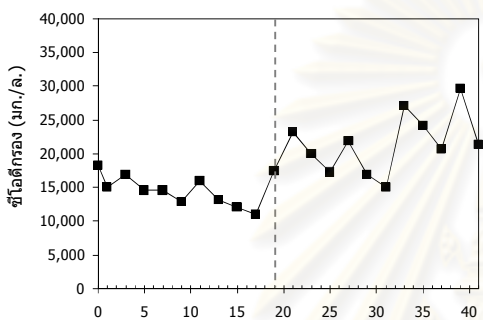
ชีโอดีทั้งหมด



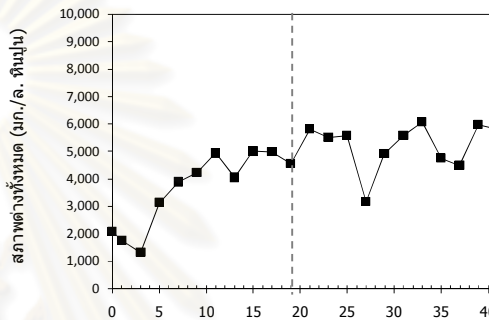
กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด



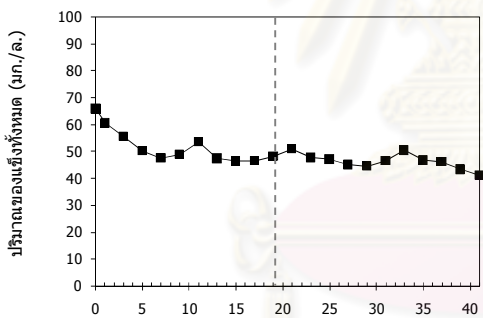
ชีโอดีกรอง



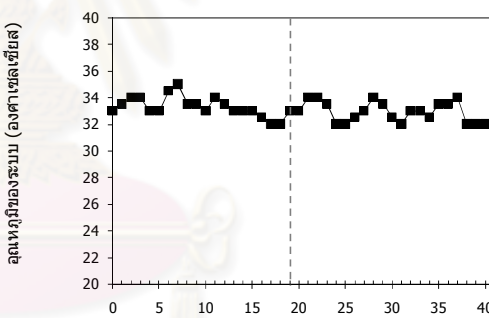
สภาพต่างทั้งหมด



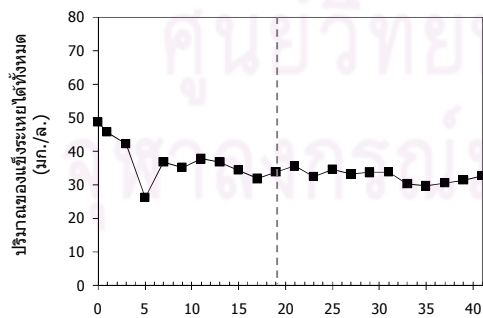
ของแข็งทั้งหมด



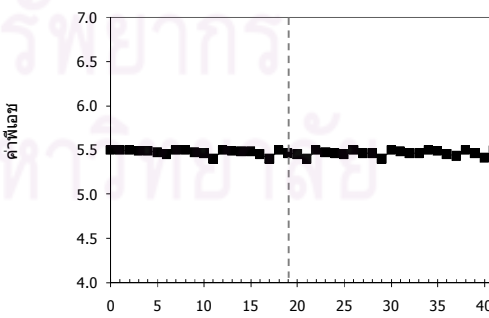
อุณหภูม



ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด



ค่าพีเอช



เวลา (วัน)

รูปที่ 4.10 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3

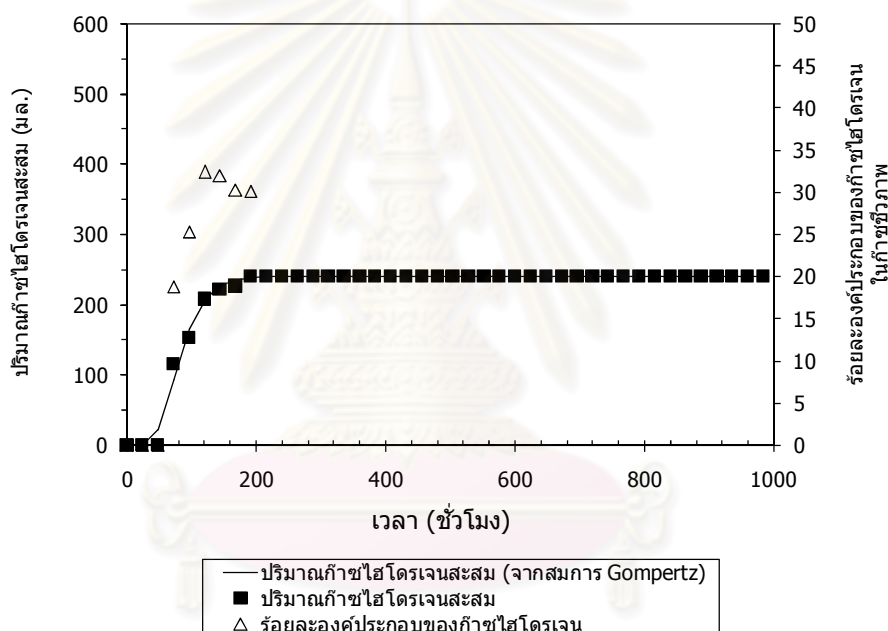
4.3.3 ชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 5

ผลการศึกษาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 5 พบว่าชุดการทดลองที่ความเข้มข้นนี้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เพียง 192 ชั่วโมงหรือเท่ากับ 8 วัน โดยมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมเท่ากับ 240.9 มล. และมีช่วง lag time ก่อนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 44.8 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.11 ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าในชุดการทดลองอื่นๆ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่มีความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นภายในระบบที่สูงมากเกินไป ทำให้แบคทีเรียต้องมีการปรับตัวเพื่อให้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตก๊าซชีวภาพ โดยเมื่อสามารถปรับตัวได้แล้วพบว่าเมื่ออัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สูงกว่าในชุดการทดลองอื่นๆ โดยมีค่าเท่ากับ 3.4 มล./ชั่วโมง ก่อนที่การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะยุติลงในวันที่ 9 ของการทดลอง จากการที่ชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นนี้มีช่วง lag time ที่นานแต่มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ต่ำถึงแม้ว่าจะมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ ก็ตาม ผลการทดลองดังกล่าวช่วยยืนยันผลการทดลองที่ได้จากชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3 ที่ว่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนไม่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถแสดงถึงผลของความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นที่มีต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้อีกด้วย โดยการมีความเข้มข้นของซับสเตรทที่สูงเกินไปจะทำให้แบคทีเรียภายในระบบจะต้องมีการปรับตัวให้ทนต่อความเข้มข้นของซับสเตรทเพื่อให้สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์และนำสารอินทรีย์ในซับสเตรทดังกล่าวไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ แต่การปรับตัวในลักษณะนี้แบคทีเรียจะสามารถทนได้เพียงระยะเวลาหนึ่งเท่านั้นเนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายและสร้างกรดบางชนิดจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ผลการทดลองนี้มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Argun และคณะ (2008) และงานวิจัยของ Lin และคณะ (2008) ที่ทำการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้การทดลองแบบทีละเท ซึ่งพบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของซับสเตรทที่เพิ่มขึ้นจนถึงความเข้มข้นหนึ่ง หลังจากนั้นเมื่อความเข้มข้นของซับสเตรทเพิ่มสูงขึ้นอีกจะมีผลทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ลดลง และนอกจากนี้เมื่อความเข้มข้นของซับสเตรทมีค่าสูงมากเกินไปจะมีผลทำให้ช่วง lag time ก่อนการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 4.10 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนและค่าที่ได้จากกราฟ ที่สร้างจากสมการ Gompertz ที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 5

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)	ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนโดยเฉลี่ย	ค่าที่ได้จากกราฟ			R ²
		ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุด (มล.)	อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (มล./ชม.)	ช่วง lag phase (ชม.)	
812.2	28.1	240.9	3.4	44.8	0.9927

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมและร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจน



รูปที่ 4.11 กราฟที่ได้จากสมการ Gompertz และร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจน ในก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 5

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในชุดการทดลองนี้ พบว่าค่าซีไอดีทั้งหมดมีค่าลดลงตามระยะเวลาการทดลอง ส่วนค่าซีไอดีกรอนั้นพบว่าไม่มีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการทดลองและปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 3 สำหรับปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยได้ทั้งหมดพบว่ามีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการทดลองที่มีการผลิตก๊าซเกิดขึ้นก่อนที่จะมีปริมาณที่ลดลงเล็กน้อยจนเกือบคงที่ในเวลาต่อมา โดยมีประสิทธิภาพร้อยละ

การกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยได้ทั้งหมดในช่วงที่มีการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 40.47 และ 44.78 ตามลำดับ

จากการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายและสภาพต่างทั้งหมดในระบบพบว่า มีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายและสภาพต่างทั้งหมดในขณะอินทรีย์สังเคราะห์ก่อน เริ่มต้นการทดลองและมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ตลอดระยะเวลาการทดลองดังรูปที่ 4.12 ซึ่ง ถึงแม้ว่าจะมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสูงแต่กลับพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายดังกล่าวไม่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งอาจเนื่องมาจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนถูกยับยั้งจากปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่มีค่าสูงมากเกินไป โดยอาจสันนิษฐานได้ว่า กรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นอาจเป็นกรดโพโรไฟโอนิกซึ่งเกิดได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ดัง สมการที่ 4.1 ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะไม่มีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้น

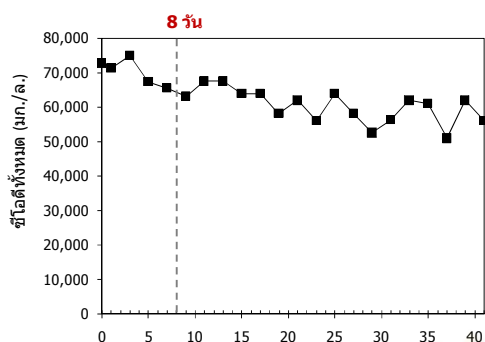


สำหรับค่าพีเอชและอุณหภูมิภายในถังหมักของชุดการทดลองนี้พบว่าค่าพีเอชมีค่าลดต่ำลง และอุณหภูมิมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 3 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.46 และ 33.17 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

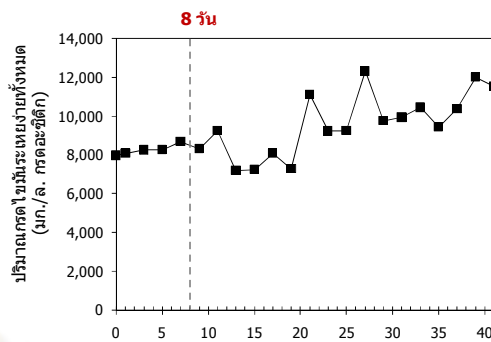
ตารางที่ 4.11 สรุปค่าที่ได้จากการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ในชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 5

พารามิเตอร์	ก่อนเริ่มต้น การทดลอง (มก./ล.)	ปริมาณหลังการทดลอง (มก./ล.)		ประสิทธิภาพ ร้อยละการกำจัด	
		หลังการผลิต ก๊าซชีวภาพ	สิ้นสุดการ ทดลอง	หลังการผลิต ก๊าซชีวภาพ	สิ้นสุดการ ทดลอง
ชีโอดีทั้งหมด	72,727	63,125	56,000	13.20	23.00
ชีโอดีกรอง	29,091	25,000	24,000	14.06	17.50
ของแข็งทั้งหมด	86,730	52,250	47,400	40.47	46.16
ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด	68,550	37,850	33,670	44.78	50.89
กรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. กรดอะซิติก)	7,859	8,334		-	-
สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล. หินปูน)	2,394	4,553		-	-
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	33.00	33.17		-	-
ค่าพีเอช	5.50	5.46		-	-

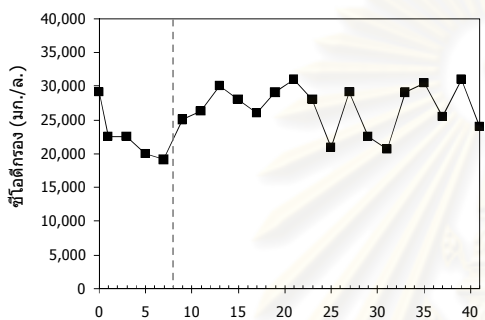
ชีโอดีทั้งหมด



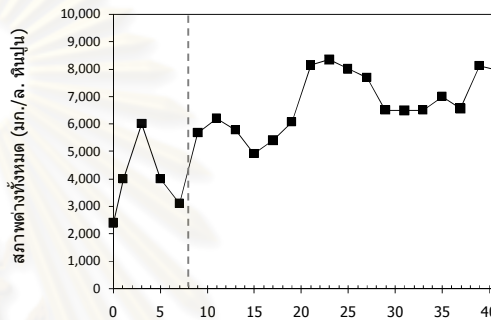
กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด



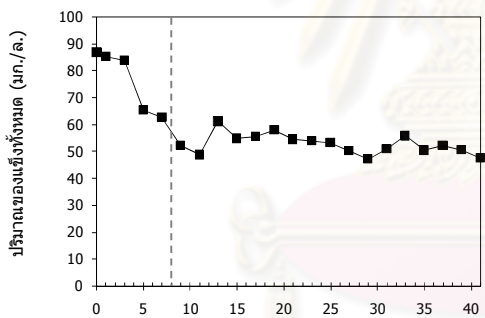
ชีโอดีกรอง



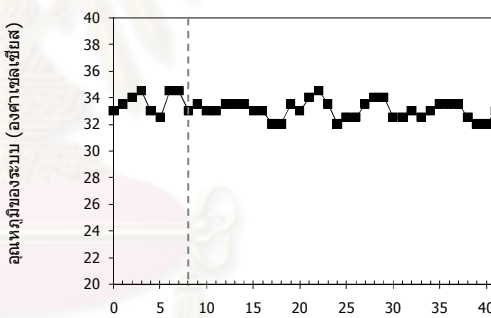
สภาพต่างทั้งหมด



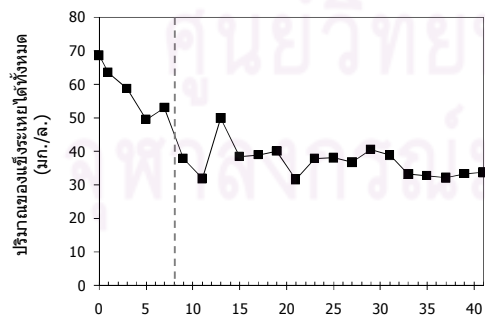
ของแข็งทั้งหมด



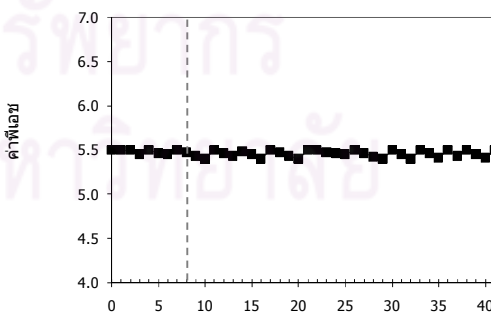
อุณหภูมิ



ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด



ค่าพีเอช



เวลา (วัน)

รูปที่ 4.12 ผลการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 5

4.3.4 เปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ

ในการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาผลของร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสดที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ จากผลการศึกษาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนรวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ต่างๆ ในชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างกันตั้งแต่ร้อยละ 2-5 พบว่าชุดการทดลองที่มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นสูงสุดคือ ชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3 ซึ่งมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดในทุกชุดการทดลองโดยมีค่าเท่ากับ 459.7 มล. ในขณะที่ชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2 และ 5 มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมเท่ากับ 276.5 มล. และ 240.9 มล. ตามลำดับ เมื่อคิดเป็นไฮโดรเจนยิลด์พบว่าที่ชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2 3 และ 5 มีไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 13.8 15.3 และ 4.8 มล.ไฮโดรเจน/ก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่เข้าระบบ หรือเมื่อพิจารณาจากค่าซีโอดีพบว่า มีค่าเท่ากับ 5.56 8.24 และ 3.31 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีโอดีทั้งหมดที่เข้าระบบ ตามลำดับ โดยแต่ละชุดการทดลองมีร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกันโดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 28.1-30.9 ดังรูปที่ 4.13 สำหรับจากการหาช่วง lag time ที่ได้จากกราฟที่สร้างจากสมการ Gompertz พบว่าชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3 มีช่วง lag time สั้นที่สุดในทุกชุดการทดลองโดยมีค่าเท่ากับ 25.7 ชั่วโมง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการมีสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียส่งผลให้แบคทีเรียสามารถปรับตัวและผลิตก๊าซจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว ค่าที่ได้จากกราฟที่สร้างจากสมการ Gompertz และไฮโดรเจนยิลด์ที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ ดังรูปที่ 4.14

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในส่วนของค่าซีโอดีโดยสรุปพบว่าชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 2 มีประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีโอดีสูงสุด โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีทั้งหมดและซีโอดีกรองเท่ากับร้อยละ 24.54 และ 22.66 ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยได้พบว่าชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 5 มีประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยได้สูงสุด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 40.47 และ 44.78 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการศึกษาที่ได้จากชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นแตกต่างกันทั้ง 3 ค่านั้น เมื่อพิจารณาในแง่ของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากขยะอินทรีย์ในการทดลองนี้จะเห็นได้ชัดว่าชุดการทดลองที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้

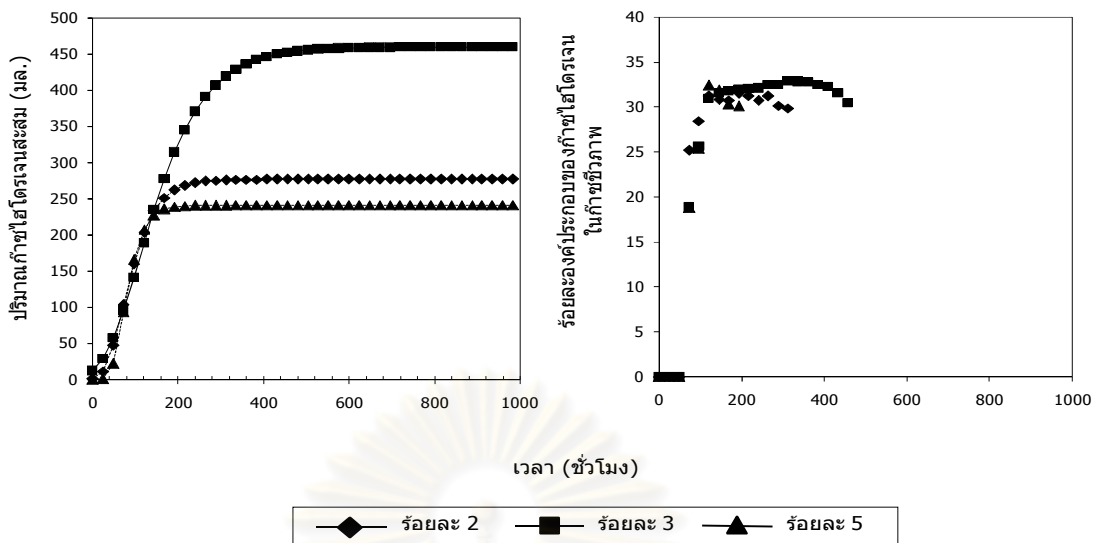
เริ่มต้นเท่ากับ 3 มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและไฮโดรเจนยิลด์ต่อหน่วยของซับสเตรตที่ผลิตได้สูงสุด ดังนั้นจึงทำให้สามารถสรุปได้ว่า ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสดโดยใช้การทดลองแบบที่ละเท ในการทดลองนี้คือ ที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เท่ากับ 3 ซึ่งในการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้ระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนในการทดลองที่ 2 จะใช้ขยะอินทรีย์สังเคราะห์ที่มีร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3 ในการทดลองต่อไป

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซไฮโดรเจน ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนและค่าที่ได้จากกราฟที่สร้างจากสมการ Gompertz ที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ

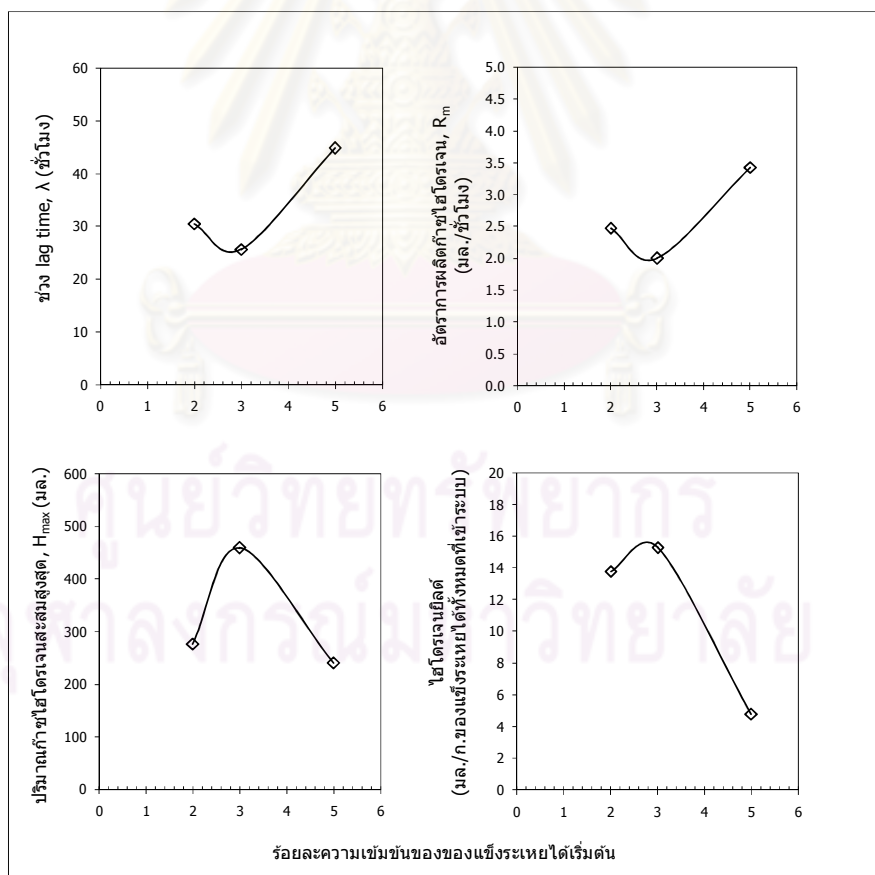
ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด	ค่าที่ได้จากกราฟ			R ²
	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุด (มล.)	อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (มล./ชม.)	ช่วง lag phase (ชม.)	
2	276.5	2.5	30.5	0.9736
3	459.7	2.0	25.7	0.9902
5	240.9	3.4	44.8	0.9927

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบไฮโดรเจนยิลด์ที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ

ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้ทั้งหมด	ก๊าซชีวภาพต่อกรัมของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด)	ไฮโดรเจนยิลด์ต่อซับสเตรตที่เข้าระบบ		
		ก๊าซไฮโดรเจนต่อกรัมของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด)	มิลลิโมลไฮโดรเจนต่อกรัมของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (มิลลิโมล/ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด)	ก๊าซไฮโดรเจนต่อกรัมชีโอดีทั้งหมด (มล./ก.ชีโอดีทั้งหมด)
2	46.1	13.8	0.56	5.56
3	49.6	15.3	0.62	8.24
5	16.2	4.80	0.19	3.31



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมและร้อยละองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าที่ได้จากกราฟที่สร้างจากสมการ Gompertz และไฮโดรเจนยิลด์ของชุดการทดลองที่ร้อยละความเข้มข้นของของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ

จากผลการศึกษาปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลองนี้เมื่อเปรียบเทียบกับ การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากของเสียประเภทต่างๆ ในงานวิจัยอื่น พบว่ามีปริมาณที่ไม่สูงมากนัก เนื่องจากปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบของชั้นสเตรท ก่อนข้างมาก โดยชั้นสเตรทที่มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบจะมีความเหมาะสมในการ เจริญเติบโตของแบคทีเรียเนื่องจากสามารถย่อยสลายและนำไปใช้ได้ง่ายกว่าชั้นสเตรทชนิดอื่นจึง ทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีค่าสูง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับของเสียประเภท เศษผักหรือของเสียที่มีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในงานวิจัยอื่นพบว่ามีค่าสูงกว่า ดังตารางที่ 4.14 ซึ่งอาจจะเป็นผลมาจากค่าพีเอชของชุดการทดลองที่มีค่าแตกต่างกัน โดยค่าพีเอชที่ต่ำหรือสูงเกินไปจะส่งผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ ทั้งนี้ค่าพีเอชเท่ากับ 5.5 ในการทดลองนี้ น่าจะมีความ เหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากขยะประเภทนี้

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดที่ได้จากของเสียชนิดต่างๆ จากการทดลองแบบทีละ เทและใช้หัวเชื้อจุลชีพแบบผสม

ชนิดของเสีย / ชั้นสเตรท	สภาวะการทดลอง		ร้อยละ องค์ประกอบ ของก๊าซ ไฮโดรเจน	ไฮโดรเจนยิลด์	งานวิจัยอ้างอิง
	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าพีเอช			
เศษอาหาร	36	5.5	- ⁿ	100 มล./ก.ซีโอดี	Chen และคณะ (2006)
เซลลูโลส	26	6.0	- ⁿ	0.02 มิลลิโมล/ ก.เซลลูโลส	Logan, Oh และ Van Ginkel (2002)
หญ้าเลี้ยงสัตว์	35	4.9-5.0	6-23	4 มล./ก.ของแข็ง ระบายได้ทั้งหมด	Pakarinen และ คณะ (2008)
ขยะอินทรีย์	40	6.0	40-50	13 มล./ก.ของของแข็ง ระบายได้ทั้งหมด	Chou และคณะ (2008)
ขยะอินทรีย์ จากตลาดสด	อุณหภูมิห้อง ^ข	5.5	28.1-30.9	8.24 มล./ก.ซีโอดี, 0.62 มิลลิโมล/ ก.ของของแข็งระบาย ได้ทั้งหมด, 15.3 มล./ก.ของ ของแข็งระบายได้ ทั้งหมด	งานวิจัยนี้

หมายเหตุ: ⁿ ไม่มีข้อมูล; ^ข อุณหภูมิโดยเฉลี่ยเท่ากับ 33.17 องศาเซลเซียส

4.4 ผลการทดลองที่ 2 การศึกษาผลของเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสด

การทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาผลของเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยใช้การทดลองต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนแตกต่างกัน 3 ค่า ได้แก่ 5 3 และ 2 วัน และควบคุมเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซมีเทนให้มีค่าคงที่เท่ากับ 15 วันตลอดการทดลอง

สำหรับผลการทดลองที่ 2 นี้จะแสดงผลการศึกษาประสิทธิภาพของระบบแยกตามหัวข้อ 3 หัวข้อ ได้แก่ ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของระบบ ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพและสภาวะการทำงานของระบบ โดยมีผลการศึกษาดังนี้คือ

4.4.1 การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดมลสารในระหว่างการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสดด้วยระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน

เมื่อพิจารณาลักษณะน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทน โดยการสังเกตเบื้องต้นพบว่า น้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนมีสีน้ำตาลอมเขียว มีตะกอนขุ่นและมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวค่อนข้างแรงจากกรดที่เกิดขึ้นและการย่อยสลายที่ไม่สมบูรณ์ของขั้นตอนการสร้างกรด ส่วนน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทนนั้นพบว่ามีสีน้ำตาลอมดำ มีตะกอนอยู่บ้างเล็กน้อยและมีกลิ่นเหม็นลดน้อยลง ลักษณะของน้ำเสียที่ออกจากถังหมักทั้งสองถังดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ลักษณะของน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทน

นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาปริมาณและประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของระบบ ด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ซีไอดีทั้งหมด ซีไอดีกรอง ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยได้ ทั้งหมดพบว่าผลการศึกษาแยกตามพารามิเตอร์ดังนี้คือ

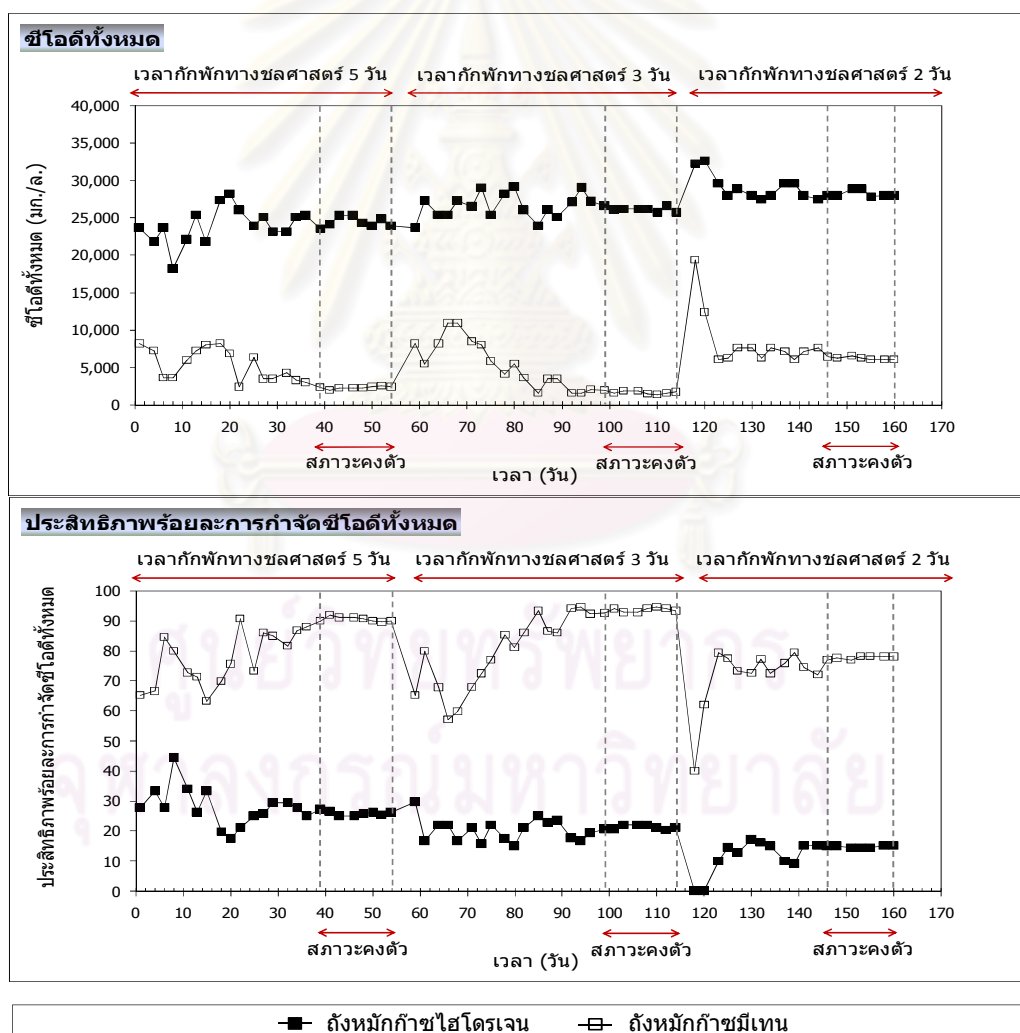
1) ซีไอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีทั้งหมด

