

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นจากน้ำเสียโรงงานขอสปรุงรส

นายวีรภัทร ฤทธาภิรมย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIOHYDROGEN PRODUCTION BY ANAEROBIC BAFFLED REACTOR FROM  
WASTEWATER OF SEASONING SAUCE FACTORY

Mr.Verapat Rittapirom

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ แบบแผ่นกั้นจากน้ำเสียโรงงานขอสปรุงรส
โดย	นายวิรัชกร ฤทธาภิรมย์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัย  
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. ตะวัน ลิ้มปิยากร)

.....กรรมการ  
(อาจารย์ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงศ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร พุททวงษ์)

วีรภัทร ฤทธาภิรมย์ : การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น  
จากน้ำเสียโรงงานซอสปรุงรส. (BIOHYDROGEN PRODUCTION BY ANAEROBIC  
BAFFLED REACTOR FROM WASTEWATER OF SEASONING SAUCE FACTORY)  
อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ ดร. ชเรศ ศรีสถิตย์, 115 หน้า.

งานวิจัยนี้สนใจในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียโรงงานซอสปรุงรส (มีค่าซีโอดีเฉลี่ยที่  
18,000-20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ พีเอช 3-4) โดยระบบแผ่นกั้นไร้อากาศแบบ 3 ห้องปริมาตรสุทธิ 12  
ลิตร ซึ่งแบ่งชุดการทดลองตามพีเอชเริ่มต้นคือที่พีเอชน้ำเสียจริง พีเอช 5 และพีเอช 6 แต่ละชุดการทดลอง  
มีการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ด้วยความร้อน (ที่ 80 °ซ และ 110 °ซ 30 นาที) เปรียบเทียบกับหัวเชื้อจุลินทรีย์  
ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ โดยเดินระบบแบบต่อเนื่องที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 5 วัน ณ อุณหภูมิห้องทุกชุดการ  
ทดลอง

สำหรับประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีตามชุดการทดลองที่ทุกพีเอชเริ่มต้น เกิดประสิทธิภาพ  
สูงสุดเมื่อระบบไม่มีการปรับสภาพหัวเชื้อ โดยที่พีเอชน้ำเสียจริง พีเอช 5 และพีเอช 6 มีร้อยละการบำบัด  
ซีโอดีเฉลี่ย 27.35 36.77 และ 40.28 ตามลำดับ

จากผลการทดลองทั้งหมดเมื่อหัวเชื้อจุลินทรีย์ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนที่ 110 °ซ พบว่ามี  
ปริมาณร้อยละของก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ โดยชุดการทดลองที่พีเอชเริ่มต้น  
เท่ากับพีเอช 5 ได้ก๊าซไฮโดรเจนปริมาณสูงร้อยละ 35.0 ของปริมาณก๊าซทั้งหมดซึ่งสูงกว่าพีเอชเริ่มต้น  
อื่นๆ ส่วนอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนมีค่า 5.5 มล./ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด สำหรับที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6  
ได้ก๊าซไฮโดรเจนปริมาณสูงร้อยละ 33.4 ของปริมาณก๊าซทั้งหมด ส่วนอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนมีค่า  
8.12 มล./ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด ขณะที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับพีเอชน้ำเสียจริง ได้ก๊าซไฮโดรเจนปริมาณสูง  
ร้อยละ 24.6 ของปริมาณก๊าซทั้งหมด และมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนมีค่า 6.75 มล./ก. ซีโอดีที่ถูก  
บำบัด

เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีและอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนตามการแปรผันของ  
สภาวะพีเอชเริ่มต้นและการปรับสภาพหัวเชื้อ พบว่าน้ำเสียที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับพีเอช 6 มีค่าร้อยละบำบัด  
ซีโอดีสูงสุด สำหรับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ เท่ากับ ร้อยละ 40.28 ซีโอดีที่ถูกบำบัด และมี  
อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด เมื่อปรับสภาพหัวเชื้อที่ 110 °ซ เท่ากับ 8.12 มล./ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ.....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา 2553

## 5170470221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : BIOHYDROGEN / ANAEROBIC BAFFLED REACTOR / SEASONING SAUCE FACTORY WASTEWATER

VERAPAT RITTAPIROM : BIOHYDROGEN PRODUCTION BY ANAEROBIC BAFFLED REACTOR FROM WASTEWATER OF SEASONING SAUCE FACTORY. ADVISOR : ASSOC. PROF. THARES SRISATIT. Ph.D., 115 pp.

This research is interested in the production of hydrogen from wastewater of seasoning sauce factory (the average total COD value was found to be around 18,000-20,000 mg/l and pH~3-4) by using a laboratory-scale three-compartment anaerobic baffled reactor (ABR) with an effective volume of 12 liters were used to study the effect of initial pH (Wastewater initial pH was varied at raw-pH, 5 and 6) and initial seed preparation (Two anaerobic sludge used were treated with heat at 80 °C and 110 °C 30 minutes compare with non-pretreated). By the operating cycle continuous period of Hydraulic Retention Time (HRT) 5 days at room temperature for all experimental set.

For efficiency of COD removal, under treatment at any initial pH. Most effective when there is no pretreatment inoculum. It was found that the initial pH of raw-wastewater pH 5 and pH 6 have 27.35 36.77 and 40.28 % COD removed efficiency.

From all experimental set, when the microorganisms through the pretreatment with 110 ° C. Found that the percentage of the maximum hydrogen gas in biogas composition. The trial at Initial pH was pH 5 showed highest H<sub>2</sub> production rate (35.0% hydrogen yield) and average yielded 5.5 ml H<sub>2</sub> / g COD removed. The trial at Initial pH was pH 6 showed high H<sub>2</sub> production rate (33.4% hydrogen yield) and average yielded 8.12 ml H<sub>2</sub> / g COD removed and the trial at Initial pH was raw-pH showed high H<sub>2</sub> production rate (24.6% hydrogen yield) and average yielded 6.75 ml H<sub>2</sub> / g COD removed.

When consider with the COD removal efficiency and rate of hydrogen production under conditions of varying initial pH and initial inoculum conditioning, found that the initial pH 6 showed highest COD removal efficiency, 40.28 % for non-pretreated microorganisms and showed highest hydrogen production yield, 8.12 ml / g COD removed, when anaerobic sludge used were treated with heat at 110 °C.

Department: Environmental Engineering

Student's Signature.....

Field of Study: Environmental Engineering

Advisor's Signature.....

Academic Year: 2010.....

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความสามารถและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ณ โอกาสนี้ผู้วิจัยขอสำนึกในพระคุณของท่านทั้งหลายเหล่านี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ชเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ซึ่งสละเวลาคอยให้ความรู้ คำแนะนำ ปรับปรุง แก้ไขวิทยานิพนธ์ และข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งช่วยเหลือและสนับสนุนทุนในการวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจน ดร. ตะวัน ลิ้มปิยากร และ ดร. อัจฉริยา สุริยะวงศ์กรรมการและ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศศิธร พุททวงษ์กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัยที่ได้กรุณาชี้แนะแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่กรุณาอบรมสั่งสอนและถ่ายทอดความรู้แก่ผู้ทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และหน่วยวิจัยการจัดการของเสียอุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการมูลฝอย คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ห้องปฏิบัติการวิจัย พร้อมทั้งขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านของภาควิชาที่เอื้ออำนวยความสะดวกช่วยเหลือทั้งทางด้านเอกสารและการใช้ห้องปฏิบัติการ

ขอกราบขอบพระคุณ ทูพระราชาทาน ในพระองค์สมเด็จพระนางเจ้าสิริกิติ์ พระบรมราชินีนาถ ที่ให้ความอนุเคราะห์ทุนค่าเล่าเรียนตลอดระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบคุณ โรงงานศรีไทยฟู้ด บางปู และ โรงงานผลไม้มาลี สามพราน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการนำน้ำเสียและตะกอนหัวเชื้อจุลินทรีย์มาใช้ในงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณผู้สนับสนุนทุนในการวิจัยทุกท่านรวมทั้งคณะกรรมการจรรยาบรรณที่อนุเคราะห์ทุนเพื่อการเดินทางไปสัมมนาวิชาการ ณ กรุงเทพมหานคร ประเทศเวียดนาม

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา คุณลุงนริศ คุณป้าปราณี และญาติพี่น้องทุกคน ที่คอยสนับสนุนด้านการศึกษาและเป็นกำลังใจเสมอมา โดยเฉพาะคุณแม่และคุณพ่อที่สนับสนุนด้านทุนทรัพย์ในการศึกษาตลอด 25 ปี พร้อมทั้งสนับสนุนในทุกๆ ด้านตลอดชีวิตของข้าพเจ้าจนถึงทุกวันนี้

ท้ายที่สุดขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ทุกคนของข้าพเจ้าที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจด้วยกันตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฅ
สารบัญรูป .....	ฉ
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย .....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
<b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....</b>	<b>3</b>
2.1 ไฮโดรเจน.....	3
2.1.1 พลังงานจากไฮโดรเจน.....	3
2.1.2 การผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากของเสีย.....	5
2.1.2.1 การผลิตไฮโดรเจนจากน้ำด้วยสาหร่าย.....	6
2.1.2.2 การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง.....	6
2.1.2.3 การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบใช้แสง.....	7
2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสีย.....	9
2.1.3.1 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental factor).....	9
2.1.3.2 ปัจจัยทางด้านการดำเนินงาน (Operational factor) .....	11
2.2 กลไกการย่อยสลายแบบไร้อากาศ .....	12
2.2.1 กลไกการย่อยสลายประกอบด้วย 4 ขั้นตอน.....	13
2.2.2 แบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....	16
2.2.2.1 Non-methanogenic bacteria .....	16
2.2.2.2 Methanogenic bacteria .....	18

2.2.3 รูปแบบของระบบบำบัดไร้อากาศ .....	19
2.2.3.1 ถังปฏิกริยาแบบแบคทีเรียแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย .....	19
2.2.3.2 ถังปฏิกริยาแบบแบคทีเรียอยู่ติดกับตัวกลาง .....	19
2.2.3.3 ถังปฏิกริยาแบบผสม.....	19
2.3 ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ .....	20
2.3.1 การพัฒนาของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ.....	20
2.3.2 ประสิทธิภาพของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศและการผลิตก๊าซชีวภาพ .....	22
2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....</b>	<b>30</b>
3.1 แผนการวิจัย.....	30
3.1.1 ศึกษาลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานน้ำซอสปรงรส .....	30
3.1.2 การทดลองช่วงที่ 1 เป็นทดลองในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ.....	30
3.1.3 การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการทดลองในช่วงเดินระบบ.....	31
3.2 ตัวแปรที่ศึกษา .....	35
3.3 หัวเชื้อ (seed).....	36
3.4 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง .....	36
3.4.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง.....	36
3.4.2 เครื่องมืออุปกรณ์ .....	36
3.5 การติดตั้งเครื่องมือและหลักการทำงาน .....	38
3.6 จุดเก็บตัวอย่าง .....	39
3.7 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย .....	39
3.7.1 การเตรียมน้ำเสียเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบ .....	39
3.7.2 การทดสอบระบบ.....	39
3.7.3 วิเคราะห์ลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนเข้าระบบ .....	40
3.7.4 การเริ่มต้นและสถานะในการดำเนินระบบ .....	40
3.7.5 การวิเคราะห์ .....	40
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง.....</b>	<b>42</b>
4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงงานซอสปรงรสที่ใช้ในการทดลอง.....	42



4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพใน ชุดการทดลองที่ 1 .....	43
4.2.1 ผลการทดลองที่พีเอชน้ำเสียจริงตามสภาวะหัวเชื้อจุลชีพเริ่มต้น .....	43
4.2.2 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ .....	46
4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพใน ชุดการทดลองที่ 2 .....	48
4.3.1 ผลการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอช 5 .....	48
4.3.2 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ .....	51
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพใน ชุดการทดลองที่ 3 .....	53
4.4.1 ผลการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอช 6 .....	53
4.4.2 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ .....	55
4.5 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการสร้างกรด .....	58
4.5.1 ผลการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอชน้ำเสียจริง .....	58
4.5.2 ผลการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอช 5 .....	61
4.5.3 ผลการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอช 6 .....	63
4.6 เปรียบเทียบพีเอชที่ส่งผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพตามการ ปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพ .....	66
4.7 สรุปประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงงานซอสปรุงรส .....	69
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>74</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย .....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	75
<b>รายการอ้างอิง .....</b>	<b>76</b>
<b>ภาคผนวก .....</b>	<b>82</b>
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง .....	83
ภาคผนวก ข ผลการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์กรดไขมันระเหย .....	101
ภาคผนวก ค ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ .....	108
ภาคผนวก ง ผลวิเคราะห์ TOC .....	111
ภาคผนวก จ การคำนวณ .....	112

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 115

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน .....	4
2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนและเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ.....	5
2.3 แสดงปริมาณและอัตราการผลิตไฮโดรเจนจากจุลชีพประเภทต่างๆ ของกระบวนการหมักแบบไร้แสง.....	8
2.4 ความต้องการโลหะและสารอาหาร ในโตรเจน และฟอสฟอรัสของระบบไร้อากาศ .....	11
2.5 เปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบแผ่นกั้น ไร้อากาศ .....	24
3.1 จุดเก็บน้ำตัวอย่างและความถี่ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำเสียที่เข้าระบบ ....	30
3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	35
3.3 พารามิเตอร์ของหัวเชื้อที่ทำการวิเคราะห์.....	36
3.4 วิธีวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ .....	40
4.1 ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง .....	42
4.2 สรุปประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่สภาวะต่างๆ.....	57
4.3 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่สภาวะต่างๆ.....	58
4.4 อัตราส่วนบิวทริกต่ออะซิติกในช่วงปลายของทุกชุดการทดลอง .....	65
4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงงานขอสปรงรส .....	71
4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทดลองกับงานวิจัยอื่น .....	72
4.7 เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนกับงานวิจัยอื่น .....	73

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮโดรเจนและลักษณะทางเทอร์โมไดนามิกของการเกิดปฏิกิริยาแบบไร้อากาศ.....	14
2.2 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการไร้อากาศ.....	16
2.3 ลักษณะของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ.....	21
2.4 รูปแบบต่างๆ ของถังปฏิกิริยาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ.....	21
3.1 ขั้นตอนการทดลองที่ 1.....	32
3.2 ขั้นตอนการทดลองที่ 2.....	33
3.3 ขั้นตอนการทดลองที่ 3.....	34
3.4 ถังปฏิกิริยาของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ.....	37
3.5 อุปกรณ์วัดก๊าซแบบแทนที่น้ำ.....	38
3.6 การติดตั้งชุดถังปฏิกิริยา (A) และ ชุดถังปฏิกิริยา (B).....	39
3.7 การเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ.....	41
4.1 รูปลักษณะน้ำเสียโรงงานขอปรับปรุงรส.....	43
4.2 ประสิทธิภาพบำบัดชีโอดีที่พีเอชน้ำเสียจริง.....	45
4.3 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	47
4.4 เปรียบเทียบองค์ประกอบในก๊าซชีวภาพ.....	48
4.5 ประสิทธิภาพบำบัดชีโอดีที่พีเอช 5.....	50
4.6 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	51
4.7 เปรียบเทียบองค์ประกอบในก๊าซชีวภาพ.....	52
4.8 ประสิทธิภาพบำบัดชีโอดีที่พีเอช 6.....	54
4.9 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ.....	55
4.10 เปรียบเทียบองค์ประกอบในก๊าซชีวภาพ.....	56
4.11 ปริมาณกรดไขมันระเหยที่พีเอชน้ำเสียจริง.....	60
4.12 ปริมาณกรดไขมันระเหยที่พีเอช 5.....	62
4.13 ปริมาณกรดไขมันระเหยที่พีเอช 6.....	64
4.14 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเมื่อไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์.....	67
4.15 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเมื่อปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ 80 ° ซ.....	68
4.16 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเมื่อปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ 110 ° ซ.....	68

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) เป็นความหวังในอนาคตอันใกล้ที่จะใช้เป็นพลังงานทางเลือกโดยเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ไฮโดรเจนเมื่อมีการสันดาปด้วยอากาศแล้วจะให้พลังงานสะอาดพร้อมด้วยผลิตภัณฑ์คือน้ำซึ่งปราศจากมลภาวะและไม่ก่อให้เกิดก๊าซที่ส่งผลกระทบต่อภาวะเรือนกระจกที่โลกกำลังเผชิญอยู่ขณะนี้ก๊าซไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี การเผาถ่านหินด้วยวิธี coal gasification หรือการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ต่างๆ ทางชีวภาพ ในวิธีการทั้งหมดนี้การผลิตก๊าซไฮโดรเจนทางชีวภาพเป็นวิธีการที่ประหยัดพลังงาน ซึ่งมีแบคทีเรียจำนวนมากมายหลายชนิดที่มีการศึกษาว่าสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ เช่น แพลคทีทิว แอนแอโรบัส แอโรบัส ไชยาโนแบคทีเรีย และแบคทีเรียสังเคราะห์แสง การผลิตก๊าซไฮโดรเจนทางชีวภาพจากสารชีวมวลต่างๆ ที่สามารถหมุนเวียนนำกลับมาใช้ได้ เช่น องค์กรประกอบอินทรีย์สารต่างๆ ในของเสียและน้ำเสีย ซึ่งเป็นประเด็นหลักที่นำมาแก้ปัญหาภาวะโลกร้อนในยุคปัจจุบัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียโรงงานขอสปรงรสด้วยระบบไร้อากาศแบบแผ่นกั้น

โดยในงานวิจัยนี้จะได้ทำการศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากระบบอาทิกำพีเอช และหัวเชื้อจุลชีพที่ผ่านการคัดกรอง นอกจากนั้นจะศึกษาถึงประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนต่อปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำเสียเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานในวงการอุตสาหกรรม โดยให้ความสนใจที่อุตสาหกรรมอาหารประเภทน้ำขอสปรงรสที่มีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 18,000-20,000 มก./ล. และมีสถานะเป็นกรด (พีเอช 3-4) ซึ่งจำเป็นต้องทำการบำบัดแบบไร้อากาศอยู่แล้ว งานวิจัยนี้จะได้ควบคุมสถานะการผลิตก๊าซไฮโดรเจนให้เกิดขึ้นเท่านั้นโดยจะควบคุมและรักษาปฏิกิริยาให้อยู่ในช่วงของสภาพกรดไว้ตลอดการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ผลของงานวิจัยนี้จะนำไปสู่การพัฒนากระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน แทนการหมักแบบเดิมที่ปล่อยให้เกิดก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์แล้วขยายผลต่อไป เพื่อนำมาใช้ผลิตเป็นแหล่งพลังงานความร้อนทดแทน โดยมีข้อได้เปรียบของวัตถุดิบตั้งต้นที่มีสถานะเป็นกรดซึ่งแตกต่างจากน้ำเสียแหล่งอื่นๆ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อหาค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในระบบบำบัดแบบแผ่นกั้นไร้อากาศ (Anaerobic baffled reactor)
- 1.2.2 เพื่อศึกษาผลของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านการคัดกรองด้วยอุณหภูมิที่แตกต่างกันสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจน
- 1.2.3 เพื่อหาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนภายใต้สภาวะไร้อากาศจากน้ำเสียโรงงานขอสงวนสิทธิ์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงปฏิบัติการเป็นการทดลองแบบต่อเนื่องภายใต้สภาวะไร้อากาศ ณ อุณหภูมิห้อง โดยทำการวิจัยที่หน่วยวิจัยการจัดการของเสียอุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการมูลฝอยภาควิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีขอบเขตการวิจัยดังนี้

- 1.3.1 ใช้ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น (Anaerobic baffled reactor: ABR)
- 1.3.2 ใช้น้ำเสียจริงในการทดลอง จากอุตสาหกรรมอาหารประเภทน้ำขอสงวนสิทธิ์ ที่มีค่าซีโอดีของน้ำเสียอยู่ในช่วง 18,000-20,000 มก./ล.
- 1.3.3 พีเอชที่ทำการศึกษาในการเดินระบบคือที่พีเอชเริ่มต้นเป็น 3-4 (น้ำเสียจริง) 5 และ 6
- 1.3.4 หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ศึกษามีทั้งที่ผ่านการคัดกรอง (ผ่านการต้มที่ 80 °ซ และ 110 °ซ เป็นเวลา 30 นาที) และไม่ผ่านการคัดกรอง (Original seed)
- 1.3.5 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้แก่ พีเอช ซีโอดี บีโอดี และ ไนมันระเหยง่าย (VFA)
- 1.3.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ไฮโดรเจน มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ รวบรวมปริมาณก๊าซด้วยหลักการแทนที่น้ำและวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยวิธีก๊าซโครมาโทกราฟี

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

เพิ่มศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนในระดับห้องปฏิบัติการและสามารถนำไปพัฒนาเพิ่มศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อผลิตไฮโดรเจนชีวภาพที่สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นธาตุเคมี ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐานเป็นก๊าซที่โมเลกุลมี 2 อะตอม ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ติดไฟง่าย ไม่เป็นโลหะ ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่เบาที่สุด และมีปรากฏในจักรวาลมากที่สุด มีอยู่ในน้ำ ในสารประกอบอินทรีย์ทุกตัว และสิ่งมีชีวิตทุกชนิด นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตแอมโมเนีย ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทน และเป็นพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง ไฮโดรเจนที่ใช้ในการค้าได้มาจากการย่อยก๊าซธรรมชาติ การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีที่ง่ายแต่สิ้นเปลือง ปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์กำลังวิจัยเกี่ยวกับวิธีใหม่ๆ ในการผลิตไฮโดรเจน เช่น การใช้สาหร่ายเขียว การใช้ผลิตภัณฑ์จากชีวมวล เป็นต้น

##### 2.1.1 พลังงานจากไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นก๊าซที่สามารถมีบทบาทสำคัญในด้านพลังงานในอนาคต ปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการกำหนดบทบาทเฉพาะของไฮโดรเจนคือความต้องการพลังงาน คาดกันว่าไฮโดรเจนจะเป็นสิ่งที่มาทดแทนน้ำมันปิโตรเลียม และกลายเป็นแหล่งพลังงานของยานยนต์ในอนาคตอันใกล้ ในคริสต์ศตวรรษที่ 20 มีการใช้ไฮโดรเจนอย่างแพร่หลายในการผลิตแอมโมเนีย เมทานอล ก๊าซโซลีน และน้ำมันที่ให้ความร้อน รวมทั้งสินค้าที่ต้องใช้เป็นประจำ เช่น ปุ๋ย แก้ว โลหะบริสุทธิ์ วิตามิน เครื่องสำอาง วงจรเซมิคอนดักเตอร์ น้ำมันหล่อลื่น น้ำยาทำความสะอาด เนยเทียม และเชื้อเพลิงจรวด เป็นต้น ภายหลังปี 1974 มีการศึกษามากมายเพื่อตรวจสอบการใช้ประโยชน์และส่งเสริมศักยภาพของไฮโดรเจนให้เป็นแหล่งพลังงาน ต่อมาในภาคอุตสาหกรรมทั่วโลกมีการตื่นตัวในการพัฒนาและผลิตไฮโดรเจน ยานพาหนะพลังงานไฮโดรเจน เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน และเทคโนโลยีที่ใช้ไฮโดรเจนอื่นๆ (Midilli และคณะ, 2005)

คุณสมบัติของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน และการเปรียบเทียบคุณสมบัติสำคัญของเชื้อเพลิงไฮโดรเจนและเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และ 2.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงไฮโดรเจน

คุณสมบัติ	หน่วย	ค่า
ความหนาแน่น(ก๊าซ)	kg/m <sup>3</sup>	0.0838
Higher heating value และ Lower heating value	MJ/kg (ของเหลว)	141.9-119.90
Higher heating value และ Lower heating value	MJ/m <sup>3</sup> (ปริมาตร)	11.89-10.05
จุดเดือด	°K/°C	20.41/-252.59
จุดเยือกแข็ง	°K/°C	13.97/-259.03
ความหนาแน่น (ของเหลว)	kg/m <sup>3</sup>	70.8
สัมประสิทธิ์การแพร่ในอากาศ	cm <sup>2</sup> /s	0.61
ความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่	kJ/kg K	14.89
ขีดจำกัดการเผาไหม้ในอากาศ	% (ปริมาตร)	4-75
พลังงานการเผาไหม้ในอากาศ	millijoule	0.02
อุณหภูมิการเผาไหม้	°K/°C	585/312
อุณหภูมิเปลวไฟในอากาศ	°K/°C	2,318/2,045
พลังงานการระเบิด	kJ/g TNT	58.823
การปล่อยรังสีจากเปลวไฟ	%	17-25
Stoichiometric mixture in air	%	29.53
Stoichiometric air/fuel	kg/kg	34.3/1
ความเร็วของเปลวไฟ	cm/s	2.75
Motivity factor		1.00

ที่มา : Midilli และคณะ, 2005



ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบคุณสมบัติของเชื้อเพลิง ไฮโดรเจนและเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ

เชื้อเพลิง	ค่าความร้อนสูงสุด (at 25 °C and 1 atm)	ค่าความร้อนต่ำสุด (at 25 °C and 1 atm)
ไฮโดรเจน	61,000 Btu/lb (141.86 kJ/g)	51,500 Btu/lb (119.93 kJ/g)
มีเทน	24,000 Btu/lb (55.53 kJ/g)	21,500 Btu/lb (50.02 kJ/g)
โพรเพน	21,650 Btu/lb (50.36 kJ/g)	19,600 Btu/lb (45.6 kJ/g)
ก๊าซโซลีน	20,360 Btu/lb (47.5 kJ/g)	19,000 Btu/lb (44.5 kJ/g)
ดีเซล	19,240 Btu/lb (44.8 kJ/g)	18,250 Btu/lb (42.5 kJ/g)
เมทานอล	8,580 Btu/lb (19.96 kJ/g)	7,760 Btu/lb (18.05 kJ/g)

ที่มา: The Fuel Cell Engine Company, 2001

สำหรับในประเทศไทยมีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี โรงงานบางแห่งใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตไอน้ำแต่ปริมาณที่ใช้อยู่มีน้อยมาก การใช้ก๊าซไฮโดรเจนเพื่อผลิตพลังงานคิดเป็นปริมาณเท่ากับ 600 ตัน เทียบเท่าน้ำมันดิบ เพิ่มขึ้นจากปี 2545 คิดเป็นร้อยละ 42.9 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2546)

### 2.1.2 การผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจากของเสีย

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการทางชีวภาพมีสัญญาณในทางที่ดีกว่าการผลิตทางเคมี ซึ่งกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนทางชีวภาพส่วนใหญ่แล้วคือกระบวนการ Bio-photolysis ในน้ำโดยอาศัยสาหร่าย กระบวนการหมักสารอินทรีย์ทั้งแบบใช้แสงและไม่ใช้แสง โดยทั่วไปแล้วคือการหมักสารประเภทคาร์โบไฮเดรตโดยอาศัยแบคทีเรีย ซึ่งของเสียประเภทที่มีองค์ประกอบเป็นสารคาร์โบไฮเดรตในปริมาณมาก มีองค์ประกอบของไนโตรเจนไม่เพียงพอ เช่น เซลลูโลส และแป้ง เป็นต้น ที่มาจากอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมเกษตร โดยน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารบางประเภท เช่น ชีส น้ำมันมะกอก และยีสต์ สามารถนำมาใช้ในการผลิตไฮโดรเจนด้วยเทคโนโลยีที่ใช้กระบวนการทางชีวภาพที่เหมาะสม เป็นต้น การใช้ประโยชน์จากของเสียข้างต้นในการผลิตไฮโดรเจนเป็นวิธีที่ประหยัดในการสร้างพลังงานพร้อมกับบำบัดของเสียไปด้วย (Kapdan และ Kargi, 2006)

ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ โดยที่การผลิตก๊าซไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากหลายแหล่ง ตัวอย่างเช่น ในสหรัฐอเมริกา ก๊าซไฮโดรเจนส่วนใหญ่ผลิตมาจาก

กระบวนการ Thermocatalytic และ Gasification ของก๊าซธรรมชาติซึ่งให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนประมาณ 50% จากอนุพันธ์ปิโตรเลียม Napthenes และ Distillates อีกประมาณ 30% และถ่านหิน 18% ส่วนที่เหลืออีก 2% ได้มาจากกระแสไฟฟ้า (Van Ginkel และคณะ, 2005) น้ำเสียมีศักยภาพสูงสำหรับการผลิตไฮโดรเจนที่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์เพราะการผลิตผลิตภัณฑ์จากของเสียสามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดและกำจัดของเสีย (Water Environment Research Foundation [WERF], 1999)

กระบวนการชีวภาพสำหรับการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

กระบวนการชีวภาพส่วนใหญ่ที่ใช้สำหรับการสร้างก๊าซไฮโดรเจนสามารถจำแนกได้ 3 ประเภท (Kapdan และ Kargi, 2006)

#### 2.1.2.1 การผลิตไฮโดรเจนจากน้ำด้วยสาหร่าย

สาหร่ายทำการแยกโมเลกุลน้ำเป็นไฮโดรเจนไอออนและออกซิเจน โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง การเกิดไฮโดรเจนไอออนแล้วเปลี่ยนไปเป็นก๊าซไฮโดรเจนด้วยเอนไซม์ไฮโดรจีเนส ซึ่งทำการเปลี่ยนโดยตรงที่น้ำให้เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนโดยใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน ตามปฏิกิริยาข้างล่างดังนี้

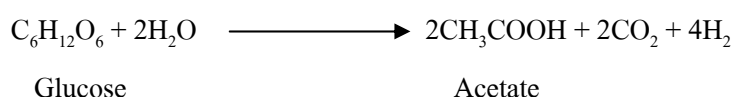


ปฏิกิริยาต้องการเฉพาะน้ำและแสงแดดเท่านั้น อย่างไรก็ตามด้วยโครงสร้างพันธะทางธรรมชาติในกระบวนการนี้จึงให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนต่ำ เนื่องจากมีปฏิกิริยาที่ซับซ้อน

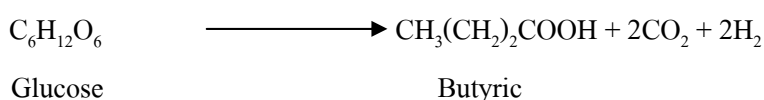
#### 2.1.2.2 การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง

การหมักแบบไม่ใช้แสงของของเสียจำพวกสารอินทรีย์ มีแนวโน้มแสดงถึงการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพที่ดีเปรียบเทียบกับวิธีที่สังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) (Levin และคณะ Love, 2004) ข้อดีคือมีอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์ที่สูงโดยไม่ต้องการพลังงานแสง ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับปริมาณออกซิเจนที่จำกัดและสามารถเดินระบบด้วยราคาค่าใช้จ่ายที่ต่ำ ชีวมวลในระบบถูกหมักเป็นอะซิเตท คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ดังปฏิกิริยาข้างล่างดังนี้

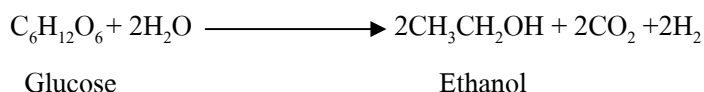
Facultative anaerobes



Anaerobic bacteria



## Anaerobic bacteria

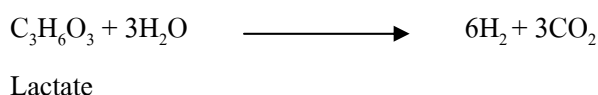


Fermentative bacteria ได้แก่ *Clostridium sp.* และ *Enterobacter sp.* เป็นแบคทีเรียทั่วไปที่สามารถสร้างก๊าซไฮโดรเจนได้ ซึ่ง *Clostridium sp.* เป็นที่รู้จักดีว่าเป็นตัวสร้างไฮโดรเจน (Chen และคณะ, 2005) มีการรายงานผลถึงปริมาณไฮโดรเจนที่ *Clostridium sp.* สร้างได้ถึง 1.4-2.8 โมลไฮโดรเจน/โมลกลูโคส อย่างไรก็ตามมันมีความไวต่อปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในระบบ มันเป็นการยากที่จะทำการคัดแยกเฉพาะเชื้อที่สามารถสร้างไฮโดรเจนได้ และส่วนมากเชื้อผสมก็ถูกใช้เป็นตัวเชื้อที่ทำการเติมลงในระบบมากกว่าเชื้อเดี่ยว (Van Ginkel และคณะ, 2005) ตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณและอัตราการผลิตไฮโดรเจนจากจุลชีพประเภทต่างๆ ของกระบวนการหมักแบบไร้แสง

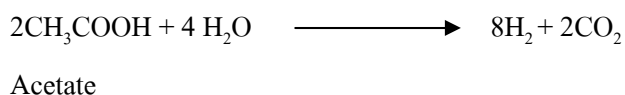
## 2.1.2.3 การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไร้แสง

แบคทีเรียประเภท photo-heterotrophic บางชนิดสามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่าย (อะเซติก แลคติก และบิวไทริก) ให้เป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ภายใต้สภาวะไร้อากาศแบบมีแสง ดังนั้นกรดไขมันระเหยง่ายที่ถูกสร้างขึ้นในขั้นตอนการสร้างกรด (acidogenic phase) ของกระบวนการย่อยแบบไร้อากาศของของเสียสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์โดยแบคทีเรียไร้อากาศประเภทสังเคราะห์แสงได้ ดังสมการข้างล่างนี้ (Kapdan และ Kargi, 2006)

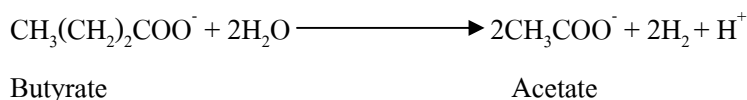
## Photosynthetic anaerobic bacteria



## Photosynthetic anaerobic bacteria



## Photosynthetic anaerobic bacteria



ตารางที่ 2.3 แสดงปริมาณและอัตราการผลิตไฮโดรเจนจากจุลินทรีย์ประเภทต่างๆ ของกระบวนการหมักแบบไร้แสง

จุลินทรีย์	สารตั้งต้น	ระบบ	ปริมาณไฮโดรเจน	อ้างอิง
Mixed culture	Arabinose	Batch	2.5 mol-H <sub>2</sub> /mol-arabinose consumed	Abreu และคณะ (2009)
Anaerobic mixed microflora (35 °C)	glucose	MBR adding 10.9FeSO <sub>4</sub> /l	1.6 mol-H <sub>2</sub> /mol-glucose	Lee และคณะ (2009)
Mixed culture (Anaerobic swine sludge)	glucose (synthetic wastewater)	AFBR	2.49 mol-H <sub>2</sub> /mol-glucose	Amorim และคณะ (2009)
<i>Enterobacter aerogenes</i>	glucose	Batch	0.83 mol-H <sub>2</sub> /mol-glucose	Zhao และคณะ (2009)
<i>Clostridium butyricum</i>	glucose	Batch	31.95 mL H <sub>2</sub> /g COD	Chong และคณะ (2009)
Mixed microflora (45 °C)	Cattle Wastewater	Batch	368 ml H <sub>2</sub> /g COD consumed	Tang และคณะ (2008)
<i>Rhodospirillum rubrum</i> (30 °C)	Acetate	CSTBR	16 mmol/g cell. h	Younesi และคณะ (2008)
Mixed microbial cultures (35 °C)	molasses-containing wastewater	EGSB	3.47 mol/mol sucrose	Guo และคณะ (2008)
Mixed microbial (35 °C)	cheese processing wastewater	CSTR	10 mM/g COD	Yang และคณะ (2007)
Mixed culture (35 °C)	Molasses	CAFR	26.13 mol/kg COD removed	Ren และคณะ (2006)

### 2.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสีย

เนื่องจากในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ประกอบด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม ที่เกี่ยวข้องกันได้แก่ แบคทีเรียพวกที่ไม่สร้างก๊าซมีเทนและแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสภาวะแวดล้อมให้มีสภาพที่เหมาะสมที่จะทำให้แบคทีเรียเหล่านี้อยู่ด้วยกันได้เป็นอย่างดี ในการที่จะควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจะต้องทำให้แบคทีเรียอยู่ในสภาวะสมดุลกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม และ ปัจจัยทางด้านการทำงาน

#### 2.1.3.1 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental factor)

##### 1.) อุณหภูมิ (Temperature)

การย่อยสลายแบบไร้อากาศมีอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วง คือ อุณหภูมิระหว่าง 30-40 °C (Mesophilic temperature) แบคทีเรียที่ทำงานในช่วงนี้เรียกว่า Mesophilic bacteria และอุณหภูมิระหว่าง 50-60 °C (Thermophilic temperature) แบคทีเรียที่ทำงานในช่วงนี้เรียกว่า Thermophilic bacteria ในช่วง Thermophilic temperature อัตราเร็วของปฏิกิริยาและประสิทธิภาพของระบบจะมากกว่าในช่วง Mesophilic temperature ทำให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่ระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์สั้นลงและลดปริมาณถังหมักลง แต่ระบบการหมักที่อุณหภูมิสูงมีข้อเสียคือ Thermophilic bacteria ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ไม่ดีเท่า Mesophilic bacteria การควบคุมระบบจึงมีความเสี่ยงสูงต่อการล้มเหลวของระบบ และยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของระบบอีกด้วย ซึ่งเมื่อคำนึงถึงจุดนี้แล้วระบบการหมักที่อุณหภูมิต่ำน่าจะเหมาะสมกับประเทศไทยมากกว่าเพราะสภาพอากาศของประเทศไทยมีอุณหภูมิอยู่ในช่วงนี้

Masse และ Masse (2001) รายงานว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงฆ่าสัตว์ภายใต้สภาวะไร้อากาศคือ 20, 25 และ 30 °C สามารถกำจัดซีโอดีไปเป็นมีเทนได้เท่ากับ 84.2, 88.7 และ 90.8 % ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำจัดซีโอดีไปเป็นมีเทนจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงนั้นแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทนจะมีกิจกรรมสูงด้วย

##### 2.) ความเป็นกรดด่าง (pH)

พีเอชเป็นปัจจัยที่สำคัญของระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศที่ต้องรักษาให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมประมาณ 6.5-7.5 ถ้าพีเอชมีค่าสูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง และถ้าพีเอชมีค่าต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะที่สภาวะนี้จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทนเนื่องจากแบคทีเรียเหล่านี้ใช้กรดไขมันระเหยง่ายไม่ทันทำให้ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายถูกสะสมเพิ่มมากขึ้นพีเอชจึงลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ถ้าพีเอชลดต่ำลงถึง 4.5-5.0 จะทำให้ Methanogenic bacteria หยุดการเจริญเติบโต ซึ่ง

สามารถป้องกันได้โดยการเติมสารเคมีพวกต่างๆ ลงไป เช่น ปูนขาว (CaO) โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO<sub>3</sub>) โซดาไฟ (NaOH) และโซเดียมคาร์บอเนต (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) เป็นต้น หรืออาจจะลดปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าระบบลง ในการใช้ด่างแก่หรือคาร์บอเนตปรับสภาพจะทำให้คาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำเกิดสมดุลชั่วคราว เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศถูกดึงเข้าไปทดแทนคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ เพื่อสร้างด่างไบคาร์บอเนตทำให้พีเอชเพิ่มขึ้น แต่เมื่อแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาแทนที่จะทำให้จุดสมดุลเคลื่อนไปจนกระทั่งคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำสมดุลกับคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศซึ่งใช้บ่งชี้สภาวะภายในถังหมักไร้อากาศได้อย่างหนึ่ง คือ ค่าพีเอชแต่มีปัญหาเนื่องจากเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงช้าในขณะที่กรดไขมันระเหยง่ายระเหยเพิ่มมากขึ้นแต่ค่าพีเอชกลับเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องมาจากผลของบัฟเฟอร์ของความเป็นด่างภายในระบบ ดังนั้นการใช้ค่าพีเอชสำหรับการแก้ไขสภาวะภายในระบบอาจจะไม่ทันการ เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามค่าพีเอชก็ยังเป็นสิ่งสำคัญในการควบคุมระบบอยู่ดีเพราะสามารถหาค่าได้ง่ายและรวดเร็ว