ผลการศึกษาค่าซีไอดีทั้งหมดในระบบตามระยะทางพบว่า ค่าซีไอดีมีปริมาณลดลง จากปริมาณซีไอดีในขณะที่เข้าระบบ น้ำออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทน โดยลำดับ โดยมีประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดค่าซีไอดีทั้งหมดของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 14.95–25.97 และร้อยละ 77.83–93.61 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.15 จากที่ได้กล่าวมาแล้วในผลการทดลองแบบที่ละเทในการทดลองที่ 1 ถึงการลดลงของค่าซีไอดีภายในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์และสร้างกรดไขมันระเหยง่ายในระบบจึงทำให้มีการลดลงของค่าซีไอดีเพียงเล็กน้อย ซึ่งจากการทดลองนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีในระบบที่มีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้นจากปริมาณซีไอดีในขณะที่เข้าและออกจากระบบ โดยปริมาณซีไอดีที่มีค่าค่อนข้างสูงในน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจน (24,457-28,196 มก./ล.) นี้จะถูกนำไปใช้ในการย่อยสลายเพื่อสร้างก๊าซมีเทนในถังหมักก๊าซมีเทนต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีทั้งหมดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ พบว่าเมื่อเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนลดลงมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีลดลง เนื่องมาจากการมีระยะเวลาการคงอยู่ในระบบน้อยทำให้แบคทีเรียมีระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลงตามไปด้วย อีกทั้งยังมีระยะเวลาไม่เพียงพอในการย่อยสลายสารอินทรีย์บางชนิดที่ต้องใช้ระยะเวลาในการไฮโดรไลซิสนานโดยอาจต้องใช้เวลาในการไฮโดรไลซิสนานกว่าเวลากักพักทางชลศาสตร์ของระบบ ซึ่งหากระบบมีเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่นานเพียงพอจะทำให้แบคทีเรียมีระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์และมีผลทำให้ค่าซีไอดีภายในระบบมีค่าลดลงได้มากขึ้น จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนที่มีเวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วันมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 14.95 และที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 วันมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีสูงสุด แต่เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีของถังหมักก๊าซมีเทนกลับพบว่าถังหมักก๊าซมีเทนในชุดการทดลองที่มีเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วันมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีทั้งหมดสูงสุดซึ่งอาจเนื่องมาจากการมีปริมาณสารอินทรีย์เข้าระบบ (น้ำเสียออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจน) ที่มีความเหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซมีเทนมากกว่าในชุดการทดลองที่มีเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนอื่นๆ

ตารางที่ 4.15 สรุปค่าซีไอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีทั้งหมดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ของถัง หมักก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	ซีไอดีทั้งหมด (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละ การกำจัดซีไอดีทั้งหมด		
	ขยะเข้า ระบบ	น้ำออกจากถังหมัก ก๊าซไฮโดรเจน	น้ำออกจากถัง หมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจน	ถังหมัก ก๊าซมีเทน	ระบบ โดยรวม
5	33,031	24,457	2,302	25.97	90.58	93.03
3	33,271	26,180	1,674	21.31	93.61	94.97
2	33,153	28,196	6,252	14.95	77.83	81.14



รูปที่ 4.16 ซีไอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีทั้งหมดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

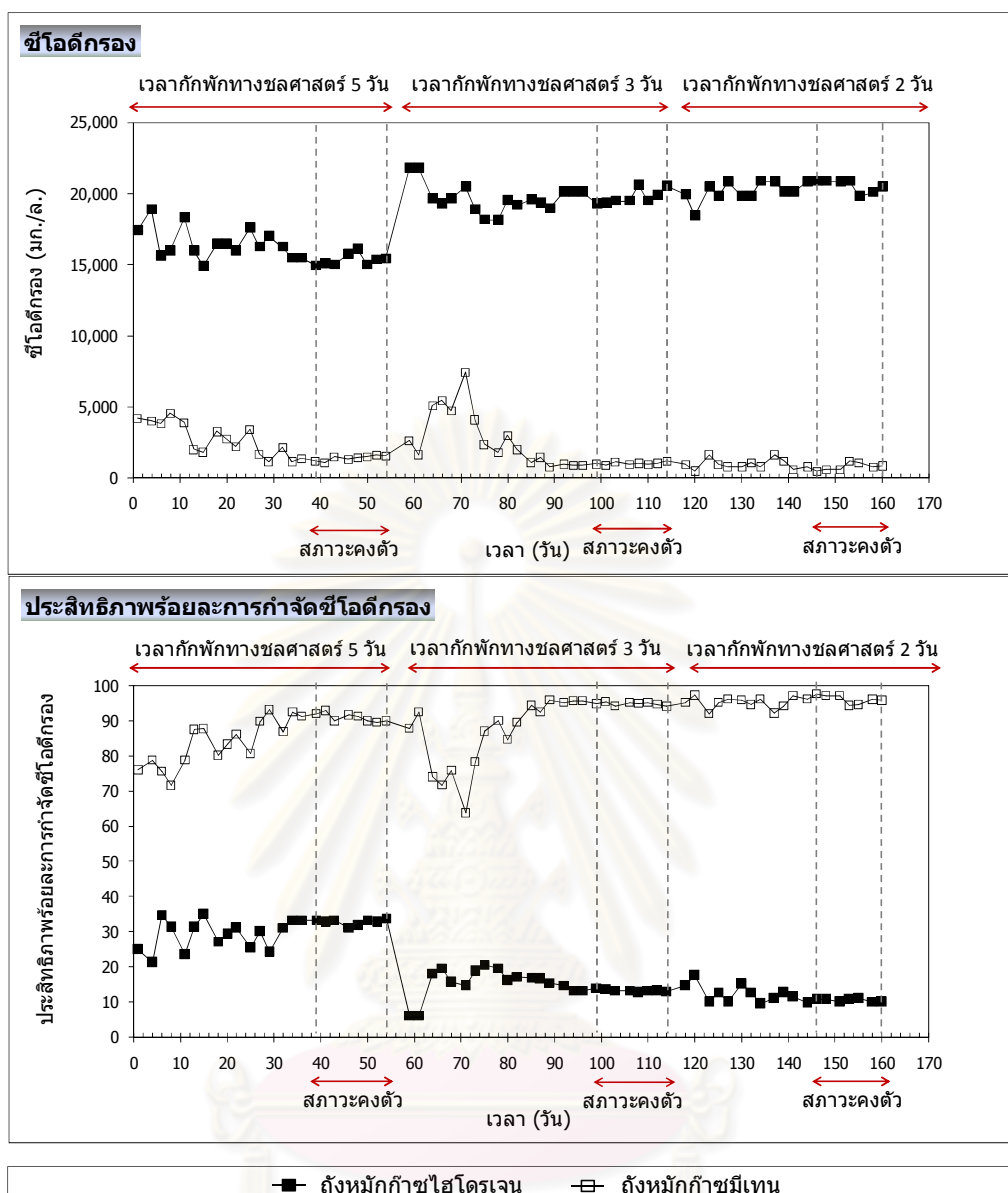
1) ซีไอดีกรองประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกรอง

ผลการศึกษาปริมาณซีไอดีกรองและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกรองที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ พบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับลักษณะการเปลี่ยนแปลงของซีไอดีทั้งหมดโดยมีค่าซีไอดีกรองลดลงตามระยะทางจากขยะที่เป็นระบบ ถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทน โดยลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกรองของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10.51–32.78 และร้อยละ 90.95–96.18 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.16

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกรองที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกรองของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนมีค่าลดลงเมื่อเวลากักพักทางชลศาสตร์ของระบบลดลง โดยที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 วันมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกรองสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 32.78 และที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วันมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกรองต่ำสุดโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 10.51 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกรองของถังหมักก๊าซมีเทนพบว่า เมื่อเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนลดลงกลับมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกรองเพิ่มขึ้น โดยที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วันมีประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกรองสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 96.18

ตารางที่ 4.16 สรุปค่าซีไอดีกรองและประสิทธิภาพการกำจัดซีไอดีกรองโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ของถัง หมักก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละ การกำจัดซีไอดีกรอง		
	ขยะเข้า ระบบ	น้ำออกจากถังหมัก ก๊าซไฮโดรเจน	น้ำออกจากถัง หมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจน	ถังหมัก ก๊าซมีเทน	ระบบ โดยรวม
5	22,821	15,341	1,388	32.78	90.95	93.92
3	22,817	19,776	1,015	13.34	94.87	95.56
2	22,969	20,556	782	10.51	96.18	96.59



รูปที่ 4.17 ชีโอดีกรองและประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีกรองที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

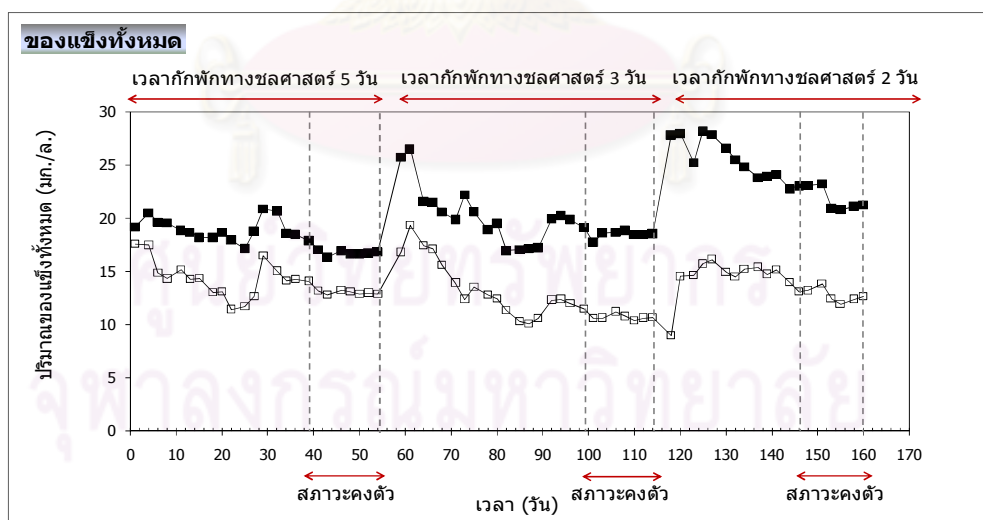
3) ของแข็งทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมด

ผลการศึกษาปริมาณของแข็งทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ พบว่ามีประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วง 38.57-52.76 และ 22.01-41.68 ในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทน ตามลำดับ จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการลดลงของของแข็งทั้งหมดในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนค่อนข้างสูงและมีค่าใกล้เคียงกับการลดลงของของแข็งทั้งหมดในถังหมักก๊าซมีเทน

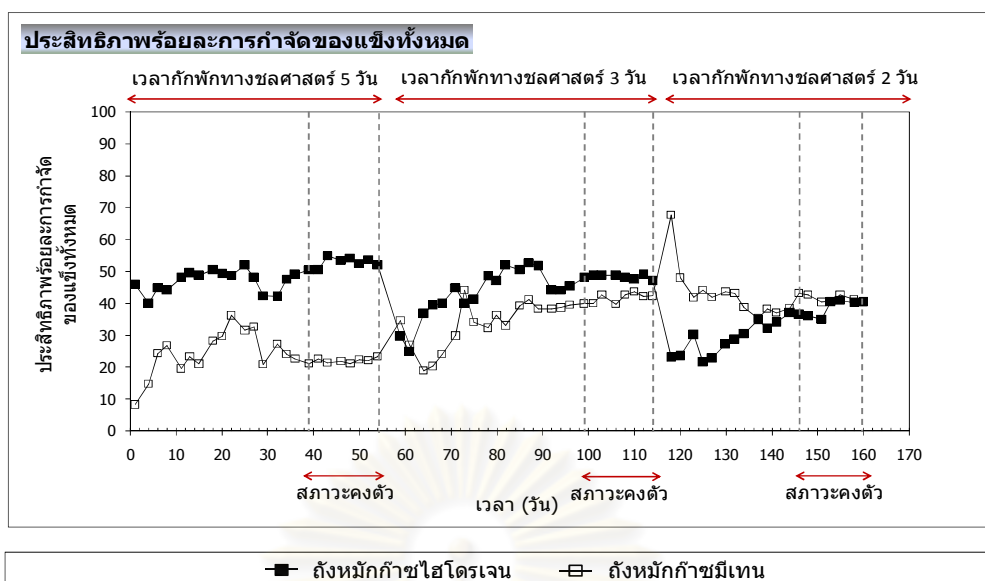
ยกเว้นที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 วันทีประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข็งทั้งหมดของทั้งสองถึงมีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน เนื่องจากการมีค่าเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่สูงของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนทำให้ระบบมีความสามารถในการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่สูงตามไปด้วยโดยมีประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 52.76 ด้วยกัน ทำให้เหลือปริมาณของแข็งทั้งหมดในน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนไม่สูงมากนัก เมื่อน้ำเสียเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทนจึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดค่อนข้างต่ำ ดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.17 สรุปปริมาณของแข็งทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ของถัง หมักก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละ การกำจัดของแข็งทั้งหมด		
	ขยะเข้า ระบบ	น้ำออกจากถังหมัก ก๊าซไฮโดรเจน	น้ำออกจากถัง หมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจน	ถังหมัก ก๊าซมีเทน	ระบบ โดยรวม
5	35.72	16.87	13.16	52.76	22.01	63.16
3	35.81	18.54	10.81	48.22	41.68	69.81
2	35.68	21.92	12.80	38.57	41.59	64.13



รูปที่ 4.18 ของแข็งทั้งหมดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ



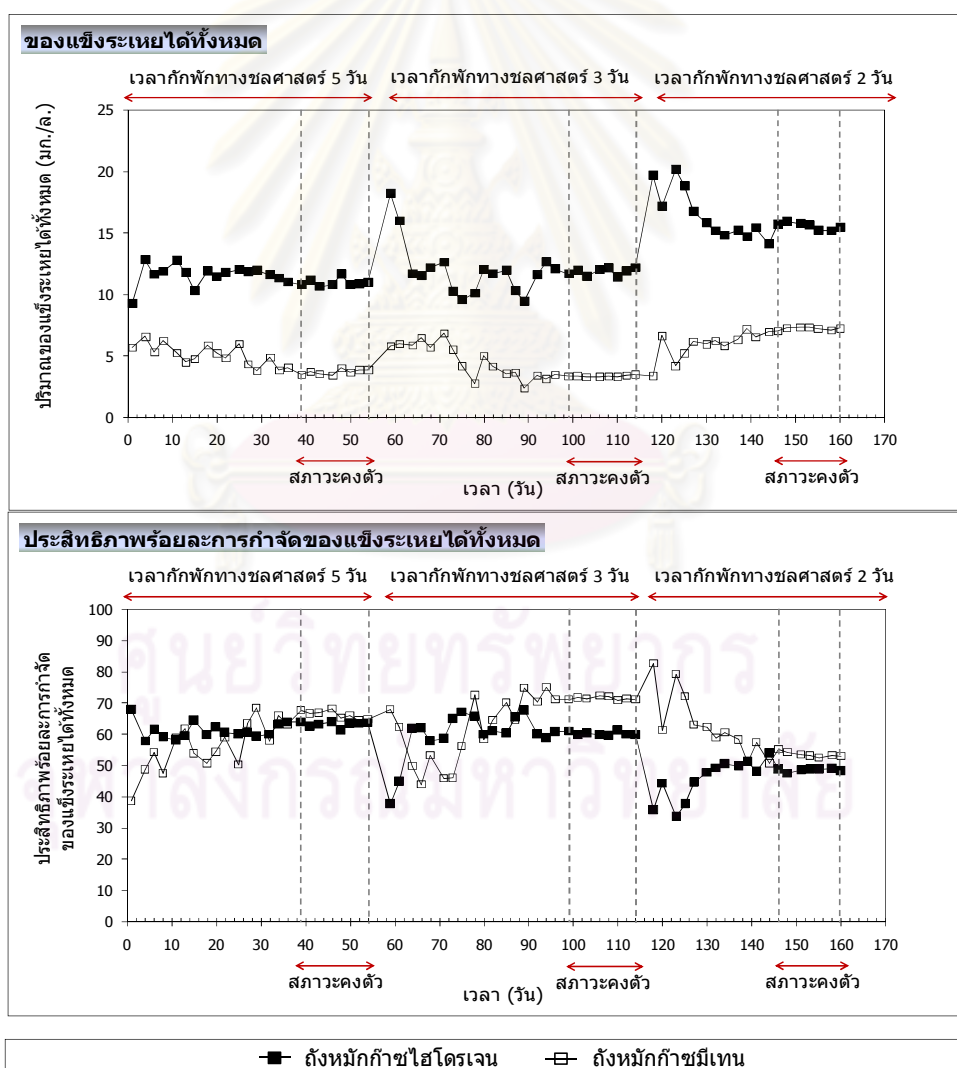
รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

4) ของแข็งระเหยได้ทั้งหมดประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ทั้งหมด

ผลการศึกษาปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ ตามระยะทาง พบว่าถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนมีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 48.53-63.26 และ 53.56-71.52 ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.18 โดยเมื่อเปรียบเทียบกับแนวโน้มประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดจะเห็นได้ว่ามีลักษณะที่แตกต่างกันเนื่องจากการลดลงของของแข็งทั้งหมดส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในถังหมักก๊าซไฮโดรเจน แต่จากผลการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ทั้งหมดของทั้งสองถังมีค่าที่ค่อนข้างสูงและใกล้เคียงกัน โดยถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนมีความสามารถกำจัดของแข็งระเหยได้ทั้งหมดสูงกว่าร้อยละ 50 ในทุกชุดการทดลอง ยกเว้นถังหมักก๊าซไฮโดรเจนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วันที่มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระเหยได้ทั้งหมดต่ำกว่าเล็กน้อยโดยมีเท่ากับร้อยละ 48.53 เนื่องมาจากการมีระยะเวลาในการคงอยู่ในระบบต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น

ตารางที่ 4.18 สรุปปริมาณของแฉ่งระเหยได้ทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแฉ่งระเหยได้ทั้งหมดโดยเฉลี่ยที่สถานะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ของถัง หมักก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	ปริมาณของแฉ่งระเหยได้ทั้งหมด (ก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ของแฉ่งระเหยได้ทั้งหมด		
	ขยะเข้า ระบบ	น้ำออกจากถังหมัก ก๊าซไฮโดรเจน	น้ำออกจากถัง หมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจน	ถังหมัก ก๊าซมีเทน	ระบบ โดยรวม
5	29.95	11.00	3.72	63.26	66.22	87.59
3	29.88	11.88	3.38	60.23	71.52	88.68
2	30.29	15.59	7.24	48.53	53.56	76.10



รูปที่ 4.20 ปริมาณของแฉ่งระเหยได้ทั้งหมดและประสิทธิภาพการกำจัดของแฉ่งระเหยได้ทั้งหมดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

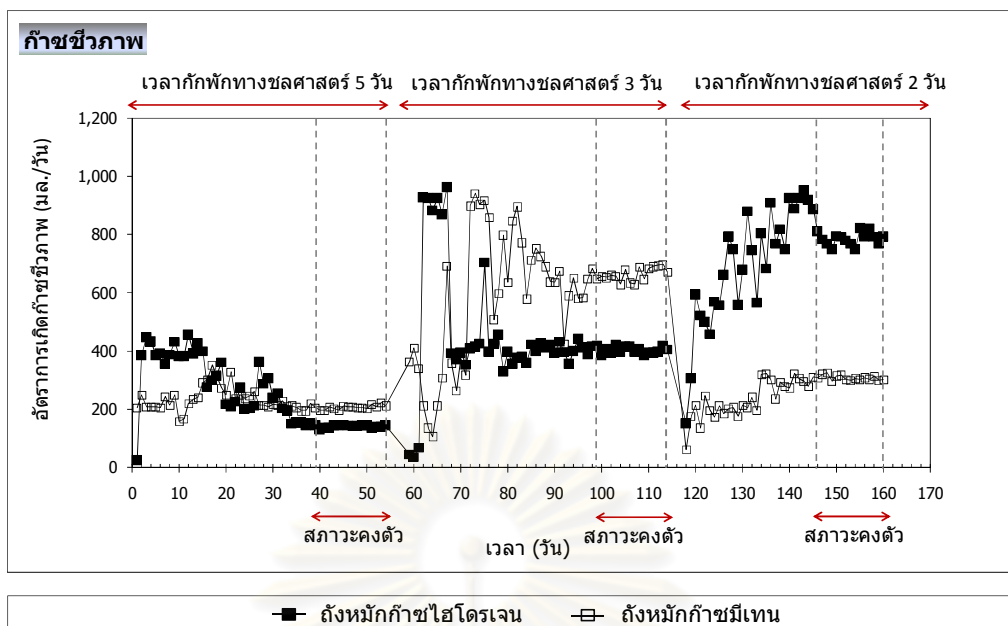
4.4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาด ด้วยระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน

1) ก๊าซชีวภาพทั้งหมด

ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดที่ผลิตได้ในระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน พบว่าที่ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ มีค่าแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อวันเท่ากับ 141.98 403.75 และ 785.99 มล./วัน ที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 3 และ 2 วัน ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วันมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สูงสุด สำหรับถังหมักก๊าซมีเทนพบว่าถังหมักก๊าซมีเทนในชุดการทดลองที่มีเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วันมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สูงสุด โดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 663.32 มล./วัน ส่วนถังหมักก๊าซมีเทนในชุดการทดลองที่มีเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 และ 2 วันมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 206.24 และ 307.66 มล./วัน ตามลำดับ โดยอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนดังแสดงในตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.21

ตารางที่ 4.19 สรุปอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพทั้งหมดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ของถังหมัก ก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพทั้งหมด (มล./วัน)		
	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ระบบโดยรวม
5	141.98	206.24	348.22
3	403.75	663.32	1,067.07
2	785.99	307.66	1,093.65



รูปที่ 4.21 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทน
ที่เวลาแก๊กฟักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

2) องค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ

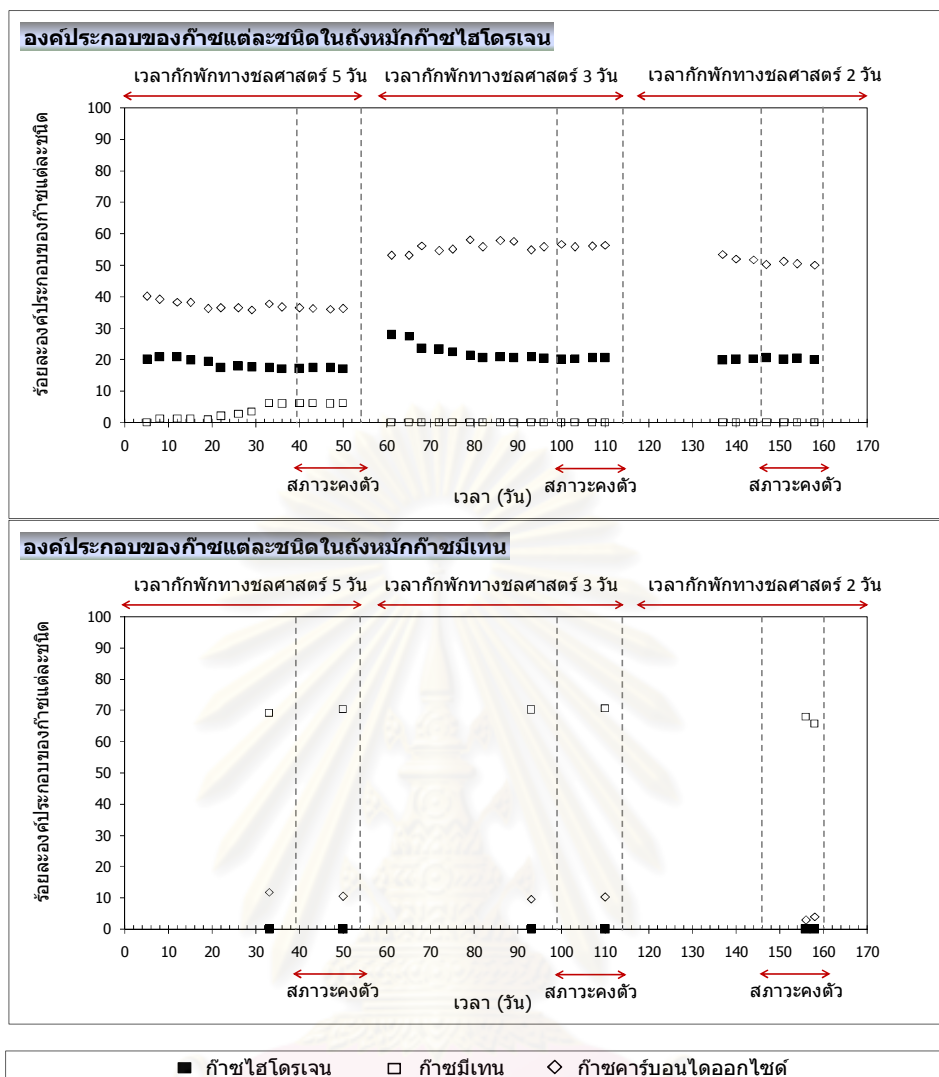
เมื่อทำการศึกษาองค์ประกอบของก๊าซแต่ละชนิดที่เวลาแก๊กฟักทางชลศาสตร์ต่างๆ พบว่ามีองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนภายในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนโดยเฉลี่ยอยู่ในช่วงร้อยละ 17.21-22.34 และ 0-6.10 ตามลำดับ สำหรับถังหมักก๊าซมีเทนมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 66.79-70.52 ดังตารางที่ 4.20 จากผลการศึกษาองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนแสดงให้เห็นถึงผลของเวลาแก๊กฟักทางชลศาสตร์ที่มีต่อการเกิดขึ้นของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน โดยจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซแต่ละชนิดที่เวลาแก๊กฟักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 วันภายหลังจากการเดินระบบ 5 วัน ซึ่งยังไม่พบว่ามีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ แต่เมื่อเดินระบบต่อเนื่องจากวันที่ 5 ของการเดินระบบจนกระทั่งสิ้นสุดระยะเวลาการทดลองที่เวลาแก๊กฟักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 วันในวันที่ 54 ของการทดลอง พบว่าองค์ประกอบของก๊าซมีเทนมีปริมาณที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 จนมีค่าสูงสุดที่ร้อยละ 6.16 ดังรูปที่ 4.22 ซึ่งการเพิ่มขึ้นขององค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพดังกล่าวเป็นผลมาจากการที่มีเวลาแก๊กฟักทางชลศาสตร์ที่สูงเกินไปทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนสามารถเจริญเติบโตได้ในระบบ นอกจากนี้ยังสามารถแสดงให้เห็นถึงผลของการบำบัดหัวเชื้อจุลินทรีย์ด้วยความร้อน โดยจะเห็นได้ว่าการให้ความร้อนแก่หัวเชื้อจุลินทรีย์สามารถกำจัดแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนออกจากหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นได้ในช่วงแรกของการทดลองเท่านั้น แต่ปัจจัยที่มีความสำคัญมากกว่าคือ เวลาแก๊กฟักทาง

ชลศาสตร์หรือปัจจัยเกี่ยวกับสภาวะการทำงานของระบบอื่นๆ ที่จำเป็นที่จะต้องมีการควบคุมให้มีความเหมาะสม ทั้งนี้เมื่อลดเวลากักพักทางชลศาสตร์เหลือ 3 วันและ 2 วัน กลับพบว่าไม่พบองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพอีก ซึ่งอาจเนื่องมาจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนถูกล้างออกไปจากระบบและสาเหตุจากการมีสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มนี้ที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ที่สั้นลงดังกล่าว

เมื่อศึกษาองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในถังหมักก๊าซมีเทนพบว่ามีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพค่าค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นผลมาจากการมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายจำนวนมากน้ำเสียที่เข้าระบบที่ได้จากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นซับสเตรทที่ดีสำหรับการผลิตก๊าซมีเทนของแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน และส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากการแยกขั้นตอนของการสร้างกรดและสร้างก๊าซมีเทนออกจากกันทำให้มีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแต่ละชนิดซึ่งเป็นข้อดีของระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนที่ใช้ในการทดลองนี้

ตารางที่ 4.20 สรุปร้อยละองค์ประกอบของก๊าซแต่ละชนิดในก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ของถัง หมักก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซ ในถังหมักก๊าซไฮโดรเจน			ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซ ในถังหมักก๊าซมีเทน		
	ก๊าซ ไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์	ก๊าซ ไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์
5	17.21	6.10	36.25	0	70.36	10.51
3	20.34	0	56.21	0	70.52	10.23
2	20.22	0	50.38	0	66.79	3.39



รูปที่ 4.22 ร้อยละองค์ประกอบของก๊าซแต่ละชนิดของก๊าซชีวภาพในถังหมักก๊าซไฮโดรเจน และถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

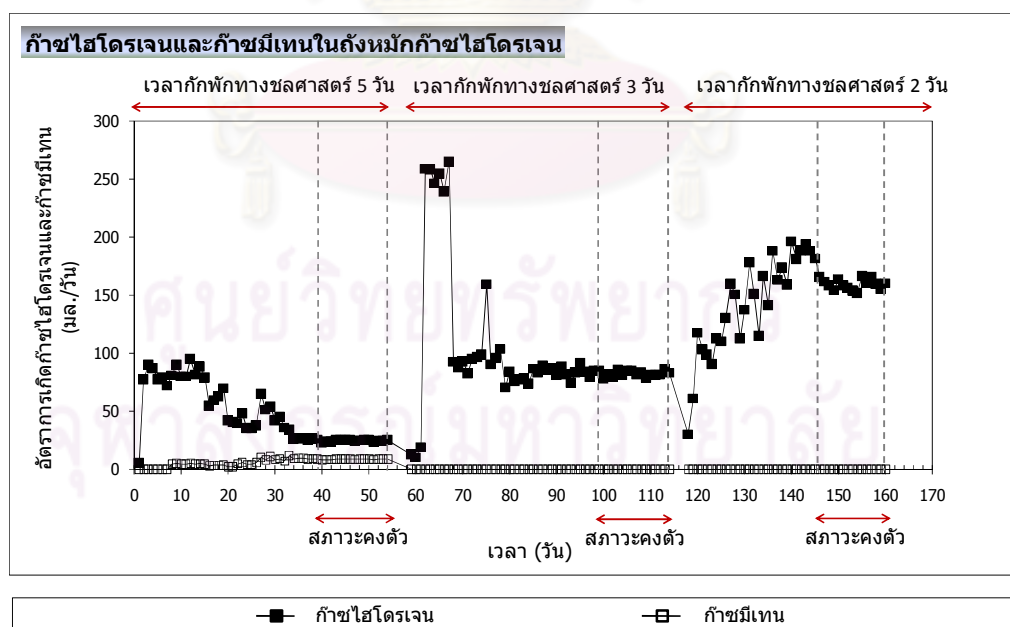
3) ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน

จากผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซแต่ละชนิด เมื่อคิดเป็นปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ของระบบพบว่า ถังหมักก๊าซไฮโดรเจนสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้เท่ากับ 24.44 82.14 และ 159.23 มล./วัน ที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 3 และ 2 วัน ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วันมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ต่อวันสูงสุด สำหรับชุดการทดลองที่มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ต่อวันต่ำสุดคือที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 วัน ซึ่งส่วนหนึ่งอาจเป็นผลมาจากการสร้างก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนภายในระบบ โดยจะมีการดึงเอาก๊าซไฮโดรเจนไปใช้ในการผลิตร่วมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทำให้ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนลดลง สำหรับถังหมักก๊าซ

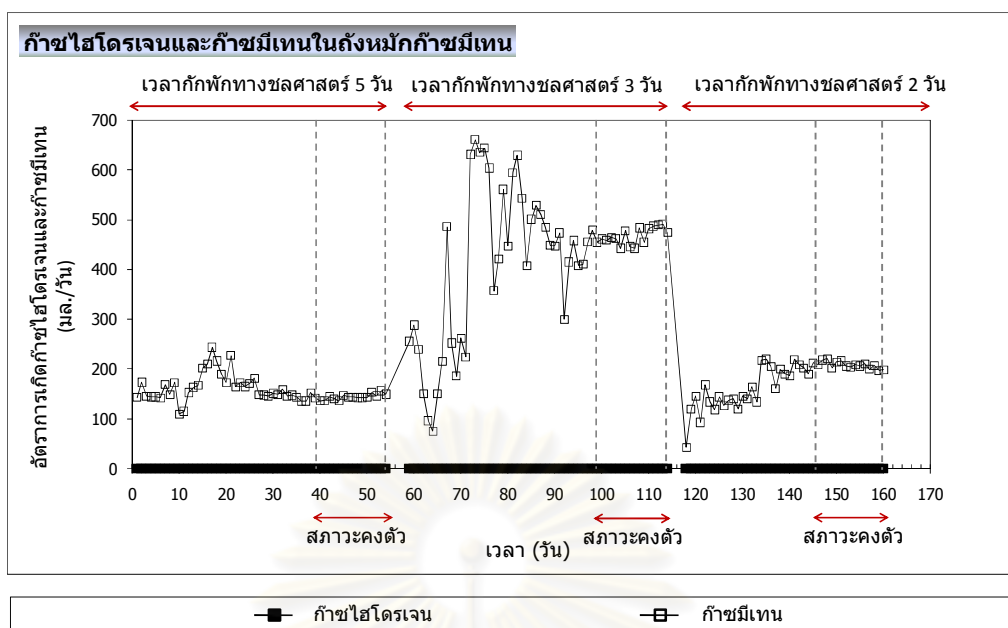
มีเทนพบว่ามีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 143.36 466.38 และ 203.20 มล./วัน ที่เวลาพักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 3 และ 2 วัน ตามลำดับ ซึ่งจากตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.23 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าถังหมักก๊าซมีเทนในชุดการทดลองที่มีเวลาพักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วันมีปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้สูงสุด

ตารางที่ 4.21 สรุปอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลาพักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลาพักพักทาง ชลศาสตร์ของ ถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจน (วัน)	อัตราการเกิดก๊าซ ไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน ในถังหมักก๊าซไฮโดรเจน (มล./วัน)		อัตราการเกิดก๊าซ ไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน ในถังหมักก๊าซมีเทน (มล./วัน)		อัตราการเกิดก๊าซของระบบ โดยรวม (มล./วัน)		
	ก๊าซ ไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ก๊าซ ไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ก๊าซ ชีวภาพ	ก๊าซ ไฮโดรเจน	ก๊าซ มีเทน
	5	24.44	8.66	0.00	143.36	348.22	24.44
3	82.16	0.00	0.00	466.38	1,067.07	82.16	466.38
2	159.23	0.00	0.00	203.20	1,093.65	159.23	203.20



รูปที่ 4.23 อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนที่เวลาพักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ



รูปที่ 4.24 อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนของถังหมักก๊าซมีเทน
ที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

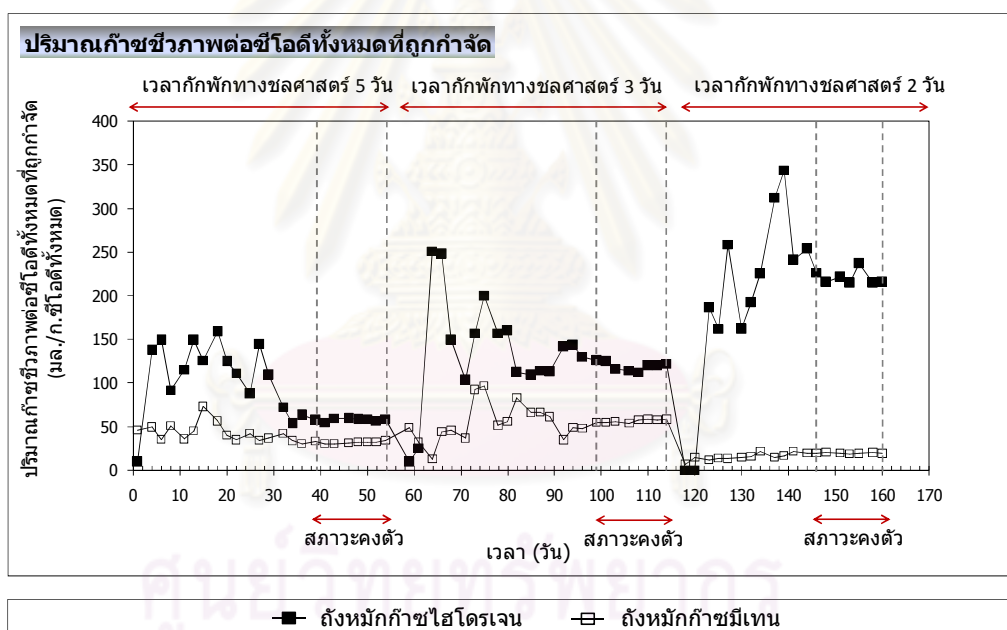
4) ไฮโดรเจนยิลด์

4.1) ก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อซีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัด

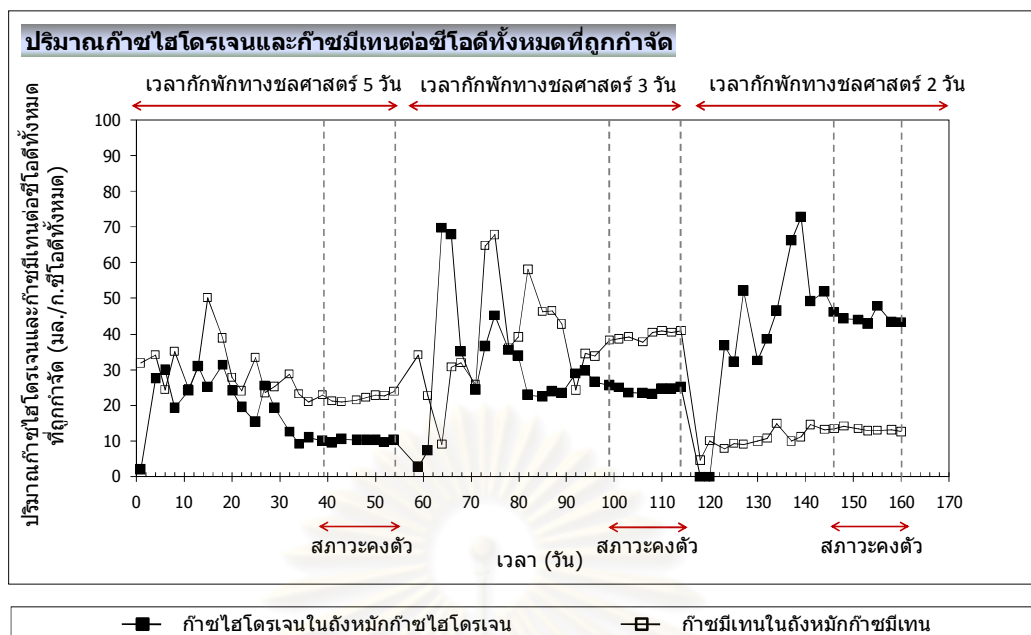
ผลการศึกษาก๊าซไฮโดรเจนยิลด์ในรูปแบบของก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อกรัมซีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ พบว่าถังหมักก๊าซไฮโดรเจนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วันมีปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนต่อกรัมซีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัดสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 220.75 และ 44.59 มล./ก.ซีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัดตามลำดับ สำหรับถังหมักก๊าซมีเทนพบว่าที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน มีปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อกรัมซีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัดสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 56.21 และ 39.53 มล./ก.ซีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัด ตามลำดับ สำหรับปริมาณก๊าซต่อซีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัดของถังหมักทั้งสองถังที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.22

ตารางที่ 4.22 สรุปปริมาณก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อกรัมซีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัด โดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางจุลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง จุลศาสตร์ของถังหมัก ก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน (มล./ก.ซีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัด)		ถังหมักก๊าซมีเทน (มล./ก.ซีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัด)	
	ก๊าซชีวภาพ	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซชีวภาพ	ก๊าซมีเทน
5	57.81	9.95	31.87	22.18
3	119.41	24.30	56.21	39.53
2	220.75	44.59	19.44	13.10



รูปที่ 4.25 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัดที่เวลากักพักทางจุลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ



รูปที่ 4.26 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อซีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัดในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

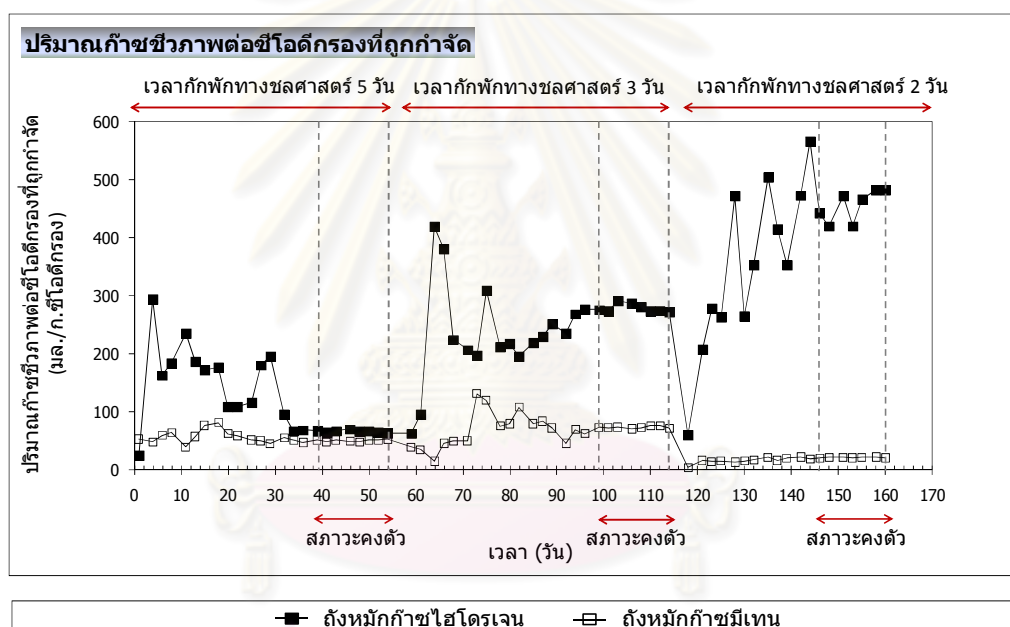
4.2) ก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อซีโอดีกรองที่ถูกกำจัด

ผลการศึกษ ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ต่อกรัมซีโอดีกรองที่ถูกกำจัดในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ต่อกรัมซีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัด โดยที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วันมีปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนต่อกรัมซีโอดีกรองที่ถูกกำจัดสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 454.27 และ 91.73 มล./ก.ซีโอดีกรองที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ผลการศึกษ ปริมาณก๊าซต่อกรัมซีโอดีกรองที่ถูกกำจัดของถังหมักทั้งสองถึงที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.23

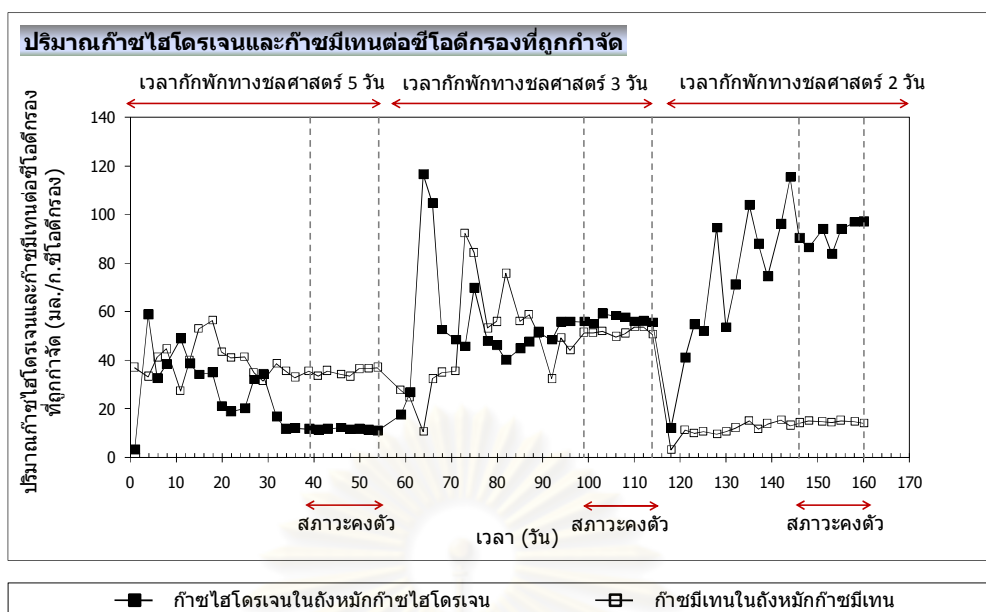
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.23 สรุปปริมาณก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อกรัมชีโอดีกรองที่ถูกกำจัดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ของ ถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจน (วัน)	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน (มล./ก.ชีโอดีกรอง)		ถังหมักก๊าซมีเทน (มล./ก.ชีโอดีกรอง)	
	ก๊าซชีวภาพ	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซชีวภาพ	ก๊าซมีเทน
5	66.28	11.41	50.60	35.21
3	278.08	56.61	73.42	51.64
2	454.27	91.73	21.58	14.54



รูปที่ 4.27 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อชีโอดีกรองที่ถูกกำจัดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ



รูปที่ 4.28 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อซีโอดีกรองที่ถูกกำจัดในถังหมักก๊าซไฮโดรเจน และถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

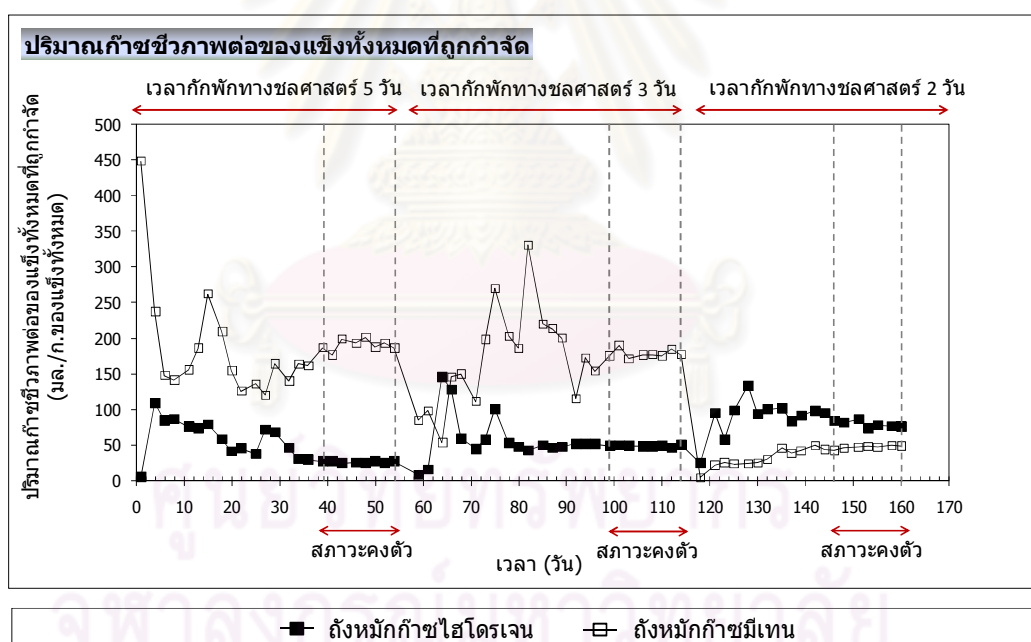
4.3) ก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด

ผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนต่อของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดของถังหมักก๊าซไฮโดรเจน พบว่ามีแนวโน้มเช่นเดียวกับปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนต่อกรัมซีโอดีทั้งหมดและซีโอดีกรองที่ถูกกำจัด โดยมีค่าสูงสุดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วัน ซึ่งมีปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนต่อกรัมของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดเท่ากับ 79.73 และ 16.11 มล./ก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด ตามลำดับ สำหรับถังหมักก๊าซมีเทนพบว่าที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วันมีปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 190.28 และ 132.39 มล./ก.ของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด ตามลำดับ ดังจะเห็นได้ว่ามีแนวโน้มที่แตกต่างจากปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อกรัมซีโอดีทั้งหมดและซีโอดีกรองที่ถูกกำจัด ซึ่งเป็นผลมาจากประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งทั้งหมดภายในถังหมักก๊าซมีเทนที่มีค่าต่ำโดยมีค่าเพียงร้อยละ 22.01 จึงส่งผลทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดมีค่าสูง แต่จากผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมดในถังหมักก๊าซมีเทนซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณก๊าซมีเทนในถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วันมีค่าต่ำสุดในทุกชุดการทดลอง จึงแสดงให้เห็นว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน การเปลี่ยนแปลง

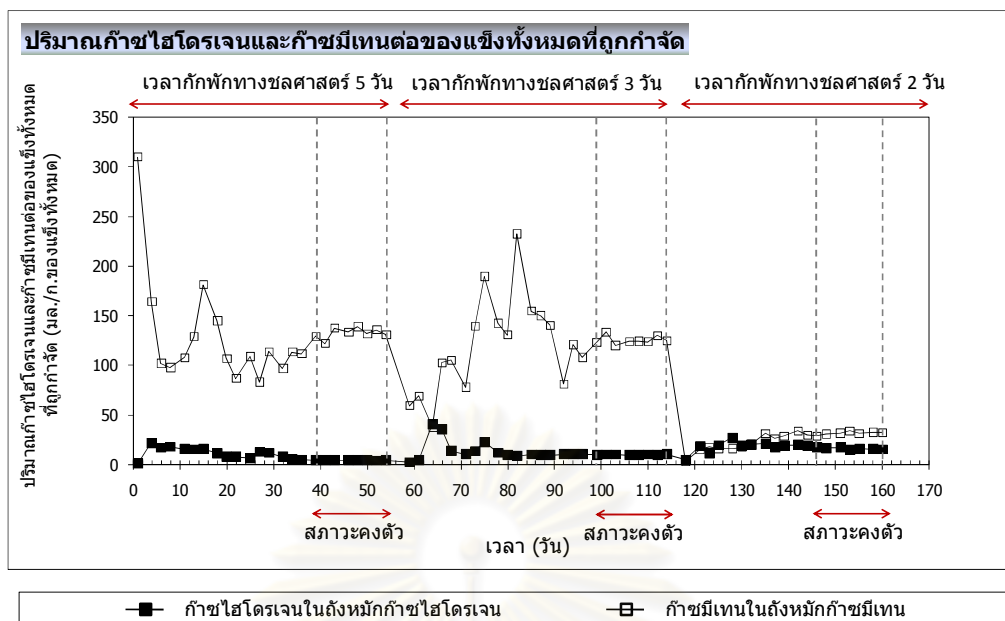
ของปริมาณก๊าซต่อของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดภายในถังหมักทั้งสองถึงที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.24 และรูปที่ 4.29

ตารางที่ 4.24 สรุปปริมาณก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ของถัง หมักก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน (มล./ก.ของแข็งทั้งหมด)		ถังหมักก๊าซมีเทน (มล./ก.ของแข็งทั้งหมด)	
	ก๊าซชีวภาพ	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซชีวภาพ	ก๊าซมีเทน
5	26.33	4.53	190.28	132.39
3	48.98	9.97	178.38	125.45
2	79.73	16.11	46.88	31.58



รูปที่ 4.29 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ



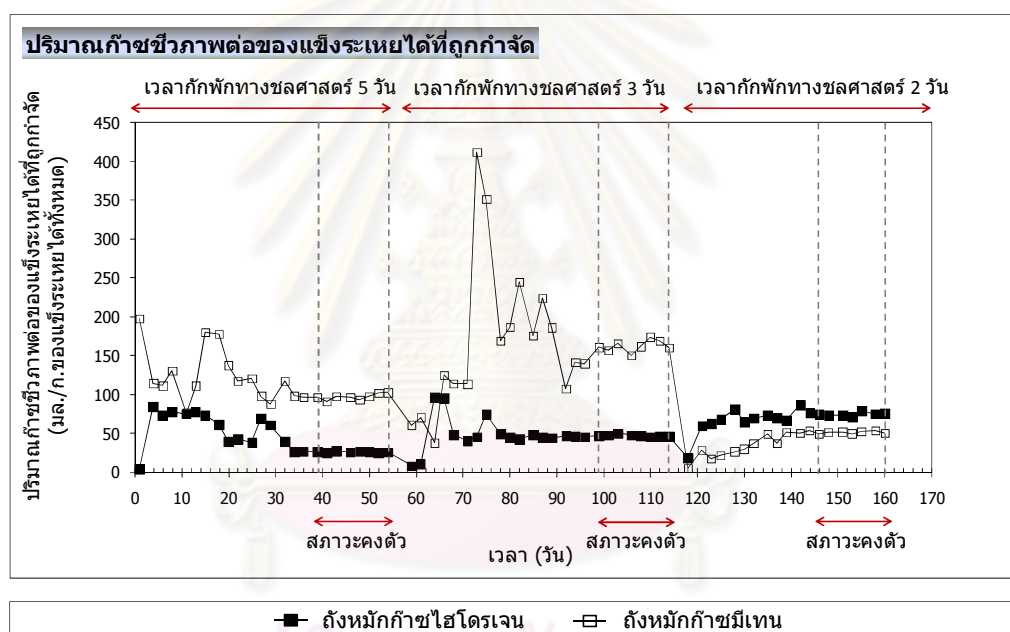
รูปที่ 4.30 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัดในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

4.4) ก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัด

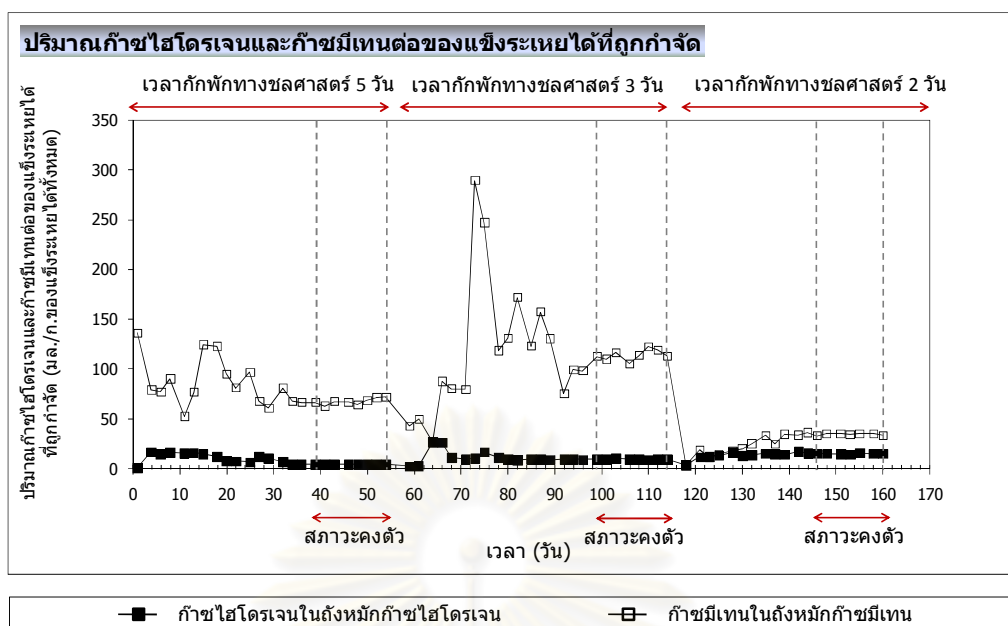
เมื่อศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนต่อกรัมของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัดของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนพบว่ามีความโน้มแนมเช่นเดียวกับปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนต่อกรัมชีโอดีทั้งหมด ชีโอดีกรองและของแข็งทั้งหมดที่ถูกกำจัด โดยที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วันมีปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนต่อกรัมของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัดสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 74.40 และ 15.03 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัดตามลำดับ สำหรับถังหมักก๊าซมีเทนพบว่าที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วันมีปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัดสูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 162.17 และ 114.06 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัด ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงของปริมาณก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัดภายในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.25 และรูปที่ 4.31

ตารางที่ 4.25 สรุปปริมาณก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ของถัง หมักก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน (มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด)		ถังหมักก๊าซมีเทน (มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด)	
	ก๊าซชีวภาพ	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซชีวภาพ	ก๊าซมีเทน
5	26.16	4.50	96.95	67.47
3	47.00	9.57	162.17	114.06
2	74.40	15.03	51.09	34.42



รูปที่ 4.31 ปริมาณก๊าซชีวภาพต่อของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ



รูปที่ 4.32 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนต่อของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัดในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนที่ได้จากการทดลองนี้เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากเศษอาหารและของเสียชนิดต่างๆ ด้วยระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน พบว่ามีค่าที่ต่ำกว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากเศษอาหาร เนื่องจากเศษผักมีองค์ประกอบของเซลล์ลิวโลสที่ย่อยสลายได้ยากกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำเสียพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันโดยค่าไฮโดรเจนและมีเทนยิลด์ที่ได้จากงานวิจัยต่างๆ ดังตารางที่ 4.26

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.26 เปรียบเทียบไฮโดรเจนและมีเทนยิลด์ที่ได้จากการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากของเสียต่างๆ ด้วยระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนนี้

ชนิดของเสีย / ชั้นสเตรท	ชนิดของระบบ	สภาวะการทดลอง ^๑			ไฮโดรเจน และมีเทนยิลด์	งานวิจัย อ้างอิง
		เวลากัก พักทาง ชลศาสตร์	อุณหภูมิ ของระบบ (องศา เซลเซียส)	ค่าพีเอช		
เศษอาหาร (มีแป้งเป็น องค์ประกอบ) น้ำเสีย	ถึงปฏิกิริยาแบบ ทรงกระบอก	- ^๒	40±2	5.2-5.8 / 6.7-7.3	49-71 / 480-551 มล./ก.ของแข็ง ระบายได้ทั้งหมด	Wang และ Zhao (2009)
	ถึงกรองชีวภาพ	24 ชม. / 24 ชม.	28±2	6.0 / 7.0	0.2-1.59 / 2.67-16.23 มิลลิโมล/ ก.ชีโอดี	Mohan, Mohanakrishna and Sarma (2008)
ขยะอินทรีย์ จากตลาดสด	ถึงปฏิกิริยาแบบ กวนสมบูรณ์	2 3 และ 5 / 15 วัน	อุณหภูมิ ห้อง	5.5 / 7.0-8.0	4.50-15.03 มล./ ก.ของแข็ง ระบายได้ ทั้งหมด หรือ 0.4-1.79, 0.53-1.59 มิลลิโมล/ ก.ชีโอดี	งานวิจัยนี้

หมายเหตุ: ^๑ แสดงสภาวะการทดลองของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและมีเทนตามลำดับ; ^๒ ไม่มีข้อมูล

4.4.3 สภาวะการทำงานของระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนนี้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ จากขยะอินทรีย์จากตลาดสด

4.4.3.1 กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด

1) ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด

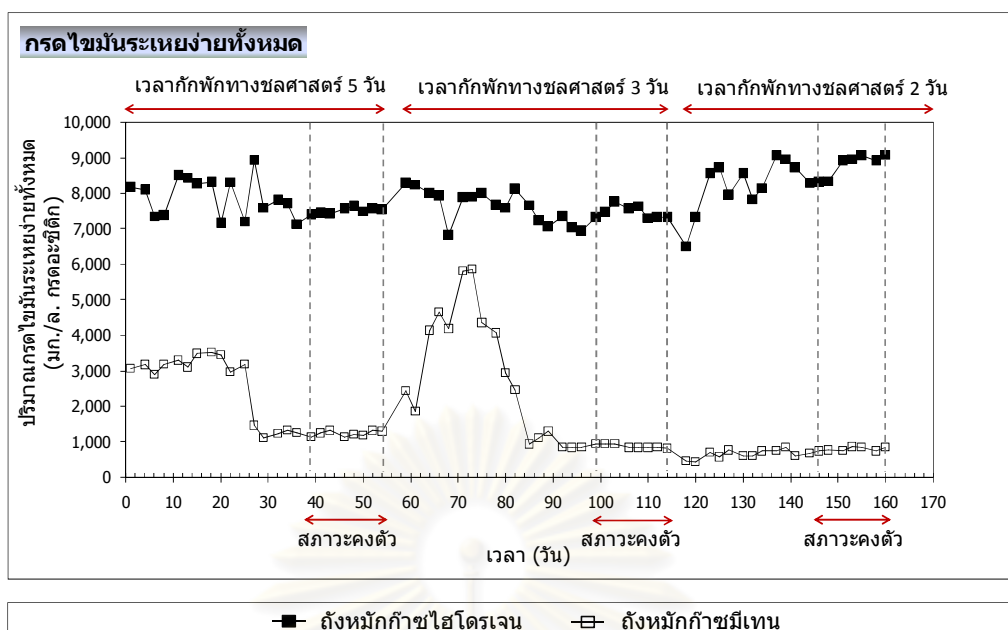
ผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดตามระยะทางพบว่า ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดในถังหมักก๊าซก๊าซไฮโดรเจนมีปริมาณเพิ่มขึ้นจากขยะที่เข้าระบบ ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์และสร้างกรดของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดภายใน

ระบบ หลังจากนั้นจึงมีปริมาณลดลงเมื่อเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทนซึ่งจะมีการนำเอากรดไขมันระเหยง่ายไปใช้ในการสร้างก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทน โดยปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดภายในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วง 7,456-8,793 มก./ล. กรดอะซิติก ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นจากขยะที่เข้าระบบเท่ากับร้อยละ 46.03-53.82

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ ทั้ง 3 ค่า พบว่าที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 และ 3 วัน มีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดค่อนข้างใกล้เคียงกันโดยมีค่าเท่ากับ 7,501 และ 7,456 มก./ล. กรดอะซิติก ตามลำดับ จากนั้นจึงมีค่าลดลงเหลือ 1,221 และ 868 มก./ล. กรดอะซิติก เมื่อเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทน ตามลำดับ สำหรับที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วันมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนสูงกว่าที่เวลากักพักทางชลศาสตร์อื่นๆ เนื่องจากการที่มีอัตราการสลายอินทรีย์ที่เข้าระบบสูงจึงทำให้มีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดเพิ่มสูงขึ้นด้วย แต่เมื่อเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทนพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายมีค่าคงเหลือเพียง 785 มก./ล. กรดอะซิติก ดังตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.27 สรุปปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ของถัง หมักก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (มก./ล. กรดอะซิติก)		
	ขยะเข้าระบบ	น้ำออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	น้ำออกจากถังหมักก๊าซมีเทน
5	4,028	7,501	1,221
3	4,023	7,456	868
2	4,058	8,793	785



รูปที่ 4.33 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่เวลาดักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

2) องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิด

การศึกษาถึงองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิดจะทำให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการสร้างกรดและผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ดียิ่งขึ้น จากผลการศึกษาองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายจำนวน 5 ชนิด ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทริก กรดวาเลริกและกรดคาโปรอิกในขณะที่ยังมีน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาดักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ พบว่ามีองค์ประกอบที่แตกต่างกันโดยมีผลการศึกษาแยกตามการศึกษาตามระยะทางของระบบและเมื่อทำการเปรียบเทียบที่เวลาดักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ พบว่ามีผลการศึกษาดังนี้

2.1) องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิดตามระยะทาง

องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายตามระยะทางการทำงานของระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน โดยรวม พบว่าขณะที่เข้าระบบมีกรดอะซิติกเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่เป็นจำนวนมากในกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดโดยมีอยู่ถึงร้อยละ 61.89-63.36 และชนิดของกรดไขมันระเหยง่ายที่มีอยู่ในปริมาณสูงรองลงมาคือกรดบิวไทริกซึ่งมีอยู่เท่ากับร้อยละ 19.01-19.53 นอกจากนี้พบว่ามีกรดไขมันระเหยง่ายชนิดอื่นอยู่บ้างเล็กน้อยคือ กรดโพรไพโอนิก กรดวาเลริกและกรดคาโปรอิกโดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 7.69-8.09 6.99-7.04 และ 2.77-3.18 ตามลำดับ ซึ่งการที่พบองค์ประกอบของกรดอะซิติกเป็นจำนวนมากนั้นอาจเนื่องมาจากการที่ขะอินทรีย์ประกอบไปด้วย

ส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายและยาก ส่วนที่ย่อยสลายได้ง่ายส่วนใหญ่อยู่ในรูปของกรดอะซิติกดังผลที่ได้จากการวิเคราะห์ ในขณะที่เดียวกันยังมีส่วนที่ย่อยสลายได้ยากหรือมีโมเลกุลที่ซับซ้อนที่มีจำนวนของคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมขึ้นไปอยู่ด้วยแต่มีปริมาณไม่มากนัก โดยทั้งนี้อาจจะมีส่วนที่อยู่ในรูปของกรดไขมันชนิดอื่นที่นอกเหนือจากกรดไขมันระเหยง่ายทั้ง 5 ชนิดนี้ที่ไม่ได้มีการตรวจวัดอีกด้วย และอาจจะมียอยู่ในปริมาณมากกว่ากรดอะซิติกที่ตรวจพบก็เป็นได้

ผลการศึกษาองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิดในน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจน พบว่ามีองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายชนิดอื่นๆ นอกเหนือจากกรดอะซิติกมากขึ้น โดยมีองค์ประกอบของกรดบิวไทรก กรดโพรไพโอนิก กรดวาเลริก และกรดคาโปรอิกอยู่ในช่วงร้อยละ 16.49-39.68 11.99-17.77 11.32-12.63 และ 7.24-11.58 ตามลำดับ เมื่อน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทนจะมีการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายเป็นก๊าซมีเทนจนเหลืออยู่ในปริมาณเล็กน้อยดังตารางที่ 4.28 โดยเมื่อวิเคราะห์น้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทนพบว่ามีส่วนประกอบหลักคือ กรดอะซิติกและกรดบิวไทรก ยกเว้นที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน พบองค์ประกอบของกรดอะซิติกอยู่ถึงร้อยละ 77.88 ซึ่งเกิดจากการที่มีระยะเวลาในการคงอยู่ในระบบนานตั้งแต่ภายในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนทำให้กรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลายตัวหรือมีโครงสร้างซับซ้อนได้เกิดการย่อยสลายจนมีโมเลกุลสั้นลงเรื่อยๆ จนเหลือกรดอะซิติกเป็นองค์ประกอบหลัก ดังจะเห็นได้จากการที่ไม่พบองค์ประกอบของกรดวาเลริกและกรดคาโปรอิกในน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ แต่อย่างใด

2.2) องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ พบว่าที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน มีองค์ประกอบของกรดอะซิติกมากที่สุด (ร้อยละ 50.14) และที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน มีองค์ประกอบของกรดบิวไทรกมากที่สุด (ร้อยละ 38.68) ทั้งนี้เมื่อพิจารณาในแง่ของการผลิตก๊าซไฮโดรเจนแล้ว จากสมการการย่อยสลายกลูโคส (สมการที่ 2.43 และ 2.44) ซึ่งกรดอะซิติกและกรดบิวไทรกจะให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนอย่างละ 4 และ 2 โมล ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อได้กรดอะซิติกเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของปฏิกิริยาจะได้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนมากกว่ากรดบิวไทรกถึง 2 เท่าด้วยกัน แต่เมื่อพิจารณาร่วมกับผลของก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากการทดลองนี้ ซึ่งพบว่าที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้มากที่สุดโดยมีไฮโดรเจนยลต์เท่ากับ 15.03 มล./ก.ของแข็งระเหย

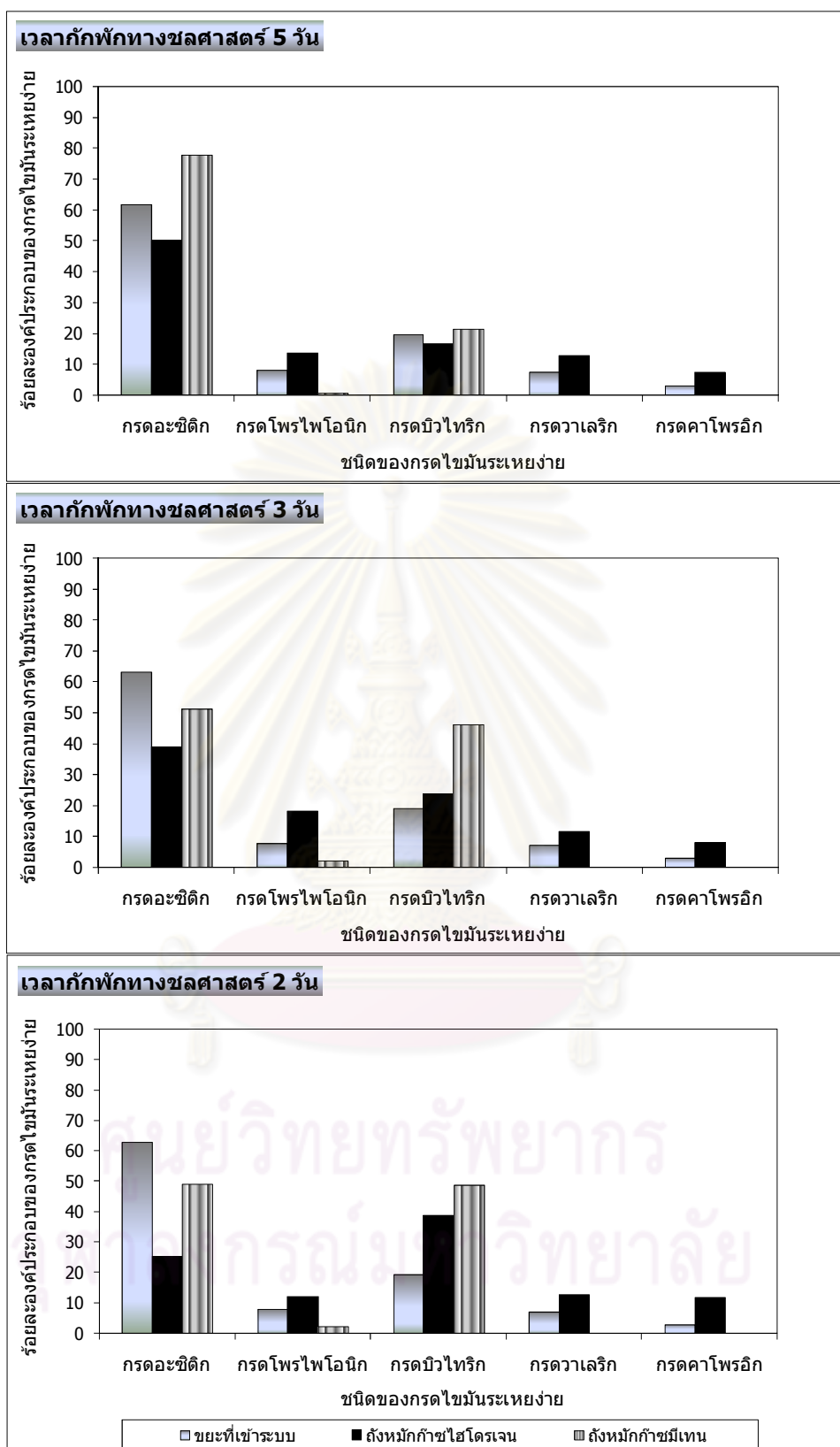
ได้ทั้งหมด โดยที่เวลากักพักทางชลศาสตร์นี้มีกรดอะซิติกและกรดบิวไทริกอยู่เท่ากับร้อยละ 25.12 และ 38.68 ของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรดบิวไทริกอาจจะมีความสัมพันธ์กับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในการทดลองนี้มากกว่ากรดอะซิติก ทั้งนี้เนื่องมาจากเมื่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้ความดันพาร์เซิลของก๊าซไฮโดรเจนในระบบมีค่าสูง ซึ่งการเพิ่มอำนาจของ NAD^+ ในระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างเช่นกลูโคสไม่สามารถเกิดขึ้นได้ด้วยวิธีปกติ ส่งผลทำให้มีกรดอะซิติกที่ได้จากการย่อยสลายลดลงโดยมีกรดไขมันระเหยง่ายชนิดอื่น เช่น กรดบิวไทริกและโพรไพโอนิก เกิดขึ้นทดแทน โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดอะซิติก (ที่ผลิตไฮโดรเจนได้) จะสามารถย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้เป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน เมื่อระบบมีความดันพาร์เซิลของก๊าซไฮโดรเจนต่ำกว่า 2×10^{-3} บรรยากาศ และต่ำกว่า 9×10^{-3} บรรยากาศ สำหรับการย่อยสลายกรดบิวไทริกและกรดโพรไพโอนิก ตามลำดับ (มันลิน ตันจุลเวศม์, 2542) จากผลการทดลองเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนของกรดบิวไทริกต่อกรดอะซิติกที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนลดลงมีผลทำให้อัตราส่วนของกรดบิวไทริกต่อกรดอะซิติกและไฮโดรเจนยึดเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.35

นอกจากนี้จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่าย

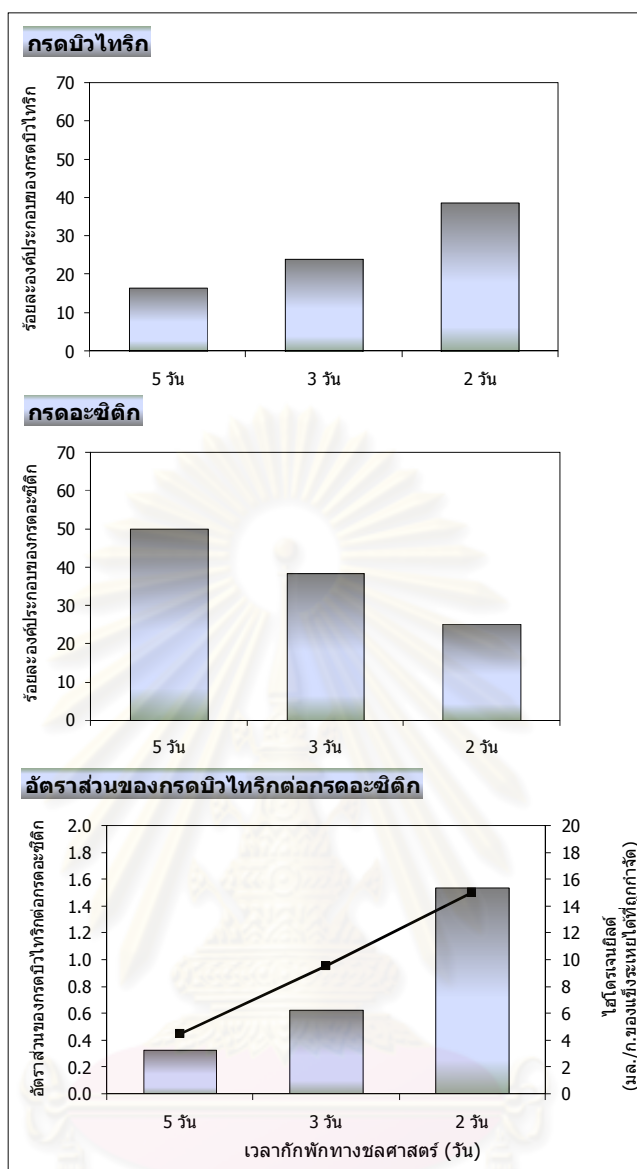
ดังกล่าว ยังสามารถอธิบายได้ถึงสาเหตุของการที่ถังหมักก๊าซมีเทนที่มีเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน มีปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดได้ โดยเป็นผลเนื่องมาจากการที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนเป็นแบคทีเรียที่เจริญเติบโตได้ช้า ดังนั้นแบคทีเรียจึงจะต้องใช้ระยะเวลาในการปรับตัวเพื่อนำซับสเตรทที่เข้าสู่ระบบไปใช้ ทำให้ในการเดินระบบระยะแรกๆ (เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน) มีปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่ำ ถึงแม้ว่าในน้ำเสียออกของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนจะมีกรดอะซิติกซึ่งเป็นอาหารของแบคทีเรียกลุ่มนี้ อยู่ในปริมาณที่สูงกว่าที่เวลากักพักทางชลศาสตร์อื่นๆ ก็ตาม แต่เมื่อเดินระบบได้ระยะหนึ่งแบคทีเรียจะมีความคุ้นเคยกับน้ำเสียหรือซับสเตรทมากขึ้นทำให้สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้เพิ่มขึ้นด้วย ดังจะเห็นได้จากปริมาณก๊าซมีเทนที่เพิ่มมากขึ้นที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน ส่วนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์สั้นเท่ากับ 2 วัน สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ยังอยู่ในรูปที่แบคทีเรียกลุ่มสร้างก๊าซมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ได้จึงส่งผลทำให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ลดลงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.34

ตารางที่ 4.28 สรุปร้อยละประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากัก
พักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

ชนิดของกรด ไขมันระเหยง่าย	ร้อยละองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่าย			ปริมาณก๊าซต่อกรัมของซบสเตรท	
	ขยะเข้า ระบบ	น้ำออกจากถัง หมักก๊าซ ไฮโดรเจน	น้ำออกจากถัง หมักก๊าซ มีเทน	ก๊าซไฮโดรเจนต่อ กรัมของของแข็ง ระเหยได้ทั้งหมด ที่ถูกกำจัด	ก๊าซมีเทนต่อ กรัมของของแข็ง ระเหยได้ทั้งหมด ที่ถูกกำจัด
เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ 5 วัน					
กรดอะซีติก	61.89	50.14	77.88	4.50	67.47
กรดโพรไพโอนิก	7.96	13.56	0.74		
กรดบิวไทรริก	19.53	16.49	21.37		
กรดวาเลริก	7.45	12.57	0.00		
กรดคาโปรอิก	3.18	7.24	0.00		
เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ 3 วัน					
กรดอะซีติก	63.36	38.56	51.44	9.57	114.06
กรดโพรไพโอนิก	7.69	17.71	2.17		
กรดบิวไทรริก	19.01	24.10	46.39		
กรดวาเลริก	7.04	11.32	0.00		
กรดคาโปรอิก	2.92	8.31	0.00		
เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ 2 วัน					
กรดอะซีติก	62.91	25.12	48.94	15.03	34.42
กรดโพรไพโอนิก	8.09	11.99	2.37		
กรดบิวไทรริก	19.24	38.68	48.69		
กรดวาเลริก	6.99	12.63	0.00		
กรดคาโปรอิก	2.77	11.58	0.00		



รูปที่ 4.34 ร้อยละองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ



รูปที่ 4.35 ร้อยละองค์ประกอบและอัตราส่วนของกรดบิวโทริกและกรดอะซีติก
ในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ

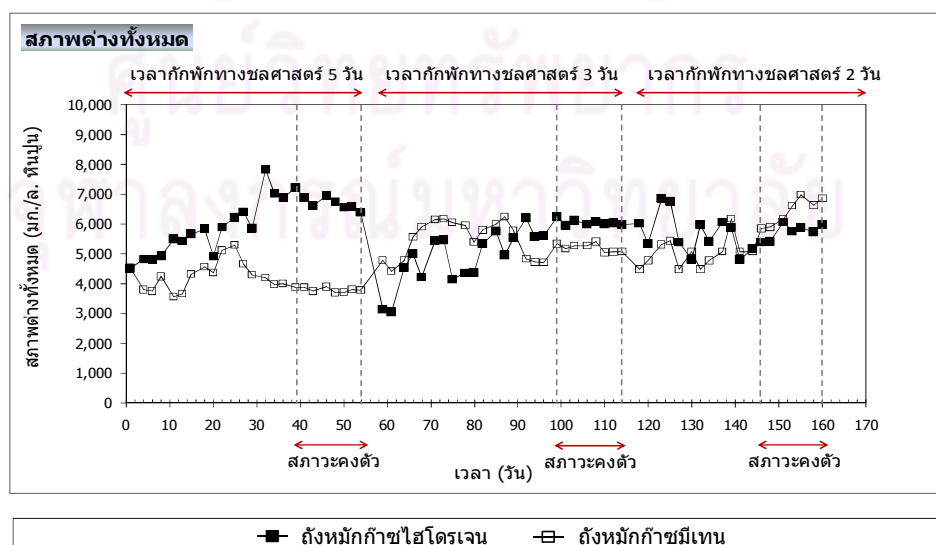
4.4.3.2 สภาพต่างทั้งหมด

ผลการศึกษาสภาพต่างทั้งหมดของระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนในการทดลองนี้เมื่อพิจารณาตามระยะทางพบว่า น้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนมีสภาพต่างสูงกว่าสภาพต่างทั้งหมดในขณะที่เข้าระบบ ซึ่งผลการศึกษาในการทดลองนี้มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกับผลการศึกษาสภาพต่างทั้งหมดในการทดลองแบบทีละเทในการทดลองที่ 1 ซึ่งพบว่าสภาพต่างทั้งหมดมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจากสภาพต่างทั้งหมดในขณะก่อนเริ่มต้นการทดลอง แต่ในการทดลองนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพต่างตามระยะทางได้ดียิ่งขึ้น ปริมาณ

สภาพต่างโดยรวมของระบบในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 5,747-6,048 มก./ล. หินปูน ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นสูงกว่าสภาพต่างทั้งหมดในขณะที่เข้าระบบเท่ากับร้อยละ 69.69-74.00 ซึ่งเป็นผลมาจากการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับค่าพีเอชในระบบ ซึ่งจะมีการดึงเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาทำปฏิกิริยาเกิดเป็นโซเดียมไบคาร์บอเนต ซึ่งจะแตกตัวให้ไบคาร์บอเนตไอออนเพิ่มสภาพต่างให้กับระบบ และเกิดจากการมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อยู่สูงภายในถังหมักก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนจะละลายน้ำเกิดเป็นกรดคาร์บอนิกซึ่งสามารถแตกตัวให้ไบคาร์บอเนตไอออนได้อีกด้วย จึงมีผลโดยรวมทำให้สภาพต่างทั้งหมดของระบบเพิ่มสูงขึ้น สำหรับถังหมักก๊าซมีเทนมีปริมาณสภาพต่างทั้งหมดอยู่ในช่วง 3,799-6,427 มก./ล. หินปูน การเปลี่ยนแปลงของสภาพต่างทั้งหมดภายในระบบสองขึ้นตอนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4.29 และในรูปที่ 4.36

ตารางที่ 4.29 สรุปสภาพต่างทั้งหมดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ของถัง หมักก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	สภาพต่างทั้งหมด (มก./ล. หินปูน)		
	ขณะเข้าระบบ	น้ำออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	น้ำออกจากถังหมักก๊าซมีเทน
5	1,752	6,744	3,799
3	1,743	6,048	5,207
2	1,739	5,747	6,427



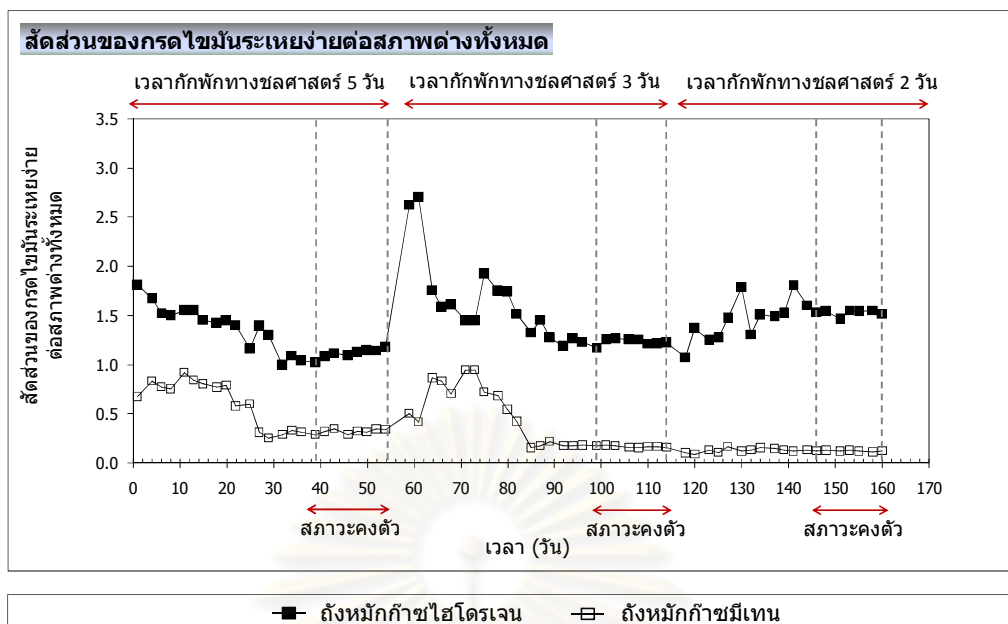
รูปที่ 4.36 สภาพต่างทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

4.4.3.3 สัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมด

ผลการศึกษาสัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดตามระยะทางพบว่า สัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดภายในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนมีค่าลดลงจากสัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดของขยะที่เข้าระบบที่มีสัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดอยู่ในช่วง 2.30-2.33 อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของสภาพต่างทั้งหมดโดยมีสัดส่วนลดลงเหลืออยู่ในช่วง 1.11-1.53 ซึ่งถือว่ามีค่าค่อนข้างสูง แต่เนื่องจากกระบวนการที่เกิดขึ้นภายในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเป็นขั้นของการสร้างกรดจึงทำให้ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายมีค่าสูงส่งผลให้สัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดสูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อศึกษาสัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดในถังหมักก๊าซมีเทน พบว่ามีสัดส่วนลดลงจนเหลืออยู่ในช่วง 0.12-0.32 ซึ่งถือว่ามีค่าเหมาะสมสำหรับระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจน การเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดในการทดลองนี้แสดงดังตารางที่ 4.30 และรูปที่ 4.37

ตารางที่ 4.30 สรุปสัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวของเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ของถัง หมักก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	สัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมด		
	ขยะเข้าระบบ	น้ำออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	น้ำออกจากถังหมักก๊าซมีเทน
5	2.30	1.11	0.32
3	2.31	1.23	0.17
2	2.33	1.53	0.12



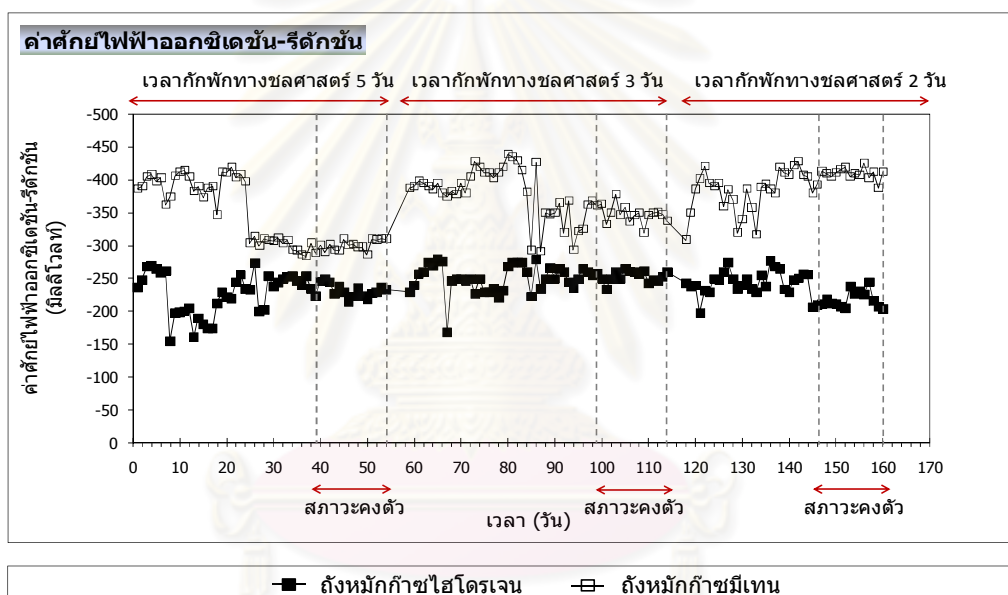
รูปที่ 4.37 สัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพต่างทั้งหมดที่เวลาเก็บพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

4.4.3.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน

ผลการศึกษาค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชันหรือค่าโออาร์พีของระบบตามระยะทางพบว่า ถังหมักก๊าซไฮโดรเจนมีค่าโออาร์พีอยู่ในช่วง -218.20 ถึง -253.63 และ -228.78 ถึง -251.36 ที่สถานะคงตัวและโดยเฉลี่ยตลอดการทดลองของระบบ ตามลำดับ เมื่อน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทนพบว่าค่าโออาร์พีที่เป็นลบมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการที่ระบบมีสถานะที่เป็นแบบไร้ออกซิเจนมากขึ้นโดยค่าโออาร์พีของระบบที่วัดได้มีค่าอยู่ในช่วง -300.19 ถึง -408.60 และ -342.98 ถึง -391.72 ที่สถานะคงตัวและโดยเฉลี่ยตลอดการทดลองของระบบ ตามลำดับ โดยที่ค่าโออาร์พีของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาเก็บพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ มีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันดังตารางที่ 4.31

ตารางที่ 4.31 สรุปค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชันของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของ ถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ของถังหมัก ก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน ในถังหมักก๊าซไฮโดรเจน (มิลลิโวลต์)		ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน ในถังหมักก๊าซมีเทน (มิลลิโวลต์)	
	สภาวะคงตัว	ค่าเฉลี่ยของระบบ	สภาวะคงตัว	ค่าเฉลี่ยของระบบ
5	-231.56	-228.78	-300.19	-342.98
3	-253.63	-251.36	-348.38	-371.39
2	-218.20	-235.19	-408.60	-391.72



รูปที่ 4.38 ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชันของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

4.4.3.5 อุดหนุน

การศึกษาค่าอุดหนุนของระบบในการทดลองนี้ใช้วิธีการเทียบค่าอุดหนุนของถังหมักกับอุดหนุนของห้องและน้ำกลั่นซึ่งวางบริเวณใกล้กับถังหมักเพื่อใช้ในการอ้างอิงเปรียบเทียบกัน โดยไม่ได้มีการเปรียบเทียบกับอุดหนุนของขยะที่เข้าระบบ เนื่องจากการป้อนขยะเข้าสู่ระบบในการทดลองนี้จะมีการป้อนเป็นครั้งคราว (6 และ 3 รอบ/วัน) โดยมีการเปลี่ยนขยะที่เข้าระบบทุกวันในช่วงเช้า ทำให้มีระยะเวลาระหว่างการป้อนขยะและเวลาที่น้ำเสียออกจากถังหมักค่อนข้างนาน ซึ่งในระหว่างนั้นอาจมีปัจจัยอื่นๆ รวมทั้งอุดหนุนของห้องที่มีการเปลี่ยนแปลงและส่งผลต่อค่า

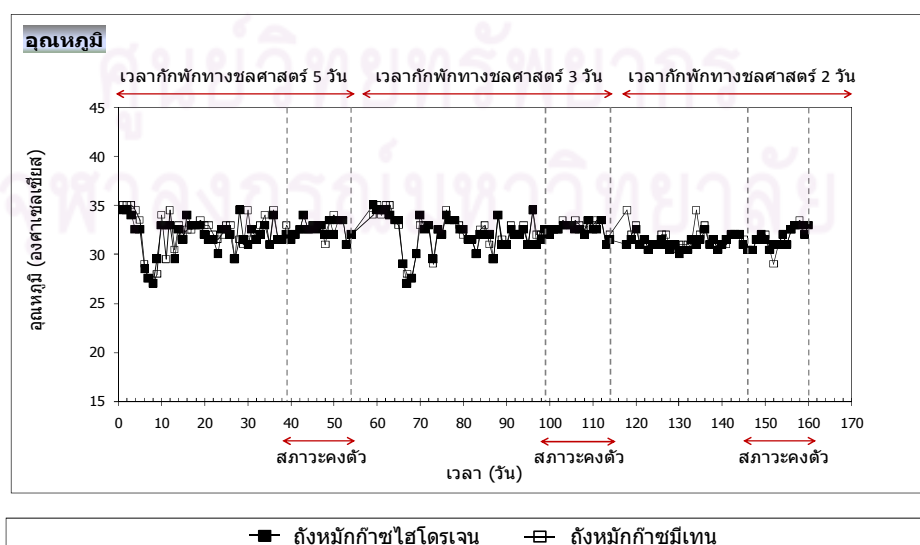
อุณหภูมิในระบบได้ ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิของระบบกับอุณหภูมิของห้องและน้ำอ้างอิงในขณะตรวจวัดซึ่งจะสามารถแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงภายในระบบในการทดลองนี้ได้ดีกว่า จากผลการศึกษาพบว่าอุณหภูมิภายในระบบมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของน้ำอ้างอิงเนื่องมาจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของแบคทีเรียภายในระบบ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิมีค่าที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของห้องโดยภายในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนมีค่าอยู่ในช่วง 31.67-32.53 และ 31.37-32.07 ที่สภาวะคงตัวและโดยเฉลี่ยตลอดการทดลองของระบบ ตามลำดับ สำหรับค่าอุณหภูมิภายในถังหมักก๊าซมีเทนพบว่ามีค่าโดยเฉลี่ยสูงกว่าถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเล็กน้อยโดยมีค่าอยู่ในช่วง 31.60-32.75 และ 31.63-32.36 ที่สภาวะคงตัวและโดยเฉลี่ยตลอดการทดลองของระบบตามลำดับ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เวลาพักพักทางจุลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก ดังตารางที่ 4.32 และรูปที่ 4.39

ตารางที่ 4.32 สรุปค่าอุณหภูมิของระบบที่เวลาพักพักทางจุลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลาพักพักทางจุลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	อุณหภูมิในถังหมักก๊าซไฮโดรเจน (องศาเซลเซียส)		อุณหภูมิในถังหมักก๊าซมีเทน (องศาเซลเซียส)	
	สภาวะคงตัว	ค่าเฉลี่ยของระบบ	สภาวะคงตัว	ค่าเฉลี่ยของระบบ
5 ⁿ	32.53	32.07	32.72	32.32
3 ^u	32.50	32.21	32.75	32.36
2 ^h	31.67	31.37	31.60	31.63

หมายเหตุ:

ⁿ อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิของน้ำอ้างอิงโดยเฉลี่ยที่เวลาพักพักทางจุลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 3 และ 2 วัน มีค่าเท่ากับ 32.39 และ 30.51 32.48 และ 30.55 31.87 และ 30.07 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



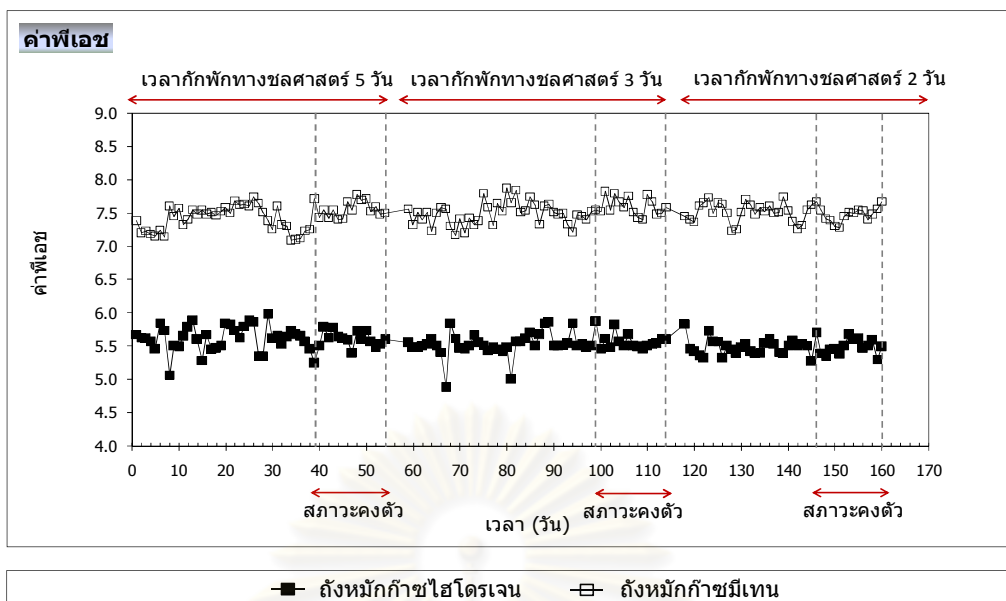
รูปที่ 4.39 ค่าอุณหภูมิของระบบที่เวลาพักพักทางจุลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

4.4.3.6 ค่าพีเอช

ในการทดลองนี้มีการควบคุมค่าพีเอชของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนให้มีค่าเท่ากับ 5.5 ตลอดการทดลอง แต่อย่างไรก็ตามค่าพีเอชของระบบที่ได้ทำการตรวจวัดในระหว่างการเก็บตัวอย่างมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงไปจากค่าที่ควบคุมเล็กน้อยซึ่งภายหลังจากการตรวจวัดจะมีการปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 5.5 อีกครั้งโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2 นอร์มัล จากผลการตรวจวัดค่าพีเอชของระบบพบว่าค่าพีเอชโดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวและตลอดการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 4.33 และรูปที่ 4.40 โดยที่ชุดการทดลองที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ มีค่าพีเอชที่ค่อนข้างใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 5.50-5.59 และ 5.49-5.61 โดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวและตลอดการทดลอง ตามลำดับ สำหรับถังหมักก๊าซมีเทนจะมีการควบคุมค่าพีเอชให้มีค่าอยู่ในช่วง 7.0-8.0 โดยมีการเติมสารเคมีบริเวณถังหมักเพื่อปรับค่าพีเอชเป็นครั้งคราวเมื่อพีเอชมีค่าลดลงต่ำกว่าช่วงพีเอชที่ควบคุมมากเท่านั้น เนื่องจากน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนมีปริมาณสภาพต่างค่อนข้างสูง อีกทั้งยังพบว่าค่าพีเอชของน้ำเสียที่ออกจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนในถังพักน้ำเสียเพื่อรอป้อนเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทนมีการเพิ่มขึ้นของค่าพีเอชโดยธรรมชาติอยู่แล้ว จึงไม่ได้ทำการปรับค่าพีเอชก่อนเข้าระบบแต่อย่างใด ซึ่งผลการตรวจวัดค่าพีเอชภายในระบบในขณะที่ทำการเก็บตัวอย่างจากถังหมัก พบว่ามีค่าพีเอชที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ อยู่ในช่วง 7.48-7.60 และ 7.45-7.52 โดยเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวและตลอดการทดลองตามลำดับ

ตารางที่ 4.33 สรุปค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

เวลากักพักทาง ชลศาสตร์ของถังหมัก ก๊าซไฮโดรเจน (วัน)	ค่าพีเอชในถังหมักก๊าซไฮโดรเจน		ค่าพีเอชในถังหมักก๊าซมีเทน	
	สภาวะคงตัว	ค่าเฉลี่ยของระบบ	สภาวะคงตัว	ค่าเฉลี่ยของระบบ
5	5.59	5.61	7.56	7.45
3	5.58	5.54	7.60	7.52
2	5.50	5.49	7.48	7.50



รูปที่ 4.40 ค่าพีเอชของระบบที่เวลาพักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

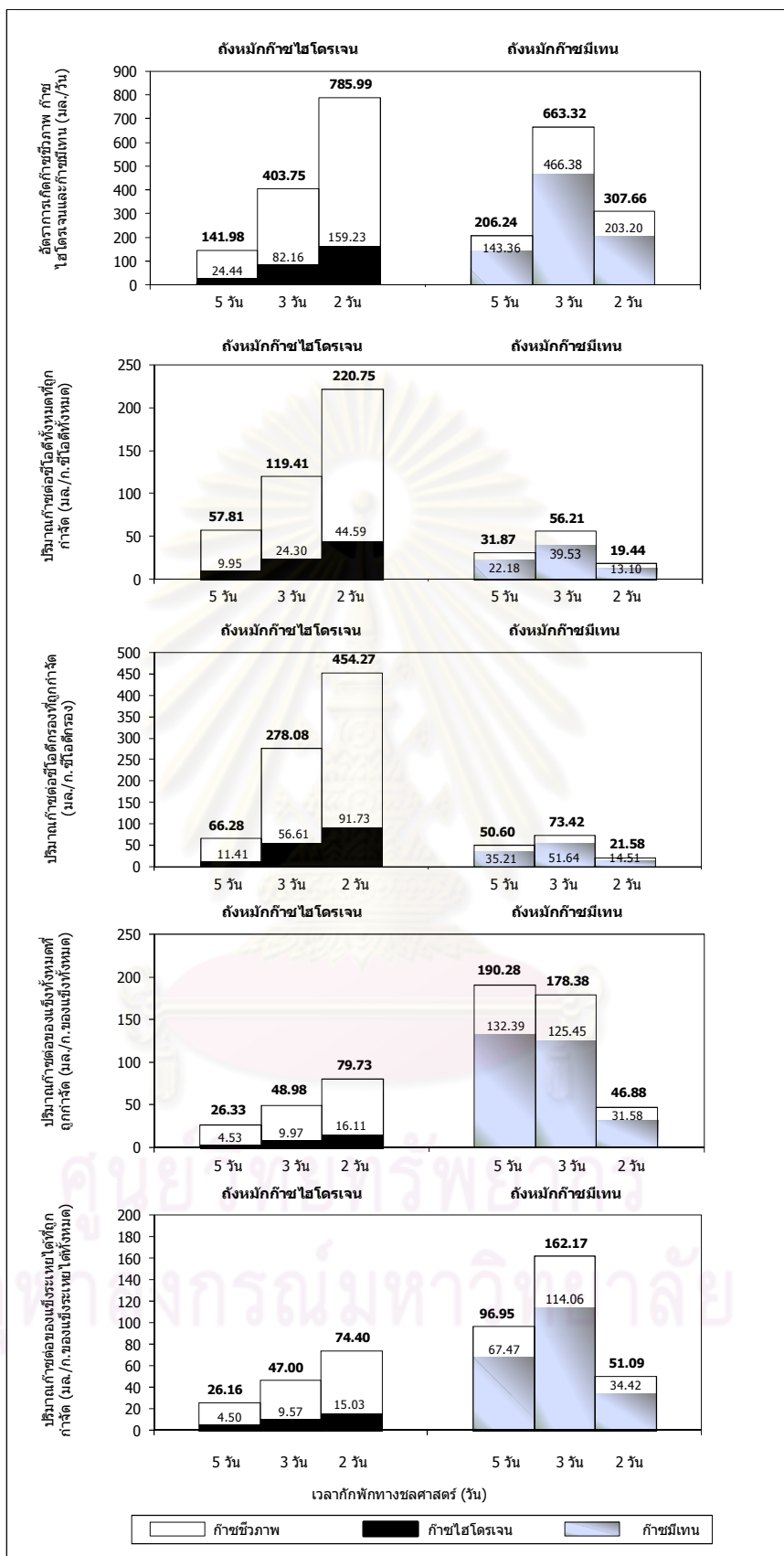
นอกจากผลการทดลองที่เวลาพักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ ทั้ง 3 ค่า ตั้งแต่ 5 3 และ 2 วันแล้ว ผู้วิจัยยังได้ทำการทดลองเดินระบบ โดยลดระยะเวลาพักพักทางชลศาสตร์เหลือเท่ากับ 1 วันเพื่อศึกษาผลการทดลองที่ได้ โดยเมื่อเดินระบบจนครบ 1 สัปดาห์พบว่า ยังไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น อีกทั้งยังพบว่าภายในถังหมักมีตะกอนสะสมอยู่ค่อนข้างมากดังรูปที่ 4.41 ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าที่เวลาพักพักทางชลศาสตร์ดังกล่าวมีระยะเวลาที่สั้นเกินไปจนอาจเป็นผลทำให้แบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดถูกล้างออกจากระบบทำให้ไม่มีการย่อยสลายเกิดขึ้น



รูปที่ 4.41 ลักษณะน้ำเสียในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนที่เวลาพักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 1 วัน

4.4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

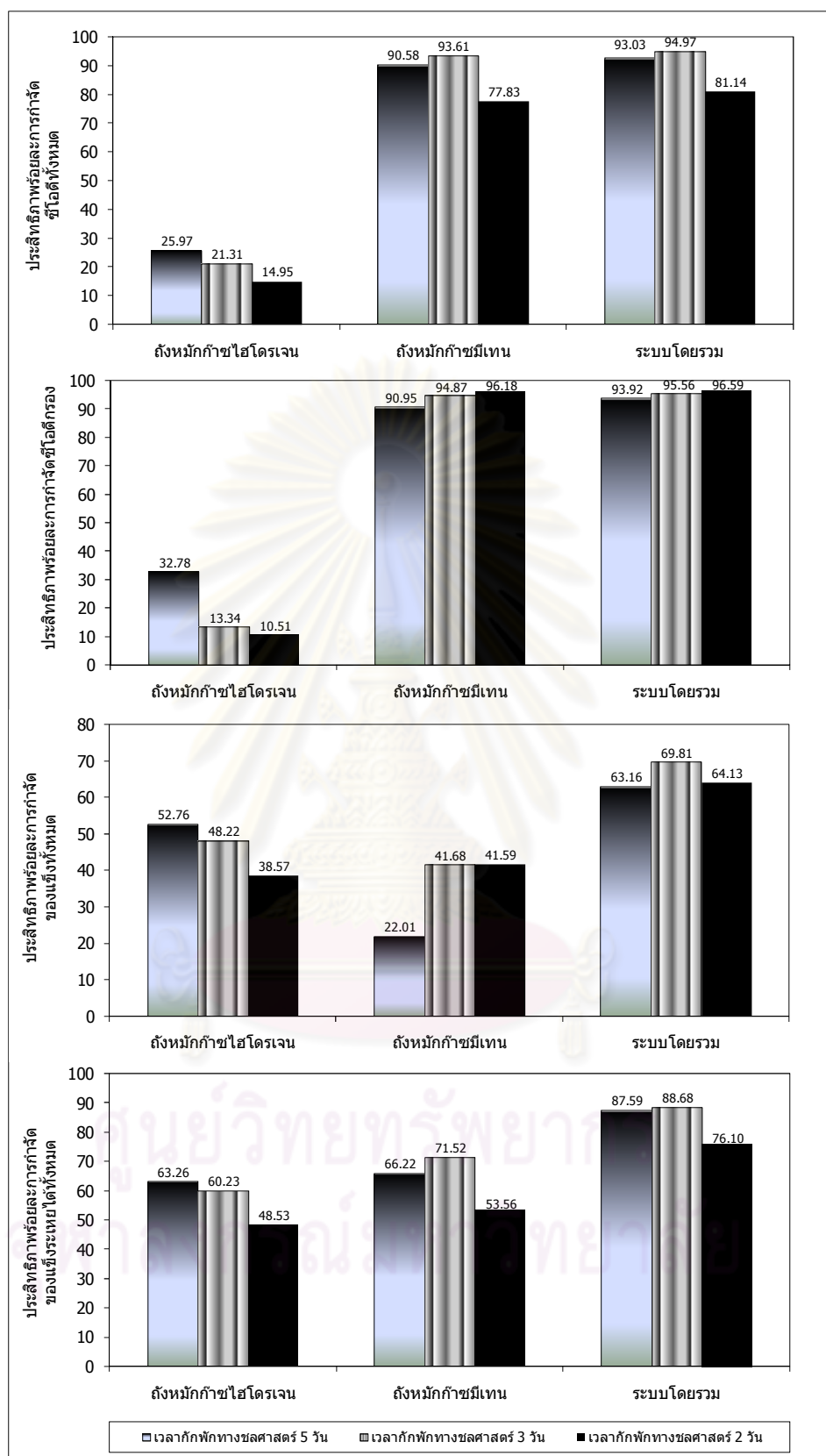
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ จะเห็นได้ว่าที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วัน มีปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้สูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 785.99 และ 159.23 มล./วัน ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 และ 3 วัน ซึ่งมีปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้เท่ากับ 141.98 และ 24.44 มล./วัน และ 403.75 และ 82.16 มล./วัน ตามลำดับ โดยผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลากักพักทางชลศาสตร์ลดลงมีผลทำให้ไฮโดรเจนยิลด์เพิ่มขึ้น ซึ่งที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วัน มีไฮโดรเจนยิลด์สูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 15.03 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัด และที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 และ 3 วัน มีค่าไฮโดรเจนยิลด์เท่ากับ 4.50 และ 9.57 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัด ตามลำดับ สำหรับถังหมักก๊าซมีเทนพบว่ามีผลการทดลองแตกต่างจากผลที่ได้จากถังหมักก๊าซไฮโดรเจน โดยชุดการทดลองที่มีเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน มีปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่ผลิตได้สูงสุด เมื่อคิดเป็นมีเทนยิลด์พบว่า มีค่าเท่ากับ 114.06 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัด โดยผลการศึกษาปริมาณก๊าซและค่ายิลด์ของก๊าซชีวภาพและก๊าซชนิดต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.42 ทั้งนี้จากการทดลองที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 3 และ 2 วัน รวมทั้งการทดลองเดินระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 1 วัน มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ Gomez และคณะ (2006) ที่ทำการศึกษากการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากขยะชุมชนที่ประกอบไปด้วยเศษผักและผลไม้ เศษอาหารประเภทแป้งและกระดาษด้วยระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอน ซึ่งพบว่าเมื่อเวลากักพักทางชลศาสตร์ลดลงมีผลทำให้ไฮโดรเจนยิลด์เพิ่มสูงขึ้น และสอดคล้องกับงานวิจัยของ Arooj และคณะ (2008) ที่ทำการศึกษากการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากแป้งด้วยระบบต่อเนื่องแบบขั้นตอนเดียว ซึ่งพบว่าไฮโดรเจนยิลด์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเวลากักพักทางชลศาสตร์ลดลง แต่เมื่อเวลากักพักทางชลศาสตร์มีค่าต่ำเกินไปมีผลทำให้ค่าไฮโดรเจนยิลด์ลดลงจากการที่แบคทีเรียถูกล้างออกจากระบบ



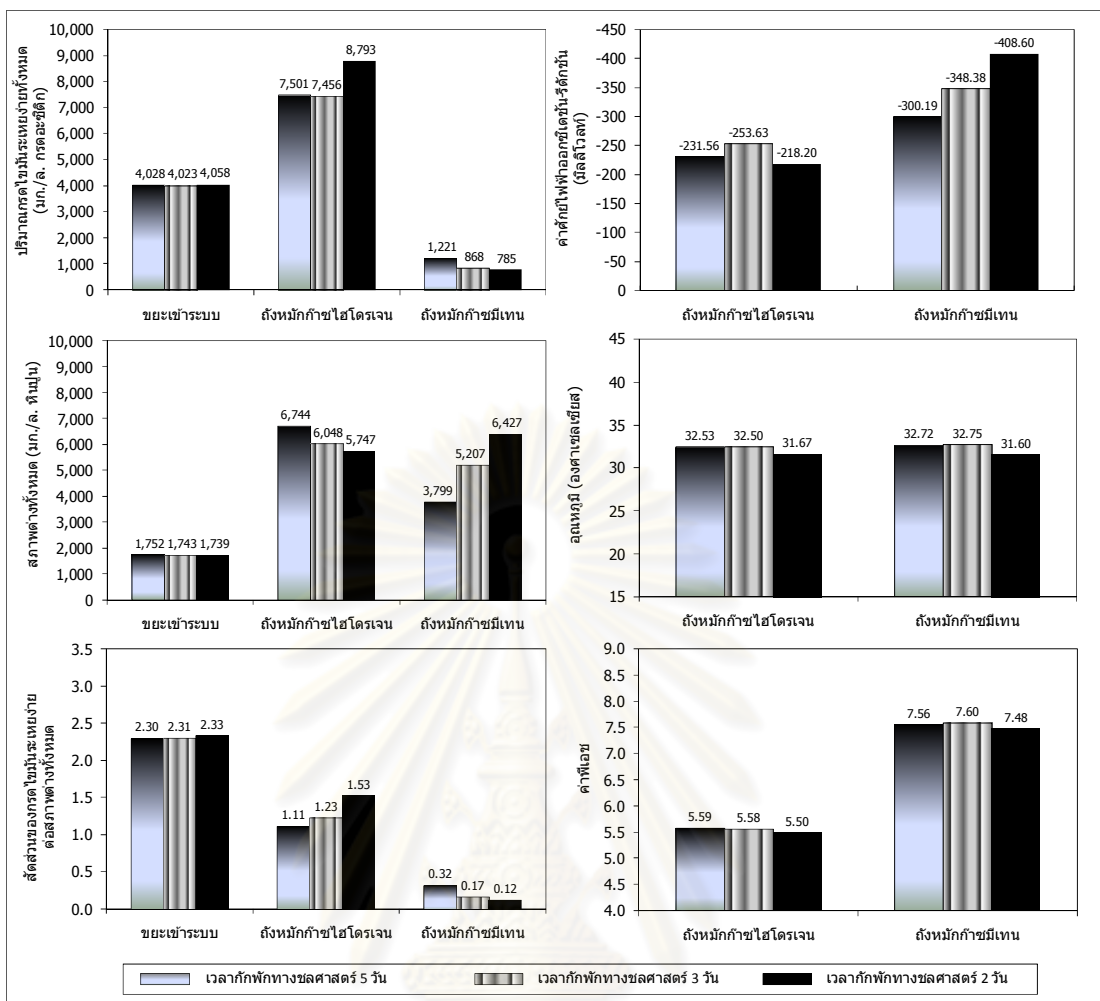
รูปที่ 4.42 เปรียบเทียบอัตราการผลิตข้าวสีขาว ก้าวไฮโดรเจน ก้าวมีเทนและปริมาณข้าวต่อกรัมของซบัสเตรทที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของตั้งหมักก้าวไฮโดรเจนต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดมลสารของระบบโดยรวมตามระยะทางที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ พบว่าการกำจัดซีโอไซด์ส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่ถังหมักก๊าซมีเทน ส่วนการกำจัดของแข็งและของแข็งระเหยได้ทั้งหมดพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเมื่อเวลากักพักทางชลศาสตร์มีค่าเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์ทั้งหมด ซีโอไซด์กรอง ของแข็งและของแข็งระเหยได้ทั้งหมดเพิ่มสูงขึ้นจากการที่แบคทีเรียมีระยะเวลาการสัมผัสกับซับสเตรทนานทำให้เกิดการย่อยสลายได้มากขึ้น แต่สารอินทรีย์ที่กำจัดได้เพิ่มขึ้นนี้ไม่มีความสัมพันธ์กับปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ โดยที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 วัน ซึ่งมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ต่ำสุดพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดมลสารต่างๆ ซึ่งได้แก่ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์ทั้งหมด ซีโอไซด์กรอง ของแข็งและของแข็งระเหยได้ทั้งหมดสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 25.97 32.78 52.76 และ 63.26 ตามลำดับ โดยที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 3 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดมลสารต่างๆ เท่ากับร้อยละ 21.31 13.34 48.22 และ 60.23 ตามลำดับ และที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดมลสารต่างๆ เท่ากับร้อยละ 14.95 10.51 38.57 และ 48.53 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการกำจัดมลสารภายในถังหมักก๊าซมีเทนพบว่าที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์ทั้งหมด ของแข็งและของแข็งระเหยได้ทั้งหมดสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 93.61 41.68 และ 71.52 ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอไซด์กรองพบว่ามีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพการกำจัดที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วัน (ร้อยละ 96.18) เล็กน้อยโดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 94.87 ดังรูปที่ 4.43

เมื่อเปรียบเทียบสภาวะการทำงานของระบบจากปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดภายในถังหมักก๊าซไฮโดรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลากักพักทางชลศาสตร์ลดลง เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบต่อวันสูงทำให้มีการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วัน มีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดสูงสุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 8,793 มก./ล. กรดอะซิติก สำหรับที่เวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 และ 3 วัน พบว่ามีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดเท่ากับ 7,501 และ 7,456 มก./ล. กรดอะซิติกตามลำดับ และเมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายพบว่ามีกรดอะซิติกและกรดบิวไทริกเป็นองค์ประกอบหลักในทุกชุดการทดลอง สำหรับพารามิเตอร์แสดงสภาวะการทำงานของระบบอื่นๆ ที่แต่ละเวลากักพักทางชลศาสตร์แสดงดังรูปที่ 4.44



รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดมลสารที่เวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

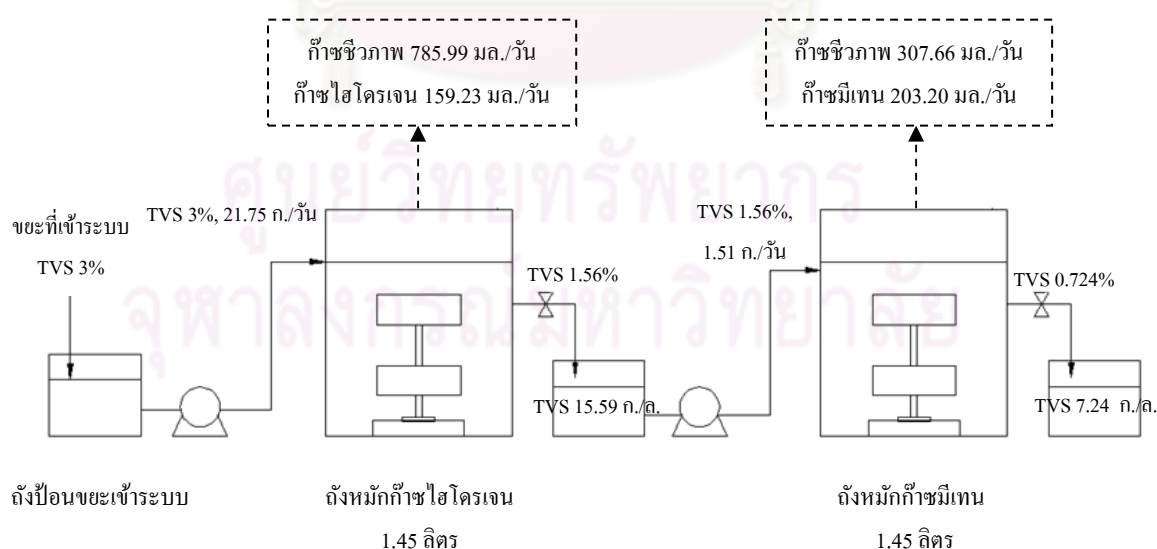


รูปที่ 4.44 เปรียบเทียบสภาวะการทำงานของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ

โดยสรุป เมื่อพิจารณาเฉพาะในส่วนของการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ จากผลการทดลองจะเห็นว่า ชุดการทดลองที่มีเวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน มีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้สูงสุด โดยชุดการทดลองนี้มีผลการศึกษาวารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับสภาวะการทำงานของระบบที่มีค่าค่อนข้างเหมาะสม ดังนั้นที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน จึงเป็นเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่มีความเหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสดโดยใช้ระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนที่ได้จากการทดลองนี้

4.5 สักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสดโดยการหมักแบบไร้ออกซิเจน

ผลการศึกษาจากการทดลองแบบที่ละเทและแบบต่อเนื่องสามารถแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสดโดยการหมักแบบไร้ออกซิเจนได้ ซึ่งจากสมมูลมวลสารภายในระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนที่ใช้ในการทดลองนี้ที่เวลากักพักทางจุลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วันซึ่งเป็นเวลากักพักทางจุลศาสตร์ที่เหมาะสมดังรูปที่ 4.45 สามารถอธิบายได้ว่าปริมาณมวลสารในขยะที่เข้าระบบในรูปของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่เข้าสู่ถังหมักก๊าซไฮโดรเจนร้อยละ 48.53 จะถูกนำไปใช้ในการสร้างก๊าซชีวภาพโดยการผลิตเป็นก๊าซไฮโดรเจนได้เท่ากับ 159.23 มล./วัน จากนั้นของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่เหลือในน้ำเสี้ยวจะถูกป้อนเข้าสู่ถังหมักก๊าซมีเทนโดยที่ของแข็งระเหยได้ทั้งหมดในน้ำเสี้ยวร้อยละ 53.56 จะถูกนำไปใช้ในการสร้างก๊าซชีวภาพโดยในจำนวนนี้มีปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นเท่ากับ 203.20 มล./วัน ซึ่งปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ดังกล่าวหากมีการนำไปใช้ในการผลิตเป็นแหล่งพลังงานจะสามารถสร้างพลังงานความร้อนได้เท่ากับ 143.26 และ 1,232.46 กิโลจูล/กก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัด ตามลำดับ (พลังงานความร้อนที่ได้จากก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทนเท่ากับ 237 และ 890.30 กิโลจูล/โมล ตามลำดับ) หรือคิดเป็นพลังงานที่ได้จากระบบโดยรวมเท่ากับ 1,375.72 กิโลจูล/กก.ของของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัด หรือ 2,056.38 กิโลจูล/ตันของขยะที่เข้าระบบ



รูปที่ 4.45 สมมูลมวลสารของระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพและเคมีของขยะอินทรีย์ ศักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ และปัจจัยเริ่มต้นรวมถึงสภาวะการทำงานที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสดโดยการหมักแบบไร้ออกซิเจนด้วยการทดลองแบบที่ละเทและระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนนี้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 การทดลองที่ 1

1. ขยะอินทรีย์จากตลาดสดมีองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่ประกอบไปด้วยขยะจำพวกเศษผัก ซึ่งพบว่าปริมาณสารอินทรีย์ค่อนข้างสูงถึงร้อยละ 85 และมีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและเหล็กอยู่ในปริมาณที่ไม่มากนัก ซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีการเติมสารอาหารเพิ่มเติมให้กับขยะในการนำไปใช้ในการทดลอง

2. ความเข้มข้นของแฉะระเหยได้เริ่มต้นมีผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสด จากการปรับเปลี่ยนร้อยละความเข้มข้นของแฉะระเหยได้เริ่มต้นตั้งแต่ร้อยละ 2-5 หรือเท่ากับ 20-50 ก./ล. พบว่าเมื่อความเข้มข้นของแฉะระเหยได้เริ่มต้นเพิ่มสูงขึ้นจะมีผลทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อความเข้มข้นของแฉะระเหยได้เริ่มต้นมีค่าสูงเกินไปจะมีผลยับยั้งแบคทีเรียภายในระบบและทำให้การผลิตก๊าซยุติลงในที่สุด