### 3.) กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid, VFA)

กรดไขมันระเหยง่ายเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียพวกสร้างกรดซึ่งจะถูกแบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนนำไปใช้เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงาน ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายจะมีส่วนสำคัญต่อค่าพีเอชของระบบ คือ เมื่อมีปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสูงขึ้นพีเอชจะต่ำลง ระดับของกรดอะซิติกที่มีค่าเกิน 800 มก./ล. หรืออัตราส่วนของกรดโพรไพโอนิกต่อกรดอะซิติกเกิน 1.4 จะทำให้ระบบเกิดการล้มเหลวได้ (Marchaim และ Krause, 1993)

### 4.) ความเป็นด่าง (Alkalinity)

ความเป็นด่างในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตที่เกิดมาจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ความเป็นด่างนี้จะเป็บบัฟเฟอร์ที่ดีให้แก่วระบบที่จะควบคุมพีเอชให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญของแบคทีเรีย เมื่อความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายภายในระบบเพิ่มสูงขึ้น ความเป็นด่างไบคาร์บอเนตจะถูกทำลายไป การทำลายความสามารถในการเป็นบัฟเฟอร์นี้เป็นสาเหตุทำให้พีเอชลดลง

### 5.) สารอาหาร (Nutrient)

สารอาหารแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ สารอาหารหลัก (macronutrient) ได้แก่ คาร์บอน (C) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) กำมะถัน (S) และสารอาหารรอง (micronutrient) ได้แก่ แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) แมงกานีส (Mn) ทองแดง (Cu) โคบอลต์ (Co) เหล็ก (Fe) นิกเกิล (Ni) ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่แบคทีเรีย

ต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศอย่างน้อยที่สุดต้องมีอัตราส่วนของ บีโอดี:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 100:1.1:0.2 โดยใช้คาร์บอนในการสังเคราะห์พลังงาน ไนโตรเจนในการสังเคราะห์โปรตีนและฟอสฟอรัสในการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก ดังนั้นในการควบคุมสถานะให้เหมาะสมจึงต้องใส่สารอาหารให้เพียงพอแก่ความต้องการ เพราะของเสียที่เข้าสู่ระบบนั้นมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป เช่น ของเสียเศษอาหาร ผักผลไม้ มีสารอาหารเหล่านี้ในปริมาณที่เพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรียแล้วแต่ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมบางอย่างไม่มี จึงจำเป็นต้องเติมสารอาหารเหล่านี้เพิ่ม นอกจากนี้สารอาหารรอนั้นแบคทีเรียมีความต้องการน้อยมาก และในธรรมชาติก็มีเพียงพอต่อความต้องการของแบคทีเรียอยู่แล้วดังตารางที่ 2.4

**ตารางที่ 2.4** ความต้องการโลหะและสารอาหาร ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสของระบบไร้อากาศ (Speece, 1996)

โลหะ	ความต้องการ (ก./ซีโอดี 100 ก.)
Ni	0.01
Co	0.01
Fe	1.7
Mo	0.2
N	2.1
P	0.6

#### 2.1.3.2 ปัจจัยทางการทำงาน (Operational factor)

##### 1.) อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic loading rate, OLR)

เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่ใช้ในการกำหนดความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ การปรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ให้มีค่าแตกต่างกัน ทำได้โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของของเสียที่ไหลผ่านถังหมัก หรือเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของของแข็งหรือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าไปซึ่งการเปลี่ยนอัตราการป้อนสารอินทรีย์จะมีผลต่อระยะเวลาเก็บกักด้วย

##### 2.) ระยะเวลาเก็บกักชลศาสตร์ (Hydraulic retention time, HRT)

เป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้ในการควบคุมประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ อัตราเร็วของการย่อยสลายจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นจะลดลงจนกระทั่งถึงขั้นหนึ่งที่แบคทีเรียถูกล้างออกจากระบบ (Wash out) ในอัตราที่เร็วกว่าแบคทีเรียจะเพิ่มจำนวนขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลวได้

สามารถแก้ไขการที่แบคทีเรียถูกล้างออกจากระบบได้โดยการเพิ่มระยะเวลาเก็บกักให้นานขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลาเก็บกักจะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบการหมัก กล่าวคือ ระยะเวลาเก็บกักเป็นระยะเวลาที่ของเสียอยู่ในถังหมักสามารถหาได้โดยการหารปริมาณของเสียที่เติมลงในถังหมักต่อหน่วยเวลา ระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบ (Solid retention time, SRT) หมายถึงมวลของของแข็งภายในระบบหารด้วยมวลของของแข็งที่ปล่อยออกจากระบบต่อวัน ในถังหมักแบบธรรมดาที่ไม่มีกรหมุนเวียนตะกอน มีระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบจะเท่ากับระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (SRT เท่ากับ HRT) แต่ในถังหมักที่มีการหมุนเวียนตะกอน มีระยะเวลาที่แบคทีเรียอยู่ในระบบมากกว่าระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (SRT มากกว่า HRT)

### 3.) การกวน (Mixing)

การกวนเป็นสิ่งสำคัญในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยมีหลักการคือ ทำให้สารอินทรีย์อยู่ในสภาพแขวนลอย เพื่อให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างสารอาหารกับแบคทีเรีย เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วย และป้องกันการเกิดการสะสมของสารอินทรีย์ตามจุดต่างๆ ของถังหมัก และทำให้ของเหลวภายในถังหมักมีสภาพเป็นเนื้อเดียวกัน วิธีในการกวนของเหลวในถังหมักมีหลายวิธี เช่น ใช้เครื่องกวน สูบอัดก๊าซไปทางด้านก้นของถังหมัก หมุนเวียนตะกอนด้วยปั๊ม ใช้การสูบลมผ่านท่อขึ้น เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป การที่จะเลือกใช้วิธีไหนต้องคำนึงถึงปัจจัยในหลายๆ ด้านประกอบกัน

## 2.2 กลไกการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (มันลิน ตันทูลเวศม์, 2546)

การกำจัดสารอินทรีย์โดยใช้กระบวนการทางชีวภาพเกิดขึ้นจากการที่จุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์เป็นอาหาร โดยคาร์บอนในสารอินทรีย์ส่วนหนึ่งจะใช้ในการหายใจและได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา โดยส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้สร้างเซลล์ใหม่ของจุลินทรีย์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นเป็นก๊าซซึ่งออกสู่บรรยากาศได้ง่าย ส่วนเซลล์จุลินทรีย์สามารถแยกออกจากน้ำได้โดยวิธีการตกตะกอนอาจจะมีสารอินทรีย์ตกค้างอยู่บ้างแต่ถือว่าเป็นสารเหลือที่ไม่ย่อยสลายอีกแล้ว จุลินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจนเหมาะสมสำหรับใช้กำจัดสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 50-400 มก./ล. ในรูปของซีโอดีที่ย่อยสลายได้ ถ้าซีโอดีที่ย่อยสลายได้มีความเข้มข้นต่ำกว่า 50 มก./ล. ควรใช้วิธีบำบัดทางเคมี-ฟิสิกส์มากกว่า ส่วนในกรณีที่ซีโอดีที่ย่อยสลายได้สูงกว่า 4,000 มก./ล. ควรใช้ระบบบำบัดแบบไร้อากาศเพื่อลดซีโอดีที่ย่อยสลายได้ลงให้ต่ำกว่า 4,000 มก./ล. เสียก่อน แล้วจึงใช้ระบบที่ใช้อากาศช่วยลดอีกทีหนึ่ง แต่ถ้าซีโอดีที่ย่อยสลายได้ของสารอินทรีย์สูงเกินกว่า 50,000 มก./ล. แล้ว วิธีการระเหย (evaporation) และการเผา (incineration) อาจจะมีประสิทธิภาพดีกว่าวิธีอื่นๆ ฉะนั้นต้องตระหนักว่าความเข้มข้นที่พูดถึงนี้เป็นความเข้มข้นในรูปสารละลาย ถ้าน้ำ



เสียมิตะคอนแวนลอยของสารอินทรีย์แล้ว มักจะพบว่า การกำจัดตะกอนออกก่อนด้วยวิธีทางกายภาพ ทางเคมี หรือผสมกันระหว่างเคมีและกายภาพ จะเป็นการประหยัดและง่ายกว่าที่จะใช้ระบบทางชีวเคมีเพียงอย่างเดียว

### 2.2.1 กลไกการย่อยสลายประกอบด้วย 4 ขั้นตอน ได้แก่

#### 1.) ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ขั้นตอนนี้แบคทีเรียสร้างกรดจะปล่อยเอนไซม์ออกมาภายนอกเซลล์ ย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน เป็นต้น ซึ่งมีโมเลกุลเล็กจนผ่านเซลล์เมมเบรนเข้าสู่ภายในเซลล์ของแบคทีเรียสร้างกรดได้ ขั้นตอนนี้ค่อนข้างช้าและเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการเกิดปฏิกิริยา อัตราเร็ว และความสมบูรณ์ของขั้นตอนนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ เวลาที่กักน้ำ และค่าพีเอช เป็นต้น

#### 2.) การสร้างกรด (Acidogenesis)

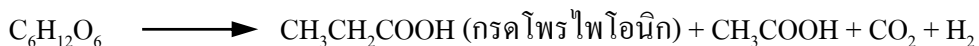
ผลผลิตของขั้นตอนที่ 1 จะเข้าสู่ภายในเซลล์ของแบคทีเรียสร้างกรด และถูกออกซิไดซ์ให้กลายเป็นกรดไขมันระเหยง่าย เช่น กรดอะเซติก กรดโพรไพโอนิก กรดบิวไทริก เป็นต้น ซึ่งจะเป็นอะไรนั้นขึ้นกับค่าความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนในระบบ ดังแสดงในปฏิกิริยาแบคทีเรียสร้างกรดส่วนใหญ่เป็นชนิดไร้อากาศอย่างเด็ดขาด มีเพียงส่วนน้อยประมาณ 1% เป็นชนิดกึ่งไร้อากาศ

#### ปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างกรด

##### ความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนต่ำ



##### ความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนสูง



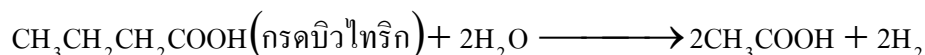
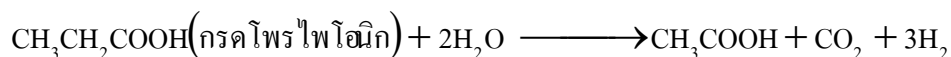
#### 3.) การสร้างกรดอะเซติก (Acetogenesis)

แบคทีเรียสร้างกรดอะเซติกจะเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายที่ได้จากขั้นตอนการสร้างกรดเป็นกรดอะเซติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยจะเกิดภายใต้สภาวะความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนต่ำเท่านั้น ดังแสดงในปฏิกิริยาการสร้างมีเทนโดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนและการ

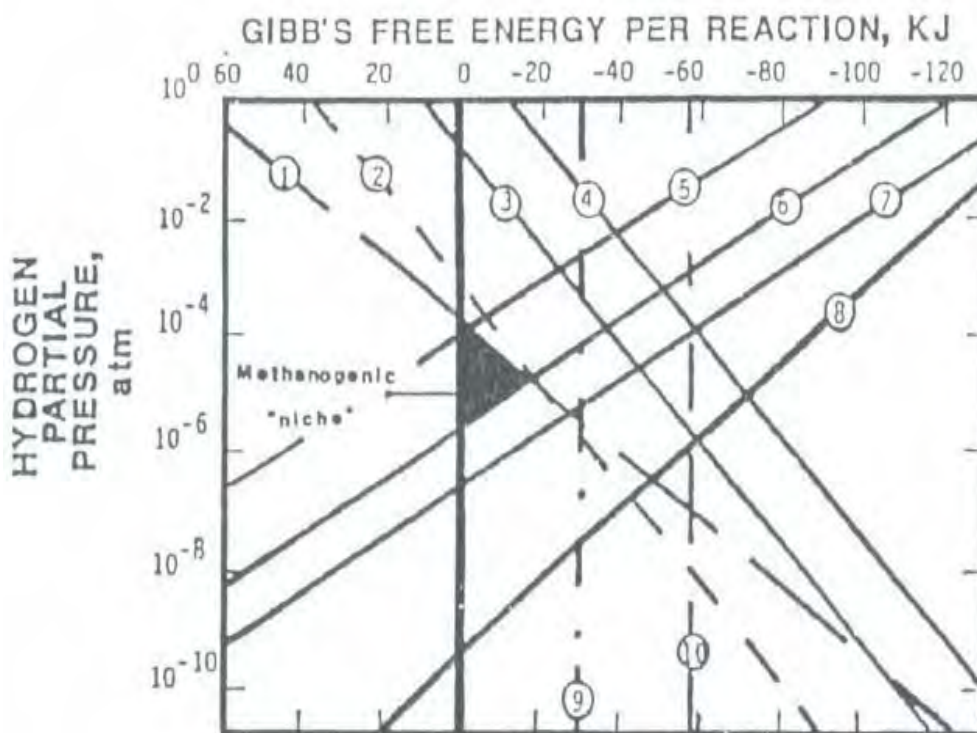
ใช้ก๊าซไฮโดรเจนโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต จะช่วยไม่ให้เกิดการสะสมของกรดโพรไพโอนิกซึ่ง  
เป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน

ปฏิกิริยาในขั้นตอนการสร้างอะเซติก

ความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนต่ำ



และภายในสถานะที่ไฮโดรเจนมี Partial Pressure ต่ำนี้ ปฏิกิริยาจะถูกผลักไปทาง  
ขวามือ มีค่า  $\Delta G^\circ$  ลดลงดังแสดงในรูปที่ 2.1 และมีโอกาสเกิดขึ้นได้ง่าย (Pohland, 1992) เนื่องจาก  
ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส อะซิโคเจนซิส และอะซิโตเจนซิส มักเกิดต่อเนื่องกันไป จึงถูกเรียกรวมๆ  
ว่าเป็น กระบวนการสร้างกรดอินทรีย์ (acidification) และเรียกแบคทีเรียเหล่านี้ว่าแบคทีเรียสร้าง  
กรด (acid formers)



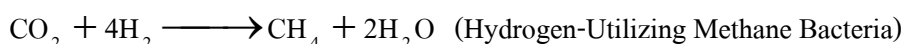
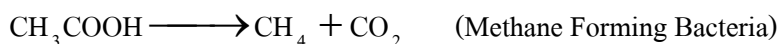
รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างไฮโดรเจนและลักษณะทางเทอร์โมไดนามิกของการ  
เกิดปฏิกิริยาแบบไร้อากาศ (Pohland, 1992)

#### 4.) การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

แบคทีเรียสร้างมีเทนเป็นชนิดไร้อากาศอย่างเด็ดขาด ใช้สารอาหารจำเพาะเจาะจง แบ่งสารอาหารได้เป็น 3 ประเภทดังนี้

- (1) ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ รวมทั้งฟอร์มิก (HCOOH) และคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยมีก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวให้อิเล็กตรอน
- (2) กลุ่มเมทิล ( $\text{CH}_3$ ) ที่มีคาร์บอน 1 อะตอม เช่น เมทานอล ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ), เมทิลเลมัล ( $\text{CH}_3\text{NH}_3^+$ )
- (3) กรดอะเซติก

การเกิดก๊าซมีเทนเกิดได้ 2 แบบ แบบแรกคือ เกิดจากการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายไปเป็นก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้มีปริมาณเป็น 70% ของก๊าซมีเทนสามารถเกิดขึ้นได้ในระบบอีกแบบหนึ่งจะเกิดจากการรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียประเภท Hydrogen-Utilizing Methane Bacteria



แบคทีเรียที่เป็นตัวสร้างมีเทนเจริญเติบโตได้ช้า และสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตค่อนข้างมาก ทำให้ช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียชนิดนี้แคบ โดยสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงพีเอชประมาณ 6.5–7.2 นอกจากนี้อุณหภูมิก็มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียอีกด้วยและมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (Specific Growth Rate) ต่ำ แบคทีเรียในกลุ่มนี้สามารถใช้เพียงสารอาหารที่โครงสร้างไม่ซับซ้อน ดังนั้นการเติบโตของแบคทีเรียที่เป็นตัวสร้างมีเทนนี้จึงขึ้นอยู่กับการทำงานของแบคทีเรียในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและการสร้างกรดและแบคทีเรียทุกกลุ่มต้องทำงานอย่างสัมพันธ์กัน หากพิจารณาของกลุ่มของแบคทีเรียที่อยู่ร่วมกันในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศในแง่ของสภาพการเจริญเติบโตแล้ว กลุ่มของแบคทีเรียที่เป็นตัวสร้างมีเทนจะเป็นกลุ่มแบคทีเรียหลักในการควบคุมปฏิกิริยาทั้งหมดในระบบเนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้มีอัตราการเติบโตช้าที่สุด และมีข้อจำกัดด้านสภาพแวดล้อมของระบบมากกว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่น

ขั้นตอนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic Process) ในขั้นต่างๆ ที่กล่าวมาแล้วสามารถสรุปดังรูปที่ 2.2

Stage	Anaerobic digestion process	Organism group
Hydrolysis	Lipid ↓ Long chain Fatty acids ↓ ↓ Protein ↓ amino acids ↓ ↓ Carbohydrates ↓ sugars ↓ ↓	Acidogenic
Acidogenesis	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Short chain fatty acids + H<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub></div> ↓ ↓	
Acetogenesis	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Acetic acids + H<sub>2</sub> + CO<sub>2</sub></div> ↓ ↓	Acetogenic
Methanogenesis	↓ ↓ CH <sub>4</sub> + CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub>	Methanogenic
หมายเหตุ	—————> High hydrogen partial pressure - - - - -> Low hydrogen partial pressure	

รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยกระบวนการไร้อากาศ

(Sam-soon และคณะ, 1990)

### 2.2.2 แบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

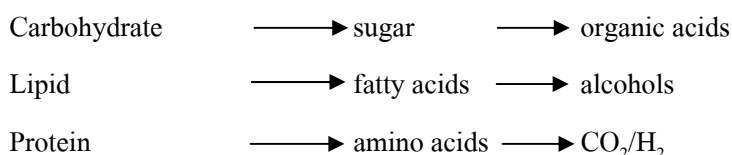
ในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศจะเกี่ยวข้องกับแบคทีเรียหลายชนิด ซึ่งมีหน้าที่การทำงานแตกต่างกัน แบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน (Methanogenic bacteria) ไม่สามารถใช้สารอินทรีย์ที่ซับซ้อนเพื่อผลิตก๊าซมีเทนได้ จึงต้องมีแบคทีเรียพวกที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน (Non-methanogenic bacteria) มาย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านี้ให้กลายเป็นสารที่แบคทีเรียพวกสร้างก๊าซมีเทนนำไปใช้ได้ สามารถแบ่งแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

#### 2.2.2.1 Non-methanogenic bacteria

เป็นกลุ่มของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนไฮโดรไลซิส อะซิโดเจเนซิส และอะซิโดเจเนซิส แบคทีเรียพวกนี้สามารถเจริญเติบโตได้ดีที่พีเอช 4.0-6.5 มีทั้งพวกที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ภายใต้สภาวะไร้อากาศเท่านั้น (Obligate anaerobic bacteria) และพวกที่ดำรงชีวิตอยู่

ได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีอากาศ (Facultative anaerobic bacteria) ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงที่สภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูง สามารถเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า ได้ภายในเวลา 24 ชม. แบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ Fermentative bacteria และ Acetogenic bacteria

1.) Fermentative bacteria ทำหน้าที่ในขั้นตอนไฮโดรไลซิสและอะซิโดเจเนซิส แบคทีเรียในกลุ่มนี้จะผลิตเอนไซม์แล้วปล่อยออกมาออกเซลล์เพื่อย่อยสลายสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส แป้ง ไขมัน และโปรตีน เป็นต้น ให้เป็นสารโมเลกุลเดี่ยวหรือสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงที่แบคทีเรียสามารถนำไปในเซลล์ได้ เช่น น้ำตาล กรดไขมัน กรดอะมิโน เป็นต้น แล้วสารต่างๆ เหล่านี้จะผ่านเข้าไปในเซลล์และถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไขมันระเหยง่ายเช่น อะเซติก บิวไทริก โพรไพโอนิก แลคเตท เอทานอล ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการ

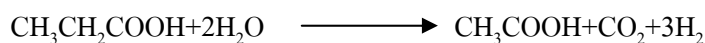


การที่จะได้สารตัวใดเป็นผลผลิตนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสารตั้งต้น (Substrate) และความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน (Hydrogen partial pressure) ในสภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนต่ำ (Low hydrogen partial pressure) แบคทีเรียจะผลิตสารพวกอะเซติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา แต่ในสภาวะที่มีความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนสูง (High hydrogen partial pressure) แบคทีเรียจะผลิตสารพวกโพรไพโอนิก แลคเตท บิวไทริก และเอทานอล

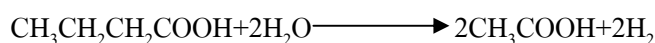
2.) Acetogenic bacteria หรือ Acetogen ทำหน้าที่ในขั้นตอน Acetogenesis แบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ

(1) กลุ่ม Hydrogen producing acetogenic bacteria เป็นแบคทีเรียที่สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนหลายอะตอม (คาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม) และเอทานอลให้เป็นอะเซติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และยังมีหน้าที่ที่สำคัญในฐานะเป็นตัวเชื่อมระหว่างแบคทีเรียที่สร้างกรดและแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน พบว่าก๊าซไฮโดรเจนที่สร้างขึ้นนั้นมีบทบาทสำคัญในการควบคุมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ โดยถ้ามีก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นในปริมาณมากจะทำให้ไฮโดรเจนไอออน (H<sup>+</sup>) เพิ่มมากขึ้น เพื่อชดเชยในระบบเป็นกรดจนกระทั่งไปมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียพวกนี้ แต่ถ้าในระบบมีพวก Methanogenic bacteria อยู่ด้วย ก๊าซไฮโดรเจนจะถูกใช้รีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนใน

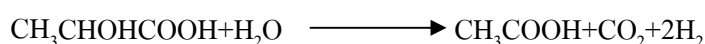
ขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนจึงทำให้ในระบบมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนไม่สูงมากจนถึงระดับที่เป็นพิษได้ตัวอย่างของปฏิกิริยาการเกิดอะเซติก ดังสมการ



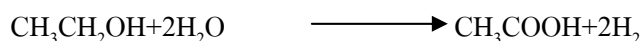
(Propionate)



(Butyrate)



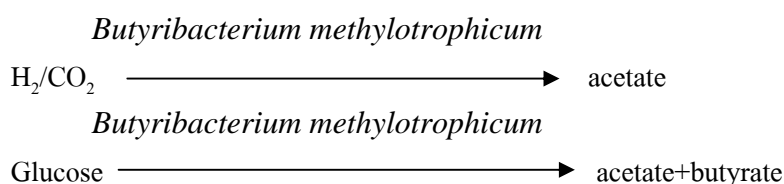
(Lactate)



(Ethanol)

ตัวอย่างแบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ *Desulfovibrio*, *Selenomonas*, *Syntrophomonas* และ *Ruminococcus* แบคทีเรียเหล่านี้มีอยู่ประมาณ 106 เซลล์/มล. ในน้ำเสีย

(2) กลุ่ม Homoacetogenic bacteria เป็นแบคทีเรียที่สามารถใช้สารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอม เช่น ฟอรัมเมท ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ออกมาเป็นอะเซติก แต่ถ้าใช้สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอม เช่น น้ำตาลกลูโคส แลคเตท และไพรูเวท เป็นต้น จะได้ออกมาทั้งอะเซติกและบิวไทริก ดังสมการ

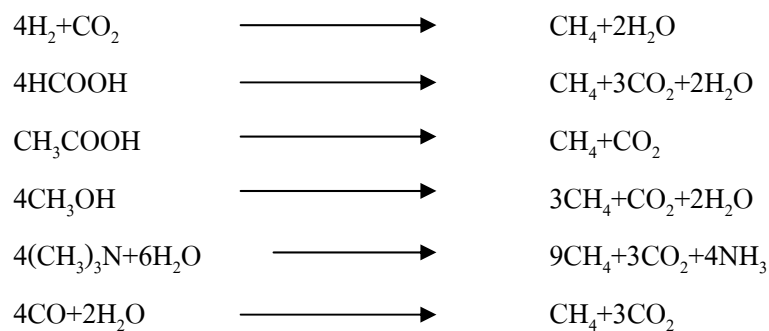


ตัวอย่างแบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ *Butyribacterium methylotrophicum*, *Clostridium thermoaceticum*, *Acetobacterium woodii*, *A. carbinolium*, *Acetoanaerobicum naterae* และ *Eubacterium limosum* แบคทีเรียเหล่านี้มีอยู่ประมาณ 105 เซลล์/มล. ในน้ำเสีย

#### 2.2.2.2 Methanogenic bacteria

Methanogenic bacteria หรือ Methanogen เป็นกลุ่มของแบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอน Methanogenesis แบคทีเรียกลุ่มนี้จัดเป็นพวกที่ไม่ต้องการออกซิเจนอย่างแท้จริง เนื่องจากออกซิเจนจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียนี้สามารถเจริญได้ดีในพีเอชที่เป็นกลางประมาณ 6.8-7.2 อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มนี้จะช้ากว่าแบคทีเรียกลุ่มอื่นในขั้นตอนการย่อยสลายภายใต้สภาวะ

ไร้อากาศ ในการแบ่งเซลล์เพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า ต้องใช้เวลา 3-5 วัน มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะแวดล้อมได้น้อยกว่า เช่น ไม้อาจทนต่อออกซิเจน แม้มีปริมาณเพียงเล็กน้อยหรือไม่อาจเจริญเติบโตได้ดีเมื่ออยู่ภายนอกช่วงพีเอชที่เหมาะสม เป็นต้น และมีข้อจำกัดคือสามารถใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเพียงไม่กี่ชนิด เช่น อะเซติก เป็นต้น และสารประกอบที่มีคาร์บอน 1 อะตอมเท่านั้น เช่น ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ฟอर्मเมท เมทานอล และ เมทิลลามีน ดังสมการ



### 2.2.3 รูปแบบของระบบบำบัดไร้อากาศ

ถึงปฏิกิริยาชีวภาพไร้อากาศได้มีการพัฒนารูปแบบมาอย่างต่อเนื่องจากถึงปฏิกิริยาที่เป็นถังหมักธรรมดา จนถึงถึงปฏิกิริยาที่มีอัตราการย่อยสลายสูง (High rate digester) ที่ใช้ระยะเวลาในการบำบัดสั้นมาก โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

2.2.3.1 ถึงปฏิกิริยาแบบแบคทีเรียแขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย (Suspended Growth) ถึงปฏิกิริยาประเภทนี้อาศัยการกวนผสมแบคทีเรียกับน้ำเสียจึงจำเป็นต้องมีถังตะกอนเพื่อแยกน้ำที่ผ่านการบำบัดและเชื้อแบคทีเรียให้ออกจากกัน และมีการหมุนเวียนเชื้อกลับเข้าสู่ถึงปฏิกิริยา โดยถึงปฏิกิริยาประเภทนี้เหมาะสำหรับระบบย่อยตะกอนหรือน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์อยู่ในรูปของแข็งปนอยู่มาก ระบบในประเภทนี้ เช่น ระบบถังย่อยแบบสัมผัส (Anaerobic Contact) เป็นต้น

2.2.3.2 ถึงปฏิกิริยาแบบแบคทีเรียอยู่ติดกับตัวกลาง (Supported Growth) เนื่องจากแบคทีเรียแบบไม่ใช้อากาศไม่สามารถตกตะกอนได้ดี และอาจหลุดออกไปกับน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว ทำให้มีการปรับปรุงโดยให้แบคทีเรียเกาะติดกับตัวกลางและทำให้แบคทีเรียไม่หลุดออกไปกับน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว ทำให้ค่าใช้จ่ายของการสร้างถังตะกอนเปลี่ยนไปเป็นราคาของตัวกลางที่ให้แบคทีเรียเกาะติด โดยถึงปฏิกิริยาประเภทนี้เหมาะสำหรับน้ำเสียที่สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น ระบบกรองชีวภาพไร้อากาศ ระบบชั้นลอยตัวแบบไร้อากาศ (Anaerobic fluidized bed) เป็นต้น

2.2.3.3 ถังปฏิกริยาแบบผสม (Hybrid) ซึ่งเป็นการนำข้อดีมาใช้และตัดปัญหาข้อด้อยจาก 2 รูปแบบข้างต้น เช่น ระบบยูเอเอสบี (UASB) เป็นระบบที่นำข้อดีของระบบชั้นลอยตัวแบบไร้อากาศ (Anaerobic fluidized bed) มาใช้ประโยชน์โดยพัฒนาให้ตะกอนเกิดเป็นเม็ดตะกอน ทำให้ไม่ต้องเสียพื้นที่ในการใส่ชั้นตัวกลาง

## 2.3 ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ (ABR หรือ Anaerobic Baffled Reactor)

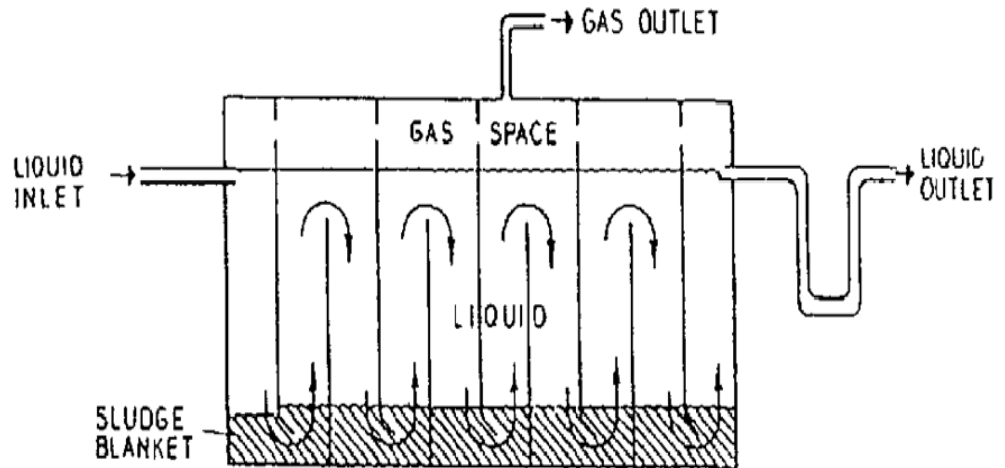
ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศเป็นระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศที่ถูกพัฒนาตั้งแต่ปี ค.ศ. 1980 ในช่วงเวลาใกล้เคียงกับ Lettinga พัฒนาระบบยูเอเอสบี โดย McCarty และคณะที่มหาวิทยาลัย Stanford ได้สังเกตเห็นว่ากลุ่มแบคทีเรียในระบบงานหมุ่นชีวภาพไร้อากาศ (RBC) ส่วนมากสามารถแขวนลอยอยู่ในน้ำเสียและเมื่อได้นำแผ่นงานหมุ่นออกและตัดแปลงมาเป็นระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศจัดว่าเป็นระบบบำบัดที่สามารถบำบัดน้ำเสียได้ที่อัตราสูง (High rate) เนื่องจากสามารถเก็บกักเซลล์จุลินทรีย์ได้จำนวนมาก (SRT สูง) โดยไม่ขึ้นกับระยะเวลาที่กักเก็บน้ำในระบบ (Chynoweth และคณะ, 1980 อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999 )

ข้อดีที่สำคัญของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ คือ สามารถแบ่งขั้นการสร้างกรดไขมันระเหยง่าย และขั้นการสร้างมีเทนตามแต่ละห้องของถัง ระบบนี้จึงเป็นระบบบำบัดแบบ Two-phase system ซึ่งจากลักษณะดังกล่าวเป็นการส่งเสริมความสามารถในการทำงานของระบบบำบัดได้เป็นอย่างดี เนื่องจากแบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทนมีความต้องการในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกันทำให้ง่ายต่อการควบคุมระบบ ข้อเสียของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศสำหรับการออกแบบระบบบำบัดแบบนาร่องหรือระบบบำบัดจริงคือ ต้องออกแบบให้ดินเพื่อควบคุมอัตราการไหลของน้ำและก๊าซที่เหมาะสม และต้องทำให้การกระจายน้ำเสียที่เข้าถังมีความสม่ำเสมอ

### 2.3.1 การพัฒนาของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ

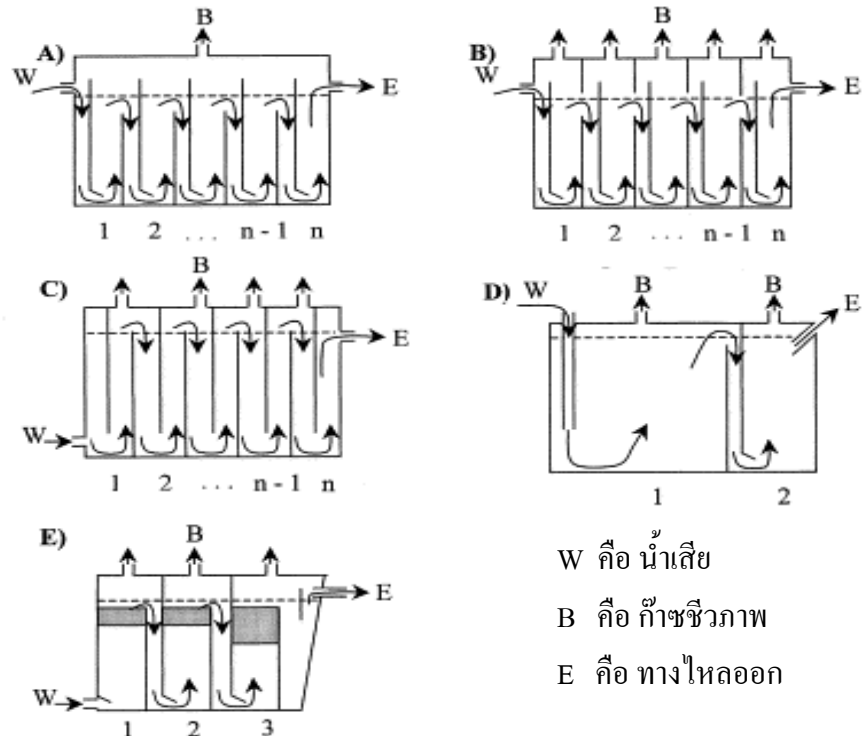
ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศเป็นระบบที่ออกแบบด้วยการใส่นุกรมของแผ่นกั้นทำให้เกิดลักษณะเป็นห้องต่อๆ กัน ดังรูปที่ 2.3 โดยในระบบนี้จะมีการเติบโตของแบคทีเรียเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และเมื่อแบคทีเรียมีมากขึ้นจะเกิดการจับตัวกันทำให้มีผลต่อการไหลของน้ำเสียผ่านชั้นตะกอนแบคทีเรียและมีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ แต่การจับตัวกันของแบคทีเรียจะมีผลน้อยในถังปฏิกริยาที่มีระยะเวลาที่กักเก็บน้ำที่ยาวนาน





รูปที่ 2.3 ลักษณะของระบบแผ่นกั้นไรร้ออากาศ (Marchaim, 2007)

รูปแบบของระบบแผ่นกั้นไรร้ออากาศได้มีผู้พัฒนาปรับปรุงระบบในรูปแบบต่างๆ โดยมีวัตถุประสงค์หลักก็คือ การเพิ่มความสามารถในการกักเก็บเซลล์จุลินทรีย์ให้ได้มากขึ้น แต่บางครั้งได้มีการปรับปรุงระบบในเรื่องอื่นๆ เช่น การบำบัดน้ำเสียที่มีตะกอนมาก หรือการลดต้นทุนค่าก่อสร้าง เป็นต้น ซึ่งสามารถสรุปรูปแบบการพัฒนาบบได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 รูปแบบต่างๆ ของถังปฏิกริยาแบบแผ่นกั้นไรร้ออากาศ (Barber และ Stuckey, 1999)

การพัฒนากระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ไร้อากาศเริ่มต้นในปี 1981 โดย Fannin และคณะ (อ้างถึงใน Barber และ Stuckey, 1999) ได้ศึกษาเรื่องการเพิ่มจำนวนห้องให้กับระบบแผ่นกั้นไร้อากาศเพื่อบำบัดน้ำเสียที่มีตะกอนสูงจากน้ำเสียอาหารทะเล (รูปที่ 2.4 (C)) โดยรับอัตราการบรรทุกทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate) คงที่ที่ 1.6 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าการเพิ่มจำนวนห้องทำให้ปริมาณของแบคทีเรียสร้างมีเทนเพิ่มมากขึ้น โดยปริมาณมีเทนเพิ่มขึ้นจาก 30% เป็นมากกว่า 55% ต่อมาการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบแผ่นกั้น 2 แบบคือ 1) เปรียบเทียบก่อนและหลังมีช่องไหลลงที่แคบ 2) ความเอียงที่ขอบปลายแผ่นกั้นด้านล่าง (รูปที่ 2.4 (A)) จากการทดลองพบว่าระบบที่มีช่องไหลลงที่แคบและขอบแผ่นกั้นด้านล่างที่เอียง ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพและมีอัตราการผลิตมีเทนดีขึ้น แต่ประสิทธิภาพของระบบยังดีกว่าระบบกรองไร้อากาศและระบบงานหมุนชีวภาพไร้อากาศ ซึ่งเมื่อเทียบความสามารถในการกำจัดซีโอดี ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศกำจัดได้ 82% ระบบกรองไร้อากาศกำจัดได้ 92% และระบบงานหมุนชีวภาพไร้อากาศกำจัดได้ 90%

ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบแผ่นกั้นไร้อากาศแบบผสม (hybrid reactor) (รูปที่ 2.4 (E)) เพื่อใช้บำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูง โดยพัฒนาในด้านการเพิ่มระยะเวลาการกักเก็บตะกอน ซึ่งได้ปรับปรุงโดยมีการใส่ชั้นตัวกลางที่ช่องไหลขึ้นของแต่ละห้องและเพิ่มห้องตกตะกอนต่อจากห้องสุดท้ายของระบบ ทำให้สามารถลดตะกอนที่หลุดออกจากระบบและสามารถเวียนตะกอนกลับไปห้องแรกได้ และได้มีการแยกวัดก๊าซเป็นห้องๆ เพื่อช่วยป้องกันแบคทีเรียสร้างกรดอะซิติกจากความเป็นพิษของความเข้มข้นของไฮโดรเจน

Boopathy (1998) ได้ศึกษาการใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศบำบัดน้ำเสียจากการเลี้ยงสุกร โดยปัญหาที่สำคัญในการบำบัดน้ำเสียจากการเลี้ยงสุกรที่ใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ คือ เกิดชั้นตะกอนลอยยากและอัตราการไหลที่สูงทำให้ตะกอนหลุดออกจากระบบ ดังนั้น Boopathy ได้ปรับปรุงระบบแผ่นกั้นไร้อากาศแบบ 2 ห้อง โดยทำให้ห้องแรกใหญ่กว่าห้องที่ 2 (รูปที่ 2.4 (D)) เพื่อลดอัตราเร็วในช่องไหลขึ้นในห้องแรกของระบบทำให้สามารถลดปัญหาตะกอนหลุดออกจากระบบและเพิ่มระยะกักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ ในการทดลองได้มีการเปรียบเทียบกับถังปฏิกริยาแบบ 3 ห้องที่มีปริมาตรรวมเท่ากับถังปฏิกริยาแบบ 2 ห้องที่ปรับปรุงขึ้น ผลปรากฏว่าถังแบบ 2 ห้องที่ปรับปรุงขึ้นมีปริมาณตะกอนหลุดออกจากระบบน้อยกว่า แต่ระบบแบบ 3 ห้องมีประสิทธิภาพในการผลิตมีเทนได้ดีกว่า