1. ที่ร้อยละความเข้มข้นของแฉะระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับ 3 มีความเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์จากตลาดสดด้วยการทดลองแบบที่ละเทมากที่สุด โดยมีก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดเท่ากับ 459.7 มล. และมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่อชั่วโมงในรูปของปริมาณของแฉะระเหยได้ที่เข้าระบบเท่ากับ 15.3 มล./ก.ของแฉะระเหยได้ทั้งหมด และที่ความเข้มข้นของแฉะระเหยได้เริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 5 ซึ่งมีความเข้มข้นของแฉะระเหยได้เริ่มต้นสูงสุดพบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ต่ำสุดโดยมีค่าเท่ากับ 240.9 มล. และมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนต่อชั่วโมงของแฉะระเหยได้ที่เข้าระบบเท่ากับ 4.80 มล./ก.ของแฉะระเหยได้ทั้งหมด

5.1.2 การทดลองที่ 2

1. เวลาพักพักทางชลศาสตร์มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ โดยเมื่อลดเวลาพักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนลงพบว่าผลทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้เพิ่มขึ้น โดยที่เวลาพักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 2 วันมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้สูงสุด โดยมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ต่อปริมาณของแข็งระเหยได้เท่ากับ 15.03 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัด ซึ่งมีค่าสูงกว่าที่เวลาพักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 5 (4.50 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัด) และ 3 วัน (9.57 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัด) เท่ากับร้อยละ 70.06 และ ร้อยละ 36.33 ตามลำดับ

2. ถังหมักก๊าซมีเทนในชุดการทดลองที่มีเวลาพักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน มีปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้สูงสุดโดยมีค่าเท่ากับ 114.06 มล./ก.ของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ถูกกำจัด หรือเท่ากับ 39.53 มล./ก.ซีโอดีทั้งหมดที่ถูกกำจัด

3. ประสิทธิภาพการกำจัดมลสารส่วนใหญ่เกิดขึ้นในถังหมักก๊าซมีเทน โดยประสิทธิภาพการกำจัดมลสารในรูปของซีโอดีทั้งหมดของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนและถังหมักก๊าซมีเทนที่เวลาพักพักทางชลศาสตร์ต่างๆ มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 14.95–25.97 และร้อยละ 77.83–93.61 ตามลำดับ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีกรอมมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 10.51–32.78 และร้อยละ 90.95–96.18 ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะในการนำไปใช้

1. เนื่องจากถังหมักก๊าซไฮโดรเจนมีองค์ประกอบของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในก๊าซชีวภาพค่อนข้างสูง ซึ่งก๊าซชนิดนี้เป็นก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญชนิดหนึ่ง ดังนั้นเมื่อมีการนำไปใช้ในระบบจริงจึงควรที่จะมีการติดตั้งอุปกรณ์ในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ โดยการดักจับไว้ในรูปอื่นๆ เพื่อลดการปล่อยออกสู่บรรยากาศ ซึ่งจะช่วยให้ก๊าซไฮโดรเจนที่ได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นอีกด้วย

2. น้ำที่ออกจากถังหมักก๊าซมีเทนในระบบต่อเนื่องแบบสองขั้นตอนยังมีค่าซีโอดีที่เกินเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมที่กำหนดไว้ ดังนั้นน้ำที่ออกจากระบบจึงควรที่จะมีการบำบัดต่อด้วยระบบอื่นๆ โดยอาจใช้ระบบบำบัดน้ำเสียที่สามารถเดินระบบและบำรุงรักษาได้ง่าย เช่น บ่อเหม็น หรือระบบอื่นๆ ตามความเหมาะสม เพื่อบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานก่อนปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อม

5.3 ข้อเสนอแนะในการวิจัยเพิ่มเติม

1. งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์ที่ได้จากตลาดสด ซึ่งผลการศึกษาที่ได้้นอกจากจะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะอินทรีย์แล้ว ยังสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากเศษพืชผลทางการเกษตรที่มีลักษณะใกล้เคียงกับขยะอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนี้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการผลิตแหล่งพลังงานทดแทนของประเทศไทยซึ่งมีเศษพืชผลทางการเกษตรเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากต่อไปได้อีกด้วย

2. เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากขยะอินทรีย์ ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ถังปฏิกริยากวนสมบูรณ์เพื่อให้ขยะมีลักษณะเดียวกันมากที่สุดเนื่องจากขยะอินทรีย์โดยทั่วไปและขยะอินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดสูงซึ่งจะมีการย่อยสลายได้ยาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระบบผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่มีการใช้เวลากักพักทางชลศาสตร์ที่สั้นทำให้ขยะส่วนหนึ่งที่ย่อยสลายไม่ทันตกค้างอยู่ในระบบ อีกทั้งยังมีผลทำให้การป้อนขยะเข้าสู่ระบบโดยใช้เครื่องสูบน้ำทำได้ยากและต้องดูแลรักษาเครื่องสูบอย่างสม่ำเสมอ จึงควรที่จะมีการศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากขยะประเภทนี้ด้วยระบบอื่นๆ เพิ่มเติมโดยเป็นระบบที่ไม่จำเป็นต้องป้อนขยะเข้าระบบบ่อยๆ และไม่ต้องดูแลรักษามากนัก เช่น ระบบไร้อากาศแบบแห้ง เป็นต้น

3. เนื่องจากขยะอินทรีย์ประเภทเศษผักมีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัสในปริมาณไม่มากนัก จึงควรที่จะมีการศึกษาเกี่ยวกับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนร่วมกับการเติมของเสียประเภทอื่นๆ ที่มีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัสสูง เช่น มูลสัตว์ ของเสียจากโรงฆ่าสัตว์ ตะกอนน้ำเสียชุมชน เป็นต้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. วิศวกรรมกรรมการกำจัดน้ำเสีย. เล่ม 4. ม.ป.ท., 2543.
- ควบคุมมลพิษ, กรม. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. เล่ม 2.
กรุงเทพมหานคร : ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- ฉาไลสา ยุวอมรพิทักษ์. เทคโนโลยีชีวภาพกับพลังงาน[ออนไลน์]. (ม.ป.ป.). แหล่งที่มา :
<http://www.techno.msu.ac.th/bt/pdfdocxls/b.doc> [4 ธันวาคม 2549]
- ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ. ข้อมูลการลดและใช้ประโยชน์ขยะมูลฝอยชุมชนของเทศบาล องค์ประกอบและปริมาณขยะมูลฝอย ปี 2548 [online]. 2548. แหล่งที่มา: <http://www.pcd.go.th/download/waste.cfm?task=s2> [29 มกราคม 2553]
- ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. สำนักนโยบายและแผนทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2550. พิมพ์ครั้งที่ 1.
กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์วิบูลย์การปก, 2551.
- ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ. สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2550[online]. 2550. แหล่งที่มา: <http://www.pcd.go.th/Public/News/GetNewsThai.cfm?task=lt2006&id=15101> [29 มกราคม 2553]
- ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, กระทรวง. กรมควบคุมมลพิษ. สรุปสถานการณ์มลพิษของประเทศไทย ปี 2552[online]. 2552. แหล่งที่มา: <http://www.pcd.go.th/Public/News/GetNewsThai.cfm?task=lt2009&id=16172> [29 มกราคม 2553]
- ธีระ เกรอด. วิศวกรรมน้ำเสีย การบำบัดทางชีวภาพ. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- นันทนา อรุณฤกษ์. การจำแนกแบคทีเรียกลุ่มแอนแอโรบ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์ไอเอสพริ้นติ้งเฮ้าส์, 2549.
- พลังงาน, กระทรวง. สำนักนโยบายและแผนพลังงาน. แผนอนุรักษ์พลังงานและแนวทางหลักเกณฑ์ เงื่อนไข และลำดับความสำคัญของการใช้จ่ายเงิน กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ในช่วงปี 2551-2554 [online]. 2551. แหล่งที่มา: <http://www.eppo.go.th/encon/plan-2551-2554/encon-2551-2554.pdf> [19 มกราคม 2553]
- มันสิน ดันฑกุลเวสม์. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่ม 2. กรุงเทพมหานคร: แชน. อี. 68 คอนซัลติ้ง เอ็นจิเนียรส์, 2542.

วิทยา ขงเจริญ. ไฮโดรเจนพลังงานในอนาคต. วารสารพลังงาน 5 (2547) : 1-10.
 อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. พิมพ์ครั้งที่ 3.
 กรุงเทพมหานคร : สำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2549.
 อุดุณิยมหาวิทยาลัย, กรม. ก๊าซเรือนกระจก (Greenhouse gas)[online]. 2551. แหล่งที่มา:
<http://ozone.tmd.go.th/gg06.htm> [19 มกราคม 2553]

ภาษาอังกฤษ

- Aceves-Lara, C. A.; Latriille, E.; Buffiere, P.; Bernet, N.; and Steyer, J. P. Experimental determination by principal component analysis of a reaction pathway of biohydrogen production by anaerobic fermentation. Chemical Engineering and Processing 47 (2008) : 1968-1975.
- American Public Health Association. Standard methods for examination of water and wastewater. 19th ed. Washington, DC : American Public Health Association, 1995.
- Argun, H.; Kargi, F.; Kapdan, I. K.; and Oztekin, R. Batch dark fermentation of powdered wheat starch to hydrogen gas: Effect of the initial substrate and biomass concentrations. Int. J. Hydrogen Energy 33 (2008) : 6109-6115.
- Arooj, M. F.; Han, S. K.; Kim, S. H.; Kim, D. H.; and Shin, H. S. Continuous biohydrogen production in a CSTR using starch as a substrate. Int. J. Hydrogen Energy 33 (2008) : 3289-3294.
- Chang, J. S.; Lee, K. S.; and Lin, P. J. Biohydrogen production with fixed-bed bioreactors. Int. J. Hydrogen Energy 27 (2002) : 1167-1174.
- Chen, W. H.; Chen, S. Y.; Khanal, S. K.; and Sung, S. Kinetic study of biological hydrogen production by anaerobic fermentation. Int. J. Hydrogen Energy 31 (2006) : 2170-2178.
- Chou, C. H.; Wang, C. W.; Huang, C. C.; and Lay, J. J. Pilot study of the influence of stirring and pH on anaerobes converting high-solid organic wastes to hydrogen. Int. J. Hydrogen Energy 33 (2008) : 1550-1558.
- Chu, C. F.; Li, Y. Y.; Xu, K. Q.; Ebie, Y.; Inamori, Y.; and Kong, H. N. A pH- and temperature-phased two-stage process for hydrogen and methane production from food waste. Int. J. Hydrogen Energy 33 (2008) : 4739-4746.
- Das, D.; and Veziroglu, T. N. Advances in biological hydrogen production processes. Int. J. Hydrogen Energy 33 (2008) : 6046-6057.

- Fan, K. S.; Kan, N. R.; and Lay, J. J. Effect of hydraulic retention time on anaerobic hydrogenesis in CSTR. Bioresource Technology 97 (2006) : 84–89.
- Fang, H. H. P.; Li, C.; and Zhang, T. Acidophilic biohydrogen production from rice slurry. Int. J. Hydrogen Energy 31 (2006) : 683-692.
- Fang, H. H. P.; and Liu, H. Effect of pH on hydrogen production from glucose by a mixed culture. Bioresource Technology 82 (2002) : 87–93.
- Forsberg, C. W. Hydrogen futures and technologies [online]. 2003. Available from: <http://web.mit.edu/hmtl/www/papers/FORSBERG.pdf> [2007, January 28]
- Garcia, M. L.; and Angenent, L. T. Interaction between temperature and ammonia in mesophilic digesters for animal waste treatment. Water Res. 43 (2009) : 2373-2382.
- Gomez, X.; Moran, A.; Cuetos, M. J.; and Sanchez, M. E. The production of hydrogen by dark fermentation of municipal solid waste and slaughterhouse waste : A two-phase process. Journals of power sources 157 (2006) : 727-732.
- Grady, C. P. L., Jr.; Daigger, G. T.; and Lim, H. C. Biological wastewater Treatment. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, Inc., 1999.
- Hawkes, F. R.; Dinsdale, R.; Hawkes, D. L.; and Hussy, I. Sustainable fermentative hydrogen production: challenges for process optimisation. Int. J. Hydrogen Energy 27 (2002) : 1339–1347.
- Hawkes, F. R.; Hussy, I.; Kyazze, G.; Dinsdale, R.; and Hawkes, D. L. Continuous dark fermentative hydrogen production by mesophilic microflora : Principles and progress. Int. J. Hydrogen Energy 32 (2007) : 172 – 184.
- Hussy, I.; Hawkes, F. R.; Dinsdale, R.; and Hawkes, D. L. Continuous fermentative hydrogen production from sucrose and sugarbeet. Int. J. Hydrogen Energy 30 (2005) : 471-483.
- Kapdan, I. K.; and Kargi, F. Bio-hydrogen production from waste materials. Enzyme and microbial technology 38 (2006) : 569-582.
- Khanal, S. K.; Chen, W. H.; Li, L.; and Sung, S. Biological hydrogen production: effects of pH and intermediate products. Int. J. Hydrogen Energy 29 (2004) : 1123–1131.
- Kim, S. H.; Han, S. K.; and Shin, H. S. Feasibility of biohydrogen production by anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge. Int. J. Hydrogen Energy 29 (2004) : 1607–1616.

- Kim, S. H.; Han, S. K.; and Shin, H. S. Effect of substrate concentration on hydrogen production and 16S rDNA-based analysis of the microbial community in a continuous fermenter. Process Biochemistry 41 (2006) : 199-207.
- Kotsopoulos, T. A.; Fotidis, I. A.; Tsolakis, N.; and Martzopoulos, G. G. Biohydrogen production from pig slurry in a CSTR reactor system with mixed cultures under hyperthermophilic temperature (70 °C). Biomass and Bioenergy 33 (2009) : 1168-1174.
- Kumar, N.; and Das, D. Enhancement of hydrogen production by *Enterobacter cloacae* IIT-BT 08. Process Biochem. 35 (2000) : 589-593.
- Lee, D. Y.; Ebie, Y.; Xu, K. Q.; Li, Y. Y.; and Inamori, Y. Continuous H₂ and CH₄ production from high-solid food waste in the two-stage thermophilic fermentation process with the recirculation of digester sludge. Bioresource Technology 101 (2009) : S42-S47.
- Lee, Z. K.; Li, S. L.; Lin, J. S.; Wang, Y. H.; Kuo, P. C.; and Cheng, S. S. Effect of pH in fermentation of vegetable kitchen wastes on hydrogen production under a thermophilic condition. Int. J. Hydrogen Energy 33 (2008) : 5234-5241.
- Lin, C. Y.; Chang, C. C.; and Hung, C. H. Fermentative hydrogen production from starch using natural mixed cultures. Int. J. Hydrogen Energy 33 (2008) : 2445 – 2453.
- Lin, C. Y.; and Chen, H. P. Sulfate effect fermentative hydrogen production using anaerobic mixed microflora. Int. J. Hydrogen Energy 31(2006) : 953–960.
- Liu, D.; Liu, D. P.; Zeng, R. J.; and Angelidaki, I. Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process. Water Res. 40 (2006) : 2230 – 2236.
- Logan, B. E; Oh, S. E; Van Ginkel, S. W. Bio-hydrogen production measured in batch anaerobic respirometers. Environmental Science and Technology 36 (2002) : 2530-2535.
- Mathews, J.; and Wang, G. Metabolic pathway engineering for enhanced biohydrogen production. Int. J. Hydrogen Energy 34 (2009) : 7404-7416.
- Metcalf and Eddy. Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. 4th ed. Singapore : McGraw-Hill, 2004.
- Mohan, S. V.; Babu, V L.; and Sarma, P. N. Anaerobic biohydrogen production from dairy wastewater treatment sequencing batch reactor (AnSBR): Effect of organic loading rate. Enzyme. Microb. Technol. 41 (2007) : 506-515.

- Mohan, S. V; Mohanakrishna, G.; Goud, R. K.; and Sarma, P. N. Acidogenic fermentation of vegetable based market waste to harness biohydrogen with simultaneous stabilization. Bioresource Technology 100 (2009) : 3061-3068.
- Mohan, S. V; Mohanakrishna, G.; and Sarma, P. N. Integration of acidogenic and methanogenic processes for simultaneous production of biohydrogen and methane from wastewater treatment. Int. J. Hydrogen Energy 33 (2008) : 2156-2166.
- Mohanakrishna, G.; Goud, R. K.; Mohan, S. V; and Sarma, P. N. Enhancing biohydrogen production through sewage supplementation of composite vegetable based market waste. Int. J. Hydrogen Energy 35 (2010) : 533-541.
- Mu, Y.; Zheng, X. J.; Yu, H. Q.; and Zhu, R. F. Biological hydrogen production by anaerobic sludge at various temperatures. Int. J. Hydrogen Energy 31 (2006) : 780-785.
- Pakarinen, O.; Annimari, L.; and Rintala, J. Batch dark fermentative hydrogen production from grass silage: The effect of inoculum, pH, temperature and VS ratio. Int. J. Hydrogen Energy 33 (2008) : 594 – 601.
- Pan, C. M.; Fan, Y. T.; Zhao, P.; and Hou, H. W. Fermentative hydrogen production by the newly isolated *Clostridium beijerinckii* Fanp3. Int. J. Hydrogen Energy 33 (2008) : 5383-5391.
- Panate Manomaivibool. Municipal Solid Waste Management in Bangkok. Master's Thesis Department of Science in Environmental Management and Policy, IIIIEE, Lund University, 2005.
- Sam-Soon; Palns; Loewenthal, R. E.; Dold, P. L.; and Marais, G. V. R. Hypothesis for pellrtisation in the upflow anaerobic sludge bed reactor. Wat. SA. (1987) : 69-78.
- Speece, R. E. Anaerobic Biotechnology for industrial wastewaters. Nashville, Tennessee: Archae Press, 1996.
- Tanisho, S.; Kuromoto, M.; and Kadokura, N. Effect of CO₂ removal on hydrogen production by fermentation. Int. J. Hydrogen Energy 23 (1998) : 559-563.
- Ueno, Y.; Fukui, H.; and Goto, M. Operation of a two-stage fermentation process producing hydrogen and methane from organic waste. Environ. Sci. Technol. 41 (2007) : 1413-1419.
- Ueno, Y.; Haruta, S.; Ishii, M.; and Igarashi, Y. Microbial community in anaerobic hydrogen-producing microflora enriched from sludge compost. Appl. Microbiol. Biotechnol. 57 (2001) : 555 – 562.

- United States. Department of energy. Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. [online]. 2001. Available from: http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm00r0.pdf [2010, January 23]
- United States. Energy Information Administration. Renewable Energy Consumption by Energy Use Sector and Energy Source, 2000-2004 [online]. 2005. Available from: http://www.eia.doe.gov/cneaf/solar.renewables/page/rea_data/rea_sum.html [2006, December 4]
- Valdez-Vazquez, I.; and Poggi-Varaldo, H. M. Alkalinity and high total solids affecting H₂ production from organic solid waste by anaerobic consortia. Int. J. Hydrogen Energy 34 (2009) : 3639-3646.
- Van Ginkel, S.; Oh, S. E.; and Logan, B. Biohydrogen gas production from food processing and domestic wastewater. Int. J. Hydrogen Energy 30 (2005) : 1535-1542.
- Van Ginkel, S.; and Logan, B. Increased biological hydrogen production with reduced organic loading. Water Res. 39 (2005) : 3819–3826.
- Vijayaraghavan, K.; Ahmad, D.; and Ibrahim, M. K. B. Biohydrogen generation from jackfruit peel using anaerobic contact filter. Int. J. Hydrogen Energy 31 (2006) : 569-579.
- Vijayaraghavan, K.; Ahmad, D.; and Soning, C. Bio-hydrogen generation from mixed fruit peel waste using anaerobic contact filter. Int. J. Hydrogen Energy 32 (2007) : 4754-4760.
- Wang, C. H.; Lin, P. J.; and Chang, J. S. Fermentative conversion of sucrose and pineapple waste into hydrogen gas in phosphate-buffered culture seeded with municipal sewage sludge. Process Biochemistry 41 (2006) : 1353-1358.
- Wang, B.; Wan, W.; and Wang, J. Effect of ammonia concentration on fermentative hydrogen production by mixed cultures. Bioresource Technology 100 (2009) : 1211-1213.
- Wang, X.; and Zhao, Y. C. A bench scale study of fermentative hydrogen and methane production from food waste in integrated two-stage process. Int. J. Hydrogen Energy 34 (2009) : 245-254.
- 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. 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. Int. J. Hydrogen Energy 33 (2008) : 1542-1549.

Zhang, T.; Liu, H.; and Fang H. H. P. Biohydrogen production from starch in wastewater under thermophilic conditions. J. Environ Manag. 69 (2003) : 149-156.

Zhang, Z. P.; Show, K. Y.; Tay, J. H.; Liang, D. T.; Lee, D. J.; and Jiang, W. J. Effect of hydraulic retention time on biohydrogen production and anaerobic microbial community. Process Biochemistry 41 (2006) : 2118-2123.



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลการทดลองที่ 1

ตารางที่ ก-1 ข้อมูลผลการศึกษาค่าซีไอดีทั้งหมด ซีไอดีกรอง ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ร้อยละความเข้มข้นของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ

จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ซีไอดีทั้งหมด (มก./ล.)			ซีไอดีกรอง (มก./ล.)			ของแข็งทั้งหมด (ก./ล.)			ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (ก./ล.)		
	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ร้อยละ 5	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ร้อยละ 5	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ร้อยละ 5
ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ	49,697	55,758	72,727	14,545	18,182	29,091	52.60	65.77	86.73	37.10	48.63	68.55
1	45,000	53,750	71,250	11,250	15,000	22,500	47.85	60.43	85.2	36.78	45.60	63.45
3	45,000	52,500	75,000	15,000	16,875	22,500	46.97	55.63	83.90	35.60	42.10	58.60
5	36,364	50,909	67,273	10,909	14,545	20,000	49.50	50.20	65.23	33.10	26.20	49.40
7	29,091	36,364	65,455	10,909	14,545	19,091	43.87	47.50	62.70	23.27	36.80	52.93
9	23,750	35,000	63,125	10,000	12,813	25,000	47.85	48.85	52.25	22.30	35.20	37.85
11	30,000	37,500	67,500	7,500	15,938	26,250	46.83	53.40	48.65	18.35	37.70	31.70
13	37,500	45,000	67,500	11,250	13,125	30,000	49.70	47.30	61.10	21.35	36.75	49.85
15	32,000	40,000	64,000	12,000	12,000	28,000	48.15	46.25	54.65	21.15	34.25	38.40
17	28,000	40,000	64,000	10,000	11,000	26,000	47.50	46.40	55.62	22.64	31.76	38.95
19	38,710	42,581	58,065	13,548	17,419	29,032	45.65	48.05	57.95	23.50	33.75	40.00
21	38,710	46,452	61,935	15,484	23,226	30,968	48.70	50.85	54.40	23.10	35.50	31.45
23	32,000	40,000	56,000	12,000	20,000	28,000	51.30	47.65	53.85	25.20	32.40	37.87
25	27,077	49,231	64,000	9,846	17,231	20,923	47.80	46.95	53.25	23.55	34.55	37.95
27	29,091	43,636	58,182	14,545	21,818	29,091	48.75	44.90	50.20	23.85	33.05	36.60
29	30,000	37,500	52,500	11,250	16,875	22,500	44.40	44.30	47.20	24.37	33.65	40.60
31	33,750	41,250	56,250	10,313	15,000	20,625	48.60	46.35	50.8	21.58	33.80	38.73
33	38,710	54,194	61,935	13,548	27,097	29,032	51.30	50.25	55.75	19.07	30.27	33.05
35	38,095	53,333	60,952	17,778	24,127	30,476	48.05	46.55	50.30	20.65	29.57	32.65

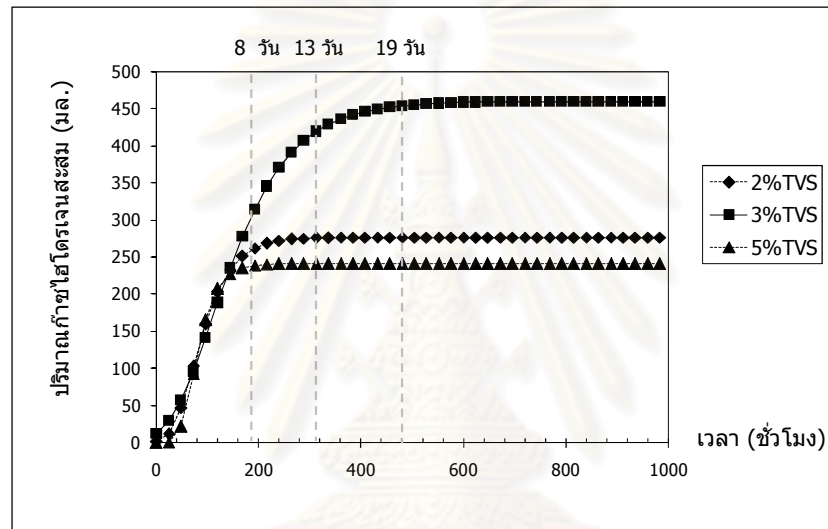
ตารางที่ ก-1 ข้อมูลผลการศึกษาค่าซีโอดีทั้งหมด ซีโอดีกรอง ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยได้ทั้งหมดที่ร้อยละความเข้มข้นของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ (ต่อ)

จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ซีโอดีทั้งหมด (มก./ล.)			ซีโอดีกรอง (มก./ล.)			ของแข็งทั้งหมด (ก./ล.)			ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (ก./ล.)		
	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5
37	36,364	50,909	50,909	13,333	20,606	25,455	49.15	46.15	52.25	20.70	30.45	32.05
39	38,710	54,194	61,935	18,065	29,677	30,968	47.86	43.20	50.45	22.33	31.40	33.25
41	32,000	40,000	56,000	14,667	21,333	24,000	46.20	41.00	47.40	22.90	32.70	33.67

ตารางที่ ก-2 ข้อมูลผลการศึกษาริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและสภาพด่างทั้งหมดที่ร้อยละความเข้มข้นของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ

จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (มก./ล.)			สภาพด่างทั้งหมด (มก./ล.)			จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (มก./ล.)			สภาพด่างทั้งหมด (มก./ล.)		
	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5		ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5
ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ	2,542	5,188	7,979	2,083	2,067	2,394	21	3,769	8,456	11,125	3,688	5,800	8,133
1	2,831	5,325	8,100	2,500	1,750	4,000	23	4,369	7,031	9,244	3,775	5,500	8,325
3	4,369	5,981	8,250	2,750	1,325	6,000	25	2,813	6,188	9,268	3,688	5,583	8,000
5	2,213	9,844	8,288	5,183	3,125	4,000	27	4,125	4,425	12,328	5,000	3,175	7,688
7	6,694	5,461	8,700	1,065	3,875	3,100	29	5,330	6,750	9,788	4,821	4,917	6,500
9	2,670	6,094	8,333	2,360	4,219	5,667	31	4,870	6,600	9,940	4,050	5,568	6,480
11	2,925	7,300	9,250	2,550	4,933	6,208	33	4,500	6,613	10,453	3,233	6,075	6,500
13	3,750	6,788	7,193	5,552	4,038	5,773	35	4,275	5,813	9,438	3,750	4,750	7,000
15	4,613	8,250	7,250	2,500	5,000	4,917	37	3,836	7,088	10,369	3,208	4,475	6,550
17	4,038	6,784	8,090	3,240	4,980	5,387	39	2,580	5,087	12,030	3,045	5,960	8,120
19	3,563	5,475	7,286	3,425	4,550	6,071	41	1,844	4,313	11,563	2,833	5,792	7,958

กราฟที่สร้างจากสมการ Gompertz ที่ร้อยละความเข้มข้นของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ



ตารางที่ ก-3 ข้อมูลผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ได้จากสมการ Gompertz ที่ร้อยละความเข้มข้นของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ

จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)			ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)					ค่าพีเอช		
	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5
ก่อนเริ่มต้นเดินระบบ	2.46	79.90	0.00	0.92	11.59	0.00	33.0	33.0	33.0	33.0	31.0	5.50	5.50	5.50
1	40.74	153.57	0.00	11.49	28.74	0.55	33.0	33.5	33.5	33.5	31.5	5.50	5.50	5.50
2	178.51	255.07	68.44	46.90	56.97	21.74	33.5	34.0	34.0	33.5	32.0	5.46	5.50	5.50
3	388.42	378.27	523.87	102.76	95.39	93.03	33.5	34.0	34.5	34.0	32.5	5.43	5.49	5.45

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ได้จากสมการ Gompertz ที่ร้อยละความเข้มข้นของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ (ต่อ)

จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)			ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)					ค่าพีเอช		
	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5
4	584.77	513.72	751.48	159.16	140.63	165.35	33.0	33.0	33.0	33.5	31.0	5.43	5.49	5.50
5	725.27	651.57	801.11	203.17	188.38	207.61	33.0	33.0	32.5	33.0	31.0	5.50	5.47	5.46
6	812.28	783.68	810.25	232.81	234.78	227.18	34.5	34.5	34.5	34.5	32.5	5.48	5.45	5.45
7	862.19	904.51	811.88	251.18	277.13	235.43	34.0	35.0	34.5	34.0	32.5	5.48	5.50	5.50
8	889.67	1011.06	812.17	262.06	313.99	238.77	32.0	33.5	33.0	32.5	31.0	5.46	5.50	5.47
9	904.49	1102.40	812.22	268.33	344.96	240.11	32.5	33.5	33.5	33.0	31.5	5.45	5.47	5.43
10	912.38	1179.00	812.23	271.89	370.29	240.64	33.0	33.0	33.0	33.0	31.5	5.50	5.46	5.40
11	916.56	1242.14	812.23	273.90	390.59	240.85	32.0	34.0	33.0	33.0	31.0	5.49	5.40	5.50
12	918.77	1293.50	812.23	275.02	406.60	240.93	33.5	33.5	33.5	33.5	32.0	5.48	5.50	5.46
13	919.93	1334.86	812.23	275.65	419.10	240.96	33.0	33.0	33.5	33.5	32.0	5.50	5.49	5.43
14	920.55	1367.88	812.23	276.01	428.76	240.98	33.0	33.0	33.5	33.5	32.0	5.45	5.48	5.48
15	920.87	1394.10	812.23	276.20	436.19	240.98	32.5	33.0	33.0	33.0	31.0	5.50	5.48	5.45
16	921.04	1414.80	812.23	276.31	441.87	240.98	33.0	32.5	33.0	33.0	31.0	5.48	5.45	5.40
17	921.13	1431.10	812.23	276.37	446.19	240.98	33.0	32.0	32.0	33.5	31.5	5.46	5.40	5.50
18	921.18	1443.88	812.23	276.41	449.48	240.98	33.5	32.0	32.0	33.5	32.0	5.46	5.50	5.47
19	921.20	1453.89	812.23	276.43	451.97	240.98	33.5	33.0	33.5	34.0	32.5	5.45	5.46	5.43
20	921.22	1461.71	812.23	276.44	453.85	240.98	32.5	33.0	33.0	33.5	31.5	5.50	5.45	5.40
21	921.22	1467.81	812.23	276.44	455.27	240.98	31.0	34.0	34.0	34.0	32.0	5.46	5.40	5.50

ตารางที่ ก-3 ข้อมูลผลการศึกษาปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่ได้จากสมการ Gompertz ที่ร้อยละความเข้มข้นของแข็งระเหยได้เริ่มต้นต่างๆ (ต่อ)

จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (มล.)			ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มล.)			อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)					ค่าพีเอช		
	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ร้อยละ 2	ร้อยละ 3	ร้อยละ 5
22	921.23	1472.57	812.23	276.45	456.35	240.98	31.5	34.0	34.5	34.0	32.5	5.50	5.50	5.50
23	921.23	1476.27	812.23	276.45	457.16	240.98	33.0	33.5	33.5	34.5	32.0	5.47	5.47	5.47
24	921.23	1479.16	812.23	276.45	457.77	240.98	33.0	32.0	32.0	32.0	30.5	5.50	5.46	5.46
25	921.23	1481.40	812.23	276.45	458.24	240.98	33.5	32.0	32.5	33.0	30.5	5.47	5.45	5.45
26	921.23	1483.15	812.23	276.45	458.58	240.98	34.0	32.5	32.5	33.0	31.0	5.45	5.50	5.50
27	921.23	1484.50	812.23	276.45	458.85	240.98	33.5	33.0	33.5	33.5	31.5	5.50	5.46	5.46
28	921.23	1485.56	812.23	276.45	459.04	240.98	31.5	34.0	34.0	34.0	32.0	5.48	5.46	5.42
29	921.23	1486.38	812.23	276.45	459.19	240.98	31.5	33.5	34.0	34.5	32.0	5.45	5.40	5.40
30	921.23	1487.01	812.23	276.45	459.31	240.98	32.5	32.5	32.5	32.0	30.5	5.45	5.50	5.50
31	921.23	1487.51	812.23	276.45	459.39	240.98	32.5	32.0	32.5	33.0	30.5	5.50	5.48	5.45
32	921.23	1487.89	812.23	276.45	459.45	240.98	34.0	33.0	33.0	33.0	31.0	5.46	5.46	5.40
33	921.23	1488.19	812.23	276.45	459.50	240.98	34.0	33.0	32.5	33.0	31.0	5.46	5.46	5.50
34	921.23	1488.42	812.23	276.45	459.54	240.98	32.0	32.5	33.0	33.5	31.5	5.50	5.50	5.46
35	921.23	1488.60	812.23	276.45	459.57	240.98	32.0	33.5	33.5	34.0	32.0	5.50	5.49	5.41
36	921.23	1488.74	812.23	276.45	459.59	240.98	33.0	33.5	33.5	34.0	32.0	5.47	5.45	5.50
37	921.23	1488.85	812.23	276.45	459.60	240.98	32.5	34.0	33.5	34.5	32.5	5.45	5.43	5.43
38	921.23	1488.94	812.23	276.45	459.61	240.98	33.0	32.0	32.5	32.0	30.5	5.50	5.50	5.50
39	921.23	1489.00	812.23	276.45	459.62	240.98	34.0	32.0	32.0	32.0	30.0	5.48	5.46	5.45
40	921.23	1461.71	812.23	276.45	459.63	240.98	32.5	32.0	32.0	32.5	30.5	5.48	5.41	5.41
41	921.23	1467.81	812.23	276.45	459.63	240.98	32.0	31.5	33.0	33.0	30.0	5.50	5.50	5.50

ผลการทดลองที่ 2

ตารางที่ ก-4 ข้อมูลผลการศึกษาค่าซีไอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีไอดีทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ซีไอดีทั้งหมด (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีไอดีทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ซีไอดีทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
1	1	32,727	23,636	8,182	27.78	65.38	75.00
4	4	32,727	21,818	7,273	33.33	66.67	77.78
6	6	32,727	23,636	3,636	27.78	84.62	88.89
8	8	32,727	18,182	3,636	44.44	80.00	88.89
11	11	33,529	22,059	6,000	34.21	72.80	82.11
13	13	34,545	25,455	7,273	26.32	71.43	78.95
15	15	32,727	21,818	8,000	33.33	63.33	75.56
18	18	34,286	27,429	8,229	20.00	70.00	76.00
20	20	34,286	28,286	6,857	17.50	75.76	80.00
22	22	33,000	26,000	2,400	21.21	90.77	92.73
25	25	32,000	24,000	6,400	25.00	73.33	80.00
27	27	33,871	25,161	3,484	25.71	86.15	89.71
29	29	32,903	23,226	3,484	29.41	85.00	89.41
32	32	32,903	23,226	4,258	29.41	81.67	87.06
34	34	34,839	25,161	3,290	27.78	86.92	90.56
36	36	33,750	25,313	3,000	25.00	88.15	91.11
39	39	32,459	23,607	2,361	27.27	90.00	92.73
41	41	32,903	24,194	1,935	26.47	92.00	94.12

ตารางที่ ก-4 ข้อมูลผลการศึกษาค่าซีโอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีโอดีทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ ของเดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ซีโอดีทั้งหมด (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีโอดีทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ซีโอดีทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
43	43	33,750	25,313	2,250	25.00	91.11	93.33
46	46	33,750	25,313	2,250	25.00	91.11	93.33
48	48	32,813	24,375	2,250	25.71	90.77	93.14
50	50	32,571	24,000	2,400	26.32	90.00	92.63
52	52	33,429	24,857	2,571	25.64	89.66	92.31
54	54	32,571	24,000	2,400	26.32	90.00	92.63
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		33,031	24,457	2,302	25.97	90.58	93.03
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		535	637	184	0.78	0.80	0.57
ค่าสูงสุด		33,750	25,313	2,571	27.27	92.00	94.12
ค่าต่ำสุด		3,2459	23,607	1,953	25.00	89.66	92.31
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		8	8	8	8	8	8

ตารางที่ ก-5 ข้อมูลผลการศึกษาค่าซีโอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีโอดีทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ซีโอดีทั้งหมด (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีโอดีทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ซีโอดีทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
59	1	33,636	23,636	8,182	29.73	65.38	75.68
61	3	32,727	27,273	5,455	16.67	80.00	83.33
64	6	32,727	25,455	8,182	22.22	67.86	75.00
66	8	32,727	25,455	10,909	22.22	57.14	66.67
68	10	32,727	27,273	10,909	16.67	60.00	66.67
71	13	33,529	26,471	8,471	21.05	68.00	74.74
73	15	34,545	29,091	8,000	15.79	72.50	76.84
75	17	32,727	25,455	5,818	22.22	77.14	82.22
78	20	34,286	28,286	4,114	17.50	85.45	88.00
80	22	34,286	29,143	5,486	15.00	81.18	84.00
82	24	33,000	26,000	3,600	21.21	86.15	89.09
85	27	32,000	24,000	1,600	25.00	93.33	95.00
87	29	33,871	26,129	3,484	22.86	86.67	89.71
89	31	32,903	25,161	3,484	23.53	86.15	89.41
92	34	32,903	27,097	1,548	17.65	94.29	95.29
94	36	34,839	29,032	1,548	16.67	94.67	95.56
96	38	33,750	27,188	2,063	19.44	92.41	93.89

ตารางที่ ก-5 ข้อมูลผลการศึกษาค่าซีไอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีไอดีทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ ของเดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ซีไอดีทั้งหมด (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีไอดีทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ซีไอดีทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
99	41	33,443	26,557	1,967	20.59	92.59	94.12
101	43	32,903	26,129	1,548	20.59	94.07	95.29
103	45	33,750	26,250	1,875	22.22	92.86	94.44
106	48	33,750	26,250	1,875	22.22	92.86	94.44
108	50	33,750	26,250	1,500	22.22	94.29	95.56
110	52	32,571	25,714	1,371	21.05	94.67	95.79
112	54	33,429	26,571	1,543	20.51	94.19	95.38
114	56	32,571	25,714	1,714	21.05	93.33	94.74
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		33,271	26,180	1,674	21.31	93.61	94.97
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		515	327	215	0.78	0.79	0.61
ค่าสูงสุด		33,750	26,571	1,967	22.22	94.67	95.79
ค่าต่ำสุด		32,571	25,714	1,371	20.51	92.59	94.12
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		8	8	8	8	8	8

ตารางที่ ก-6 ข้อมูลผลการศึกษาค่าซีโอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีโอดีทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ซีโอดีทั้งหมด (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีโอดีทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ซีโอดีทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
118	1	32,321	32,321	19,393	-	40.00	40.00
120	3	32,690	32,690	12,388	-	62.11	62.11
123	6	33,063	29,671	6,104	10.26	79.43	81.54
125	8	32,676	27,934	6,260	14.51	77.59	80.84
127	10	33,063	28,830	7,667	12.80	73.41	76.81
130	13	33,773	27,976	7,667	17.16	72.60	77.30
132	15	32,864	27,500	6,244	16.32	77.29	81.00
134	17	32,864	27,934	7,667	15.00	72.55	76.67
137	20	33,062	29,671	7,121	10.26	76.00	78.46
139	22	32,676	29,671	6,057	9.20	79.59	81.46
141	24	33,063	27,976	7,121	15.38	74.55	78.46
144	27	32,500	27,500	7,667	15.38	72.12	76.41
146	29	32,864	27,934	6,408	15.00	77.06	80.50
148	31	32,864	27,934	6,244	15.00	77.65	81.00
151	34	33,773	28,830	6,590	14.63	77.14	80.49
153	36	33,773	28,830	6,260	14.63	78.29	81.46
155	38	32,676	27,895	6,057	14.63	78.29	81.46

ตารางที่ ก-6 ข้อมูลผลการศึกษาค่าซีไอดีทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีไอดีทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ ของเดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ซีไอดีทั้งหมด (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีไอดีทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ซีไอดีทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
158	41	33,063	27,976	6,104	15.38	78.18	81.54
160	43	33,063	27,976	6,104	15.38	78.18	81.54
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		33,153	28,196	6,252	14.95	77.83	81.14
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		443	434	192	0.34	0.54	0.48
ค่าสูงสุด		33,773	28,830	6,590	15.38	78.29	81.54
ค่าต่ำสุด		32,676	27,895	6,057	14.63	77.06	80.49
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		7	7	7	7	7	7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-7 ข้อมูลผลการศึกษาค่าซีไอดีกรองและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีไอดีกรองของระบบที่เวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีไอดีกรอง		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ซีไอดีกรองโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
1	1	23,273	17,455	4,182	25.00	76.04	82.03
4	4	24,000	18,909	4,000	21.21	78.85	83.33
6	6	24,000	15,636	3,818	34.85	75.58	84.09
8	8	23,273	16,000	4,545	31.25	71.59	80.47
11	11	24,000	18,353	3,882	23.53	78.85	83.82
13	13	23,273	16,000	2,000	31.25	87.50	91.41
15	15	22,909	14,909	1,818	34.92	87.80	92.06
18	18	22,629	16,457	3,257	27.27	80.21	85.61
20	20	23,314	16,457	2,743	29.41	83.33	88.24
22	22	23,200	16,000	2,200	31.03	86.25	90.52
25	25	23,600	17,600	3,400	25.42	80.68	85.59
27	27	23,226	16,258	1,645	30.00	89.88	92.92
29	29	22,452	17,032	1,161	24.14	93.18	94.83
32	32	23,613	16,258	2,129	31.15	86.90	90.98
34	34	23,226	15,484	1,161	33.33	92.50	95.00
36	36	23,226	15,484	1,355	33.33	91.25	94.17
39	39	22,426	14,951	1,180	33.33	92.11	94.74

ตารางที่ ก-7 ข้อมูลผลการศึกษาค่าชี้โอดีกรองและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดชี้โอดีกรองของระบบที่เวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ ของเดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ชี้โอดีกรอง (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดชี้โอดีกรอง		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ชี้โอดีกรองโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
41	41	22,452	15,097	1,065	32.76	92.95	95.26
43	43	22,500	15,000	1,500	33.33	90.00	93.33
46	46	22,875	15,750	1,313	31.15	91.67	94.26
48	48	23,625	16,125	1,406	31.75	91.28	94.05
50	50	22,500	15,000	1,500	33.33	90.00	93.33
52	52	22,875	15,375	1,594	32.79	89.63	93.03
54	54	23,314	15,429	1,543	33.82	90.00	93.38
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		22,821	15,341	1,388	32.78	90.95	93.92
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		446	420	187	0.91	1.22	0.79
ค่าสูงสุด		23,625	16,125	1,594	33.82	92.95	95.26
ค่าต่ำสุด		22,426	14,951	1,065	31.15	89.63	93.03
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		8	8	8	8	8	8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-8 ข้อมูลผลการศึกษาค่าชีโอดีกรองและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดชีโอดีกรองของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ชีโอดีกรอง (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดชีโอดีกรอง		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ชีโอดีกรองโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
59	1	23,273	21,818	2,636	6.25	87.92	88.67
61	3	23,273	21,818	1,636	6.25	92.50	92.97
64	6	24,000	19,636	5,091	18.18	74.07	78.79
66	8	24,000	19,273	5,455	19.70	71.70	77.27
68	10	23,273	19,636	4,727	15.63	75.93	79.69
71	13	24,000	20,471	7,412	14.71	63.79	69.12
73	15	23,273	18,909	4,091	18.75	78.37	82.42
75	17	22,909	18,182	2,364	20.63	87.00	89.68
78	20	22,629	18,171	1,800	19.70	90.09	92.05
80	22	23,314	19,543	3,000	16.18	84.65	87.13
82	24	23,200	19,200	2,000	17.24	89.58	91.38
85	27	23,600	19,600	1,100	16.95	94.39	95.34
87	29	23,226	19,355	1,452	16.67	92.50	93.75
89	31	22,452	18,968	774	15.52	95.92	96.55
92	34	23,613	20,129	968	14.75	95.19	95.90
94	36	23,226	20,129	871	13.33	95.67	96.25
96	38	23,226	20,129	871	13.33	95.67	96.25

ตารางที่ ก-8 ข้อมูลผลการศึกษาค่าซีไอดีกรองและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีไอดีกรองของระบบที่เวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ ของเดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีไอดีกรอง		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ซีไอดีกรองโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
99	41	22,426	19,279	984	14.04	94.90	95.61
101	43	22,452	19,355	871	13.79	95.50	96.12
103	45	22,500	19,500	1,125	13.33	94.23	95.00
106	48	22,500	19,500	938	13.33	95.19	95.83
108	50	23,625	20,625	1,031	12.70	95.00	95.63
110	52	22,500	19,500	938	13.33	95.19	95.83
112	54	22,875	19,875	1,031	13.11	94.81	95.49
114	56	23,657	20,571	1,200	13.04	94.17	94.93
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		22,817	19,776	1,015	13.34	94.87	95.56
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		528	537	107	0.42	0.47	0.41
ค่าสูงสุด		23,657	20,625	1,200	14.04	95.50	96.12
ค่าต่ำสุด		22,426	19,279	871	12.70	94.17	94.93
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		8	8	8	8	8	8

ตารางที่ ก-9 ข้อมูลผลการศึกษาค่าซีไอดีกรองและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีไอดีกรองของระบบที่เวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ซีไอดีกรอง (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีไอดีกรอง		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ซีไอดีกรองโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
118	1	23,366	19,939	935	14.67	95.31	96.00
120	3	22,405	18,451	494	17.65	97.32	97.79
123	6	22,750	20,475	1,625	10.00	92.06	92.86
125	8	22,750	19,825	935	12.86	95.29	95.89
127	10	23,167	20,840	802	10.04	96.15	96.54
130	13	23,366	19,825	802	15.15	95.96	96.57
132	15	22,750	19,825	1,067	12.86	94.62	95.31
134	17	23,085	20,878	802	9.56	96.16	96.53
137	20	23,409	20,850	1,625	10.93	92.21	93.06
139	22	23,085	20,150	1,170	12.71	94.19	94.93
141	24	22,750	20,150	569	11.43	97.18	97.50
144	27	23,085	20,840	802	9.72	96.15	96.53
146	29	23,409	20,878	475	10.81	97.73	97.97
148	31	23,409	20,878	569	10.81	97.27	97.57
151	34	23,167	20,850	569	10.00	97.27	97.55
153	36	23,409	20,878	1,170	10.81	94.39	95.00
155	38	22,265	19,825	1,067	10.96	94.62	95.21

ตารางที่ ก-9 ข้อมูลผลการศึกษาค่าซีไอติกรองและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีไอติกรองของระบบที่เวลากักพักทางพลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ ของเดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ซีไอติกรอง (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดซีไอติกรอง		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ซีไอติกรองโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
158	41	22,375	20,105	778	10.14	96.13	96.52
160	43	22,750	20,475	845	10.00	95.87	96.29
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		22,969	20,556	782	10.51	96.18	96.59
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		503	436	265	0.43	1.32	1.18
ค่าสูงสุด		23,409	20,878	1,170	10.96	97.73	97.97
ค่าต่ำสุด		22,265	19,825	475	10.00	94.39	95.00
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		7	7	7	7	7	7

ตารางที่ ก-10 ข้อมูลผลการศึกษาของแข่งทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข่งทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ของแข่งทั้งหมด (ก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข่งทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ของแข่งทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
1	1	35.45	19.18	17.60	45.89	8.25	50.35
4	4	34.15	20.50	17.48	39.97	14.72	48.80
6	6	35.65	19.62	14.85	44.97	24.30	58.35
8	8	34.98	19.55	14.32	44.12	26.73	59.05
11	11	36.25	18.83	15.15	48.07	19.52	58.21
13	13	36.96	18.65	14.30	49.54	23.32	61.31
15	15	35.55	18.20	14.37	48.80	21.02	59.56
18	18	36.72	18.17	13.02	50.53	28.30	64.53
20	20	36.75	18.65	13.10	49.25	29.76	64.35
22	22	35.10	17.95	11.45	48.86	36.21	67.38
25	25	35.62	17.13	11.73	51.93	31.53	67.09
27	27	36.15	18.78	12.65	48.06	32.62	65.01
29	29	36.30	20.87	16.50	42.49	20.96	54.55
32	32	35.70	20.68	15.05	42.06	27.24	57.84
34	34	35.47	18.58	14.12	47.62	24.04	60.21
36	36	36.25	18.47	14.30	49.06	22.56	60.55
39	39	36.20	17.88	14.10	50.62	21.12	61.05

ตารางที่ ก-10 ข้อมูลผลการศึกษาของแข่งทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข่งทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ ของเดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ของแข่งทั้งหมด (ก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข่งทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ของแข่งทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
41	41	34.32	17.03	13.18	50.40	22.61	61.62
43	43	36.27	16.33	12.82	55.00	21.44	64.65
46	46	36.45	16.95	13.25	53.50	21.83	63.65
48	48	36.35	16.62	13.10	54.26	21.20	63.96
50	50	35.03	16.63	12.90	52.53	22.41	63.17
52	52	36.15	16.70	13.00	53.80	22.16	64.04
54	54	35.00	16.83	12.90	51.93	23.33	63.14
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		35.72	16.87	13.16	52.76	22.01	63.16
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		35.72	16.87	13.16	52.76	22.01	1.24
ค่าสูงสุด		36.45	17.88	14.10	55.00	23.33	64.65
ค่าต่ำสุด		34.32	16.33	12.82	50.40	21.12	61.05
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		8	8	8	8	8	8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-11 ข้อมูลผลการศึกษาของแข่งทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข่งทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ของแข่งทั้งหมด (ก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข่งทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ของแข่งทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
59	1	36.55	25.72	16.83	29.62	34.60	53.97
61	3	35.40	26.50	19.35	25.14	26.98	45.34
64	6	34.05	21.55	17.45	36.71	19.03	48.75
66	8	35.50	21.48	17.13	39.51	20.26	51.76
68	10	34.30	20.58	15.63	40.01	24.06	54.45
71	13	36.10	19.88	13.95	44.94	29.81	61.36
73	15	36.95	22.20	12.40	39.92	44.14	66.44
75	17	35.00	20.58	13.55	41.19	34.17	61.29
78	20	36.75	18.92	12.82	48.50	32.28	65.12
80	22	36.83	19.50	12.43	47.05	36.28	66.26
82	24	35.25	16.95	11.35	51.91	33.04	67.80
85	27	34.43	17.03	10.32	50.54	39.35	70.01
87	29	36.20	17.10	10.07	52.76	41.08	72.17
89	31	35.70	17.22	10.62	51.75	38.32	70.24
92	34	35.70	19.95	12.32	44.12	38.22	65.48
94	36	36.25	20.22	12.40	44.21	38.69	65.79
96	38	36.30	19.85	12.00	45.32	39.55	66.94

ตารางที่ ก-11 ข้อมูลผลการศึกษาของแข่งทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข่งทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ ของเดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ของแข่งทั้งหมด (ก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข่งทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ของแข่งทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
99	41	36.75	19.10	11.47	48.03	39.92	68.78
101	43	34.60	17.72	10.62	48.77	40.06	69.29
103	45	36.25	18.60	10.65	48.69	42.74	70.62
106	48	36.37	18.65	11.22	48.73	39.81	69.14
108	50	36.27	18.85	10.80	48.04	42.71	70.23
110	52	35.08	18.43	10.38	47.47	43.69	70.42
112	54	36.13	18.43	10.65	49.00	42.20	70.52
114	56	35.05	18.55	10.70	47.08	42.32	69.47
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		35.81	18.54	10.81	48.22	41.68	69.81
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.78	0.40	0.36	0.69	1.52	0.72
ค่าสูงสุด		36.75	19.10	11.47	49.00	43.69	70.62
ค่าต่ำสุด		34.60	17.72	10.38	47.08	39.81	68.78
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		8	8	8	8	8	8

ตารางที่ ก-12 ข้อมูลผลการศึกษาของแข็งทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข็งทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ของแข็งทั้งหมด (ก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข็งทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ของแข็งทั้งหมด โดยรวมของระบบ
		ขยะในระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
118	1	36.15	27.80	9.00	23.10	67.63	75.10
120	3	36.58	27.98	14.55	23.51	47.99	60.22
123	6	36.05	25.20	14.65	30.10	41.87	59.36
125	8	35.98	28.20	15.72	21.62	44.26	56.31
127	10	36.05	27.85	16.15	22.75	42.01	55.20
130	13	36.50	26.55	14.95	27.26	43.69	59.04
132	15	35.75	25.50	14.50	28.67	43.14	59.44
134	17	35.70	24.85	15.22	30.39	38.75	57.37
137	20	36.50	23.80	15.42	34.79	35.21	57.75
139	22	35.25	23.95	14.76	32.06	38.37	58.13
141	24	36.58	24.10	15.15	34.11	37.14	58.58
144	27	36.07	22.75	13.98	36.94	38.57	61.26
146	29	36.30	23.05	13.10	36.50	43.17	63.91
148	31	36.07	23.07	13.22	36.04	42.69	63.34
151	34	35.80	23.22	13.85	35.13	40.37	61.31
153	36	35.25	20.95	12.42	40.57	40.69	64.75
155	38	35.30	20.80	11.93	41.08	42.67	66.22

ตารางที่ ก-12 ข้อมูลผลการศึกษาของแข่งทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข็งทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ ของเดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ของแข็งทั้งหมด (ก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแข็งทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ของแข็งทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
158	41	35.35	21.12	12.40	40.24	41.30	64.92
160	43	35.65	21.23	12.68	40.46	40.28	64.45
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		35.68	21.92	12.80	38.57	41.59	64.13
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.41	1.13	0.64	2.56	1.22	1.53
ค่าสูงสุด		36.30	23.22	13.85	41.08	43.17	66.22
ค่าต่ำสุด		35.25	20.80	11.93	35.13	40.28	61.31
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		7	7	7	7	7	7

ตารางที่ ก-13 ข้อมูลผลการศึกษาของแจ้งระเหยได้ทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแจ้งระเหยได้ทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจน เท่ากับ 5 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ของแจ้งระเหยได้ทั้งหมด (ก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแจ้งระเหยได้ทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ของแจ้งระเหยได้ทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะในระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
1	1	29.00	9.30	5.70	67.93	38.71	80.34
4	4	30.60	12.86	6.60	57.97	48.71	78.44
6	6	30.25	11.66	5.33	61.47	54.29	82.39
8	8	29.05	11.90	6.24	59.02	47.54	78.50
11	11	30.50	12.80	5.27	58.03	58.85	82.73
13	13	29.30	11.81	4.51	59.70	61.79	84.60
15	15	29.15	10.35	4.78	64.49	53.86	83.62
18	18	29.75	11.96	5.89	59.81	50.70	80.19
20	20	30.37	11.48	5.24	62.19	54.35	82.74
22	22	29.95	11.80	4.83	60.59	59.04	83.86
25	25	30.17	12.08	6.00	59.98	50.34	80.13
27	27	30.05	11.86	4.33	60.54	63.47	85.58
29	29	29.45	12.00	3.79	59.26	68.45	87.15
32	32	29.25	11.65	4.90	60.17	57.94	83.25
34	34	30.95	11.35	3.88	63.33	65.85	87.48
36	36	30.83	11.06	4.07	64.12	63.19	86.79

ตารางที่ ก-13 ข้อมูลผลการศึกษาของแจ้งระเหยได้ทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแจ้งระเหยได้ทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจน เท่ากับ 5 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ ของเดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ของแจ้งระเหยได้ทั้งหมด (ก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแจ้งระเหยได้ทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ของแจ้งระเหยได้ทั้งหมด โดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
39	39	30.15	10.83	3.50	64.09	67.69	88.40
41	41	29.95	11.22	3.75	62.52	66.58	87.48
43	43	29.10	10.68	3.54	63.31	66.84	87.84
46	46	30.08	10.83	3.44	63.99	68.21	88.55
48	48	30.15	11.69	4.05	61.23	65.32	86.56
50	50	29.70	10.85	3.69	63.48	65.98	87.58
52	52	30.00	10.92	3.89	63.61	64.38	87.04
54	54	30.45	11.01	3.88	63.84	64.74	87.25
ค่าเฉลี่ยที่สถานะคงตัว		29.95	11.00	3.72	63.26	66.22	87.59
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.40	0.32	0.22	0.95	1.37	0.67
ค่าสูงสุด		30.45	11.69	4.05	64.09	68.21	88.55
ค่าต่ำสุด		29.10	10.68	3.44	61.23	64.38	86.56
จำนวนข้อมูลที่สถานะคงตัว		8	8	8	8	8	8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-14 ข้อมูลผลการศึกษาของแจ้งระเหยได้ทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแจ้งระเหยได้ทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางกลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจน เท่ากับ 3 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ของแจ้งระเหยได้ทั้งหมด (ก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแจ้งระเหยได้ทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ของแจ้งระเหยได้ทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
59	1	29.25	18.22	5.82	37.71	68.04	80.10
61	3	29.00	16.00	6.03	44.83	62.34	79.22
64	6	30.70	11.72	5.87	61.82	49.88	80.87
66	8	30.45	11.57	6.49	61.99	43.93	78.69
68	10	29.00	12.21	5.72	57.88	53.20	80.29
71	13	30.52	12.65	6.85	58.55	45.85	77.55
73	15	29.25	10.27	5.54	64.89	46.02	81.05
75	17	29.30	9.60	4.20	67.24	56.25	85.67
78	20	29.47	10.13	2.78	65.63	72.53	90.56
80	22	30.28	12.07	5.01	60.13	58.47	83.44
82	24	30.05	11.73	4.17	60.96	64.49	86.14
85	27	30.15	11.99	3.58	60.22	70.14	88.12
87	29	30.03	10.36	3.67	65.49	64.61	87.79
89	31	29.32	9.50	2.40	67.62	74.78	91.83
92	34	29.20	11.65	3.45	60.10	70.39	88.18
94	36	30.85	12.68	3.16	58.89	75.11	89.77

ตารางที่ ก-14 ข้อมูลผลการศึกษาของแจ้งระเหยได้ทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแจ้งระเหยได้ทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางกลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจน เท่ากับ 3 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ ของเดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ของแจ้งระเหยได้ทั้งหมด (ก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแจ้งระเหยได้ทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ของแจ้งระเหยได้ทั้งหมด โดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
96	38	30.93	12.13	3.49	60.79	71.23	88.72
99	41	30.12	11.72	3.39	61.11	71.09	88.76
101	43	29.82	12.01	3.39	59.74	71.76	88.63
103	45	28.98	11.49	3.29	60.35	71.36	88.64
106	48	30.10	12.08	3.33	59.87	72.41	88.93
108	50	30.15	12.19	3.39	59.58	72.21	88.77
110	52	29.58	11.46	3.34	61.24	70.87	88.71
112	54	29.90	11.92	3.42	60.13	71.33	88.57
114	56	30.38	12.21	3.52	59.82	71.14	88.40
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		29.88	11.88	3.38	60.23	71.52	88.68
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.44	0.30	0.07	0.63	0.55	0.16
ค่าสูงสุด		30.38	12.21	3.52	61.24	72.41	88.93
ค่าต่ำสุด		28.98	11.46	3.29	59.58	70.87	88.40
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		8	8	8	8	8	8

ตารางที่ ก-15 ข้อมูลผลการศึกษาของแฉิ่งระเหยได้ทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแฉิ่งระเหยได้ทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจน เท่ากับ 2 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ของแฉิ่งระเหยได้ทั้งหมด (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแฉิ่งระเหยได้ทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ของแฉิ่งระเหยได้ทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
118	1	30.70	19.70	3.40	35.83	82.74	88.93
120	3	30.98	17.20	6.65	44.47	61.34	78.53
123	6	30.40	20.20	4.20	33.55	79.21	86.18
125	8	30.25	18.85	5.25	37.69	72.15	82.64
127	10	30.25	16.75	6.20	44.63	62.99	79.50
130	13	30.42	15.85	5.98	47.90	62.27	80.34
132	15	30.05	15.20	6.25	49.42	58.88	79.20
134	17	29.95	14.85	5.85	50.42	60.61	80.47
137	20	30.30	15.22	6.35	49.77	58.28	79.04
139	22	30.15	14.72	7.20	51.18	51.09	76.12
141	24	29.73	15.45	6.58	48.02	57.44	77.88
144	27	30.72	14.15	6.98	53.93	50.71	77.29
146	29	30.70	15.72	7.05	48.78	55.17	77.04
148	31	30.53	15.97	7.30	47.68	54.30	76.09
151	34	30.67	15.80	7.35	48.49	53.48	76.04
153	36	30.62	15.67	7.35	48.82	53.11	76.00