### 2.3.2 ประสิทธิภาพของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศและการผลิตก๊าซชีวภาพ

เนื่องจากในระบบไร้อากาศนั้นแบคทีเรียมีการเจริญเติบโตที่ช้า ดังนั้นในช่วงการเริ่มต้นเดินระบบจึงต้องมีภาระบรรทุกทุกสารอินทรีย์ที่ต่ำและอัตราการไหลที่ต่ำ โดยช่วงการเริ่มต้นเดินระบบควรมีอัตราการบรรทุกทุกสารอินทรีย์ที่เข้าระบบประมาณ 1.2 กก. ซีโอดี /ลบ.ม.-วัน และการ

เริ่มต้นระบบมีความสำคัญต่อการเดินระบบ ทำให้ Barber และ Stuckey (1997) ได้พบว่าการเริ่มต้นเดินระบบด้วยค่าระยะเวลาพักเก็บน้ำที่สูงๆ (มากกว่า 80 ชม.) แล้วค่อยๆ ลดระยะเวลาพักเก็บน้ำลงเป็นขั้นๆ โดยควบคุมให้ความเข้มข้นของสารอาหารที่เข้าระบบ (Substrate) คงที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพและความคงตัวของระบบได้ดี และเมื่อทำการแบ่งสารอาหารเข้าในแต่ละห้อง (Split feed) พบว่าสามารถลดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ โดยทำให้ค่าระยะเวลาพักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ในห้องแรกๆ ของระบบมากขึ้น และเมื่อต้องการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงต้องทำการเจือจางหรือเดินระบบที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำต่ำ เนื่องจากมีการเกิดก๊าซจำนวนมากในระบบทำให้เกิดการขยายตัวของชั้นตะกอน ดังนั้นความสามารถในการตกตะกอนจึงลดลง และมีโอกาสที่เซลล์จุลินทรีย์จะถูกชะล้างออกไปได้ เมื่อพิจารณาในแง่ของไคเนติกส์การที่น้ำเสียมีความเข้มข้นสูงทำให้อัตราการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มที่มีค่า  $K_s$  สูง มีการเติบโตมากขึ้นและผลิตก๊าซมีเทนได้มากขึ้น Boopthy และ Tilche (1991) พบว่าแบคทีเรีย *Methanosarcina sp.* เป็นกลุ่มเด่นในตะกอนจุลินทรีย์ เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นสูง

และจากข้อมูลของการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบแผ่นกั้น ไร้อากาศนั้นยังมีข้อมูลไม่มากนัก จึงยกตัวอย่างการเดินระบบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบแผ่นกั้น ไร้อากาศ

พารามิเตอร์	อ้างอิง		
	Bodkhe (2009)	Kuscu และ Sponza (2009)	Krishna และคณะ(2009)
การเดินระบบ			
ถังปฏิกริยา	ABR	ABR/CSTR	ABR
ชนิดสารอาหาร	municipal wastewater	Nitrobenzene wastewater	Low-strength soluble wastewater
ระยะเวลา (วัน)	375	-	-
ระยะเวลากักเก็บ (ชม.)	6	60	8
อุณหภูมิ (°ซ)	-	-	27
ค่าความสกปรก (มก.ซีไอดี/ล.-วัน)	-	30-210	500
ผลการทดลอง			
การบำบัดที่ซีไอดี (%)	84	95	>90
มีเทน (%)	67	48-50	-
ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ลบ.ม.มีเทน/กก.ซีไอดี)	0.34	1.5 L/d	0.4

จากที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ระบบแผ่นกั้น ไร้อากาศได้มีการนำมาใช้บำบัดน้ำเสียได้หลากหลายอย่างซึ่งปัจจุบันได้มีการนำมาใช้มากขึ้นเรื่อยๆ

## 2.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Hwang และคณะ (2009) พบว่าการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของซัลเฟตและพีเอช ต่อการผลิตไฮโดรเจนจากการหมักแบบต่อเนื่องโดยใช้เชื้อผสมมีผลต่อการผลิตไฮโดรเจนสูงสุด 2.8 ล./วัน ที่พีเอช 5.5 และพบว่าที่ความเข้มข้นของซัลเฟต 3,000 มก./ล. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนมีค่าลดลงเมื่อมีการเพิ่มพีเอชจาก 5.5 ไปเป็น 6.2 ซึ่งบิวไทริกเป็นกรดไขมันระเหยง่ายที่มีปริมาณสูงสุด น้ำาออกจากระบบ

Krishna และคณะ (2009) ได้ทำการบำบัดน้ำเสียที่มีค่าความสกปรกต่ำ คือมีค่าซีโอดีละลายน้ำ ประมาณ 500 มก./ล. ด้วยระบบแผ่นกั้นไรร้ออากาศ 8 ห้อง ที่สภาวะคงที่ (Pseudo Steady-State; PSS) พบว่ามีซีโอดีทั้งหมดและซีโอดีละลายน้ำเฉลี่ยที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 8 ชม. 50 และ 40 มก./ล. ตามลำดับ ขณะที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 10 ชม. มีค่าซีโอดีทั้งหมดและซีโอดีละลายน้ำที่ 47 และ 37 มก./ล. ค่าซีโอดีและบีโอดีที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 3 วัน 27 °ซ มีประสิทธิภาพการบำบัดมากกว่า 90 % และพบว่ามีก๊าซมีเทนเกิดขึ้นในระบบมากกว่า 60 % ซึ่งห้องแรกค่าบีโอดีและซีโอดีส่วนใหญ่มีค่าความสกปรกตกลงทำให้พีเอชต่ำลงทันที (จาก 7.8 เป็น 6.7) พร้อมกับเกิดกรดไขมันระเหยง่าย 53-85 มก./ล. โดยที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 8 และ 10 ชม. สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.40 และ 0.36 ลบ.ม./กก.-ซีโอดีที่ถูกบำบัด ซึ่งเป็นองค์ประกอบก๊าซมีเทนถึง 0.29 และ 0.27 ลบ.ม./กก.-ซีโอดีที่ถูกบำบัด ตามลำดับ

Kuscu และ Sponza (2009) ศึกษาผลของการเพิ่มความเข้มข้นไนโตรเบนซีนและระยะเวลาพักเก็บน้ำในการบำบัดไนโตรเบนซีนโดยใช้ระบบแผ่นกั้นไรร้ออากาศ พบว่าเมื่อทำการทดลองที่ความเข้มข้นไนโตรเบนซีน 30 และ 210 มก./ล. มีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 88 และ 92 ตามลำดับ และสามารถกำจัดไนโตรเบนซีนได้เกือบ 100% ผลิตก๊าซมีเทน 1,500 มล./วัน และมีสัดส่วนมีเทนร้อยละ 48-50 และเมื่อลดระยะเวลาพักเก็บน้ำจาก 10.38 วัน เป็น 2.5 วัน ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีจะลดลงจากร้อยละ 94 เป็นร้อยละ 92

Shida และคณะ (2009) ได้ศึกษาเพื่อการวัดประเมินความคงตัวของปริมาณไฮโดรเจนและกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นในระบบไรร้ออากาศแบบ anaerobic fluidized bed reactor (AFBR) ซึ่งประกอบด้วยชั้นดินเหนียว (เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.80-3.35 มม.) เป็นตัวกลาง และเดินระบบที่ระยะเวลาสั้น โดยใช้หัวเชื้อที่ผ่านการคัดกรองด้วยความร้อนและเดินระบบโดยการลดระยะเวลาพักเก็บน้ำจาก 8 ชม. เป็น 1 ชม. มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 30 °ซ และพีเอชประมาณ 3.8 สารอาหารที่เข้าระบบเป็นกลูโคสมีความเข้มข้น 2,000 มก./ล. เมื่อทำการปรับระยะเวลาพักเก็บน้ำลดลงเป็น 1 ชม. ทำให้การผลิตไฮโดรเจนเฉลี่ยแล้วเพิ่มสูงขึ้น และสูงสุดที่ปริมาณ 1.28 ล./ชม. พร้อมกับเกิดก๊าซ

ไฮโดรเจน 2.29 โมลไฮโดรเจน/โมลกลูโคส และที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 2 ชม. มีปริมาณ ไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพเกิดสูงสุดถึง 37 %

Zhu และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการด้วยระบบแผ่นกั้นไร้อากาศแบบ 4 ห้อง โดยใช้น้ำเสียประเภทโปรตีนถั่วเหลืองเป็นค่าปริมาณสารอินทรีย์ในการตรวจสอบลักษณะการเกิดแต่ละขั้นตอนในระบบ ซึ่งพบว่าค่าซีโอดีได้รับการบำบัดสูงถึง 92-97% ที่อัตราภาระสารอินทรีย์อยู่ในช่วง 1.2-6.0 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และมีการเกิดก๊าซชีวภาพคือ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนในห้องแรก และมีปริมาณไฮโดรเจนสูงสุดถึงร้อยละ 60 ของก๊าซชีวภาพในห้องที่ 2 แล้วลดลงตามลำดับพร้อมกับปริมาณก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้น

Li และคณะ (2007) ได้ทำการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากกากน้ำตาลเจือจาง โดยอาศัยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศในถังปฏิกรณ์แผ่นกั้นไร้อากาศแบบ 3 ห้อง ขนาด 27.48 ล. โดยมีการป้อนน้ำเสียที่มีซีโอดีเข้มข้น 5,000 มก./ล. อุณหภูมิ 35 °C เป็นระยะเวลา 26 วัน พบว่าเกิดกรดไขมันระเหยง่าย 2,053 มก./ล. ขณะที่พีเอชและไออาร์พีของน้ำขาออกเท่ากับ 4.3-4.4 และ -249 ถึง -241 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ โดยมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 32.5 ล./วัน คิดเป็น 0.13 ล.ของก๊าซไฮโดรเจน/ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด

Ting และ Lee (2007) ทำการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนจากสลัดจ์ในน้ำเสียโดยใช้เชื้อ clostridium โดยหัวเชื้อใช้ทั้งแบบไม่คัดกรองและคัดกรอง (acidified, basidified and freeze/thaward) การคัดกรองหัวเชื้อที่พีเอช 5.0-5.4 พบว่าไม่มีการสร้างมีเทนเกิดขึ้น ซึ่งเหมาะกับการเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดพร้อมกับเพิ่มปริมาณการเกิดไฮโดรเจน

Cheong และ Hansen (2006) ได้ทำการทดลองเพื่อยกระดับการผลิตไฮโดรเจนในห้องปฏิบัติการ โดยการหมักแบบ completely mixed batch reactor และมีการควบคุมพีเอชที่ 4.6 5.7 และ 6.8 พบว่าที่พีเอช 5.7 ให้ปริมาณไฮโดรเจนสูงสุดมากกว่าที่พีเอชอื่นๆ และปริมาณกรดบิวไทริกเกิดขึ้น 50.8 -75.8% โดยมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่ 107.8 มล./ก. กลูโคสที่ถูกบำบัดจากการทดลองครั้งที่ 1 และมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่ 133.มล./ก. กลูโคสที่ถูกบำบัด จากการทดลองครั้งที่ 2

Van Ginkel และคณะ (2005) แนะนำว่าการเติมสารอาหารเป็นผลทำให้ปริมาณการผลิตไฮโดรเจนสอดคล้องกับค่าความเข้มข้นของน้ำเสีย แต่ไม่ได้เพิ่มการผลิตไฮโดรเจนเสมอไป เป็นที่คาดว่า การเติมสารอาหารจะเสริมการผลิตไฮโดรเจนเมื่อใช้น้ำเสียที่มีวัตถุดิบหลัก คือ น้ำตาล แต่การเติมสารอาหารกลับทำให้เกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ถ้าคิดเป็นสัดส่วนปริมาณ

ไฮโดรเจนที่ได้ต่อความเข้มข้นซีโอดีของน้ำเสียพบว่ากรณีเติมสารอาหารมีค่าคงที่ อย่างไรก็ตาม กรณีที่ไม่เติมสารอาหารค่าที่ได้จะแปรผันค่อนข้างมากและไม่เป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นซีโอดี

Khanal และคณะ (2004) พบว่าค่าพีเอชตั้งต้นมีผลทั้งศักยภาพการเกิดไฮโดรเจนและอัตราการเกิดไฮโดรเจนสำหรับพีเอชตั้งต้นต่ำสุด 4.5 จะให้ปริมาณไฮโดรเจนได้มากที่สุด 214.0 และ 125.0 มล. ของก๊าซไฮโดรเจน/ก. ซีโอดี สำหรับซูโครสและแป้ง ตามลำดับ แต่กลับให้อัตราการเกิดไฮโดรเจนได้ต่ำสุด แม้ว่าการเกิดก๊าซไฮโดรเจนในช่วงต้นจะมีอัตราที่สูงที่ระดับพีเอชที่สูงแต่เป็นเพียงระยะเวลาสั้น และพบว่าช่วงพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการเกิดไฮโดรเจน คือ 5.5-5.7

Liu และ Shen (2004) พบว่ากรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดมากสุดในการทดลอง คือ อะซิเตท ส่วนกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดจะเพิ่มตามความเข้มข้นของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ) ยิ่งมีปริมาณแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตเพิ่มขึ้นในน้ำเสีย บิวไทริกและโพรไพโอนิกจะเกิดมากตามไปด้วย การเพิ่มขึ้นของบิวไทริกเป็นผลมาจากการหมักอะซิเตทค่อยๆ กลายเป็นการหมักแบบบิวไทริก การแปรผันของสัดส่วนกรดไขมันระเหยง่ายชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของการสัณดาปในขบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ และยังพบอีกว่าการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันระเหยง่ายโดยรวมอาจไปยับยั้งการผลิตไฮโดรเจนทำให้ค่าไฮโดรเจนยิลด์ที่ได้มีค่าน้อย ส่วนความเข้มข้นของแป้งถ้ายิ่งสูงขึ้นค่ายิลด์ของอะซิเตท โพรไพโอเนท และบิวไทริกจะเพิ่มตามไปด้วย

Wang และคณะ (2004) ศึกษาถึงศักยภาพและลักษณะเฉพาะของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ (น้ำตาลกลูโคส) มีค่าซีโอดี 2,000-2,500 มก./ล. ในถังปฏิกริยาขนาด 5 ห้อง พบว่ามีกรดไขมันระเหยง่ายหลายชนิดและพบอะซิเตทเกิดขึ้นในชั้นของตะกอนจุลินทรีย์ โดยความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายจะลดลงตามความยาวของถังปฏิกริยา และในการวิเคราะห์ส่วนประกอบของก๊าซชีวภาพพบว่าความเข้มข้นของมีเทนจะเพิ่มอย่างต่อเนื่องจากห้องที่ 1 ถึงห้องที่ 5 ในขณะที่ความเข้มข้นของไฮโดรเจนลดลงจากห้องแรกจนไม่พบใน 2 ห้องสุดท้าย ในการผลิตมีเทนของตะกอนจุลินทรีย์ในห้องต่างๆจะขึ้นอยู่กับสารอาหาร โดยกลุ่มของแบคทีเรียไร้อากาศในแต่ละห้องจะพัฒนาสอดคล้องกับความเพียงพอของสารอาหารและสภาวะแวดล้อมจำเพาะจึงทำให้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศมีประสิทธิภาพในการรับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่สูงๆ ได้ และรับกับสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ดี

Zhang และคณะ (2003) เสนอว่าน้ำเสียอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ปล่อยน้ำทิ้งออกมาที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียประเภทนี้จึงอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิค่อนข้างสูง (Thermophilic condition) ซึ่งเป็นผลดีต่อการย่อยสลาย นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่าในสภาวะ Thermophilic มีความต้องการ lag time ที่ยาวนานกว่าเพื่อเปลี่ยนแปลงในปริมาณมากให้กลายเป็นไฮโดรเจนแม้ว่ายังมีอัตราการเกิดที่ต่ำอยู่ การที่มีความต้องการช่วงเวลา lag time ที่ยาวนานก็เพราะว่าแบคทีเรีย

จำเป็นต้องใช้เวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะแวดล้อมใหม่ๆ สรุปได้ว่าการผลิตไฮโดรเจนจากแบ่งภายใต้ภาวะ Thermophilic นั้นให้ค่าปริมาณไฮโดรเจนที่สูงกว่าภาวะ Mesophilic

Boopathy (1998) ทำการศึกษาเกี่ยวกับจำนวนห้องที่มีผลต่อการบำบัดน้ำเสีย ทำการทดลองโดยใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ 4 ถึง (มีขนาด 2, 3, 4 และ 5 ห้องตามลำดับ) ในการบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่มีซีโอดี 15,000 มก./ล. ใช้ระยะเวลาพักเก็บที่ 14 วัน ทำให้ได้ระยะเวลาพักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ที่ 25, 30, 36 และ 42 วันในถังปฏิกริยาขนาด 2, 3, 4 และ 5 ห้อง ตามลำดับ จากการทดลองทำให้ทราบว่า ระบบนี้สามารถลดซีโอดีประมาณ 70-78% ในทุกถังปฏิกริยา และเกิดก๊าซมีเทนมากที่สุดถังที่มี 4 ห้องและ 5 ห้องโดยที่มีปริมาณมีเทน 0.59 และ 0.62 ล./ก.ของวีเอส ที่เข้าระบบในถังขนาด 4 ห้องและ 5 ห้อง ตามลำดับ

Boopathy และ Tilche (1991) ศึกษาถึงการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นสูงจากกากน้ำตาลโดยใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศที่มีค่าซีโอดี 115,771 และ 990,000 มก./ล. ใช้อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่ 20 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน จากการทดลองพบว่าสามารถบำบัดซีโอดีได้ 70% มีการเกิดเม็ดตะกอนชีวภาพขนาด 0.5 มม. และถังปฏิกริยาแบบนี้ยังมีระยะเวลาพักเก็บตะกอนจุลินทรีย์ที่นาน

พิพัฒน์ พรอำนวนย (2551) ได้ทำการวิจัยเป็นการทดลองแบบที่ละเทภายใต้สภาวะไร้อากาศสำหรับการทดลองน้ำเสียปลากระป๋องโดยปรับเปลี่ยนค่าพีเอช 3 ค่า สรุปได้ว่าที่พีเอช 6.5 นั้นเหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 121 มล./ก. ซีโอดีที่ถูกกำจัด อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนต่อเวลามีค่าเท่ากับ 36 มล./ชม. และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีสูงที่สุดร้อยละ 96.5

นพพล รัตนโกวิน (2551) ในช่วงเริ่มต้นระบบพบว่าระบบแบบ 3 ห้องไม่มีตะแกรงกั้นที่ช่วงไหลขึ้นใช้เวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวนานกว่าระบบที่มีตะแกรงกั้นทั้งหมด 76 วัน เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของระบบแบบมีตะแกรงกั้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบแบบไม่มีตะแกรงกั้น โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีเฉลี่ยที่สภาวะคงตัวเท่ากับ 97.52% และ 95.73% ตามลำดับ

อรุณี สุกสินสาริต (2551) พบว่าชุดการทดลองที่มีกากยีสต์อยู่ช่วยให้ผลผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพที่ดีกว่าการหมักแบบแบทช์ ที่มีแต่น้ำตาลกลูโคสเป็นสารอาหารเพียงอย่างเดียว โดยสัดส่วนที่เหมาะสมประกอบด้วย น้ำตาลกลูโคส กากยีสต์ และเชื้อจุลินทรีย์ ผสมในระบบไร้อากาศ ที่ความเข้มข้น 7.0, 11.0 และ 12.0 ก./ล. ตามลำดับ กากยีสต์ยังช่วยทำให้อัตราการใช้สารอาหารของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น จากนั้นจึงดำเนินการศึกษาถึงผลของระยะเวลาพักเก็บน้ำที่มีผลต่อผลผลิตก๊าซไฮโดรเจนแบบต่อเนื่อง โดยทำการทดลองในถังหมัก CSTR ที่มีการแปรค่าระยะเวลา



กักเก็บน้ำ 4 ค่าคือ 24, 12, 8 และ 4 ชม. ตามลำดับ โดยใช้เวลา 10 วันต่อการทดลองที่แต่ละระยะเวลากักเก็บน้ำ พบว่าที่สภาวะคงตัว (steady-state) ระยะเวลากักเก็บน้ำ 4 ชม. ให้ผลผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงถึง 2.87 โมล/โมลกลูโคส คิดเป็น 71.8%

ฉันทพร นงศ์นวล (2552) ศึกษาอัตราหมุนเวียนน้ำทิ้งภายในระบบที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่า โดยใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศระดับห้องปฏิบัติการ ขนาด 20 ล. โดยป้อนน้ำเสีย 25,000 มก./ล. พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่ชุดควบคุม และที่อัตราหมุนเวียนน้ำทิ้ง 1, 2, 4 และ 6 เท่ากับ ร้อยละ 72.35, 76.36, 77.43, 80.57 และ 77.55 ตามลำดับ และมีการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 35.53, 43.81, 50.59, 53.46, และ 45.14 ล./วัน ตามลำดับ คิดเป็นปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพ 0.40, 0.46, 0.52, 0.55 และ 0.50 ล./ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด และทุกชุดการทดลองมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 60

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการวิจัย

ทำการทดลองที่หน่วยวิจัยการจัดการของเสียอุตสาหกรรม ห้องปฏิบัติการมูลฝอย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเป็นการทดลองหาศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียโรงงานซอสปรุงรส

##### 3.1.1 ศึกษาลักษณะสมบัติน้ำเสียของโรงงานน้ำซอสปรุงรส (ตารางที่ 3.1)

ตารางที่ 3.1 จุดเก็บน้ำตัวอย่างและความถี่ในการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำเสียที่เข้าระบบ

พารามิเตอร์	น้ำเสียที่เข้าระบบ
พีเอช	ทุกวัน
ไออาร์พี	ทุกวัน
ซีไอดี	3-4 วันต่อสัปดาห์
บีไอดี	ทุกครั้งที่เก็บตัวอย่าง
กรดไขมันระเหยง่าย	ทุกๆ 5 วัน <sup>(1)</sup>
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	ทุกๆ 7 วัน
ค่าความเค็ม	ทุกครั้งที่เก็บตัวอย่าง

หมายเหตุ: (1) หมายถึง กรองตัวอย่าง

3.1.2 การทดลองช่วงที่ 1 เป็นการทดลองในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ โดยศึกษาถึงระยะเวลาในการเข้าสู่ภาวะคงตัวโดยพิจารณาจากความสามารถในการบำบัดซีไอดีและลักษณะตัวแปรต่างๆ ในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ ทำได้โดยการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากระบบบำบัดแบบไร้อากาศลงไปในระบบแผ่นกั้นไร้อากาศประมาณร้อยละ 30 ของปริมาตรถัง จากนั้นทำการป้อนน้ำเสียตามพีเอชเริ่มต้นของชุดการทดลองที่มีซีไอดีเริ่มต้นประมาณ 5,000 มก./ล. เพื่อให้จุลินทรีย์ปรับตัวให้เข้ากับน้ำเสีย และเมื่อจุลินทรีย์สามารถปรับตัวได้ ทำการป้อนน้ำเสียที่มีซีไอดีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งป้อนน้ำเสียที่มีซีไอดี 18,000-20,000 มก./ล. ซึ่งเป็นภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูงสุดเท่ากับ 4 ก./ล.-วัน

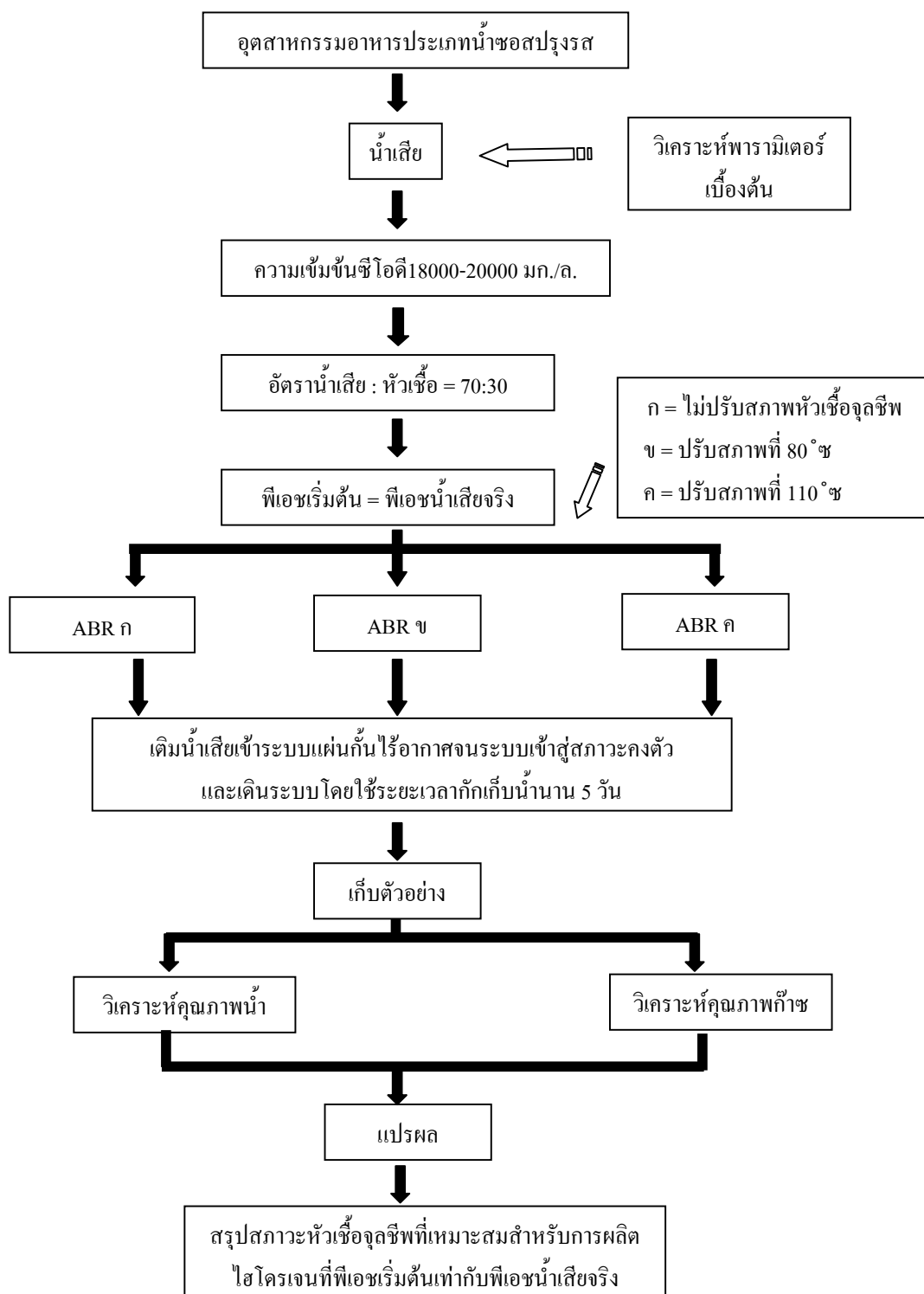
3.1.3 การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการทดลองในช่วงเดินระบบเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วโดยได้ทำการศึกษาในระบบแผ่นกั้นไรรักษาต่อความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ และส่วนที่ 2 จะศึกษาตัวแปรต่างๆ ภายในห้องสุดท้ายของถังปฏิกรณ์แบบ 3 ห้อง โดยศึกษาถึงสภาวะในการสร้างกรดความสามารถในการบำบัดสารอินทรีย์ และศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนเพื่อใช้ประเมินประสิทธิภาพของระบบได้ ซึ่งในการทดลองช่วงที่ 2 นี้จะใช้รูปแบบของถังปฏิกรณ์และระยะเวลาในการเริ่มต้นเดินระบบเช่นเดียวจากการทดลองช่วงที่ 1

ทั้งสองช่วงการทดลองได้ทำการทดลองแบบต่อเนื่อง ในชุดทดลองแบบไรรักษาที่มีการใช้น้ำเสียจริงและมีการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ (ตารางที่ 3.1) และมีการเติมหัวเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไรรักษา โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ชุดทดลอง เพื่อเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตไฮโดรเจนและประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ตามการแปรผันของค่าพีเอชเริ่มต้นและสภาวะของหัวเชื้อจุลินทรีย์ดังนี้

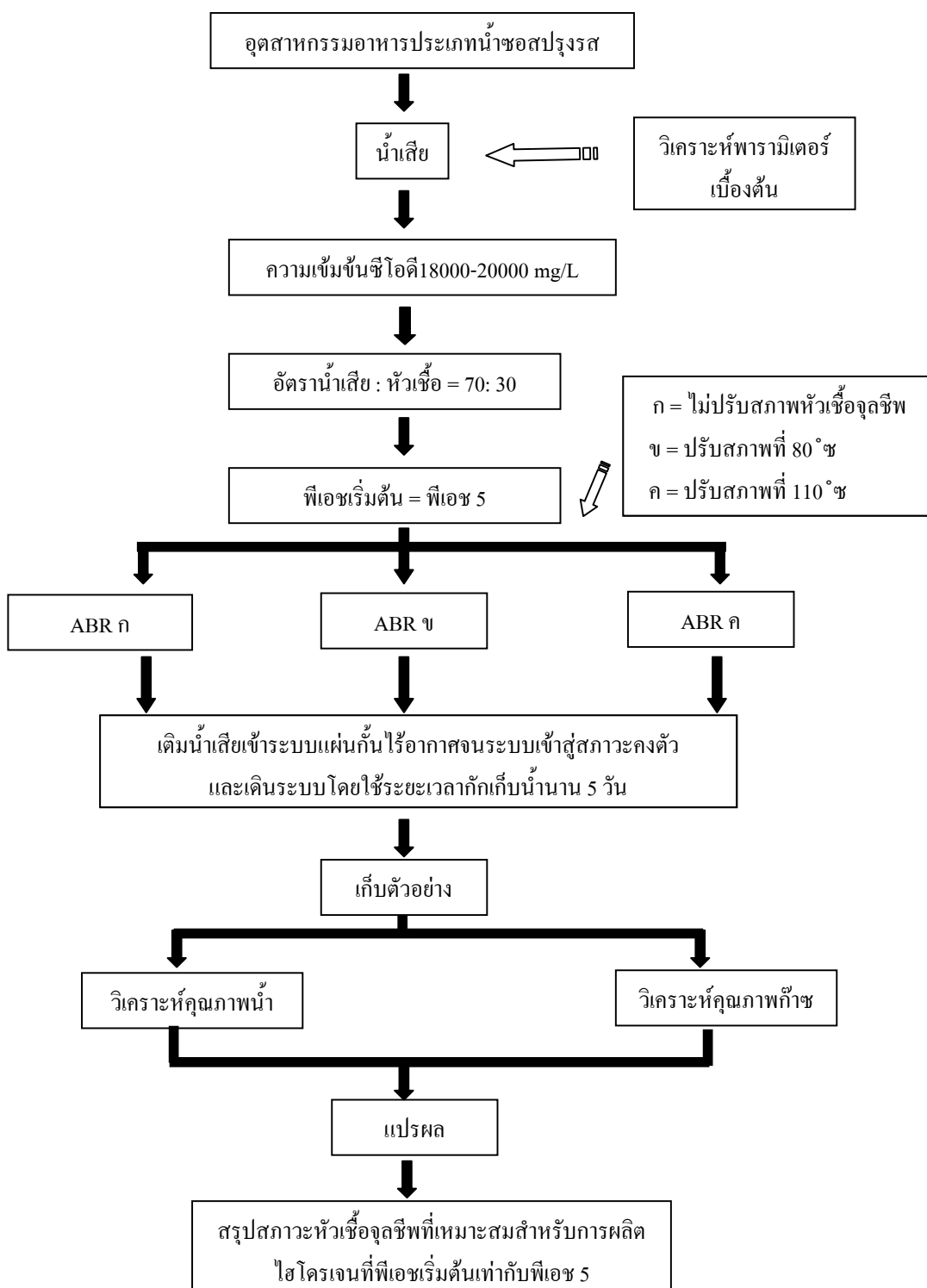
1.) สำหรับชุดการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาในระบบแผ่นกั้นไรรักษา (ABR) ที่สภาวะพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอชน้ำเสียจริงโดยมีการแปรค่าสภาวะของหัวเชื้อจุลินทรีย์เพื่อทำการเปรียบเทียบดังนี้ ABR ก หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ ABR ข หัวเชื้อจุลินทรีย์ผ่านการปรับสภาพที่ 80 °ซ เป็นเวลา 30 นาที และ ABR ค หัวเชื้อจุลินทรีย์ผ่านการปรับสภาพที่ 110°ซ เป็นเวลา 30 นาที กำหนดให้อัตราส่วนน้ำเสียต่อหัวเชื้อเป็น 70:30 ทุกการทดลอง (รูปที่ 3.1)

2.) สำหรับชุดการทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาในระบบแผ่นกั้นไรรักษาที่สภาวะพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอช 5 ทำการปรับ พีเอชของน้ำเสียด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มอล (NaOH 6 N) และมีการแปรค่าสภาวะของหัวเชื้อจุลินทรีย์เพื่อทำการเปรียบเทียบเช่นเดียวกับชุดการทดลองที่ 1 (รูปที่ 3.2)

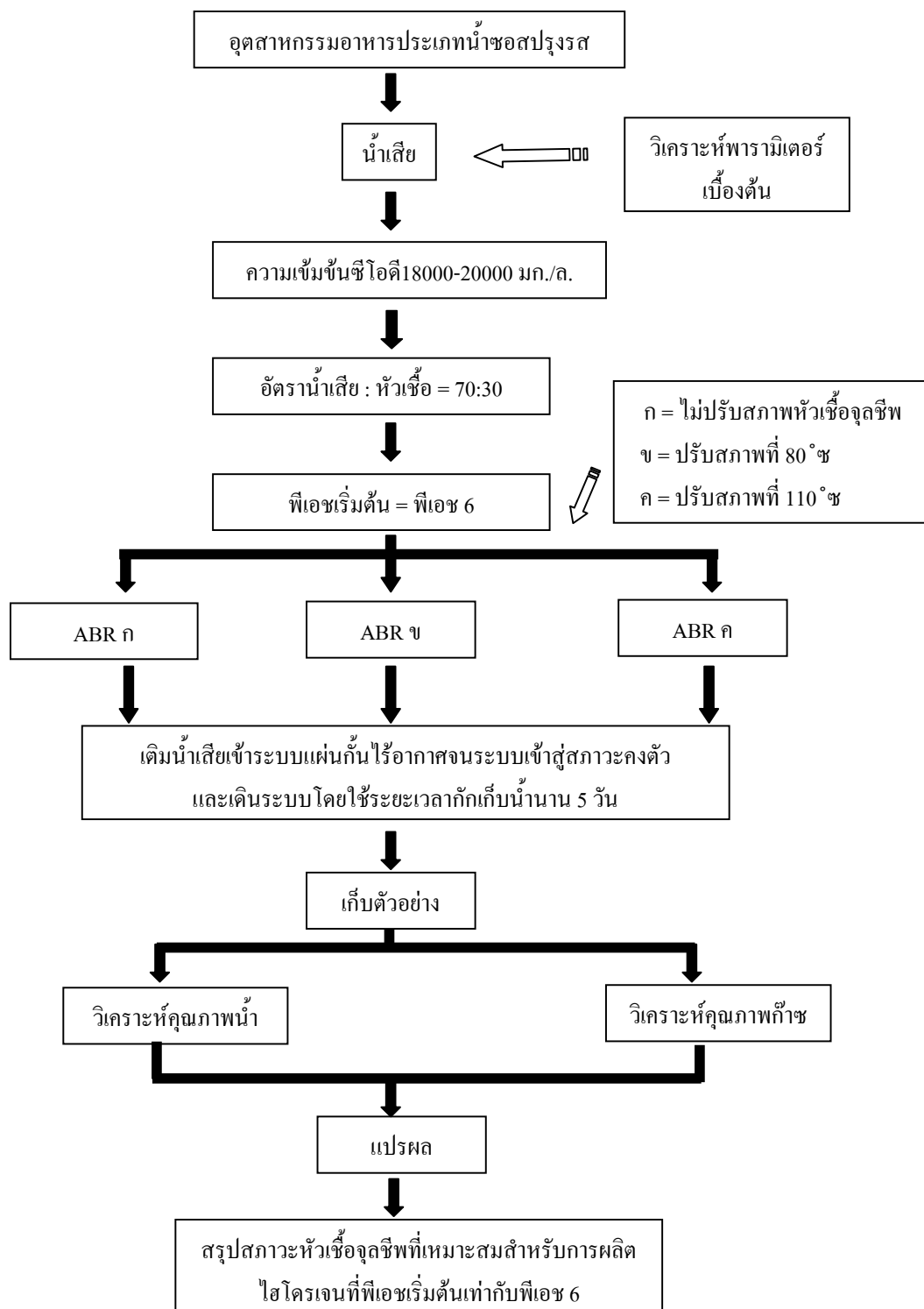
3.) สำหรับชุดการทดลองที่ 3 เป็นการศึกษาในระบบแผ่นกั้นไรรักษาที่สภาวะพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอช 6 ทำการปรับพีเอชของน้ำเสียด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มอล (NaOH 6 N) และมีการแปรค่าสภาวะของหัวเชื้อจุลินทรีย์เพื่อทำการเปรียบเทียบเช่นเดียวกับชุดการทดลองที่ 1 (รูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนชุดการทดลองที่ 1 ที่พีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอชน้ำเสียจริง



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนชุดการทดลองที่ 2 ที่พีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอช 5



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนชุดการทดลองที่ 3 ที่พีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอช 6

### 3.2 ตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรที่ทำการศึกษาแบ่งเป็น 3 ประเภทได้แก่ ตัวแปรที่กำหนดให้คงที่ ตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา และตัวแปรตามที่ทำการวิเคราะห์ โดยแบ่งตามชุดการทดลองเป็น 2 ชุด คือ ตัวแปรที่ทำการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสม และตัวแปรที่ทำการศึกษาสถานะของหัวเชื้อเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการเกิดก๊าซไฮโดรเจนแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ทำการศึกษา

ตัวแปรที่กำหนดให้คงที่	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ปริมาณชุดการทดลอง	12 ล.
ซีไอดีตั้งต้นของน้ำเสีย	18,000-20,000 มก./ล.
อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น	30% ของปริมาณชุดการทดลอง (พิพัฒน์ พรอานวย, 2551)
ระยะเวลาเก็บเก็บผลศาสตร์	5 วัน
ตัวแปรอิสระที่ทำการศึกษา	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
ชนิดและองค์ประกอบของน้ำเสียตั้งต้น	น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร
ค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสีย	3-4 (น้ำเสียจริง) 5 และ 6
สถานะหัวเชื้อจุลินทรีย์	ไม่ผ่านการปรับสภาพ
สถานะหัวเชื้อจุลินทรีย์	ต้มที่ 80 °ซ
สถานะหัวเชื้อจุลินทรีย์	ต้มที่ 110 °ซ
ตัวแปรตามที่ทำการวิเคราะห์	วิธีการวิเคราะห์
ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด	หลักการแทนที่น้ำ
องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ(H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> )	เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ(GC-TCD)
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	วิธีอบแห้งที่ 103-105 °ซ
บีไอดี	วิเคราะห์ที่ 5 วัน 20 °ซ
ซีไอดี	วิธีรีฟลักซ์แบบปิด
กรดไขมันระเหยง่าย	เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ (GC-FID)
พีเอช (น้ำเข้าและออกจากระบบ)	พีเอชมิเตอร์

### 3.3 หัวเชื้อ (seed)

หัวเชื้อ (Seed) ที่ใช้ในการเริ่มต้นเดินระบบแผ่นกั้นไรร้ออากาศ เป็นหัวเชื้อจากสตัดจ์ของถังตกตะกอนในระบบบำบัดไรร้ออากาศจากระบบยูเอเอสบี (UASB) ของโรงงานผลไม้มะพร้าวมาลี ได้ทำการตรวจวัดค่าดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 พารามิเตอร์ของหัวเชื้อที่ทำการวิเคราะห์

สิ่งที่ทำการตรวจวัด	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์	หน่วย
ของแข็ง	ของแข็งทั้งหมด	มก./ล
ความเป็นกรดเป็นด่าง	พีเอช	-
อื่นๆ	ไออาร์พี	มิลลิโวลท์

### 3.4 เครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

#### 3.4.1 ชุดอุปกรณ์การทดลอง

- ระบบแผ่นกั้นไรร้ออากาศ ปริมาตรสุทธิ 12 ล. 3 ชุด
- ถังพักน้ำเสียเข้าระบบ ขนาด 30 ล. 3 ถัง
- อุปกรณ์วัดก๊าซแบบแทนที่น้ำ 3 ชุด
- เครื่องปั้มน้ำเข้าระบบ 3 ชุด

#### 3.4.2 เครื่องมืออุปกรณ์

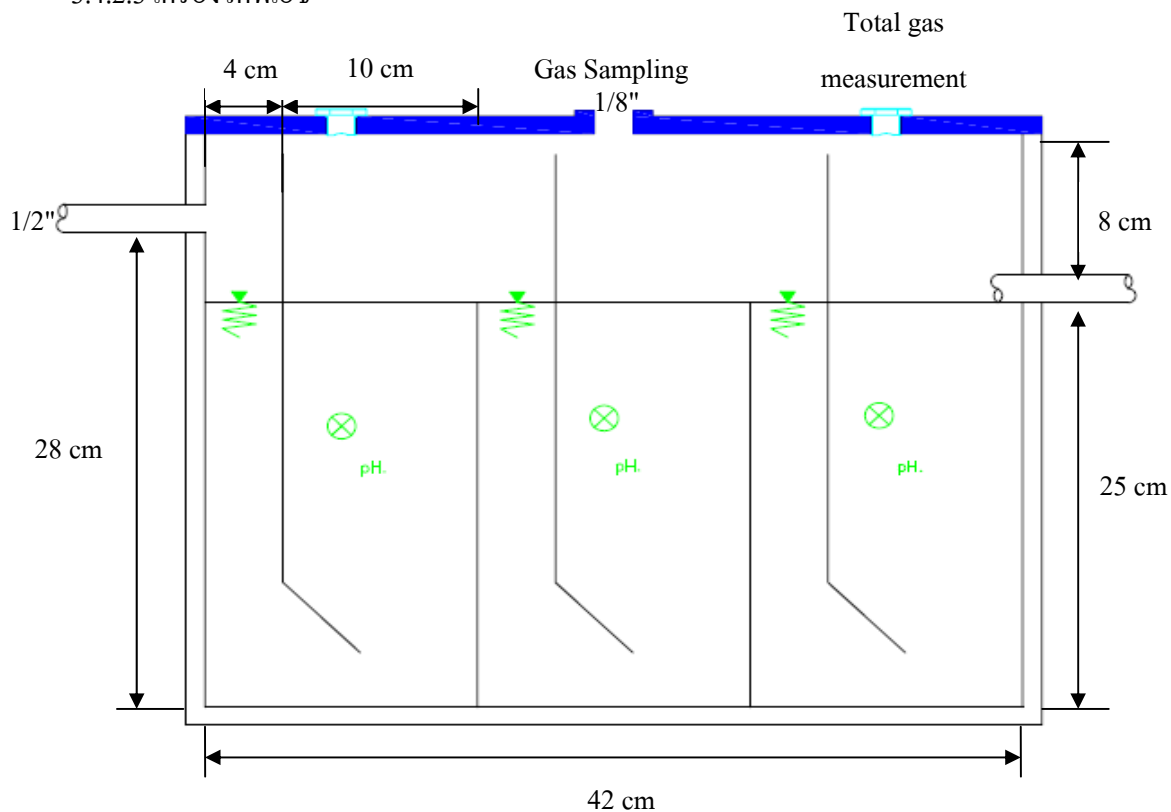
##### 3.4.2.1 ถังปฏิริยาของระบบแผ่นกั้นไรร้ออากาศ

เป็นแบบจำลองระดับห้องปฏิบัติการ โดยได้ยึดหลักการทำงานของระบบบำบัดแผ่นกั้นไรร้ออากาศได้ทำการจำลองถังปฏิริยาจำนวน 3 ชุด ในแต่ละชุดจะมีช่องสำหรับใส่แผ่นกั้นโดยสามารถกั้นให้มีขนาด 3 ห้องโดยตัวถังทำจากอะคริลิกใสมีขนาดกว้าง 12 ซม. ยาว 42 ซม. และสูง 35 ซม. โดยมีความสูงของระดับน้ำในถังปฏิริยาที่ประมาณ 25 ซม. มีปริมาตรของเหลวภายในระบบประมาณ 12.6 ล. และท่อทางน้ำเข้ากับทางน้ำออกจะใช้ท่อพีวีซีขนาด ½ นิ้ว ทางด้านบนของถังปฏิริยาจะมีการต่อสายยางนำก๊าซขนาด 1/8 นิ้ว ผ่านเข้าสู่ชุดวัดก๊าซแบบแทนที่น้ำดังรูปที่ 3.4



### 3.4.2.2 เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ (Gas Chromatograph, GC)

### 3.4.2.3 เครื่องวัดพีเอช



รูปที่ 3.4 ดังปฏิกิริยาของระบบแผ่นกันรั้อากาศ

### 3.4.2.4 ชุดอุปกรณ์วัดก๊าซแบบแทนที่น้ำ

ชุดอุปกรณ์วัดก๊าซแบบแทนที่น้ำอาศัยหลักการแทนที่น้ำของก๊าซที่เกิดขึ้น ภาชนะที่ใช้วัดปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.5 และทำการปรับพีเอชของน้ำให้ต่ำกว่า 3 โดยใช้โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) 20 ก. ผสมกับกรดซัลฟูริกเข้มข้น ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 5 มล. ในน้ำ 100 มล. เพื่อป้องกันการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์วัดก๊าซแบบแทนที่น้ำ

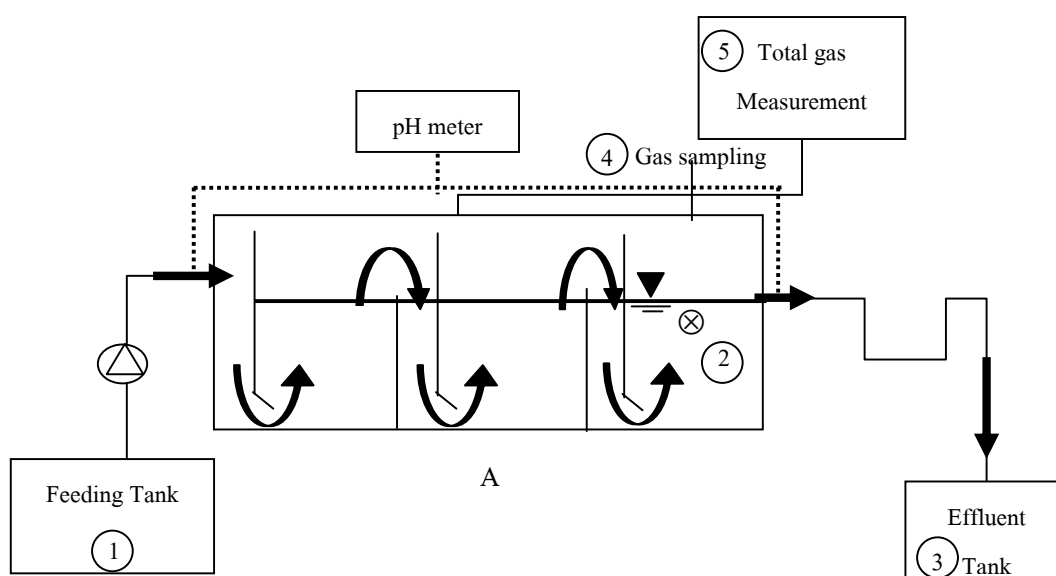
### 3.5 การติดตั้งเครื่องมือและหลักการทำงาน

วิธีการติดตั้งเครื่องมือและหลักการทำงานของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศ ดังรูปที่ 3.6 โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้

1. เครื่องสูบน้ำจะสูบน้ำเสียจากถังพักน้ำเสียเข้าสู่ถังปฏิกิริยา
2. น้ำเสียจะไหลลงไปได้ชั้นตะกอนจุลชีวินถังปฏิกิริยาและส่วนน้ำใสจะไหลไปสู่ที่ทางไหล

ออกจากระบบ

3. ก๊าซที่เกิดขึ้นจะไหลผ่านท่อนำก๊าซซึ่งอยู่ด้านบนของถังปฏิกิริยาไปยังชุดอุปกรณ์วัดก๊าซแบบแทนที่น้ำ (Total gas measurement)





รูปที่ 3.6 การติดตั้งชุดถังปฏิกริยา (A) และชุดถังปฏิกริยา (B)

### 3.6 จุดเก็บตัวอย่าง

จุดเก็บตัวอย่างมีด้วยกัน 5 จุด ได้แก่

1. ถังพักน้ำเสีย (วิเคราะห์ลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนเข้าระบบ)
2. น้ำเสียขณะทำการบำบัดที่ห้องสุดท้ายของถังปฏิกริยา (วิเคราะห์พีเอชและกรดไขมันระเหย)
3. ถังพักน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด (วิเคราะห์ลักษณะน้ำเสียหลังบำบัด)
4. ด้านบนของถังปฏิกริยาเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ
5. วัดปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำ

### 3.7 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

#### 3.7.1 การเตรียมน้ำเสียเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบ

ทำการวิเคราะห์อัตราส่วนซีโอดี:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส ของน้ำเสียแล้วทำการเติมสารอาหารเพื่อให้มีค่าซีโอดี:ไนโตรเจน:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 150:2:0.2 โดยแหล่งไนโตรเจนและแหล่งฟอสฟอรัส ได้แก่ ยูเรีย และ โปแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) ตามลำดับ

#### 3.7.2 การทดสอบระบบ

การตรวจสอบรอยรั่วเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งของการหมักแบบไร้อากาศเพราะระบบนี้จะต้องเป็นระบบปิดอย่างแท้จริงมิฉะนั้นแล้วก๊าซชีวภาพจะออกมาตามรอยรั่วต่างๆ ได้เป็นเหตุให้แรงดันมีไม่มากพอที่จะแทนที่น้ำในระบบเก็บก๊าซ ทดสอบการรั่วของก๊าซชีวภาพโดยใช้น้ำสบู่ทาบริเวณรอยต่อต่างๆ แล้วเป่าลมเข้าระบบแผ่นกั้น ไร้อากาศ จากนั้นอุดรอยรั่วทุกทางด้วยกาวซิลิโคน

3.7.3 วิเคราะห์ลักษณะสมบัติน้ำเสียก่อนเข้าระบบตามพารามิเตอร์ที่กล่าวมาข้างต้น

3.7.4 การเริ่มต้นและสถานะในการดำเนินระบบ (Start-up and operating condition)

(1) ปรับพีเอชของน้ำเสีย ให้มีค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 3-4 (น้ำเสียจริง) 5 และ 6

(2) เติมหิวเชื้อจุลินทรีย์ตามอัตราส่วนน้ำเสียต่อหิวเชื้อจุลินทรีย์เท่ากับ 70:30 โดยปริมาตร (พิพัฒนา

พรอำนาจ, 2551)

(3) ปรับปริมาณน้ำเสียให้เป็น 12 ล. ด้วยอัตราการป้อน 0.1 ล./ชม.

(4) เดินระบบที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำ 5 วัน

(5) เก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ รวมถึงเก็บตัวอย่างก๊าซจากจุดเก็บตัวอย่างด้านบนของถังปฏิกิริยาซึ่งเป็นตัวอย่างเฉลี่ยจากทั้งสามห้องของระบบแผ่นกั้นไว้รออากาศเพื่อวิเคราะห์ทางองค์ประกอบของก๊าซที่ได้เพื่อเปรียบเทียบศักยภาพการผลิตไฮโดรเจนจากสถานะต่างๆ

3.7.5 การวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่ทำกรวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำ ได้แก่ ค่าพีเอช ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid, VFA: Acetate Butyrate และ Propionate) และปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended solids, SS) หลังการบำบัดอีกด้วย

ตารางที่ 3.4 วิธีวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์	ความถี่ในการเก็บตัวอย่าง	ปริมาตรตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ (มล.)
ค่าพีเอช	เครื่องวัดพีเอช	ทุกวัน	-
ค่าซีโอดี	วิธีรีฟลักซ์แบบปิด	ทุกวัน	5
ค่าบีโอดี	วิเคราะห์ที่ 20 °ซ 5 วัน	ท้ายการทดลอง	0.5-1
กรดไขมันระเหยง่าย	เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (GC-FID)	ทุก 3 วัน	50
ของแข็งแขวนลอย	วิธีอบแห้งที่ 103-105 °ซ	สัปดาห์ละ 1 ครั้ง	25

หมายเหตุ: วิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ทำตาม Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA and WPCF, 1998)

การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ (ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน) ทำการดูดเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพจากจุดเก็บก๊าซ (Gas sampling) ที่ด้านบนของถังปฏิกิริยา ABR (รูปที่ 3.7) ด้วยถุงเก็บก๊าซ แล้วนำตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่ได้ขึ้นไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบเป็นค่าร้อยละของก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography: GC-TCD)



รูปที่ 3.7 การเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียโรงงานขอสปรงรสที่ใช้ในการทดลอง

น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยนี้ เป็นน้ำเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตขอสปรงรส ขอสปริก ขอสมะเจือเทศ และน้ำจิ้มต่างๆ ที่อุตสาหกรรมบางปู จังหวัดสมุทรปราการ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียมาอย่างน้อย 6 ครั้ง น้ำเสียที่นำมามีลักษณะทั่วไปคือ มีสีน้ำตาลแดงอ่อนๆ มีกลิ่นเหม็น มีสารแขวนลอยอนุภาคเล็กปริมาณเล็กน้อย และมีเศษตะกอนจากวัตถุดิบตั้งต้นนอนก้นอยู่ปริมาณมาก โดยเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ พบว่า น้ำเสียมีพีเอชในช่วง 3-4 ซีโอดีทั้งหมดมีค่าประมาณ 18,000-20,000 มก./ล. ปริมาณของแข็งแขวนลอย เท่ากับ 1,056-2,150 มก./ล. และ ยังมีค่าความเค็ม (Salinity) ค่อนข้างสูงอีกด้วย เมื่อวัดด้วยวิธี Conductivity เท่ากับ 1.1% (ที่ค่าการนำไฟฟ้า 1,413 ไมโครซีเมนซ์/ซม. และค่าคงที่ K 0.2965) ซึ่งลักษณะสมบัติน้ำเสียสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 โดยตัวอย่างน้ำเสียที่เก็บมาทั้ง 6 ครั้ง มีลักษณะโดยรวมใกล้เคียงกัน

#### ตารางที่ 4.1 ลักษณะของน้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย
อุณหภูมิ	°ซ	27-28
พีเอช	-	3-4
ไออาร์พี	มิลลิโวลท์	140-160
ซีโอดี	มก./ล.	18,000-20,000
กรดไขมันระเหย	มก./ล. อะซิติค	800-900
ของแข็งแขวนลอย	มก./ล.	1,056-2,150
บีโอดี	มก./ล.	10,800-12,000
ไนโตรเจน	มก./ล.	14.0-15.3
ฟอสเฟต	มก./ล.	9.68-10.37
TOC	มก./ล.	5,314
ค่าความเค็ม	% การนำไฟฟ้า/มก./ล.	1.1/11,000

หมายเหตุ เก็บตัวอย่างวันที่ 17/6/2010 13/7/2010 และ 12/8/2010



รูปที่ 4.1 ลักษณะน้ำเสียโรงงานขอสปรงรตที่ใช้ ในการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดแผ่นกั้นไร้อากาศในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยประกอบด้วย 3 ชุดการทดลองตามการแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นและสภาวะหัวเชื้อจุลชีพ ซึ่งทั้ง 3 ชุดการทดลองแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง ดังนี้

การทดลองช่วงที่ 1 เป็นการทดลองในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ โดยมีการเพิ่มภาระสารอินทรีย์จากการเจือจางน้ำเสีย ด้วยอัตราเจือจางร้อยละ 70 เป็น ร้อยละ 50 ซึ่งมีภาระสารอินทรีย์จาก 1.1 เป็น 2.2-2.4 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เพื่อให้จุลชีพปรับตัวเข้ากับน้ำเสีย เป็นระยะเวลา 30 วัน

การทดลองช่วงที่ 2 เป็นการทดลองในช่วงเดินระบบโดยเดินระบบ ด้วยภาระสารอินทรีย์จริงของน้ำเสียตามพีเอชเริ่มต้นของแต่ละชุดการทดลอง ซึ่งภาระสารอินทรีย์ในช่วงนี้มีค่าประมาณ 3.5-4 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เป็นระยะเวลาประมาณ 30 วันหลังจากเริ่มต้นเดินระบบ

#### 4.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในชุดการทดลองที่ 1

##### 4.2.1 ผลการทดลองที่พีเอชน้ำเสียจริงตามสภาวะหัวเชื้อจุลชีพเริ่มต้น

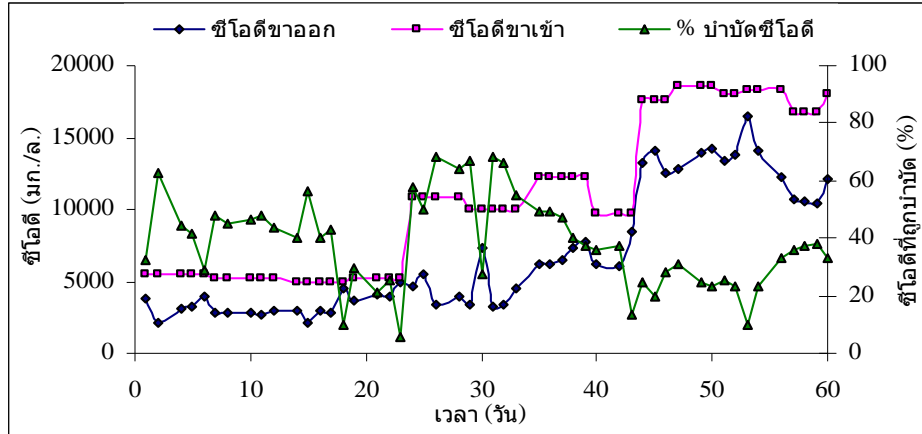
ในการวิจัยนี้เป็นการทดลองโดยนำน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตขอสและเครื่องปรุงรต ซึ่งมีลักษณะของน้ำเสียที่เข้าระบบดังตารางที่ 4.1 จากนั้นทำการเจือจางน้ำเสียประมาณร้อยละ 30 ของน้ำเสียจริงและวัดค่าซีโอดีเริ่มต้นได้ 5,503 มก./ล. เพื่อเริ่มต้นเดินระบบ และเมื่อจุลชีพสามารถปรับตัวได้ ทำการป้อนน้ำเสียที่มีซีโอดีเพิ่มขึ้นในช่วง 9,671-12,237 มก./ล ซึ่งเป็นภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2.2-2.4 กก./ลบ.ม.-วัน โดยไม่มีการปรับเปลี่ยนค่าพีเอช แล้วทำการเติม

หัวเชื้อจุลชีพ (seed) มีความเข้มข้นจุลชีพเริ่มต้น 22,730 มก./ล. ในระบบแผ่นกั้นไร้อากาศประมาณ ร้อยละ 30 ของปริมาตรถัง เติบโตแบบต่อเนื่องตลอดเวลาและเก็บตัวอย่างน้ำเสีย และวัด ปริมาตรก๊าซชีวภาพทุกวันในช่วงเดินระบบ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีและอัตราการ ผลิตก๊าซชีวภาพตามความแตกต่างของสภาวะหัวเชื้อจุลชีพเริ่มต้น ดังนี้

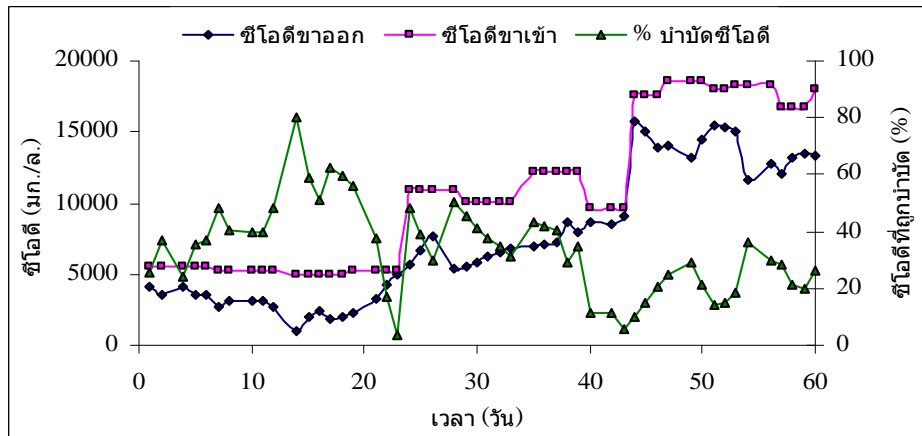
ช่วงเริ่มเดินระบบ (Start up) วันที่ 1-30 ที่สภาวะที่เอชน้ำเสียดังกล่าวนี้เป็นสภาวะที่มีพีเอช ประมาณ 3-4 จัดเป็นสภาวะที่เป็นกรดค่อนข้างสูง ซึ่งพีเอชดังกล่าวเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อ กิจกรรมการทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบของหัวเชื้อจุลชีพที่มีการปรับสภาพแตกต่างกัน (รูปที่ 4.2 ก ข และ ค) โดยเริ่มต้นเดินระบบที่ภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 1.1 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน จากในการเริ่มเดินระบบนี้ซึ่งมีร้อยละเจือจางน้ำเสียสูงถึง 70% ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีตาม การปรับสภาพหัวเชื้อ (รูปที่ 4.2 ก ข และ ค) หลัง 15 วันจึงสูงถึง 56.4 59.2 และ 56.4% ตามลำดับ หลังจากนั้นจึงทำการเพิ่มภาระสารอินทรีย์เข้าไปในระบบที่ประมาณ 2.2-2.4 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดโดยรวมในช่วงภาระสารอินทรีย์นี้ไม่ด้นักเมื่อเปรียบเทียบกับช่วง 15 วัน แรก ยกเว้นการทดลองที่ไม่ทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพเพราะมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี หลัง 29 วันสูงถึง 66.7% โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพที่ 80°ซ และที่ 110°ซ เป็น 45.5 และ 49.2% ตามลำดับในวันเดียวกัน

ช่วงเดินระบบ (Operate) วันที่ 31- 60 หลังจากการเริ่มเดินระบบจึงทำการป้อนน้ำเสีย จริงซึ่งมีภาระสารอินทรีย์ในช่วง 3.5-3.7 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีซีโอดีขาเข้าเฉลี่ยเข้มข้นที่ 18,000 มก./ล. ซึ่งเป็นภาระสารอินทรีย์สูงสุดของชุดการทดลองนี้เพื่อทำการเดินระบบเป็นระยะเวลา 30 วัน โดยจากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีโดยรวมมีร้อยละการ บำบัดลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าภาระสารอินทรีย์ที่มากขึ้นประกอบกับพีเอชที่เป็นกรด ของระบบนี้ ส่งผลต่อกิจกรรมของหัวเชื้อจุลชีพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลงไม่ว่าหัวเชื้อ จุลชีพจะทำการปรับสภาพหรือไม่ ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจะลดลงอย่างมากในช่วงเดิน ระบบที่ 15 วันแรกคือ 19.6 14.7 และ 20.5% และปรับสูงขึ้นในช่วงท้ายของการเดินระบบเป็น 32.7 25.9 และ 29.3% (รูปที่ 4.2 ก ข และ ค) ในวันที่ 60 ของการเดินระบบ

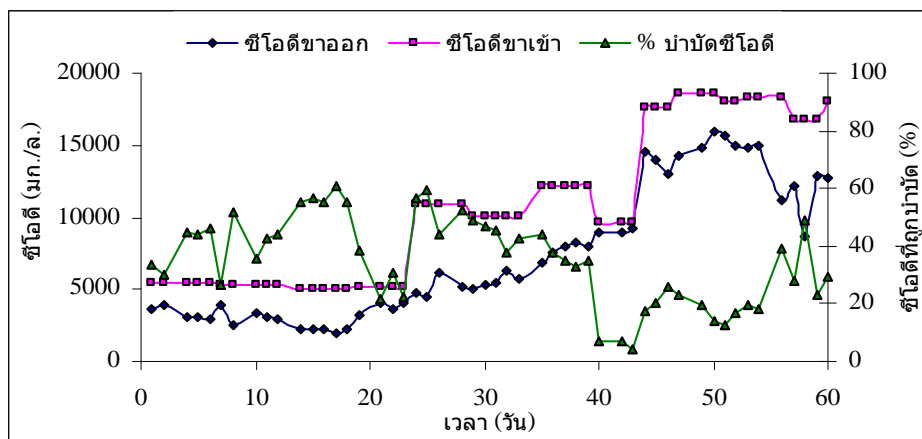




ก) ไม่ปรับสภาพหัวเชื่อมจุลชีพ



ข) หัวเชื่อมจุลชีพผ่านการปรับสภาพที่ 80° ซ 30 นาที



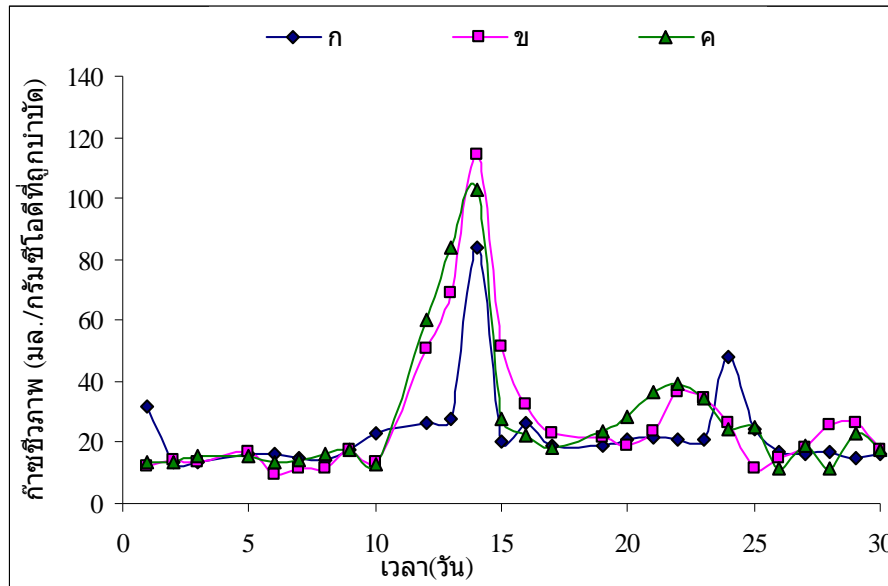
ค) หัวเชื่อมจุลชีพผ่านการปรับสภาพที่ 110° ซ 30 นาที

รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่พีเอชน้ำเสียจริง

จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีน้ำเสียทั้งสามสถานะหั่วเชื้อจุลชีพ (รูปที่ 4.2 ก ข และ ค) ในช่วงเริ่มเดินระบบ 30 วันแรกมีประสิทธิภาพโดยรวมมากกว่าร้อยละ 40 แต่จากรูปสังเกตเห็นว่าในวันที่ 20 ประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากการเพิ่มภาระสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ จุลชีพในระบบจึงทำการปรับตัวและฟื้นคืนประสิทธิภาพอย่างช้าๆ จนกระทั่งประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีลดลงอีกครั้ง จากการเพิ่มภาระสารอินทรีย์ ในช่วง 3.5-3.7 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีซีโอดีเข้าเฉลี่ยเข้มข้นที่ 18,000 มก./ล. ซึ่งเป็นความเข้มข้นจริงของน้ำเสีย ในวันที่ 40 ซึ่งเป็นช่วงเดินระบบ หลังจากนั้นประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีจึงฟื้นตัวอย่างช้าๆ และเริ่มคงที่อีกครั้ง

#### 4.2.2 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

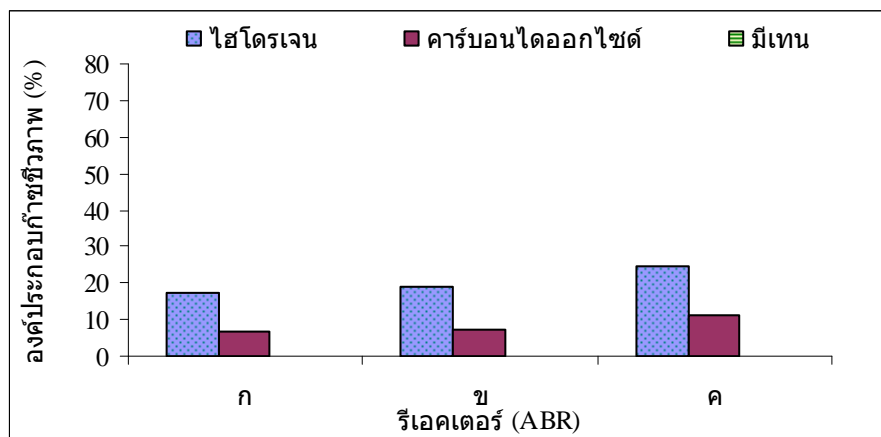
จากผลการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศตามการปรับสภาพหั่วเชื้อจุลชีพที่พีเอชน้ำเสียจริง โดยหั่วเชื้อจุลชีพที่ใช้ผลิตก๊าซชีวภาพเป็นเม็ดตะกอนจุลินทรีย์จากระบบยูเอเอสบีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ก) ผ่านการปรับสภาพที่ 80°ซ 30 นาที (ข) และผ่านการปรับสภาพที่ 110°ซ 30 นาที (ค) ในภาวะการทดลองที่ระยะเวลาพักเก็บเซลล์สาสตร์เท่ากับ 5 วันเท่ากันทุกชุดการทดลอง อัตราภาระสารอินทรีย์เท่ากับ 3.5-3.7 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน และอัตราการป้อนเข้าระบบเท่ากับ 2.4 ล./วัน ความคุมพีเอชที่พีเอชเริ่มต้นก่อนเข้าระบบโดยชุดการทดลองนี้เป็นพีเอชของน้ำเสียจริงที่ไม่มีการปรับพีเอชที่อุณหภูมิห้อง ( $30 \pm 3$  °ซ) ได้ทำการวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นในช่วงเดินระบบตั้งแต่วันที่ 31-60 ซึ่งช่วง 10 วันแรกของการเดินระบบทั้งสามสถานะการปรับสภาพหั่วเชื้อมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล.) ต่อกรัมซีโอดีที่ถูกบำบัดค่อนข้างต่ำเฉลี่ยที่ 17.95 13.40 และ 14.72 มล./ก.ซีโอดีที่ถูกบำบัด หลังจากนั้นจึงพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีความแปรปรวนมากตลอด 15 วันหลังการเดินระบบโดยมีปริมาณการเกิดก๊าซสูงสุดวันที่ 14 เท่ากับ 84.12 114.42 และ 102.63 มล./ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด และเริ่มลดลงอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 4.3)



รูปที่ 4.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อกรัมชีโอดีที่ถูกบำบัด: (ก) ไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพ (ข) หัวเชื้อจุลชีพผ่านการปรับสภาพที่ 80 °ซ 30 นาที และ (ค) หัวเชื้อจุลชีพผ่านการปรับสภาพที่ 110 °ซ 30 นาที

ขณะที่ก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มสูงขึ้นมาก 10-15 วันแรก ซึ่งแปรผกผันกับค่าชีโอดี เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพโดยมีการเก็บตัวอย่างก๊าซในช่วงกลางของการเดินระบบคือ วันที่ 15-20 เป็นการเก็บแบบสะสมในถุงเก็บก๊าซทุกวันตลอดระยะเวลาดังกล่าวแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟ ซึ่งผลที่ได้คิดเป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพตลอดระยะเวลาเดินระบบทำเช่นนี้ทุกการทดลอง พบว่าที่สภาวะพีเอชเริ่มต้นเท่ากับพีเอชน้ำเสียจริง (3-4) ตามถึงปฏิกิริยา ก ข และ ค ตามการปรับสภาพหัวเชื้อมีอัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซรวมเท่ากับร้อยละ 17.5 19.6 และ 24.6 และมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 6.5 7.0 และ 11.0 (รูป 4.4 ก ข และ ค) ตามลำดับ โดยร้อยละขององค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่เหลือนั้นอาจอยู่ในรูปก๊าซในโตรเจน เนื่องจากขณะทำการเดินระบบมีความจำเป็นต้องเปิดถังปฏิกิริยาเพื่อแก้ไขการอุดตันและนำตะกอนที่เกิดจากน้ำเสียออกจากถังปฏิกิริยาเพราะตะกอนดังกล่าวลดพื้นที่รองรับภาระสารอินทรีย์ของระบบซึ่งระหว่างเปิดปิดถังปฏิกิริยานั้นทำให้อากาศสามารถเข้าไปในระบบได้ นอกจากนี้ก๊าซออกซิเจนในอากาศบางส่วนที่สามารถละลายน้ำได้เป็นพิษต่อแบคทีเรียหรือจุลชีพที่อยู่ได้ภายใต้สภาวะไร้อากาศเท่านั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ลดลง และหากน้ำเสียมีองค์ประกอบของสารจำพวกซัลเฟตอาจมีก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพได้ โดยปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีความแปรปรวนน้อยและมีค่าค่อนข้างคงที่เพราะช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาการเดินระบบค่อนข้างสั้น จึงมีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนต่อกรัมชีโอดีที่ถูกบำบัดเฉลี่ยตลอดระยะเวลาเดินระบบเท่ากับ 3.93 5.26 และ 6.73 มล.ไฮโดรเจน/ก.ชีโอดี

ที่ถูกบำบัด ซึ่งมีอัตราการเกิดก๊าซที่ไม่มากนักสอดคล้องกับประสิทธิภาพที่ต่ำในการบำบัดชีโอดีของสภาวะพีเอชเริ่มต้นนี้



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบองค์ประกอบในก๊าซชีวภาพที่พีเอชเริ่มต้น 3-4: (ก) ไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพ (ข) หัวเชื้อจุลชีพผ่านการปรับสภาพที่ 80°ซ 30 นาที และ (ค) หัวเชื้อจุลชีพผ่านการปรับสภาพที่ 110°ซ 30 นาที

สาเหตุที่ไม่พบก๊าซมีเทนในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพของทุกๆ รีเอคเตอร์ตามการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพที่พีเอชเริ่มต้นจากชุดการทดลองที่ 1 เป็นผลมาจากปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมซึ่งขึ้นอยู่กับความเป็นกรดต่าง (พีเอช) ของระบบเป็นสำคัญ ถ้าพีเอชมีค่าต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะที่สภาวะนี้จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทนเนื่องจากแบคทีเรียเหล่านี้ใช้กรดไขมันระเหยง่ายไม่ทนทำให้ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายถูกสะสมเพิ่มมากขึ้นพีเอชจึงลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ถ้าพีเอชลดต่ำลงถึง 4.5-5.0 จะทำให้ Methanogenic bacteria หยุดการเจริญเติบโต ซึ่งสอดคล้องกับพีเอชตลอดระยะเวลาเดินระบบอยู่ที่ 4.3 4.4 และ 4.3 ของถังสามถังปฏิบัติการ ก ข และ ค ตามลำดับ

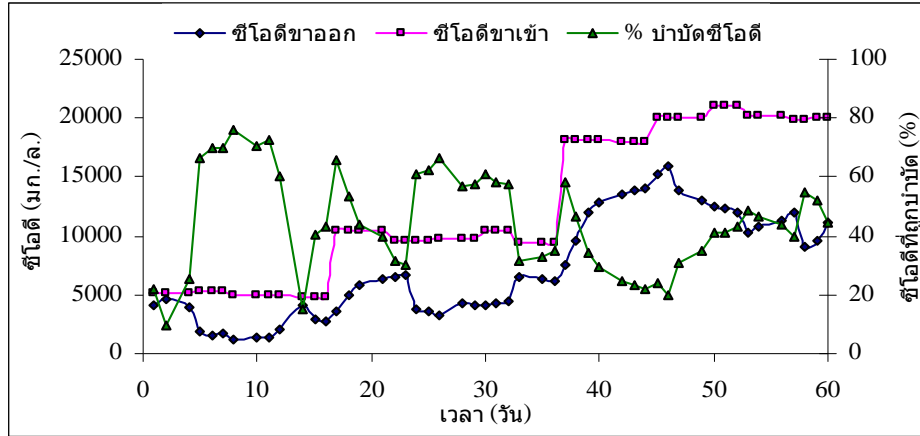
#### 4.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดชีโอดีและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในชุดการทดลองที่ 2

##### 4.3.1 ผลการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอช 5

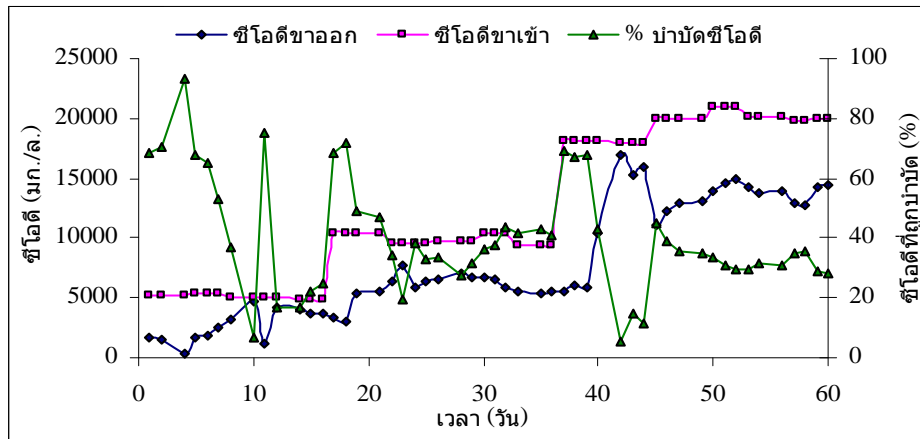
ลักษณะน้ำเสียที่ทำการป้อนเพื่อเริ่มต้นเดินระบบมีลักษณะเช่นเดียวกันดังตารางที่ 4.1 แต่ต่างกันที่ชุดการทดลองนี้มีการปรับพีเอชของน้ำเสียเป็นพีเอช 5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอโมลล์ โดยอัตราเจือจางน้ำเสียเพื่อทำการเริ่มเดินระบบกระทำเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.2.1

ช่วงเริ่มเดินระบบ (Start up) วันที่ 1-30 เมื่อมีการปรับพีเอชน้ำเสียโรงงานขอสรุปรสเป็นที่พีเอช 5 ก่อนเข้าระบบพร้อมกับเริ่มต้นเดินระบบด้วยการเจือจางน้ำเสียเพื่อลดภาระอินทรีย์ทำให้ประสิทธิภาพบำบัดชีโอดีในช่วงอาทิตย์แรกมีแนวโน้มที่ดีคือมีร้อยละการบำบัดอยู่ที่ 69.5 53.2 และ 36.5% ตามลำดับการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพ (รูปที่ 4.5 ก ข และ ค) ซึ่งภาระสารอินทรีย์ที่ทำการป้อนเข้าไปนั้นอยู่ในช่วง 0.9-1.1 กก. ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน หลังจากนั้นประสิทธิภาพเริ่มลดลงและคงที่ในช่วงวันที่ 12 ถึงวันที่ 15 มีประสิทธิภาพบำบัดเฉลี่ยประมาณ 20-40% ต่อมาจึงทำการเพิ่มภาระสารอินทรีย์เป็น 1.9-2 กก. ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน ประสิทธิภาพการบำบัดจึงลดต่ำลงในช่วง 15-20 วันแรก จนกระทั่งประสิทธิภาพบำบัดชีโอดีเริ่มคงที่ในช่วงวันที่ 25-30 ทำการเดินระบบด้วยภาระสารอินทรีย์ในช่วง 3.6-4 กก. ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน

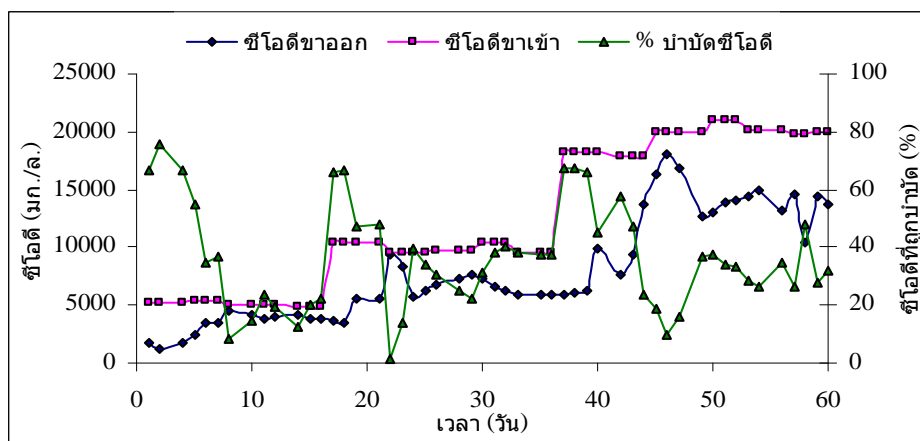
ช่วงเดินระบบ (Operate) ทำการเดินระบบด้วยภาระสารอินทรีย์ในช่วง 3.6-4 กก. ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน จนกระทั่งจุลชีพในระบบสามารถปรับตัวเพิ่มขึ้นจนมีแนวโน้มเริ่มคงที่ที่ 44.6 28.2 และ 31.6% ในช่วงท้ายของการเดินระบบ ซึ่งประสิทธิภาพบำบัดชีโอดีที่พีเอช 5 ประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พีเอชน้ำเสียจริงในการทดลอง



ก) ไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์



ข) หัวเชื้อจุลินทรีย์ผ่านการปรับสภาพที่ 80°ซ 30 นาที



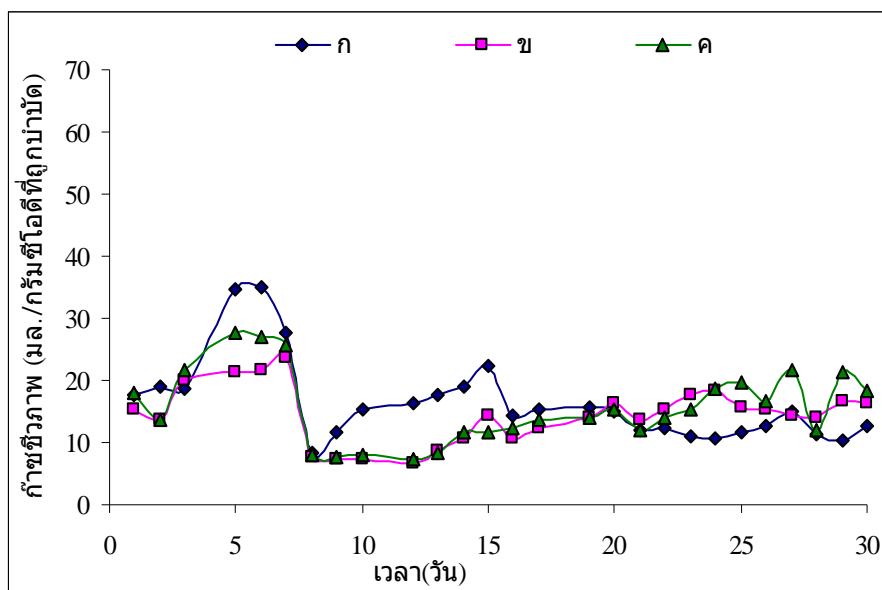
ค) หัวเชื้อจุลินทรีย์ผ่านการปรับสภาพที่ 110°ซ 30 นาที

รูปที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอโอดีที่พีเอช 5

จากรูปที่ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในช่วง 10 วันแรกของการเริ่มเดินระบบมีความแปรปรวนเป็นอย่างมากเพราะจุลชีพจำเป็นต้องปรับตัว เมื่อมีการปรับตัวได้แล้วสังเกตจากสารอินทรีย์ (ซีโอดีขาออก) มีความเข้มข้นลดลงและเริ่มคงที่ จนมีประสิทธิภาพลดต่ำลงในช่วงวันที่ 20 และ วันที่ 45 เป็นผลมาจากการเพิ่มภาระสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ จนกระทั่งจุลชีพสามารถฟื้นตัวและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีในวันที่ 50 ถึง วันที่ 60

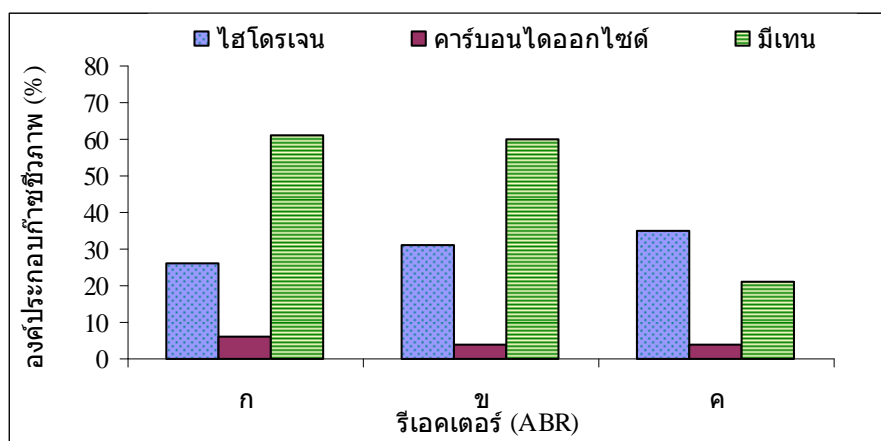
4.3.2 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ

อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับพีเอช 5 เดินระบบเป็นระยะเวลา 30 วัน ด้วยภาระสารอินทรีย์ในช่วง 3.5-4.2 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่ระยะเวลาเก็บผลผลิต 5 วันคงที่ ที่ทุกสภาวะการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพโดยในชุดการทดลองพีเอชที่ 5 มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 34.78 มล./ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด เมื่อไม่ทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพในวันที่ 5 ของการเดินระบบ ขณะที่ถึงปฏิกิริยา ข และ ค มีค่าเท่ากับ 21.26 และ 27.80 มล./ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด ตามลำดับ โดยสรุปพบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียโรงงานซอสปรุงรสมีค่าสูงสุดที่ถึงปฏิกิริยา ก รองลงมาคือถึงปฏิกิริยา ค และ ข ตามลำดับ (รูปที่ 4.6)



รูปที่ 4.6 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อกรัมซีโอดีที่ถูกบำบัด: (ก) ไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพ (ข) หัวเชื้อจุลชีพผ่านการปรับสภาพที่ 80°ซ 30 นาที และ (ค) หัวเชื้อจุลชีพผ่านการปรับสภาพที่ 110°ซ 30 นาที

จากรูปที่ 4.6 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีความแปรปรวนอย่างมากในช่วง 15 วันแรกของการเดินระบบ และมีความแปรปรวนลดลงจนเริ่มคงที่หลังจากนั้น ซึ่งส่วนประกอบของก๊าซที่เกิดขึ้นพบว่ามีย่อตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซรวมในสัปดาห์ที่ 3 หลังเดินระบบ เท่ากับ ร้อยละ 26.3 31.0 และ 35.0 ก๊าซมีเทนร้อยละ 61.0 60.0 และ 21.0 พร้อมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 6.0 4.0 และ 4.0 ของถังปฏิกรณ์ที่ ก ข และ ค ตามลำดับ (รูปที่ 4.7)



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบองค์ประกอบในก๊าซชีวภาพที่พีเอชเริ่มต้น 5: (ก) ไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ (ข) หัวเชื้อจุลินทรีย์ผ่านการปรับสภาพที่ 80°ซ 30 นาที และ (ค) หัวเชื้อจุลินทรีย์ผ่านการปรับสภาพที่ 110°ซ 30 นาที

จากผลการวิเคราะห์หาร้อยละองค์ประกอบไฮโดรเจน (รูปที่ 4.7) ทำให้ทราบว่าที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 พร้อมกับการปรับสภาพหัวเชื้อที่ 110°ซ (ถังปฏิกรณ์ ค) ช่วยยกระดับร้อยละไฮโดรเจนในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพได้ พร้อมกับลดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพจากร้อยละ 61.0 ที่หัวเชื้อจุลินทรีย์ไม่ผ่านการปรับสภาพ เป็นร้อยละ 21.0 โดยเมื่อนำมาคำนวณหาอัตราการผลิตไฮโดรเจนต่อกรัมซีโอดีที่ถูกบำบัด ได้พบว่ามีปริมาณเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 5.50 มล.ไฮโดรเจน/ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด รองลงมาคือที่ถังปฏิกรณ์ ข 4.47 และถังปฏิกรณ์ ก 4.32 มล.ไฮโดรเจน/ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด ตามลำดับ สาเหตุที่พบก๊าซมีเทนในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพค่อนข้างสูงที่ถังปฏิกรณ์ ก มาจากผลของหัวเชื้อจุลินทรีย์เป็นหลักเพราะไม่ได้ทำการปรับสภาพ และหัวเชื้อตะกอนจุลินทรีย์นี้เป็นหัวเชื้อที่ทำการผลิตก๊าซมีเทนในระบบยูเอสบีของโรงงานผลิตผลไม้กระป๋อง มีพีเอชเท่ากับ 6.8-7.4 ซึ่งพีเอชดังกล่าวนี้เป็นสภาวะที่แบคทีเรียจำพวกผลิตก๊าซมีเทนเติบโตได้ดี พร้อมกับพีเอชเริ่มต้นของน้ำเสียในชุดการทดลองนี้ปรับจากพีเอช 4 เป็นพีเอช 5 โดยตลอดระยะเวลาเดินระบบในช่วงแรก พีเอชของวันที่ 5 มีค่า 5.63 5.60 และ 5.59 ที่ถังปฏิกรณ์ ก ข และ ค ตามลำดับ พีเอชในช่วงนี้ไม่เป็นพิษต่อแบคทีเรียสร้างมีเทนจึงพบมีเทนเกิดขึ้นในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพดังที่กล่าวข้างต้น แต่เมื่อทำการปรับสภาพหัวเชื้อโดยผ่านความร้อนที่



อุณหภูมิ 80 และ 110 °ซ แล้วทำให้มีการสร้างอัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซรวมเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังมีประสิทธิภาพที่ไม่ดีพอในการยับยั้งการสร้างก๊าซมีเทนในระบบที่การปรับสภาพหัวเชื้อ 80 °ซ แต่เมื่อทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพที่ 110 °ซ สามารถลดการเกิดก๊าซมีเทนในองค์ประกอบ ก๊าซชีวภาพได้มากกว่าครึ่ง

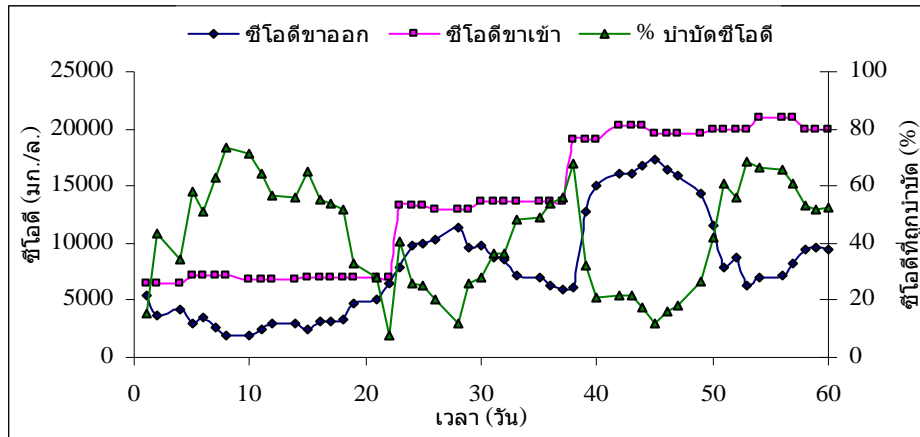
#### 4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีและอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในชุดการทดลองที่ 3

##### 4.4.1 ผลการทดลองที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอช 6

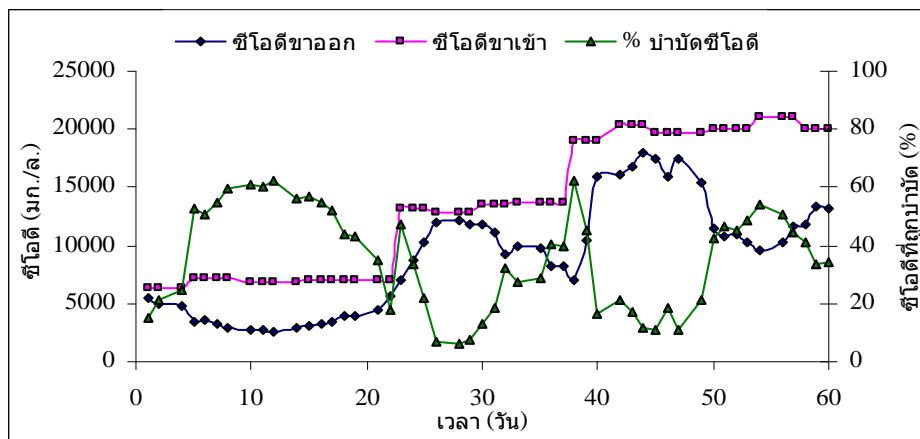
ลักษณะน้ำเสียที่ทำการป้อนเพื่อเริ่มต้นเดินระบบมีลักษณะเช่นเดียวกัน(ตารางที่ 4.1) แต่ต่างกันที่ชุดการทดลองนี้มีการปรับพีเอชของน้ำเสียเป็นพีเอช 6 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอโมล โดยอัตราเจือจางน้ำเสียเพื่อทำการเริ่มเดินระบบเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.2.1

ผลการทดลองช่วงเริ่มเดินระบบ (Start up) เมื่อมีการปรับพีเอชของน้ำเสียจริงเป็นพีเอช 6 พบว่าระบบตามลำดับการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพ (รูปที่ 4.8 ก ข และ ค) มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดซีโอดีอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นเดินระบบที่ 10 วันแรก โดยมีค่าร้อยละ 71 61 และ 64 คิดเป็นซีโอดีที่เหลือจากการบำบัดเท่ากับ 1,974.7 2,654.3 และ 2,441.9 มก./ล. ซึ่งกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นในระบบพบว่ามีปริมาณค่อนข้างต่ำและมีค่าใกล้เคียงกัน ที่เป็นเช่นนี้อาจกล่าวได้ว่าระบบสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ดี และหลังจากเพิ่มภาระสารอินทรีย์ในการเริ่มต้นเดินระบบเป็น 2.5-2.7 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่ามีประสิทธิภาพบำบัดลดลงในช่วงวันที่ 15-30 เป็นอย่างมาก

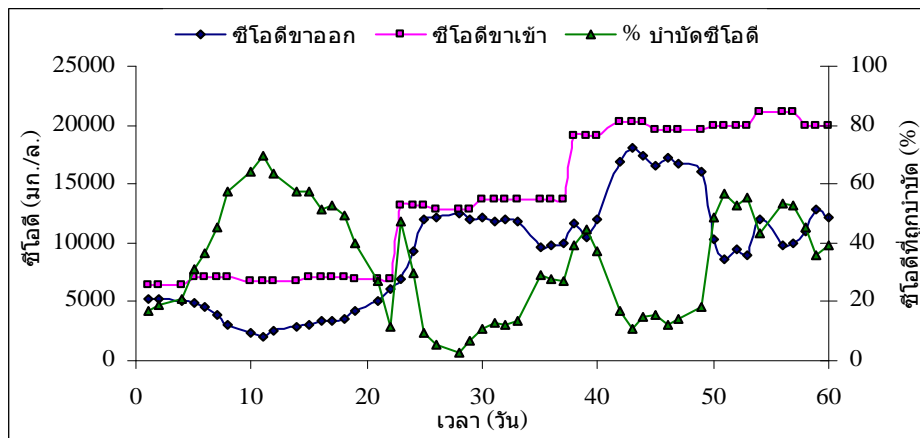
จนกระทั่งช่วงเดินระบบ (Operate) มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ในวันที่ 33-38 ต่อมาจึงเดินระบบด้วยภาระสารอินทรีย์ที่สูงขึ้นไปอีกเป็น 3.8-4.2 กก. ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน จนกระทั่งประสิทธิภาพบำบัดซีโอดีสุดท้ายคิดเป็นร้อยละ 52.5 34.2 และ 38.9 คิดเป็นซีโอดีที่เหลือเท่ากับ 9,492 13,153 และ 12,203 มก./ล. ตามลำดับ ซึ่งมีความสามารถในการลดค่าซีโอดีมากกว่าชุดการทดลองที่พีเอชอื่นๆโดยพีเอช 6 ใกล้เคียงกับพีเอช 6.5 ที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมของระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Acher และ Kirsop, 1991) ทำให้สารอินทรีย์ลดลงได้ในเวลาที่รวดเร็ว โดยมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพบำบัดซีโอดีที่สภาวะต่างๆ ดังตารางที่ 4.2



ก) ไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์



ข) ผ่านการปรับสภาพที่ 80° ซ 30 นาที

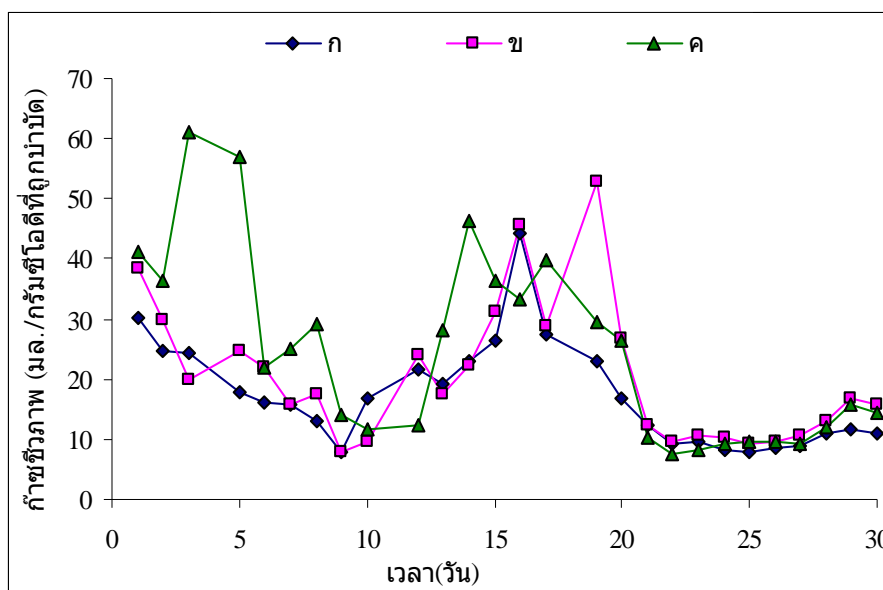


ค) ผ่านการปรับสภาพที่ 110° ซ 30 นาที

รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีที่พีเอช 6

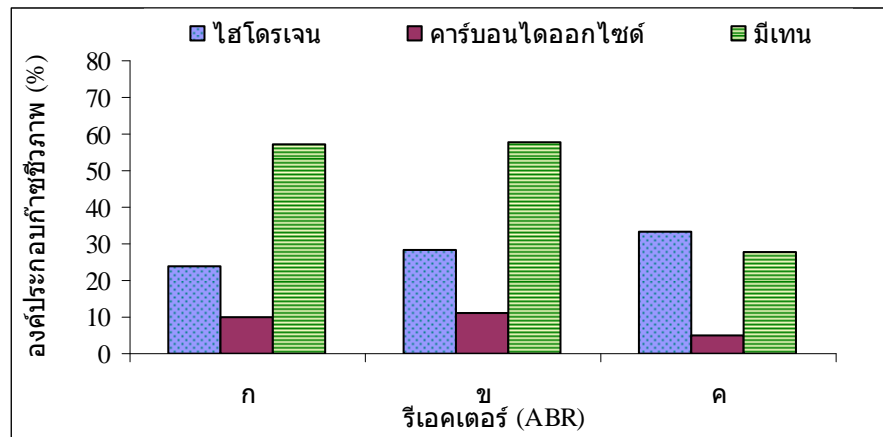
#### 4.4.2 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีค่าพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอช 6

เมื่อทำการเดินระบบที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 ตามสภาวะการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพต่างๆ ตามถึงปฏิริยาที่ ก ข และ ค โดยมีระยะเวลาที่เก็บผลศาสตร์ และอัตราการไหลของน้ำเสียป้อนเข้าระบบเช่นเดียวกับทุกชุดการทดลอง พบว่าระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 254.44 224.74 และ 231.48 มล./วัน คิดเป็นปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อซีโอดีที่ถูกบำบัดเท่ากับ 17.30 20.52 และ 24.30 มล./ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดต่อกรัมซีโอดีที่ถูกบำบัด: (ก) ไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพ (ข) หัวเชื้อจุลชีพผ่านการปรับสภาพที่ 80°ซ 30 นาที และ (ค) หัวเชื้อจุลชีพผ่านการปรับสภาพที่ 110°ซ 30 นาที

จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าในช่วงเดินระบบที่ 20 วันแรกระบบจะมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่แปรปรวนเป็นอย่างมากและมีอัตราการผลิตมากกว่า 10 วันสุดท้ายของการเดินระบบอย่างเห็นได้ชัดซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีที่มีประสิทธิภาพสูงในช่วง 10 วันแรกของการเดินระบบ และเมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพของถึงปฏิริยา ก ข และ ค พบว่ามีอัตราส่วนก๊าซไฮโดรเจนต่อก๊าซรวมในสัปดาห์ที่ 3 หลังเดินระบบ เท่ากับร้อยละ 23.9 28.5 และ 33.4 ก๊าซมีเทนร้อยละ 57.0 58.0 และ 28.0 พร้อมกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 10.0 11.0 และ 5.0 ตามลำดับ (รูปที่ 4.10)



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบองค์ประกอบในก๊าซชีวภาพที่พีเอชเริ่มต้น 6: (ก) ไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพ (ข) หัวเชื้อจุลชีพผ่านการปรับสภาพที่ 80°ซ 30 นาที และ (ค) หัวเชื้อจุลชีพผ่านการปรับสภาพที่ 110°ซ 30 นาที

จากรูปที่ 4.10 พบว่าที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 และมีการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพที่ 110°ซ มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบสูงสุดถึงร้อยละ 33.4 นั้นให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นต่อซีโอดีที่ถูกบำบัดเฉลี่ยเท่ากับ 8.12 มล.ไฮโดรเจน/ก.ซีโอดีที่ถูกบำบัด รองลงมาคือถึงปฏิกิริยา ข และ ก เท่ากับ 5.85 และ 4.13 มล.ไฮโดรเจน/ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด ตามลำดับ โดยมีพีเอชเฉลี่ยตลอดระยะเวลาเดินระบบ 10 วันแรกเป็น 5.7 5.5 และ 5.4 ที่ถึงปฏิกิริยา ก ข และ ค ตามลำดับ ซึ่งที่พีเอชดังกล่าวนี้เป็นพีเอชที่แบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้แต่เจริญเติบโตได้ช้าเนื่องจากช่วงค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียชนิดนี้แคบในช่วงพีเอชประมาณ 6.5-7.2 และประกอบกับหัวเชื้อจุลชีพในทุกชุดการทดลองเป็นหัวเชื้อที่ทำการบำบัดสารอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซมีเทนในระบบยูเอเอสบีของโรงงานผลิตผลไม้กระป๋องที่มีพีเอชเท่ากับ 6.8-7.4 และมีค่าโออาร์พีติดลบถึง -294 มิลลิโวลต์ โดยปัจจัยต่างๆ เหล่านี้ส่งผลต่อการเกิดมีเทนในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองที่ 3 นี้ แต่เมื่อทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพที่ 110°ซ พบว่าสามารถลดการเกิดมีเทนในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพได้อย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 4.10)

จากผลการทดลองทั้งหมดทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพบำบัดซีโอดีที่สภาวะต่างๆ (ตารางที่ 4.2) ซึ่งประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีเป็นค่าที่แสดงความสามารถหรือประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพสูงทำงานได้ดีจะมีประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดีสูงตามไปด้วย แต่เมื่อพิจารณาถึงปริมาณซีโอดีคงเหลือในน้ำทิ้งจากการผลิตไฮโดรเจนของน้ำเสียโรงงานซอสปรุงรสที่สภาวะต่างๆ แล้วพบว่ายังมีค่าสูงมาก โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Oh และ Logan (2005) ที่พบว่าน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหารภายหลังจากการผลิตไฮโดรเจนแล้วยังคงมีสารอินทรีย์เหลืออยู่มาก

ตารางที่ 4.2 สรุปประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีที่สภาวะต่างๆ

พีเอชเริ่มต้น	หัวเชื้อจุลชีพ	ชีโอดีเข้า (มก./ล.)	ชีโอดีออก (มก./ล.)	พีเอชสุดท้าย	%บำบัดชีโอดี
4	ก	18,000	12105	4.12	32.75
4	ข	18,000	13328	4.01	25.96
4	ค	18,000	12727	3.97	29.29
5	ก	20,000	11076	4.87	44.62
5	ข	20,000	14359	4.71	28.21
5	ค	20,000	13675	4.50	31.63
6	ก	20,000	9492	5.58	52.54
6	ข	20,000	13153	5.65	34.24
6	ค	20,000	12203	5.50	38.99

Xiao และ Liu (2009) กล่าวว่าผลของการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพนั้นสามารถทำลายโครงสร้างเจล (Gel Structure) และโครงสร้างเซลล์ของหัวเชื้อจุลชีพ เมื่อมีการปรับสภาพทำให้พีเอชของหัวเชื้อจุลชีพมีค่าต่ำลง ส่งผลให้ชีโอดีละลายน้ำเพิ่มขึ้น พร้อมกับปริมาณกรดไขมันระเหยที่สูงขึ้นเนื่องจากการปรับสภาพด้วยความร้อนหัวเชื้อจุลชีพจะมีการปล่อยสารอินทรีย์จำพวกสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ เช่น กรดไขมันระเหยง่ายในระบบ เป็นต้น หัวเชื้อจุลชีพที่ผ่านการปรับสภาพนี้จึงมีความเข้มข้นสูงกว่าที่ไม่ทำการปรับสภาพเป็นสาเหตุให้การบำบัดชีโอดีที่ถึงปฏิกิริยา ข และ ค ต่ำกว่าถึงปฏิกิริยา ก แต่การปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพด้วยความร้อนนั้นเพื่อกำจัดจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ (ภนิดา เกษมโชติช่วง, 2550) โดยสามารถสังเกตองค์ประกอบก๊าซมีเทนที่ลดลงได้เมื่อทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพ (ตารางที่ 4.3)

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่สภาวะต่างๆ

พีเอชเริ่มต้น	สภาวะ หัวเชื้อจุลชีพ	องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ		
		%H <sub>2</sub>	%CO <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>
3-4 (น้ำเสียจริง)	ไม่ปรับสภาพ	17.5	6.5	- <sup>A</sup>
	ปรับสภาพที่ 80 °ซ	19.2	7.0	- <sup>A</sup>
	ปรับสภาพที่ 110 °ซ	24.6	11.0	- <sup>A</sup>
5	ไม่ปรับสภาพ	26.3	6.0	61.0
	ปรับสภาพที่ 80 °ซ	31.0	4.0	60.0
	ปรับสภาพที่ 110 °ซ	35.0	4.0	21.0
6	ไม่ปรับสภาพ	23.9	10.0	57.0
	ปรับสภาพที่ 80 °ซ	28.5	11.0	58.0
	ปรับสภาพที่ 110 °ซ	33.4	5.0	28.0

หมายเหตุ (A) ไม่พบมีเทนในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

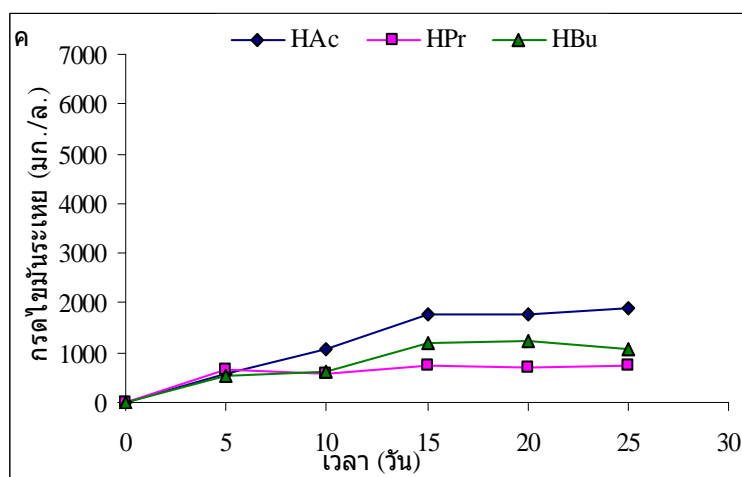
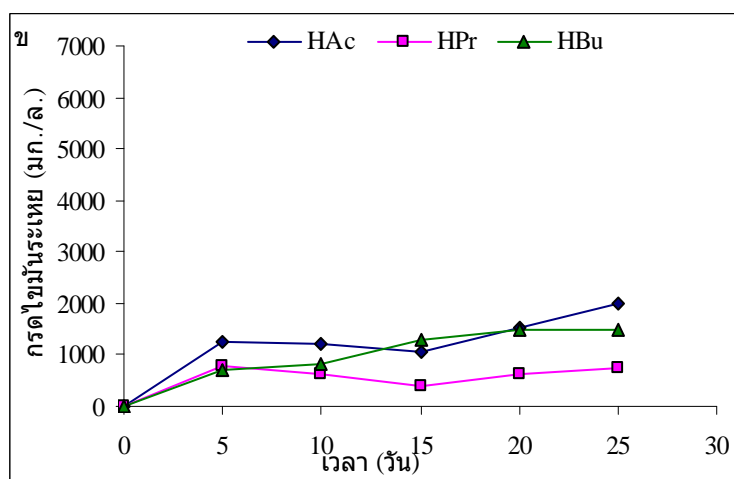
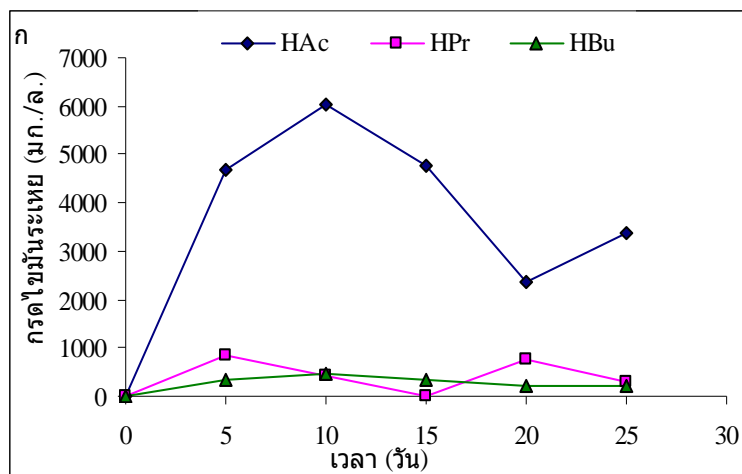
จากตารางที่ 4.3 สาเหตุที่พบมีเทนเป็นองค์ประกอบในก๊าซชีวภาพแม้จะทำการปรับสภาพหัวเชื้อก็ตาม เนื่องจากลักษณะการเก็บตัวอย่างของการวิจัยนี้ได้ทำการรวบรวมเก็บตัวอย่างก๊าซที่ด้านบนของถังปฏิกรณ์แบบรวมทุกห้องไม่มีการแยกเก็บตามห้องต่างๆ ซึ่ง Zhu และคณะ (2008) ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพแต่ละห้องจากห้องที่ 1 ถึงห้องที่ 4 พบว่าที่ห้องแรกมีเพียงก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบถึงร้อยละ 30 และ 63 ตามลำดับ ห้องที่สองพบว่ามีก๊าซไฮโดรเจนสูงที่สุดถึงร้อยละ 60 พร้อมกับเกิดก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ปริมาณเล็กน้อยในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ หลังจากนั้นร้อยละไฮโดรเจนลดลงอย่างมากในห้องที่ 3 และห้องที่ 4 พร้อมกับเกิดก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้นอย่างมากในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ โดยมีปริมาณสูงถึงร้อยละ 80

#### 4.5 ผลของพีเอชเริ่มต้นต่อกระบวนการสร้างกรด

##### 4.5.1 ที่สภาวะพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอชน้ำเสียจริง (พีเอช 3-4)

ผลิตภัณฑ์กรดไขมันระเหยง่ายชนิดต่างๆ ได้แก่ กรดอะซิติก (HAc) โพรพิโอนิก (HPr) และกรดบิวไทรก (HBu) คือ ผลการทดลองที่ได้จากช่วงเดินระบบ 30 วันหลังจากช่วงเริ่มต้นเดินระบบซึ่งการเดินระบบนี้เกิดขึ้นในสภาวะที่พีเอชประมาณ 3-4 ซึ่งเป็นพีเอชของน้ำเสียจริงแปรผันตามสภาวะการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพที่ 80 °ซ (ข) 110 °ซ (ค) เปรียบเทียบกับหัวเชื้อจุลชีพ

ที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ก) โดยจากรูปที่ 4.11 จะสังเกตเห็นว่าในสภาพพีเอชดังกล่าวซึ่งเป็นพีเอช น้ำเสียจริงมีสภาพเป็นกรดส่งผลต่อการสลายสารตัวกลางต่างๆในระบบของจุลชีพไม่ดีนัก สอดคล้องกับ Cheong และ Hansen (2006) ที่พบว่าพีเอช 4.6 มีอัตราการเติบโตของจุลชีพต่ำสุด ทำให้เกิดการสะสมของปริมาณกรดไขมันระเหยชนิดต่างๆ โดยเฉพาะปริมาณกรดอะซิติกที่ในช่วง 15 วันแรกของการเดินระบบมีมากถึง 93.6 % 38.9% และ 47.8 % ของปริมาณกรดไขมันระเหยทั้งหมด ตามการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพดังรูป ก ข และ ค ตามลำดับ นอกจากนี้ในขั้นตอนการสร้างกรดยังผลิตกรดไขมันระเหยชนิดอื่นประกอบด้วยกรดบิวไทริกและกรด โพรพิโอนิกเฉลี่ยตลอดระยะเวลาเดินระบบเป็น 6.3% และ 9.3% เมื่อไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพ 36.1% และ 19.8% เมื่อปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพที่ 80° ซ และ 30.6% และ 22.5% เมื่อปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพที่ 110° ซ

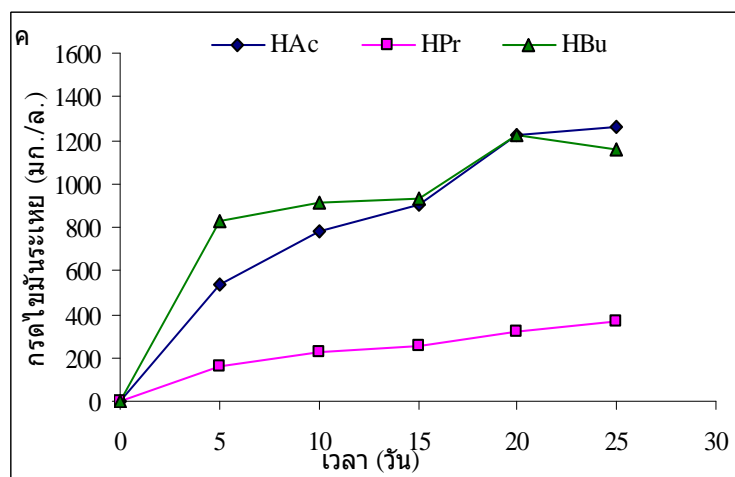
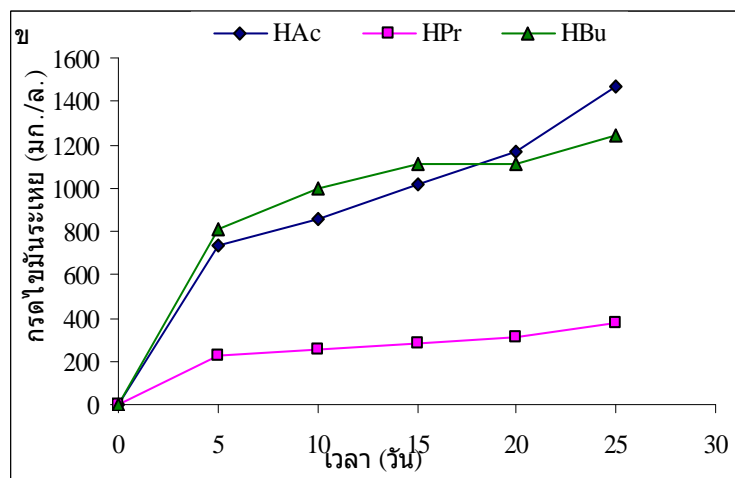
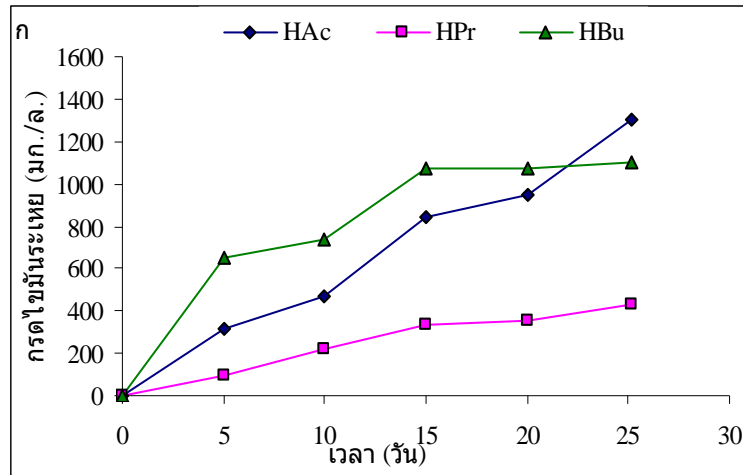


รูปที่ 4.11 ปริมาณการเกิดกรดไขมันระเหยง่ายที่พีเอชเริ่มต้น 3-4: (ก) ไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ (ข) หัวเชื้อจุลินทรีย์ผ่านการปรับสภาพที่ 80°ซ 30 นาที และ (ค) หัวเชื้อจุลินทรีย์ผ่านการปรับสภาพที่ 110°ซ 30 นาที



#### 4.5.2 ที่สภาวะพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอช 5

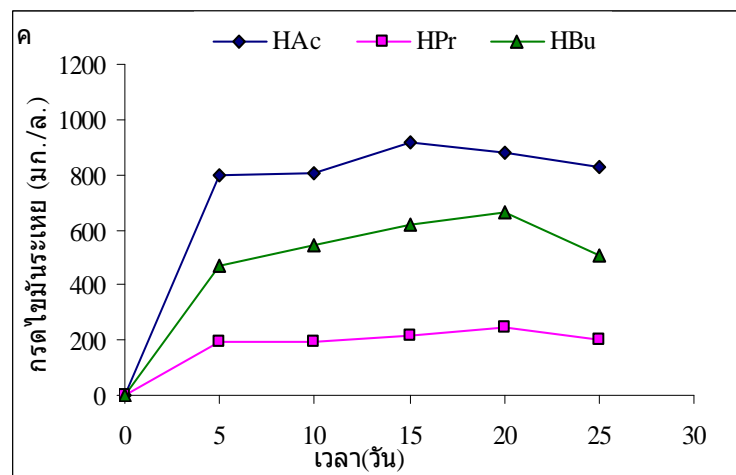
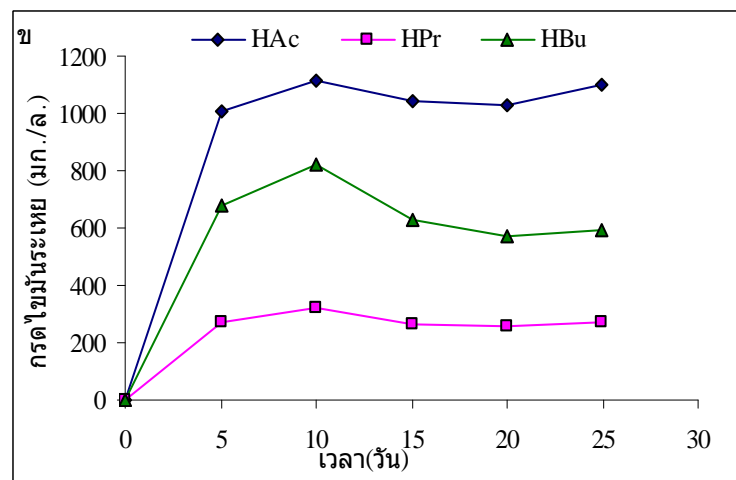
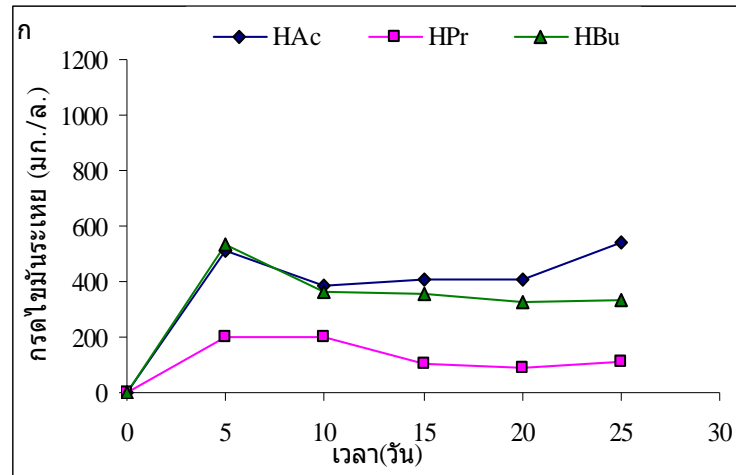
เมื่อทำการป้อนน้ำเสียที่ทำการปรับพีเอชเป็น 5 เพื่อเดินระบบส่งผลให้แนวโน้มการผลิตกรดบิวไทริกเฉลี่ยแล้วเพิ่มสูงขึ้นจากทุกชุดการทดลองเป็น 46.7% 44.1% และ 45.6% ดังรูปที่ 4.12 ก ข และ ค ตามลำดับ โดย Cheong และ Hansen (2006) ก็พบว่าเกิดกรดบิวไทริก 50.8%-75.8% ที่พีเอช 5.7 โดยเป็นสัญญาณที่ดีบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ เมื่อระบบสามารถผลิตกรดบิวไทริกปริมาณมากขึ้น ซึ่งปริมาณกรดบิวไทริกนี้จะเพิ่มขึ้นอย่างมากจากห้องที่ 1 ของถังปฏิกรณ์ถึงห้องที่ 3 กรดบิวไทริกเป็นสารตัวกลางที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจนในระบบได้โดยอาศัยแบคทีเรียชนิด Hydrogen-producing acetogenic bacteria (Li และคณะ, 2007)



รูปที่ 4.12 ปริมาณการเกิดกรดไขมันระเหยง่ายที่พีเอช 5

#### 4.5.3 ที่สภาวะพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอช 6

เมื่อระบบทำการป้อนน้ำเสียที่มีการปรับพีเอชเป็น 6 นั้น มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกรดไขมันระเหยง่ายในระบบอย่างเห็นได้ชัด โดยมีปริมาณกรดชนิดต่างๆ (อะซิติก โพรพิโอนิก และ บิวไทริก) สะสมลดลงเป็นอย่างมากและมีแนวโน้มใกล้เคียงกันไม่ว่าจะทำการปรับสภาพหัวเชื้อเริ่มต้นหรือไม่ บ่งบอกถึงการปรับสภาพของหัวเชื้อจุลินทรีย์ในระบบที่มีความสามารถใส่สารตัวกลางเหล่านี้เพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณกรดบิวไทริกลดลงจากพีเอช 5 คือ 929 (ก) 1054 (ข) และ 1011 มก./ล. เป็น 381 659 และ 560 มก./ล. ที่พีเอช 6 และจากผลการทดลองที่พีเอชดังกล่าวนี้จะสังเกตได้จากรูปที่ 4.13 ว่าปริมาณกรดอะซิติกกลับเพิ่มมากขึ้นเป็นกรดไขมันระเหยง่ายชนิดหลักที่เกิดขึ้นในระบบสอดคล้องกับ Cheong และ Hansen (2006) ที่เมื่อปรับพีเอชของระบบจาก 5.7 เป็น 6.8 แล้วทำให้ความเข้มข้นของกรดอะซิติกเพิ่มขึ้นมากกว่ากรดบิวไทริก โดยอัตราส่วนระหว่างกรดบิวไทริกต่อกรดอะซิติกมีความสัมพันธ์และเป็นตัวชี้วัดความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนได้ คือเมื่ออัตราส่วนระหว่างกรดบิวไทริกต่อกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น เปอร์เซ็นต์การเกิดก๊าซไฮโดรเจนจะสูงตามไปด้วย ซึ่งแสดงอัตราส่วนดังกล่าวจากช่วงปลายของทุกชุดการทดลองดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.13 ปริมาณการเกิดกรดไขมันระเหยง่ายที่พีเอช 6

กรดไขมันระเหยเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่ยกถึงการดำเนินงานของระบบบำบัดแบบไร้อากาศ เนื่องจากจุลินทรีย์จะใช้กรดไขมันระเหยง่ายในการสร้างก๊าซชีวภาพ ดังนั้นระบบที่ทำงานได้ดีจะใช้กรดไขมันระเหยง่ายสร้างก๊าซชีวภาพได้สูง ซึ่งปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายชนิดต่างๆ มีส่วนสำคัญต่อฟิเอชของระบบคือเมื่อปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายสูงขึ้น ฟิเอชของระบบจะต่ำลง โดยระดับของกรดอะซิติกที่มีค่าเกิน 800 มก./ล. หรืออัตราส่วนระหว่างกรดโพโรไพโอนิกต่อกรดอะซิติกเกิน 1.4 จะทำให้ระบบเกิดการล้มเหลวได้ (Marchaim และ Krause, 1993) นอกจากนี้จะสังเกตพบว่าเป็นบางช่วงเวลาที่มีการเว้นระยะการเก็บก๊าซชีวภาพนานๆ จะไม่มีการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากในระบบมีความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนมากเกินไป ทำให้ไฮโดรเจนบางส่วนละลายกลับลงไปในน้ำ และมีผลให้เกิดการสร้างและสะสมตัวของกรดโพโรไพโอนิกและกรดบิวไทริกขึ้นในระบบ ส่งผลโดยตรงทำให้ปริมาณไฮโดรเจนลดลง (มันสิน ตันทุลเวศน์, 2546)

ตารางที่ 4.4 อัตราส่วนบิวไทริกต่ออะซิติกในช่วงปลายของทุกชุดการทดลอง

ฟิเอชเริ่มต้น	สถานะหัวเชื้อ	ผลิตภัณฑ์กรดไขมันระเหยง่ายในระบบ (มก./ล)				
		อะซิติก (HAc)	โพโรไพโอนิก (HPr)	บิวไทริก (HBu)	อัตรา HBu/HAc	ฟิเอชขาออก
3-4	ไม่ปรับสภาพ	3394.15	302.64	201.86	0.059	4.12
3-4	ปรับสภาพที่ 80 °ซ	1991.09	723.94	1476.01	0.741	4.01
3-4	ปรับสภาพที่ 110 °ซ	1896.20	721.99	1061.71	0.560	3.97
5	ไม่ปรับสภาพ	1304.22	433.13	1102.66	0.845	4.87
5	ปรับสภาพที่ 80 °ซ	1470.13	377.76	1241.24	0.844	4.71
5	ปรับสภาพที่ 110 °ซ	1263.18	366.05	1160.60	0.919	4.50
6	ไม่ปรับสภาพ	543.55	110.49	331.24	0.609	5.58
6	ปรับสภาพที่ 80 °ซ	1096.86	268.98	592.46	0.540	5.65
6	ปรับสภาพที่ 110 °ซ	823.70	202.00	503.35	0.611	5.50

จากตารางที่ 4.4 พบว่าอัตราส่วนระหว่างกรดบิวไทริกต่อกรดอะซิติก เท่ากับ 0.92 เป็นค่าอัตราส่วนสูงสุดจากการทดลองทั้งหมด โดยมีปริมาณการเกิดก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 5.5 มล. ไฮโดรเจน/ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด และสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 82.51 มล. ซึ่งตาม Cheong และ Hansen (2006) พบว่าสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุด 238 และ 228 มล. เมื่อมีอัตราส่วนระหว่างกรดบิวไทริกต่อกรดอะซิติก คือ 2.68 และ 2.78 ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่สูงกว่าชุดการทดลองอื่นหลังจากมีวิธีปรับสภาพหัวเชื้อตะกอนจุลชีพที่แตกต่างกัน และมีปริมาณ

ไฮโดรเจนเกิดขึ้นเท่ากับ 57.8 มล. ไฮโดรเจน/ก. ซูโครสที่ถูกบำบัด เมื่อควบคุมพีเอชไว้ที่ 4.6 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพีเอชขาออกที่เท่ากับ 4.5 แต่สาเหตุที่ทำให้อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในการทดลองค่อนข้างต่ำเนื่องจากเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยถังปฏิกรณ์ขนาดแลปสเกลปริมาตร 12 ล. ซึ่งจะมีปัญหาเกี่ยวกับการป้อนน้ำเสียที่ระบบสูบน้ำเข้าถังปฏิกรณ์ พร้อมกับมีปัญหาในการอุดตันของสายซิลิโคนเป็นระยะๆ โดยแหล่งคาร์บอนที่สำคัญมาจากน้ำเสียจริงซึ่งมีความสกปรกค่อนข้างสูง แตกต่างจาก Cheong และ Hansen (2006) ที่ทำการทดลองแบบเบทช์ (Completely mixed batch reactors) และมีการใช้น้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลกลูโคส เป็นแหล่งคาร์บอน เมื่อเปรียบเทียบการเกิดผลิตภัณฑ์เหลวทั้งหมด (Total VFAs) ในขั้นตอนการสร้างกรดและอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนต่อกรัมซีโอดีที่ถูกบำบัดของงานวิจัยนี้กับ Li และคณะ (2007) ซึ่งมีการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้ระบบแผ่นกั้นไร้อากาศเช่นเดียวกันพบว่า Li และคณะ (2007) มีความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด เท่ากับ 1,853 มก./ล. ขณะที่อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 40 มล. ไฮโดรเจน/ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด สำหรับงานวิจัยนี้พบว่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเฉลี่ย 8.12 มล. ไฮโดรเจน/ก. ซีโอดีที่ถูกบำบัด เมื่อความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด เท่ากับ 1,529.05 มก./ล. โดยปริมาณความเข้มข้นของกรดโพรไพโอนิกเป็นตัวชี้วัดหากมีความเข้มข้นลดลง แสดงว่ากรดโพรไพโอนิกสามารถเปลี่ยนรูปไปเป็นกรดอะซิติกและไฮโดรเจนด้วยอะซิโตเจนิกแบคทีเรีย (Hydrogen-producing acetogenic bacteria) (Li และคณะ, 2007)

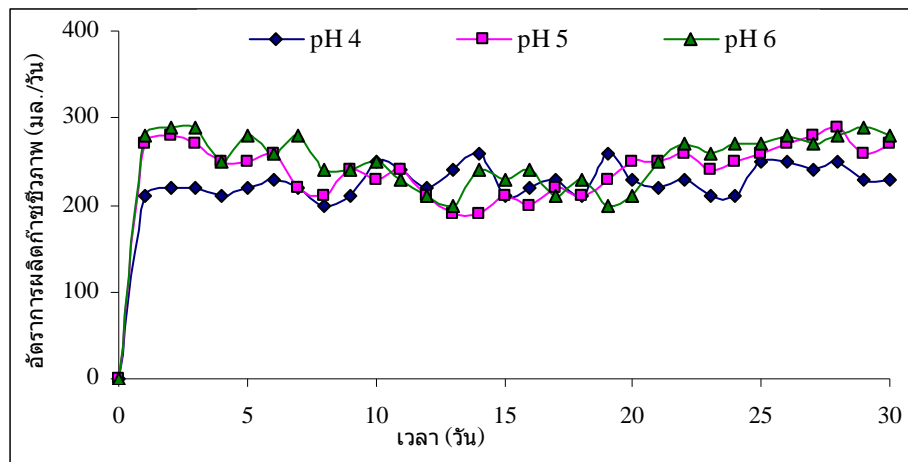
#### 4.6 เปรียบเทียบพีเอชที่ส่งผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพตามการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์

การเปลี่ยนแปลงสภาวะพีเอชของระบบมีความสำคัญและส่งผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งสัดส่วนปริมาณก๊าซรวมจากทุกชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยเป็นไปตามการบำบัดซีโอดีต่อวัน ของแต่ละชุดการทดลอง ซึ่งในหัวข้อนี้แสดงเฉพาะปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวันเท่านั้น (รูปที่ 4.14-4.16) และจะทำการเปรียบเทียบกับสัดส่วนซีโอดีที่ถูกบำบัดในตารางที่ 4.2 ต่อไป โดย Speece (1996) กล่าวว่าระบบไร้อากาศที่ดีควรมีสัดส่วนปริมาณก๊าซเฉลี่ยรวมที่ 0.76 ลบ.ม./กก. ซีโอดีที่ย่อยสลาย ที่ความดัน 1 บรรยากาศ อุณหภูมิ 25 °C

##### 4.6.1 ปริมาณก๊าซรวมที่เกิดขึ้นเมื่อไม่ทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์

อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเมื่อทุกชุดการทดลองนี้ไม่ได้ทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่สภาวะพีเอชเริ่มต้น 4 5 และ 6 โดยรวมแล้วทุกพีเอชเริ่มต้นมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่ใกล้เคียงกันซึ่งที่พีเอช 4 มีอัตราการผลิตที่ต่ำสุดในช่วง 10 วันแรกของการเดินระบบและมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลา โดยมีอัตราการผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 227 มล./วัน ส่วนพีเอชเริ่มต้นที่ 5 และ 6 นี้มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงในช่วง 3 วันแรกและเริ่มลดต่ำลงจนกระทั่ง

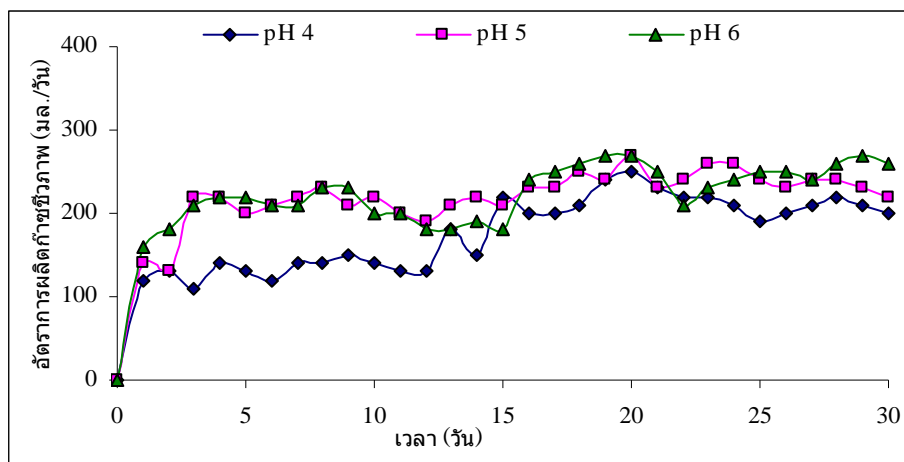
ถึงในวันที่ 15 จึงมีแนวโน้มปรับตัวผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยมีอัตราการผลิตที่ใกล้เคียงกันตลอดระยะเวลา 15 วันหลังเดินระบบซึ่งมีอัตราการผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 242 และ 253 มล./วัน ของพีเอช 5 และ 6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวันตามสภาวะพีเอชเริ่มต้น

#### 4.6.2 ผ่านการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพที่ 80 °ซ 30 นาที

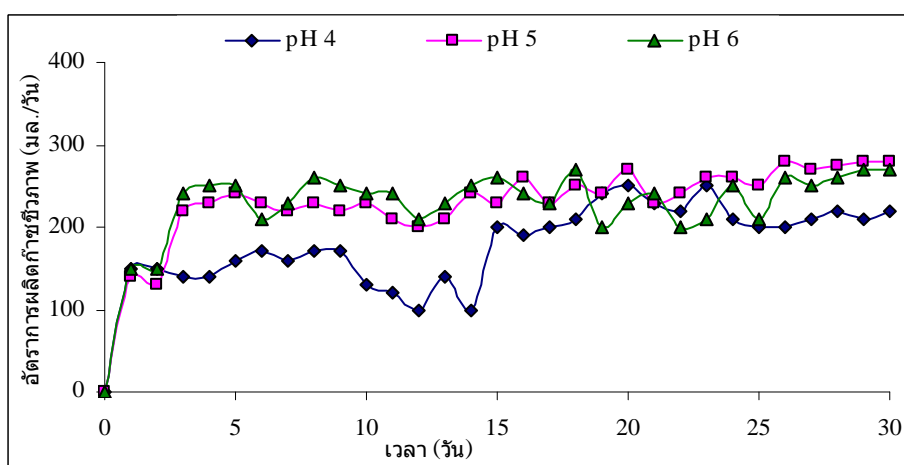
หลังจากปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพที่ 80 °ซ 30 นาทีแล้วเดินระบบเป็นระยะเวลา 30 วัน โดยแต่ละพีเอชเริ่มต้นได้มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพดังรูปที่ 4.15 โดยพีเอช 4 ซึ่งเป็นพีเอชต่ำสุด และเป็นพีเอชจริงของน้ำเสีย โดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพช้าที่สุดใน 10-15 วันแรกของการเดินระบบและมีการเพิ่มขึ้นทันทีหลังจากนั้น ส่วนแนวโน้มในการผลิตก๊าซชีวภาพดีที่สุดในช่วงการเดินระบบคือที่พีเอช 5 และ 6 ซึ่งอัตราการผลิตในวันที่ 3 นั้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 2 วันแรกและมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่เริ่มคงที่หลังจากวันที่ 15 ซึ่งสามวันสุดท้ายอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่พีเอชเริ่มต้น 6 ปรับตัวสูงขึ้นอยู่ที่ประมาณ 260-270 มล./วัน ส่วนที่พีเอช 5 และ 4 มีอัตราการผลิตเป็น 220-240 และ 200-220 มล./วัน ตามลำดับ โดยพีเอชทั้งสามนี้เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ไม่ทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพแล้วมีอัตราผลิตก๊าซชีวภาพโดยรวมที่ต่ำกว่า



รูปที่ 4.15 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวันตามสภาวะพีเอชเริ่มต้น

#### 4.6.3 ผ่านการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ $110^{\circ}\text{C}$ 30 นาที

ชุดการทดลองนี้หัวเชื้อจุลินทรีย์ทำการปรับสภาพที่  $110^{\circ}\text{C}$  30 นาทีส่งผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 4 อย่างมากโดยมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่ต่ำสุดเมื่อเทียบกับพีเอช 5 และ 6 อย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่พีเอช 4 เป็นไปอย่างช้าๆ ใน 10 วันแรกของการเดินระบบและลดลงในช่วง 10-15 วันหลังจากนั้นจึงมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่เพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่หลังจากวันที่ 20 ไปแล้วส่วนแนวโน้มในการผลิตก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุดในช่วงการเดินระบบคือที่พีเอช 5 และ 6 ซึ่งอัตราการผลิตในวันที่ 3 เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจาก 2 วันแรกและจากนั้นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพก็เริ่มคงที่จนถึงวันที่ 10 โดยที่พีเอช 6 เริ่มมีความแปรปรวนส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงต่ำกว่าอัตราการผลิตที่พีเอช 5 หลังจากวันที่ 15 ในการเดินระบบทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพช่วงท้ายการทดลองของพีเอช 5 และ 6 มีค่า 270-280 และ 250-270 มล./วัน ตามลำดับ



รูปที่ 4.16 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพต่อวันตามสภาวะพีเอชเริ่มต้น



ค่าพีเอชน้ำออกจากระบบตลอดระยะเวลาการผลิตไฮโดรเจนที่ได้จากทดลองมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับค่าพีเอชน้ำเข้าโดยช่วงแรกมีค่าแปรปรวนเล็กน้อย แต่มีค่าลดลงจากพีเอชเริ่มต้นในช่วงทำการทดลองอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากมีปฏิกิริยาย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ นอกจากนี้จะได้ก๊าซไฮโดรเจนแล้วยังเกิดกรดโมเลกุลเล็กๆ เช่น กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก และกรดบิวไทริกเป็นผลิตภัณฑ์จึงทำให้มีค่าพีเอชลดลง ถ้าพีเอชมีค่าต่ำกว่า 6.2 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงตัวอย่างรวดเร็วเพราะสภาวะนี้จะเป็อันตรายต่อแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียเหล่านี้ใช้กรดไขมันระเหยง่ายไม่ทนทำให้ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายถูกสะสมเพิ่มมากขึ้นพีเอชจึงลดต่ำลงอย่างรวดเร็ว ถ้าพีเอชลดต่ำลงถึง 4.5-5.0 จะทำให้ Methanogenic bacteria หยุดการเจริญเติบโต ส่งผลต่ออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับพีเอชน้ำเสียจริง (พีเอช 3-4) ของการทดลองที่มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (มล./วัน) ต่ำกว่าที่สภาวะพีเอชเริ่มต้นอื่นๆ

#### 4.7 สรุปประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงงานขอสปรงรสเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงงานขอสปรงรสและสภาวะในการเดินระบบของแผ่นกั้นไร้อากาศที่สภาวะพีเอชเริ่มต้นและการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพต่างๆ ดังตารางที่ 4.5 แสดงถึงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพรวม พบว่าองค์ประกอบของก๊าซไฮโดรเจนสำหรับสภาวะที่มีการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพมีแนวโน้มสูงกว่าสภาวะหัวเชื้อจุลชีพที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนระหว่างระบบที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้นกับระบบที่ใช้น้ำเสียจริงเดินระบบ ระบบที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้นสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณสูงและสำหรับการบำบัดซีโอดีเห็นได้ว่าน้ำเสียที่มีการปรับพีเอชเริ่มต้นก็มีประสิทธิภาพที่ดีในการบำบัดเช่นเดียวกันแต่ประสิทธิภาพจะดียิ่งกว่าหากไม่ทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพ

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของน้ำเสียในการศึกษานี้กับการทดลองอื่นๆ ดังตารางที่ 4.7 พบว่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนส่วนใหญ่สำหรับผลการวิจัย มีค่าต่ำกว่าข้อมูลอ้างอิงในตาราง โดยเฉพาะชุดทดลองที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพ เมื่อพิจารณาชุดทดลองที่ทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพที่ 110 °ซ ที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 พบว่าผลการวิจัยมีค่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงกว่า 2 เท่าของสภาพหัวเชื้อที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนและข้อมูลที่น่ามาอ้างอิง สรุปได้ว่าชุดทดลองที่มีการปรับสภาพหัวเชื้อและปรับพีเอชเริ่มต้นนั้นมีประสิทธิภาพที่ดีเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป

จากผลการทดลอง ค่าความเค็มทุกชุดการทดลองดังตารางที่ 4.5 ที่น้ำขากอกมีค่ามากกว่า 1% (10 Path per thousand หรือ 10,000 มก./ล.) โดย Ji และคณะ (2009) กล่าวว่าถ้าค่าความเค็มในน้ำ

เสียมากกว่า 1% มีพิษต่อระบบ ที่ส่งผลต่อการเติบโตของจุลชีพ ความเข้มข้นของค่าความเค็มสูงๆ มีผลต่อความดันภายในและภายนอกของเซลล์จุลชีพ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วส่งผลทำให้ผนังเซลล์อาจแตกได้ (Cellular broken) หรือไม่ก็ยับยั้งการเติบโตของเซลล์จุลชีพ แต่ที่พบว่าการทดลองแบบอาศัยตัวกลาง (Fixed-Bed reactor) เซลล์จุลชีพสามารถดำรงอยู่รอดได้แม้ค่าความเค็มจะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงถึง 5% และยังพบอีกว่า ค่าความเค็มในช่วง 1.15-1.46% จะทำให้เกิดการเติบโตของจุลชีพช้า ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพบำบัดสารอินทรีย์ของระบบอีกด้วย

ตารางที่ 4.5 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียโรงงานขอสงวนสิทธิ์โดยระบบแผ่นกั้นไร้อากาศที่สภาวะต่างๆ

พารามิเตอร์	พีเอชเริ่มต้น = พีเอช 3-4			พีเอชเริ่มต้น = พีเอช 5			พีเอชเริ่มต้น = พีเอช 6		
	ก	ข	ค	ก	ข	ค	ก	ข	ค
ซีไอได้น้ำเข้า (มก./ล.)	18000	18000	18000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
ซีไอได้น้ำออก (มก./ล.)	12985.15	13914.68	13636.86	12189.82	13643.84	14259.59	11088.65	13178.46	12603.03
%การบำบัดซีไอ*	27.35	21.94	23.69	36.77	32.09	34.15	40.28	32.30	35.08
บีไอได้น้ำออก (มก./ล.)	6350	7125	6625	9078	9450	9847	8974	9517	9604
%การบำบัดบีไอ	20.63	10.94	17.19	26.58	23.57	20.36	27.42	23.03	22.32
ค่าความเค็ม (%) <sup>1</sup>	2.7	2.8	3.1	1.2	1.8	1.6	1.1	1.5	1.5
การผลิตก๊าซชีวภาพ <sup>2</sup> (มล./วัน)	230	200	220	270	220	280	280	260	270
อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ <sup>2</sup> (มล./กรัมซีไอที่ถูกบำบัด)	16.26	17.84	17.38	12.61	16.25	18.45	11.10	15.82	14.43
ร้อยละของปริมาณไฮโดรเจน	17.5	19.2	24.6	26.3	31.0	35.0	23.9	28.5	33.4

หมายเหตุ (ก) ไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ (ข) หัวเชื้อจุลินทรีย์ผ่านการปรับสภาพที่ 80°ซ 30 นาที และ (ค) หัวเชื้อจุลินทรีย์ผ่านการปรับสภาพที่ 110°ซ 30 นาที

(1) ค่าการนำไฟฟ้า (2) วันที่ 60 ของการเดินระบบ และ \* ค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลาเดินระบบ

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทดลองกับงานวิจัยอื่น

งานวิจัย	ระบบบำบัด	น้ำเสีย	อัตราการสารอินทรีย์ (kg-COD/m <sup>3</sup> -d)	ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดี (%)	การผลิตก๊าซชีวภาพ (L/g- COD Removed)
งานวิจัยนี้	ABR	น้ำเสียโรงงาน ซอสปรุงรส	3.6-4	53	0.02
กัญญารัตน์ ศฤงษ์พงษ์ทิรรม (2550)	ABR	น้ำเสียโรงงานน้ำ ยางชั้น	4.65	64	0.07
ชั้นยพร นงศันวล(2552)	ABR	น้ำกากสำ	6.25	81	0.55
Kusca และ Sponza (2006)	ABR/ CSTR	น้ำเสียสังเคราะห์ p-Nitrophenol	3.16	71	0.27
Zhu และคณะ (2008)	ABR	น้ำเสียจากการ ผลิตถั่วเหลือง แปรรูป	6	97	0.38
Bayrakdar และ คณะ (2009)	ABR	น้ำเสียปนเปื้อน สังกะสีและกรด	-	95	-
Luo และคณะ (2010)	CSTR	กากมัน สำปะหลัง	13	58	-
Wu และคณะ (2010)	ASBR	น้ำเสียโรงเลื่อย สุกร	-	98	0.29

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนกับงานวิจัยอื่นๆ

ประเภทน้ำเสีย	อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน	แบบการเดินระบบ	สภาวะที่ทำการทดลอง	อ้างอิง
น้ำตาลทรายแดงเป็นแหล่งคาร์บอน	7.38 mmol/gCOD removed	ต่อเนื่อง	OLR = 7.70 พีเอชเริ่มต้น 5.5	ภนิตาเกษมโชคช่วง (2550)
ชุดทดลองน้ำเสียปลากระป๋องที่ผ่านความร้อน	113 ml H <sub>2</sub> /gCOD removed	ทีละเท	ต้มหัวเชื้อที่ 100 ° ซ เป็นเวลา 15 นาที และคุมพีเอช 6.5	พิพัฒน์พรอำนวย (2551)
กากน้ำตาลเจือจาง	130 ml/g-MLVSS.d	ต่อเนื่อง	ABR พีเอชขาออก 4.2-4.4	Li และคณะ (2007)
น้ำเสียสังเคราะห์ (sucrose-rich)	74.2 ml/g-VSS.h	ทีละเท	Batch mixed Anaerobic Culture	Wang และคณะ (2008)
ของเสียประเภทกากตะกอนไฮโดรคอก	16.26 ml/g VS	ทีละเท	การหมักไร้อากาศ โดยหัวเชื้อจุลินทรีย์ผ่านหม้อนึ่งความดันที่ 121 ° ซ 1.5 atm 30 นาที	Xiao และ Liu (2009)
Cassava stillage	14 ml/gVS	ต่อเนื่อง	CSTR OLR>10, pH<6	Luo และคณะ (2010)
Sweet sorghum syrup	0.68 mol/molhexose	ทีละเท	ASBR ที่ pH=5 HRT 96 hr.	Saraphirom และ Reungsong (2010)
สลัดจ์จากระบบไร้อากาศ	96 ml/g COD	-	DC Voltage (2 V)	kargi และคณะ (2011)
น้ำเสียโรงงานซอสปรุงรส	5.5 ml/gCOD removed หรือ 0.22 mmol/g COD removed	ต่อเนื่อง	ABR พีเอชเริ่มต้น 5 และปรับหัวเชื้อที่ 110 ° ซ 30 นาที	งานวิจัยนี้
น้ำเสียโรงงานซอสปรุงรส	8.12 ml/gCOD removed หรือ 0.33 mmol/g COD removed	ต่อเนื่อง	ABR พีเอชเริ่มต้น 6 และปรับหัวเชื้อที่ 110 ° ซ 30 นาที	งานวิจัยนี้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานซอสปรุงรส เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อผลิตไฮโดรเจนชีวภาพเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน โดยทำการวิจัยเป็นการทดลองแบบต่อเนื่องภายใต้สภาวะไร้อากาศซึ่งใช้น้ำเสียจริงเดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แผ่นกั้น ไร้อากาศแบบ 3 ห้อง มีการแปรผันค่าพีเอชเริ่มต้นของระบบเป็น 3 ค่า คือ 3-4 5 และ 6 นอกจากนี้ยังศึกษาถึงปัจจัยของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านความร้อนที่ 80 °ซ 110 °ซ กับแบบปกติที่ไม่ปรับสภาพ ผลสรุปดังนี้

5.1.1 สำหรับการทดลองน้ำเสียโรงงานซอสปรุงรสโดยปรับเปลี่ยนค่าพีเอชเริ่มต้น 3 ค่า สรุปได้ว่าที่พีเอช 6 นั้นเหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้ค่าอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 8.12 5.85 และ 4.13 มล./ก. ซีโอดีที่ถูkbำบัด ตามการปรับสภาพที่ 110 °ซ 80 °ซ และไม่ทำการปรับสภาพ ตามลำดับ ขณะที่อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนต่อเวลามีค่าเฉลี่ย 77.31 64.05 และ 60.81 มล./วัน และมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงที่สุดเฉลี่ยร้อยละ 35.08 32.30 และ 40.28 ตามลำดับ

5.1.2 จากผลของหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ผ่านความร้อนที่ 110 °ซ ทำให้ทุกชุดการทดลองของพีเอชเริ่มต้นที่พีเอชน้ำเสียจริง พีเอช 5 และ พีเอช 6 ได้ก๊าซไฮโดรเจนปริมาณสูงร้อยละ 24.6 35.0 และ 33.4 ของปริมาณก๊าซทั้งหมด ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าการปรับสภาพหัวเชื้อที่ 80 °ซ และหัวเชื้อที่ไม่ทำการปรับสภาพ ขณะที่อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน มีค่าเฉลี่ย 6.75 5.50 และ 8.12 มล./ก. ซีโอดีที่ถูkbำบัด เมื่อพีเอชเริ่มต้นเป็นพีเอชน้ำเสียจริง พีเอช 5 และ พีเอช 6 ตามลำดับ

5.1.3 ประสิทธิภาพการเกิดก๊าซไฮโดรเจนในระบบแผ่นกั้น ไร้อากาศนอกจากขึ้นกับการแปรผันพีเอชเริ่มต้นและสภาวะหัวเชื้อจุลินทรีย์ดังกล่าวมาแล้ว ยังขึ้นกับปริมาณสารตัวกลางซึ่งได้แก่กรดไขมันระเหยง่าย (VFAs) เช่น กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก และกรดบิวไทรก ที่เกิดขึ้น ณ สภาวะขั้นตอนการสร้างกรด ซึ่งพบว่าอัตราส่วนระหว่างกรดบิวไทรกต่อกรดอะซิติก เท่ากับ 0.92 เป็นค่าอัตราส่วนสูงสุดจากการทดลองทั้งหมด เมื่อเดินระบบที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับพีเอช 5 และปรับสภาพหัวเชื้อที่ 110 °ซ สอดคล้องกับที่สภาวะนี้ได้ก๊าซไฮโดรเจนปริมาณสูงร้อยละ 35 ของปริมาณก๊าซทั้งหมด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรียในระบบ จำพวกแบคทีเรียกลุ่มเด่นในระบบ เช่น กลุ่มแบคทีเรียที่สอดคล้องกับกระบวนการสร้างกรดเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนหรือไม่ เป็นต้น

5.2.2 ศึกษาผลของสารพิษ เช่น คลอไรด์ ค่าความเค็ม (Salinity) และ ซัลเฟต เป็นต้น ในน้ำเสียโรงงานขอสปรงรสที่มีผลยับยั้งต่อประสิทธิภาพของระบบแผ่นกั้นไร้อากาศในการบำบัดสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพ

5.2.3 ศึกษาผลของระยะเวลาเก็บเก็บผลศาสตร์ จาก 5 วัน เป็น 3 7 10 และ 15 วันว่ามีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนหรือไม่

5.2.4 ทำการทดลองใหม่ที่พีเอชเริ่มต้นเป็น พีเอช 4.5 5.5 และ 6.5 โดยมีการควบคุมพีเอชตลอดระยะเวลาเดินระบบว่ามีผลต่อการผลิตไฮโดรเจนหรือไม่

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- กัญญารัตน์ สฤกษ์พงศ์ทีรฆ. 2550. ผลการปรับพีเอชด้วยเถ้าไม้ยางพาราและอัตราส่วนการสูบน้ำ  
ที่ต่อสมรรถภาพการทำงานของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นในการบำบัดน้ำเสีย  
โรงงานน้ำยางข้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- นพพล รัตนโกวิน. 2551. การเริ่มต้นและการเดินระบบแผ่นกั้นไร้อากาศเพื่อบำบัดน้ำเสียความ  
เข้มข้นสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิพัฒน์ พรอำนวนย. 2551. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพจากน้ำเสียประเภทต่างๆ. วิทยานิพนธ์  
ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย.
- ภนิดา เกษมโชติช่วง. 2550. การผลิตไฮโดรเจนและมีเทนชีวภาพโดยใช้ระบบยูเอเอสบีแบบสอง  
ขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธัญพร นงศ์นวล. 2552. อัตราการหมุนเวียนน้ำทิ้งในระบบแผ่นกั้นไร้ออกซิเจนที่เหมาะสมต่อการ  
ผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรม  
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มันสิน ตันกุลเวศม์. 2546. คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ. เล่มที่ 1.  
กรุงเทพมหานคร: ศูนย์บริการวิชาการแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อรทัย ชวาลภาฤทธิ์. 2545. คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัท  
จุดทองจำกัด.
- อรุณี ศุภสินสาริต. 2551. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงจาก  
ของเสียโรงงานเบียร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.



## ภาษาอังกฤษ

- Abreu, A. A., Danko, A. S., Costa, J. C., Ferreira, E. C., and Alves, M. M. 2009. Inoculum type response to different pHs on biohydrogen production from L-arabinose, a component of hemicellulosic biopolymers. International Journal of Hydrogen Energy 34: 1744-1751.
- Amorim, E. L. C., Barros, A. R., Damianovic, M. H. R. Z., and Silva, E. L. 2009. Anaerobic fluidized bed reactor with expanded clay as support for hydrogen production through dark fermentation of glucose. International Journal of Hydrogen Energy 34: 783-790.
- APHA. 1998. American Public Health Association Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. 20th ed. Washington, DC: APHA and American Water Works Association and Water Environment Federation.
- Archer, D. B., and Kirsop, B. H. 1991. The microbiology and control of anaerobic digestion. Anaerobic Digestion. A Waste Treatment Technology: 49-91.
- Barber, W. P., and Stuckey, D. C. 1997. Start-up strategies for anaerobic baffled reactors treating a synthetic sucrose feed. Proceedings of the 8th International Conference on Anaerobic Digestion 2: 32-39.
- Barber, W. P., and Stuckey, D. C. 1999. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: A review. Water Research 33: 1559-1578.
- Bayrakdar, A., Sahinkaya, E., Gungor, M., Uyanik, S., and Atasoy, A. D. 2009. Performance of sulfidogenic anaerobic baffled reactor (ABR) treating acidic and zinc-containing wastewater. Bioresource Technology 100: 4354-4360.
- Bodkhe, S. Y. 2009. A modified anaerobic baffled reactor for municipal wastewater treatment. Journal of Environmental Management 90(8): 2488-2493.
- Boopathy, R. 1998. Biological treatment of swine waste using anaerobic baffled reactor. Bioresource technology 64: 1-6.
- Boopathy, R., and Tilche, A. 1991. Anaerobic-digestion of high-strength molasses waste-water using a hybrid anaerobic baffled reactor. Water Research 25(7): 785-790.
- Chen, W. M., Tseng, Z. J., Lee, K. S., and Chang, J. S. 2005. Fermentative hydrogen production with *Clostridium butyricum* CGS5 isolated from anaerobic sewage sludge. International Journal of Hydrogen Energy 30: 1063-1070.

- Cheong, D. Y., and Hansen, C. L. 2006. Acidogenesis characteristics of natural, mixed anaerobes converting carbohydrate-rich synthetic wastewater to hydrogen. Process Biochemistry 41: 1736-1745.
- Chong, M. L., Rahim, R. A., Shirai, Y., and Hassan, M. A. 2009. Biohydrogen production by *Clostridium butyricum* EB6 from palm oil mill effluent. International Journal of Hydrogen Energy 34: 764- 771.
- Guo, W. Q., et al. 2008. Biohydrogen production from ethanol-type fermentation of molasses in an expanded granular sludge bed (EGSB) reactor. International Journal of Hydrogen Energy 33: 4981-4988.
- Hwang, J. H., et al. 2009. Effect of pH and sulfate concentration on hydrogen production using anaerobic mixed microflora. International Journal of Hydrogen Energy XXX: 1-9.
- Ji, G. D., Sun, T. H., Ni, J. R., and Tong, J. J. 2009. Anaerobic baffled reactor (ABR) for treating heavy oil produced water with high concentrations of salt and poor nutrient. Bioresource Technology 100: 1108-1114.
- Kapdan, I. K., and Kargi, F. 2006. Bio-hydrogen production from waste materials. Enzyme and Microbial Technology 38: 569-582.
- Kargi, F., Catalkaya, E. C., and Uzuncar, S. 2011. Hydrogen gas production from waste anaerobic sludge by electrohydrolysis: Effects of applied DC voltage. International Journal of Hydrogen Energy 36: 2049-2056.
- Khanal, S. K., Chen, W. H., Li, L., and Sung, S. 2004. Biological hydrogen production: effects of pH and intermediate products. International Journal of Hydrogen Energy 29: 1123-1131.
- Krishna, G. V. T. G., Kumar, P., and Kumar, P. 2009. Treatment of low-strength soluble wastewater using an anaerobic baffled reactor (ABR). Journal of Environmental Management 90(1): 166-176.
- Kuscu, Ö. S., and Sponza, D. T. 2009. Effects of nitrobenzene concentration and hydraulic retention time on the treatment of nitrobenzene in sequential anaerobic baffled reactor (ABR)/continuously stirred tank reactor (CSTR) system. Bioresource Technology 100(7): 2162-2170.
- Lee, D. Y., Li, Y. Y., Oh, Y. K., Kim, M. S., and Noike, T. 2009. Effect of iron concentration on continuous H<sub>2</sub> production using membrane bioreactor. International Journal of Hydrogen Energy 34: 1244- 1252.

- Levin, D. B., Pitt, L., and Love, M. 2004. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. International Journal of Hydrogen Energy 29: 173-185.
- Li, J., et al. 2007. Hydrogen production from diluted molasses by anaerobic hydrogen producing bacteria in an anaerobic baffled reactor (ABR). International Journal of Hydrogen Energy 32: 3274-3283.
- Liu, G., and Shen, J. 2004. Effects of Culture and Medium Conditions on Hydrogen Production from Starch Using Anaerobic Bacteria. Journal of Bioscience and Bioengineering 98: 251-256.
- Luo, G., et al. 2010. Anaerobic treatment of cassava stillage for hydrogen and methane production in continuously stirred tank reactor (CSTR) under high organic loading rate (OLR). International Journal of Hydrogen Energy 35: 11733-11737.
- Marchaim, U. 2007. Biogas processes for sustainable Development [Online]. Available from: [http://www.wcasfmra.org/biogas\\_docs/www.fao.org\\_docrep.pdf](http://www.wcasfmra.org/biogas_docs/www.fao.org_docrep.pdf). [2009, Jun 7]
- Marchaim, U., and Krause, C. 1993. Propionic to acetic acid ratios in overloaded anaerobic digestion. Bioresource Technology 43: 195-203.
- Masse, D. I., and Masse, L. 2001. The effect of temperature on slaughterhouse wastewater treatment in anaerobic sequencing batch reactors. Bioresource Technology 76: 91-98.
- Midilli, A., Ay, M., Dincer, I., and Rosen, M. A. 2005. On hydrogen and hydrogen energy strategies I: current status and needs. Renewable and Sustainable Energy Reviews 9: 255-271.
- Oh, S. E., and Logan, B. E. 2005. Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies. Water Research 39: 4673-4682.
- Pohland, F. 1992. Edited design of anaerobic process for the treatment of industrial and municipal. Waste Water quality management 7: Technomical lancaaster.
- Ren, N., Li, J., Li, B., Wang, Y., and Liu, S. 2006. Biohydrogen production from molasses by anaerobic fermentation with a pilot-scale bioreactor system. International Journal of Hydrogen Energy 31: 2147-2157.
- Sam-soon, P. A. L. N. S., Loewenthal, R. E., Wentzel, M. C., and Marais, G. V. R. 1990. Growth of biopellets on glucose in Upflow Anaerobic Sludge Bed (UASB) System. Water South African 16(13): 151-164.

- Shida, G. M., et al. 2009. Long-term stability of hydrogen and organic acids production in an anaerobic fluidized-bed reactor using heat treated anaerobic sludge inoculum. International Journal of Hydrogen Energy 34: 3679-3688.
- Speece, R. E. 1996. Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters. Nashville, Tennessee: Archae Press.
- Saraphirom, P., and Reungsang, A. 2010. Biological hydrogen production from sweet sorghum syrup by mixed cultures using an anaerobic sequencing batch reactor (ASBR). International Journal of Hydrogen Energy xxx : 1-9.
- Tang, G. L., et al. 2008. Biohydrogen Production from Cattle Wastewater by Enriched Anaerobic Mixed Consortia: Influence of Fermentation Temperature and pH. Journal of Bioscience and Bioengineering 106(1): 80-87.
- The Fuel Cell Engine Company, Federal Transit Administration, College of the Deser 1958, Advanced Transportation Technology, Sunline Transit agency, AC Transit, Valley Transportation Authority and NAC [Online]. Available from: [http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech\\_validation/pdfs/fcm01r0.pdf](http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm01r0.pdf). [2009, Feb 25]
- Ting, C. H., and Lee, D. J. 2007. Production of hydrogen and methane from wastewater sludge using anaerobic fermentation. International Journal of Hydrogen Energy 32: 677-682.
- Van Ginkel, S. W., Oh, S. E., and Logan, B. E. 2005. Biohydrogen gas production from food processing and domestic wastewaters. International Journal of Hydrogen Energy 30: 1535-1542.
- Wang, J., Huang, Y., and Zhao, X. 2004. Performance and characteristics of an anaerobic baffled reactor. Bioresource technology 93: 205-208.
- Wang, Y., et al. 2008. Biohydrogen production with mixed anaerobic cultures in the presence of high-concentration acetate. International Journal of Hydrogen Energy 33: 1164-1171.
- Water Environment Research Foundation (WERF). 1999. Research needs to optimize wastewater resource utilization. Project 98-CTS-1: 4-5.
- Wu, X., Yao, W., and Zhu, J. 2010. Effect of pH on continuous biohydrogen production from liquid swine manure with glucose supplement using an anaerobic sequencing batch reactor. International Journal of Hydrogen Energy 35: 6592-6599.
- Xiao, B., and Liu, J. 2009. Biological hydrogen production from sterilized sewage sludge by anaerobic self-fermentation. Journal of Hazardous Materials 168: 163-167.

- Yang, P., Zhang, R., McGarvey, J. A., and Benemann, J. R. 2007. Biohydrogen production from cheese processing wastewater by anaerobic fermentation using mixed microbial communities. International Journal of Hydrogen Energy 32: 4761-4771.
- Younesi, H., Najafpour, G., Ismail, K. S. K., Mohamed, A. R., and Kamaruddin, A.H. 2008. Biohydrogen production in a continuous stirred tank bioreactor from synthesis gas by anaerobic photosynthetic bacterium: *Rhodospirillum rubrum*. Bioresource Technology 99: 2612-2619.
- Zhang, T., Liu, H., and Fang, H .H. P. 2003. Biohydrogen production from starch in wastewater under thermophilic condition. Journal of Environmental Management 69: 149-156.
- Zhao, H., et al. 2009. Cloning and knockout of formate hydrogen lyase and H<sub>2</sub>-uptake hydrogenase genes in *Enterobacter aerogenes* for enhanced hydrogen production. International Journal of Hydrogen Energy 34: 186-194.
- Zhu, G. F., li, J. Z., Wu, P., Jin, H. Z., and Wang, Z. 2008. The performance and phase separated characteristics of an anaerobic baffled reactor treating soybean protein processing wastewater. Bioresource Technology 99: 8027-8033.

ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก**  
**ผลการทดลอง**

ตารางที่ ก-1 ผลการวิเคราะห์ซีโอดีและประสิทธิภาพการบำบัดที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับพีเอช  
น้ำเสียจริงตามการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซีโอดีเข้าระบบ (มก./ล.)	ซีโอดีออกจากระบบ (มก./ล.)			ร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัด		
			ABR ก	ABR ข	ABR ค	ABR ก	ABR ข	ABR ค
1	23/6/2553	5503	3737	4087	3641	32.09	25.74	33.84
2	24/6/2553	5503	2044	3492	3864	62.86	36.54	29.79
4	26/6/2553	5503	3055	4161	3046	44.49	24.39	44.64
5	27/6/2553	5503	3216	3567	3062	41.56	35.19	44.36
6	28/6/2553	5503	3899	3476	2979	29.15	36.84	45.86
7	29/6/2553	5278	2760	2731	3890	47.71	48.26	26.30
8	30/6/2553	5278	2883	3145	2534	45.37	40.42	51.99
10	2/7/2553	5278	2842	3167	3378	46.15	39.99	35.99
11	3/7/2553	5278	2735	3167	3026	48.18	39.99	42.66
12	4/7/2553	5278	2990	2745	2956	43.34	47.99	43.99
14	6/7/2553	5000	2990	985	2252	40.19	80.29	54.96
15	7/7/2553	5000	2181	2041	2182	56.38	59.18	56.36
16	8/7/2553	5000	2990	2463	2248	40.19	50.73	55.05
17	9/7/2553	5000	2848	1885	1958	43.05	62.30	60.85
18	10/7/2553	5000	4509	2030	2248	9.82	59.40	55.05
19	11/7/2553	5186	3636	2286	3195	29.88	55.93	38.38
21	13/7/2553	5186	4073	3227	4079	21.47	37.78	21.34
22	14/7/2553	5186	3880	4303	3603	25.18	17.04	30.52
23	15/7/2553	5186	4886	5011	4011	5.78	3.37	22.65
24	16/7/2553	10909	4599	5648	4759	57.84	48.22	56.37
25	17/7/2553	10909	5461	6659	4419	49.94	38.96	59.49
26	18/7/2553	10909	3449	7645	6119	68.38	29.92	43.91
28	20/7/2553	10909	3927	5389	5223	64.00	50.60	52.12
29	21/7/2553	10036	3345	5467	5098	66.67	45.53	49.20
30	22/7/2553	10036	7273	5881	5345	27.53	41.40	46.74
31	23/7/2553	10036	3200	6234	5467	68.11	37.88	45.53
32	24/7/2553	10036	3408	6579	6275	66.04	34.45	37.48
33	25/7/2553	10036	4495	6876	5784	55.21	31.48	42.37

ตารางที่ ก-1 ผลการวิเคราะห์ซีโอดีและประสิทธิภาพการบำบัดที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับพีเอช  
 น้ำเสียจริงตามการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ (ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซีโอดีเข้าระบบ (มก./ล.)	ซีโอดีออกจากระบบ (มก./ล.)			ร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัด		
			ABR ก	ABR ข	ABR ค	ABR ก	ABR ข	ABR ค
35	27/7/2553	12237	6236	6955	6879	49.04	43.17	43.79
36	28/7/2553	12237	6165	7154	7609	49.62	41.54	37.82
37	29/7/2553	12237	6439	7287	7934	47.38	40.45	35.16
38	30/7/2553	12237	7317	8654	8197	40.21	29.28	33.01
39	31/7/2553	12237	7683	7986	7953	37.22	34.74	35.01
40	1/8/2553	9671	6220	8599	8975	35.69	11.09	7.20
42	3/8/2553	9671	6085	8581	8976	37.09	11.27	7.19
43	4/8/2553	9671	8383	9125	9265	13.32	5.65	4.20
44	5/8/2553	17560	13280	15769	14538	24.38	10.20	17.21
45	6/8/2553	17560	14110	14987	13960	19.65	14.65	20.50
46	7/8/2553	17560	12588	13966	13065	28.31	20.47	25.60
47	8/8/2553	18534	12780	13984	14267	31.04	24.55	23.02
49	10/8/2553	18534	13969	13124	14895	24.63	29.19	19.63
50	11/8/2553	18534	14266	14539	15908	23.03	21.56	14.17
51	12/8/2553	18000	13375	15489	15673	25.70	13.95	12.93
52	13/8/2553	18000	13820	15367	14980	23.22	14.63	16.78
53	14/8/2553	18313	16495	14988	14765	9.93	18.16	19.37
54	15/8/2553	18313	14069	11624	14982	23.17	36.52	18.19
56	17/8/2553	18313	12248	12827	11123	33.12	29.96	39.26
57	18/8/2553	16785	10698	12025	12125	36.26	28.36	27.76
58	19/8/2553	16785	10557	13236	8618	37.10	21.14	48.66
59	20/8/2553	16785	10416	13467	12927	37.94	19.77	22.99
60	21/8/2553	18000	12106	13328	12727	32.75	25.96	29.30



ตารางที่ ก-2 ผลการวิเคราะห์ซีโอดีและประสิทธิภาพการบำบัดที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับพีเอช 5  
ตามการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซีโอดีเข้าระบบ (มก./ล.)	ซีโอดีออกจากระบบ (มก./ล.)			ร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัด		
			ABR ก	ABR ข	ABR ค	ABR ก	ABR ข	ABR ค
1	7/9/2553	5187	4045	1624	1714	22.02	68.69	66.95
2	8/9/2553	5187	4672	1534	1263	9.93	70.43	75.65
4	10/9/2553	5187	3879	361	1722	25.22	93.04	66.81
5	11/9/2553	5357	1804.51	1722	2436	66.31	67.86	54.53
6	12/9/2553	5357	1624.06	1881	3493	69.68	64.89	34.80
7	13/9/2553	5357	1631.58	2507	3403	69.54	53.19	36.48
8	14/9/2553	4967	1180.45	3134	4567	76.23	36.90	8.05
10	16/9/2553	4967	1447.76	4639	4226	70.85	6.60	14.91
11	17/9/2553	4967	1358.21	1238	3798	72.66	75.08	23.54
12	18/9/2553	4967	1985.07	4124	3987	60.03	16.97	19.73
14	20/9/2553	4851	4126.07	4043	4238	14.94	16.66	12.64
15	21/9/2553	4851	2888.25	3764	3876	40.46	22.41	20.10
16	22/9/2553	4851	2750.72	3655	3765	43.30	24.65	22.39
17	23/9/2553	10477	3575.93	3289	3590	65.87	68.61	65.73
18	24/9/2553	10477	4897	2987	3503	53.26	71.49	66.56
19	25/9/2553	10477	5890	5370	5527	43.78	48.74	47.25
21	27/9/2553	10477	6345	5539	5479	39.44	47.13	47.70
22	28/9/2553	9582	6578	6327	9428	31.35	33.97	1.61
23	29/9/2553	9582	6709	7702	8252	29.98	19.62	13.88
24	30/9/2553	9582	3768	5916	5808	60.68	38.26	39.39
25	1/10/2553	9582	3598	6408	6298	62.45	33.12	34.27
26	2/10/2553	9804	3301	6498	6792	66.33	33.72	30.72
28	4/10/2553	9804	4234	7105	7349	56.81	27.53	25.04
29	5/10/2553	9804	4186	6744	7653	57.30	31.21	21.94
30	6/10/2553	10485	4129	6703	7232	60.62	36.07	31.03
31	7/10/2553	10485	4347	6518	6514	58.54	37.84	37.87
32	8/10/2553	10485	4456	5876	6254	57.50	43.96	40.35
33	9/10/2553	9473	6478	5553	5876	31.62	41.38	37.97

ตารางที่ ก-2 ผลการวิเคราะห์ซีโอดีและประสิทธิภาพการบำบัดที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับพีเอช 5  
ตามการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ (ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซีโอดีเข้าระบบ (มก./ล.)	ซีโอดีออกจากระบบ (มก./ล.)			ร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัด		
			ABR ก	ABR ข	ABR ค	ABR ก	ABR ข	ABR ค
35	11/10/2553	9473	6376	5427	5904	32.69	42.71	37.68
36	12/10/2553	9473	6145	5597	5896	35.13	40.92	37.76
37	13/10/2553	18176	7548	5604	5981	58.47	69.17	67.09
38	14/10/2553	18176	9657	5973	5990	46.87	67.14	67.04
39	15/10/2553	18176	11986	5848	6214	34.06	67.83	65.81
40	16/10/2553	18176	12785	10348	9972	29.66	43.07	45.14
42	18/10/2553	17931	13457	16965	7614	24.95	5.39	57.54
43	19/10/2553	17931	13788	15265	9458	23.11	14.87	47.25
44	20/10/2553	17931	13987	15860	13674	22.00	11.55	23.74
45	21/10/2553	19984	15189	11045	16235	23.99	44.73	18.76
46	22/10/2553	19984	15961	12261	17974	20.13	38.65	10.06
47	23/10/2553	19984	13854	12897	16786	30.67	35.46	16.00
49	25/10/2553	19984	13029	13064	12653	34.80	34.63	36.68
50	26/10/2553	21034	12420	13987	13086	40.95	33.50	37.79
51	27/10/2553	21034	12358	14567	13901	41.25	30.75	33.91
52	28/10/2553	21034	11945	14882	14034	43.21	29.25	33.28
53	29/10/2553	20152	10348	14208	14347	48.65	29.50	28.81
54	30/10/2553	20152	10785	13784	14879	46.48	31.60	26.17
56	1/11/2553	20152	11309	13949	13128	43.88	30.78	34.85
57	2/11/2553	19837	11987	12855	14632	39.57	35.20	26.24
58	3/11/2553	19837	9026	12718	10393	54.50	35.89	47.61
59	4/11/2553	20000	9573	14222	14496	52.14	28.89	27.52
60	5/11/2553	20000	11077	14359	13675	44.62	28.21	31.62

ตารางที่ ก-3 ผลการวิเคราะห์ซีไอดีและประสิทธิภาพการบำบัดที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับพีเอช 6  
ตามการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซีไอดีเข้าระบบ (มก./ล.)	ซีไอดีออกจากระบบ (มก./ล.)			ร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัด		
			ABR ก	ABR ข	ABR ค	ABR ก	ABR ข	ABR ค
1	18/11/2553	6389	5387	5417	5291	15.68	15.22	17.18
2	19/11/2553	6389	3598	5042	5164	43.68	21.08	19.17
4	21/11/2553	6389	4198	4798	5029	34.29	24.90	21.28
5	22/11/2553	7138	3015	3354	4942	57.76	53.01	30.77
6	23/11/2553	7138	3471	3519	4518	51.37	50.70	36.70
7	24/11/2553	7138	2624	3218	3891	63.24	54.91	45.49
8	25/11/2553	7138	1919	2876	3061	73.12	59.71	57.12
10	27/11/2553	6816	1975	2654	2442	71.03	61.06	64.17
11	28/11/2553	6816	2440	2731	2075	64.21	59.93	69.55
12	29/11/2553	6816	2969	2554	2497	56.44	62.53	63.36
14	1/12/2553	6816	3013	2978	2901	55.80	56.31	57.44
15	2/12/2553	7024	2480	3042	2988	64.69	56.69	57.47
16	3/12/2553	7024	3139	3193	3401	55.31	54.54	51.58
17	4/12/2553	7024	3217	3369	3310	54.19	52.04	52.87
18	5/12/2553	7024	3395	3946	3566	51.66	43.83	49.23
19	6/12/2553	6942	4659	3960	4196	32.89	42.96	39.55
21	8/12/2553	6942	4985	4498	5043	28.19	35.20	27.35
22	9/12/2553	6942	6386	5699	6148	8.01	17.91	11.44
23	10/12/2553	13200	7861	6975	6942	40.44	47.16	47.41
24	11/12/2553	13200	9817	8792	9288	25.63	33.39	29.64
25	12/12/2553	13200	9893	10341	11987	25.05	21.66	9.19
26	13/12/2553	12856	10286	11947	12134	19.99	7.07	5.62
28	15/12/2553	12856	11322	12083	12469	11.93	6.01	3.01
29	16/12/2553	12856	9540	11900	11967	25.80	7.43	6.91
30	17/12/2553	13608	9754	11873	12095	28.32	12.75	11.12
31	18/12/2553	13608	8702	11094	11882	36.05	18.47	12.69
32	19/12/2553	13608	8648	9198	11973	36.45	32.41	12.01
33	20/12/2553	13671	7104	9971	11840	48.04	27.06	13.39

ตารางที่ ก-3 ผลการวิเคราะห์ซีโอดีและประสิทธิภาพการบำบัดที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับพีเอช 6  
ตามการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ (ต่อ)

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ซีโอดีเข้าระบบ (มก./ล.)	ซีโอดีออกจากระบบ (มก./ล.)			ร้อยละประสิทธิภาพในการบำบัด		
			ABR ก	ABR ข	ABR ค	ABR ก	ABR ข	ABR ค
35	22/12/2553	13671	6954	9701	9699	49.13	29.04	29.05
36	23/12/2553	13671	6333	8149	9854	53.68	40.39	27.92
37	24/12/2553	13671	6026	8219	9937	55.92	39.88	27.31
38	25/12/2553	19020	6139	7105	11630	67.72	62.64	38.86
39	26/12/2553	19020	12837	10457	10543	32.51	45.02	44.57
40	27/12/2553	19020	14975	15912	11996	21.27	16.34	36.93
42	29/12/2553	20350	15998	16099	16954	21.39	20.89	16.69
43	30/12/2553	20350	16002	16819	18095	21.37	17.35	11.08
44	31/12/2553	20350	16734	17961	17368	17.77	11.74	14.66
45	1/1/2554	19614	17350	17419	16597	11.54	11.19	15.38
46	2/1/2554	19614	16438	16008	17211	16.19	18.38	12.25
47	3/1/2554	19614	15985	17499	16782	18.50	10.78	14.44
49	5/1/2554	19614	14399	15433	16003	26.59	21.31	18.41
50	6/1/2554	19973	11525	11525	10305	42.29	42.29	48.40
51	7/1/2554	19973	7864	10712	8678	60.62	46.37	56.55
52	8/1/2554	19973	8814	10983	9492	55.87	45.01	52.48
53	9/1/2554	20000	6237	10305	8949	68.81	48.47	55.25
54	10/1/2554	21031	7051	9627	11932	66.47	54.22	43.26
56	12/1/2554	21031	7186	10305	9763	65.83	51.00	53.58
57	13/1/2554	21031	8271	11661	9898	60.67	44.55	52.93
58	14/1/2554	20000	9356	11797	10983	53.22	41.02	45.08
59	15/1/2554	20000	9627	13288	12881	51.86	33.56	35.59
60	16/1/2554	20000	9492	13153	12203	52.54	34.24	38.98

ตารางที่ ก-4 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชและความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (โออาร์พี) ที่พีเอช  
เริ่มต้นเท่ากับพีเอชน้ำเสียจริงตามการปรับสภาพหัวเชื้อจุลชีพขณะเดินระบบ

วันที่	วัน/เดือน/ปี	พีเอช	พีเอชออกจากระบบ			โออาร์พีออกจากระบบ		
		เข้าระบบ	ABR ก	ABR ข	ABR ค	ABR ก	ABR ข	ABR ค
3	25/7/2553	3.52	4.50	4.95	4.90	-125.2	-115.2	-103.8
5	27/7/2553	3.71	4.36	4.56	4.76	-94.6	-113.4	-92.9
8	30/7/2553	3.65	4.40	4.70	4.63	-121.9	-105.6	-98.1
10	1/8/2553	3.88	4.47	4.54	4.20	-123.7	-103.7	-107.8
14	5/8/2553	3.64	4.35	4.49	4.50	-111.6	-95.8	-105.3
17	8/8/2553	3.94	4.10	4.36	3.94	-106.8	-110.0	-111.6
21	12/8/2553	4.06	3.91	4.15	4.13	-117.6	-97.7	-116.2
24	15/8/2553	3.91	4.21	4.24	4.27	-119.5	-119.3	-109.1
28	19/8/2553	3.83	4.19	4.15	4.22	-121.4	-114.1	-110.7
30	21/8/2553	3.74	4.12	4.01	3.97	-120.7	-108.4	-106.4

ตารางที่ ก-5 ผลการวิเคราะห์ค่าพีเอชและความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (โออาร์พี) ที่พีเอช  
เริ่มต้นเท่ากับพีเอช 5 ตามการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ขณะเดินระบบ

วันที่	วัน/เดือน/ปี	พีเอช	พีเอชออกจากระบบ			โออาร์พีออกจากระบบ		
		เข้าระบบ	ABR ก	ABR ข	ABR ค	ABR ก	ABR ข	ABR ค
3	9/10/2553	5	5.47	5.32	5.60	-169.1	-154.9	-144.5
5	11/10/2553	5	5.63	5.60	5.59	-159.2	-150.3	-158.8
8	14/10/2553	5	5.57	5.61	5.50	-171.5	-155.7	-164.6
10	16/10/2553	5	5.43	5.40	5.00	-165.8	-159.8	-151.5
14	20/10/2553	5	5.19	5.05	4.90	-178.3	-163.7	-155.9
17	23/10/2553	5	4.86	4.80	4.72	-171.3	-169.2	-161.7
21	27/10/2553	5	4.83	4.66	4.60	-151.6	-153.3	-168.1
24	30/10/2553	5	4.50	4.48	4.39	-179.3	-164.8	-170.1
28	3/11/2553	5	4.64	4.57	4.50	-173.6	-161.2	-154.2
30	5/11/2553	5	4.87	4.71	4.50	-176.9	-167.8	-152.2

ตารางที่ ก-6 ผลการวิเคราะห์ค่าฟิเชและความต่างศักย์ออกซิเดชัน-รีดักชัน (โออาร์พี) ที่ฟิเช  
เริ่มต้นเท่ากับฟิเช 6 ตามการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ขณะเดินระบบ

วันที่	วัน/เดือน/ปี	ฟิเช	ฟิเชออกจากระบบ			โออาร์พีออกจากระบบ		
		เข้าระบบ	ABR ก	ABR ข	ABR ค	ABR ก	ABR ข	ABR ค
3	20/12/2553	6	5.85	5.98	5.86	-182.7	-170.2	-171.6
6	23/12/2553	6	5.74	5.39	5.27	-178.4	-167.0	-166.1
8	25/12/2553	6	5.61	5.4	5.3	-196.4	-175.8	-171.9
10	27/12/2553	6	5.67	5.23	5.34	-201.6	-179.3	-178.0
14	31/12/2553	6	5.58	5.44	5.29	-213.8	-164.0	-167.6
17	3/1/2554	6	5.5	5.65	5.32	-199.2	-175.1	-169.5
21	7/1/2554	6	5.8	5.41	5.28	-189.1	-182.4	-172.7
24	10/1/2554	6	5.3	5.15	5.04	-216.3	-177.0	-179.3
28	14/1/2554	6	5.45	5.26	5.21	-197.4	-180.1	-181.5
30	16/1/2554	6	5.58	5.5	5.65	-199.5	-170.5	-180.5

ตารางที่ ก-7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่พีเอชน้ำเสียจริงเมื่อไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์

วันที่	Biogas (ml/day)	biogas production [ml/g-COD removed]	mol of Biogas	mmol of H <sub>2</sub>	ml H <sub>2</sub> /g-COD removed
30	210	31.67	0.0084	1.44	5.3831
31	220	13.41	0.0088	1.50	2.2796
32	220	13.83	0.0088	1.50	2.3511
33	220	16.54	0.0088	1.50	2.8126
35	230	15.97	0.0093	1.57	2.7147
36	220	15.10	0.0088	1.50	2.5665
37	200	14.37	0.0080	1.37	2.4434
38	210	17.78	0.0084	1.44	3.0234
39	250	22.87	0.0101	1.71	3.8885
40	220	26.56	0.0088	1.50	4.5152
42	240	27.88	0.0097	1.64	4.7400
43	260	84.12	0.0105	1.78	14.2997
44	210	20.44	0.0084	1.44	3.4751
45	220	26.57	0.0088	1.50	4.5163
46	230	19.27	0.0093	1.57	3.2766
47	260	18.83	0.0105	1.78	3.2008
49	230	20.99	0.0093	1.57	3.5689
50	220	21.48	0.0088	1.50	3.6514
51	230	20.72	0.0093	1.57	3.5222
52	210	20.94	0.0084	1.44	3.5590
53	210	48.14	0.0084	1.44	8.1837
54	250	24.54	0.0101	1.71	4.1725
56	250	17.18	0.0101	1.71	2.9199
57	240	16.43	0.0097	1.64	2.7928
58	250	16.73	0.0101	1.71	2.8434
59	230	15.05	0.0093	1.57	2.5581
60	230	16.26	0.0093	1.57	2.7639



ตารางที่ ก-8 ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่พีเอชน้ำเสียจริงเมื่อปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ 80° ซ

วันที่	Biogas (ml/day)	biogas production [ml/g-COD removed]	mol of Biogas	mmol of H <sub>2</sub>	ml H <sub>2</sub> /g-COD removed
30	120	12.03	0.0048	0.93	2.3107
31	130	14.25	0.0052	1.00	2.7355
32	110	13.26	0.0044	0.85	2.5454
33	130	17.14	0.0052	1.00	3.2914
35	120	9.47	0.0048	0.93	1.8173
36	140	11.48	0.0056	1.08	2.2034
37	140	11.78	0.0056	1.08	2.2626
38	150	17.44	0.0060	1.16	3.3491
39	140	13.72	0.0056	1.08	2.6349
40	130	50.51	0.0052	1.00	9.6985
42	180	68.83	0.0072	1.39	13.2149
43	150	114.42	0.0060	1.16	21.9684
44	220	51.18	0.0088	1.70	9.8257
45	200	32.39	0.0080	1.54	6.2192
46	200	23.18	0.0080	1.54	4.4515
47	240	21.98	0.0097	1.85	4.2196
49	250	19.26	0.0101	1.93	3.6970
50	230	23.99	0.0093	1.78	4.6057
51	220	36.51	0.0088	1.70	7.0099
52	220	34.82	0.0088	1.70	6.6847
53	210	26.31	0.0084	1.62	5.0524
54	190	11.84	0.0076	1.47	2.2725
56	200	15.19	0.0080	1.54	2.9164
57	210	18.38	0.0084	1.62	3.5295
58	220	25.83	0.0088	1.70	4.9595
59	210	26.37	0.0084	1.62	5.0635
60	200	17.84	0.0080	1.54	3.4245

ตารางที่ ก-9 ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่พีเอชน้ำเสียจริงเมื่อปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่

110° ซ

วันที่	Biogas (ml/day)	biogas production [ml/g-COD removed]	mol of Biogas	mmol of H <sub>2</sub>	ml H <sub>2</sub> /g-COD removed
30	150	13.32	0.0060	1.48	3.2776
31	150	13.68	0.0060	1.48	3.3651
32	140	15.51	0.0056	1.39	3.8155
33	160	15.68	0.0064	1.58	3.8570
35	170	13.22	0.0068	1.68	3.2521
36	160	14.41	0.0064	1.58	3.5436
37	170	16.46	0.0068	1.68	4.0495
38	170	17.53	0.0068	1.68	4.3131
39	130	12.64	0.0052	1.29	3.1104
40	100	59.87	0.0040	0.99	14.7270
42	140	83.93	0.0056	1.39	20.6475
43	100	102.63	0.0040	0.99	25.2463
44	200	27.58	0.0080	1.98	6.7836
45	190	21.99	0.0076	1.88	5.4097
46	200	18.54	0.0080	1.98	4.5606
47	240	23.44	0.0097	2.37	5.7652
49	250	28.63	0.0101	2.47	7.0418
50	230	36.49	0.0093	2.28	8.9775
51	220	39.39	0.0088	2.18	9.6906
52	250	34.49	0.0101	2.47	8.4851
53	210	24.66	0.0084	2.08	6.0668
54	200	25.02	0.0080	1.98	6.1543
56	200	11.59	0.0080	1.98	2.8513
57	210	18.78	0.0084	2.08	4.6194
58	220	11.22	0.0088	2.18	2.7611
59	210	22.68	0.0084	2.08	5.5792
60	220	17.38	0.0088	2.18	4.2761

ตารางที่ ก-10 ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่พีเอช 5 เมื่อไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์

วันที่	Biogas (ml/day)	biogas production [ml/g-COD removed]	mol of Biogas	mmol of H <sub>2</sub>	ml H <sub>2</sub> /g-COD removed
30	270	17.70	0.0109	2.86	4.6551
31	280	19.01	0.0113	2.96	4.9989
32	270	18.66	0.0109	2.86	4.9075
33	250	34.78	0.0101	2.64	9.1472
35	260	34.98	0.0105	2.75	9.1998
36	220	27.54	0.0088	2.33	7.2441
37	210	8.23	0.0084	2.22	2.1653
38	240	11.74	0.0097	2.54	3.0872
39	230	15.48	0.0093	2.43	4.0718
40	210	16.23	0.0084	2.22	4.2687
42	190	17.69	0.0076	2.01	4.6537
43	190	19.11	0.0076	2.01	5.0255
44	210	22.19	0.0084	2.22	5.8348
45	200	14.38	0.0080	2.12	3.7820
46	220	15.22	0.0088	2.33	4.0027
47	230	15.63	0.0093	2.43	4.1116
49	250	14.98	0.0101	2.64	3.9390
50	250	12.09	0.0101	2.64	3.1804
51	260	12.49	0.0105	2.75	3.2840
52	240	11.00	0.0097	2.54	2.8936
53	250	10.62	0.0101	2.64	2.7944
54	260	11.57	0.0105	2.75	3.0417
56	270	12.72	0.0109	2.86	3.3459
57	280	14.86	0.0113	2.96	3.9088
58	290	11.18	0.0117	3.07	2.9394
59	260	10.39	0.0105	2.75	2.7324
60	270	12.61	0.0109	2.86	3.3158

ตารางที่ ก-11 ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่พีเอช 5 เมื่อปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ 80° ซ

วันที่	Biogas (ml/day)	biogas production [ml/g-COD removed]	mol of Biogas	mmol of H <sub>2</sub>	ml H <sub>2</sub> /g-COD removed
30	140	15.42	0.0056	1.75	4.7814
31	130	13.65	0.0052	1.62	4.2328
32	220	19.89	0.0088	2.74	6.1655
33	200	21.26	0.0080	2.49	6.5901
35	210	21.63	0.0084	2.62	6.7042
36	220	23.65	0.0088	2.74	7.3314
37	230	7.62	0.0093	2.87	2.3631
38	210	7.17	0.0084	2.62	2.2228
39	220	7.44	0.0088	2.74	2.3051
40	190	6.69	0.0076	2.37	2.0749
42	210	8.78	0.0084	2.62	2.7218
43	220	10.58	0.0088	2.74	3.2791
44	210	14.41	0.0084	2.62	4.4680
45	230	10.72	0.0093	2.87	3.3235
46	230	12.41	0.0093	2.87	3.8467
47	240	14.11	0.0097	2.99	4.3742
49	270	16.26	0.0109	3.37	5.0397
50	230	13.60	0.0093	2.87	4.2157
51	240	15.46	0.0097	2.99	4.7936
52	260	17.61	0.0105	3.24	5.4589
53	260	18.23	0.0105	3.24	5.6500
54	240	15.70	0.0097	2.99	4.8681
56	230	15.45	0.0093	2.87	4.7891
57	240	14.32	0.0097	2.99	4.4398
58	240	14.05	0.0097	2.99	4.3545
59	230	16.59	0.0093	2.87	5.1418
60	220	16.25	0.0088	2.74	5.0375

ตารางที่ ก-12 ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่พีเอช 5 เมื่อปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ 110° ซ

วันที่	Biogas (ml/day)	biogas production [ml/g-COD removed]	mol of Biogas	mmol of H <sub>2</sub>	ml H <sub>2</sub> /g-COD removed
30	140	17.93	0.0056	1.97	6.2763
31	130	13.64	0.0052	1.83	4.7742
32	220	21.67	0.0088	3.10	7.5829
33	240	27.80	0.0097	3.38	9.7303
35	230	26.85	0.0093	3.24	9.3981
36	220	25.63	0.0088	3.10	8.9693
37	230	7.86	0.0093	3.24	2.7504
38	220	7.52	0.0088	3.10	2.6328
39	230	8.01	0.0093	3.24	2.8040
40	200	7.44	0.0080	2.82	2.6032
42	210	8.48	0.0084	2.96	2.9684
43	240	11.80	0.0097	3.38	4.1308
44	230	11.61	0.0093	3.24	4.0622
45	260	12.38	0.0105	3.66	4.3338
46	230	13.67	0.0093	3.24	4.7848
47	240	13.89	0.0097	3.38	4.8625
49	270	15.35	0.0109	3.80	5.3710
50	230	12.06	0.0093	3.24	4.2201
51	240	14.02	0.0097	3.38	4.9068
52	260	15.48	0.0105	3.66	5.4167
53	260	18.66	0.0105	3.66	6.5317
54	250	19.75	0.0101	3.52	6.9142
56	280	16.61	0.0113	3.94	5.8136
57	270	21.62	0.0109	3.80	7.5655
58	275	12.13	0.0111	3.87	4.2466
59	280	21.20	0.0113	3.94	7.4185
60	280	18.45	0.0113	3.94	6.4561

ตารางที่ ก-13 ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่พีเอช 6 เมื่อไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์

วันที่	Biogas (ml/day)	biogas production [ml/g-COD removed]	mol of Biogas	mmol of H <sub>2</sub>	ml H <sub>2</sub> /g-COD removed
30	280	30.27	0.0113	2.69	7.2352
31	290	24.63	0.0117	2.79	5.8871
32	290	24.36	0.0117	2.79	5.8227
33	280	17.76	0.0113	2.69	4.2458
35	260	16.13	0.0105	2.50	3.8548
36	280	15.90	0.0113	2.69	3.7997
37	240	13.08	0.0097	2.31	3.1263
38	240	7.76	0.0097	2.31	1.8554
39	250	16.85	0.0101	2.40	4.0263
40	210	21.63	0.0084	2.02	5.1704
42	200	19.15	0.0080	1.92	4.5763
43	240	23.00	0.0097	2.31	5.4970
44	230	26.50	0.0093	2.21	6.3343
45	240	44.16	0.0097	2.31	10.5554
46	210	27.55	0.0084	2.02	6.5847
47	200	22.96	0.0080	1.92	5.4877
49	210	16.78	0.0084	2.02	4.0103
50	250	12.33	0.0101	2.40	2.9471
51	270	9.29	0.0109	2.60	2.2205
52	260	9.71	0.0105	2.50	2.3202
53	270	8.17	0.0109	2.60	1.9536
54	270	8.05	0.0109	2.60	1.9233
56	280	8.43	0.0113	2.69	2.0140
57	270	8.82	0.0109	2.60	2.1072
58	280	10.96	0.0113	2.69	2.6196
59	290	11.65	0.0117	2.79	2.7841
60	280	11.10	0.0113	2.69	2.6534

ตารางที่ ก-14 ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่พีเอช 6 เมื่อปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ 80° ซ

วันที่	Biogas (ml/day)	biogas production [ml/g-COD removed]	mol of Biogas	mmol of H <sub>2</sub>	ml H <sub>2</sub> /g-COD removed
30	160	38.42	0.0064	1.83	10.9493
31	180	29.83	0.0072	2.06	8.5029
32	210	19.84	0.0084	2.41	5.6543
33	220	24.78	0.0088	2.52	7.0616
35	210	22.04	0.0084	2.41	6.2816
36	210	15.85	0.0084	2.41	4.5164
37	230	17.58	0.0093	2.64	5.0096
38	230	8.04	0.0093	2.64	2.2923
39	200	9.73	0.0080	2.29	2.7737
40	180	24.13	0.0072	2.06	6.8767
42	180	17.64	0.0072	2.06	5.0278
43	190	22.42	0.0076	2.18	6.3905
44	180	31.40	0.0072	2.06	8.9479
45	240	45.56	0.0097	2.75	12.9860
46	250	28.89	0.0101	2.87	8.2336
47	268	52.79	0.0108	3.07	15.0455
49	270	26.91	0.0109	3.10	7.6694
50	250	12.33	0.0101	2.87	3.5143
51	210	9.45	0.0084	2.41	2.6927
52	230	10.66	0.0093	2.64	3.0381
53	240	10.31	0.0097	2.75	2.9397
54	250	9.13	0.0101	2.87	2.6033
56	250	9.71	0.0101	2.87	2.7678
57	240	10.67	0.0097	2.75	3.0416
58	260	13.21	0.0105	2.98	3.7637
59	270	16.76	0.0109	3.10	4.7770
60	260	15.82	0.0105	2.98	4.5090

ตารางที่ ก-15 ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่พีเอช 6 เมื่อปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ 110° ซ

วันที่	Biogas (ml/day)	biogas production [ml/g-COD removed]	mol of Biogas	mmol of H <sub>2</sub>	ml H <sub>2</sub> /g-COD removed
30	150	41.30	0.0060	2.02	13.7955
31	150	36.20	0.0060	2.02	12.0921
32	240	61.18	0.0097	3.22	20.4338
33	250	56.90	0.0101	3.36	19.0051
35	210	22.03	0.0084	2.82	7.3578
36	230	25.11	0.0093	3.09	8.3868
37	260	29.01	0.0105	3.49	9.6904
38	250	14.09	0.0101	3.36	4.7076
39	240	11.80	0.0097	3.22	3.9401
40	210	12.46	0.0084	2.82	4.1606
42	230	28.22	0.0093	3.09	9.4248
43	250	46.20	0.0101	3.36	15.4311
44	260	36.32	0.0105	3.49	12.1320
45	240	33.15	0.0097	3.22	11.0707
46	230	39.88	0.0093	3.09	13.3184
47	200	29.43	0.0080	2.69	9.8292
49	230	26.54	0.0093	3.09	8.8646
50	240	10.34	0.0097	3.22	3.4547
51	200	7.38	0.0080	2.69	2.4642
52	210	8.35	0.0084	2.82	2.7883
53	250	9.43	0.0101	3.36	3.1483
54	210	9.62	0.0084	2.82	3.2120
56	260	9.61	0.0105	3.49	3.2111
57	250	9.36	0.0101	3.36	3.1252
58	260	12.01	0.0105	3.49	4.0128
59	270	15.80	0.0109	3.63	5.2784
60	270	14.43	0.0109	3.63	4.8194

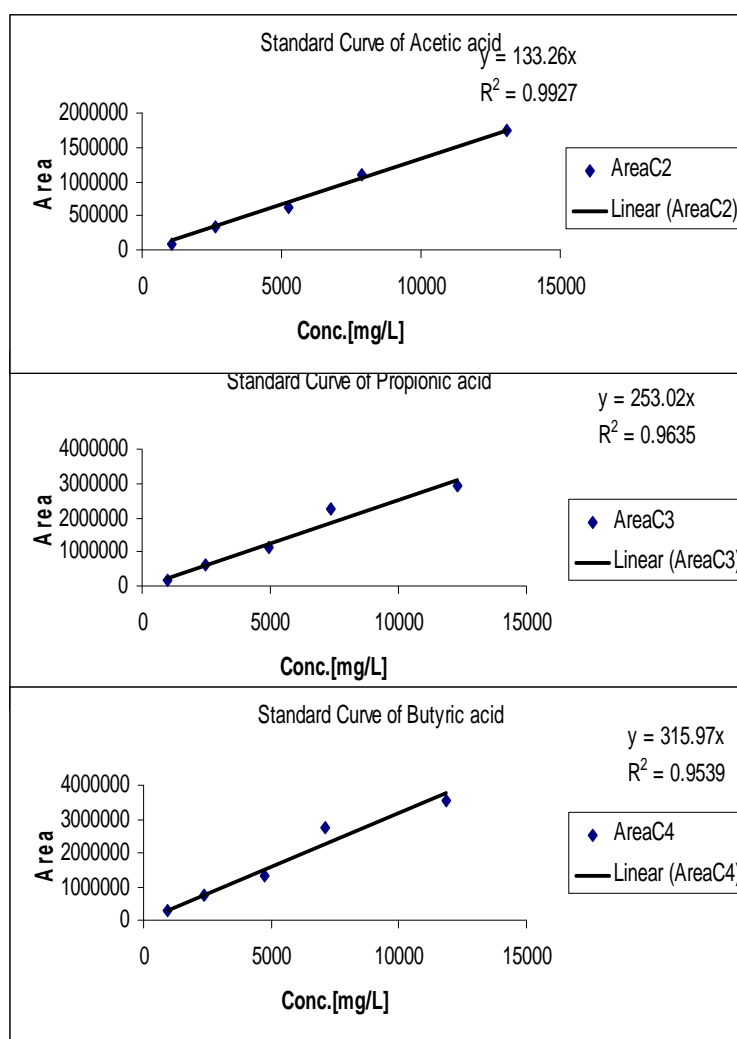


## ภาคผนวก ข

ภาคผนวก ข-1 ผลการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์กรดไขมันระเหยครั้งที่ 1

ตารางที่ ข-1 พื้นที่ใต้กราฟมาตรฐานของกรดอะซิติก โพรไพโอนิก และกรดบิวทริก

STD	Conc.	AreaC2	Conc.	AreaC3	Conc.	AreaC4
STD-1	1048	86237	985	195771	948	274334
STD-2	2620	336847	2463	616805	2371	729617
STD-3	5240	623935	4925	1122013	4742	1314846
STD-4	7859	1111811	7388	2248122	7113	2759037
STD-5	13099	1743234	12313	2943319	11855	3518188

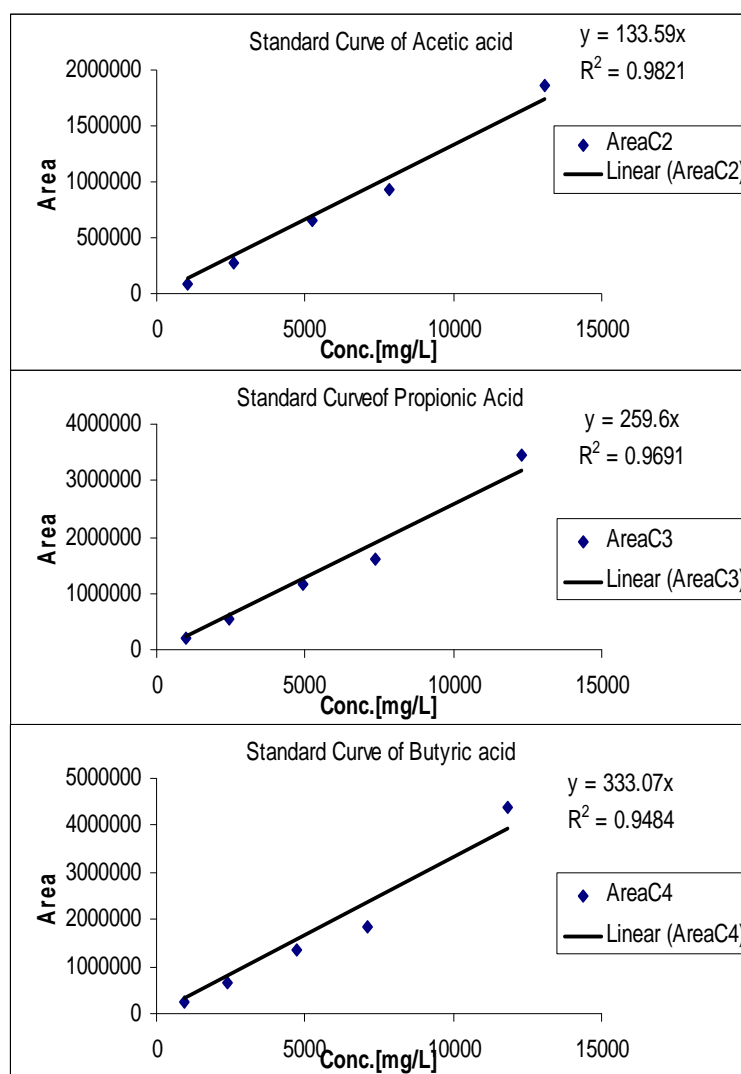


รูปที่ ข-1 กราฟมาตรฐานครั้งที่ 1

ภาคผนวก ข-2 ผลการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์กรดไขมันระเหยครั้งที่ 2

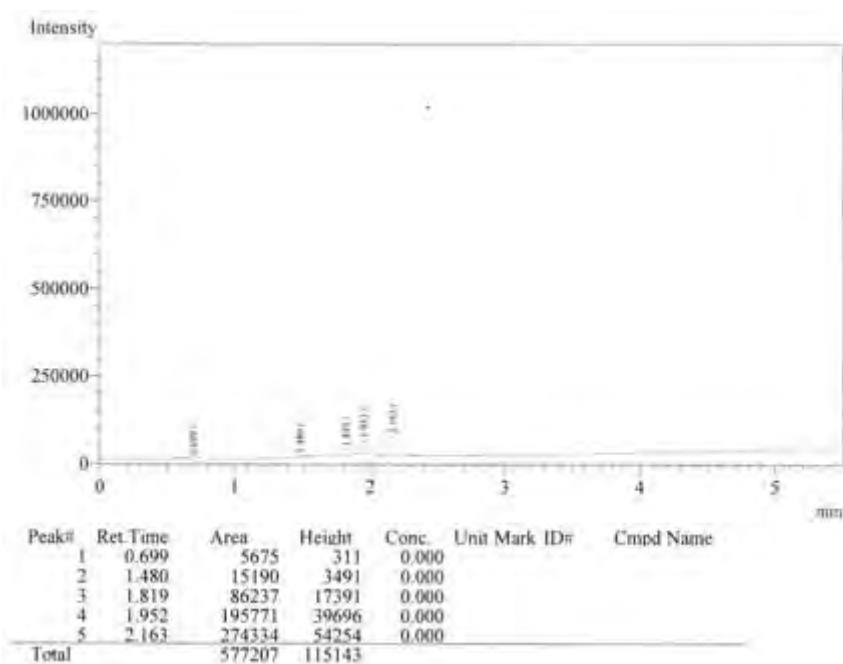
ตารางที่ ข-2 พื้นที่ใต้กราฟมาตรฐานของกรดอะซิติก โพรไพโอนิก และกรดบิวทริก

STD	Conc.	Area C2	Conc.	Area C3	Conc.	Area C4
STD-1	1048	85934	985	189467	948	256499
STD-2	2620	277417	2463	548681	2371	664782
STD-3	5240	655013	4925	1158745	4742	1350511
STD-4	7859	935393	7388	1594372	7113	1840712
STD-5	13099	1855438	12313	3461863	11855	4386853

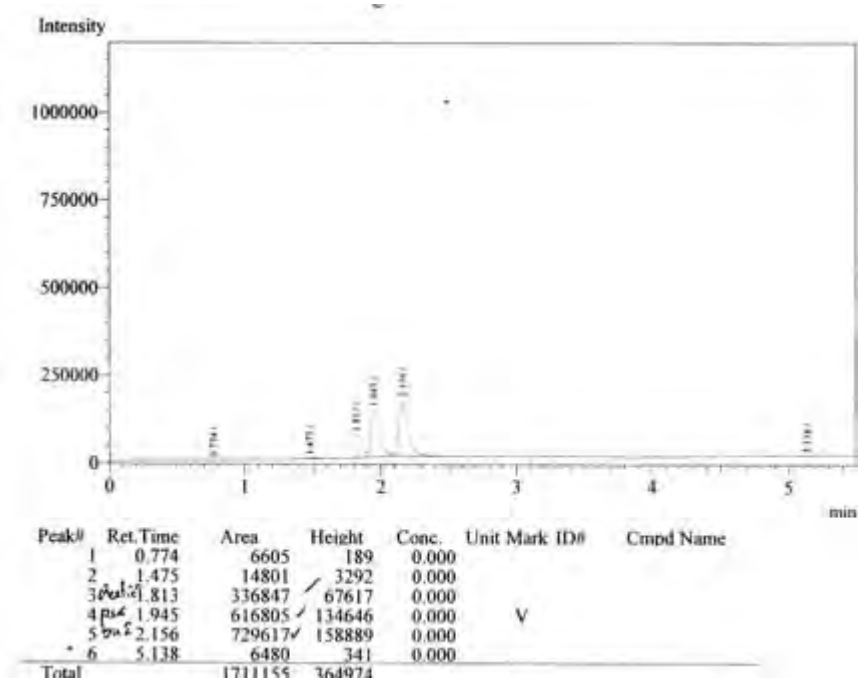


รูปที่ ข-2 กราฟมาตรฐานครั้งที่ 2

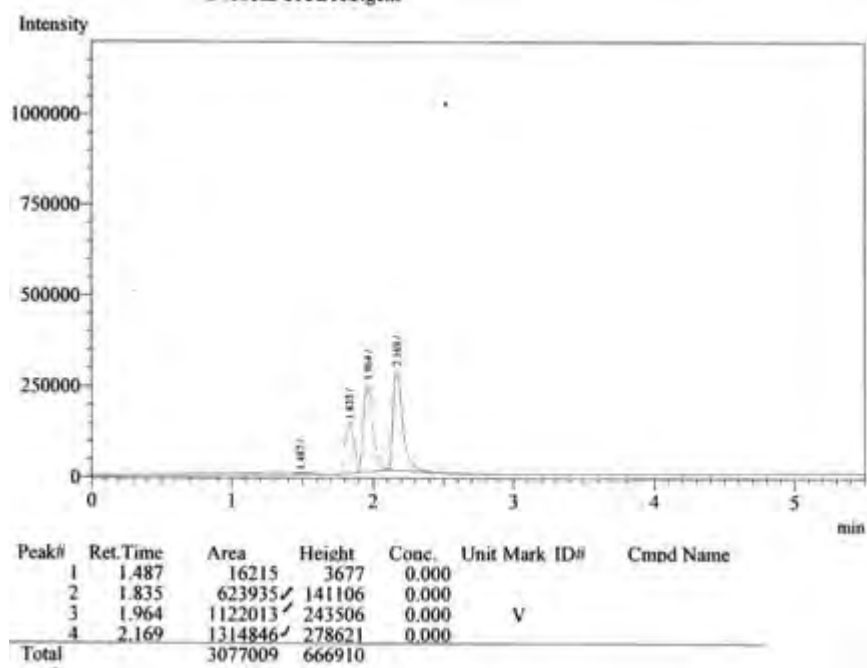
ภาคผนวก ข-3 ผลการวิเคราะห์กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก และกรดบิวทริกของสารมาตรฐาน  
(Standard VFA) ครั้งที่ 1



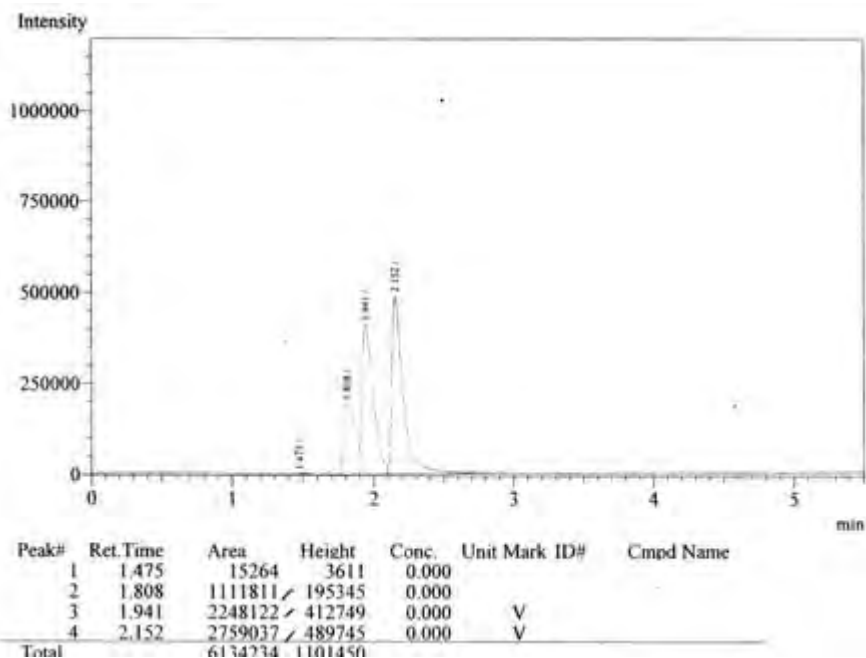
ความเข้มข้นมาตรฐานที่ 1



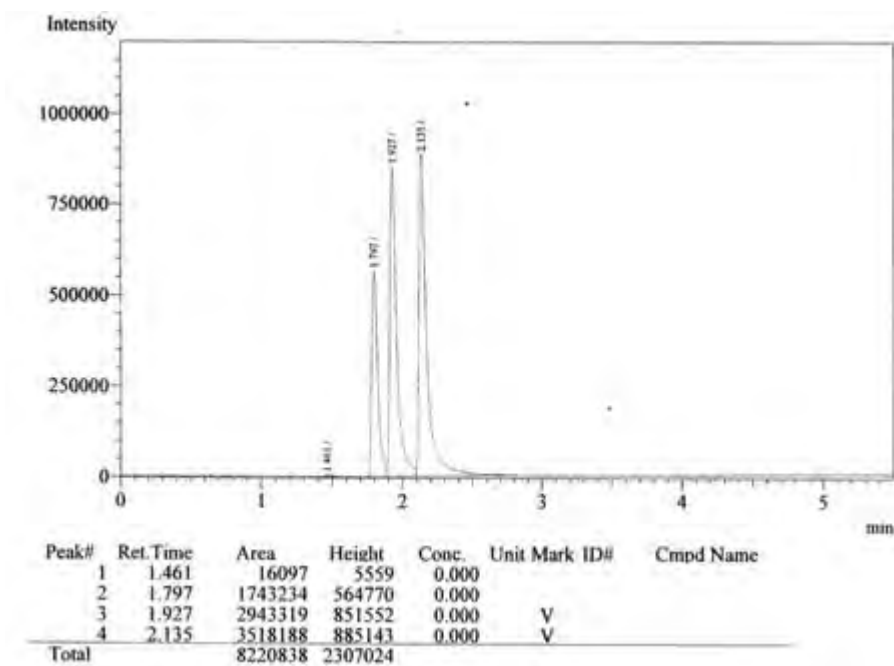
ความเข้มข้นมาตรฐานที่ 2



ความเข้มข้นมาตรฐานที่ 3

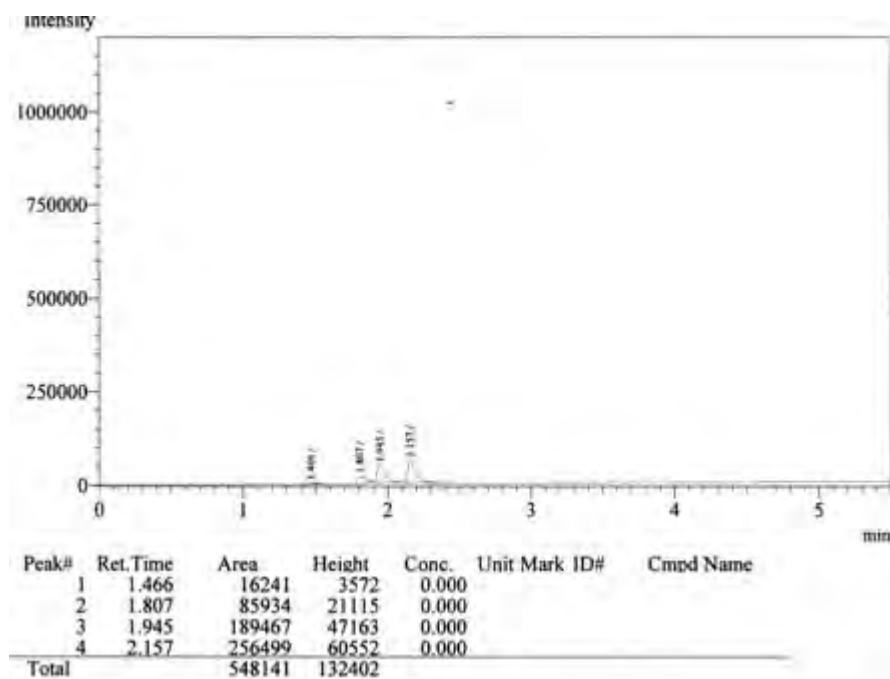


ความเข้มข้นมาตรฐานที่ 4

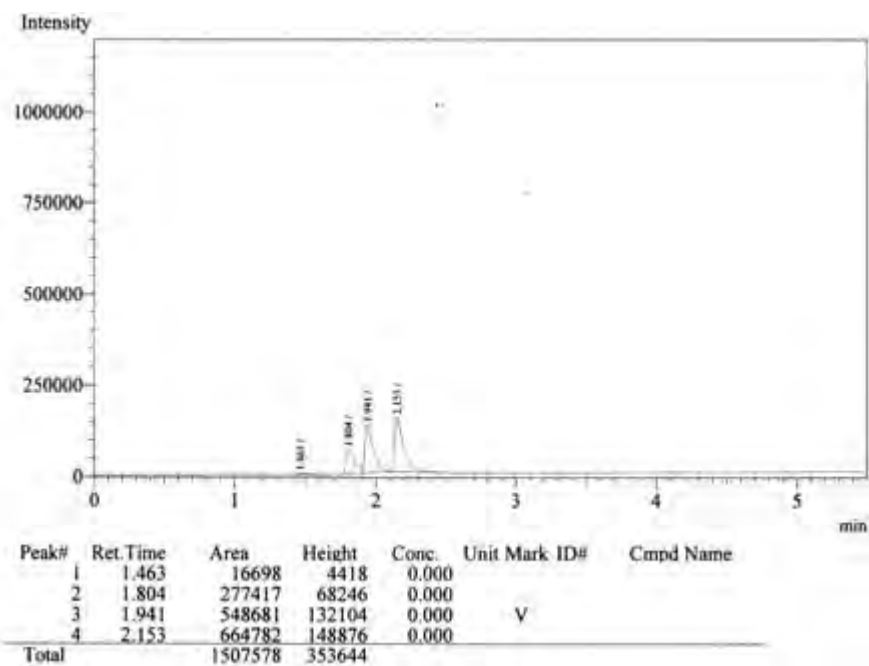


ความเข้มข้นมาตรฐานที่ 5

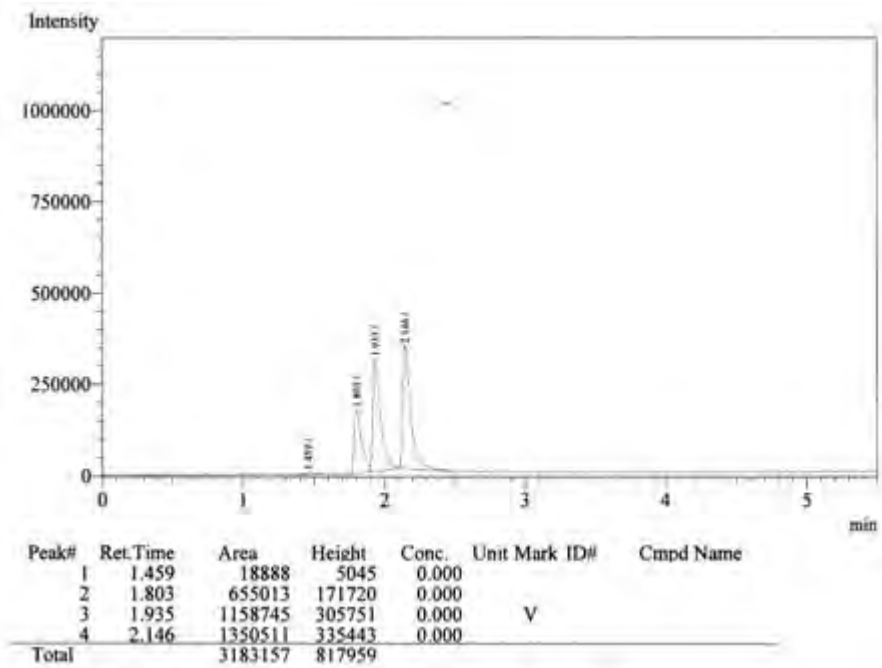
ภาคผนวก ข-4 ผลการวิเคราะห์กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก และกรดบิวทริกของสารมาตรฐาน (Standard VFA) ครั้งที่ 2



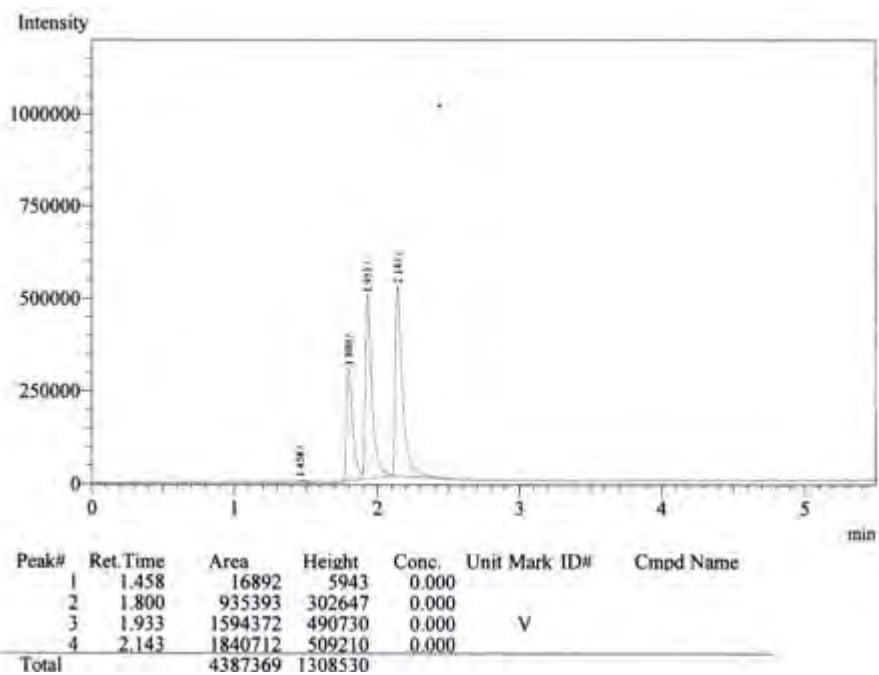
ความเข้มข้นมาตรฐานที่ 1



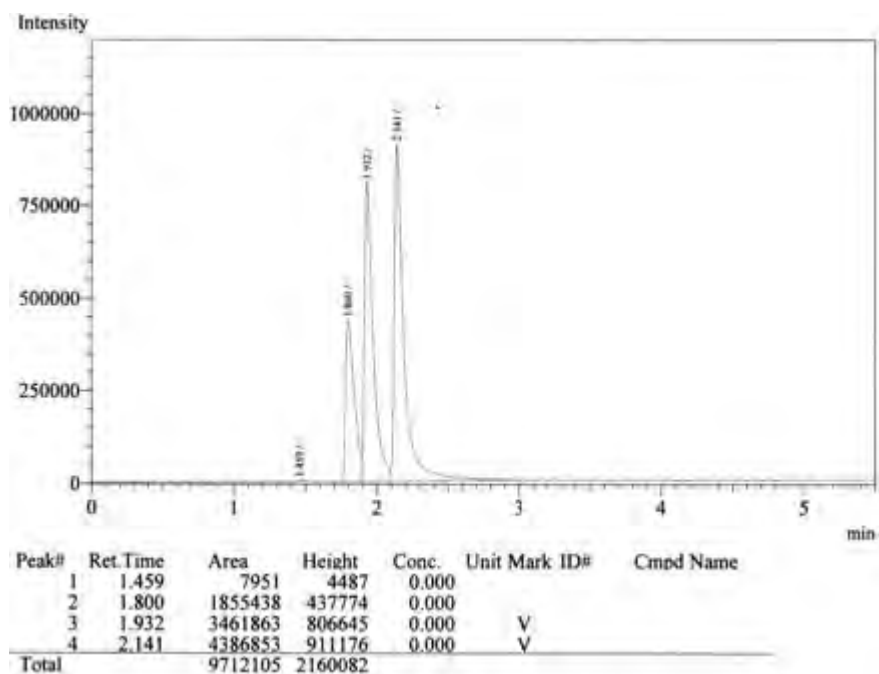
ความเข้มข้นมาตรฐานที่ 2



ความเข้มข้นมาตรฐานที่ 3



ความเข้มข้นมาตรฐานที่ 4



ความเข้มข้นมาตรฐานที่ 5

ภาคผนวก ค

ภาคผนวก ค-1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่พีเอชเริ่มต้นน้ำเสียดิจจริงไม่ปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์

ภาควิชาเคมีอินทรีย์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	เอกสาร: ScFM-CT-06-002-A	โทร 0-2218-7523-6 โทรสาร 0-2258-5831
	แบบรายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ	ลำดับการพิมพ์ 0 หน้า 1

วันที่ 23 สิงหาคม 2553

รายงานผลการวิเคราะห์และทดสอบ

ชื่อ รายงานผลการทดสอบทางเคมีประกอบในตัวอย่าง GAS

ผู้ส่งวิเคราะห์ : ... นายวิวัฒน์ กฤษณวิวัฒน์ ... โบลอนกรานาเซีย ... CT10953 ...  
 หน่วยงาน : ... ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 ชนิดตัวอย่าง : ... Gas  
 วันที่รับตัวอย่าง : ... 9 สิงหาคม 2553 ... วันที่วิเคราะห์ : 17 สิงหาคม 2553


เครื่องมือวิเคราะห์ทดสอบ : ... GAS CHROMATOGRAPH MODEL TRACE GC ที่ชื่อ THERMO FINNIGAN  
 สภาพการวิเคราะห์ :

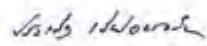
Carrier gas : Nitrogen flow rate: 20 ml/min  
 Injector Temperature : 120 °C  
 Column : SHIN CARBON, Temperature program set at 80-130 °C for 20 min  
 Detector : TCD at 150 °C  
 Injection Volume : 1 ml

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : -  
 ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

ลำดับ	Sample ID	% Hydrogen	% Methane	% Carbon dioxide
1.	Unscreened micro. Seed only	17.5	-	8.0

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

  
 (นางสาววิชา ชัยชญานิธิ)  
 ภาควิชาวิทยาศาสตร์  
 วันที่ 23 สิงหาคม 2553

  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ฉิมปัดทอง)  
 หัวหน้าห้องวิจัย Fuel Research  
 วันที่ 23 สิงหาคม 2553

หมายเหตุ : 1. ผลการวิเคราะห์ในรายงานฉบับนี้ใช้สำหรับตัวอย่างที่ส่งมาเท่านั้น  
 2. ห้ามทำสำเนาหรือเผยแพร่ข้อมูลนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากภาควิชา

เลขที่	ผู้รับ	วันที่รับ	สถานที่รับ	หมายเลขรับ	ผู้ส่ง	วันที่ส่ง	ผู้รับ
ScFM-CT-06-002-A	ห้องปฏิบัติการ	17/8/53	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	15	ScFM	17	ห้องปฏิบัติการ



ภาคผนวก ค-2 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่พีเอชเริ่มต้นน้ำเสียจริงตามการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ 80 ° ซ 110 ° ซ และที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 เมื่อไม่ทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์กับปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ 80 ° ซ

สภาวะการวิเคราะห์ :

Carrier gas : Nitrogen flow rate: 25 ml/min  
 Injector Temperature : 120 °C  
 Column : SHIN CARBON. Temperature program set at 80-130 °C for 20 min  
 Detector : TCD at 150 °C  
 Injection Volume : 1 ml

มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : -

ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

ลำดับ	Sample ID	% Hydrogen	% Methane	% Carbondioxide
1.	pH 4 80°C	19.2	-	7.0
2.	pH 4 110°C	24.6	-	11.0
3.	pH 5 No treated	26.3	61.0	6.0
4.	pH 5 80°C	31.0	60.0	4.0

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง

( นางสาววันวิสา ธาศัยญาติ )  
 นักวิทยาศาสตร์  
 วันที่ 16 มีนาคม 2554

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เจียมร้อยเจริญ )  
 หัวหน้าห้องวิจัย Fuel Research  
 วันที่ 16 มีนาคม 2554

ภาคผนวก ค-3 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 5 ปรับสภาพหัวเชื้อ จุลชีพที่ 110 ° ซ และที่พีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 6 ทั้งหมด

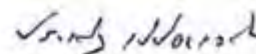
Carrier gas : Nitrogen flow rate: 25 ml/min  
 Injector Temperature : 120 °C  
 Column : SHIN CARBON, Temperature program set at 80-130 °C for 20 min  
 Detector : TCD at 150 °C  
 Injection Volume : 1 ml  
 มาตรฐานอ้างอิงสำหรับการทดสอบ : -  
 ผลการวิเคราะห์และทดสอบ :

ลำดับ	Sample ID	% Hydrogen	% Methane	% Carbondioxide
1.	pH 5 110°C	35.0	21.0	4.0
2.	pH 6 No treated	23.9	57.0	10.0
3.	pH 6 80°C	28.5	58.0	11.0
4.	pH 6 110°C	33.4	28.0	5.0

รับรองผลการวิเคราะห์ถูกต้อง



(นางสาววันวิสา อาศัยญาติ)  
 นักวิทยาศาสตร์  
 วันที่ 16 มีนาคม 2554



(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)  
 หัวหน้าห้องวิจัย Fuel Research  
 วันที่ 16 มีนาคม 2554

## ภาคผนวก ง

## ภาคผนวก ง-1 ผลการวิเคราะห์ TOC ในน้ำเสียโรงงานซอสปรุงรส

ERIC-S-L\_003



สถาบันวิจัยสภาพแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
อาคารสถานีน 2 ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
โทร 02-2188211, 02-2188213 โทรสาร 02-2188212

## รายงานผลวิเคราะห์

เจ้าของตัวอย่าง : นายวีรภัทร ตุททองวิวัฒน์

ที่อยู่ : ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุดเก็บตัวอย่าง : \_\_\_\_\_

ผู้เก็บตัวอย่าง : \_\_\_\_\_

ประเภทตัวอย่าง : น้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร

รหัสงานวิเคราะห์ : 01528

วันที่ส่งตัวอย่าง : 24 กุมภาพันธ์ 2554

วันที่วิเคราะห์ : 8 มีนาคม 2554

รายการวิเคราะห์	หน่วย	ผลวิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์
TOC	mg/L	5.314	Combustion-Infrared Method 5310 B

BASED ON STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER 21<sup>st</sup> Edition (2005)

หมายเหตุ : รายงานฉบับนี้มีผลเฉพาะเจาะจงกับตัวอย่างที่ส่งตรวจเท่านั้น ห้ามนำไปใช้ข้างอื่นเพื่อการตัดสินใจหรือนำสินค้า  
ทางวิศวกรรมหรือด้านราชการอื่นวิเคราะห์โดยไม่แจ้งต่อลูกค้าและ ต้องได้รับพระมหากรุณาธิคุณจากผู้อำนวยการสถาบันฯ

(นางสาววชิร ศรีเชิดชูประภา)

หัวหน้างานปฏิบัติการ

10 มีนาคม 2554

ผู้อำนวยการศูนย์ วิจัยและพัฒนา

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยสภาพแวดล้อม

10 มีนาคม 2554



### ภาคผนวก จ

#### การคำนวณ

ภาคผนวก จ-1 ตัวอย่างการคำนวณภาระบรรทุกสารอินทรีย์และอัตราการไหล

โดยคำนวณจากค่าระยะกักเก็บชลศาสตร์ที่ 5 วัน ปริมาตรถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้น 12 ลิตร และค่าซีโอดี 20,000 มก./ล.

1. จาก Organic loading rate = COD (kg/m<sup>3</sup>)/Time (day)  
โดย COD ปกติใช้หน่วย mg/L เมื่อเปลี่ยนเป็นหน่วย COD×10<sup>3</sup> เป็น kg/m<sup>3</sup>  
ดังนั้น Organic loading rate = COD×10<sup>-3</sup> / (HRT)  
= 20,000×10<sup>-3</sup>/5  
= 4 กก. COD/ลบ.ม.·วัน
2. จาก Q = V/T โดย V คือ ปริมาตร และ T คือ เวลา  
Q = 12/5 = 2.4 ลิตร/วัน หรือ Q = 0.1 ลิตร/ชม.

ภาคผนวก จ-2 ตัวอย่างการคำนวณสัดส่วนปริมาณก๊าซรวม

1. จากสัดส่วนปริมาณก๊าซรวม =  $\frac{\text{ปริมาณ gas (ml/day)}}{\text{COD removal (g COD/day)}}$   
เนื่องจาก ปริมาณ gas ที่เก็บข้อมูลมีหน่วยเป็น ml/day จึงเปลี่ยนหน่วยเป็น L/day โดยนำ ปริมาณ gas/1000  
จาก COD removal = COD<sub>เข้า</sub> - COD<sub>ออก</sub> เปลี่ยนหน่วยจาก mg/L เป็น g/L โดยนำ COD/1000 แล้วคิดเป็นปริมาณ COD ที่เข้าระบบทั้งหมดต่อวัน โดยคูณกับอัตราการไหลจะได้ COD removal หน่วย g COD/day
2. วิธีคำนวณดังตัวอย่าง  
กำหนดให้ COD เข้า = 16,785 mg/L, COD ออก = 10,416  
gas ที่เกิดขึ้น 230 ml/day, อัตราการไหล 2.4 L/day  
เนื่องจาก ปริมาณ gas ที่เก็บข้อมูลมีหน่วยเป็น ml/day ถ้าเปลี่ยนเป็นหน่วย L/day โดยนำ ปริมาณ gas/1000  
ดังนั้น COD removal = 16,785-10,416 = 6369 mg/L  
เปลี่ยนหน่วยจาก mg/L เป็น g/L

โดย COD removal (g/L) = COD removal/1000 = 6369/1000 = 6.37 g/L  
แล้วคิดเป็นปริมาณ COD ที่เข้าระบบทั้งหมดต่อวัน โดยคูณกับอัตราการไหลจะได้ COD removal (gCOD/day)

$$\begin{aligned}\text{โดย COD removal (gCOD/day)} &= \text{COD removal (g/L)} \times \text{อัตราการไหล (L/day)} \\ &= 6.37 \times 2.4 \\ &= 15.29 \text{ g COD/day}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{จากสัดส่วนปริมาณก๊าซรวม} &= \frac{\text{ปริมาณ gas (ml/day)}}{\text{COD removal (g COD/day)}} \\ &= \frac{230 \text{ ml/day}}{15.29 \text{ g COD/day}} \\ &= 15.05 \text{ ml/g COD removal}\end{aligned}$$

ภาคผนวก จ-3 การคำนวณหาจำนวน โมลของก๊าซ

ตัวอย่าง ปริมาตรรวมของก๊าซทั้งหมดในวันนี้ เท่ากับ 230 มิลลิลิตร

$$\text{จากสูตรการหาจำนวนโมล ได้ } n_t = \frac{PV}{RT}$$

โดยที่ P คือ ความดันบรรยากาศ เท่ากับ 1 atm

V คือ ปริมาตรก๊าซที่เก็บได้ต่อวัน

R คือ ค่าคงที่ก๊าซ เท่ากับ  $0.082054 \text{ L}\cdot\text{atm}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$

T คือ อุณหภูมิห้องเท่ากับ  $303 \text{ }^{\circ}\text{k}$

แทนสมการจะได้

$$\begin{aligned}n_t &= \frac{1 \text{ atm} \times 230 \text{ ml} \times 1\text{L}}{0.082054 \text{ L}\cdot\text{atm}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{k}^{-1} \times 303 \text{ }^{\circ}\text{k} \times 1000 \text{ ml}} \\ &= 0.00925 \text{ mol}\end{aligned}$$

จะได้จำนวน โมลรวมของก๊าซชีวภาพต่อวัน เท่ากับ 0.00925 mol

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีจะทราบร้อยละความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจน (เฉลี่ยตลอดระยะเวลาเดินระบบ) แล้วนำมาคูณกับจำนวนโมลรวมที่ได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} \text{เช่น} \quad & \text{ได้ร้อยละไฮโดรเจน} = 17.5 \% \text{ ในองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ} \\ \text{ดังนั้น} \quad & \text{มีจำนวนโมลไฮโดรเจน} = 17.5\% \times 0.00925 \text{ mol} = 1.62 \text{ มิลลิโมล} \end{aligned}$$

การคำนวณหาปริมาตรก๊าซ

นำร้อยละความเข้มข้นของก๊าซชนิดต่างๆ ที่วิเคราะห์ได้ด้วยเครื่อง GC เช่นเดียวกับข้างต้นนำมาคูณกับปริมาตรก๊าซรวมทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อวันจากถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นเช่นร้อยละความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนเท่ากับ 17.5% จะมีปริมาตรเท่ากับ  $17.5\% \times 230 \text{ ml of Biogas} = 40.25 \text{ ml of Hydrogen}$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวีรภัทร ฤทธาภิรมย์ เกิดเมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน 2528 สถานที่เกิด จังหวัดยะลา สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์เคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปี พ.ศ. 2550 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตร มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2551

## ผลงานวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่

วีรภัทร ฤทธาภิรมย์ และ ชเรศ ศรีสถิตย์. (2554) การผลิตก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบแผ่นกั้นจากน้ำเสียโรงงานซอสปรุงรส. การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมและการจัดการสิ่งแวดล้อม ครั้งที่ 3 วันที่ 14-15 มีนาคม 2554 ณ คณะ วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (นำเสนอผลงานแบบบรรยายมีเรื่องเต็ม)