ตารางที่ ก-15 ข้อมูลผลการศึกษาของแจ้งระเหยได้ทั้งหมดและประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแจ้งระเหยได้ทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางกลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจน เท่ากับ 2 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	ของแจ้งระเหยได้ทั้งหมด (มก./ล.)			ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัดของแจ้งระเหยได้ทั้งหมด		ประสิทธิภาพร้อยละการกำจัด ของแจ้งระเหยได้ทั้งหมดโดยรวมของระบบ
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	
155	38	29.72	15.25	7.25	48.70	52.46	75.61
158	41	29.83	15.22	7.10	48.98	53.34	76.19
160	43	29.98	15.50	7.27	48.29	53.06	75.73
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		30.29	15.59	7.24	48.53	53.56	76.10
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		443	434	192	0.34	0.54	0.46
ค่าสูงสุด		30.70	15.97	7.35	48.98	55.17	77.04
ค่าต่ำสุด		29.72	15.22	7.05	47.68	52.46	75.61
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		7	7	7	7	7	7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-16 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน/ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางจุลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน

จำนวนวันที่เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่เริ่มการทดลอง (วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด (มล./วัน)		อัตราการผลิตก๊าซแต่ละชนิด (มล./วัน)		ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				ค่าพีเอช	
		ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
1	1	25	206	4.96	142.27	-237	-387	34.5	35.0	35.0	33.0	5.68	7.38
2	2	385	250	77.22	172.68	-248	-390	34.5	35.0	35.0	33.0	5.63	7.20
3	3	449	209	89.89	144.25	-268	-405	34.0	35.0	34.0	31.0	5.61	7.23
4	4	434	208	86.87	143.56	-270	-408	32.5	34.5	33.0	31.5	5.56	7.18
5	5	385	208	77.22	143.56	-265	-398	32.5	33.5	33.0	31.5	5.45	7.15
6	6	394	204	78.86	141.10	-259	-403	28.5	29.0	28.5	26.5	5.85	7.24
7	7	357	243	71.60	168.00	-262	-362	27.5	27.5	28.0	26.0	5.74	7.14
8	8	387	214	80.55	148.07	-155	-374	27.0	27.0	27.0	26.0	5.07	7.60
9	9	432	249	89.85	172.08	-198	-406	29.5	28.0	30.0	27.0	5.50	7.45
10	10	383	158	79.76	108.90	-199	-412	33.0	34.0	34.5	33.0	5.49	7.57
11	11	384	166	79.86	114.72	-201	-415	33.0	29.5	33.0	31.0	5.65	7.32
12	12	457	220	94.68	152.21	-205	-405	33.0	34.5	33.0	31.0	5.78	7.40
13	13	393	235	81.31	162.45	-161	-383	29.5	30.5	30.0	28.0	5.88	7.55
14	14	427	241	88.42	166.31	-190	-390	32.5	33.0	32.5	31.0	5.60	7.48
15	15	399	291	78.84	201.11	-181	-373	31.5	32.0	32.5	31.0	5.29	7.54

ตารางที่ ก-16 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน/ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางจุลชีวศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่เริ่มการทดลอง (วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด (มล./วัน)		อัตราการผลิตก๊าซแต่ละชนิด (มล./วัน)		ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				ค่าพีเอช	
		ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
16	16	276	303	54.57	209.12	-175	-388	34.0	32.5	34.0	33.0	5.68	7.48
17	17	299	352	59.14	243.27	-175	-390	33.0	32.5	33.5	32.0	5.46	7.51
18	18	316	312	62.49	215.95	-213	-347	33.0	33.0	34.0	32.0	5.47	7.46
19	19	361	273	69.51	188.63	-230	-412	33.0	33.5	33.0	31.0	5.50	7.52
20	20	217	249	41.74	172.08	-222	-411	32.0	33.0	32.5	30.5	5.85	7.58
21	21	209	327	40.22	226.30	-220	-420	31.5	33.0	31.5	30.5	5.82	7.50
22	22	226	237	39.31	163.70	-245	-404	31.5	32.0	32.0	29.5	5.74	7.68
23	23	275	249	47.74	172.08	-256	-409	30.0	31.5	30.0	28.0	5.63	7.62
24	24	202	237	35.10	164.11	-235	-398	32.5	32.0	32.5	30.5	5.80	7.63
25	25	202	246	35.14	170.31	-233	-304	32.5	33.0	33.0	31.0	5.88	7.60
26	26	212	261	37.56	180.22	-274	-314	32.0	33.0	32.0	30.0	5.86	7.74
27	27	364	213	64.55	147.54	-200	-300	29.5	29.5	30.0	28.5	5.34	7.64
28	28	288	213	51.14	147.21	-203	-311	34.5	31.5	34.5	33.0	5.34	7.51
29	29	307	209	53.73	144.20	-254	-308	31.5	31.0	31.5	29.5	5.98	7.38
30	30	240	218	42.05	150.66	-238	-307	31.0	34.5	31.5	29.0	5.61	7.25

ตารางที่ ก-16 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน/ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางจุลชีวศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่เริ่มการทดลอง (วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด (มล./วัน)		อัตราการผลิตก๊าซแต่ละชนิด (มล./วัน)		ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				ค่าพีเอช	
		ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
31	31	256	214	44.84	147.72	-244	-312	32.5	31.5	33.0	31.0	5.65	7.60
32	32	203	229	35.52	158.12	-250	-303	31.5	31.5	32.0	30.0	5.53	7.32
33	33	195	210	33.68	145.07	-253	-308	32.0	33.0	32.0	30.5	5.64	7.30
34	34	150	213	25.90	146.91	-254	-294	33.0	34.0	33.0	31.0	5.72	7.09
35	35	153	206	26.55	142.56	-247	-293	31.0	31.0	31.0	29.0	5.67	7.10
36	36	154	195	26.50	134.85	-240	-286	34.0	34.5	35.0	32.0	5.65	7.12
37	37	144	195	24.88	134.85	-254	-284	31.5	31.5	31.5	30.0	5.56	7.23
38	38	152	220	26.18	151.76	-235	-304	31.5	31.5	31.5	29.5	5.45	7.25
39	39	146	204	25.22	141.27	-224	-289	32.0	33.0	32.5	30.0	5.25	7.71
40	40	131	196	22.45	135.46	-246	-301	31.5	32.0	32.0	30.0	5.50	7.43
41	41	138	197	23.67	136.08	-250	-290	32.0	32.0	32.5	30.5	5.78	7.55
42	42	137	208	23.47	144.06	-245	-302	32.5	32.5	33.0	30.5	5.63	7.42
43	43	146	202	25.17	139.46	-227	-294	34.0	34.0	34.0	32.0	5.79	7.54
44	44	144	196	24.83	135.46	-238	-292	32.5	32.5	33.0	30.0	5.64	7.40
45	45	147	211	25.36	146.10	-230	-310	33.0	33.0	33.0	31.5	5.61	7.41

ตารางที่ ก-16 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน/ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางจุลชีวศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ทั้งหมด (มล./วัน)		อัตราการผลิตก๊าซแต่ละชนิด (มล./วัน)		ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน -รีดักชัน (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				ค่าพีเอช	
		ถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซ มีเทน	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซ มีเทน	ถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซ มีเทน	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซ มีเทน
46	46	144	207	24.83	143.06	-215	-301	32.5	33.0	32.5	31.0	5.59	7.67
47	47	141	207	24.33	143.06	-223	-302	33.0	33.0	33.5	31.5	5.39	7.54
48	48	143	206	24.68	142.07	-236	-298	32.0	31.0	32.0	31.0	5.72	7.77
49	49	145	206	25.10	142.07	-224	-298	33.5	33.5	34.0	32.0	5.60	7.69
50	50	146	202	25.05	142.35	-219	-286	32.0	34.0	33.5	32.0	5.74	7.71
51	51	136	217	23.41	152.68	-228	-310	33.5	33.5	33.5	32.0	5.56	7.52
52	52	141	207	24.27	145.65	-230	-309	33.5	33.5	33.5	32.0	5.48	7.59
53	53	141	222	24.20	155.93	-237	-311	31.0	31.0	31.0	30.0	5.53	7.48
54	54	145	212	25.04	149.06	-233	-310	32.0	32.0	32.0	30.0	5.60	7.50
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		141.98	206.24	24.44	143.36	-231.56	-300.19	32.5	32.72	32.84	31.00	5.59	7.56
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		4.53	7.09	0.82	5.73	9.93	8.31	0.83	0.93	0.83	0.86	0.14	0.12
ค่าสูงสุด		147.06	221.61	25.36	155.93	-215.00	-286.00	34.0	34.00	34.00	32.00	5.79	7.77
ค่าต่ำสุด		131.00	196.00	22.45	135.46	-250.00	-311.00	31.0	31.00	31.00	30.00	5.25	7.40
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

ตารางที่ ก-17 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน/ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางจุลชีวศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน

จำนวนวันที่เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่เริ่มการทดลอง (วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด (มล./วัน)		อัตราการผลิตก๊าซแต่ละชนิด (มล./วัน)		ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				ค่าพีเอช	
		ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
59	1	44	363	12.24	254.98	-230	-388	35.0	34.0	35.5	32.5	5.55	7.56
60	2	35	410	9.82	287.75	-240	-390	34.5	35.0	35.0	32.0	5.48	7.32
61	3	67	339	18.75	238.34	-257	-399	34.5	34.0	35.0	33.0	5.48	7.51
62	4	928	213	258.57	149.36	-260	-395	34.5	35.0	35.0	33.0	5.51	7.40
63	5	926	136	258.01	95.82	-275	-390	34.0	35.0	34.0	31.0	5.53	7.51
64	6	883	106	245.99	74.68	-270	-385	33.5	33.5	33.0	31.5	5.60	7.23
65	7	926	213	254.34	149.36	-280	-395	33.5	33.0	33.0	31.5	5.50	7.50
66	8	870	307	238.88	215.36	-276	-380	29.0	29.0	28.5	26.5	5.41	7.58
67	9	965	691	264.87	485.29	-169	-374	27.0	28.0	28.0	26.0	4.88	7.56
68	10	393	358	92.24	251.67	-247	-383	27.5	27.5	27.0	26.0	5.85	7.30
69	11	372	264	87.21	185.35	-250	-378	30.0	30.0	30.0	27.0	5.62	7.17
70	12	396	372	92.80	261.25	-250	-395	34.0	33.0	34.5	33.0	5.47	7.41
71	13	352	318	82.52	223.27	-247	-380	32.5	33.0	33.0	31.0	5.45	7.20
72	14	410	898	94.87	630.40	-250	-405	33.0	33.0	33.0	31.0	5.50	7.42
73	15	415	940	96.09	660.14	-227	-428	29.5	29.0	30.0	28.0	5.66	7.32

ตารางที่ ก-17 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน/ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางจุลชีวศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่เริ่มการทดลอง (วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด (มล./วัน)		อัตราการผลิตก๊าซแต่ละชนิด (มล./วัน)		ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				ค่าพีเอช	
		ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
74	16	425	904	98.45	634.44	-250	-420	32.5	32.5	32.5	31.0	5.55	7.38
75	17	704	917	159.23	643.83	-230	-411	32.0	32.0	32.5	31.0	5.52	7.79
76	18	398	859	90.08	602.78	-230	-411	34.0	34.5	34.0	33.0	5.43	7.58
77	19	424	508	95.79	356.83	-235	-403	33.5	33.5	33.5	32.0	5.48	7.31
78	20	456	599	103.24	420.27	-221	-411	33.5	33.5	34.0	32.0	5.46	7.64
79	21	331	798	70.12	560.36	-232	-420	32.5	33.0	33.0	31.0	5.42	7.52
80	22	397	636	84.03	446.54	-268	-439	32.5	32.0	32.5	30.5	5.48	7.87
81	23	357	846	75.57	594.15	-275	-435	31.5	31.5	31.5	30.5	5.00	7.65
82	24	378	895	77.16	628.59	-275	-429	31.5	31.5	32.0	29.5	5.56	7.84
83	25	382	772	78.03	542.02	-275	-415	30.0	30.0	30.0	28.0	5.56	7.51
84	26	360	579	73.44	406.42	-260	-382	32.0	32.5	32.5	30.5	5.61	7.53
85	27	423	713	86.33	500.30	-223	-293	32.0	33.0	33.0	31.0	5.70	7.74
86	28	400	752	83.02	527.94	-279	-427	32.0	31.0	32.0	30.0	5.50	7.62
87	29	428	725	88.81	509.05	-235	-291	29.5	29.5	30.0	28.5	5.67	7.33
88	30	412	690	85.50	484.45	-250	-350	34.0	34.0	34.5	33.0	5.85	7.60

ตารางที่ ก-17 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน/ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางจุลชีวศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่เริ่มการทดลอง (วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด (มล./วัน)		อัตราการผลิตก๊าซแต่ละชนิด (มล./วัน)		ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				ค่าพีเอช	
		ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
89	31	423	638	86.85	447.74	-266	-348	31.0	31.5	31.5	29.5	5.86	7.63
90	32	395	636	81.06	446.54	-250	-350	31.0	31.0	31.5	29.0	5.50	7.51
91	33	431	673	88.55	472.75	-265	-365	32.5	33.0	33.0	31.0	5.50	7.48
92	34	396	425	81.35	298.73	-260	-320	32.0	32.0	32.0	30.0	5.52	7.49
93	35	357	590	74.06	414.38	-245	-368	32.0	32.0	32.0	30.5	5.54	7.33
94	36	401	651	83.23	457.37	-236	-294	32.5	33.0	32.5	30.0	5.85	7.21
95	37	441	580	91.49	407.21	-250	-322	31.0	31.0	31.0	29.0	5.50	7.47
96	38	413	584	83.66	409.68	-265	-325	34.5	34.5	35.0	32.0	5.53	7.45
97	39	389	647	78.91	454.47	-260	-362	31.0	32.0	31.5	30.0	5.48	7.40
98	40	417	682	84.52	478.83	-255	-368	31.5	32.0	31.5	29.5	5.50	7.52
99	41	419	647	84.92	454.10	-258	-361	32.5	32.0	32.5	30.0	5.87	7.55
100	42	387	656	77.70	460.58	-250	-363	32.0	32.0	32.0	30.0	5.45	7.52
101	43	408	652	82.01	458.06	-234	-333	32.5	32.5	32.5	30.5	5.62	7.82
102	44	395	661	79.25	463.80	-250	-350	32.5	32.5	33.0	30.5	5.48	7.54
103	45	421	657	85.70	461.50	-260	-378	33.0	33.5	34.0	32.0	5.82	7.79

ตารางที่ ก-17 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน/ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางจุลชีวศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่เริ่มการทดลอง (วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด (มล./วัน)		อัตราการผลิตก๊าซแต่ละชนิด (มล./วัน)		ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				ค่าพีเอช	
		ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
104	46	397	629	80.77	441.62	-250	-347	33.0	33.0	33.0	30.0	5.56	7.66
105	47	416	680	84.57	477.55	-265	-358	33.0	33.0	33.0	31.5	5.50	7.58
106	48	415	634	84.43	445.13	-261	-336	32.5	33.5	32.5	31.0	5.67	7.75
107	49	397	629	81.43	441.62	-260	-346	32.5	33.0	33.5	31.5	5.50	7.51
108	50	407	688	83.52	483.20	-257	-350	32.0	32.5	32.0	31.0	5.49	7.43
109	51	384	647	78.83	453.92	-262	-320	33.5	33.5	34.0	32.0	5.45	7.40
110	52	396	682	81.00	481.17	-243	-346	32.5	33.0	33.5	32.0	5.50	7.77
111	53	395	690	80.72	486.59	-248	-350	32.5	33.5	33.5	32.0	5.53	7.67
112	54	397	693	81.12	488.70	-247	-351	33.5	33.5	33.5	32.0	5.54	7.48
113	55	420	696	85.78	490.88	-253	-347	31.0	31.0	31.0	30.0	5.62	7.50
114	56	405	672	82.79	473.66	-260	-338	31.5	32.0	32.0	30.0	5.60	7.58
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		403.75	663.32	82.16	466.38	-253.63	-348.38	32.50	32.75	32.84	31.00	5.58	7.60
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		11.85	23.08	2.49	16.94	8.25	13.36	0.66	0.73	0.83	0.86	0.12	0.13
ค่าสูงสุด		421.22	696.08	85.78	490.88	-234.00	-320.00	33.50	33.50	34.00	32.00	5.87	7.82
ค่าต่ำสุด		384.33	629.00	77.70	441.62	-265.00	-378.00	31.00	31.00	31.00	30.00	5.45	7.40
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8

ตารางที่ ก-18 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน/ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางจุลชีวศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน

จำนวนวันที่เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่เริ่มการทดลอง (วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด (มล./วัน)		อัตราการผลิตก๊าซแต่ละชนิด (มล./วัน)		ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				ค่าพีเอช	
		ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
118	1	150	62	29.65	41.99	-243	-309	31.0	34.5	32.0	30.5	5.84	7.45
119	2	307	175	60.50	118.83	-238	-350	31.5	32.0	34.0	30.0	5.45	7.40
120	3	595	214	117.18	144.99	-240	-386	32.5	33.0	33.5	31.0	5.42	7.36
121	4	523	136	103.07	92.22	-198	-402	31.0	31.0	33.0	30.0	5.36	7.61
122	5	500	247	98.53	167.71	-232	-421	31.5	31.5	31.5	30.5	5.32	7.65
123	6	458	196	90.29	133.33	-230	-395	30.5	30.5	31.0	29.0	5.72	7.73
124	7	570	174	112.30	117.89	-250	-390	31.0	31.0	31.0	29.0	5.56	7.50
125	8	558	212	109.96	143.95	-248	-395	31.0	31.0	31.5	30.0	5.57	7.65
126	9	661	186	130.32	126.05	-260	-360	31.5	32.0	32.0	30.0	5.32	7.63
127	10	795	202	159.48	136.95	-275	-385	31.0	32.0	31.5	30.5	5.50	7.50
128	11	749	206	150.29	139.87	-250	-370	30.5	30.5	30.5	29.5	5.46	7.23
129	12	560	176	112.36	119.24	-235	-320	31.0	30.5	31.0	29.0	5.40	7.25
130	13	679	213	137.10	144.95	-240	-340	30.0	31.0	30.5	28.5	5.48	7.51
131	14	880	206	177.76	139.87	-250	-387	30.5	31.0	31.0	29.0	5.53	7.70
132	15	746	241	150.77	163.75	-235	-358	30.5	31.0	31.0	29.0	5.42	7.62

ตารางที่ ก-18 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน/ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางจุลชีวศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่เริ่มการทดลอง (วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด (มล./วัน)		อัตราการผลิตก๊าซแต่ละชนิด (มล./วัน)		ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				ค่าพีเอช	
		ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
133	16	567	196	114.52	133.33	-230	-317	31.5	31.5	32.0	30.0	5.40	7.48
134	17	805	319	166.19	216.67	-255	-389	31.0	34.5	32.0	30.5	5.39	7.58
135	18	683	322	141.14	218.96	-238	-394	31.5	32.0	32.0	30.0	5.54	7.52
136	19	910	301	187.92	204.38	-277	-386	32.5	33.0	33.0	31.0	5.62	7.60
137	20	769	235	162.80	159.81	-268	-380	31.0	31.0	31.5	30.0	5.53	7.50
138	21	818	293	173.35	198.91	-265	-420	31.5	31.5	31.5	30.5	5.41	7.51
139	22	749	279	158.64	189.44	-234	-411	30.5	30.5	31.0	29.0	5.40	7.74
140	23	925	274	195.92	186.05	-230	-408	31.0	31.0	31.0	29.0	5.50	7.53
141	24	889	321	180.88	218.19	-248	-422	31.5	31.0	32.0	30.0	5.58	7.37
142	25	925	306	188.15	207.77	-251	-428	32.0	32.0	32.0	30.0	5.50	7.26
143	26	951	296	193.53	200.89	-257	-407	32.0	32.0	32.0	30.0	5.53	7.31
144	27	920	279	187.76	189.44	-256	-405	32.0	32.0	32.0	30.5	5.51	7.55
145	28	889	311	181.37	211.28	-207	-380	31.0	31.5	31.0	28.0	5.27	7.62
146	29	811	307	165.46	208.28	-210	-393	30.5	30.5	31.0	28.0	5.70	7.67
147	30	784	321	161.36	217.62	-212	-413	30.5	30.5	30.5	28.5	5.40	7.54

ตารางที่ ก-18 ข้อมูลผลการศึกษาอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน/ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางจุลชีวศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่เริ่มการทดลอง (วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด (มล./วัน)		อัตราการผลิตก๊าซแต่ละชนิด (มล./วัน)		ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				ค่าพีเอช	
		ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
148	31	769	324	158.27	220.25	-219	-410	31.5	31.5	32.0	30.0	5.35	7.41
149	32	749	296	154.15	200.98	-213	-405	32.0	32.0	32.0	30.0	5.46	7.39
150	33	795	314	163.71	213.51	-211	-411	31.5	32.0	32.0	30.5	5.45	7.30
151	34	792	318	158.00	215.92	-208	-416	30.5	30.5	30.5	29.0	5.38	7.28
152	35	781	302	155.72	205.13	-205	-419	31.0	29.0	31.0	29.5	5.50	7.45
153	36	769	298	153.50	202.56	-238	-405	31.0	31.0	32.0	30.0	5.67	7.51
154	37	749	306	151.52	207.98	-227	-410	32.0	32.0	32.0	31.0	5.60	7.50
155	38	823	302	166.36	205.16	-231	-407	31.0	31.0	30.5	29.0	5.61	7.55
156	39	792	309	160.17	209.81	-226	-425	32.5	32.5	32.5	30.5	5.47	7.53
157	40	820	303	165.93	198.94	-245	-403	33.0	33.0	33.0	31.0	5.50	7.40
158	41	792	314	159.47	206.27	-216	-412	33.0	33.5	33.5	31.5	5.59	7.48
159	42	769	299	154.84	196.49	-208	-388	32.0	32.0	32.5	31.0	5.30	7.56
160	43	795	301	159.97	197.73	-204	-412	33.0	33.0	33.0	31.5	5.49	7.67
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		785.99	307.66	159.23	203.20	-218.20	-408.60	31.67	31.60	31.87	30.07	5.50	7.48
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		22.38	8.73	4.73	7.30	12.50	9.30	0.92	1.20	0.97	1.08	0.12	0.11

ตารางที่ ก-18 ข้อมูลผลการศึกษ้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซมีเทน/ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน-รีดักชัน อุณหภูมิและค่าพีเอชของระบบที่เวลากักพักทางจุลชีวศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ทั้งหมด (มล./วัน)		อัตราการผลิตก๊าซแต่ละชนิด (มล./วัน)		ค่าศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชัน -รีดักชัน (มิลลิโวลต์)		อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				ค่าพีเอช	
		ถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซ มีเทน	ก๊าซไฮโดรเจน	ก๊าซมีเทน	ถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซ มีเทน	ถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซ มีเทน	ห้อง	น้ำอ้างอิง	ถังหมักก๊าซ ไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซ มีเทน
ค่าสูงสุด		822.57	324.38	166.36	220.25	-204.00	-388.00	33.00	33.50	33.50	31.50	5.70	7.67
ค่าต่ำสุด		749.00	296.00	151.52	196.49	-245.00	-425.00	30.50	29.00	30.50	28.00	5.30	7.28
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

ตารางที่ ก-19 ข้อมูลผลการศึกษปริมาตรกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและสภาพค่างทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางจุลชีวศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (มก./ล.)			สภาพค่างทั้งหมด (มก./ล.)		
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
1	1	4,041	8,156	3,056	1,775	4,506	4,525
4	4	4,238	8,095	3,168	1,713	4,838	3,796
6	6	4,163	7,350	2,897	1,669	4,806	3,750
8	8	4,041	7,359	3,178	1,656	4,919	4,231
11	11	4,238	8,490	3,291	1,638	5,479	3,563
13	13	4,022	8,438	3,094	1,619	5,451	3,663

ตารางที่ ก-19 ข้อมูลผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและสภาพค่างทั้งหมดของระบบที่เวลาพักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (มก./ล.)			สภาพค่างทั้งหมด (มก./ล.)		
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
15	15	3,975	8,259	3,476	1,413	5,655	4,327
18	18	3,975	8,300	3,516	1,531	5,833	4,563
20	20	3,984	7,150	3,441	1,538	4,933	4,363
22	22	4,191	8,316	2,963	1,563	5,913	5,113
25	25	4,209	7,209	3,178	1,625	6,213	5,300
27	27	4,013	8,944	1,453	1,575	6,425	4,667
29	29	3,947	7,594	1,100	1,763	5,857	4,300
32	32	4,228	7,800	1,219	1,819	7,838	4,200
34	34	4,031	7,706	1,325	1,813	7,031	3,983
36	36	4,013	7,134	1,250	1,744	6,875	4,008
39	39	3,919	7,388	1,125	1,763	7,217	3,875
41	41	4,050	7,438	1,238	1,750	6,875	3,888
43	43	4,144	7,406	1,313	1,750	6,600	3,750
46	46	4,116	7,558	1,125	1,750	6,942	3,894
48	48	4,003	7,631	1,195	1,763	6,763	3,695
50	50	3,956	7,500	1,172	1,738	6,569	3,703
52	52	3,984	7,556	1,313	1,775	6,588	3,813
54	54	4,050	7,528	1,288	1,725	6,400	3,775

ตารางที่ ก-19 ข้อมูลผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและสภาพค้างทั้งหมดของระบบที่เวลาพักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (มก./ล.)			สภาพค้างทั้งหมด (มก./ล.)		
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
ค่าเฉลี่ยที่สถานะคงตัว		4,028	7,501	1,221	1,752	6,744	3,799
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		77	84	78	16	260	81
ค่าสูงสุด		4,144	7,631	1,313	1,775	7,217	3,894
ค่าต่ำสุด		3,919	7,388	1,125	1,725	6,400	3,695
จำนวนข้อมูลที่สถานะคงตัว		8	8	8	8	8	8

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-20 ข้อมูลผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและสภาพค่างทั้งหมดของระบบที่เวลาพักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (มก./ล.)			สภาพค่างทั้งหมด (มก./ล.)		
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
59	1	4,041	8,278	2,428	1,563	3,150	4,788
61	3	4,031	8,241	1,856	1,750	3,050	4,419
64	6	4,252	7,997	4,127	1,719	4,538	4,779
66	8	4,172	7,927	4,646	1,631	5,000	5,573
68	10	4,056	6,806	4,181	1,658	4,225	5,913
71	13	4,238	7,875	5,813	1,606	5,438	6,156
73	15	4,022	7,903	5,850	1,625	5,460	6,175
75	17	3,979	7,988	4,350	1,493	4,156	6,050
78	20	3,956	7,659	4,059	1,581	4,375	5,950
80	22	3,975	7,594	2,934	1,563	4,363	5,400
82	24	4,191	8,109	2,456	1,575	5,338	5,800
85	27	4,200	7,664	928	1,638	5,763	6,000
87	29	4,013	7,223	1,111	1,613	4,950	6,250
89	31	3,947	7,050	1,284	1,738	5,531	5,788
92	34	4,210	7,341	844	1,875	6,188	4,838
94	36	4,031	7,031	825	1,688	5,563	4,725
96	38	4,013	6,928	844	1,694	5,613	4,713

ตารางที่ ก-20 ข้อมูลผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและสภาพค่างทั้งหมดของระบบที่เวลากักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 3 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (มก./ล.)			สภาพค่างทั้งหมด (มก./ล.)		
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
99	41	3,928	7,313	938	1,769	6,238	5,338
101	43	4,088	7,463	938	1,750	5,950	5,177
103	45	4,116	7,744	938	1,763	6,125	5,275
106	48	4,106	7,561	825	1,763	6,013	5,275
108	50	4,003	7,641	830	1,706	6,063	5,411
110	52	3,938	7,303	830	1,694	6,000	5,045
112	54	3,984	7,313	844	1,775	6,025	5,063
114	56	4,022	7,313	800	1,725	5,975	5,075
ค่าเฉลี่ยที่สถานะคงตัว		4,023	7,456	868	1,743	6,048	5,207
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		74	174	59	31	93	138
ค่าสูงสุด		4,116	7,744	938	1,775	6,238	5,411
ค่าต่ำสุด		3,928	7,303	800	1,694	5,950	5,045
จำนวนข้อมูลที่สถานะคงตัว		8	8	8	8	8	8

ตารางที่ ก-21 ข้อมูลผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและสภาพค่างทั้งหมดของระบบที่เวลาพักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (มก./ล.)			สภาพค่างทั้งหมด (มก./ล.)		
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
118	1	4,269	6,509	459	1,800	6,031	4,475
120	3	4,016	7,320	427	1,738	5,338	4,773
123	6	3,913	8,553	695	1,663	6,850	5,308
125	8	4,119	8,713	566	1,675	6,750	5,430
127	10	4,063	7,950	758	1,794	5,400	4,475
130	13	4,138	8,553	602	1,688	4,800	5,075
132	15	3,922	7,835	602	1,800	5,975	4,475
134	17	3,931	8,150	734	1,794	5,413	4,773
137	20	4,250	9,050	742	1,650	6,081	5,083
139	22	4,250	8,966	835	1,663	5,875	6,169
141	24	4,063	8,713	602	1,794	4,800	5,075
144	27	4,138	8,295	667	1,663	5,163	5,083
146	29	3,922	8,300	729	1,800	5,400	5,850
148	31	3,931	8,338	758	1,688	5,413	5,895
151	34	4,119	8,900	742	1,794	6,081	6,169
153	36	4,250	8,966	853	1,788	5,763	6,613
155	38	3,931	9,050	844	1,650	5,875	6,975

ตารางที่ ก-21 ข้อมูลผลการศึกษาปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและสภาพค่างทั้งหมดของระบบที่เวลาพักพักทางชลศาสตร์ของถังหมักก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 2 วัน (ต่อ)

จำนวนวันที่ เดินระบบ (วัน)	จำนวนวันที่ เริ่มการทดลอง (วัน)	กรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (มก./ล.)			สภาพค่างทั้งหมด (มก./ล.)		
		ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน	ขยะเข้าระบบ	ถังหมักก๊าซไฮโดรเจน	ถังหมักก๊าซมีเทน
158	41	3,988	8,909	734	1,706	5,725	6,630
160	43	4,269	9,088	835	1,750	5,975	6,856
ค่าเฉลี่ยที่สภาวะคงตัว		4,058	8,793	785	1,739	5,747	6,427
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		153	331	56	59	262	455
ค่าสูงสุด		4,269	9,088	853	1,800	6,081	6,975
ค่าต่ำสุด		3,922	8,300	729	1,650	5,400	5,850
จำนวนข้อมูลที่สภาวะคงตัว		7	7	7	7	7	7

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวลลนา ใจทาลี เกิดเมื่อวันที่ 21 พฤศจิกายน พ.ศ. 2526 ณ จังหวัดเชียงใหม่ มีภูมิลำเนาอยู่ในอำเภอแม่ทะ จังหวัดลำปาง จบการศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเมื่อปีการศึกษา 2548 หลังจากนั้นในปีการศึกษา 2549 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย