

การผลิตไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร



นางสาวสุภาภรณ์ สุภวิทยานันท์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2551

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

HYDROGEN AND ELECTRICITY PRODUCTION FROM FOOD  
INDUSTRIAL WASTEWATER



Miss Supaporn Supavittayapinun

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2008

Copyright of Chulalongkorn University

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์               | การผลิตไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสีย<br>อุตสาหกรรมอาหาร |
| โดย                             | นางสาวสุภาภรณ์ สุภวิททยานันท์                             |
| สาขาวิชา                        | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม                                       |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พึ่งรัมย์             |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักษรา พงุทธิวิทยา                  |

คณะกรรมการศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พึ่งรัมย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อักษรา พงุทธิวิทยา)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกรัตน์ วงษ์แก้ว)

## 4970652621 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : HYDROGEN / ELECTRICITY / DARK FERMENTATION / INDUSTRIAL WASTEWATER

SUPAPORN SUPAVITTAYAPINUN : HYDROGEN AND ELECTRICITY PRODUCTION FROM FOOD INDUSTRIAL WASTEWATER. ADVISOR: ASST.PROF. WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D., CO-ADVISOR : ASST.PROF. AKSARA PUTTHIVIDHYA, 149 pp.

Wastewater from food industry, consisting of carbohydrates and few contaminants, has high potential for renewable energy production as hydrogen and electricity. Hydrogen could be biologically produced from anaerobic fermentation of wastewater, leaving of organic matter in the substrate which could be fed into microbial fuel cell to produce electricity. This research goal is to study the efficiency of hydrogen and energy production from wastewater from three types of food industry: cassava, chocolate and noodle. Grab samples were taken from the factory discharge outlets, prior to local wastewater treatment plant. Chemical oxygen demand (COD) values of the samples were 10,976, 1,176 and 570 mg/l, respectively. It was found that all samples have decent potential for the production of biogas, which has different hydrogen yields. Highest yield was obtained from the wastewater of cassava industry, followed by chocolate industry while noodle industry was the lowest one. The values found were 138.8, 102.4 and 28.4 ml H<sub>2</sub>/l wastewater, respectively. Electric currents produced by different fermented feed found to be similar: 0.56, 0.55 and 0.59  $\mu$ A were obtained from wastewater of cassava, chocolate and noodle industry, respectively. Furthermore, the results showed that hydrogen production by fermentation process coupled with electricity generation by microbial fuel cell is an efficient wastewater treatment method which has COD removal efficiency of 60 percent.

|   |   |
|---|---|
| Department : Environmental Engineering.....     | Student's Signature <i>Supaporn S.</i>  |
| Field of Study : Environmental Engineering..... | Advisor's Signature <i>Wiboonluk P.</i> |
| Academic Year : 2008.....                       | Co-Advisor's Signature <i>Aksara P.</i> |



สุภาภรณ์ สุภวิทยานันท์ : การผลิตไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียอุตสาหกรรม  
อาหาร. (Hydrogen and Electricity Production from Food Industrial Wastewater)  
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม:  
ผศ.ดร.อักษรา พฤทธิวิทยา, 149 หน้า.

น้ำเสียอุตสาหกรรมอาหารเป็นน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตและมีสิ่งเจือปนน้อย มีศักยภาพและประสิทธิภาพเพียงพอที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานทดแทน ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้า โดยก๊าซไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากกระบวนการหมักทางชีวภาพแบบไร้ออกซิเจน แต่น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการหมักยังคงมีสารอินทรีย์เจือปนอยู่สูงจึงสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้าด้วยวิธีดังกล่าวจากน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท ได้แก่ น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต และน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว โดยน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเก็บจากจุดปล่อยน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีปริมาณซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 10,976 1,176 และ 570 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าน้ำเสียทั้ง 3 ประเภทมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยแสดงสัดส่วนไฮโดรเจนในปริมาณที่แตกต่างกัน นั่นคือ น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังจะให้สัดส่วนไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพมากที่สุด รองลงมาคือ น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลตและน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว โดยมีค่าเท่ากับ 138.8 102.4 และ 28.4 มิลลิตรไฮโดรเจนต่อลิตรน้ำเสียตามลำดับ และเมื่อนำน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารทั้ง 3 ประเภทที่ผ่านกระบวนการหมักมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตกระแสไฟฟ้า พบว่าน้ำเสียทั้ง 3 ประเภทสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกัน โดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต และน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว มีปริมาณเท่ากับ 0.56 0.55 และ 0.59 ไมโครแอมป์ ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักควบคู่กับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นแนวทางการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพโดยมีผลทำให้ค่าความสกปรกของน้ำเสียในรูปซีโอดีลดลงสูงสุด 60 เปอร์เซ็นต์

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม .....

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม .....

ปีการศึกษา 2551 .....

ลายมือชื่อนิสิต สุภาภรณ์ สุภวิทยานันท์ .....

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  .....

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้กำเนิดอบรมสั่งสอนและส่งเสริมเลี้ยงดูจนเติบโตใหญ่ได้ทุกวันนี้ และยังมีมอบโอกาสในการศึกษาระดับปริญญาโทนี้ด้วย นอกจากนี้ขอขอบคุณพี่ชาย พี่สาวและน้องชาย ที่คอยให้คำแนะนำ และให้กำลังใจในยามท้อแท้ใจตลอดมา

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิสรา พงษ์พิทยา ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ร่วม เป็นอย่างสูง ที่คอยให้กำลังใจ คำแนะนำ และแนวทางที่ดีๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงอาจารย์ผู้ทำหน้าที่เป็นประธาน และคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำแนะนำ คำติชม ในการแก้ไขให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นไปในทางที่ดีที่สุด

ขอขอบพระคุณ ครูผู้ดูแลห้องปฏิบัติการของตึกภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ทุกๆ ท่าน ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์ในการทดลองและคอยให้คำแนะนำเกี่ยวกับการทดลอง

ขอขอบพระคุณ พี่เหม่ม พี่เอ็มมา พี่ไอ้ต และศูนย์เชี่ยวชาญด้านของเสียอันตราย ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง และให้คำปรึกษาด้านการใช้อุปกรณ์ต่างๆ

ขอขอบคุณสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงานและบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนด้านทุนวิจัยในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณบริษัท อุตสาหกรรมแป้งมันบ้านโป่ง จำกัด บริษัท เอเชียน สุกฟีเรียฟูดส์ จำกัด และบริษัทไทยฟูจีย่า จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

ขอขอบคุณ บริษัท เสริมสุข จำกัด (โรงงานปทุมธานี) ที่ให้ความอนุเคราะห์หัวเชื้อ แอนแอโรบิคเริ่มต้นเพื่อใช้ในการงานวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

|  | หน้า     |
|--|----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | ง        |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | จ        |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | ฉ        |
| สารบัญ.....  | ช        |
| สารบัญตาราง.....   | ญ        |
| สารบัญรูป.....   | ฎ        |
| <b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>   | <b>1</b> |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....                               | 1        |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                                 | 2        |
| 1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....                                       | 3        |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                               | 3        |
| <b>บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....</b>               | <b>4</b> |
| 2.1 ประเภทของพลังงาน.....  | 4        |
| 2.1.1 พลังงานสิ้นเปลือง.....                                     | 4        |
| 2.1.2 พลังงานหมุนเวียน.....                                      | 4        |
| 2.2 ก๊าซชีวภาพ.....  | 7        |
| 2.3 ก๊าซไฮโดรเจน.....  | 8        |
| 2.3.1 ประโยชน์ของก๊าซไฮโดรเจน.....                               | 9        |
| 2.3.2 วิธีการผลิตก๊าซไฮโดรเจน.....                               | 9        |
| 2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ..... | 24       |
| 2.3.4 การคำนวณหาปริมาณก๊าซไฮโดรเจน.....                          | 27       |
| 2.3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์.....                      | 28       |
| 2.4 เซลล์เชื้อเพลิง.....   | 29       |
| 2.4.1 ประวัติของเซลล์เชื้อเพลิง.....                             | 29       |
| 2.4.2 นิยามและหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....                | 29       |
| 2.4.3 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงและข้อดีข้อเสีย.....                 | 31       |
| 2.5 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ.....                                   | 34       |
| 2.5.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ.....                  | 34       |
| 2.5.2 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ.....                          | 37       |

## หน้า

|   |           |
|---|-----------|
| 2.5.3 การคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ.....   | 41        |
| 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....  | 42        |
| 2.6.1 การผลิตไฮโดรเจน.....  | 42        |
| 2.6.2 การผลิตกระแสไฟฟ้า.....  | 44        |
| <b>บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย.....</b>   | <b>47</b> |
| 3.1 แผนการวิจัย.....  | 47        |
| 3.2 การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย.....   | 49        |
| 3.3 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....   | 49        |
| 3.3.1 ชุดอุปกรณ์ผลิตก๊าซไฮโดรเจน.....   | 49        |
| 3.3.2 ชุดผลิตกระแสไฟฟ้า.....  | 51        |
| 3.3.3 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....  | 54        |
| 3.4 วิธีการทดลอง.....   | 55        |
| 3.4.1 การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักไร้ออกซิเจน.....  | 55        |
| 3.4.2 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบ.....  | 57        |
| 3.5 วิธีการวิเคราะห์.....   | 59        |
| <b>บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....</b>  | <b>60</b> |
| 4.1 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักไร้ออกซิเจน<br>แบบใช้แสงและไร้แสงจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....                             | 61        |
| 4.1.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ.....  | 61        |
| 4.1.2 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....  | 63        |
| 4.1.3 ซีไอดี.....   | 65        |
| 4.2 การทดสอบเบื้องต้นในการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสียจาก<br>อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่มีการควบคุม<br>อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส..... | 66        |
| 4.2.1 ซีไอดี.....   | 67        |
| 4.2.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ.....  | 68        |
| 4.2.3 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....  | 69        |
| 4.2.4 ความเข้มข้นกลูโคส.....  | 72        |



|  |           |
|--|-----------|
| 4.3 ศักยภาพและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน<br>จากระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรม<br>อาหาร 3 ประเภท..... | 73        |
| 4.3.1 ซีโอดี.....  | 74        |
| 4.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ.....   | 75        |
| 4.3.3 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....   | 76        |
| 4.3.4 ความเข้มข้นกลูโคส.....   | 80        |
| 4.3.5 กรดอินทรีย์ระเหย.....  | 82        |
| 4.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์.....  | 84        |
| 4.4 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์<br>อิเล็กตรอน.....   | 87        |
| 4.5 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบ.....   | 90        |
| <b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>  | <b>94</b> |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย.....  | 94        |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ.....  | 95        |
| รายการอ้างอิง.....   | 96        |
| ภาคผนวก.....   | 101       |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....  | 149       |

## สารบัญตาราง

| ตาราง  | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2.1 การใช้ประโยชน์จากพลังงานหมุนเวียน จำแนกตามประเภท<br>พลังงานและสาขาเศรษฐกิจในปี พ.ศ.2547.....    | 5    |
| ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของไฮโดรเจน.....  | 8    |
| ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของก๊าซที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนสาร.....   | 11   |
| ตารางที่ 2.4 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงจำแนกตามอุณหภูมิการทำงานและชนิดของอิเล็กโทรไลต์.....                      | 31   |
| ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด.....   | 33   |
| ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ความถี่ จุดเก็บตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์.....                    | 59   |
| ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์เบื้องต้นของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....                                | 61   |
| ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์เบื้องต้นของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภทที่ใช้ในการทดลอง.....                     | 73   |
| ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภทจากการวิเคราะห์<br>ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์..... | 84   |
| ตารางที่ 4.4 สรุปผลการเปรียบเทียบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนกับงานวิจัยอื่น.....                                     | 86   |
| ตารางที่ 4.5 ลักษณะของน้ำเสียทั้ง 3 ประเภทที่ผ่านกระบวนการหมัก.....  | 90   |
| ตารางที่ 4.6 ปริมาณสูงสุดของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการผลิตกระแสไฟฟ้า.....  | 92   |
| ตารางที่ 4.7 สรุปผลการเปรียบเทียบการผลิตกระแสไฟฟ้ากับงานวิจัยอื่น.....                                       | 93   |

## สารบัญรูป

| รูป  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน.....  | 16   |
| รูปที่ 2.2 ปฏิริยาสร้างกรดไขมันระเหยภายใต้สภาวะที่ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน<br>มีค่าสูงและต่ำ.....   | 18   |
| รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์แสงทางชีวภาพโดยตรง.....  | 19   |
| รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์แสงทางชีวภาพทางอ้อม.....   | 20   |
| รูปที่ 2.5 กระบวนการหมักแบบใช้แสง.....   | 21   |
| รูปที่ 2.6 กระบวนการหมักแบบไร้แสง.....   | 22   |
| รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงซ้อนแบบไร้อากาศ.....   | 23   |
| รูปที่ 2.8 ปริมาณชีโอดีทีที่เหลือจากกระบวนการหมักต่างๆ.....  | 23   |
| รูปที่ 2.9 การหาค่าสัมประสิทธิ์จากสมการ Modified Gompertz.....   | 28   |
| รูปที่ 2.10 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง.....  | 30   |
| รูปที่ 2.11 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้เมมเบรน.....   | 35   |
| รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของสะพานเกลือ.....   | 36   |
| รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบที่มีสารพาอิเล็กตรอน.....   | 37   |
| รูปที่ 2.14 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบที่ไม่มีสารพาอิเล็กตรอน.....  | 38   |
| รูปที่ 2.15 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะไบเดียว.....  | 39   |
| รูปที่ 2.16 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองไบ.....  | 40   |
| รูปที่ 3.1 แผนภูมิสรุปขั้นตอนการดำเนินการทดลอง.....  | 48   |
| รูปที่ 3.2 ฟังการต่อชุดอุปกรณ์ผลิตก๊าซไฮโดรเจน.....  | 50   |
| รูปที่ 3.3 ถังปฏิกรณ์ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสำหรับงานวิจัยนี้.....   | 50   |
| รูปที่ 3.4 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ.....  | 51   |
| รูปที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้า.....   | 52   |
| รูปที่ 3.6 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองไบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้.....  | 52   |
| รูปที่ 3.7 ชุดเก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าและการเชื่อมต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ.....   | 53   |
| รูปที่ 3.8 การควบคุมอุณหภูมิห้องที่ 50 องศาเซลเซียสด้วยอ่างน้ำร้อนปรับอุณหภูมิและ<br>ควบคุมให้อยู่ในสภาวะไร้แสงด้วยการปิดด้วยกระดาษดำตลอดเวลา..... | 56   |
| รูปที่ 3.9 การเก็บตัวอย่างก๊าซจากถังปฏิกรณ์.....   | 57   |
| รูปที่ 3.10 ค่าความต่างศักย์ที่บันทึกลงในคอมพิวเตอร์โดยอัตโนมัติทุกๆ 1 ชั่วโมง.....  | 58   |

รูปที่ 4.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงและไร้แสง.....62

รูปที่ 4.2 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงและไร้แสง.....62

รูปที่ 4.3 ตำแหน่งเวลาที่ควรอยู่ของก๊าซชนิดต่างๆ จากกราฟมาตรฐานที่วิเคราะห์โดยเครื่อง  
แก๊สโครมาโตกราฟี.....63

รูปที่ 4.4 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากจากระบวนการหมักไร้ออกซิเจนเมื่อวิเคราะห์  
ด้วยเครื่องเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี.....63

รูปที่ 4.5 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงเมื่อ  
จำแนกตามชนิดและสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ก๊าซ.....64

รูปที่ 4.6 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงเมื่อ  
จำแนกตามชนิดและสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ก๊าซ.....64

รูปที่ 4.7 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงและไร้แสง.....65

รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงและ  
ไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....66

รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าซีโอดีจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสีย  
อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่มีการควบคุม  
อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส.....67

รูปที่ 4.10 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสีย  
อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและ  
การหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง  
และน้ำกลั่นที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส.....68

รูปที่ 4.11 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสีย  
อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่มีการควบคุม  
อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส.....69

รูปที่ 4.12 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสีย  
อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส  
โดยจำแนกตามชนิดและสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ก๊าซ.....70

รูปที่ 4.13 องค์ประกอบก๊าซชีวภาพจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของ  
น้ำกลั่นที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส โดยจำแนกตามชนิด  
และสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ก๊าซ.....70

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 4.14 ก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสีย<br>อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่มีการควบคุม<br>อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส.....            | 71 |
| รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสีย<br>อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่มีการควบคุม<br>อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส.....  | 71 |
| รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นของกลูโคสในระบบการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสีย<br>อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่มีการควบคุม<br>อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส..... | 72 |
| รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุม<br>อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท.....                          | 74 |
| รูปที่ 4.18 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุม<br>อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท.....                             | 75 |
| รูปที่ 4.19 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุม<br>อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท.....                           | 76 |
| รูปที่ 4.20 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุม<br>อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท .....                         | 77 |
| รูปที่ 4.21 ก๊าซไฮโดรเจนสะสมจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุม<br>อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท.....                                 | 79 |
| รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นไฮโดรเจนจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุม<br>อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท.....                              | 79 |
| รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกลูโคสจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสง<br>และควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร<br>3 ประเภท.....               | 80 |
| รูปที่ 4.24 Hydrogen Yield จากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิ<br>ที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท.....                                  | 81 |
| รูปที่ 4.25 กรดอินทรีย์ระเหยจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิ<br>ที่ 50 องศาเซลเซียสจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง.....                            | 83 |
| รูปที่ 4.26 กรดอินทรีย์ระเหยจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิ<br>ที่ 50 องศาเซลเซียสจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตกล้วยเดี่ยว.....                                | 83 |



|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 4.27 กรดอินทรีย์ระเหยจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิ<br>ที่ 50 องศาเซลเซียสจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต.....        | 84 |
| รูปที่ 4.28 ตัวอย่างกราฟที่สร้างจากโปรแกรม Sigmaplot 10 เมื่อทำการจัดข้อมูลจากการ<br>ทดลองกับสมการ Compertz.....                                | 85 |
| รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นและ<br>เม็ดตะกอนจุลินทรีย์ภายหลังผ่านการนั่งด้วยหม้ออัดความดัน..... | 88 |
| รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านกระบวนการหมัก<br>แบบไร้ออกซิเจนของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท.....   | 89 |
| รูปที่ 4.31 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรม 3 ประเภท.....  | 91 |



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ได้เข้ามามีบทบาทในการดำรงชีวิตของมนุษย์มากขึ้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะต้องการพลังงานเพื่อให้สามารถทำงานได้ พลังงานที่ป้อนเข้าไปนั้นอาจอยู่ในรูปของพลังงานเชื้อเพลิง พลังงานแสงอาทิตย์หรือพลังงานกระแสไฟฟ้า โดยพลังงานที่ได้จากน้ำมันเชื้อเพลิงจะเกิดจากกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งหากการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์จะเป็นการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไนโตรเจนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ อีกทั้งน้ำมันเชื้อเพลิงยังเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่ใช้แล้วหมดไปหรือที่เรียกว่าพลังงานสิ้นเปลืองอีกด้วย ส่วนพลังงานจากแสงอาทิตย์จะถือได้ว่าเป็นแหล่งพลังงานที่มีอย่างเหลือเฟือไม่มีวันหมดและสามารถหาได้ทั่วไป บ้านพักอาศัยในปัจจุบันหลายแห่งได้มีการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์มากขึ้นเพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้พลังงานจากกระแสไฟฟ้า สำหรับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้จะได้มาจากแบตเตอรี่และการผลิตจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติ ซึ่งพลังงานที่ได้จากแบตเตอรี่จัดได้ว่าเป็นพลังงานที่สะดวกต่อการใช้งานและสามารถพกพาไปใช้ได้ทุกที่ แต่ปัญหาสำคัญจากการใช้แบตเตอรี่คือเมื่อแบตเตอรี่นั้นเสื่อมสภาพลงหรือใช้การไม่ได้แล้วก็จะทำให้เกิดเป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ซึ่งขยะประเภทนี้จัดว่าเป็นของเสียอันตราย หากไม่ได้รับการบำบัดอย่างถูกวิธีอาจทำให้สารเคมีที่เป็นอันตรายปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตได้ ปัจจุบันจึงได้มีการค้นคว้าหาแหล่งพลังงานใหม่ เพื่อที่จะนำมาใช้ทดแทนพลังงานที่จะหมดสิ้นลงโดยไม่ทำลายสภาพแวดล้อม ซึ่งแหล่งพลังงานใหม่นี้ ควรเป็นพลังงานที่สะอาด ปลอดภัย มีประสิทธิภาพและอยู่ในรูปแบบที่สะดวกต่อการใช้งาน แหล่งพลังงานที่ได้รับความสนใจคือพลังงานจากก๊าซไฮโดรเจนและจากเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะนำมาพัฒนาใช้เป็นแหล่งพลังงานต่อไปในอนาคต

พลังงานจากก๊าซไฮโดรเจนจัดได้ว่าเป็นพลังงานที่สะอาดและเป็นพลังงานหมุนเวียนเพราะใช้แล้วได้น้ำกลับคืนมา เนื่องจากวัฏจักรในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนคือน้ำ ซึ่งเมื่อนำก๊าซไฮโดรเจนไปใช้ในการเผาไหม้หรือใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจะได้ผลิตภัณฑ์คือน้ำพร้อมกับพลังงานไฟฟ้า และยังสามารถนำมาใช้แทนเชื้อเพลิงในรถยนต์ได้ด้วย สำหรับเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในปัจจุบัน ได้แก่ การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำมันปิโตรเลียม การผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis) และจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน หรือกระบวนการหมัก (Fermentation)

พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ โดยพลังงานไฟฟ้ากระแสตรง (Direct current) จะเกิดจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีภายในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งมีส่วนประกอบสำคัญคืออิเล็กโทรด (Electrodes) ที่ประกอบด้วยขั้วแอโนด (Anode) ขั้วแคโทด (Cathode) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) โดยหลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแล้วจะไม่มีกระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นในปฏิกิริยา จึงไม่ก่อให้เกิดก๊าซที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันมีอยู่หลายประเภทโดยจำแนกได้ตามชนิดของสารอิเล็กโทรไลต์ที่นำมาใช้งาน

อย่างไรก็ตามการศึกษาแนวทางการผลิตพลังงานทดแทนประเภทไฮโดรเจนและการใช้ประโยชน์จากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพยังมีการศึกษาค้นคว้ากันน้อย ในงานวิจัยครั้งนี้จึงมุ่งที่จะทำการศึกษาศักยภาพการใช้ประโยชน์จากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนผ่านกระบวนการหมักและต่อเนื่องด้วยการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยนำน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารจัดเป็นน้ำเสียที่มีปริมาณสูงและมีแนวโน้มมากขึ้นตามจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และประกอบกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารเป็นน้ำเสียที่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูง มีปริมาณสารพิษปนเปื้อนน้อยกว่าอุตสาหกรรมชนิดอื่น (Oh และ Logan, 2005) จึงมีศักยภาพและความเป็นไปได้ในการนำมาผลิตไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้าได้ ซึ่งทั้งสองกระบวนการดังกล่าวจัดเป็นแนวทางการบำบัดและการจัดการน้ำเสียที่เหมาะสมโดยได้พลังงานทดแทนควบคู่ไปด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนและต่อเนื่องด้วยการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ที่มีองค์ประกอบต่างกัน
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนและต่อเนื่องด้วยการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ที่มีองค์ประกอบต่างกัน
3. เพื่อศึกษาปัจจัยทางสภาพที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้า
4. เพื่อศึกษาการทำงานเบื้องต้นของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพในการผลิตกระแสไฟฟ้า

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ดำเนินการ ณ อุณหภูมิห้อง ที่ห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเป็นการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) มีการกำหนดขอบเขตของการวิจัยต่างๆ ดังนี้

1.3.1 น้ำเสียที่ใช้ในการวิจัยเป็นน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ที่มีองค์ประกอบต่างกัน ได้แก่ น้ำเสียเจือจางของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียจริงของโรงงานผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว และน้ำเสียจริงของโรงงานผลิตช็อกโกแลต

1.3.2 หัวเชื้อ (Seed) ที่ใช้ในการเริ่มเดินระบบเป็นหัวเชื้อแอนแอโรบิกจากระบบบำบัดแบบไร้ออกซิเจนของบริษัท เสริมสุข จำกัด (โรงงานปทุมธานี)

1.3.3 การผลิตไฮโดรเจนดำเนินการในสภาวะไร้ออกซิเจนด้วยระบบแบทช์ (Batch) โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ ขนาด 3.5 ลิตร และทำการไล่อากาศออกด้วยก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 15 นาที ก่อนดำเนินการทดลอง

1.3.4 การผลิตกระแสไฟฟ้าดำเนินการต่อจากการผลิตไฮโดรเจน ด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพนิกดาซนสองใบ (Two - chamber MFC) โดยสารละลายด้านแอโนดเป็นน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารประเภทต่างๆ ที่ผ่านกระบวนการหมักเพื่อผลิตไฮโดรเจนแล้ว ส่วนสารละลายด้านแคโทดเป็นน้ำ และมีการเติมอากาศตลอดเวลาเพื่อเป็นตัวรับอิเล็กตรอน

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อให้ทราบถึงองค์ประกอบและลักษณะน้ำเสียเบื้องต้นของโรงงานอุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ที่มีศักยภาพและความเหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักและการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพนิกดาซน

2. เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหารประเภทต่างๆ ที่มีองค์ประกอบต่างกัน

3. เพื่อนำความรู้ที่ได้รับไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ควบคู่ไปกับการผลิตพลังงานทางเลือก

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญและเป็นแรงขับเคลื่อนที่มีอิทธิพลต่อการพัฒนาประเทศทั้งในด้านเศรษฐกิจ ความมั่นคง และความเป็นอยู่ของประชากร เนื่องจากพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่มีผลต่อกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ โดยเฉพาะในด้านการดำรงชีวิตประจำวัน ด้านอุตสาหกรรม และการขนส่ง เป็นต้น

#### 2.1 ประเภทของพลังงาน

พลังงานแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

##### 2.1.1 พลังงานสิ้นเปลือง (Nonrenewable energy)

คือ แหล่งพลังงานจากใต้พื้นดิน เมื่อใช้หมดแล้วไม่สามารถสร้างขึ้นใหม่หรือหามาทดแทนโดยธรรมชาติได้ทันความต้องการในเวลาอันรวดเร็ว ต้องใช้เวลานานกว่าร้อยล้านปีที่จะสร้างขึ้นมามีได้และมีปริมาณจำกัด พลังงานกลุ่มนี้ได้แก่ พลังงานฟอสซิลและพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป ได้แก่ น้ำมันดิบ (ปิโตรเลียม) ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ

พลังงานที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันส่วนใหญ่มาจากพลังงานสิ้นเปลือง เช่น เชื้อเพลิงฟอสซิลจำพวกน้ำมันดิบ ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ โดยเชื้อเพลิงนี้เกิดขึ้นจากซากพืชซากสัตว์ที่ตายมานานนับล้านปี ทับถมอยู่ใต้ดินจนเปลี่ยนเป็นฟอสซิล จากนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงตามธรรมชาติกลายเป็นน้ำมันดิบ ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งกลายเป็นปัญหาในปัจจุบัน คือไม่สามารถหามาทดแทนการใช้ได้ทัน โลกเราต้องใช้เวลาอันนานเป็นล้านปีกว่าจะผลิตน้ำมันแต่ละลิตรได้ นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เพราะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงจะได้ก๊าซพิษออกมาด้วย เช่น ฟุนละออง เขม่าควัน ไนโตรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซเหล่านี้ทำให้เกิดภาวะโลกร้อนขึ้น หรือเรียกอีกอย่างว่าปรากฏการณ์เรือนกระจก (Green house effect)

##### 2.1.2 พลังงานหมุนเวียน (Renewable energy)

คือ แหล่งพลังงานที่ได้จากธรรมชาติรอบตัวเรา หามาใช้ได้ไม่มีวันหมด ซึ่งสามารถสร้างทดแทนได้ในเวลาสั้น ๆ โดยธรรมชาติหลังจากมีการใช้ไป จึงมีหลายชื่อที่ใช้เรียกได้แก่ พลังงานทดแทน พลังงานสะอาด และพลังงานสีเขียว เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่



ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมนั่นเอง ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานคลื่นในทะเล พลังงานน้ำขึ้นน้ำลง พลังงานชีวมวล พลังงานความร้อนใต้พิภพ และพลังงานไฮโดรเจน ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำพลังงานหมุนเวียนดังกล่าวมาใช้เป็นพลังงานร่วมในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การใช้ประโยชน์จากพลังงานหมุนเวียน จำแนกตามประเภทพลังงานและสาขาเศรษฐกิจในปี พ.ศ. 2547 (หน่วย: พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ)

| ประเภทพลังงานหมุนเวียน                                  | สาขาเศรษฐกิจ |           |                       |                 |               |              |          |
|---|--------------|-----------|-----------------------|-----------------|---------------|--------------|----------|
|   | เกษตรกรรม    | เหมืองแร่ | อุตสาหกรรม<br>การผลิต | การ<br>ก่อสร้าง | บ้านอยู่อาศัย | ธุรกิจการค้า | การขนส่ง |
| เชื้อเพลิงชีวภาพของเหลว<br>(LIQUID BIOFUELS)            | -            | -         | -                     | -               | -             | -            | 45.0     |
| ก๊าซชีวภาพ<br>(BIOGAS)                                  | 0.4          | -         | 21.7                  | -               | -             | 0.4          | -        |
| พลังงานชีวมวลของแข็ง<br>(SOLID BIOMASS ENERGY)          | -            | -         | 4869.0                | -               | 5647.0        | -            | -        |
| พลังงานความร้อน<br>ใต้พิภพ<br>(GEOTHERMAL ENERGY)       | -            | -         | -                     | -               | -             | -            | -        |
| พลังงานน้ำ<br>(HYDRO ENERGY)                            | -            | -         | -                     | -               | -             | -            | -        |
| พลังงานแสงอาทิตย์เชิง<br>ไฟฟ้า<br>(PHOTOVOLTAIC ENERGY) | -            | -         | -                     | -               | 0.4           | 0.5          | -        |
| พลังงานแสงอาทิตย์เชิง<br>ความร้อน<br>(SOLAR REDIATION)  | -            | -         | -                     | -               | -             | 0.2          | -        |
| พลังงานคลื่น น้ำขึ้น<br>น้ำลง<br>(WAVE/TIDAL ENERGY)    | -            | -         | -                     | -               | -             | -            | -        |
| พลังงานลม<br>(WIND ENERGY)                              | -            | -         | -                     | -               | -             | -            | -        |

ที่มา : รายงานของประเทศไทย ปี 2547 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน:

<http://www.dede.go.th/dede/fileadmin/usr/wpd/static/alter-energy47/37table28.pdf>

จากข้อมูลในตารางข้างต้นพบว่าก๊าซชีวภาพที่ได้จากสารชีวมวลเป็นพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากในการผลิตก๊าซชีวภาพนอกจากจะได้พลังงานแล้วยังสามารถลดปริมาณขยะของเสียลงได้ด้วย

สารชีวมวล (biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติและสามารถนำมาผลิตพลังงาน เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น

- แกลบจากการสีข้าวเปลือก
- ชานอ้อยที่ได้จากการผลิตน้ำตาลทราย
- เศษไม้ที่ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัสเป็นส่วนใหญ่ และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้
- กากปาล์มที่ได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด
- กากมันสำปะหลังที่ได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง
- ชังข้าวโพดที่ได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก
- กาบและกะลามะพร้าวที่ได้จากการนำมะพร้าวมาปอกเปลือกออกเพื่อนำเปลือกมะพร้าวไปผลิตกะทิ และน้ำมันมะพร้าว
- ลำห่อที่ได้จากการผลิตแอลกอฮอล์
- รวมไปถึงน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์สูงด้วย เป็นต้น

การนำวัสดุเหล่านี้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงสามารถทำได้หลายวิธี เช่น นำมาเป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในการให้ความร้อนหรือการนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการหมักทางชีวภาพเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานหลัก และมีแนวโน้มการใช้พลังงานสูงขึ้นเรื่อย ๆ แต่แหล่งพลังงานหลักดังกล่าวมีจำนวนจำกัด และปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อนำไปใช้พลังงานจะก่อให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซที่เป็นมลพิษทางอากาศ เช่น  $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{C}_x\text{H}_x$ , ฝุ่น, เขม่าควัน และสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ เข้าสู่ชั้นบรรยากาศซึ่งมลพิษทางอากาศเหล่านี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ฝนกรด และทำให้สภาพอากาศของโลกเกิดการเปลี่ยนแปลงจนทำให้น้ำแข็งบริเวณขั้วโลกเกิดการละลาย ด้วยเหตุนี้เราจึงเริ่มตระหนักถึงปัญหามลพิษที่เกิดขึ้นและจำนวนของแหล่งพลังงานที่กำลังจะหมดไป โดยการเริ่มทำการอนุรักษ์พลังงานอย่างแท้จริง ตลอดจนเร่งดำเนินนโยบายสำรวจค้นคว้าวิจัย และพัฒนาแหล่งทรัพยากรพลังงานอย่างกว้างขวาง เพื่อให้มีพลังงานใช้ทดแทนพลังงานจากแหล่งธรรมชาติที่อาจหมดไปในอนาคต

พลังงานชีวมวลเป็นพลังงานทดแทนทางเลือกหนึ่งที่น่าจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการนำมาใช้เพื่อทดแทนพลังงานรูปแบบดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เพราะพลังงานจากชีวมวลจะเป็นการนำของเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมที่หาได้ง่าย ราคาไม่แพง และมีจำนวนมากมาใช้ให้เป็นประโยชน์ การใช้พลังงานจากชีวมวลยังสามารถนำมาใช้ได้รูปแบบ เช่น การนำมาเผาไหม้โดยตรง หรือนำไปเผาให้พลังงานในเตาไอน้ำ เพื่อใช้พลังงานจากไอน้ำ และการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ และก๊าซไฮโดรเจน เป็นต้น

## 2.2 ก๊าซชีวภาพ (ภนิดา เกษมโชติช่วง, 2549)

ก๊าซชีวภาพเป็นสารที่อยู่ในรูปของก๊าซซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติในภาวะที่เหมาะสม เป็นก๊าซที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยแบคทีเรียชนิดไร้ออกซิเจนในสภาวะไร้ออกซิเจน แหล่งที่เกิดก๊าซชีวภาพ ได้แก่ น้ำเสียของโรงงานแปรรูปสินค้าทางการเกษตรและฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น โรงงานแปรงมันสำปะหลัง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ โรงงานผลไม้กระป๋อง โรงงานผลิตแอลกอฮอล์ และฟาร์มเลี้ยงหมู เป็นต้น

องค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ประมาณ 60-70 % ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ประมาณ 28-38 % และก๊าซอื่นๆ ประมาณ 2 % เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) และก๊าซไนโตรเจน ( $\text{N}_2$ ) เป็นต้น เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบหลัก ดังนั้นจึงทำให้มีคุณสมบัติติดไฟได้ดีและสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น เผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง และนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้กับหม้อต้มไอน้ำ (Steam Boiler) เป็นต้น นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลต่างๆ เช่น เครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซล เป็นต้น หรือเผาเพื่อใช้พลังงานความร้อนร่วมกับการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า

ก๊าซมีเทนที่เกิดด้วยวิธีทางชีวภาพ ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของแบคทีเรียในกลุ่มเมทาโนเจน ลักษณะจำเพาะของแบคทีเรียกลุ่มนี้คือ ต้องอาศัยอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไร้ออกซิเจน แหล่งที่เราสามารถพบแบคทีเรียเหล่านี้ตามธรรมชาติได้แก่ กากตะกอนในบ่อบำบัด กระจาหรือลำไส้ของคน และในโคลนตะกอนขึ้นแฉะ เป็นต้น

แบคทีเรียในกลุ่มเมทาโนเจนเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ไม่ค่อยได้รับการสนใจ มีการศึกษาน้อย แต่เมื่อเกิดวิกฤตการณ์ด้านพลังงาน จึงเป็นแรงกระตุ้นให้นักวิทยาศาสตร์หันมาสนใจศึกษากันมากขึ้นเพื่อที่จะนำพลังงานจากก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์ต่อไป การผลิตก๊าซชีวภาพจะเกิดจากการที่แบคทีเรียนำแหล่งพลังงานจำเพาะมาใช้เพื่อการเจริญเติบโต โดยจะได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งแหล่งพลังงานจำเพาะจะได้มาจากการย่อยสลายอินทรีย์ หรือลักษณะทางธรณีวิทยาของแหล่งที่อยู่อาศัย

## 2.3 ก๊าซไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่เบาที่สุด มีอยู่ในปริมาณมากที่สุด ในจักรวาลและบนโลกนี้ เป็นโมเลกุลที่พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ ธาตุไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบของสสารแทบทุกชนิด ตัวอย่างที่เห็นได้ชัด คือ น้ำอันเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตบนโลก ในน้ำ 1 โมเลกุลจะมีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบถึง 2 อะตอม บรรยากาศในโลกมีก๊าซไฮโดรเจนอยู่ประมาณ 0.1 ส่วนในล้านส่วน (ppm) มีความแข็งแรงในการยึดโมเลกุลเท่ากับ 436 กิโลจูลต่อโมล (104 กิโลแคลอรีต่อโมล) คุณสมบัติทางกายภาพของไฮโดรเจนแสดงดังตารางที่ 2.2 ก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซไม่มีสี และไม่มีกลิ่น เมื่ออยู่ในสภาวะก๊าซจะมีความหนาแน่น 0.0899 กรัมต่อลิตร ในสถานะของเหลวจะไม่มีสี ค่าความหนืดต่ำ เคลื่อนที่ได้เร็ว ในสถานะของแข็งจะเป็นของแข็งไม่มีสี มีลักษณะเป็นโครงสร้างผลึก 6 เหลี่ยม มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ -259.14 องศาเซลเซียส และมีจุดเดือดที่อุณหภูมิ -252.87 องศาเซลเซียส ต้องการพลังงานในการคิดไฟต่านอกจากนี้ กระบวนการนำไฮโดรเจนไปใช้เป็นพลังงานยังไม่ก่อให้เกิดของเสียที่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย เพราะผลผลิตสุดท้ายเมื่อนำไฮโดรเจนไปใช้จะได้เป็นน้ำบริสุทธิ์

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของก๊าซไฮโดรเจน (วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี, <http://th.wikipedia.org/wiki/ไฮโดรเจน>)

| คุณสมบัติ                | ค่าเฉพาะ   |
|--------------------------|--|
| มวลอะตอม                 | 1.00794 กรัม/โมล   |
| สถานะ                    | ก๊าซ   |
| ความหนาแน่น              | (0 องศาเซลเซียส , 101.325 กิโลปาสกาล) 0.08988 กรัม/ลิตร        |
| จุดหลอมเหลว              | 14.01 องศาเคลวิน , -259.14 องศาเซลเซียส                        |
| จุดเดือด                 | 20.28 องศาเคลวิน , -252.87 องศาเซลเซียส                        |
| Triple point             | 13.8033 องศาเคลวิน , 7.042 กิโลปาสกาล                          |
| ความร้อนจากการหลอมเหลว   | 0.117 กิโลจูล/โมล  |
| ความร้อนจากการกลายเป็นไอ | 0.904 กิโลจูล/โมล (25 องศาเซลเซียส)<br>28.826 จูลต่อโมล-เคลวิน |

พลังงานจากก๊าซไฮโดรเจนเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถสร้างทดแทนได้ตลอด และยังให้พลังงานสูงด้วย ก๊าซไฮโดรเจนจึงเป็นแหล่งพลังงานที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน ก๊าซไฮโดรเจนนอกจากจะใช้เป็นพลังงานแล้วยังสามารถนำมาใช้ในรูปแบบต่าง ๆ ได้อีกมากมาย

### 2.3.1 ประโยชน์ของก๊าซไฮโดรเจน

#### - ภาคขนส่ง

ก๊าซไฮโดรเจนสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้ เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในจรวด ใช้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้า เป็นต้น ก๊าซไฮโดรเจนเมื่อเกิดการเผาผลาญจะได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นน้ำบริสุทธิ์ อีกทั้งก๊าซไฮโดรเจนไม่มีวันหมดไปจากโลก ก๊าซไฮโดรเจนสามารถสกัดได้จากน้ำเมื่อเผาผลาญจะได้น้ำกลับมาอีกครั้ง ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงทำให้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นตัวเลือกที่ดีที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน

#### - ภาคอุตสาหกรรม

ก๊าซไฮโดรเจนสามารถนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้หลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันดิบ มีการใช้ไฮโดรเจนในกระบวนการให้ความร้อน (Hydroheating) ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดซัลเฟอร์ และสารตกค้างอื่นๆ ที่ปะปนมาในน้ำมันดิบ อุตสาหกรรมการเกษตรจะใช้ก๊าซไฮโดรเจนเพื่อผลิตปุ๋ยแอมโมเนีย อุตสาหกรรมเคมีจะใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์แอมโมเนีย แอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ และสารเคมีต่างๆ อุตสาหกรรมอาหารจะใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการผลิตน้ำมันพืช เพื่อป้องกันปฏิกิริยาการเกิดออกซิไดซ์ และป้องกันการเกิดกลิ่นเหม็นหืน นอกจากนี้ยังมีการใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการเปลี่ยนน้ำมันเหลวไปเป็นน้ำมันแข็ง เช่น การรีน อุตสาหกรรมโลหะหนักและเหมืองแร่จะใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการผลิตเหล็ก โดยใช้เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนแก่เหล็ก เพื่อเปลี่ยนแปลงและปรับปรุงคุณภาพของเหล็ก นอกจากนี้ยังมีการใช้ก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ในการผลิตทั้งสแตน โพลีคาร์บอนเนต แมกนีเซียม และใช้ก๊าซไฮโดรเจนในการตัด-หลอมแก้วและแร่ควอตซ์

### 2.3.2 วิธีการผลิตก๊าซไฮโดรเจน (สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์ และคณะ, 2547)

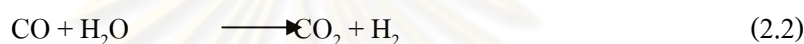
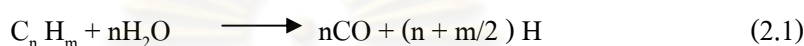
#### - การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีกายภาพและเคมี

##### 1. กระบวนการปฏิรูปด้วยไอน้ำ (Steam Reforming)

กระบวนการรีฟอร์มมิ่งหรือกระบวนการปฏิรูปกับไอน้ำเป็นกระบวนการที่ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูง เสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าวิธีอื่น และเป็นวิธีที่แพร่หลายและนำมาใช้ในการค้าแล้ว โดยหลักการของกระบวนการนี้คือ การดึงธาตุไฮโดรเจนจากไฮโดรคาร์บอนและไอน้ำที่เป็นวัตถุดิบของกระบวนการออกมาให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนให้ได้มากที่สุด ซึ่งกระบวนการผลิตจะประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอน ดังนี้



1. การทำให้วัตถุดิบมีความบริสุทธิ์โดยเน้นที่การกำจัดซัลเฟอร์ออก
2. การเกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยากับไอน้ำของไฮโดรคาร์บอนซึ่งจะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์
3. การเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนสาร (Shift Reaction) ของคาร์บอนมอนอกไซด์ให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์
4. การทำให้ก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์โดยกำจัดเอาก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนคาร์บอนอื่นๆ ออก ขึ้นตอนสำคัญอยู่ที่ขั้นตอนที่ 2 และ 3 ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยปฏิกิริยาดังนี้ คือ



ในกรณีที่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นวัตถุดิบ ก๊าซมีเทนเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในก๊าซธรรมชาติ ดังนั้น  $n$  และ  $m$  ในปฏิกิริยาก็คือ 1 และ 4 ตามลำดับ ปฏิกิริยาที่ (2.1) เรียกว่าปฏิกิริยาลำเร็จรูป (Reforming reaction) ในขณะที่ปฏิกิริยาที่ (2.2) เรียกว่าปฏิกิริยาเปลี่ยนสาร (Shift reaction)

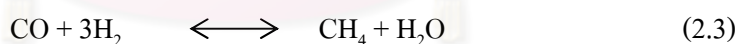
ในการกำจัดซัลเฟอร์ออกจากก๊าซธรรมชาติก่อนทำปฏิกิริยานั้น ก๊าซธรรมชาติจะถูกส่งผ่านเข้าสู่เบดที่บรรจุด้วยซิงค์ออกไซด์ (ZnO) หลังจากนั้นก๊าซธรรมชาติที่ปราศจากซัลเฟอร์จะถูกผสมกับไอน้ำร้อนยิ่งยวด (Superheated Steam) เกิดปฏิกิริยาปฏิกิริยากับไอน้ำขึ้นตามสมการ (2.1) ปฏิกิริยาปฏิกิริยากับไอน้ำนี้เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 760 – 925 องศาเซลเซียส และมีความดันอยู่ที่ 2 เมกกะปาสกาล จึงได้มีการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยานี้ ส่วนประกอบ (เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร) ของก๊าซที่ออกจากเครื่องรีฟอร์มเมอร์แสดงในตารางที่ 2.3

ก๊าซที่ผ่านออกมาจากเครื่องรีฟอร์มเมอร์ซึ่งประกอบไปด้วยก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ จะผ่านเข้าสู่ขั้นตอนการดึงความร้อนออก แล้วป้อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนสาร (Shift Conversion) ที่เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนสารเพื่อผลิตไฮโดรเจนให้ได้เพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาเปลี่ยนสารจะเป็นไปตามสมการ (2.2) ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 200 – 400 องศาเซลเซียส ปฏิกิริยาดังกล่าวจะช่วยทำให้ปริมาณคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลงเหลือประมาณ 0.2 – 0.4 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

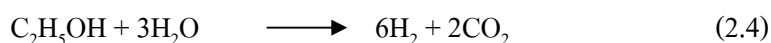
ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของก๊าซที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนสาร

| ส่วนประกอบ      | เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร |
|-----------------|-----------------------|
| H <sub>2</sub>  | 74                    |
| CO              | 18                    |
| CO <sub>2</sub> | 6                     |
| CH <sub>4</sub> | 2                     |
| รวม             | 100                   |

ก๊าซที่ออกจากเครื่องปฏิกรณ์เปลี่ยนสารจะถูกส่งผ่านเข้าหน่วยทำให้ก๊าซบริสุทธิ์ (Gas Purification) เพื่อจะกำจัดคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเปลี่ยนสาร และก๊าซอื่นๆ ออกเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์ วิธีการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ สามารถทำได้หลายวิธี วิธีหนึ่งในวิธีเหล่านั้น คือกระบวนการกำจัดแบบเปียก (Wet Scrubbing) ที่ใช้สารเคมีจำพวกโมโนเอทานอลามีน (Monoethanolamine) ซัลฟินอล (Sulfinol) และโปแทสเซียมคาร์บอเนตร้อน (Hot Potassium carbonate) ในกรณีนี้ยังมีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ หลงเหลืออยู่ ก๊าซเหล่านี้สามารถถูกกำจัดออกโดยจะถูกเปลี่ยนให้เป็นก๊าซมีเทนโดยการเกิดปฏิกิริยาเมทานชัน (Methanation) ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ (2.3) กระบวนการทั้งหมดนี้จะทำให้ไฮโดรเจนที่ได้ขั้นตอนสุดท้ายมีความบริสุทธิ์ถึง 97 ถึง 98 เปอร์เซ็นต์

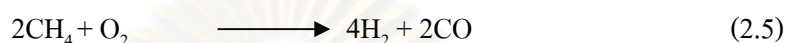


กระบวนการปฏิรูปด้วยไอน้ำเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนที่ต้องการอุณหภูมิสูงจึงมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยานี้ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ประกอบด้วย นิกเกิล ออกไซด์กับอลูมินาและตัวส่งเสริม โดยคุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต้องการคือ ความว่องไว เสถียรภาพ ความแข็งแรงทางกล และความต้านทานต่อการเกาะของคาร์บอนที่ดี ก๊าซที่ผ่านออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ส่วนใหญ่จะประกอบด้วย ก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์รอง ปฏิกิริยาที่เป็นไปได้คือ



## 2. กระบวนการปฏิรูปด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbondioxide Reforming)

กระบวนการปฏิรูปสารประกอบไฮโดรคาร์บอนนอกจากจะใช้ไอน้ำเป็นตัวรีดิวซ์ซึ่งแล้วยังสามารถใช้สารอื่นได้อีก อาทิเช่นคาร์บอนไดออกไซด์ กระบวนการปฏิรูปด้วยไอน้ำจะให้ผลิตภัณฑ์ก๊าซสังเคราะห์ที่มีค่าอัตราส่วนของ  $H_2/CO$  สูง ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตเมทานอลและกระบวนการ Fisher Tropsh ตัวอย่างของปฏิกิริยาปฏิรูปมีเทนด้วยคาร์บอนไดออกไซด์สามารถเขียนได้ดังนี้



ปฏิกิริยาดังกล่าวข้างต้นถูกนำเสนอเพื่อใช้เป็นวิธีการที่ใช้กักเก็บแสงอาทิตย์ในเครื่องปฏิกรณ์เคมีที่เรียกว่า Solar driven volumetric receiver/reactor

## 3. กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน (Partial Oxidation)

โดยหลักการกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน คือ การทำปฏิกิริยาระหว่างสารไฮโดรคาร์บอนกับออกซิเจนที่มีปริมาณไม่เพียงพอต่อการเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จึงเกิดเป็นกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นคือ



ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้เป็นปฏิกิริยาที่ทำลายพันธะระหว่างไฮโดรคาร์บอนกับไฮโดรคาร์บอนซึ่งอาจทำให้เกิดเป็นคาร์บอนเกาะบนตัวเร่งปฏิกิริยาได้

ปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีเทน (Catalytic Partial Oxidation Process, CPO) ได้รับความสนใจจากนักวิจัยทั่วไปทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการที่ใช้ผลิตก๊าซสังเคราะห์นี้มีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่ากระบวนการปฏิรูปที่ใช้ไอน้ำดังต่อไปนี้

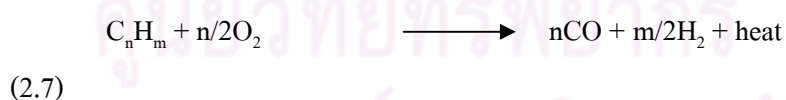
1. ก๊าซสังเคราะห์ที่ผลิตขึ้นได้จะมีค่าสัดส่วน  $H_2/CO$  ต่ำ จึงเหมาะที่ใช้ผลิตเอทานอลและเชื้อเพลิงสังเคราะห์
2. เครื่องปฏิกรณ์เคมีที่ใช้ในกระบวนการแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีเทนนี้ มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเหมือนกระบวนการปฏิรูปโดยใช้ไอน้ำ เพราะไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งป้อนพลังงานจากภายนอก (Externally Fired Heater)

3. กระบวนการแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีเทนจะมีค่าความไวและการเลือกจำเพาะสำหรับผลิตภัณฑ์สังเคราะห์สูง
4. ไม่มีการปล่อยก๊าซพิษที่ไม่ต้องการ เช่น  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  และ  $\text{SO}_x$

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยามีเทน (CPO) คือตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ निकเกิลเป็นตัวหลักกับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ Rh เป็นหลัก ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทหลังนี้จะมีค่าความไว การเลือกจำเพาะ และเสถียรภาพสูง แต่ธาตุ Rh นี้มีปริมาณอยู่น้อยจึงทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ निकเกิลได้รับความสนใจมากกว่า โดยปกติปริมาณของออกซิเดชันที่ป้อนต้องมีค่าสูงกว่าค่าความต้องการตามปริมาณมวลสารสัมพันธ์ของปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน ในกรณีของมีเทนค่าออกซิเดชันต่อมีเทนต้องสูงกว่า 0.5

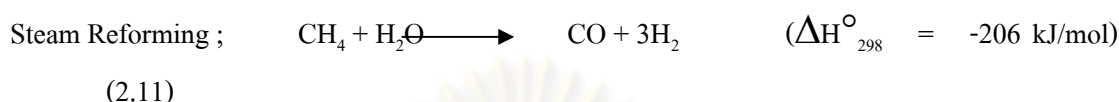
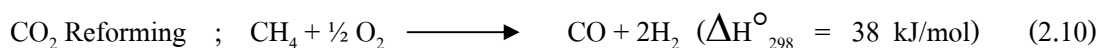
4. กระบวนการออโตเทอร์มอลหรือกระบวนการร่วมระหว่างปฏิกิริยาปฏิรูปด้วยไอน้ำกับปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน (Autothermal or Combined Steam Reforming Partial Oxidation)

กระบวนการปฏิรูปด้วยไอน้ำเหมาะสำหรับการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เบาให้เป็นไฮโดรเจนได้ดี แต่ไม่เหมาะสำหรับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่หนัก จากสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหนักมักต้องใช้กระบวนการร่วมระหว่างการทำออกซิเดชันบางส่วนกับกระบวนการปฏิรูป ทั้งนี้เพราะการทำออกซิเดชันบางส่วนของสารประกอบไฮโดรเจนหนักจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์อยู่สูง จากนั้นคาร์บอนมอนอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับไอน้ำ เพื่อผลิตคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจน ก๊าซออกซิเจนที่ใช้มีความบริสุทธิ์มากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิและความดันสูง

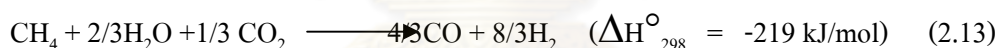


นอกจากนี้ปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนคาร์บอนกับออกซิเจนเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนพลังงานที่ได้นี้สามารถนำไปถ่ายเทให้กับปฏิกิริยาปฏิรูประหว่างสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกับไอน้ำซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน

ตัวอย่างหนึ่งของกระบวนการที่ใช้กระบวนการร่วมคือการเปลี่ยนมีเทน ให้กลายเป็นก๊าซสังเคราะห์โดยใช้กระบวนการร่วมทั้งสาม (CO<sub>2</sub> Reforming, Steam Reforming และ Partial Oxidation) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



กระบวนการดังกล่าวข้างต้น เกิดขึ้นได้ใน 2 ขั้นตอน กล่าวคือ การให้บางส่วนของมีเทนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็นน้ำกับคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอาศัยการออกซิเดชันอย่างเต็มรูปแบบ จากนั้นมีเทนที่เหลือจึงทำปฏิกิริยาปฏิรูปกับน้ำร่วมกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ผลิตได้ เกิดเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังปฏิกิริยารวมต่อไปนี้



ข้อดีของการทำปฏิกิริยาปฏิรูปร่วม คือจะทำให้สามารถปรับค่าอัตราส่วนของ H<sub>2</sub>/CO ให้อยู่ในช่วงตามที่ต้องการ นอกจากนี้ยังเป็นการใช้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียง (CO<sub>2</sub>) ที่เกิดจากปฏิกิริยา Water Gas Shift Reaction (สมการ 2.14) ให้เป็นประโยชน์

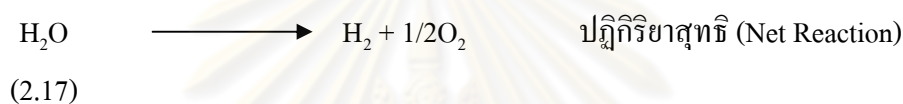
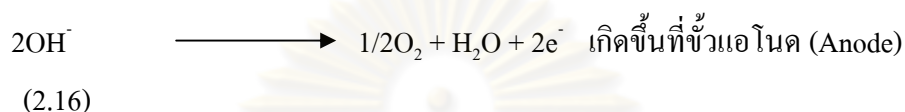
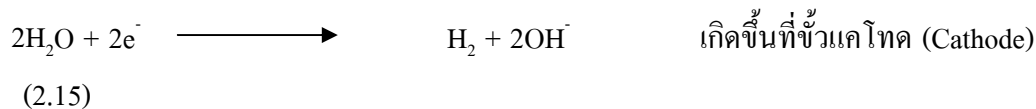


#### 5. การผลิตไฮโดรเจนด้วยปฏิกิริยาอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)

วิธีนี้จะได้ก๊าซไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงโดยอาศัยการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะเข้าไปสลายโมเลกุลของน้ำได้เป็นไฮโดรเจนอะตอมและออกซิเจนอะตอม โดยอาศัยการจุ่มสายไฟสองสายลงในน้ำที่ทำให้ความเป็นตัวนำมากขึ้น แล้วผ่านไฟฟ้ากระแสตรงลงไปตามสายนั้น จึงทำให้เกิดขั้ว 2 ขั้วตรงข้ามกัน คือ ขั้วแคโทดและขั้วแอโนด ไฮโดรเจนอะตอม และ



ออกซิเจนอะตอมจะแยกออกจากกัน โดยไฮโดรเจนอะตอมจะเข้าไปเกาะที่ด้านแคโทด ในขณะที่ออกซิเจนอะตอมจะเข้าสู่ด้านแอโนด แม้ว่าไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีความบริสุทธิ์สูง แต่วิธีนี้ก็มีความสิ้นเปลืองที่สูงตามไปด้วย อีกทั้งต้องใช้ไฟฟ้าจำนวนมาก เนื่องจากในระหว่างการแยกโมเลกุลของน้ำต้องดำเนินการในภาวะที่มีอุณหภูมิสูง



- การผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (มันลิน ตันทุลเวสม์, 2542)

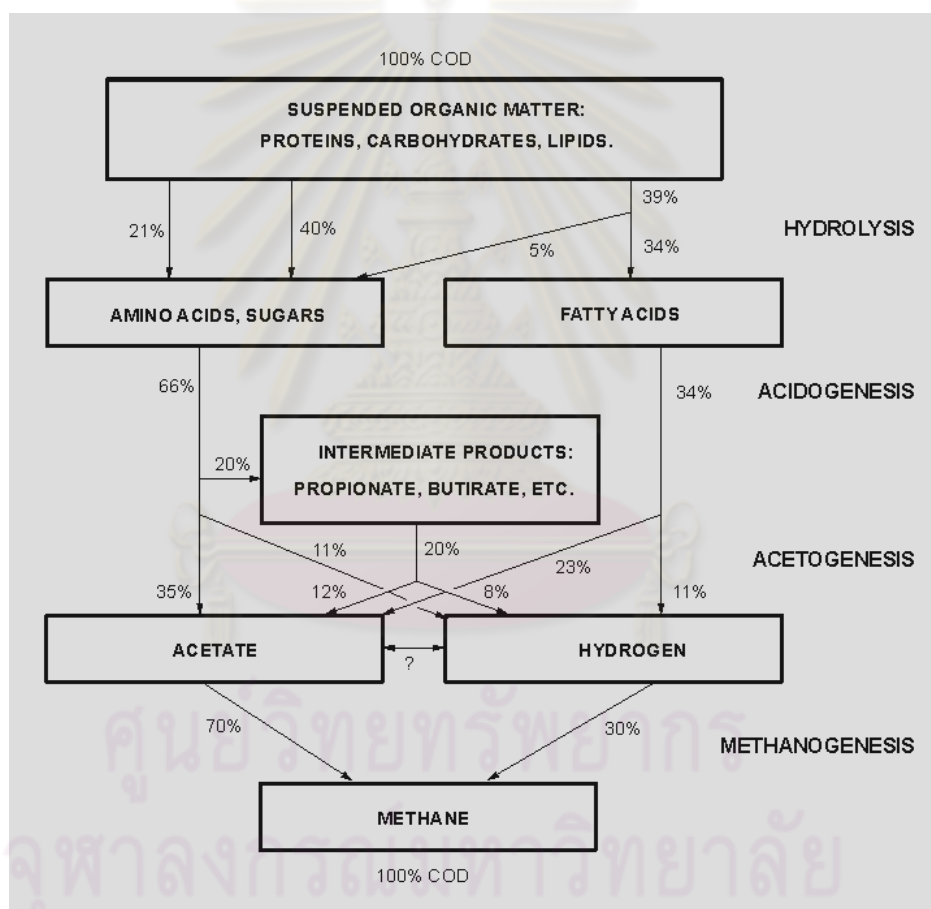
การผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการทางชีวภาพจะอาศัยปฏิกิริยาการย่อยสลายของแบคทีเรียภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ในการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาเหล่านี้ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นได้ต้องอาศัยแบคทีเรียหลายชนิดทำงานร่วมกันในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยแบคทีเรีย 3 กลุ่ม เหล่านี้ ได้แก่ กลุ่มแรกจะเป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็กลงจนแบคทีเรียกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นกลุ่มที่สร้างกรดสามารถนำไปใช้ได้ และกลุ่มสุดท้ายจะเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน ซึ่งขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนตามลำดับ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ไฮโดรไลซิสเป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลใหญ่ (แสดงดังรูปที่ 2.1) เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมันชนิดยาวตามลำดับ ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นได้ภายนอกเซลล์แบคทีเรียโดยอาศัยเอนไซม์ที่แบคทีเรียปล่อยออกมาใช้ในการย่อยสลายดังกล่าว

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรด (Acidogenesis)

ผลผลิตของขั้นตอนที่ 1 จะถูกแบคทีเรียสร้างกรดดูดซึมเข้าไปภายในเซลล์ เพื่อใช้เป็นอาหารและถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid; VFA) ได้แก่ อะซิติก บิวไทริก โพรพิโอนิก เป็นต้น จากนั้นจึงเริ่มผลิตก๊าซไฮโดรเจนกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาโดยกระบวนการทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการย่อยสลายสารประกอบโมเลกุลเล็ก โดยชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสารตั้งต้น (Substrate) และ ความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน (Hydrogen Partial Pressure)



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน (Haandel และ Lubbe, 2007)

### ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยอื่น ๆ (Acetogenesis)

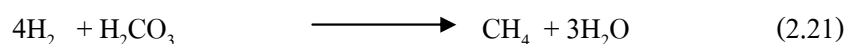
แบคทีเรียอะซิโตจีนิค (Acetogenic bacteria) จะทำการย่อยสลายกรดไขมันระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมให้กลายเป็นกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ภายใต้สภาวะที่มีความดันพาร์เซียลไฮโดรเจนต่ำกว่า  $2 \times 10^{-3}$  บรรยากาศ และต่ำกว่า  $9 \times 10^{-3}$  บรรยากาศ สำหรับการย่อยสลายกรดโพรพิโอนิก และกรดบิวไทริก ตามลำดับ ดังแสดงในสมการที่ 2.18 และ 2.19 ตามลำดับ



ขั้นตอนที่ 3 นี้ จะเกิดขึ้นได้เฉพาะในสภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซียลต่ำเท่านั้น กรดไขมันระเหยไม่สามารถย่อยสลายกลายเป็นกรดอะซิติกภายใต้สภาวะที่ไฮโดรเจนมีความดันพาร์เซียลสูง โดยรูปที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาที่แตกต่างกันในการสร้างกรดไขมันระเหยที่สภาวะความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนที่มีค่าสูงและต่ำ

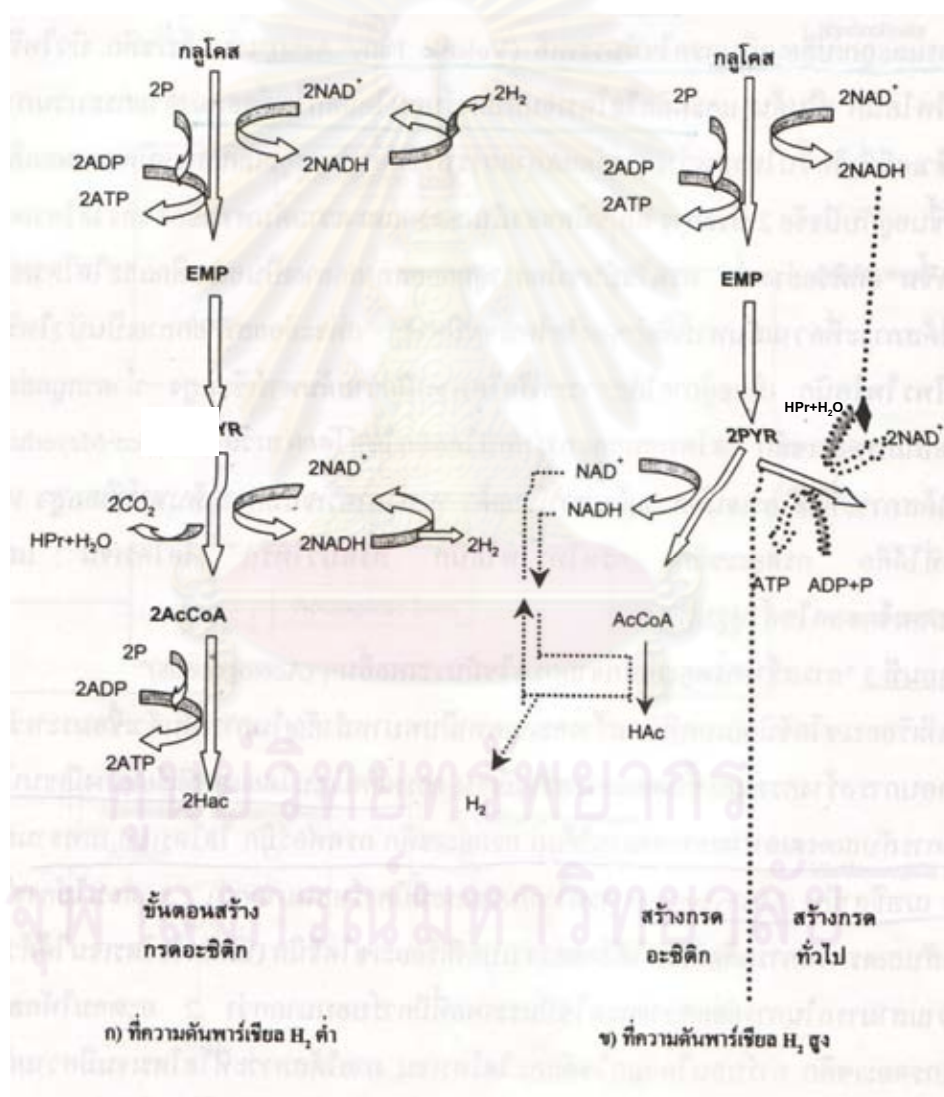
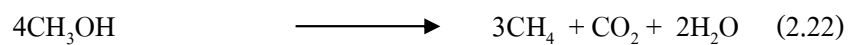
### ขั้นตอนที่ 4 การสร้างมีเทน (Methanogenesis)

กรดอะซิติกและไฮโดรเจนจะถูกแบคทีเรียใช้เพื่อสร้างก๊าซมีเทนภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในสมการที่ 2.20 และ 2.21



กรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมไม่สามารถถูกสร้างเป็นมีเทนได้โดยตรง แบคทีเรียจะต้องเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยต่าง ๆ ให้เป็นกรดอะซิติกหรือไฮโดรเจนเสียก่อนจึงจะใช้ผลิตมีเทนได้ นอกจากกรดอะซิติกและไฮโดรเจนแล้วแบคทีเรียอาจใช้สารตั้งต้นอย่างง่ายอีกใน

การผลิตมีเพียงไม่กี่ชนิดในการผลิตมีเทน เช่น เมทานอลและกรดฟอร์มิก เป็นต้น ดังสมการที่ 2.22 และ 2.23



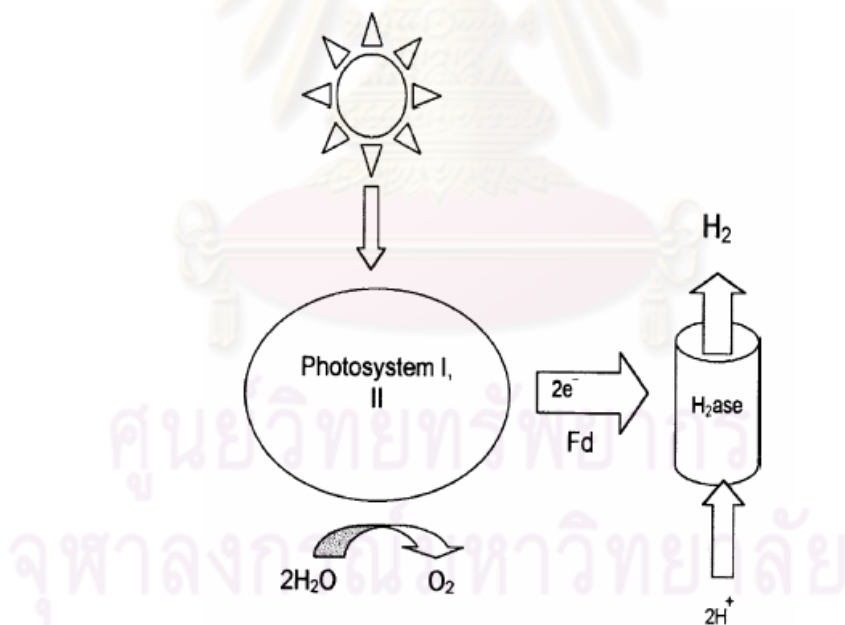
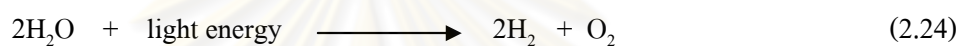
รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาสร้างกรดไขมันระเหยภายใต้สภาวะที่ความดันพาร์เซิลของไฮโดรเจนมีค่าสูงและต่ำ (มันสิน ตัณฑุลเวศม์, 2542)

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีทางชีวภาพสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการใช้แสง (Light-driven process) (Hallenbeck และ Benemann, 2002; Manish และ Banerjee, 2008)

### 1.1 การสังเคราะห์แสงทางชีวภาพโดยตรง (Direct Biophotolysis)

การผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้จะพบได้ในการสังเคราะห์แสงของพืชและสาหร่าย ซึ่งจะใช้พลังงานความร้อนในการเปลี่ยนสารตั้งต้นให้กลายเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน ดังแสดงในสมการที่ 2.24 และรูปที่ 2.3 การสังเคราะห์แสงด้วยวิธีนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีความดันพาร์เชียลของออกซิเจนเข้าใกล้ 1 บรรยากาศ

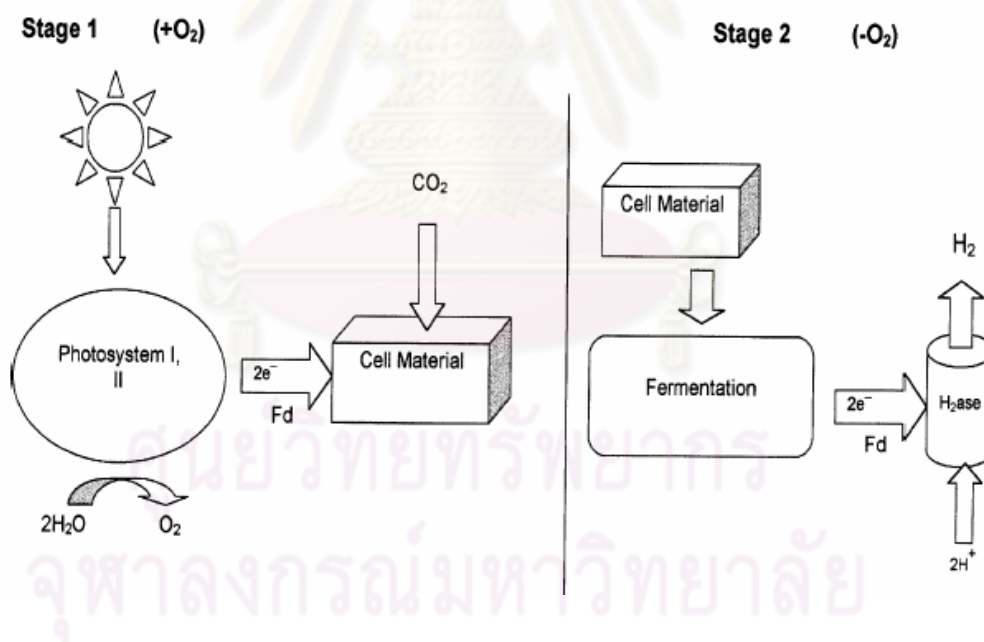
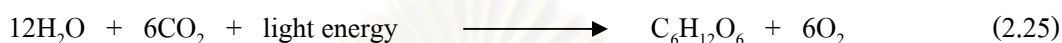


รูปที่ 2.3 การสังเคราะห์แสงทางชีวภาพโดยตรง



## 1.2 การสังเคราะห์แสงทางชีวภาพทางอ้อม (Indirect Biophotolysis)

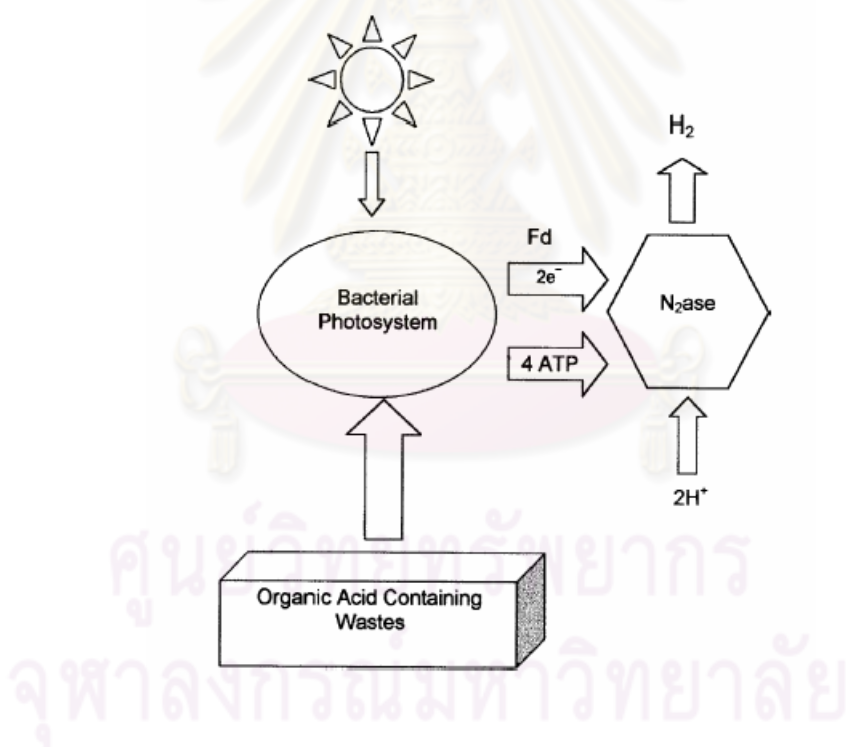
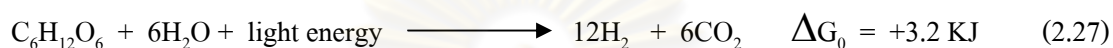
กระบวนการนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.4 คือ การแยกก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนควบคู่ไปกับการใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยไซยาโนแบคทีเรียจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน ในขั้นตอนแรกจะเป็นการแยกก๊าซออกซิเจนออกด้วยไซยาโนแบคทีเรีย ดังสมการที่ 2.25 จากนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะเข้าสู่กระบวนการหมักเพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนดังแสดงในสมการที่ 2.26



รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์แสงทางชีวภาพทางอ้อม

### 1.3 กระบวนการหมักแบบใช้แสง (Photo fermentation)

กระบวนการหมักแบบใช้แสงจัดเป็นกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบที่เรียกว่าใช้กรดอินทรีย์ต่างๆ เช่น กรดอะซิติก เป็นตัวให้อิเล็กตรอน และส่งต่อไปยังเอนไซม์ไนโตรจีเนสด้วยเฟอริดอกซิน (Ferredoxin) จากนั้นเอนไซม์ไนโตรจีเนสจะทำปฏิกิริยากับสารตั้งต้นเพื่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน โดยอาศัยพลังงานภายนอกเป็นตัวกระตุ้น ดังสมการที่ 2.27 และรูปที่ 2.5 แบบที่เรย์ที่พบในปฏิกริยานี้ ได้แก่ *Rhodobacter spheroids*, *Rhodobacter capsulatus*, *Rhodovulum sulfidophilum* W-1S และ *Rhodospseudomonas palustris* เป็นต้น

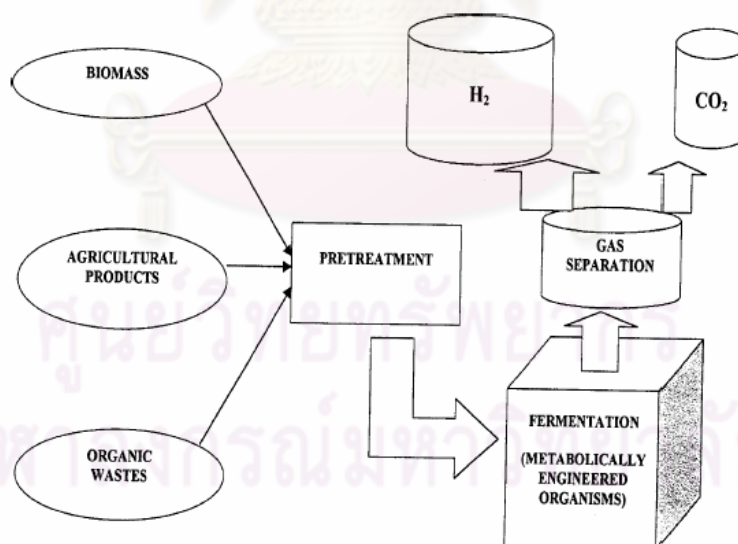


รูปที่ 2.5 กระบวนการหมักแบบใช้แสง

2. การผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการไร้แสง (Dark-driven process) (Hallenbeck และ Benemann, 2002; Manish และ Banerjee, 2008)

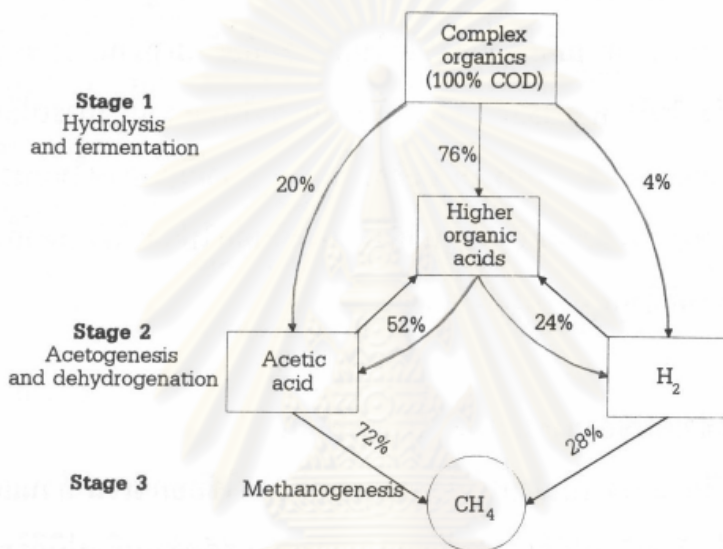
### 1. กระบวนการหมักแบบไร้แสง (Dark fermentation)

การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไร้แสง ดังแสดงในสมการที่ 2.28 เมื่อใช้กลูโคสเป็นสารตั้งต้น กลูโคสจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดไพรูวิก โดยมีโคเอนไซม์ nicotinamide adinine dinucleotide (NAD) เป็นพาหะของอิเล็กตรอนและเมื่อรับอิเล็กตรอนแล้วจะกลายเป็น NADH ส่วนกรดไพรูวิกที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับ NAD<sup>+</sup> กลายเป็นอะซิติกโคเอและมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นด้วย หลังจากนั้นอะซิติกโคเอทำปฏิกิริยาต่อ เมื่อสิ้นสุดปฏิกิริยาจะได้กรดไขมันระเหยชนิดต่างๆ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอลกอฮอล์ แบคทีเรียที่พบในปฏิกิริยานี้ ได้แก่ *Enterobacter sp*, *Bacillus sp* และ *Clostridium sp*. เป็นต้น

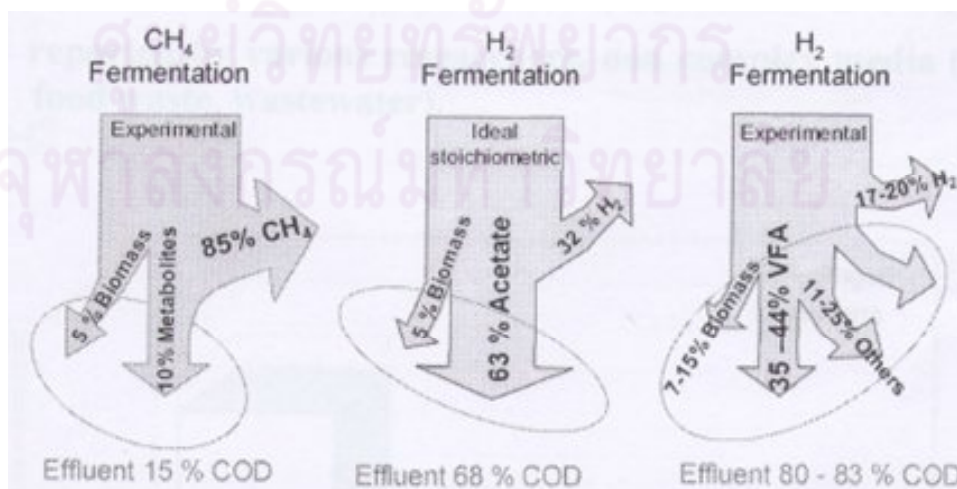


รูปที่ 2.6 กระบวนการหมักแบบไร้แสง

ในปี พ.ศ. 2524 McCarty (Chudoba, 1985) ได้รายงานว่าการผลิตไฮโดรเจนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงซ้อนในกระบวนการไร้ออกซิเจนจะทำให้ค่าซีโอดีเปลี่ยนแปลงน้อยหรือเพียงประมาณ 4 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีที่ไม่มีกระบวนการหมักแบบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.7 โดยยืนยันได้จากสัดส่วนซีโอดีที่เหลือจากกระบวนการหมักแบบต่างๆ ดังรูปที่ 2.8 นั่นคือ การผลิตไฮโดรเจนที่ผ่านกระบวนการหมักจะมีซีโอดีคงเหลือในน้ำทิ้งสูงถึง 80-83 เปอร์เซ็นต์ โดยเป็นองค์ประกอบของชีวมวล 7-15 เปอร์เซ็นต์ กรดอินทรีย์ระเหย 35-44 เปอร์เซ็นต์ และอื่นๆ 11-25 เปอร์เซ็นต์ โดยซีโอดีจะถูกใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเพียง 17-20 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงซ้อนแบบไร้ออกซิเจน (มันสิน ตันกุลเวศม์, 2542)

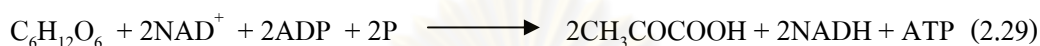


รูปที่ 2.8 ปริมาณซีโอดีที่เหลือจากกระบวนการหมักต่างๆ (Chudoba, 1985)

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

#### - ความดันพาร์เซียของไฮโดรเจน

แบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทนจะดูดซึมกลูโคสเข้าไปย่อยสลายภายในเซลล์ภายใต้วิถีทางชีวเคมีแบบ EMP (Embden-Meyerhof Pathway) โดยกลูโคสจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นกรดไพรูวิก ดังสมการ



แต่ละโมลของกลูโคส จะผลิตกรดไพรูวิก 2 โมล และ ATP 1 โมล โดย NAD จะถูกใช้เป็นพาหะของอิเล็กตรอนและไฮโดรเจน ทำให้เกิด NADH และเนื่องจาก NAD<sup>+</sup> มีอย่างจำกัด จึงต้องมีการปลดปล่อย H<sup>+</sup> ออกจาก NADH ให้กลายเป็น NAD<sup>+</sup> ใหม่เพื่อให้มีพาหะสำหรับขนส่งอิเล็กตรอนตลอดไป โดยปฏิกิริยาฟั่นอำนาจของ NAD<sup>+</sup> เกิดขึ้นได้ดังสมการ



สมการที่ 2.30 สามารถเกิดขึ้นได้เองตรงเท่ากับ H<sub>2</sub> (ในด้านขวาของสมการ) สามารถหนีออกไปจากปฏิกิริยาได้ ถ้าไฮโดรเจนที่อยู่ในบรรยากาศเหนือน้ำมีความดันพาร์เซียต่ำกว่าจนทำให้ไฮโดรเจนละลายน้ำได้น้อยมาก ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นก็จะหนีจากน้ำสู่บรรยากาศได้ง่าย ทำให้สมการที่ 2.30 สามารถเกิดได้จากซ้ายไปขวาได้เอง ทำให้มีการคืนกลับของ NAD<sup>+</sup> เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

กรดไพรูวิกที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อไป กลายเป็นอะเซทิลโคเอ (CH<sub>3</sub>CoA)

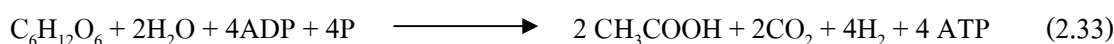


อะเซทิลโคเอจะถูกย่อยสลายต่อไป กลายเป็นกรดอะเซติก พร้อมกับการสร้าง ATP ดังสมการที่ 2.32





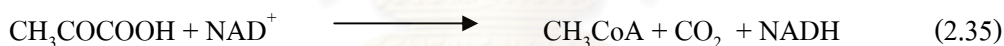
เมื่อรวมสมการที่ (2.29) (2.31) และ (2.32) เข้าด้วยกันจะได้ปฏิกิริยาการหมักที่สมบูรณ์ที่ความดันพาร์เซิลต่ำดังสมการที่ 2.33



เมื่อก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นไม่ถูกนำไปใช้ประโยชน์ จะทำให้มีการสะสมตัวของไฮโดรเจนเกิดขึ้น จนกระทั่งความดันพาร์เซิลมีค่าสูง ทำให้เกิดผลกระทบ เนื่องจากการปลดปล่อย  $\text{H}^+$  ออกจาก NADH นั่นคือ วิธีการปลดปล่อย  $\text{H}^+$  แบบปกติไม่สามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากไฮโดรเจนไม่สามารถหนีออกจากปฏิกิริยาได้ จึงต้องสร้างปฏิกิริยาขึ้นเองเพื่อใช้เป็นปฏิกิริยาควบคุมในการเปลี่ยน NADH ให้กลายเป็น  $\text{NAD}^+$  ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนกรดไพรูวิกเป็นกรดโพรพิโอนิก ดังสมการที่ 2.34



กรดไพรูวิกที่เหลือจากปฏิกิริยาการย่อยสลายกลูโคสอีก 1 โมล จะถูกย่อยเป็นอะเซทิลโคเอดตามปกติ ดังสมการที่ 2.35



แต่ถ้าความดันพาร์เซิลมีค่าสูง การปลดปล่อย  $\text{H}^+$  จะต้องเกิดควบคู่กับการเปลี่ยนอะเซทิลโคเอดเป็นกรดอะซิติก ดังสมการที่ 2.36



เมื่อรวมสมการที่ (2.29) (2.31) (2.35) และ (2.36) เข้าด้วยกันจะได้ปฏิกิริยาการหมักที่สมบูรณ์ที่ความดันพาร์เซิลสูงดังสมการที่ 2.37

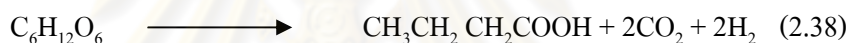


นั่นคือการย่อยสลายกลูโคสในสภาวะที่ความดันพาร์เซิลของไฮโดรเจนต่ำ กลูโคส 1 โมล จะทำให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน 4 โมล ดังสมการที่ 2.33 แต่ในสภาวะที่ไม่มีการใช้ประโยชน์จากก๊าซไฮโดรเจน ทำให้ระบบมีความดันพาร์เซิลของไฮโดรเจนสูงขึ้นนั้น จะส่งผลให้ก๊าซไฮโดรเจน

ที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลง คือ การย่อยสลายกลูโคส 1 โมล จะสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้เพียง 1 โมลเท่านั้น ดังแสดงในสมการที่ 2.37 ดังนั้นในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ มีปัจจัยที่สำคัญคือ การควบคุมความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจนให้มีค่าต่ำกว่า  $2 \times 10^{-3}$  บรรยากาศเสมอ

#### - กรดอินทรีย์ระเหย

ในขั้นตอนของกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนจะประกอบไปด้วยขั้นตอนการสร้างกรดที่สามารถสร้างกรดอินทรีย์ระเหยชนิดต่างๆได้ เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิกและกรดบิวไทรค เป็นต้น โดยชนิดและปริมาณมีผลโดยตรงกับปริมาณไฮโดรเจนที่ได้ ซึ่งจากงานวิจัยของ Van Ginkel และคณะ (2005) พบว่า การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักน้ำตาลกลูโคส จะเกิดได้ทั้งกรดอะซิติกและกรดบิวไทรคขึ้น โดยถ้าผลผลิตที่ได้เป็นกรดบิวไทรค ปริมาณไฮโดรเจนที่ได้จะมีปริมาณน้อยกว่าผลผลิตที่เป็นกรดอะซิติก ดังสมการที่ 2.38 และ 2.39



#### - พีเอช

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจนจะประกอบด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่มอาศัยอยู่ร่วมกัน ได้แก่ แบคทีเรียสร้างกรดและแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งแบคทีเรียเหล่านี้จะมีช่วงพีเอชที่เหมาะสมในการเจริญแตกต่างกัน โดยแบคทีเรียสร้างกรดจะเติบโตและทำงานได้ดีที่พีเอชประมาณ 4-6.5 ส่วนพีเอชที่เหมาะสมกับแบคทีเรียสร้างมีเทนจะอยู่ในช่วง 6.5-8.2 (Speece, 1996)

Oh และคณะ (2003) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจน โดยเปรียบเทียบอัตราการผลิตไฮโดรเจนที่พีเอช 6.2 และ 7.5 พบว่าการควบคุมพีเอชของระบบที่ 6.2 ประกอบกับการให้ความร้อนแก่หัวเชื้อเพื่อฆ่าแบคทีเรียที่สร้างมีเทนก่อนการเดินระบบ จะสามารถทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

### - อุณหภูมิ

อุณหภูมิก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจะทำให้แบคทีเรียไม่สามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ได้ทัน อาจส่งผลทำให้แบคทีเรียเหล่านั้นตายหรือทำให้ประสิทธิภาพลดลงด้วย

Lin และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจน โดยทำการเปรียบเทียบการผลิตไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 30-55 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดกับแบคทีเรียผลิตไฮโดรเจน เนื่องจากสามารถผลิตไฮโดรเจนได้มากที่สุด

#### 2.3.4 การคำนวณหาปริมาณก๊าซไฮโดรเจน (Oh และ Logan, 2005)

ปริมาณไฮโดรเจนสะสมที่เกิดจากกระบวนการหมักในการทดลองสามารถคำนวณหาได้จากปริมาณก๊าซชีวภาพและสัดส่วนของก๊าซที่เกิดขึ้นในพื้นที่เกิดก๊าซ (Headspace) ดังแสดงในสมการที่ 2.40

$$V_{H,i} = V_{H,i-1} + C_{H,i}(V_{G,i} - V_{G,i-1}) + V_H(C_{H,i} - C_{H,i-1}) \quad (2.40)$$

- เมื่อ  $V_{H,i}$  = ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่เวลา  $i$  (มิลลิลิตร)  
 $V_{H,i-1}$  = ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมที่เวลา  $i-1$  (มิลลิลิตร)  
 $V_H$  = ปริมาณพื้นที่เกิดก๊าซ (มิลลิลิตร)  
 $V_{G,i}$  = ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เวลา  $i$  (มิลลิลิตร)  
 $V_{G,i-1}$  = ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เวลา  $i-1$  (มิลลิลิตร)  
 $C_{H,i}$  = ความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจน (เปอร์เซ็นต์)

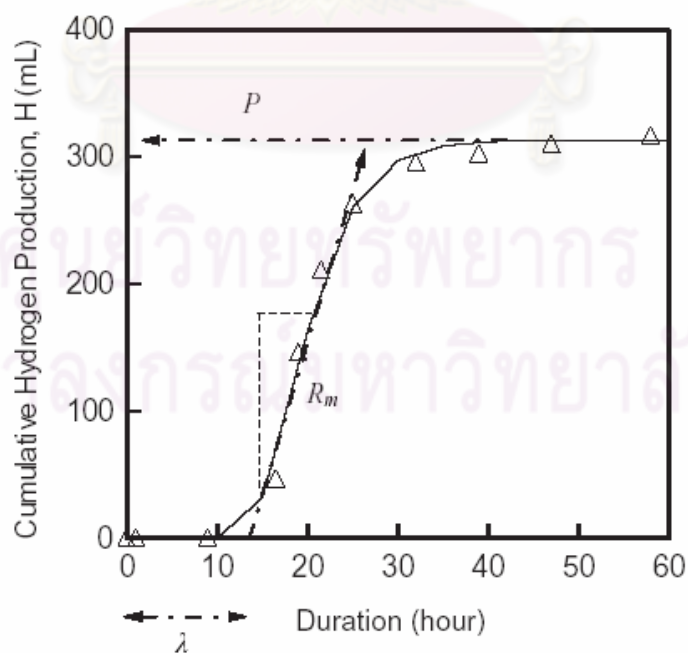
โดยปริมาณก๊าซชีวภาพ สามารถหาได้จากการเก็บข้อมูลด้วยการแทนที่น้ำของก๊าซชีวภาพในแต่ละชั่วโมง และความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนสามารถหาได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีและนำมาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน

### 2.3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ (Khanal และคณะ, 2004)

ปริมาณไฮโดรเจนสะสมจากชุดการทดลองแบบแบทช์จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยสมการ Modified Gompertz (สมการที่ 2.41) ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ซึ่งเมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาจัดรูปเพื่อเปรียบเทียบกับสมการ Modified Gompertz จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ของระยะเวลาเกิดก๊าซเริ่มต้น (Lag time) ปริมาณก๊าซสะสมสูงสุดและอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดได้ดังแสดงในรูปที่ 2.9

$$H_{(t)} = P \exp \left\{ - \exp \left[ \frac{R_m e}{P} (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (2.41)$$

- เมื่อ  $H_{(t)}$  = ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสม (มิลลิลิตร)  
 $P$  = ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น (มิลลิลิตร)  
 $R_m$  = อัตราการเกิดก๊าซ (มิลลิลิตรต่อชั่วโมง)  
 $e$  = 2.71828  
 $\lambda$  = ระยะเวลาเกิดก๊าซเริ่มต้น (ชั่วโมง)  
 $t$  = เวลา (ชั่วโมง)



รูปที่ 2.9 การหาค่าสัมประสิทธิ์จากสมการ Modified Gompertz (Khanal และคณะ, 2004)

## 2.4 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell)

### 2.4.1 ประวัติของเซลล์เชื้อเพลิง (วนัช แก้วโกมินทวงษ์, 2549)

เซลล์เชื้อเพลิงถูกประดิษฐ์ขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1839 โดยเซอร์วิลเลียม โรเบิร์ต โกรฟ (Sir William Robert Grove) ผู้พิพากษาชาวเวลส์ที่เป็นนักประดิษฐ์และนักฟิสิกส์ โดยพื้นฐานความเชื่อที่ว่า เมื่อแยกน้ำด้วยไฟฟ้าจะได้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน ในทางกลับกันเมื่อผสมก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนด้วยวิธีที่เหมาะสมก็ควรจะได้พลังงานไฟฟ้าออกมาเช่นกัน ดังนั้นเขาจึงเริ่มสร้างเครื่องมือทดลองที่เรียกว่า “ก๊าซแบตเตอรี่” เครื่องมือของโกรฟจัดว่าเป็นต้นแบบของเซลล์เชื้อเพลิงในปัจจุบัน จากการทดลองในห้องปฏิบัติการนานหลายปี ในที่สุดโกรฟก็ได้ทดลองผสมไฮโดรเจนและออกซิเจนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือ กรดซัลฟูริก และใช้ขั้วแพลตทินัมทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและน้ำ แต่ในขณะนั้นสิ่งประดิษฐ์ของโกรฟยังไม่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมามากพอที่จะใช้งานได้

คำว่า “Fuel Cell” ถูกใช้ครั้งแรกในปี ค.ศ. 1889 โดยลูดูวิด มอนด์ (Ludwig Mond) และชาร์ลส์ แลงเกอร์ (Charles Langer) ทั้งสองพยายามประดิษฐ์เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้งานได้จริงโดยใช้อากาศและก๊าซถ่านหิน (Coal Gas) นอกจากนี้นักประดิษฐ์ทั้งสองแล้ว วิลเลียม ไวท์ จาคส์ (William White Jaques) ก็ถือเป็นอีกผู้หนึ่งที่ถูกบันทึกว่าเป็นผู้เริ่มใช้คำนี้เช่นกัน โดยจาคส์เป็นนักวิจัยคนแรกที่ใช้กรดฟอสฟอริกเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์

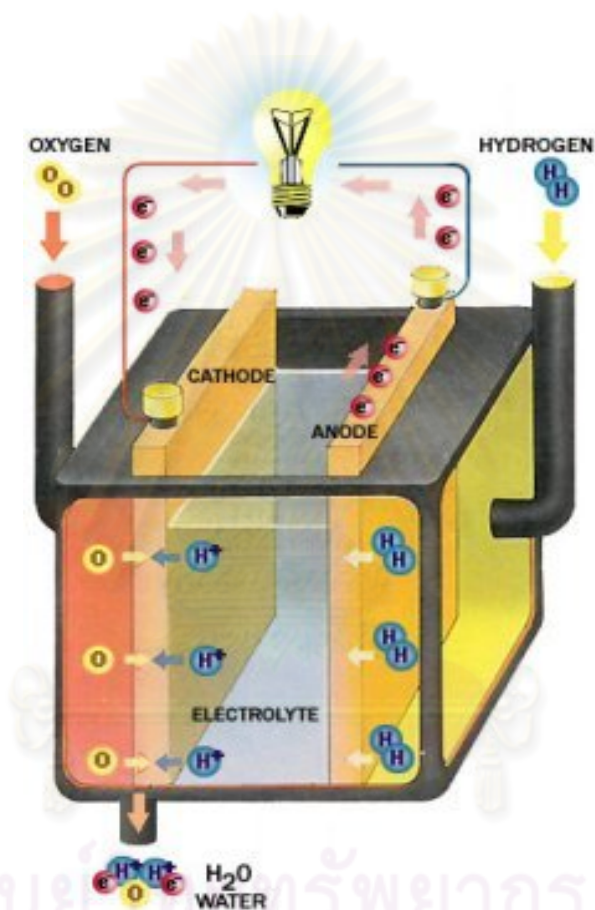
### 2.4.2 นิยามและหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง คือ อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี-ไฟฟ้าระหว่างออกซิเจนกับไฮโดรเจน ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานของเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงไม่ต้องอาศัยการเผาไหม้ ทำให้เครื่องยนต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงนี้ไม่ก่อมลภาวะทางอากาศ

เซลล์เชื้อเพลิงจะประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดที่มีความพรุน 2 ขั้ว (ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด) จุ่มหรือสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอาจอยู่ในรูปของเหลวหรือของแข็งก็ได้ เซลล์เชื้อเพลิงอันได้แก่ ก๊าซธรรมชาติหรือไฮโดรเจนจะถูกป้อนเข้าไปยังขั้วแอโนดในขณะที่ออกซิแดนซ์ (Oxidant) ถูกป้อนเข้าไปที่ขั้วแคโทด ก๊าซไฮโดรเจนก็จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยจะมีการให้หรือปล่อยอิเล็กตรอนออกจากขั้วแอโนด ในขณะที่ปฏิกิริยารีดักชันของก๊าซออกซิแดนซ์ซึ่งเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดจะเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรง (Direct-current หรือ DC) โดยที่ขั้วอิเล็กโทรดทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งปฏิกิริยา (Reaction sites) เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีไฟฟ้าของเชื้อเพลิงและตัวออกซิแดนซ์ขึ้น โดยรูปที่ 2.10 แสดงหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิง คือ ความเงียบในการทำงาน เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ที่เคลื่อนไหว



ไม่มีมลพิษ สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องตราบเท่าที่ยังมีการป้อนเชื้อเพลิงและก๊าซออกซิเจนที่เข้าไปในระบบ โดยเชื้อเพลิงที่ป้อนเข้าไปในที่นี้คือ ก๊าซไฮโดรเจน ในขณะที่ก๊าซออกซิเจนคือ ก๊าซออกซิเจน และเนื่องจากพลังงานรูปนี้จะได้มาเป็นผลผลิตหลักอย่างเดียว จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่าการสันดาป



รูปที่ 2.10 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง (Rabaey และ Verstaete, 2005)

### 2.4.3 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงและข้อดีข้อเสีย (สุทธิพร วารีสุงเนิน, 2550)

เซลล์เชื้อเพลิงสามารถจำแนกตามชนิดของอุณหภูมิในการทำงานและชนิดของสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งปัจจุบันมีเซลล์เชื้อเพลิงอยู่หลายชนิด ดังแสดงในตารางที่ 2.4 ส่วนข้อดีข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงจำแนกตามอุณหภูมิการทำงานและชนิดของอิเล็กโทรไลต์

| ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง                              | อิเล็กโทรไลต์                                    | คุณสมบัติของพลังงาน             | อุณหภูมิในการทำงาน (°C)         | ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า | สถานะ          |
|---|--|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------|
| เมทอลไฮไดรด์ (Metal hydride fuel cell)              | โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์                             | -                               | - 20                            | -                              | ธุรกิจ/วิจัย   |
| อิเล็กโตร-กาวานิก (Electro-galvanic fuel cell)      | โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์                             | -                               | < 40                            | -                              | ธุรกิจ/วิจัย   |
| ซิงค์อากาศ (Zinc-air battery)                       | โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์                             | -                               | < 40                            | -                              | ผลิตออกจำหน่าย |
| จุลชีพ (Microbial fuel cell ; MFC)                  | พอลิเมอร์เมมเบรนหรือกรดฮิวมิก                    | -                               | < 40                            | -                              | วิจัย          |
| รีเวอร์ซิเบิล (Reversible fuel cell)                | โซเดียมไฮดรอกไซด์                                | -                               | 70                              | -                              | ธุรกิจ/วิจัย   |
| ไดเร็กต์ โบโรไฮไดรด์ (Direct borohydride fuel cell) | โซเดียมไฮดรอกไซด์                                | -                               | 70                              | -                              | ธุรกิจ         |
| ด่าง (Alkaline fuel cell)                           | โปตัสเซียมไฮดรอกไซด์                             | 10-100kW                        | < 80                            | เซลล์:60-70%                   | ธุรกิจ/วิจัย   |
| ไดเร็กต์เมทานอล (Direct methanol fuel cell)         | พอลิเมอร์เมมเบรน                                 | 1mW-100kW                       | 90-100                          | เซลล์:62%<br>ระบบ:10-20%       | ธุรกิจ/วิจัย   |
| รีฟอร์มเมทานอล (Reformed methanol fuel cell)        | พอลิเมอร์เมมเบรน                                 | 5W-100kW                        | Reform<br>90-100<br>PBF 125-200 | เซลล์:50-60%<br>ระบบ:25-40%    | ธุรกิจ/วิจัย   |
| ไดเร็กต์เอทานอล (Direct ethanol fuel cell)          | พอลิเมอร์เมมเบรน                                 | สูงถึง<br>140mW/cm <sup>2</sup> | > 25                            | -                              | วิจัย          |
| โปรตอนเอ็กซ์เชนจ์เมมเบรน (Protonexchange membrane)  | พอลิเมอร์เมมเบรน(Nafion หรือ polybenzimidazolen) | 100W-500kW                      | Nafion<br>70-120<br>PBF 125-200 | เซลล์:50-70%<br>ระบบ:30-50%    | ธุรกิจ/วิจัย   |

ตารางที่ 2.4 (ต่อ) ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงจำแนกตามอุณหภูมิการทำงานและชนิดของอิเล็กโทรไลต์

| ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง                         | อิเล็กโทรไลต์                       | คุณสมบัติของพลังงาน | อุณหภูมิในการทำงาน (°C) | ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า | สถานะ        |
|--|-------------------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------|
| กรดฟอสฟอริก<br>(Phosphoric acid fuel cell)     | กรดฟอสฟอริก                         | สูงถึง 10 MW        | 150-200                 | เซลล์:55%<br>ระบบ:40%          | ธุรกิจ/วิจัย |
| ป้อนกลับ<br>(Regenerative fuel cell)           | อิเล็กโทรไลต์เหลวกับรีดอกซ์ซีตเตอร์ | 1kW-10MW            | -                       | -                              | วิจัย        |
| เกลือคาร์บอเนต<br>(Molten carbonate fuel cell) | โซเดียมคาร์บอเนต                    | 100MW               | 600-650                 | เซลล์:55%<br>ระบบ:47%          | ธุรกิจ/วิจัย |
| โปรตอน เซรามิก<br>(Protonic ceramic fuel cell) | โปรตอน เซรามิก ออกไซด์              | -                   | 700                     | -                              | วิจัย        |
| ไคร์คาร์บอน<br>(Direct carbon fuel cell)       | Several different                   | -                   | 700-850                 | เซลล์:80%<br>ระบบ:70%          | ธุรกิจ/วิจัย |
| โซลิดออกไซด์<br>(Solid oxide fuel cell)        | O <sub>2</sub> - เซรามิก ออกไซด์    | สูงถึง 100 MW       | 700-1000                | เซลล์:55%<br>ระบบ:60%          | ธุรกิจ/วิจัย |

ที่มา: สุทธิพร วารีสุนเนิน (2550)

ตารางที่ 2.5 ข้อดีและข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด

| ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง            | ข้อดี  | ข้อเสีย  |
|-----------------------------------|--|--|
| 1. โพรตอนเอ็กเชนจ์เมมเบรน (PEMFC) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- มีอิเล็กโทรดเป็นของแข็ง ซึ่งจะช่วยลดการกัดกร่อนและแก้ปัญหาการกัดกร่อน ทำได้ง่าย</li> <li>- อุณหภูมิในการทำงานต่ำ</li> <li>- การเริ่มต้นการทำงานของระบบทำได้รวดเร็ว</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ทำงานที่อุณหภูมิต่ำต้องใช้ตัวเร่งที่มีอุณหภูมิสูง</li> <li>- มีความอ่อนไหวต่อความบริสุทธิ์ของเชื้อเพลิงสูง</li> <li>- การเริ่มต้นการทำงานของระบบทำได้รวดเร็ว</li> </ul> |
| 2. อัลคาไลน์ (AFC)                | <ul style="list-style-type: none"> <li>- การเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดเร็วมากในอัลคาไลน์อิเล็กโทรไลต์ ทำให้มีสมรรถนะสูง</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้นทุนในการกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเชื้อเพลิงสูง และต้องการระบบระบายอากาศ</li> </ul>  |
| 3. กรดฟอสฟอริก (PAFC)             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ประสิทธิภาพสูงสุดถึง 85 % สำหรับการทำงานของระบบผลิตร่วมระหว่างไฟฟ้าและความร้อน</li> <li>- สามารถใช้กับเชื้อเพลิงไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์ได้</li> </ul>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องการตัวเร่งแพลทินัม</li> <li>- ให้กระแสและกำลังไฟฟ้าต่ำ</li> <li>- ขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก</li> </ul>  |
| 4. แก๊สคาร์บอนเนตเหลว (MCFC)      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ประสิทธิภาพสูง</li> <li>- ใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด</li> <li>- สามารถใช้ตัวเร่งได้หลายแบบ</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ทำงานที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการกัดกร่อนและเซลล์เสียหายได้ง่าย</li> </ul>   |
| 5. โซลิดออกไซด์ (SOFC)            | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ประสิทธิภาพสูง</li> <li>- ใช้เชื้อเพลิงได้หลายชนิด</li> <li>- สามารถใช้ตัวเร่งได้หลายแบบ มีอิเล็กโทรดเป็นของแข็ง ลดการกัดกร่อนและแก้ปัญหาทำได้ง่าย</li> </ul>                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ทำงานที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดการกัดกร่อนและเซลล์เสียหายได้ง่าย</li> </ul>   |
| 6. จุลชีพ                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้อุณหภูมิต่ำ</li> <li>- ไม่สร้างมลภาวะเนื่องจากไม่มีการเผาไหม้</li> <li>- ต้นทุนในการผลิตต่ำ</li> <li>- ไม่ทำให้เกิดการกัดกร่อนของเซลล์</li> </ul>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- ให้กระแสไฟฟ้าในปริมาณที่ต่ำ</li> </ul>  |

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) ข้อดีและข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละชนิด

| ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิง              | ข้อดี   | ข้อเสีย   |
|-------------------------------------|---|---|
| 7. สังกะสี-อากาศ (Zinc-Air battery) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- โลหะสังกะสีที่ใช้ทำขั้วแอโนดมีราคาต่ำ</li> <li>- เซลล์ทำงานได้โดยไม่ต้องใช้สารเร่งปฏิกิริยาและสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลายรูปแบบตั้งแต่ก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์จนถึงน้ำมันเชื้อเพลิง</li> </ul> | - หลังจากทำปฏิกิริยาเคมีแล้วโลหะสังกะสีจะเปลี่ยนเป็นซิงค์ออกไซด์ (ZnO) จึงต้องคอยเปลี่ยนแผ่นสังกะสีใหม่เป็นระยะ |

ที่มา: สุทธิพร วาริสูวณิน, 2550

## 2.5 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ (Microbial fuel cell) (Rabaey และ Verstaete, 2005)

### 2.5.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพของแบคทีเรีย เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพประกอบด้วยขั้วแอโนดและขั้วแคโทดที่แยกกันด้วยเยื่อเมมเบรนหรือสะพานเกลือ ที่บริเวณขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์โดยแบคทีเรียทำให้เกิดอิเล็กตรอนและโปรตอนด้วยปฏิกิริยาดังนี้

- การเกิดอิเล็กตรอนและโปรตอนจากการย่อยสลายกลูโคส (มันติน ตันฑุลเวศม์, 2542; Shukla และคณะ, 2004)

แบคทีเรียจะดูดซึมกลูโคสเข้าไปย่อยสลายภายในเซลล์ผ่านวิถีทางชีวเคมีแบบ EMP โดยกลูโคสจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นกรดไพรูวิก ดังสมการ



และกรดไพรูวิกที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อกลายเป็นอะเซทิลโคเอ ( $\text{CH}_3\text{CoA}$ )

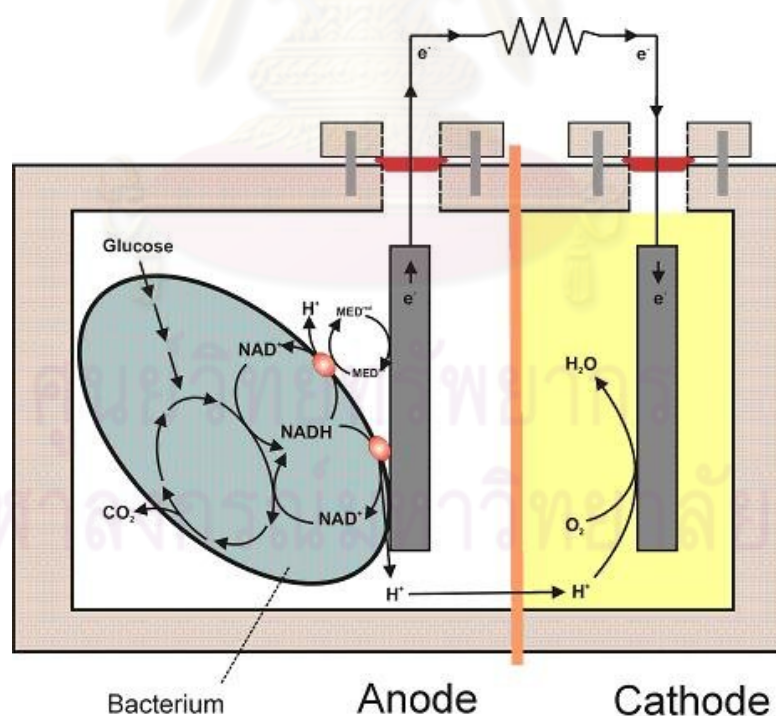


NAD จะถูกใช้เป็นพาหะของอิเล็กตรอนและไฮโดรเจน ทำให้เกิด NADH เนื่องจาก NAD<sup>+</sup> มีอย่างจำกัด จึงต้องมีการปลดปล่อย H<sup>+</sup> ออกจาก NADH ให้กลายเป็น NAD<sup>+</sup> ใหม่เพื่อให้มีพาหะสำหรับขนส่งอิเล็กตรอนตลอดไป โดยปกติการฟื้นอำนาจของ NAD<sup>+</sup> เกิดขึ้นได้ดังสมการ



- หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีวะที่ใช้เมมเบรน

อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายกลูโคสจะเคลื่อนที่ไปที่ขั้วแอโนดด้วยการนำของสารพาอิเล็กตรอนหรือไม่มีสารพาอิเล็กตรอน โดยผ่านวงจรไฟฟ้าด้านนอกไปยังขั้วแคโทดก่อนให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ส่วนโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเมมเบรนไปที่ขั้วแอโนดเช่นกัน เมื่ออิเล็กตรอนและโปรตอนรวมกับออกซิเจนที่ขั้วแคโทดจะเกิดเป็นโมเลกุลของน้ำ ดังรูปที่ 2.11

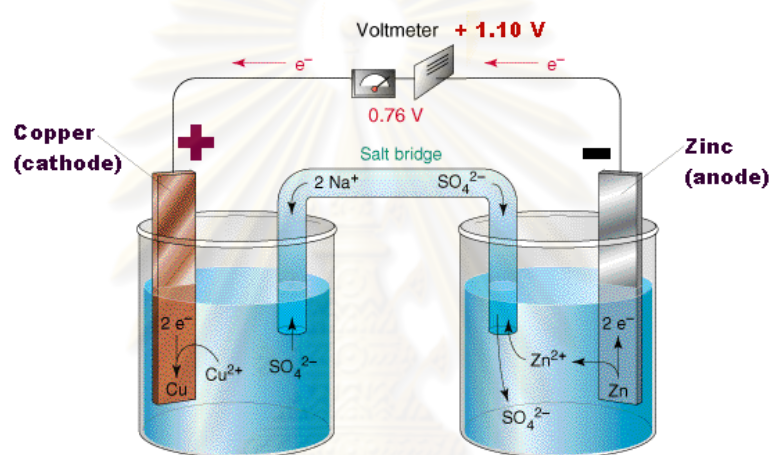


รูปที่ 2.11 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีวะที่ใช้เมมเบรน (Rabaey และ Verstaete, 2005)



- หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจูลซีฟที่ใช้สะพานเกลือ

อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายกลูโคสจะเคลื่อนที่ไปที่ขั้วแอโนดและผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกไปยังขั้วแคโทด ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ส่งผลให้อิเล็กตรอนด้านแอโนดมีปริมาณลดน้อยลง นั่นคืออิเล็กตรอนจากสะพานเกลือจะเข้ามาแทนที่เพื่อให้ระบบมีความสมดุลมากขึ้น ซึ่งหลักการทำงานของสะพานเกลือจะคล้ายกับรูปที่ 2.12 ที่ใช้สะพานเกลือทำจากโซเดียมซัลเฟต เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากด้านแอโนดไปยังด้านแคโทด ประจุบของซัลเฟตจะเข้ามาแทนที่เพื่อให้เกิดความสมดุลของระบบ



รูปที่ 2.12 หลักการทำงานของสะพานเกลือ

(<http://moonie.fccj.org/~ethall/2046/ch18/galvanic.htm>)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

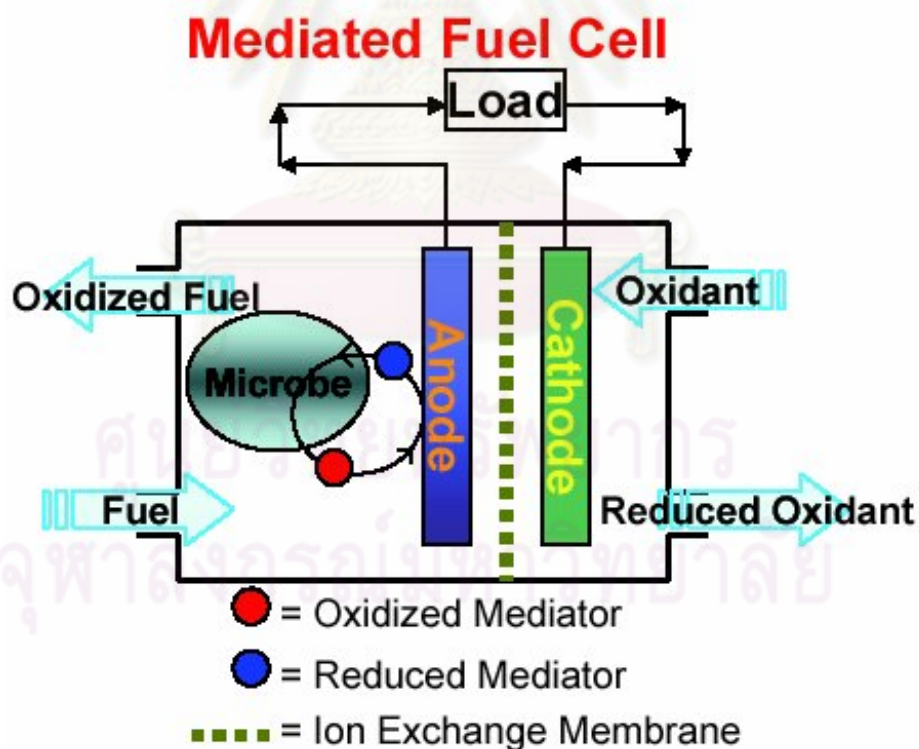
## 2.5.2 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถแบ่งได้โดยใช้หลักเกณฑ์ 2 ประการ คือ

1. การแบ่งประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยใช้สารพาอิเล็กตรอน สามารถแบ่งเซลล์เชื้อเพลิงออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่มีสารพาอิเล็กตรอน (Mediator Microbial Fuel Cell) และเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ไม่มีสารพาอิเล็กตรอน (Mediator-less Microbial fuel cell)

### 1.1 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพชนิดมีสารพาอิเล็กตรอน

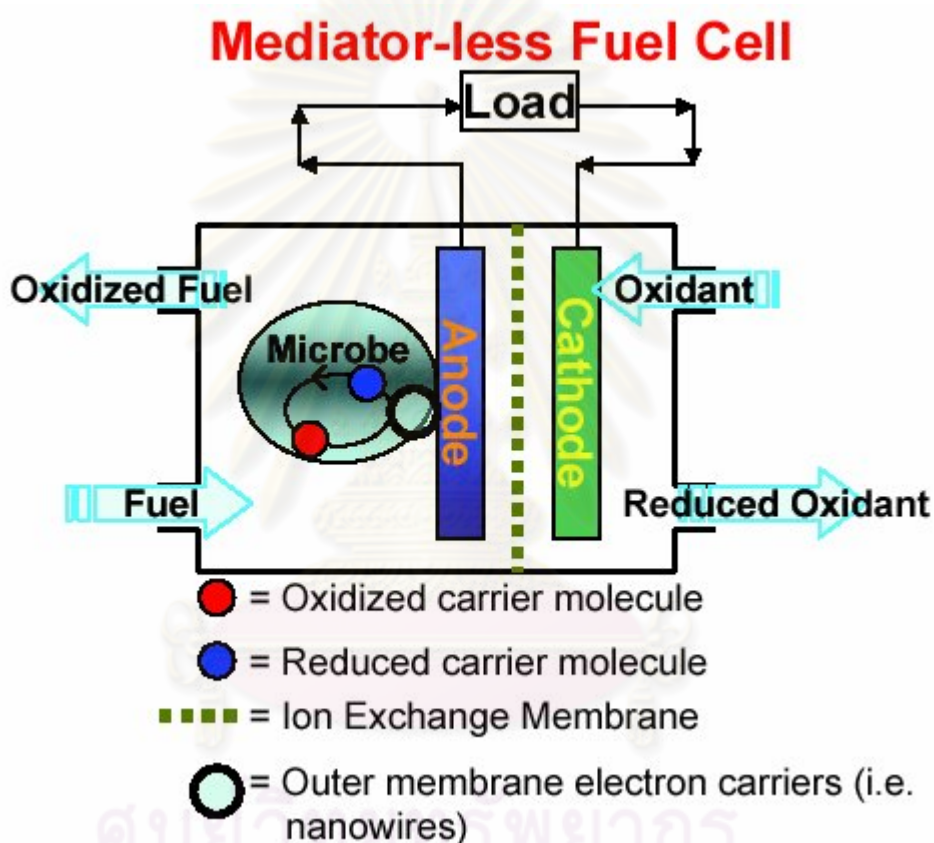
เซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้ใช้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้โดยง่ายเนื่องจากมีสารพาอิเล็กตรอนเป็นตัวนำไปส่งยังขั้วแอโนด (ดังรูปที่ 2.13) เช่น Potassium Ferric Cyanide, Thionine, Methyl Viologen (Methyl blue) และ Neutral Red แต่สารพาอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะมีราคาแพงและมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรีย



รูปที่ 2.13 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพชนิดมีสารพาอิเล็กตรอน (Ken, 2006)

## 1.2 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพชนิดไม่มีสารพาอิเล็กตรอน

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปที่ขั้วแอโนดได้โดยอาศัยแบคทีเรียซึ่งมีบทบาทในการเป็นตัวช่วยสลายสารอินทรีย์ในระบบเป็นตัวพาอิเล็กตรอนไปที่ขั้วแคโทดโดยตรง (ดังแสดงในรูปที่ 2.14) แบคทีเรียที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ที่ได้รับการศึกษาในอดีต ได้แก่ *Shewanella putrefaciens* และ *Aeromonas hydrophila*



รูปที่ 2.14 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพชนิดไม่มีสารพาอิเล็กตรอน (Ken, 2006)

2. การแบ่งประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพตามจำนวนภาชนะในการเกิดปฏิกิริยาซึ่งมีความแตกต่างกันของสารรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดซึ่งสามารถจำแนกย่อยได้เป็น 2 ชนิด คือ เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะใบเดียว (One-chamber MFC) และเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบ (Two-chamber MFC)

### 2.1 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะใบเดียว

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพประเภทนี้ประกอบด้วยส่วนทำปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในภาชนะใบเดียว ซึ่งบรรจุขั้วแอโนดและแคโทดรวมกัน โดยที่ขั้วแคโทดจะเป็นท่อกลวงอยู่บริเวณกลางภาชนะ ซึ่งมีการเป่าอากาศที่อัตรา 4.5-5.5 ลิตรต่อนาที (Lui และคณะ, 2004) ผ่านเข้าไปเพื่อใช้เป็นสารรับอิเล็กตรอน (ดังรูปที่ 2.15)



รูปที่ 2.15 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะใบเดียวในรูปแบบต่างๆ (Rabaey และ Verstaete, 2005)

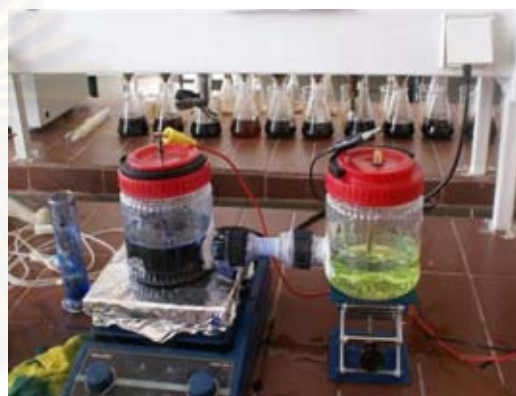


## 2.2 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบ (Two-chamber MFC)

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพประเภทนี้ใช้ขั้วแอโนดและแคโทดจะแยกกันเกิดปฏิกิริยาในภาชนะคนละใบโดยเชื่อมกันด้วยสะพานเกลือ (Salt bridge) ดังรูปที่ 2.16 (ก, ข, ค) หรือเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton exchange membrane) ดังรูปที่ 2.16 (ง) โดยภาชนะที่ขั้วแอโนดจะบรรจุน้ำเสียหรือตัวให้อิเล็กตรอน ส่วนที่ขั้วแคโทดจะประกอบด้วยน้ำหรือสารละลายเฟอร์ริกไซยาไนด์และมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.16 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบรูปแบบต่างๆ (Rabaey และ Verstaete, 2005)

### 2.5.3 การคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

ความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่เป็นผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้านแอโนดไปยังด้านแคโทด ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่จากด้านที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังด้านที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ โดยศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จากผลต่างของศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแคโทดและแอโนด (สมการที่ 2.46) หรือการแทนค่าในสมการที่ 2.47

$$\Delta E = E_{cathode}^0 - E_{anode}^0 \quad (2.46)$$

เมื่อ  $E_{cathode}^0$  ; ศักย์ไฟฟ้าด้านแคโทด (โวลต์)

$E_{anode}^0$  ; ศักย์ไฟฟ้าด้านแอโนด (โวลต์)

$$V = IR_t \quad (2.47)$$

$$R_t = R_e + R_i \quad (2.48)$$

เมื่อ  $V$  = ความต่างศักย์ (โวลต์)

$I$  = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

$R_t$  = ความต้านทานรวม (โอห์ม)

$R_e$  = ความต้านทานภายนอก (โอห์ม)

$R_i$  = ความต้านทานภายใน (โอห์ม)

และนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้มาคำนวณหาพลังงานไฟฟ้าได้จากสมการที่ 2.49

$$P = I^2 R_e \quad (2.49)$$

เมื่อ  $P$  = พลังงานไฟฟ้า (วัตต์)



## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.6.1 การผลิตไฮโดรเจน

Oh และคณะ (2003) ทำการศึกษาผลของการควบคุมพีเอชและการปรับสภาพหัวเชื้อด้วยการให้ความร้อนในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน พบว่ามี 2 วิธีที่สามารถควบคุมและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียผลิตไฮโดรเจนได้ คือ การควบคุมพีเอชให้อยู่ที่ประมาณ 6.2 และการให้ความร้อนแก่หัวเชื้อเพื่อนำแบคทีเรียที่ผลิตมีเทนและทำให้แบคทีเรียสร้างไฮโดรเจนอยู่ในรูปสปอร์ อีกทั้งยังพบว่าไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นบางส่วนอาจสูญเสียไปเนื่องจากแบคทีเรียกลุ่ม *Clostridium* ได้แก่ *C.aceticum* และ *C.thermoautotrophicum* ใช้ในการผลิตกรดอะซิติก



และไฮโดรเจนยังอาจสูญเสียไปได้จากการเปลี่ยนรูปกรดอะซิติกเป็นเอทานอล เมื่อมีความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนสูง แต่เมื่อความดันพาร์เชียลไฮโดรเจนเท่ากับ 4 ปาสคาล ก็จะทำให้ปฏิกิริยาย้อนกลับได้



Khanal และคณะ (2004) ศึกษาผลของพีเอชและผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นต่อการผลิตไฮโดรเจนจากการหมักน้ำเสียน้ำตาลซูโครสและน้ำเสียแป้งมัน โดยทำการทดลองที่พีเอช 4.5-6.5 พบว่าการทดลองที่พีเอชเริ่มต้นกับ 4.5 จะมีศักยภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 214 และ 125 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมซีโอดีสำหรับน้ำเสียน้ำตาลซูโครสและน้ำเสียแป้งมันตามลำดับ โดยแสดงอัตราการเกิดก๊าซน้อยกว่าที่พีเอชอื่น แต่มีระยะเวลาการเกิดก๊าซนานที่สุดและเมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักซึ่งได้แก่กรดอินทรีย์ระเหยจำพวกกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิกและกรดบิวไทริก พบว่าเมื่ออัตราส่วนระหว่างกรดอะซิติกต่อกรดบิวไทริก (HAc/HBu) มีค่าลดลงจะทำให้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเริ่มมีค่าคงที่และลดต่ำลงในที่สุด ซึ่งสันนิษฐานได้ว่ากรดบิวไทริกเป็นตัวยับยั้งการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

**Van Ginkel และคณะ (2005)** ทำการทดลองผลิตไฮโดรเจนชีวภาพ (Biohydrogen) จากน้ำเสีย 4 ประเภท ได้แก่ น้ำเสียแอมเปิล น้ำเสียมันฝรั่ง น้ำเสียอาหารแปรรูปจากธัญพืช และน้ำเสียชุมชน จากการทดลองพบว่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นประกอบด้วยไฮโดรเจนประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสามารถทำให้ชีโอดีลดลงได้ประมาณ 5-11 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำเสียมันฝรั่งผลิตไฮโดรเจนได้มากที่สุดเท่ากับ 2.1-2.8 ลิตรต่อลิตรน้ำเสีย และยังพบอีกว่าการเติมสารอาหารไม่ได้ทำให้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น นั่นคือ ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณชีโอดีแต่จะขึ้นอยู่กับอนุภาคของสารตั้งต้น ถ้าสารตั้งต้นมีความซับซ้อนมากและมีขนาดใหญ่ จะทำให้การย่อยสลายยากกว่าสารที่มีความซับซ้อนน้อยและมีอนุภาคเล็ก จึงทำให้ผลิตไฮโดรเจนได้น้อยกว่าด้วย

**Ginkel และ Logan (2005)** ทำการศึกษาการยับยั้งการเกิดก๊าซไฮโดรเจน โดยทำการเปรียบเทียบการยับยั้งที่เกิดจากการเติมกรดอะซิติกและกรดบิวไทรคจากภายนอก กับปริมาณกรดอะซิติกและกรดบิวไทรคที่เกิดขึ้นเอง จากการเพิ่มความเข้มข้นของกลูโคส ผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการเติมกรดอะซิติกและกรดบิวไทรคจากภายนอกที่ความเข้มข้น 25 มิลลิโมล จะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนลดลง 13 และ 22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดอะซิติกและกรดบิวไทรคเป็น 60 มิลลิโมล จะทำให้ไฮโดรเจนลดลงกว่า 93 เปอร์เซ็นต์ ส่วนการยับยั้งที่เกิดจากกรดอะซิติกและกรดบิวไทรคที่เกิดขึ้นเอง พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลูโคสจนถึง 40 กรัม กลูโคสต่อลิตร จะทำให้ไฮโดรเจนลดลงจาก  $2.0 \pm 0.2$  โมลไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคส เหลือ  $1.6 \pm 0.1$  โมลไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคส นั่นคือ กรดอะซิติกและกรดบิวไทรคที่เกิดขึ้นเองจากการเติมกลูโคสมีผลต่อการยับยั้งการเกิดไฮโดรเจนมากกว่าการเติมกรดอะซิติกและกรดบิวไทรคจากภายนอก ดังนั้นหากต้องการให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณมาก ไม่ควรเริ่มต้นจากกลูโคสที่มีความเข้มข้นสูงเกินไป เพื่อให้กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นไม่มีผลยับยั้งการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

**Sangyoka และคณะ (2007)** ทำการทดลองผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง พบว่ากลูโคสในน้ำเสียมีปริมาณลดลง ในขณะที่ก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป 72 ชั่วโมง ทำให้ทราบว่ากลูโคสถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานในการผลิตไฮโดรเจน และผลจากการหมักน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังจะพบกรดอินทรีย์ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวไทรคและกรดไพโรพิอิก โดยกรดบิวไทรคจะเกิดขึ้นเมื่อไฮโดรเจนเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัว และอัตราส่วนระหว่างกรดบิวไทรคต่อกรดอะซิติกจะเป็นตัวบ่งบอกถึงการผลิตไฮโดรเจน หากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงจะส่งผลให้ไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นน้อยลงตามสมการ



**Toa และคณะ (2007)** ทำการทดลองผลิตไฮโดรเจนจากน้ำตาลซูโครสโดยกระบวนการหมักแบบสองขั้นตอน คือ การหมักแบบไร้แสง และตามด้วยการหมักแบบใช้แสง จากการทดลองพบว่าเมื่อทำการหมักแบบสองขั้นตอนจะทำให้ปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 3.67 โมลไฮโดรเจนต่อโมลซูโครส เป็น 6.63 ไฮโดรเจนต่อโมลซูโครส และการหมักแบบใช้แสงยังทำให้กรดอินทรีย์ต่างๆ ลดลงด้วย โดยที่พีเอชเท่ากับ 6 เป็นพีเอชที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำตาลซูโครส และยังพบอีกว่าความเข้มข้นของซูโครสที่มากกว่า 25 กรัมต่อลิตร จะทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียผลิตไฮโดรเจน ส่งผลให้ต้องใช้เวลาในการย่อยมากกว่าซูโครสที่มีความเข้มข้นน้อย

## 2.6.2 การผลิตกระแสไฟฟ้า

**Oh และคณะ (2004)** ทำการศึกษาถึงลักษณะของขั้วแคโทดที่มีผลต่อการเกิดกระแสไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบระหว่างขั้วแคโทดที่ทำจากคาร์บอนและทำจากคาร์บอนที่มีการเคลือบผิวด้วยแพลททินัม (Pt) พบว่าขั้วแคโทดที่มีการเคลือบแพลททินัมจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามากขึ้น เนื่องจากแพลททินัมที่เคลือบด้านแคโทดจะทำหน้าที่เป็นตัวคะตะลิสและทำให้ศักย์ไฟฟ้าด้านแคโทดสูงขึ้น ส่งผลให้ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดมากขึ้นและทำการเปรียบเทียบขั้วแคโทดที่ทำจากคาร์บอนที่จุ่มอยู่ในสารละลายเฟอร์ริกไซดร้าไนด์กับน้ำที่มีการเติมออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน พบว่าการใช้สารละลายเฟอร์ริกไซดร้าไนด์แทนน้ำในด้านแคโทดจะมีผลทำให้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 50-80 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากสารละลายเฟอร์ริกไซดร้าไนด์มีความต่างศักย์ (322 มิลลิโวลต์) มากกว่าน้ำ (268 มิลลิโวลต์) ทำให้มีผลต่างของความต่างศักย์มากกว่าจึงทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ดีขึ้นส่งผลให้ให้เกิดกระแสไฟฟ้ามากขึ้น และยังพบอีกว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved oxygen ; DO) ซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$P = \frac{P_{\max} * DO}{K_{DO} + DO}$$

เมื่อ  $P_{\max}$  = กำลังไฟฟ้าสูงสุด

$K_{DO}$  = 1.74 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร

ส่วนผลกระทบที่เกิดจากพื้นที่ผิวของขั้วแคโทด คือ กำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น 24 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพื้นที่ผิวของแคโทดเพิ่มขึ้นจาก 22.5 เป็น 67.5 ตารางเซนติเมตร และลดลงถึง 56 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพื้นที่ผิวแคโทดลดลงเหลือ 5.8 ตารางเซนติเมตร

**Min และคณะ (2005)** ทำการศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยใช้เมมเบรนและสะพานเกลือพบว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากใช้สะพานเกลือจะมีปริมาณต่ำกว่ากระแสไฟฟ้าที่ผลิตโดยใช้เมมเบรน เนื่องจากสะพานเกลือมีความต้านทานภายในสูงถึง 19,920 โอห์ม ส่วนเมมเบรนมีความต้านทานภายใน 1,286 โอห์ม ซึ่งกระแสไฟฟ้าสามารถหาได้จากสมการ

$$I = \frac{V}{(R_i + R_e)}$$

- เมื่อ  $I$  = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)  
 $V$  = ความต่างศักย์ (โวลต์)  
 $R_i$  = ความต้านทานภายใน (โอห์ม)  
 $R_e$  = ความต้านทานภายนอก (โอห์ม)

ในการเลือกใช้เมมเบรนควรเลือกเมมเบรนชนิดที่ยอมให้แต่ประจุบวกผ่านเท่านั้น เนื่องจากถ้าออกซิเจนผ่านไปด้านแอโนดได้จะทำให้ด้านแอโนดไม่อยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน มีผลทำให้แบคทีเรียทำงานได้ไม่สมบูรณ์

**Oh และ Logan (2005)** ทำการทดลองผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักและผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร พบว่าสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 0.61-0.79 โมลไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคส และน้ำทิ้งที่เหลือยังมีปริมาณสารอินทรีย์เหลืออยู่ถึง 80-90 เปอร์เซ็นต์ จึงได้นำมาผลิตกระแสไฟฟ้าต่อโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะไบโอดีว พบว่าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ถึง 53.5 มิลลิแอมป์ต่อลิตรน้ำเสีย และยังทำให้น้ำทิ้งที่เหลือมีปริมาณสารอินทรีย์ลดลงถึง 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นได้ว่าการผลิตไฮโดรเจนและต่อเนื่องด้วยการผลิตกระแสไฟฟ้าสามารถทำให้เกิดพลังงานและเป็นการบำบัดน้ำเสียควบคู่ไปด้วย

**Rabaey และ Verstraete (2005)** พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถผลิตพลังงานได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 0.01-1.25 กิโลวัตต์ต่อตารางเมตร เมื่อน้ำเสียมีปริมาณสารอินทรีย์ 0.1-10 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร-วัน และเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะมีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

- อัตราการเปลี่ยนแปลงของสารตั้งต้น

ค่านี้ขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์แบคทีเรีย การผสม การเคลื่อนที่ของมวลในถังปฏิกรณ์ และค่าคงที่เฉพาะต่างๆของแบคทีเรียในการทำปฏิกิริยา เช่น ค่าอัตราการเติบโตจำเพาะสูงสุด ( $\mu_{max}$  ; The maximum specific growth rate of the bacteria) ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีอัตราการเติบโตจำเพาะเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราจำเพาะสูงสุด ( $K_s$  ; The bacteria affinity constant for the substrate) อัตราภาระสารอินทรีย์ (The biomass organic loading) และประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของโปรตอนผ่านเยื่อเมมเบรน

- ศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทด

ปริมาณศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรด ปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วอิเล็กโทรด ความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด ประกอบกับถ้ามีการสูญเสียอิเล็กตรอนในระหว่างการเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดจะทำให้ศักย์ไฟฟ้ามีค่าลดลง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 3

### การดำเนินการวิจัย

#### 3.1 แผนการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิจัยบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยทำการศึกษาศักยภาพและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและการผลิตกระแสไฟฟ้า เมื่อใช้น้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภทเป็นวัตถุดิบ ได้แก่ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต การผลิตก๊าซไฮโดรเจนดำเนินการด้วยกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสง และน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการหมักแล้วจะนำไปผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบ โดยงานวิจัยนี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

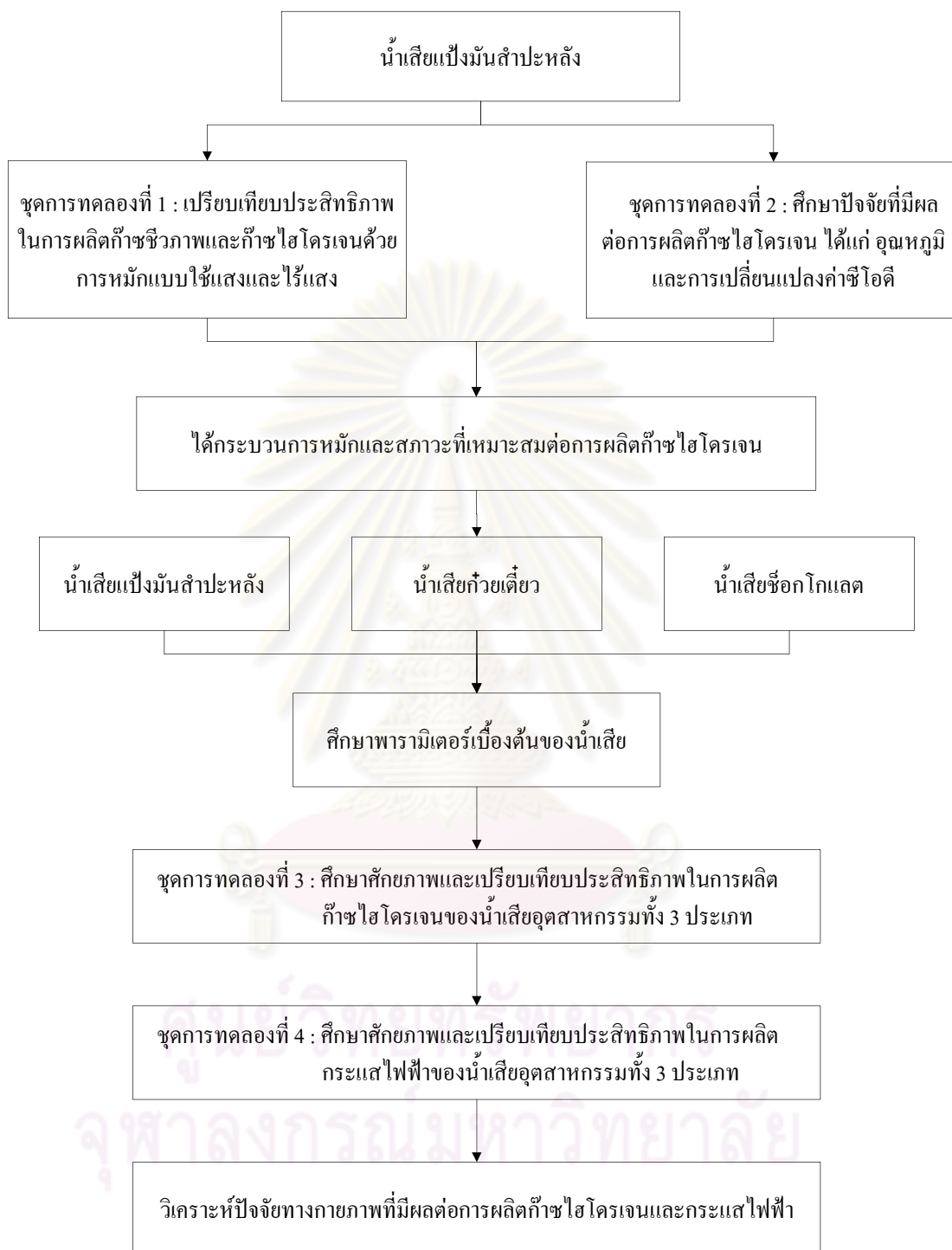
**การทดลองส่วนที่ 1** เป็นการทดสอบเบื้องต้นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและไร้แสง โดยใช้น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบ

**การทดลองส่วนที่ 2** เป็นการทดสอบเบื้องต้นเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าซีโอดีด้วยกระบวนการหมักแบบไร้แสงและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนระหว่างน้ำกลั่นที่ใช้น้ำกลั่นเป็นวัตถุดิบกับน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยควบคุมอุณหภูมิระหว่างการทดลองที่ 50 องศาเซลเซียส

**การทดลองส่วนที่ 3** เป็นการทดลองเพื่อศึกษาศักยภาพและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักแบบไร้แสงที่ทำการควบคุมอุณหภูมิของระบบที่ 50 องศาเซลเซียส โดยใช้น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภทเป็นวัตถุดิบ

**การทดลองส่วนที่ 4** เป็นการศึกษาศักยภาพและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยใช้น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภทที่ผ่านการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแล้วเป็นวัตถุดิบ





รูปที่ 3.1 แผนภูมิสรุปขั้นตอนการดำเนินการทดลอง

### 3.2 การเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

การวิจัยนี้ดำเนินการโดยใช้ตัวอย่างน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง โรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวและโรงงานอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต โดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียแบบจ้วง (Grab Sampling) จากจุดปล่อยน้ำเสียสุดท้ายก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงาน และบรรจุน้ำเสียในภาชนะแช่เย็นในน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาวิเคราะห์หองค์ประกอบเบื้องต้นของน้ำเสีย เช่น ซีโอดี ของแข็งแขวนลอย ฟิเอช ไขมันและน้ำมันและแอมโมเนีย-ไนโตรเจน และมีการเติมกรดซัลฟูริกให้มีฟิเอชต่ำกว่า 2 เพื่อยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียและคงสภาพน้ำเสียไม่ให้เปลี่ยนแปลง

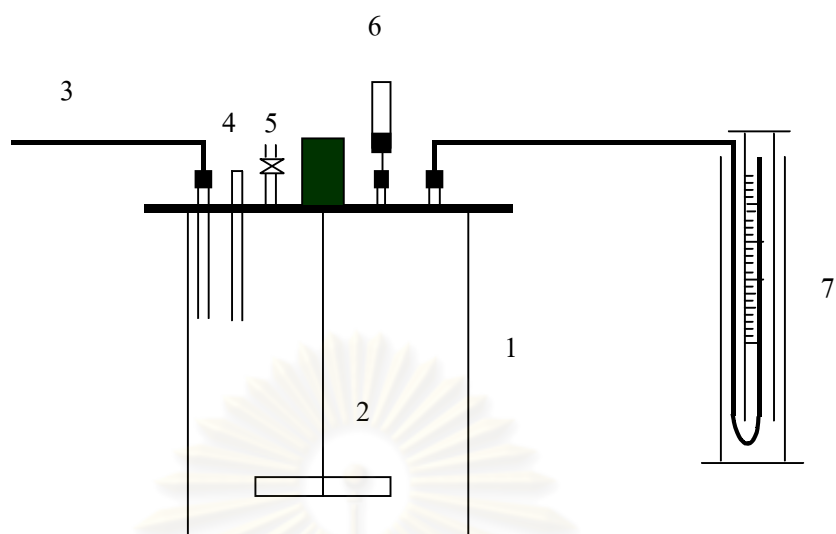
### 3.3 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

#### 3.3.1 ชุดอุปกรณ์ผลิตก๊าซไฮโดรเจน

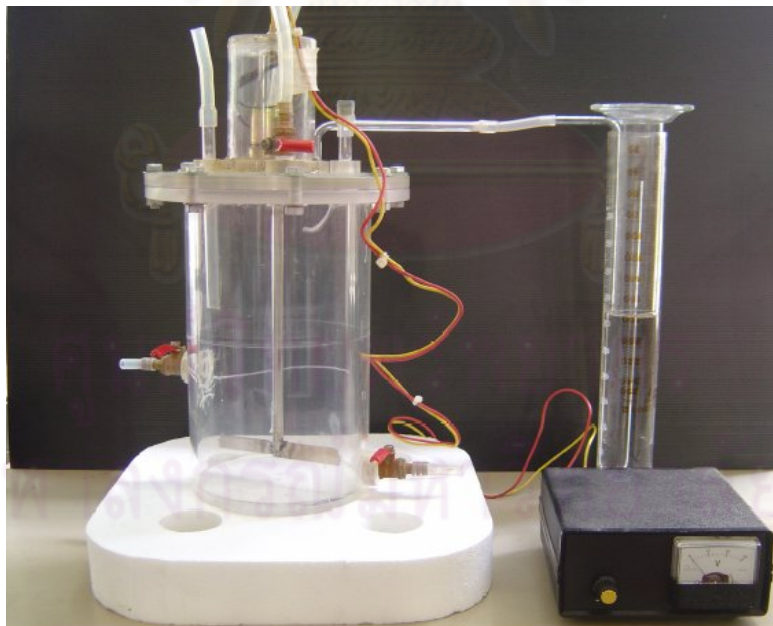
ชุดอุปกรณ์ผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีรายละเอียดผังการต่อชุดอุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และการต่ออุปกรณ์จริงดังรูปที่ 3.3 โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

##### - ถังปฏิกรณ์

- ทำจากอะคริลิก (Acrylic) ใสทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ปริมาตรรวม 3.5 ลิตร
- ใบกวนทำจากสแตนเลสเพื่อป้องกันการเกิดสนิม
- ฝาปิดด้านบนมีช่องสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำเสีย ตัวอย่างก๊าซ วัดปริมาตรก๊าซและจุดปล่อยก๊าซ
- ถังปฏิกรณ์ปิดสนิท และป้องกันการรั่วซึม



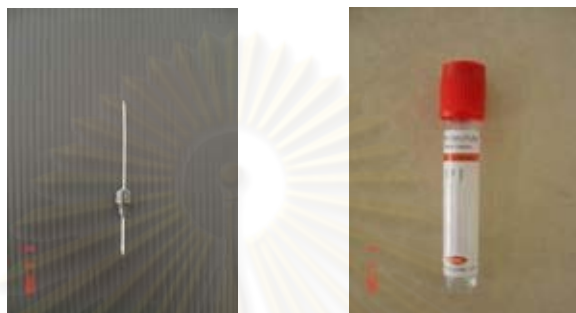
รูปที่ 3.2 ผังการต่อชุดอุปกรณ์ผลิตก๊าซไฮโดรเจน ประกอบด้วย 1. ถังปฏิกรณ์ 2. โบกวน 3. ทางน้ำเข้า 4. จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย 5. จุดปล่อยก๊าซ 6. จุดเก็บตัวอย่างก๊าซ 7. จุดวัดปริมาตรก๊าซ



รูปที่ 3.3 ถังปฏิกรณ์ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสำหรับงานวิจัยนี้

### - อุปกรณ์เก็บก๊าซ

- การวัดปริมาตรก๊าซรวม ใช้หลักการแทนที่น้ำในกระบอกตวงที่บรรจุด้วยน้ำที่มีพีเอชต่ำกว่า 2 เพื่อป้องกันการละลายน้ำของก๊าซต่างๆ จากระบบ
- การเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อนำไปวิเคราะห์ห่าจะใช้เข็ม 2 ปลาย เก็บตัวอย่างจากจุดเก็บตัวอย่างก๊าซและบรรจุในหลอดเก็บเลือดสุญญากาศดังรูปที่ 3.4



(ก) เข็ม 2 ปลาย (ข) หลอดเก็บเลือดสุญญากาศ

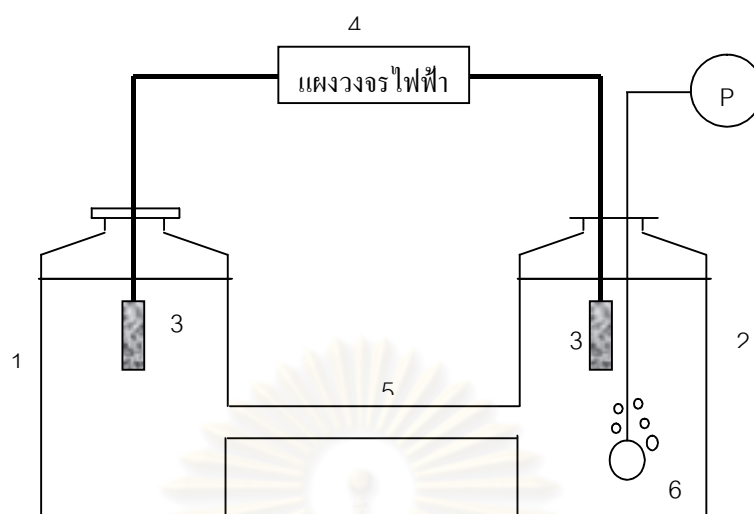
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างก๊าซ

### 3.3.2 ชุดผลิตกระแสไฟฟ้า (Oh, Min และ Logan, 2004)

#### - ชุดเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบ ดังแสดงรายละเอียดผังการต่อชุดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.5 และการเชื่อมต่ออุปกรณ์จริงดังรูปที่ 3.6 โดยมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

- ทำจากขวดพลาสติก โพลีเอทิลีนขนาด 500 มิลลิลิตร เชื่อมต่อกันด้วยสะพานเกลือ (Salt Bridge)
- สะพานเกลือทำจากวุ้น (Agar) และโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 100 กรัมต่อลิตร บรรจุอยู่ในท่อพีวีซีขนาด ½ นิ้ว ความยาว 15 เซนติเมตร
- ขั้วแอโนดและแคโทดทำจากแท่งแกรไฟต์กว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร และหนา 0.3 เซนติเมตร
- ขั้วแอโนดจุ่มอยู่ในขวดบรรจุน้ำเสียที่ผ่านการผลิตไฮโดรเจนแล้ว ส่วนขั้วแคโทดจุ่มอยู่ในขวดบรรจุน้ำกลั่นและมีการเติมอากาศด้วยหัวเติมอากาศตลอดเวลา



รูปที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์ผลิตกระแสไฟฟ้าประกอบด้วย 1. ภาชนะด้านแอโนด 2. ภาชนะด้านแคโทด  
3. แท่งแกรไฟต์ 4. แผงวงจรไฟฟ้า 5. สะพานเกลือ 6. เครื่องเติมอากาศ

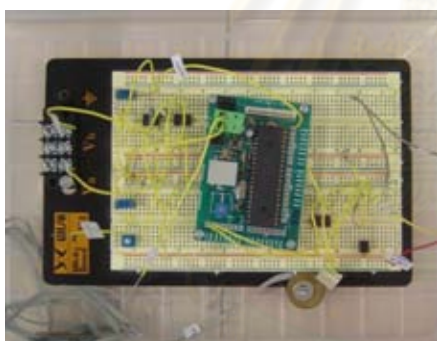


รูปที่ 3.6 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

### - ชุดเก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้า

ชุดเก็บข้อมูลที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยแผงวงจรไฟฟ้า (รูปที่ 3.7 ก) และแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 12 โวลต์ (รูปที่ 3.7 ข) ออกแบบและสร้างขึ้นเฉพาะเพื่อทำการเก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ เมื่อใช้น้ำเสียเป็นวัตถุดิบ ทุกๆ 1 ชั่วโมง โดยแสดงการเชื่อมต่ออุปกรณ์ดังกล่าวกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพและคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 3.7 ค

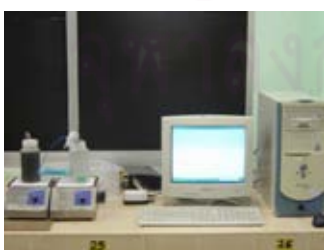
แผงวงจรไฟฟ้าที่สร้างขึ้นประกอบด้วย Operational Amplifiers (OPAMP) ที่ทำหน้าที่เปรียบเสมือนอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความต้านทานสูงเพื่อป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ทำให้ความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าเที่ยงตรงมากขึ้น และยังทำหน้าที่ขยายค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพื่อทำให้การวัดละเอียดมากขึ้นด้วย โดยความต่างศักย์ที่วัดได้จะอยู่ในระบบแอนะล็อก (Analog) จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) เพื่อทำการแปลงข้อมูลในระบบแอนะล็อกเป็นข้อมูลในระบบดิจิทัล (Digital) และไมโครคอนโทรลเลอร์นี้จะทำหน้าที่สื่อสารกับคอมพิวเตอร์ในการเก็บข้อมูลที่เกิดขึ้นด้วย โปรแกรมที่เขียนแบบ RS 232 ซึ่งเป็นรูปแบบการเขียนโปรแกรมมาตรฐานเพื่อทำการเก็บข้อมูลปริมาณความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นทุกๆ 1 ชั่วโมง



(ก) แผงวงจรไฟฟ้า



(ข) แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง



(ค) การต่อชุดเก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้ากับคอมพิวเตอร์และเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

รูปที่ 3.7 ชุดเก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าและการเชื่อมต่ออุปกรณ์กับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ



### 3.3.3 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

#### - เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องชั่งน้ำหนัก
- เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter)
- เครื่องวัดมัลติมิเตอร์ (Multimeter)
- เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas chromatograph)
- โถทำแห้งพร้อมสารดูดความชื้น
- คู่อบ
- กระจายกรอง GF/C
- เครื่องดูดสูญญากาศ
- เครื่องกวนแบบแม่เหล็ก (Magnetic stirrer)
- อ่างน้ำร้อน (Waterbath)
- เครื่องเติมอากาศแบบหัวฟ่น
- เครื่องคอมพิวเตอร์

#### - สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$  30%)
- กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$  0.5 M)
- สารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต (0.1 N)
- ซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ )
- สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์
- สารละลายมาตรฐานแอมโมเนียมซัลเฟต
- กรดเกลือ
- กรดกำมะถัน
- กรดบอริก

### 3.4 วิธีการทดลอง

#### 3.4.1 การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักไร้ออกซิเจน

##### - น้ำเสียและการเตรียมน้ำเสีย

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริง โดยทำการเก็บจากจุดปล่อยน้ำเสียสุดท้ายของกระบวนการผลิตก่อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมทั้ง 3 ประเภท โดยทำการเก็บแบบจ้วง (Grab Sampling) และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นำมาวิเคราะห์หาพารามิเตอร์เบื้องต้น ได้แก่ ซีโอดี แอมโมเนีย-ไนโตรเจนและไขมันและน้ำมัน โดยน้ำเสียเป้งมันสำปะหลังจะทำการเจือจางให้มีค่าซีโอดีเริ่มต้นประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และทำการเติมสารอาหาร (Logan และคณะ, 2002) 50 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1 กรัมต่อลิตร  $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$  100 มิลลิกรัมต่อลิตร  $\text{NaCl}$  10 มิลลิกรัมต่อลิตร  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  10 มิลลิกรัมต่อลิตร  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  10 มิลลิกรัมต่อลิตร  $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  15 มิลลิกรัมต่อลิตร และ  $\text{FeCl}_2$  2.78 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมฟอสเฟตบัพเฟอร์ 50 มิลลิลิตร

##### - หัวเชื้อและการเตรียมหิวเชื้อ

หัวเชื้อที่ใช้ในการทดลองเป็นหัวเชื้อจากระบบยูเอเอสบีของบริษัท เสริมสุข จำกัด นำมาเลี้ยงให้คุ้นเคยกับน้ำเสียคาร์โบไฮเดรต โดยเริ่มต้นที่ซีโอดีประมาณ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงค่าสูงสุดประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลาประมาณ 3 เดือน

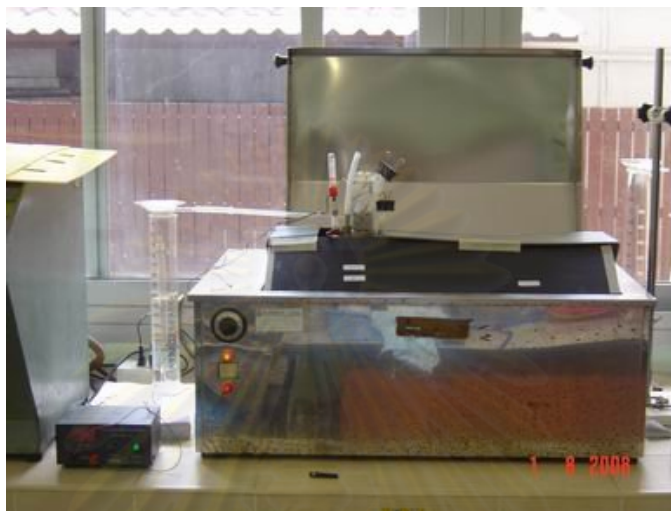
การเตรียมหิวเชื้อทำได้โดยนำหัวเชื้อที่ปรับตัวเข้ากับน้ำเสียแล้วมาทำการปั่นให้หัวเชื้อแตกออกเล็กน้อยเพื่อให้ความร้อนจากการนิ่งด้วยหม้ออัดความดัน (Autoclave) เข้าไปทำลายแบคทีเรียสร้างมีเทนอย่างทั่วถึง โดยใช้อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อควบคุมประชากรแบคทีเรียให้จำกัดอยู่ในรูปสปอร์ รวมทั้งทำลายแบคทีเรียที่สร้างมีเทน

##### - การเริ่มต้นและสภาวะในการเดินระบบ

นำน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลตและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเป้งมันสำปะหลังที่ทำการเจือจางให้มีปริมาณซีโอดีเริ่มต้นประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มาทำการปรับพีเอชให้เท่ากับ 6 ซึ่งเป็นพีเอชที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจน โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัลเติมสารอาหาร 50 มิลลิลิตร และเติมฟอสเฟตบัพเฟอร์ 50 มิลลิลิตร

ใส่หัวเชื้อที่ผ่านการนิ่งด้วยหม้ออัดความดันปริมาณ 1 ลิตร ลงในถังปฏิกรณ์ขนาด 3.5 ลิตร และเติมน้ำเสียที่เตรียมไว้ลงในถังปฏิกรณ์ จากนั้นทำการไล่อากาศในถังเพื่อให้อยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน

ออกซิเจนด้วยก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 15 นาที ขณะทำการทดลองทำการควบคุมอุณหภูมิโดยแช่ชุดปฏิกิริยาผลิตก๊าซไฮโดรเจนลงในอ่างน้ำร้อนที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 3.8 และควบคุมกระบวนการหมักให้อยู่ในสภาวะไร้แสงด้วยการคลุมชุดปฏิกิริยาด้วยกระดาษดำตลอดเวลา



รูปที่ 3.8 การควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 50 องศาเซลเซียสด้วยอ่างน้ำร้อนปรับอุณหภูมิและควบคุมให้อยู่ในสภาวะไร้แสงด้วยการปิดกระดาษดำตลอดเวลา

- การเก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อการวิเคราะห์

การเก็บตัวอย่างน้ำเสียทำโดยใช้กระบอกฉีดยาขนาด 50 มิลลิลิตร ดูดน้ำเสียส่วนใสในช่องเก็บตัวอย่างน้ำเสียด้านบนของถังปฏิกิริยา หลังจากปิดเครื่องกวนประมาณ 15 นาที เพื่อให้หัวเชื้อตกตะกอน

- การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซและการเก็บตัวอย่างก๊าซ

ปริมาณก๊าซรวมที่เกิดจากระบบทำการตรวจวัดโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำในกระบอกตวงที่บรรจุด้วยน้ำที่มีพีเอชต่ำกว่า 2 โดยบันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันในรูปของปริมาณก๊าซทั้งหมด (Total Gas) มีหน่วยเป็นมิลลิลิตร

การเก็บตัวอย่างก๊าซทำโดยใช้เข็ม 2 ปลายเสียบเข้าที่ช่องสำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซด้านบนของถังปฏิกิริยา ปล่อยให้ก๊าซในถังออกสู่กระบอกแล้วจึงนำหลอดเก็บก๊าซสูญญากาศเสียบเข้าที่ปลายเข็มอีกด้านหนึ่ง ทิ้งไว้จนก๊าซเข้าไปเต็มหลอดเก็บก๊าซ จากนั้นจึงดึงหลอดเก็บก๊าซออกแล้วตามด้วยเข็ม 2 ปลายเพื่อป้องกันก๊าซออกซิเจนเข้าไปปนเปื้อนในหลอดเก็บก๊าซ ดังรูปที่ 3.9 จากนั้นนำ

ก๊าซที่ได้ไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานที่เตรียมขึ้นโดยใช้ไฮโดรเจนเป็นก๊าซมาตรฐาน



รูปที่ 3.9 การเก็บตัวอย่างก๊าซจากถังปฏิกรณ์

### 3.4.2 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบ

#### - การเริ่มต้นและสถานะในการเดินระบบ

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นน้ำเสียที่ผ่านการผลิตไฮโดรเจนแล้ว นำมาปรับพีเอชให้เท่ากับ 7 โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 6 นอร์มัล เติมน้ำอาหาร 25 มิลลิลิตร (Logan และคณะ, 2002) ที่ประกอบด้วย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1 กรัมต่อลิตร  $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$  100 มิลลิกรัมต่อลิตร  $\text{NaCl}$  10 มิลลิกรัมต่อลิตร  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  10 มิลลิกรัมต่อลิตร  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  10 มิลลิกรัมต่อลิตร  $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  15 มิลลิกรัมต่อลิตร และ  $\text{FeCl}_2$  2.78 มิลลิกรัมต่อลิตร และเติมฟอสเฟตบัพเฟอร์ 25 มิลลิลิตร

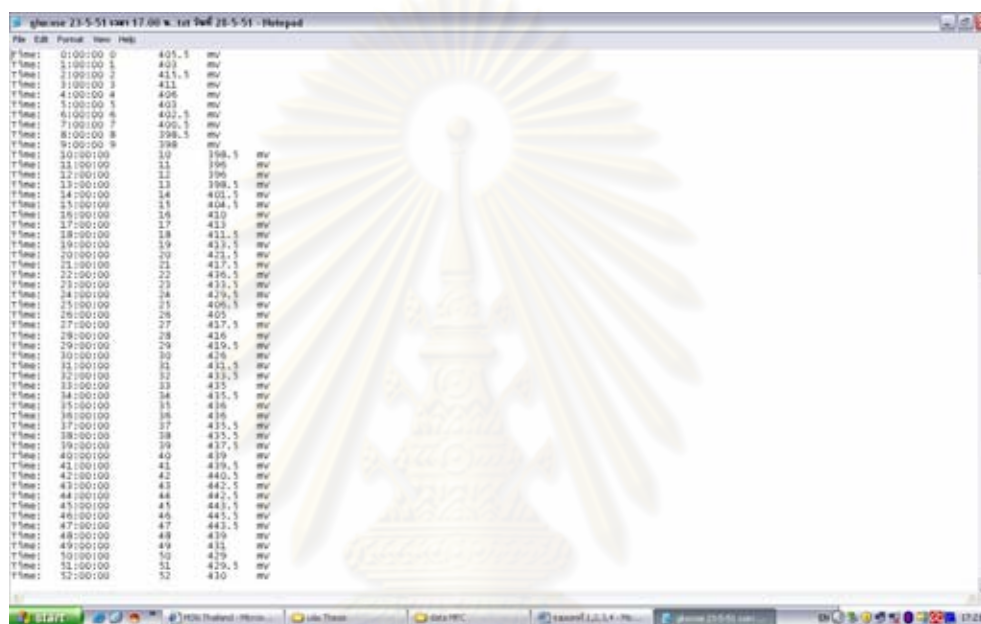
บรรจุหัวเชื้อจากระบบยูเอเอสบีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนปริมาณ 100 มิลลิลิตร ลงในภาชนะด้านแอโนด และตามด้วยน้ำเสียที่เตรียมไว้ให้ท่วมขั้วแกรไฟต์ จากนั้นทำการไล่อากาศเพื่อให้อยู่ในสถานะไร้ออกซิเจนด้วยก๊าซอาร์กอนเป็นเวลา 15 นาที ส่วนภาชนะด้านแคโทดเติมน้ำกลั่นให้ท่วมขั้วแกรไฟต์ และเติมออกซิเจนด้วยหัวเติมอากาศตลอดเวลาเพื่อใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอน

สะพานเกลือที่เชื่อมระหว่างภาชนะด้านแอโนดและแคโทด ทำได้โดยการผสมวุ้นและโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร นำไปให้ความร้อนเพื่อให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปเทใส่ท่อพีวีซีที่เตรียมไว้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $\frac{1}{2}$  นิ้ว ยาว 15 เซนติเมตร

แล้วปล่อยให้เย็นจนแข็งตัว จากนั้นนำมาเชื่อมต่อระหว่างภาชนะทั้งสองด้านและป้องกันการรั่วซึมด้วยซิลิโคน

- การตรวจวัดข้อมูลความต่างศักย์

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการทดลองจะถูกบันทึกโดยอัตโนมัติทุกๆ 1 ชั่วโมง ผ่านวงจรไฟฟ้าที่สร้างขึ้นที่ความต้านทาน 10 เมกกะโอห์ม ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ค่าความต่างศักย์ที่บันทึกลงในคอมพิวเตอร์โดยอัตโนมัติทุกๆ 1 ชั่วโมง

- การเก็บตัวอย่างน้ำเสียเพื่อการวิเคราะห์

การเก็บตัวอย่างน้ำเสียทำโดยใช้กระบอกฉีดยาขนาด 50 มิลลิลิตร ดูดน้ำเสียในภาชนะด้านแอนโอดและนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เพื่อแยกน้ำกับหัวเชื้อออกจากกัน จากนั้นนำน้ำส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าซีไอดีที่เปลี่ยนแปลง

### 3.5 วิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ในการทดลองผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักและการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีวะแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ ความถี่ จุดเก็บตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์

| พารามิเตอร์              | จุดเก็บตัวอย่าง        | ความถี่         | วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์ |
|--------------------------|------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| <b>ไฮโดรเจน</b>          |                        |                 |                                   |
| พีเอช                    | จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย | ทุกวัน          | Electronic pH Meter               |
| ซีโอดี                   | จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย | ทุกวัน          | Closed Reflux Method              |
| คาร์โบไฮเดรต (กลูโคส)    | จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย | ทุกวัน          | Phenol-Sulfuric acid Method       |
| กรดอินทรีย์ระเหย         | จุดเก็บตัวอย่างน้ำเสีย | ทุกวัน          | Gas Chromatography                |
| ปริมาณก๊าซ               | ชุดวัดปริมาณก๊าซ       | ทุกวัน          | การแทนที่น้ำ                      |
| ก๊าซไฮโดรเจน             | จุดเก็บตัวอย่างก๊าซ    | ทุกวัน          | Gas Chromatography                |
| โครงสร้างตะกอนจุลินทรีย์ | ในถังปฏิกรณ์           | สิ้นสุดการทดลอง | Scanning Electron Microscope      |
| <b>กระแสไฟฟ้า</b>        |                        |                 |                                   |
| ซีโอดี                   | ภาชนะด้านแอโนด         | สิ้นสุดการทดลอง | Closed Reflux Method              |
| ความต่างศักย์ไฟฟ้า       | ชุดวงจรไฟฟ้า           | ทุกชั่วโมง      | Data logger                       |

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาศักยภาพและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ด้วยกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนจากน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท ได้แก่ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว และน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต โดยทำการเปรียบเทียบผลการทดลองในเชิงปริมาณ องค์ประกอบ และพฤติกรรมการเกิดก๊าซชีวภาพ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนแล้ว น้ำเสียที่เกิดขึ้นจะนำไปเป็นสารตั้งต้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยการศึกษาทั้งหมดในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

การทดลองส่วนที่ 1 เป็นการทดสอบเบื้องต้นเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงและไร้ออกซิเจนจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่ทำการเจือจางให้มีปริมาณชีโอดีเริ่มต้นประมาณ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยหัวเชื้อที่ใช้ในการทดลองเป็นหัวเชื้อจากระบบยูเอเอสบีของบริษัท เสริมสุข จำกัด (โรงงานปทุมธานี) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

การทดลองส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบเบื้องต้นเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของค่าชีโอดีเมื่อผ่านการหมักด้วยกระบวนการแบบใช้แสง โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังกับน้ำกลั่นที่ใช้น้ำกลั่นเป็นวัตถุดิบ โดยหัวเชื้อที่ใช้ในการทดลองเป็นหัวเชื้อจากระบบยูเอเอสบีของบริษัท เสริมสุข จำกัด (โรงงานปทุมธานี) ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อนโดยการนึ่งด้วยหม้ออัดความดันที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

การทดลองส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาศักยภาพและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักแบบใช้แสงและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหารทั้ง 3 ประเภท

การทดลองส่วนที่ 4 เป็นการศึกษาศักยภาพและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบ โดยที่ภาชนะด้านแอนโอดจะบรรจุด้วยน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภทที่ผ่านการผลิตก๊าซไฮโดรเจนแล้ว ส่วนภาชนะด้านแคโทดบรรจุด้วยน้ำกลั่นและมีการเติมออกซิเจนด้วยหัวเติมอากาศตลอดเวลาเพื่อใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และทำการเก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทุกชั่วโมงด้วยชุดเก็บข้อมูลไฟฟ้าอัตโนมัติ

#### 4.1 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงและไร้ออกซิเจนจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง

จากการวิเคราะห์พารามิเตอร์เบื้องต้นของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง ที่ทำการเก็บตัวอย่างจากบริษัทอุตสาหกรรมแป้งมันบ้านโป่ง จำกัด จังหวัดราชบุรี พบว่าน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังมีสีเหลืองขุ่น มีค่าซีโอดีค่อนข้างสูงและมีสภาพเป็นกรด ซึ่งมีศักยภาพเพียงพอในการเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียแสดงดังตารางที่ 4.1

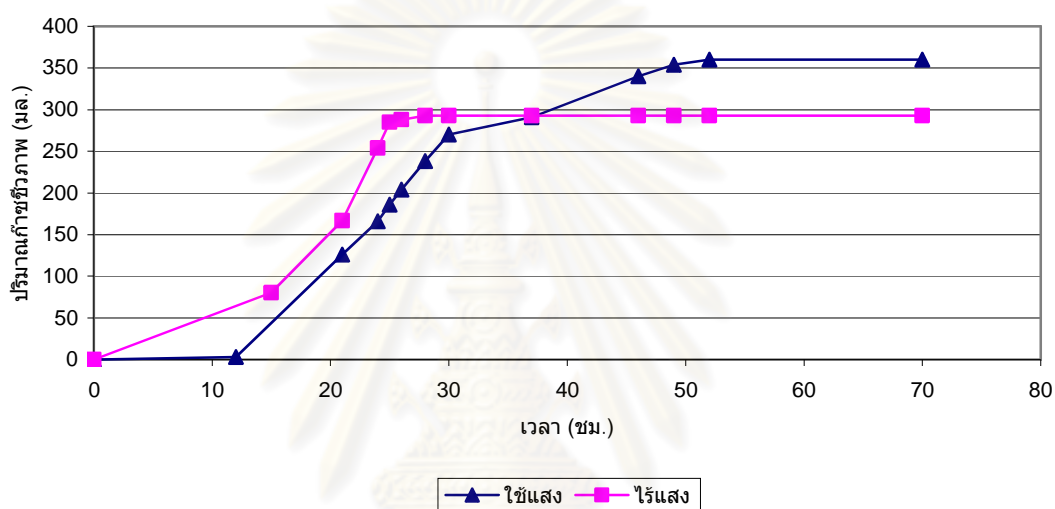
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์เบื้องต้นของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง

| พารามิเตอร์        | หน่วย                     | ปริมาณ |
|--------------------|---------------------------|--------|
| พีเอช              | -                         | 3.68   |
| ซีโอดีละลายน้ำ     | มิลลิกรัมต่อลิตร          | 20,800 |
| แอมโมเนีย-ไนโตรเจน | มิลลิกรัมต่อลิตร          | 56     |
| ของแข็งแขวนลอย     | มิลลิกรัมต่อลิตร          | 10,570 |
| กรดอินทรีย์ระเหย   | มิลลิกรัม- อะซิติกต่อลิตร | 483.75 |

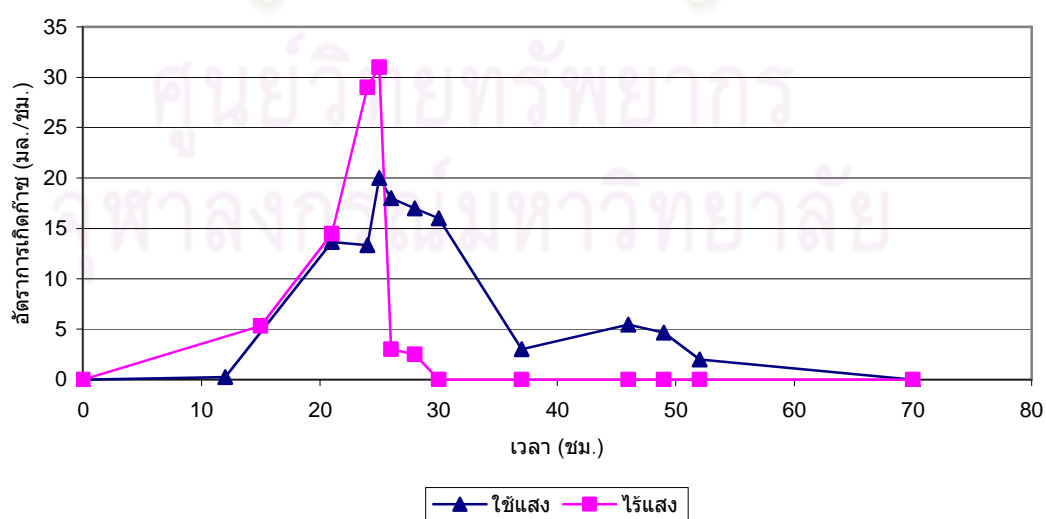
##### 4.1.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดจากระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงและไร้ออกซิเจนจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง แสดงดังรูปที่ 4.1 โดยการผลิตก๊าซชีวภาพจะเริ่มเกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 ชั่วโมงและพบว่าช่วงเวลาที่ใช้ในการเกิดก๊าซเริ่มต้น (Lag Time) จากระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้ออกซิเจนจะมีค่าน้อยกว่ากระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสง ส่งผลให้เกิดก๊าซชีวภาพได้เร็วกว่า เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่สามารถเกิดขึ้นได้เองและไม่ต้องมีสิ่งกระตุ้นจากภายนอก (Manish และ Banerjee, 2008) ดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการไร้ออกซิเจน นอกจากนี้กระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนจะเข้าสู่สภาวะคงตัวภายใน 24 ชั่วโมงหลังจากเริ่มเดินระบบ ในขณะที่การหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงจะเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 50 ชั่วโมง โดยมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดจากกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้ออกซิเจนและใช้แสงเท่ากับ 293 และ 360 มิลลิลิตร ตามลำดับ นั่นคือ สามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า กระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้ออกซิเจนมีช่วงเวลาที่ใช้ในการเกิดก๊าซเริ่มต้น สั้นกว่า แต่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่น้อยกว่ากระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสง

อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและใช้แสงมีรูปแบบคล้ายคลึงกัน โดยกระบวนการหมักแบบไร้แสงจะมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงกว่าแบบใช้แสงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 4.2 กล่าวคือ อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจะเพิ่มสูงอย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นเดินระบบ ส่งผลให้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุดของกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและใช้แสงมีค่าเท่ากับ 31 และ 18 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง ที่เวลาประมาณ 25 ชั่วโมง จากนั้นอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในระบบทั้งสองจะค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่งไม่มีการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นในระบบอีก



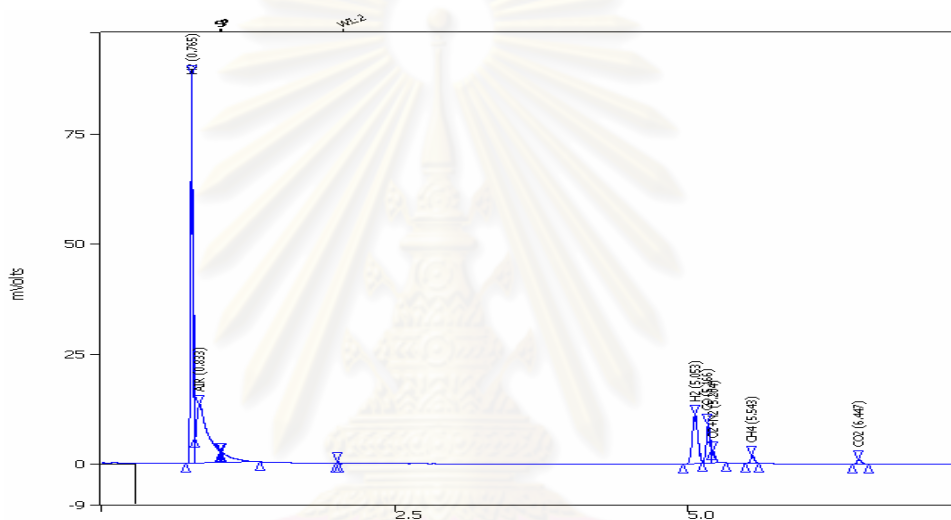
รูปที่ 4.1 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงและไร้แสง



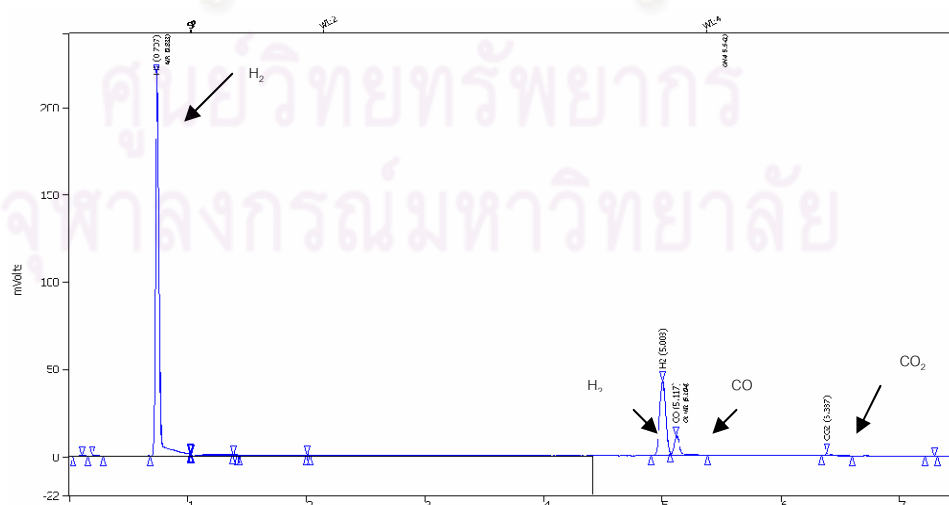
รูปที่ 4.2 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงและไร้แสง

#### 4.1.2 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

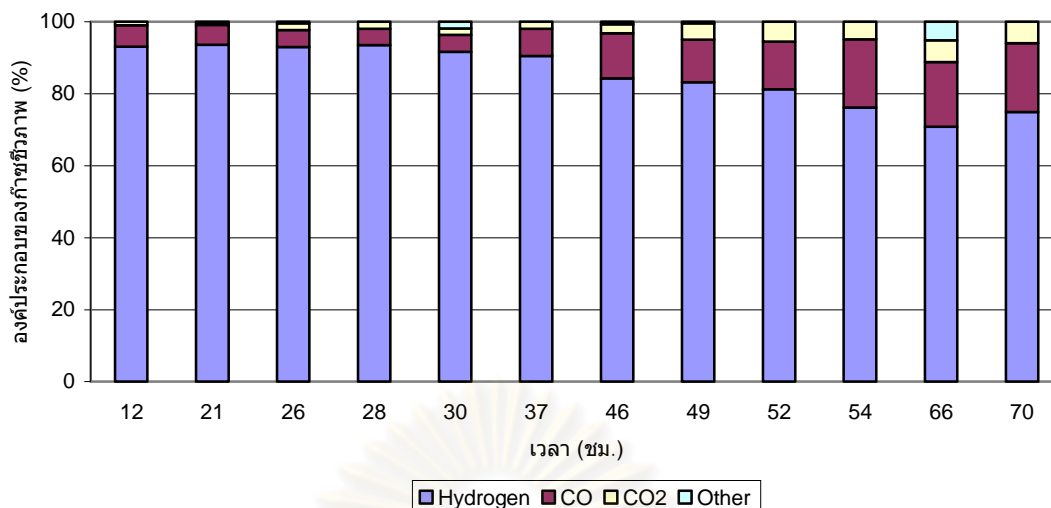
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี โดยการเทียบตำแหน่งกับเวลาที่คงอยู่ (Retention time) ของก๊าซชนิดต่างๆ จากกราฟมาตรฐานดังรูปที่ 4.3 พบว่าก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงและไร้แสงมีองค์ประกอบของก๊าซไม่ต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.4 นั่นคือ ประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆ ซึ่งอาจจะเป็นก๊าซไนโตรเจน ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น โดยมีสัดส่วนก๊าซต่างๆ ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยจำแนกรายละเอียดได้ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6



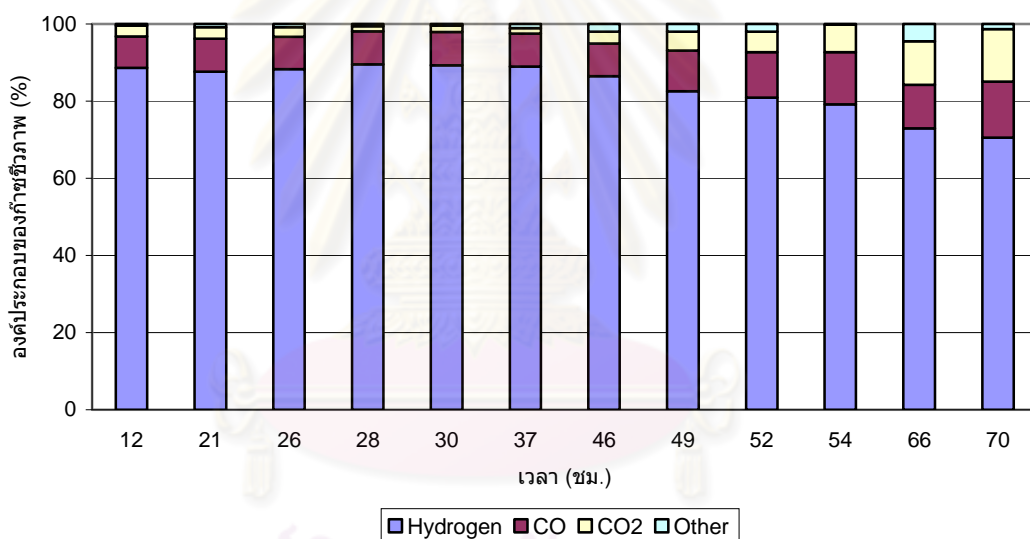
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งเวลาที่คงอยู่ของก๊าซชนิดต่างๆ จากกราฟมาตรฐานที่วิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี



รูปที่ 4.4 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนเมื่อวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี



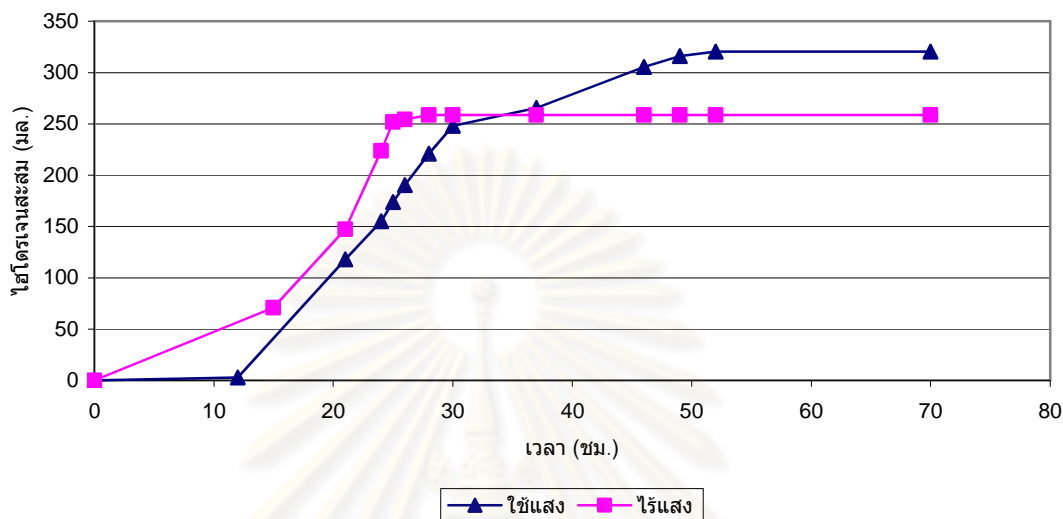
รูปที่ 4.5 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงเมื่อจำแนกตามชนิดและสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ก๊าซ



รูปที่ 4.6 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงเมื่อจำแนกตามชนิดและสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ก๊าซ

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นก๊าซไฮโดรเจน โดยแสดงแนวโน้มใกล้เคียงกันทั้งในกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงและใช้แสง โดยปริมาณไฮโดรเจนสะสมสูงสุดสำหรับกระบวนการใช้แสงคือ 258.91 มิลลิลิตร ภายใน 20 ชั่วโมงหลังการเดินระบบ และ 320.30 มิลลิลิตร สำหรับกระบวนการใช้แสงภายหลังการเดินระบบไปมากกว่า 50 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.7 จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงกว่าการหมักแบบใช้แสงเมื่อพิจารณาในกรณีที่มีการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง โดยกระบวนการหมักแบบใช้แสงจะทำให้

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเข้าสู่สถานะคงตัวที่เร็วกว่า เนื่องจากมีช่วงเวลาการเกิดก๊าซเริ่มต้นที่สั้นกว่า และประกอบกับกระบวนการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงเป็นกระบวนการที่ไม่ต้องมีการให้แสงสว่าง จึงเป็นกระบวนการเดินระบบที่ประหยัดพลังงานมากกว่าอีกด้วย

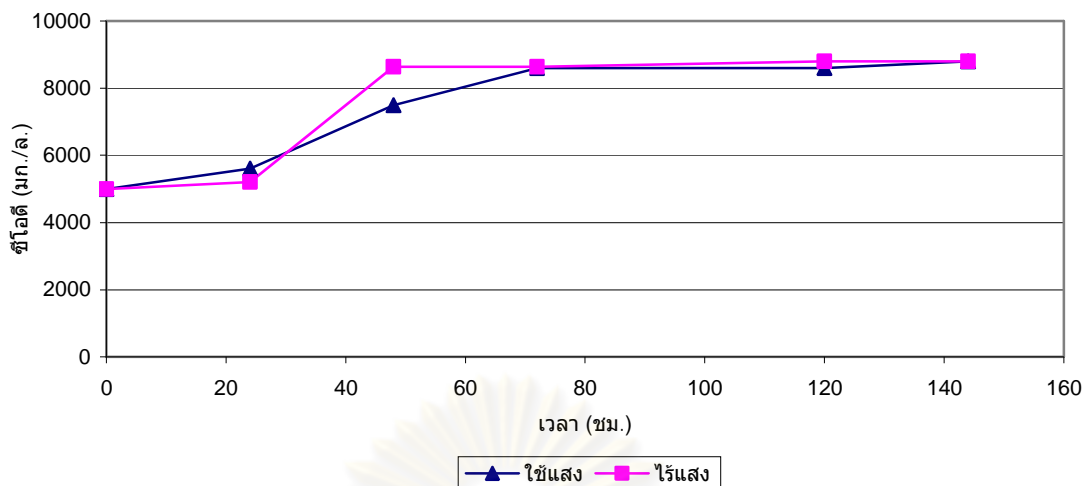


รูปที่ 4.7 ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงและไร้แสง

#### 4.1.3 ซีโอดี

น้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียจริงจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังที่ทำการเจือจางให้มีค่าซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเมื่อนำมาผ่านกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงและไร้แสง พบว่าปริมาณซีโอดีมีการเปลี่ยนแปลงดังรูปที่ 4.8 นั่นคือ ภายหลังจากเริ่มเดินระบบปริมาณซีโอดีมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นแล้วคงที่ทั้งจากกระบวนการหมักแบบใช้แสงและไร้แสง โดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นอาจสันนิษฐานได้ว่าปริมาณซีโอดีที่เพิ่มขึ้นนี้เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่ตายแล้วในหัวเชื้อที่เติมลงไปหลังจากผ่านการอบที่ความร้อน 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงในระหว่างการคัดเลือกสายพันธุ์ของแบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจน





รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบใช้แสงและไร้แสงของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง

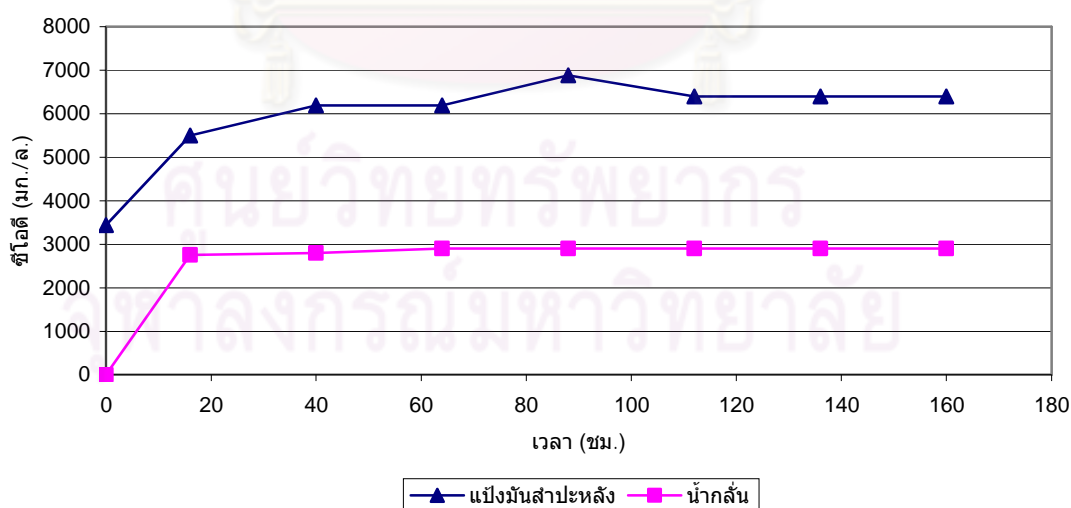
#### 4.2 การทดสอบเบื้องต้นในการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

จากผลการทดลองที่ผ่านมาซึ่งพบว่าแนวโน้มของค่าซีโอดีภายหลังกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนทั้งแบบใช้แสงและไร้แสงมีค่าเพิ่มขึ้น โดยอาจเกิดจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่ตายลงในหัวเชื้อที่เติมลงไปภายหลังผ่านการให้ความร้อน การทดลองนี้จึงดำเนินการโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินปริมาณสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นจากการทดลอง โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่ใช้น้ำกลั่นเป็นสารตั้งต้นภายหลังกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงพบว่าผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.9 เมื่อเวลาผ่านไปปริมาณซีโอดีของทั้งสองชุดการทดลอง มีค่าเพิ่มขึ้น เป็นการยืนยันได้ว่าการเปลี่ยนแปลงปริมาณซีโอดีในการทดลองนั้นเกิดจากการสลายตัวของจุลินทรีย์ในหัวเชื้อที่ตายแล้วจริง โดยในน้ำกลั่นที่มีการใช้น้ำกลั่น (DI Water) เป็นสารตั้งต้นแทนน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังมีค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นมากเนื่องจากมีสารอินทรีย์บางส่วนที่เกิดจากการย่อยสลายของหัวเชื้อละลายออกมาอยู่ในรูปซีโอดีละลายน้ำ

สำหรับปัจจัยทางกายภาพที่มีความสำคัญต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ คือ อุณหภูมิ โดยสภาวะแวดล้อมในห้องทดลองจะเป็นปัจจัยหลักที่ต้องให้ความสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งความแตกต่างของอุณหภูมิในช่วงกลางวันและกลางคืนในบางฤดูกาล ซึ่งอาจแตกต่างกันได้ถึง 2-3 องศาเซลเซียส จะมีผลอย่างมากที่จะทำให้อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนลดลง ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้ทำการควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าคงที่ที่ 50 องศาเซลเซียส ตลอดการทดลอง ซึ่งสภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะที่ Lin และคณะ (2007) รายงานว่าเป็นอุณหภูมิที่มีอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด

#### 4.2.1 ซีไอดี

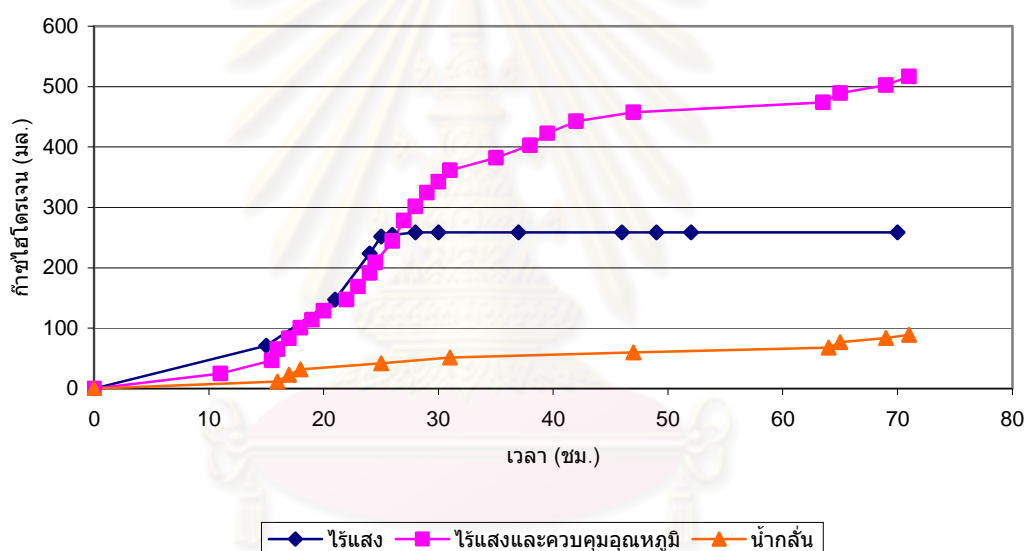
การเปลี่ยนแปลงค่าซีไอดีในระหว่างกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำกลั่นและน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังเมื่อมีการควบคุมอุณหภูมิในการทดลองที่ 50 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นว่าค่าซีไอดีในน้ำเสียทั้งสองมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 24 ชั่วโมง จากนั้นจะเข้าสู่สภาวะคงตัว โดยซีไอดีของน้ำกลั่นมีค่าอยู่ในเกณฑ์คงที่ เท่ากับ 2,900 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ค่าซีไอดีของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังมีค่าสูงสุดถึง 7,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงยืนยันถึงความเป็นไปได้ว่าค่าซีไอดีที่เพิ่มขึ้นของการทดลองในช่วงแรกจากการหมักน้ำเสียเกิดจากการย่อยสลายซากจุลินทรีย์ที่ตายแล้ว (Autodigestion) จากการนั่งด้วยหม้ออัดความดัน



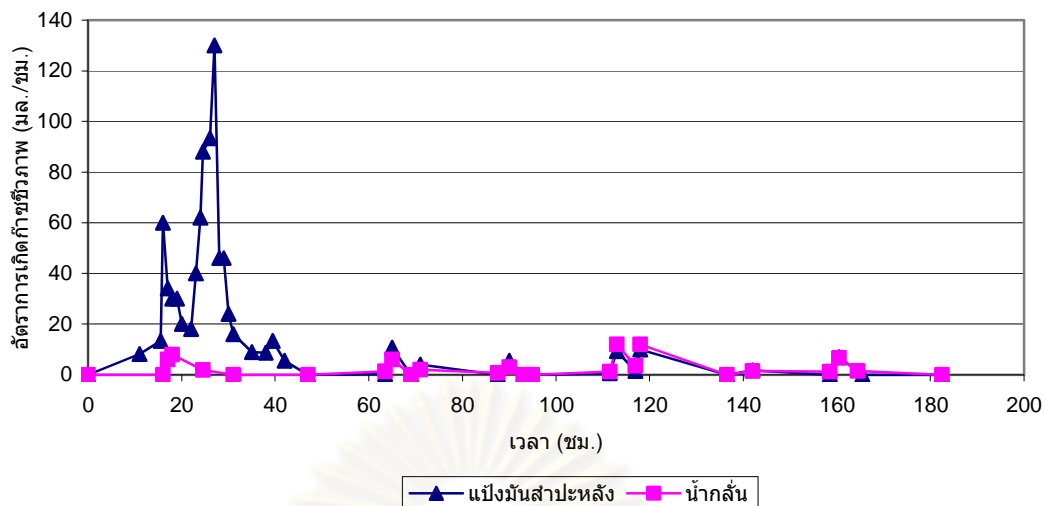
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าซีไอดีจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

#### 4.2.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ

เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้อากาศของน้ำกัลันและน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า ระบบที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสและไม่มีการควบคุมอุณหภูมิ มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงกว่าระบบที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิโดยมีปริมาณก๊าซสะสมสูงสุดมากกว่าการทดลองที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิถึง 2.5 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และเมื่อพิจารณาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในระบบเทียบกับเวลาดังรูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่าระบบที่มีการควบคุมอุณหภูมิมิ้อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุดที่มากกว่าถึง 7 เท่าเช่นกัน ในขณะที่อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในน้ำกัลันมีปริมาณเพียงเล็กน้อย



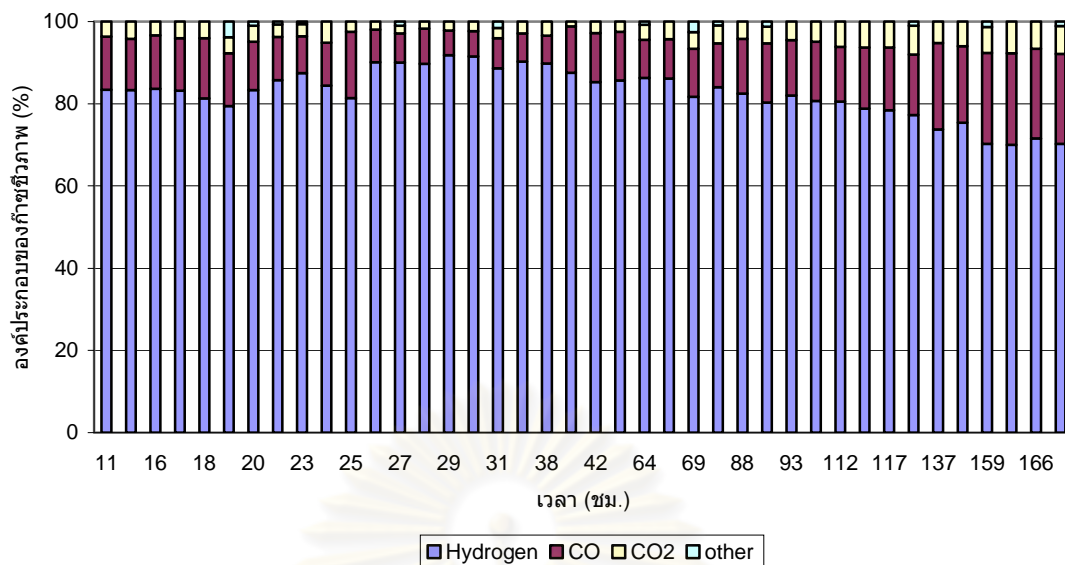
รูปที่ 4.10 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้อากาศของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการควบคุมอุณหภูมิและการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้อากาศของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกัลันที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส



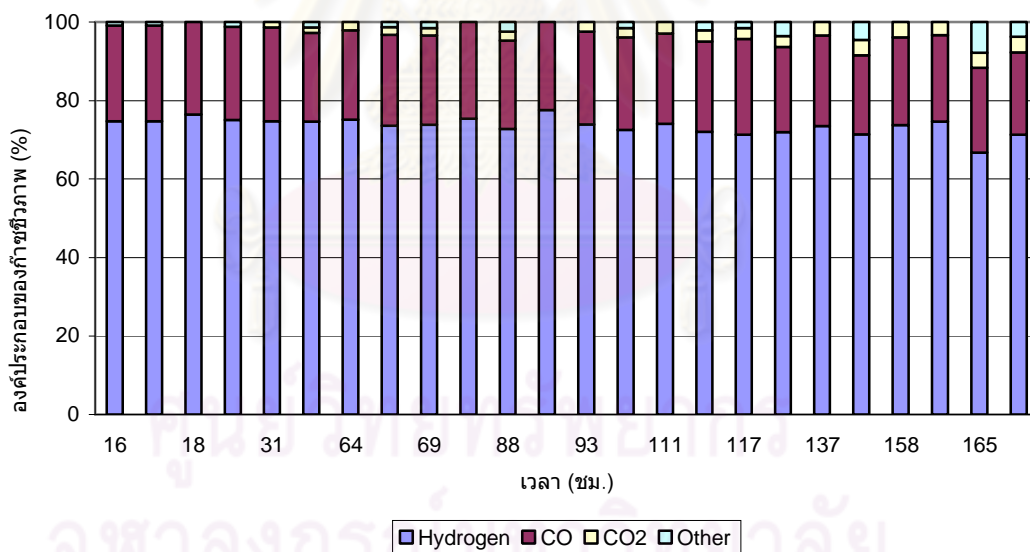
รูปที่ 4.11 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

#### 4.2.3 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

รูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส พบว่าก๊าซชีวภาพประกอบด้วยองค์ประกอบของก๊าซ 3 ชนิด คือ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยสัดส่วนของก๊าซทั้ง 3 ชนิดในตัวอย่างก๊าซชีวภาพที่เก็บจากระบบที่เวลาต่างๆ กัน จะมีสัดส่วนที่แตกต่างกันเล็กน้อย โดยเมื่อพิจารณาถึงปริมาตรโดยรวมจะพบว่าก๊าซส่วนใหญ่ในระบบเป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ และ 15 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบของก๊าซที่ได้จากการหมักน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังกับน้ำกลั่น พบว่าสัดส่วนก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำกลั่นมีค่าที่น้อยกว่าการหมักจากน้ำเสียอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลังมาก เนื่องจากกระบวนการหมักใช้น้ำกลั่นเป็นวัตถุดิบ ส่งผลให้แหล่งอาหารในระบบมีเพียงสารอินทรีย์บางส่วนจากการละลายกลับของหัวเชื้อที่ตายแล้วจากการนึ่งด้วยความร้อนซึ่งมีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการของจุลินทรีย์ที่มีหน้าที่ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจึงเกิดได้น้อยมาก



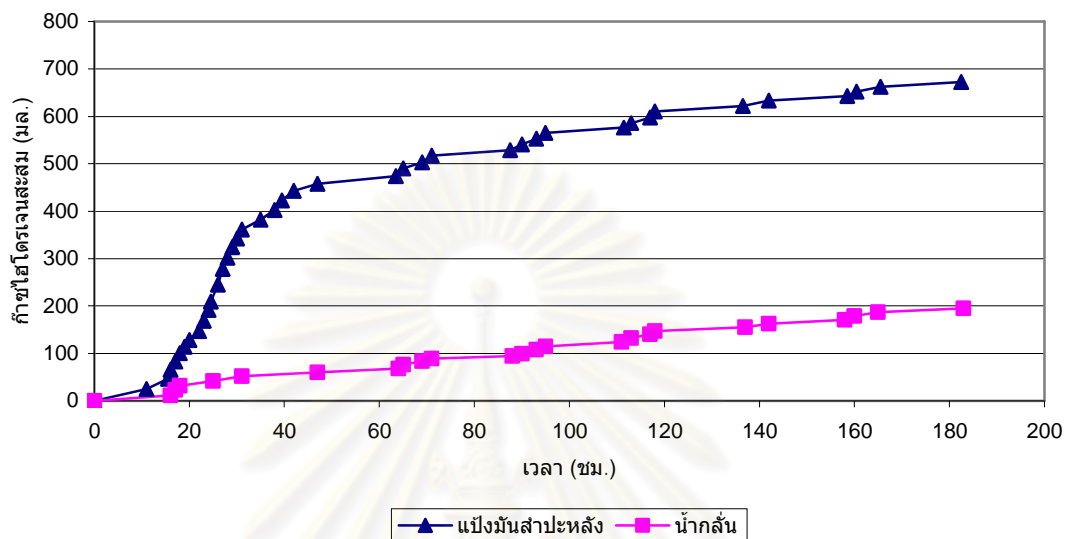
รูปที่ 4.12 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากการหมักไรรีออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส โดยจำแนกตามชนิดและสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ก๊าซ



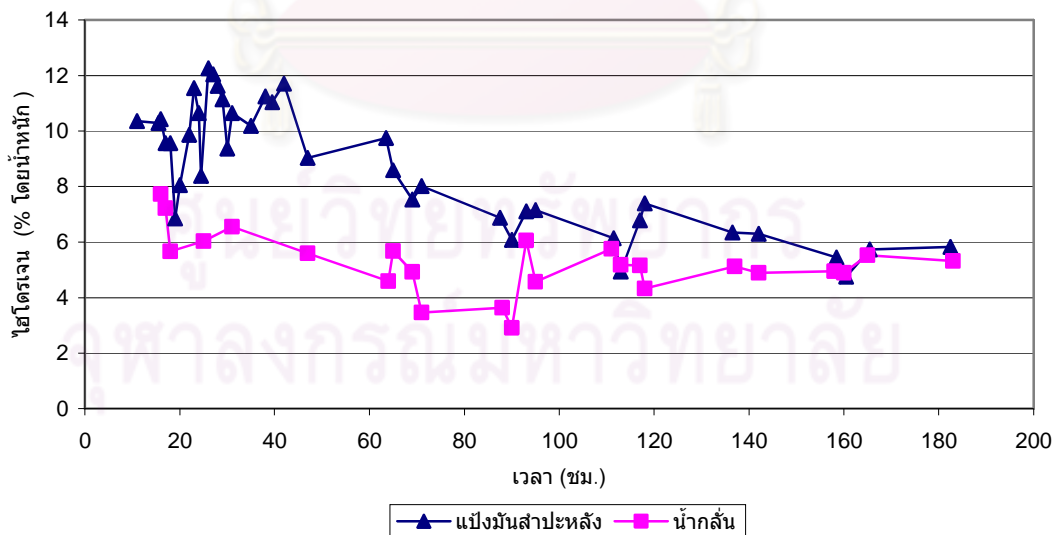
รูปที่ 4.13 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากการหมักไรรีออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำกลั่นที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส โดยจำแนกตามชนิดและสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ก๊าซ

ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักไรรีออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าทั้งสองระบบสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดได้เท่ากับ 672 และ 194 มิลลิลิตรตามลำดับ โดยเมื่อคำนวณเป็นความเข้มข้นของไฮโดรเจนเมื่อเปรียบเทียบกับกราฟ

มาตรฐานจากภาคผนวก ง จะพบว่าก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับ 12.26 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักในช่วง 40 ชั่วโมงแรก และความเข้มข้นดังกล่าวจะค่อยๆ ลดลงตามลำดับเมื่อเวลาผ่านไป ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 ก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

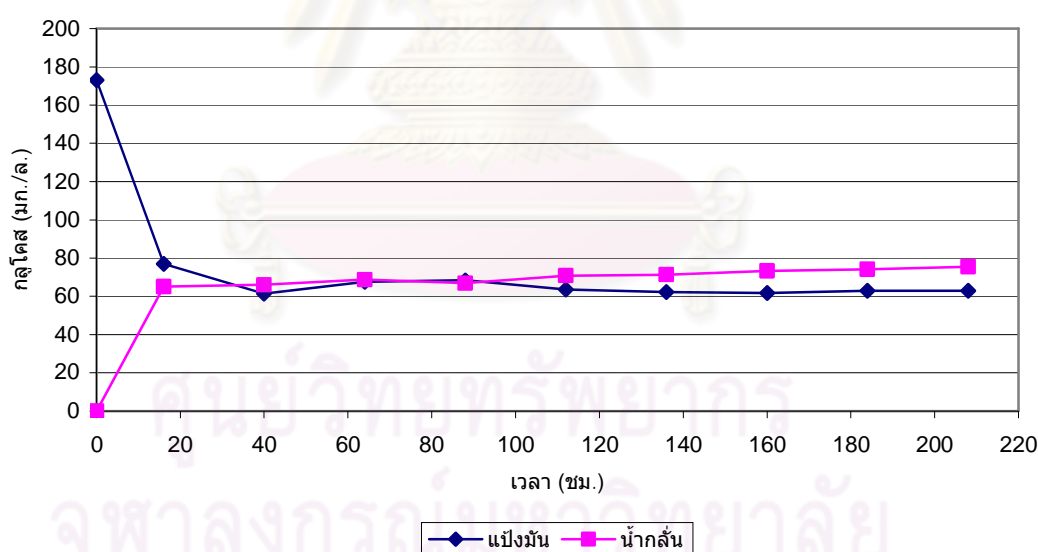


รูปที่ 4.15 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส



#### 4.2.4 ความเข้มข้นกลูโคส

เมื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียดอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังภายหลังกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้อากาศ พบว่าผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.16 นั่นคือความเข้มข้นของกลูโคสจากเริ่มต้นที่ 173 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าลดลงเหลือ 61 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 40 ชั่วโมง หรือลดลงคิดเป็น 64.7 เปอร์เซ็นต์จากเริ่มต้น จากนั้นความเข้มข้นกลูโคสจะเริ่มคงที่โดยมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มข้นของกลูโคสจากน้ำกลั่น คือในช่วง 60-70 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อพิจารณาผลการทดลองประกอบกับรูปที่ 4.14 พบว่า เวลา 40 ชั่วโมงแรกเป็นช่วงเวลาที่มียัฏการผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนสะสมสูงสุดด้วย จึงเป็นการยืนยันได้ว่า ความเข้มข้นของกลูโคสที่ลดลงในช่วงเวลานี้เกิดจากจุลินทรีย์ในระบบใช้เป็นแหล่งอาหารในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Sangyaka และคณะ (2007) ที่ได้ทำการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียดอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง พบว่าความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำเสียดจะลดลงจนเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 72 ชั่วโมง โดยลดลงคิดเป็น 10-15 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นกลูโคสเริ่มต้น



รูปที่ 4.16 ความเข้มข้นของกลูโคสในระบบการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้อากาศของน้ำเสียดอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำกลั่นที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

#### 4.3 ศักยภาพและการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท

น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภทที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว และน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต ซึ่งดำเนินการเก็บตัวอย่างน้ำจากบริษัทอุตสาหกรรมแป้งมัน จำกัด จังหวัดราชบุรี บริษัท เอเชียน สุกฟีเรีย ฟู้ดส์ จำกัด จังหวัด ราชบุรี และบริษัท ไทยฟูจีย่า จำกัด จังหวัด กรุงเทพมหานคร ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของน้ำเสียทั้ง 3 ประเภท พบว่าได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.2 นั่นคือ มีอุณหภูมิใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 31-32 องศาเซลเซียส โดยน้ำเสียแป้งมันสำปะหลังมีสภาพเป็นกรดเล็กน้อย มีของแข็งแขวนลอยและซีโอไซด์ค่อนข้างสูง น้ำเสียเส้นก๋วยเตี๋ยวเป็นน้ำเสียที่มีพีเอชปานกลาง มีค่าซีโอไซด์ต่ำ ปริมาณไขมันค่อนข้างสูง แต่ไม่มีองค์ประกอบของแอมโมเนียไนโตรเจน ในขณะที่น้ำเสียซ็อกโกแลตเป็นน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรดและมีปริมาณไขมันสูงสุดเท่ากับ 1,320 มิลลิกรัมต่อลิตร

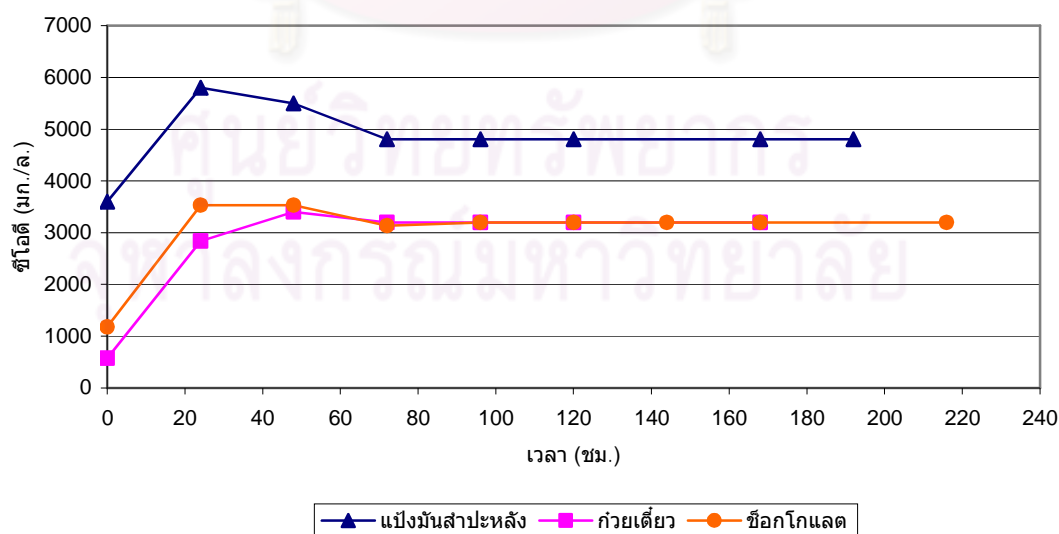
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์เบื้องต้นของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3ประเภทที่ใช้ในการทดลอง

| พารามิเตอร์        | หน่วย            | ปริมาณ          |            |           |
|--------------------|------------------|-----------------|------------|-----------|
|                    |                  | แป้งมันสำปะหลัง | ก๋วยเตี๋ยว | ซ็อกโกแลต |
| อุณหภูมิ           | -                | 32              | 32         | 31.1      |
| พีเอช              | -                | 5.62            | 6.82       | 4.3       |
| ของแข็งแขวนลอย     | มิลลิกรัมต่อลิตร | 3,560           | 1,360      | 730       |
| แอมโมเนีย-ไนโตรเจน | มิลลิกรัมต่อลิตร | 4.48            | 0          | 1.68      |
| ไขมันและน้ำมัน     | มิลลิกรัมต่อลิตร | 246.67          | 1,180      | 1,320     |
| ซีโอไซด์ละลายน้ำ   | มิลลิกรัมต่อลิตร | 10,976          | 570        | 1,176     |
| กลูโคส             | กรัมต่อลิตร      | 3.394           | 1.518      | 0.487     |

### 4.3.1 ซีโอดี

รูปที่ 4.17 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นปริมาณซีโอดีของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท ที่นอกเหนือจากปริมาณซีโอดีที่มาจากการทดลองด้วยน้ำกลั่นที่มีค่าเท่ากับ 2,900 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีในน้ำเสียทั้ง 3 มีลักษณะคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ ค่าซีโอดีจะเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการทดลองแล้วจึงค่อยๆ ลดลงและเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยค่าซีโอดีที่เพิ่มขึ้นเป็นผลจากซีโอดีที่ละลายออกมาจากการย่อยสลายซากจุลินทรีย์ที่ตายแล้ว ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ผ่านมา

สำหรับน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังพบว่ามีค่าซีโอดีเพิ่มขึ้นจนสูงสุดเท่ากับ 5,800 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยเมื่อผ่านกระบวนการหมักค่าซีโอดีลดลงเหลือ 4,800 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อสิ้นสุดการทดลอง หรือลดลงคิดเป็น 17.24 เปอร์เซ็นต์ จากค่าสูงสุดซึ่งมากกว่าน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว และน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลตซึ่งลดลงคิดเป็นเพียง 6 และ 9.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงปริมาณซีโอดีคงเหลือในน้ำทิ้งจากการผลิตไฮโดรเจนของน้ำเสียทั้ง 3 ประเภทแล้วพบว่ายังมีค่าสูงมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Oh และ Logan (2005) ที่พบว่าน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหารภายหลังจากการผลิตไฮโดรเจนแล้วยังคงมีปริมาณสารอินทรีย์เหลืออยู่มาก ซึ่งมีศักยภาพที่จะใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าต่อไปได้ด้วย เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ซึ่งภายหลังผ่านกระบวนการทั้งสองจะมีปริมาณสารอินทรีย์ลดลงถึง 95 เปอร์เซ็นต์

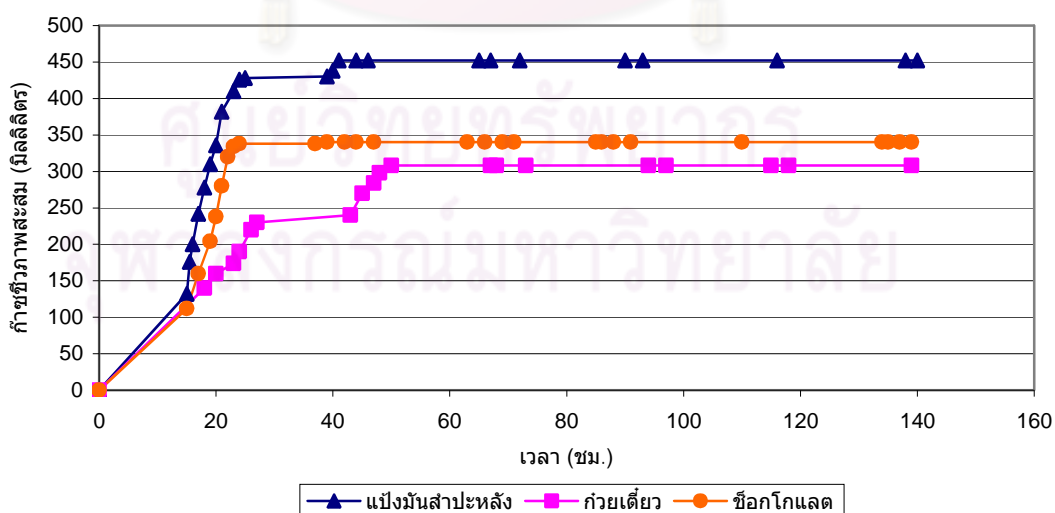


รูปที่ 4.17 การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท

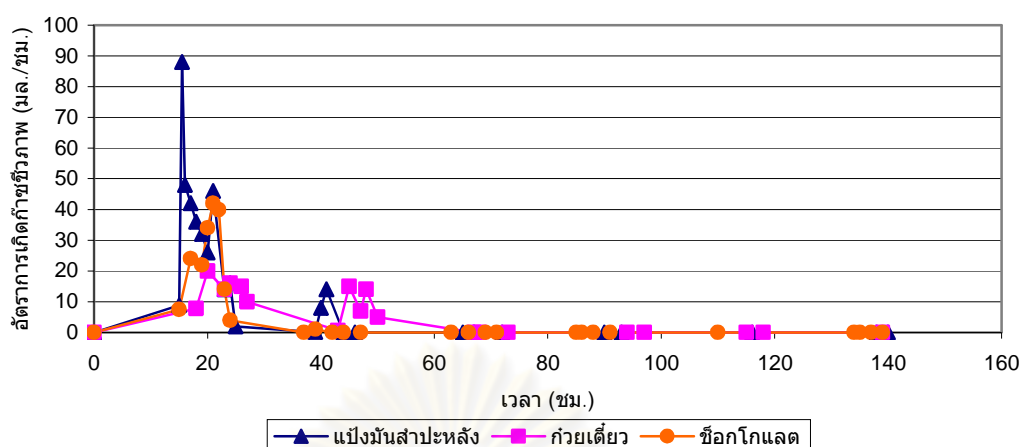
### 4.3.2 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียทั้ง 3 ประเภทเริ่มตรวจวัดได้ที่เวลาใกล้เคียงกันคือ เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 10 ชั่วโมง ดังรูปที่ 4.18 พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจะมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 25 ชั่วโมง นอกจากนี้จะสังเกตพบว่าในบางช่วงเวลาที่มีการเว้นระยะการเก็บก๊าซชีวภาพนานๆ จะไม่มีการผลิตก๊าซเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากในระบบมีความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจนมากเกินไป ทำให้ไฮโดรเจนบางส่วนละลายกลับลงไปในน้ำ และมีผลให้เกิดการสร้างและสะสมตัวของกรดโพทิโอนิกและกรดบิทิริกขึ้นในระบบ ส่งผลโดยตรงทำให้ปริมาณไฮโดรเจนลดลง (มันสิน ตัณฑุเวศม์, 2542)

จากรูปที่ 4.18 จะเห็นว่าระดับของก๊าซชีวภาพเริ่มคงที่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 50 ชั่วโมง โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากน้ำเสียอุตสาหกรรม 3 ประเภทจะมีค่าแตกต่างกัน น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังจะให้ปริมาณก๊าซสูงสุด รองลงมาคือน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตช็อกโกแลต และน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว โดยมีค่าเท่ากับ 452 340 และ 308 มิลลิลิตรตามลำดับ สำหรับอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียทั้ง 3 ประเภทแสดงดังรูปที่ 4.19 จะสังเกตได้ว่าน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันจะมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุดซึ่งเท่ากับ 88 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เวลา 16 ชั่วโมง ส่วนอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุดของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตก๋วยเตี๋ยวและน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตช็อกโกแลตมีค่าเท่ากับ 20 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เวลา 20 ชั่วโมง และ 40 มิลลิลิตรต่อชั่วโมงที่เวลา 22 ชั่วโมงตามลำดับ



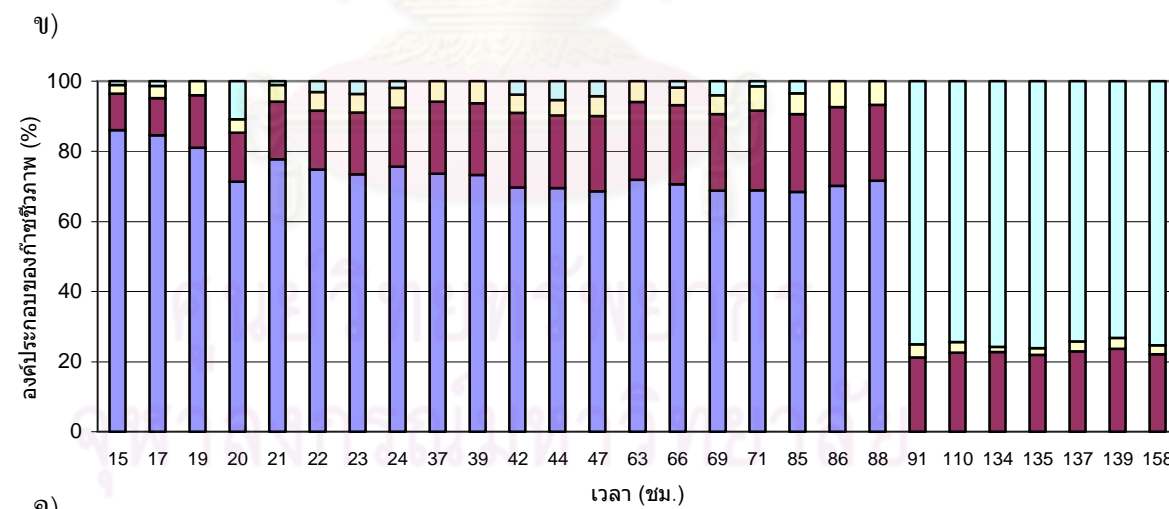
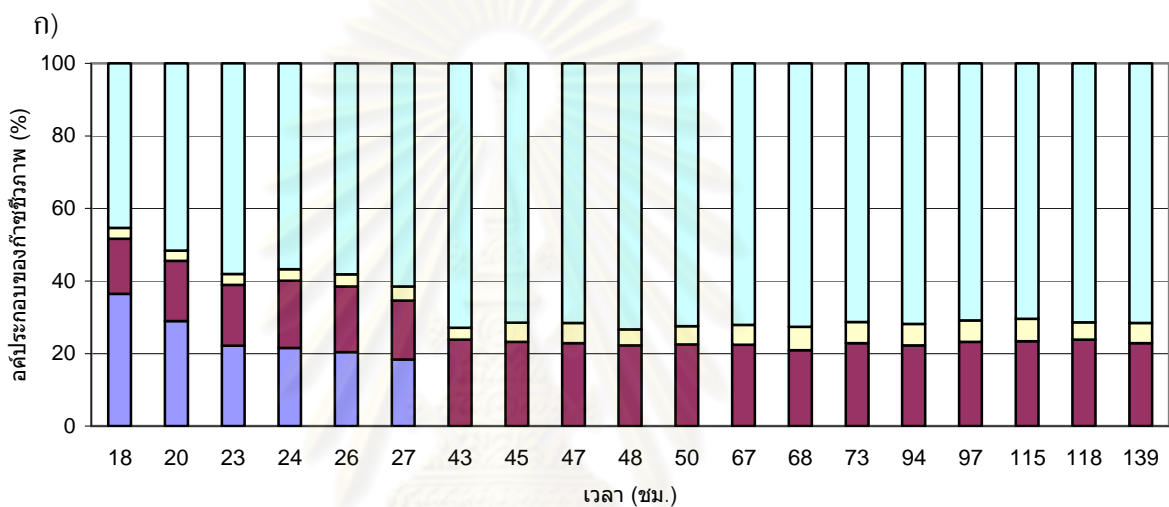
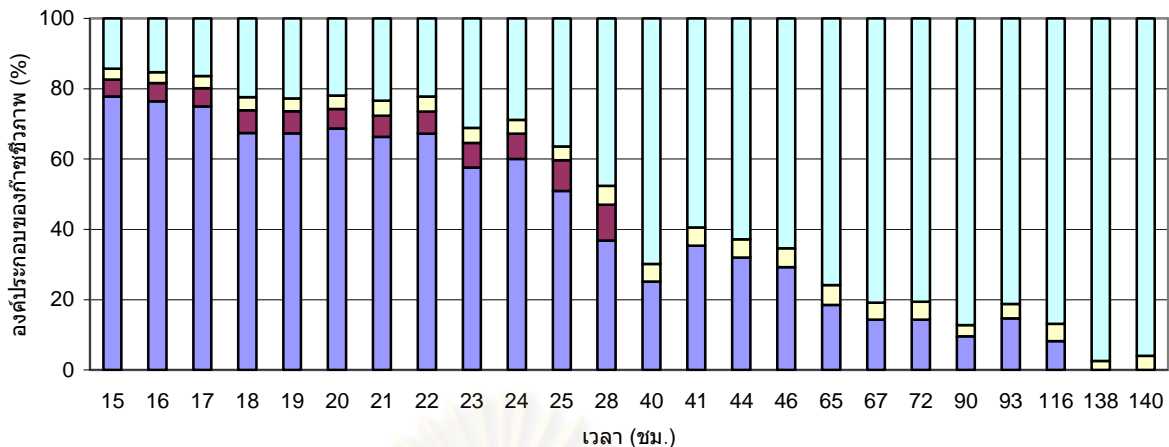
รูปที่ 4.18 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท



รูปที่ 4.19 อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมควบคุม อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท

#### 4.3.3 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหารทั้ง 3 ประเภท จะมีองค์ประกอบเหมือนกัน นั่นคือประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แต่ในสัดส่วนปริมาณที่แตกต่างกัน โดยก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง (รูปที่ 4.20 ก) และน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซีอิ๊วโกแลต (รูปที่ 4.20 ค) จะประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจนในเกณฑ์สูงคือ ประมาณ 78 - 85 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตก๊วยเตี๋ยว (รูปที่ 4.20 ข) ประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจนเพียง 38 เปอร์เซ็นต์ และการเกิดก๊าซจะอยู่ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ในช่วงเริ่มต้นการทดลอง อาจเนื่องจากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตก๊วยเตี๋ยวมี่ปริมาณชีโอดีเริ่มต้นและปริมาณกลูโคสค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซีอิ๊วโกแลต ทำให้แหล่งอาหารไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตและใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพของจุลินทรีย์



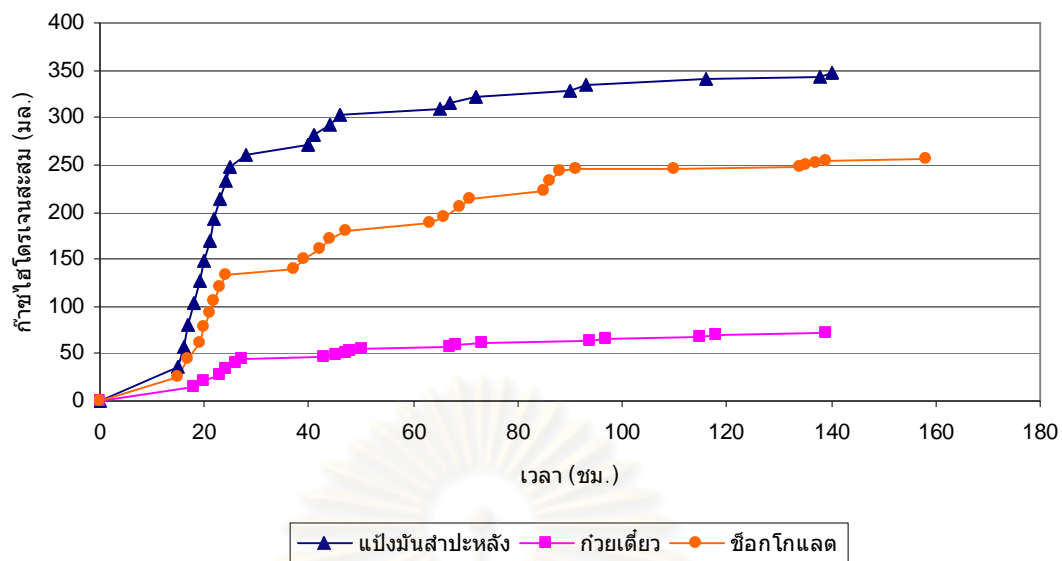
Legend: Hydrogen (blue), CO (red), CO2 (yellow), Other (cyan)

รูปที่ 4.20 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส ของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท โดย ก) น้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง ข) น้ำเสียถั่วเขียว ค) น้ำเสียซ็อกโกแลต

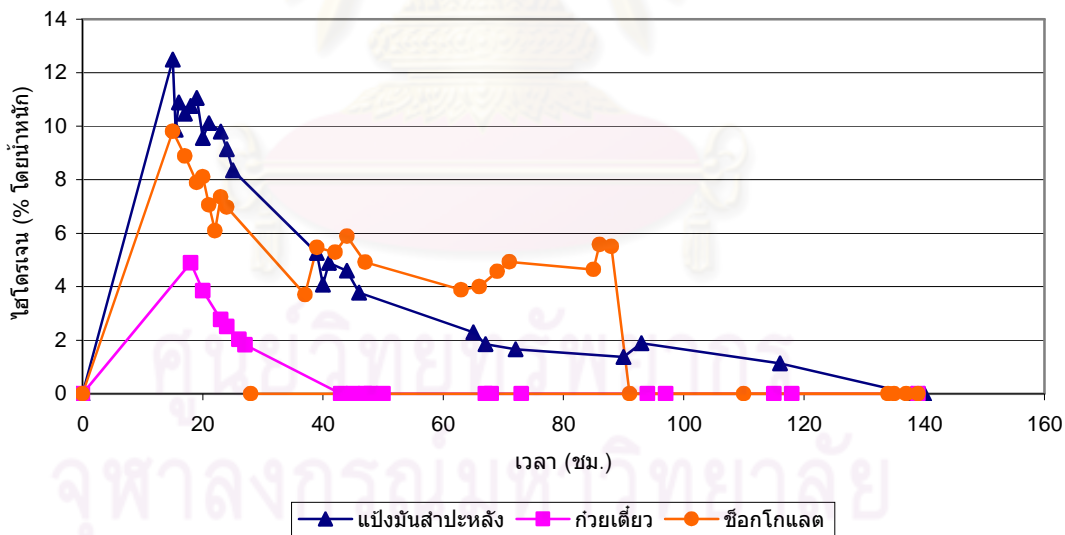


ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมจากการหมักน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท ได้แก่ น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตกล้วยเตี๋ยว และน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซีอิ๊วโกแลตมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 24 ชั่วโมงแรกและคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 4.21 โดยมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดเรียงตามลำดับคือ น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซีอิ๊วโกแลตและน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตกล้วยเตี๋ยวเท่ากับ 347 256 และ 71 มิลลิลิตรหรือเทียบเท่า 138.8 102.4 และ 28.4 มิลลิลิตรต่อลิตรน้ำเสีย ตามลำดับ โดยเมื่อนำมาเทียบเป็นความเข้มข้นของไฮโดรเจนกับกราฟมาตรฐานจากภาคผนวก ง พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากน้ำเสียทั้ง 3 จะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4.22 นั่นคือ มีช่วงเวลาคงที่ของความเข้มข้นก๊าซไฮโดรเจนในระยะหนึ่งแล้วเริ่มลดลงตามลำดับ โดยจะสังเกตพบว่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียผลิตซีอิ๊วโกแลตมีเสถียรภาพมากกว่าน้ำเสียชนิดอื่น และเมื่อพิจารณาประกอบกับผลการทดลองในรูปที่ 4.20 จะพบว่าสัดส่วนของไฮโดรเจนในก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาที่เกิดขึ้นนานกว่าน้ำเสียอีก 2 ชนิด ซึ่งอาจเนื่องมาจากส่วนผสมในการผลิตซีอิ๊วโกแลตประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลคู่ (น้ำตาลซูโครส) ซึ่งจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ได้ง่ายเพียงแต่ต้องผ่านกระบวนการย่อยสลายเพื่อให้กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (น้ำตาลกลูโคส) ก่อนทำให้มีอาหารเพียงพอที่จุลินทรีย์จะใช้ในการเจริญเติบโตและผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ดีกว่าน้ำเสียอีก 2 ชนิด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Van Ginke (2005) ที่ทำการทดลองผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 4 ประเภท และพบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นไม่ได้ขึ้นอยู่กับปริมาณซีไอดีของน้ำเสียเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลและความซับซ้อนของโครงสร้างคาร์โบไฮเดรตรวมทั้งตะกอนแขวนลอยในน้ำเสียด้วย หากมีโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตและตะกอนแขวนลอยมีขนาดใหญ่ก็จะต้องใช้เวลานานในการย่อยสลายเพื่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



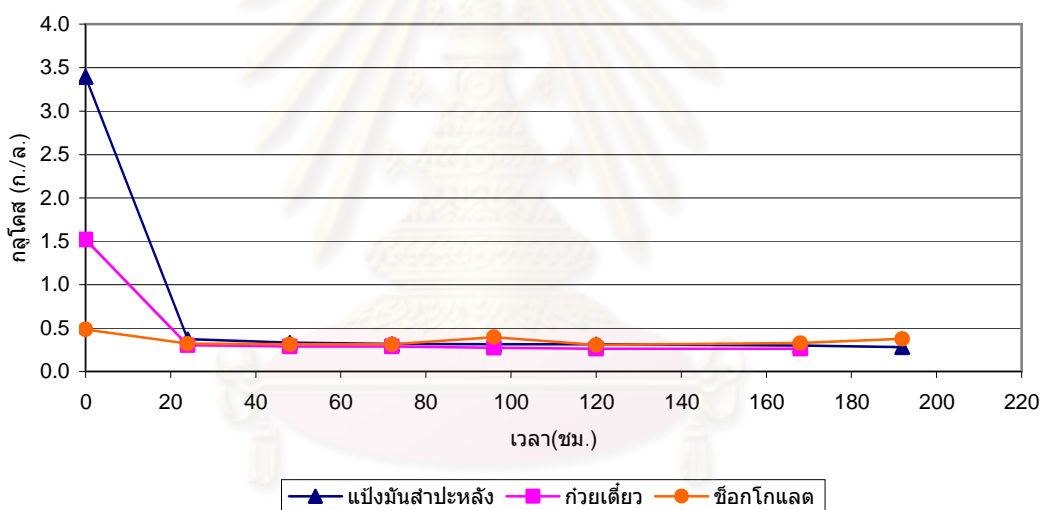
รูปที่ 4.21 ก๊ายไฮโดรเจนสะสมจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเลี้ยงอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท



รูปที่ 4.22 ความเข้มข้นไฮโดรเจนจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเลี้ยงอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท

#### 4.3.4 ความเข้มข้นกลูโคส

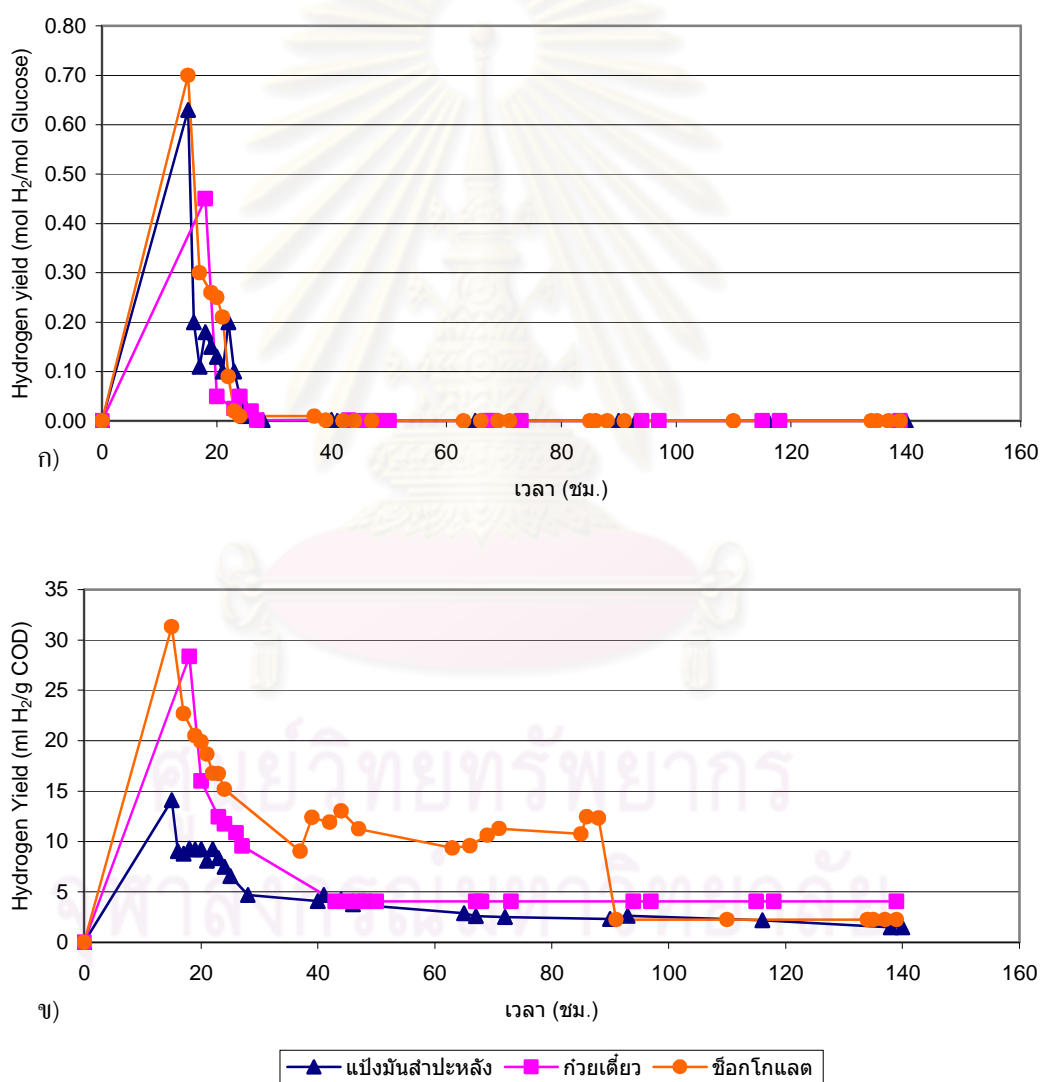
การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกลูโคสจากกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภทมีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ มีแนวโน้มที่ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 20 ชั่วโมงแรกจนมีปริมาณคงที่ที่ประมาณ 0.3 กรัมต่อลิตรภายในเวลา 24 ชั่วโมง แสดงดังรูปที่ 4.23 และเมื่อพิจารณาประกอบกับกราฟในรูปที่ 4.18 และ 4.19 จะพบว่าช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาที่มียืดการเกิดก๊าซชีวภาพและมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงที่สุดด้วยเช่นกัน นั่นคือความเข้มข้นของกลูโคสที่ลดลงน่าจะเป็นปริมาณที่จุลินทรีย์นำไปใช้ในกระบวนการหมักเพื่อผลิตไฮโดรเจน โดยจะเห็นว่าเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังจะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกลูโคสมากที่สุดเท่ากับ 90.6 เปอร์เซ็นต์ รองลงมาคือน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตถั่วเขียวและน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต ที่มีปริมาณลดลงเท่ากับ 78.9 และ 34.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกลูโคสจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้อากาศและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท

รูปที่ 4.24 แสดงปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นต่อปริมาณกลูโคสและซีโอดีที่เปลี่ยนแปลงจากการหมัก (Hydrogen Yield) ของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหารทั้ง 3 ประเภท พบว่าน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลตมีการเปลี่ยนรูปเป็นไฮโดรเจนในปริมาณมากที่สุดเท่ากับ 0.7 โมลไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคสหรือเท่ากับ 31.32 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมซีโอดี รองลงมาคือน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังและน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นถั่วเขียว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.63 และ 0.45 โมลไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคสหรือเท่ากับ 14 และ 28.38 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมซีโอดี

ตามลำดับ โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลการทดลองกับทฤษฎีการย่อยสลายกลูโคสเพื่อสร้างก๊าซไฮโดรเจนในสภาวะไร้ออกซิเจนที่รายงานว่า น้ำตาลกลูโคส 1 โมล จะเปลี่ยนรูปเป็นกรดอะซิติก 1 โมล คาร์บอนไดออกไซด์ 2 โมล และให้ก๊าซไฮโดรเจน 4 โมล พบว่าไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการทดลองเป็นปริมาณที่น้อยมาก โดยอาจเนื่องมาจากในขั้นตอนกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนมีผลผลิตเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายหลายชนิดปะปนกันอยู่ ทั้งกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวไทริก มิใช่กรดอะซิติกเพียงอย่างเดียว จึงมีผลทำให้สัดส่วนก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นน้อยลงกว่าค่าตามทฤษฎีดังกล่าว นอกจากนี้ปัจจัยต่างๆ ทางกายภาพที่ไม่เหมาะสม เช่น อุณหภูมิ พีเอช ก็เป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและการผลิตก๊าซชีวภาพที่ลดลงของจุลินทรีย์



รูปที่ 4.24 Hydrogen Yield จากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท

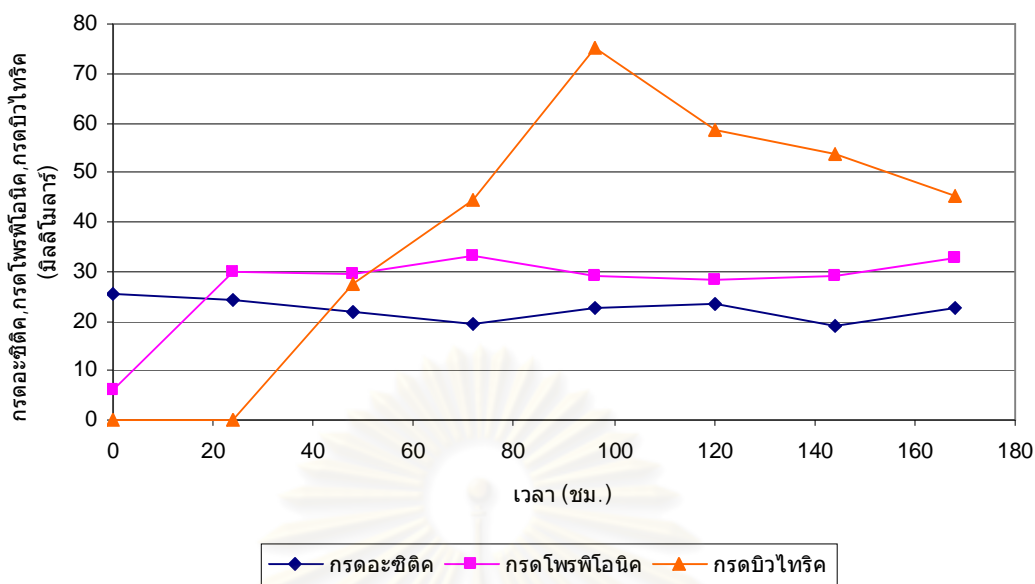
ก) Hydrogen Yield (mol H<sub>2</sub>/mol glucose) ข) Hydrogen Yield (ml H<sub>2</sub>/g COD)

#### 4.3.5 กรดอินทรีย์ระเหย

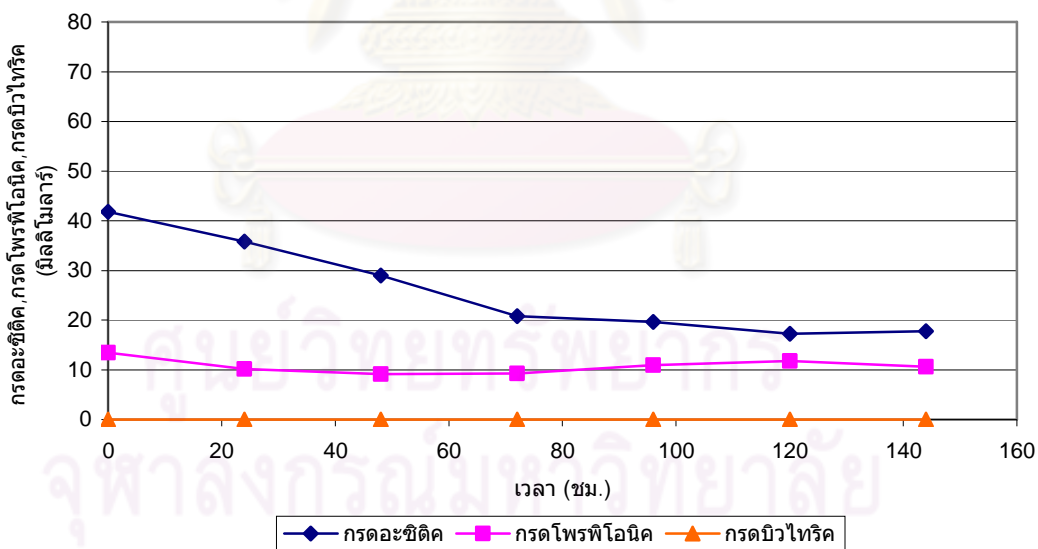
กรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดจากการหมักน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหารทั้ง 3 ประเภท ประกอบด้วยกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวไทรค จากรูปที่ 4.25 จะพบว่ากรดอะซิติกที่เกิดจากการหมักน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีการเพิ่มขึ้นของกรดบิวไทรค และเมื่อนำมาพิจารณาประกอบกับปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในรูปที่ 4.21 จะพบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนจะเริ่มเข้าสู่สภาวะคงตัวที่ประมาณ 50 ชั่วโมง ซึ่งเป็นเวลาที่กรดบิวไทรคมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นด้วย จึงเป็นการยืนยันได้ว่ากรดบิวไทรคที่เกิดขึ้นในกระบวนการหมักจะเป็นตัวยับยั้งการผลิตไฮโดรเจน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ginkel (2005) และ Sangyoka (2007) ที่พบว่าเมื่อกลูโคสเปลี่ยนเป็นกรดบิวไทรคจะทำให้ก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่ากรดบิวไทรคที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวยับยั้งการเกิดก๊าซไฮโดรเจน นอกจากนี้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ลดลงอาจเกิดจากปัจจัยอื่นๆ เช่น จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองประกอบกับสภาพภูมิอากาศที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

รูปที่ 4.26 แสดงกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดจากการหมักน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว พบว่าความเข้มข้นของกรดอะซิติกลดลงอย่างรวดเร็วหากเปรียบเทียบกับน้ำเสียแป้งมันสำปะหลัง และเมื่อนำมาพิจารณาประกอบกับรูปที่ 4.20 ข พบว่าไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นมีสัดส่วนที่น้อยและหมดลงอย่างรวดเร็วที่เวลาประมาณ 40 ชั่วโมง อาจกล่าวได้ว่าความเข้มข้นที่ลดลงอย่างรวดเร็วของกรดอะซิติก จะทำให้ไฮโดรเจนมีปริมาณน้อยลงด้วย ในขณะที่กรดอะซิติกที่เกิดจากการหมักน้ำเสียซ็อกโกแลตในรูปที่ 4.27 จะมีความเข้มข้นสูงถึง 1,700 มิลลิโมลาร์ในช่วง 20 ชั่วโมงแรก ซึ่งน่าจะเป็นผลจากกระบวนการหมักเพื่อย่อยสลายน้ำตาลโมเลกุลคู่ในน้ำเสียให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวโดยจุลินทรีย์เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและผลิตไฮโดรเจน หากนำมาพิจารณาประกอบกับรูปที่ 4.20 ค พบว่าไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะมีความเสถียรกว่าและมีระยะเวลาการเกิดไฮโดรเจนที่นานกว่าน้ำเสียอีก 2 ประเภทที่กล่าวมาข้างต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

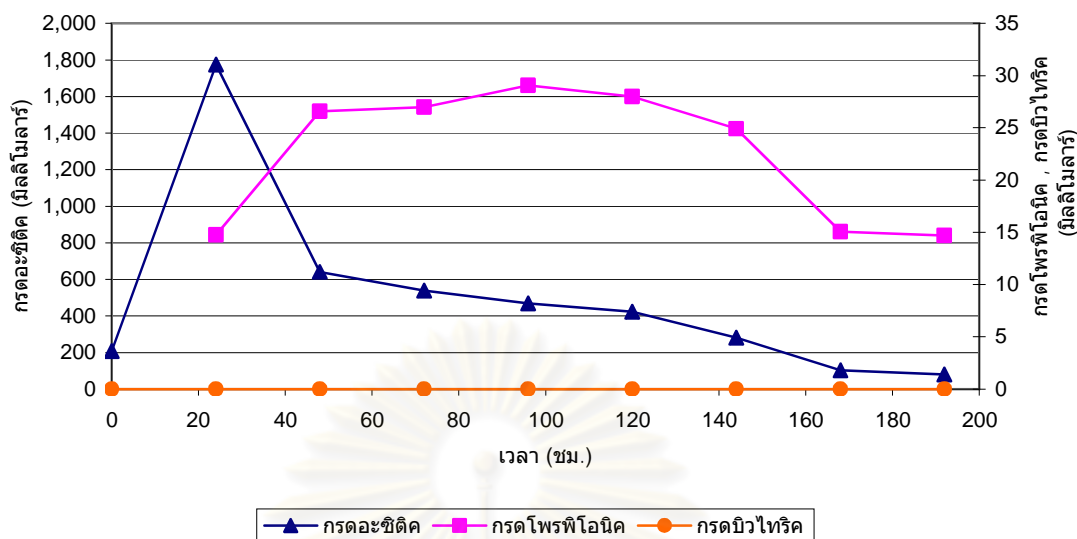


รูปที่ 4.25 กรดอินทรีย์ระเหยจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง



รูปที่ 4.26 กรดอินทรีย์ระเหยจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตกล้วยเดี่ยว





รูปที่ 4.27 กรดอินทรีย์ระเหยจากการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงและควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียสของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตช็อกโกแลต

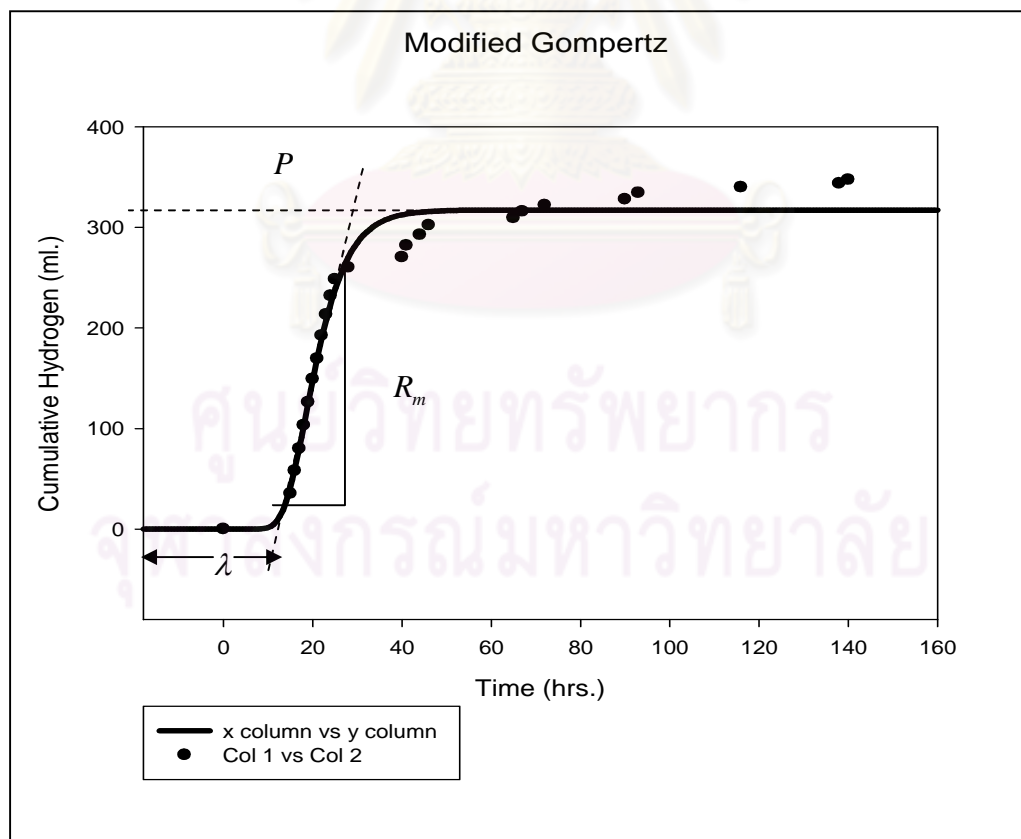
#### 4.3.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์

การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการ Modified Gompertz ใช้เทียบข้อมูลการทดลองโดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด โดยนำข้อมูลจากการทดลองมาจัดรูปเพื่อเปรียบเทียบกับสมการ Modified Gompertz ด้วยโปรแกรม Sigmaplot 10 จะสามารถหาสัมประสิทธิ์ของระยะเวลาเกิดก๊าซเริ่มต้น (Lag time) ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุดและอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดได้จากกราฟ นั่นคือค่าอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดได้จากความชันของกราฟ ระยะเวลาเกิดก๊าซเริ่มต้นได้จากจุดตัดแกน X และปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสะสมสูงสุด ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4.28 ซึ่งผลการวิเคราะห์ข้อมูลการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภทด้วยสมการดังกล่าว พบว่าสามารถระบุพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.3 พบว่าน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและมีอัตราการเกิดก๊าซมากที่สุด รองลงมาคือ น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตช็อกโกแลตและน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตถั่วเขียว ซึ่งมีค่าเท่ากับ 317.285 249.508 และ 65.933 มิลลิลิตร ตามลำดับ และเมื่อนำผลการทดลองที่เกิดขึ้นมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าปริมาณก๊าซไฮโดรเจนจากการทดลองมีปริมาณน้อยกว่างานวิจัยที่ผ่านมาอาจเนื่องมาจากปริมาณซีโอดีเริ่มต้นตะกอนแขวนลอย หัวเชื้อเริ่มต้น และสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและการผลิต

ก๊าซไฮโดรเจนของจุลินทรีย์ เช่น อุณหภูมิ พีเอชและการควบคุมความดันพาร์เซียลของไฮโดรเจน เป็นต้น

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ต่างๆ ของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภทจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางจลนพลศาสตร์

| พารามิเตอร์                                     | แป้งมันสำปะหลัง | กล้วยเตี้ย | ซ็อกโกแลต |
|---|-----------------|------------|-----------|
| อัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด, $R_m$ (มล./ชม.) | 22.8            | 1.3        | 4.2       |
| ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสูงสุด, $P$ (มล.)             | 317.3           | 65.9       | 247.3     |
| ระยะเวลาเกิดก๊าซเริ่มต้น, $\lambda$ (ชม.)       | 13.5            | 0.4        | 2.0       |
| Hydrogen Yield (มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมชีโอดี) | 14              | 28.4       | 31.3      |
| $R^2$   | 0.98            | 0.95       | 0.96      |



รูปที่

4.28 ตัวอย่างกราฟที่สร้างจากโปรแกรม Sigmaplot 10 เมื่อทำการจัดรูปข้อมูลจากการทดลองกับสมการ Modified Gompertz

ตารางที่ 4.4 สรุปผลการเปรียบเทียบการผลิตก๊าซไฮโดรเจนกับงานวิจัยอื่น

| ประเภทน้ำเสีย                         | สถานะที่ทำการทดลอง | ปริมาณก๊าซไฮโดรเจน            | การกำจัดซีโอดี (%) | เอกสารอ้างอิง           |
|---------------------------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------|
| น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์สำเร็จรูป | พีเอช 6            | 184 ml H <sub>2</sub> /L-WW   | 7.3                | Oh และ Logan, 2005      |
| น้ำเสียแอมโมเนีย                      | พีเอช 6.1          | 900 ml H <sub>2</sub> /L-WW   | 6.9                | Van Ginkel และคณะ, 2005 |
| น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์สำเร็จรูป | พีเอช 6.1          | 100 ml H <sub>2</sub> /L-WW   | 7.1                | Van Ginkel และคณะ, 2005 |
| น้ำเสียมันฝรั่ง                       | พีเอช 6.1          | 2100 ml H <sub>2</sub> /L-WW  | 6.9                | Van Ginkel และคณะ, 2005 |
| น้ำเสียชุมชน                          | พีเอช 6.1          | 10 ml H <sub>2</sub> /L-WW    | 7.0                | Van Ginkel และคณะ, 2005 |
| น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง  | พีเอช 6<br>45 °ซ   | 640 ml H <sub>2</sub> /L WW   | -                  | Reungsang และคณะ, 2004  |
| น้ำตาลซูโครส                          | พีเอช 6            | 1867 ml H <sub>2</sub> /L WW  | -                  | Khanal และคณะ, 2004     |
| น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง  | พีเอช 6            | 933 ml H <sub>2</sub> /L WW   | -                  | Khanal และคณะ, 2004     |
| น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง  | พีเอช 6            | 138.8 ml H <sub>2</sub> /L-WW | 17.24              | ผลการวิจัย              |
| น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์สำเร็จรูป | พีเอช 6            | 102.4 ml H <sub>2</sub> /L-WW | 9.3                | ผลการวิจัย              |
| น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว   | พีเอช 6            | 28.4 ml H <sub>2</sub> /L-WW  | 6                  | ผลการวิจัย              |

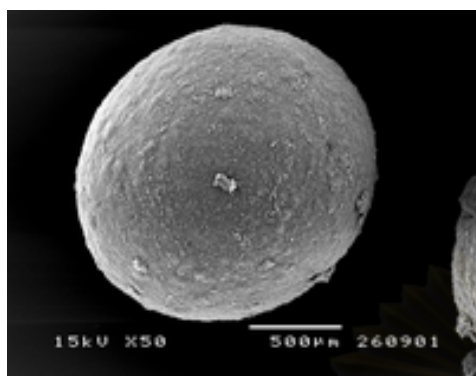
#### 4.4 การศึกษาโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

##### เม็ดตะกอนเริ่มต้น

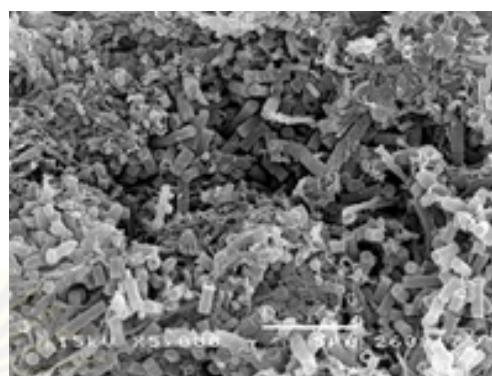
จากการศึกษาโครงสร้างของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.29 เม็ดตะกอนเริ่มต้นที่นำมาจากระบบบำบัดน้ำเสียไร้ออกซิเจนยูเอสบีของบริษัท เสริมสุข จำกัด (โรงงานปทุมธานี) มีลักษณะกลม ผิวเรียบ มีความสมบูรณ์มาก เมื่อทำการศึกษาโครงสร้างภายในเม็ดตะกอนพบว่า ประกอบด้วยจุลินทรีย์อาศัยรวมอยู่กันอย่างหนาแน่น โดยส่วนใหญ่มีรูปร่างเป็นท่อน (รูปที่ 4.29 ก และ ข) แต่เมื่อนำหัวเชื้อเริ่มต้นดังกล่าวไปผ่านการให้ความร้อนด้วยการนึ่งในหม้ออัดความดันที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เพื่อคัดเลือกให้เหลือเฉพาะจุลินทรีย์กลุ่มสร้างไฮโดรเจน พบว่าเม็ดตะกอนหดตัวเล็กน้อยทำให้มีขนาดเล็กลง โดยเกิดการหลุดลอกของเซลล์ที่พื้นผิวเป็นขุย เมื่อเพิ่มกำลังขยายส่องดูบริเวณดังกล่าว จะพบว่าซากเซลล์ตายที่เกิดจากการถูกทำลายด้วยความร้อน (รูปที่ 4.29 ค และ ง) แต่เนื่องจากหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่มีบทบาทในการผลิตไฮโดรเจนจะเป็นแบคทีเรียที่สามารถเข้าสู่ระยะสปอร์ได้เมื่อสภาวะแวดล้อมภายนอกไม่เหมาะสม จึงไม่ถูกทำลายด้วยความร้อนสูงจากการนึ่ง เป็นผลให้แบคทีเรียในเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ดังกล่าวยังอยู่ในสภาพมีชีวิต สามารถใช้สารอินทรีย์ในการเจริญเติบโตและผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้อย่างรวดเร็วเมื่อสภาวะแวดล้อมภายนอกเหมาะสมอีกครั้ง

##### ตะกอนจุลินทรีย์ภายหลังกระบวนการหมัก

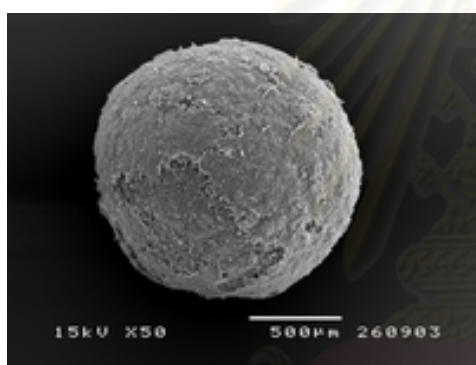
รูปที่ 4.30 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตะกอนจุลินทรีย์ภายหลังกระบวนการหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท โดยพบว่าตะกอนจุลินทรีย์ไม่มีการจับตัวเป็นเม็ด แต่มีลักษณะที่เกาะกันเป็นก้อน โดยจุลินทรีย์ที่พบในตะกอนมีลักษณะเหมือนกันคือ มีรูปร่างเป็นท่อน (Rod shape) มีขนาดในช่วง 1-5 ไมครอน ซึ่งมีลักษณะใกล้เคียงกับแบคทีเรียในกลุ่ม *Clostridium* (รูปที่ 4.29 ก) ซึ่งมีการรายงานว่าเป็นแบคทีเรียกลุ่มหลักที่ผลิตไฮโดรเจน (Yokoi, 2002)



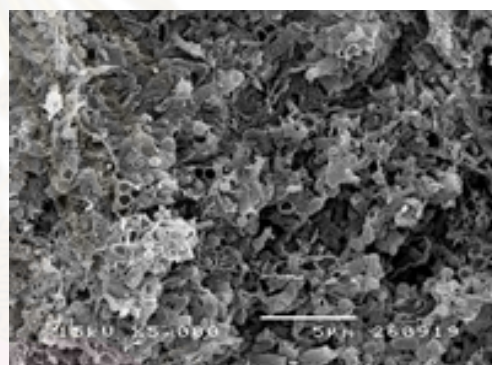
(ก)



(ข)



(ค)

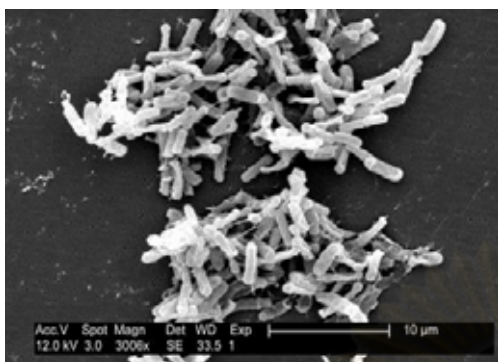


(ง)

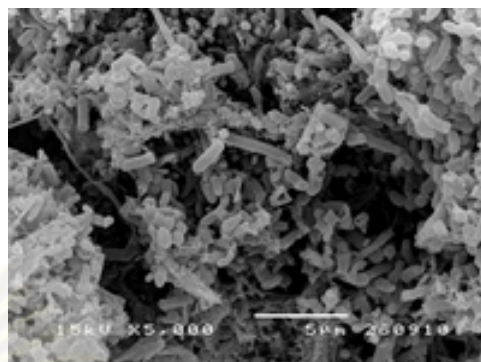
รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้นและเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ภายหลังผ่านการนึ่งด้วยหม้ออัดความดัน

- (ก) บริเวณผิวภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 50 เท่า
- (ข) บริเวณตรงกลางของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า
- (ค) บริเวณผิวภายนอกของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการนึ่งที่กำลังขยาย 50 เท่า
- (ง) บริเวณขอบของเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการนึ่งที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

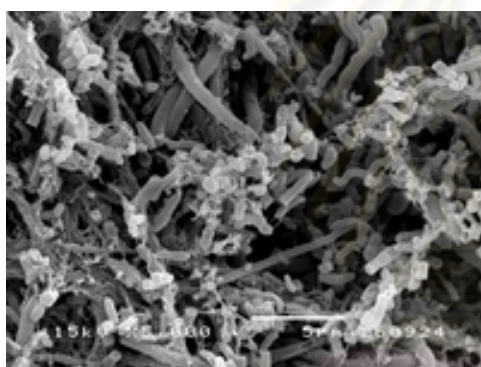




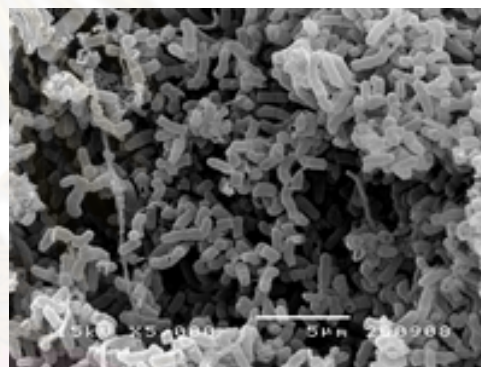
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท

(ก) แบคทีเรียกลุ่ม *Clostridium*

([http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Clostridium\\_difficile\\_01.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Clostridium_difficile_01.jpg))

(ข) กลุ่มจุลินทรีย์ในตะกอนหัวเชื้อภายหลังจากการหมักน้ำเสียแป่งมันสำปะหลังที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

(ค) กลุ่มจุลินทรีย์ในตะกอนหัวเชื้อภายหลังจากการหมักน้ำเสียกล้วยเตี๋ยที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

(ง) กลุ่มจุลินทรีย์ในตะกอนหัวเชื้อภายหลังจากการหมักน้ำเสียซีกโกแลตที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



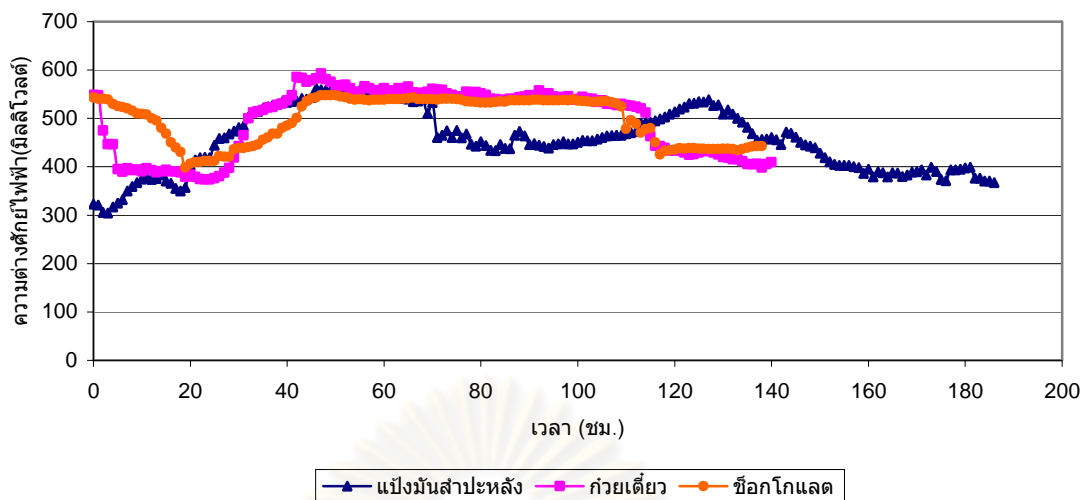
#### 4.5 การผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบ (Two-chamber MFC)

นำน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภทที่ผ่านกระบวนการหมักเพื่อผลิตไฮโดรเจนแล้วมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบ โดยนำหมักจากอุตสาหกรรมอาหารทั้ง 3 ประเภทมีลักษณะเบื้องต้นดังแสดงในตารางที่ 4.5 ทำการบรรจุน้ำหมักแต่ละประเภทลงในภาชนะด้านแอนโอดร่วมกับหัวเชื้อแอนแอโรบิคจากระบบยูเอเอสบี ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปิดภาชนะเพื่อให้อยู่ในสภาวะไร้ออกซิเจน ในขณะที่ภาชนะด้านแคโทดบรรจุด้วยน้ำกลั่นและมีการเติมออกซิเจนเพื่อเป็นตัวรับอิเล็กตรอน สำหรับปริมาณน้ำของทั้งสองภาชนะควรบรรจุให้ท่วมขั้วอิเล็กโทรดที่ทำจากแท่งแกรไฟต์ขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 4 เซนติเมตร หนา 0.3 เซนติเมตร ทำการเก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยใช้ชุดเก็บข้อมูลที่ประกอบด้วยวงจรไฟฟ้าและแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงขนาด 12 โวลต์ ที่ออกแบบเพื่อทำการเก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพทุกๆ 1 ชั่วโมง โดยใช้ความต้านทานที่ 10 เมกกะโอห์ม

ตารางที่ 4.5 ลักษณะสมบัติของน้ำหมักจากอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภทที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตกระแสไฟฟ้า

| พารามิเตอร์    | หน่วย        | ปริมาณ  |            |           |
|----------------|--------------|---------|------------|-----------|
|                |              | แป้งมัน | กล้วยเขียว | ซ็อกโกแลต |
| อุณหภูมิ       | องศาเซลเซียส | 30      | 30         | 31        |
| พีเอช          | -            | 6.03    | 6.78       | 6.50      |
| ซีโอดีละลายน้ำ | มก./ล.       | 4,800   | 3,200      | 3,200     |
| กลูโคส         | ก./ล.        | 0.314   | 0.260      | 0.327     |

ผลการทดลองพบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นกล้วยเขียวและน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลตมีปริมาณใกล้เคียงกัน แสดงดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ความต่างศักย์ไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท

จากรูปที่ 4.31 พบว่าความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นของน้ำเสียทั้ง 3 ประเภท จะเริ่มเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 100 ชั่วโมงและเริ่มลดลงจนคงที่ อาจเนื่องจากการทดลองเป็นแบบแบตช์ จึงทำให้สารอาหารไม่เพียงพอ ส่งผลทำให้แบคทีเรียไม่มีอาหารเพียงพอในการเจริญเติบโตและการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยค่าความต่างศักย์ที่ผลิตได้จากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตน้ำมันสาปะหลัง น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นกล้วยเด็ยวและน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตช็อกโกแลตมีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 526.5, 592.68 และ 548 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และมีพลังงานไฟฟ้าเท่ากับ 161.43 179.22 และ 153.22 ไมโครวัตต์ต่อตารางเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.6 ซึ่งหากเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ผ่านมาของ Logan (2005) ที่ทำการทดลองผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียผลิตซีอิ๊วสำเร็จรูปด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบแบบใช้เมมเบรน (ตารางที่ 4.7) พบว่าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ถึง  $81 \pm 7$  มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร ซึ่งมีปริมาณสูงกว่าผลการทดลองโดยอาจเนื่องมาจากปัจจัยที่มีผลหลายด้าน ได้แก่ ประเภทและองค์ประกอบของน้ำเสียที่แตกต่างกัน สภาวะที่ทำการทดลองและโดยเฉพาะอย่างยิ่งชุดเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ในงานวิจัยดังกล่าว เป็นชุดเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบที่เชื่อมต่อกันด้วยเมมเบรน ในขณะที่งานวิจัยนี้ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพลักษณะเดียวกันแต่เชื่อมต่อกันด้วยสะพานเกลือ ซึ่งงานวิจัยของ Min และคณะ (2005) พบว่าความต้านทานภายในของสะพานเกลือ ( $19920 \pm 50$  โอห์ม) มีปริมาณมากกว่าเมมเบรน ( $1286 \pm 1$  โอห์ม) จึงมีผลทำให้ความต่างศักย์ที่วัดได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีค่าน้อย และการที่จะเพิ่มความต่างศักย์ให้มีค่ามากขึ้นสามารถทำได้ 2 วิธี คือ เพิ่มพื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรดเพื่อให้อิเล็กตรอนได้มากขึ้น และการเคลือบแพลททินัมที่ขั้วอิเล็กโทรดด้านแคโทดเพื่อที่จะทำให้ความต่างศักย์ด้านแคโทดมีปริมาณมากขึ้น

นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่าการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพต่อเนื่องจากกระบวนการหมักเพื่อผลิตไฮโดรเจนจะเป็นการลดค่าความสกปรกของน้ำเสียในรูปซีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าลดลงเท่ากับ 59.45 42.35 และ 44.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวและน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต นอกจากนี้กระบวนการดังกล่าวยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียที่ออกจากระบบแอนแอโรบิก ประกอบกับได้พลังงานทดแทนกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตอีกด้วย

ตารางที่ 4.6 ปริมาณสูงสุดของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

| พารามิเตอร์   | หน่วย                    | ปริมาณสูงสุด    |            |           |
|---------------|--------------------------|-----------------|------------|-----------|
|               |                          | แป้งมันสำปะหลัง | ก๋วยเตี๋ยว | ซ็อกโกแลต |
| Voltage       | mV                       | 562.5           | 592.68     | 548       |
| Current       | $\mu\text{A}$            | 0.56            | 0.59       | 0.55      |
| Power         | $\mu\text{W}$            | 0.32            | 0.35       | 0.30      |
| Power density | $\mu\text{W}/\text{m}^2$ | 161.43          | 179.22     | 153.22    |

ตารางที่ 4.7 สรุปผลการเปรียบเทียบการผลิตกระแสไฟฟ้ากับงานวิจัยอื่น

| ประเภทน้ำเสีย  | ชนิดเซลล์เชื้อเพลิง  | กำลังไฟฟ้า                  | เอกสารอ้างอิง      |
|--|--|-----------------------------|--------------------|
| น้ำเสียผลิตดัชนีพืชสำเร็จรูป                               | เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบที่ต่อเชื่อมด้วยเมมเบรน  | $81 \pm 7 \text{ mW/m}^2$   | Oh และ Logan, 2005 |
| น้ำเสียที่ผ่านการผลิตไฮโดรเจน                              | เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะใบเดียวที่ต่อเชื่อมด้วยเมมเบรน  | $371 \pm 10 \text{ mW/m}^2$ | Oh และ Logan, 2005 |
| น้ำตาลกลูโคส   | เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบที่ต่อเชื่อมด้วยเมมเบรน และมี methylene blue เป็นสารพอลิอิเล็กตรอน | $9.3 \text{ mW/m}^2$        | Mohan และคณะ, 2007 |
| น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่ผ่านการผลิตไฮโดรเจน | เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบที่ต่อเชื่อมด้วยสะพานเกลือ   | $161 \mu\text{W/m}^2$       | ผลการวิจัย         |
| น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลตที่ผ่านการผลิตไฮโดรเจน       | เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบที่ต่อเชื่อมด้วยสะพานเกลือ   | $153.22 \mu\text{W/m}^2$    | ผลการวิจัย         |
| น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวที่ผ่านการผลิตไฮโดรเจน  | เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบที่ต่อเชื่อมด้วยสะพานเกลือ   | $179.22 \mu\text{W/m}^2$    | ผลการวิจัย         |

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการวิจัยนี้ทำการศึกษาศึกษาสภาพและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนและต่อเนื่องด้วยการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพของน้ำเสียอุตสาหกรรม 3 ประเภท ได้แก่ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว และน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต โดยสามารถสรุปผลการวิจัยนี้ได้ดังนี้

5.1.1 การหมักไร้ออกซิเจนแบบไร้แสงมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนมากกว่าการหมักแบบใช้แสง เมื่อพิจารณาจากระบบที่มีการเดินระบบแบบต่อเนื่องทั้งในด้านอัตราการเกิดก๊าซไฮโดรเจนและระยะเวลาในการเกิดก๊าซเริ่มต้น นอกจากนี้การเดินระบบแบบไร้แสงยังเป็นการประหยัดพลังงานในการให้แสงสว่างอีกด้วย

5.1.2 ปริมาณซีโอดีที่เพิ่มขึ้นของน้ำเสียในทุกชุดการทดลองเกิดจากการละลายกลับของสารอินทรีย์ที่เกิดจากการย่อยสลายหัวเชื้อที่ตายภายหลังการให้ความร้อน

5.1.3 น้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร 3 ประเภท ได้แก่ น้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว และน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลตมีศักยภาพและมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนผ่านกระบวนการหมักและผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

5.1.4 ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตจากน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว และน้ำเสียจากอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลตมีปริมาณเท่ากับ 138.80 28.40 และ 102.40 มิลลิลิตรต่อลิตรน้ำเสีย ตามลำดับ และปริมาณซีโอดีภายหลังกระบวนการหมักมีค่าลดลงเท่ากับ 17.24 6 และ 9.3 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

5.1.5 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้จากน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง น้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวและน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตช็อกโกแลตมีปริมาณใกล้เคียงกัน โดยมีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 526.5, 592.68 และ 548 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการทดลองยังพบว่าการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ เมื่อใช้น้ำเสียจากการผลิตไฮโดรเจนเป็นน้ำเสียเริ่มต้นจะทำให้ปริมาณซีโอไซด์ลดลงเท่ากับ 59.45 42.35 และ 44.44 เปอร์เซ็นต์จากปริมาณเริ่มต้นตามลำดับ ทำให้สรุปได้ว่าการใช้ประโยชน์จากน้ำเสียในการผลิตไฮโดรเจนควบคู่กับการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะเป็นการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพทางหนึ่งและได้พลังงานทดแทนกลับมาใช้ในกระบวนการผลิตอีกด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาผลของปัจจัยอื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ดังนี้

### 5.2.1 การผลิตไฮโดรเจน

- การคัดเลือกสายพันธุ์ของจุลินทรีย์และเลือกสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมกับจุลินทรีย์ผลิตไฮโดรเจน เพื่อให้ได้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนและความเข้มข้นของไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น
- ทดลองผลิตไฮโดรเจนจากคาร์โบไฮเดรตที่มีขนาดโมเลกุลต่างกัน ได้แก่ น้ำตาลโมเลกุลคู่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เป็นต้น หรือการทดลองผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียที่มีปริมาณตะกอนแขวนลอยต่างกัน

### 5.2.2 การผลิตกระแสไฟฟ้า

- การใช้เมมเบรนแทนสะพานเกลือเป็นเพื่อลดความต้านทานภายในที่เกิดจากสะพานเกลือ
- การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดในการรับอิเล็กตรอนของขั้วอิเล็กโทรด ด้วยการใช้แผ่นคาร์บอน (Carbon paper)
- การใช้เฟอร์ริกไซยาไนด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนการใช้น้ำกลั่นเพื่อทำให้ความต่างศักย์ด้านแอโนดและแคโทดมีปริมาณต่างกันมากขึ้น



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

ธีระ เกรอด. 2539. วิศวกรรมน้ำเสีย การบำบัดทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่ง  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ปลั่งงาน, กระทรวง. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. พลังงานทดแทน.  
[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.dede.go.th>: [12 มกราคม 2550]

ภนิดา เกษมโชติช่วง. 2549. การผลิตไฮโดรเจนและมีเทนชีวภาพโดยใช้ระบบยูเอเอสบีแบบสอง  
ขั้นตอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มหาวิทยาลัยมหิดล. เซลล์เชื้อเพลิง. [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา: [http://mulinet6.li.mahidol.ac.th/  
cd-om/cd-rom0306/web/5fuel\\_kind6.html](http://mulinet6.li.mahidol.ac.th/cd-om/cd-rom0306/web/5fuel_kind6.html): [12 มกราคม 2550]

มันสิน ตัณฑุลเวศม์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่ม 2, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ:  
เซน.อี.68 คอนซัลติงเอ็นจิเนียรส์.

วันช แก้วโกมินทวงษ์. 2549. การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของการนำพลังงานไฮโดรเจนมาใช้แทน  
น้ำมันเชื้อเพลิงรถยนต์ในประเทศไทย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, คณะ  
เศรษฐศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิกิพีเดีย สารานุกรมไทย. ไฮโดรเจน. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: [http://th.wikipedia.org/wiki/  
ไฮโดรเจน](http://th.wikipedia.org/wiki/ไฮโดรเจน): [16 ธันวาคม 2551]

สุทธิพร วารีสุงเนิน. 2550. การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้อง  
เดี่ยวโดยไม่ใช้เมดิเอเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สุภาภรณ์ เทอดเทียนวงษ์, อภิษฐ์ เทิดเทียนวงษ์ และปานจันทร์ ศรีจรูญ. 2547. การศึกษาเบื้องต้นของปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนและปฏิกิริยาอโต้เทอร์มอลในการผลิตเชื้อเพลิงไฮโดรเจนจากเอทานอล. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

### ภาษาอังกฤษ

APHA, AWWA, WPCF. 1992. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18<sup>th</sup> ed. Washington, DC: American Public Health Association.

Chudoba, J. 1985. Control of activated sludge filamentous bulking VI: Formulation of basic principle. Water Research 19: 1017-1022.

Dubios, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A. and Smith, F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substance. Analytical Chemistry 28, 3: 351-356.

Ginkel, S.V. and Logan, B.E. 2005. Inhibition of Biohydrogen production by undissociate acetic and butyric acid. Environmental Science and Technology 39: 9351-9356.

Hallenbeck, P.C. and Benemann, J.R. 2002. Biological hydrogen production: fundamentals and limiting process. Hydrogen Energy 27: 1185-1193.

Haandel, A.V. and Lubble, J.V. Anaerobic digestion [Online]. 2007. Available from: [http://www.wastewaterhandbook.com/webpg/th\\_sludge\\_83](http://www.wastewaterhandbook.com/webpg/th_sludge_83): [2009, Jan 20]

Khanal, S.K., Chen, W.H., Li, L. and Sung, S. 2004. Biological hydrogen production: effects of pH and intermediate products. Hydrogen Energy 29: 1123-1131.

Ken, N. Microbial Fuel Cell. [Online]. 2006. Available from: [http://www.use.edu/research/private/does/initiatives/future\\_fuel/Nealso\\_FFET.pdf](http://www.use.edu/research/private/does/initiatives/future_fuel/Nealso_FFET.pdf): [2007, Jan 11]

- Lin, C.Y., Wu, C.C. and Hung, C.H. 2007. Temperature effects on fermentative hydrogen production from xylose using mixed anaerobic culture. Hydrogen Energy 33: 43-50.
- Logan, B.E., Oh, S.E., Kim, I.S. and Ginkel, S.V. 2002. Biological hydrogen production measure in batch anaerobic respirometer. Environmental Science and Technology 36: 2530-2535.
- Lui, H., Ramnarayanan, R. and Logan, B.E. 2004. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. Environmental Science and Technology 38: 2281-2285.
- Manish, S. and Banerjee, R. 2008. Comparison of biohydrogen production processes. Hydrogen Energy 33: 279-286.
- Min, B., Cheng, S. and Logan, B.E. 2005. Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. Water Research 39: 1675-1686.
- Mohan, Y., Muthu Kumar, S.M. and Das, D. 2008. Electricity generation using microbial fuel cells. Hydrogen Energy 33: 423-426.
- 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.
- Oh, S.E., Ginkel, S.V. and Logan, B.E. 2003. The relative effectiveness of pH control and heat treatment for enhancing biohydrogen gas production. Environmental Science and Technology 37: 5186-5190.
- Oh, S.E., Min, B. and Logan, B.E. 2004. Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. Environmental Science and Technology 39: 4900-4904.

- Pennsylvania State University. Microbial Fuel Cell. [Online]. 2008. Available from: <http://www.microbialfuelcell.org/www/index.php/Research-reactors.html>: [2008, Jun 20]
- Rabaey, A. and Verstraete, W. Microbial Fuel Cell. [Online]. 2005. Available from: <http://www.microbialfuelcell.org>: [2007, Jan 11]
- Rabaey, K. and Verstraete, W. 2005. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. Trend in Biotechnology 23: 291-298.
- Reungsang, A., Sangyoka, S., Imai, T. and Chairprasert, P. 2004. Biological production from cassava starch manufacturing wastewater. Sustainable Energy and Environment 3: 319-327.
- Salt Bridge. [Online]. Available from: <http://mooni.fccj.org/~ethall/2046/ch18/galvanic.htm>: [2009, Jan 11]
- Sangyoka, S., Reungsang, A. and Moonamart, S. 2007. Repeated-batch fermentative for bio-hydrogen production from cassava starch manufacturing wastewater. Biological Science 10, 11: 1782-1789.
- Shukla, A.K., Suresh, P. and Rajendran, A. 2004. Biological fuel cells and their applications. Current Science 87: 455-468.
- Speece, R., E. 1996. Anaerobic biotechnology for industrial wastewater. United State of America.
- Tao, Y., Chen, Y., Wu, Y., He, Y. and Zhou, Z. 2007. High hydrogen yield from two-step process of dark and photo fermentation of sucrose. Hydrogen Energy 32: 200-206.
- Van Ginkel, S.W., Oh, S.E. and Logan, B.E. 2005. Biohydrogen gas production from food processing and domestic wastewater. Hydrogen Energy 30: 1535-1542.

Yokoi, H., Tokushige, T., Hirose, J., Hayashi, S. and Takasaki Y. 1998. Hydrogen production from starch by a mixed culture of *Clostridium butyricum* and *Enterobacter aerogenes*. Biotechnology Letter 2: 143-147.

Yokoi, H., Mori, S., Hirose, J., Hayashi, S. and Takasaki Y. 1998. Hydrogen production from starch by a mixed culture of *Clostridium butyricum* and *Rhodobacter* sp.M-19. Biotechnology Letter 2: 895-899.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ก

ผลการทดลองของกระบวนการหมักไร้อากาศ แสดงดังตารางต่อไปนี้

### การทดลองส่วนที่ 1

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมัน  
สำปะหลัง

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมัน  
สำปะหลัง

### การทดลองส่วนที่ 2

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมัน  
สำปะหลังที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของชุดควบคุมที่มีการควบคุม  
อุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

### การทดลองส่วนที่ 3

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมัน  
สำปะหลังที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก-6 ผลการทดลองการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว  
ที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก-7 ผลการทดลองการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต  
ที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้ง  
มันสำปะหลัง

| วันที่    | จำนวน ชม. | pH   | Dissolved COD (mg/l) |
|-----------|-----------|------|----------------------|
| 15/1/2551 | 0         | 6    | 5000                 |
| 16/1/2551 | 24        | 6.2  | 5200                 |
| 17/1/2551 | 48        | 6.23 | 8640                 |
| 18/1/2551 | 72        | 6.35 | 8640                 |
| 20/1/2551 | 120       | 6.25 | 8800                 |
| 21/1/2551 | 144       | 6.3  | 8800                 |

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองการหมักไร้อากาศแบบใช้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้ง  
มันสำปะหลัง

| วันที่    | จำนวน ชม. | pH   | Dissolved COD (mg/l) |
|-----------|-----------|------|----------------------|
| 15/1/2551 | 0         | 6    | 5000                 |
| 16/1/2551 | 24        | 6.2  | 5600                 |
| 17/1/2551 | 48        | 6.15 | 7500                 |
| 18/1/2551 | 72        | 6.23 | 8600                 |
| 20/1/2551 | 120       | 6.29 | 8600                 |
| 21/1/2551 | 144       | 6.35 | 8800                 |

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้ง  
มันสำปะหลัง

| วันที่   | จำนวน ชม. | pH   | Dissolved COD (mg/l) | Acetic Acid (mM) | Propionic Acid (mM) | Butyric Acid (mM) | Glucose (g/l) |
|----------|-----------|------|----------------------|------------------|---------------------|-------------------|---------------|
| 313/2551 | 0         | 6.0  | 3440                 | 66.598           | 1.771               | 0.000             | 173.10        |
| 1/4/2551 | 16        | 4.81 | 5504                 | 36.514           | 2.043               | 0.000             | 77.06         |
| 2/4/2551 | 40        | 5.92 | 6192                 | 25.756           | 4.3841              | 0.000             | 61.28         |
| 3/4/2551 | 64        | 6.20 | 6192                 | 23.955           | 4.160               | 0.000             | 67.49         |
| 4/4/2551 | 88        | 6.21 | 6880                 | 1.930            | 3.919               | 0.000             | 68.33         |
| 5/4/2551 | 112       | 6.29 | 6400                 | 9.581            | 3.106               | 14.074            | 63.46         |
| 6/4/2551 | 136       | 6.36 | 6400                 | 8.946            | 2.923               | 19.784            | 62.12         |
| 7/4/2551 | 160       | 6.33 | 6400                 | 17.403           | 3.650               | 13.239            | 61.62         |

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของชุดควบคุม

| วันที่   | จำนวน ชม. | pH   | Dissolved COD (mg/l) | Acetic Acid (mM) | Propionic Acid (mM) | Butyric Acid (mM) | Glucose (g/l) |
|----------|-----------|------|----------------------|------------------|---------------------|-------------------|---------------|
| 313/2551 | 0         | 6.0  | 0                    | 0.000            | 0.0000              | 0.000             | 0.00          |
| 1/4/2551 | 16        | 6.1  | 2752                 | 26.811           | 0.7922              | 0.000             | 64.97         |
| 2/4/2551 | 40        | 6.21 | 2800                 | 12.419           | 0.9813              | 0.000             | 65.98         |
| 3/4/2551 | 64        | 6.45 | 2900                 | 9.800            | 0.8936              | 0.000             | 68.67         |
| 4/4/2551 | 88        | 6.5  | 2900                 | 9.225            | 0.8799              | 0.000             | 66.82         |
| 5/4/2551 | 112       | 6.6  | 2900                 | 11.458           | 0.9028              | 0.000             | 70.85         |
| 6/4/2551 | 136       | 6.65 | 2900                 | 11.418           | 0.9346              | 0.000             | 71.35         |
| 7/4/2551 | 160       | 6.69 | 2900                 | 11.630           | 1.0056              | 0.000             | 73.37         |

ตารางที่ ก- 5 ผลการทดลองการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีการ  
ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

| วันที่    | จำนวน ชม. | pH   | Dissolved COD (mg/l) | Acetic Acid (mM) | Propionic Acid (mM) | Butyric Acid (mM) | Glucose (g/l) |
|-----------|-----------|------|----------------------|------------------|---------------------|-------------------|---------------|
| 28/7/2551 | 0         | 6    | 3600                 | 25               | 6.00                | 0.00              | 3.477         |
| 29/7/2551 | 24        | 5.72 | 5800                 | 24               | 30.00               | 0.00              | 0.368         |
| 30/7/2551 | 48        | 5.79 | 5500                 | 22               | 29.60               | 27.60             | 0.267         |
| 31/7/2551 | 72        | 5.55 | 4800                 | 19               | 33.10               | 44.30             | 0.297         |
| 1/8/2551  | 96        | 6.05 | 4800                 | 23               | 29.00               | 75.00             | 0.311         |
| 2/8/2551  | 120       | 6.0  | 4800                 | 24               | 28.10               | 58.70             | 0.321         |
| 4/8/2551  | 168       | 6.08 | 4800                 | 19               | 29.00               | 53.60             | 0.299         |
| 5/8/2551  | 192       | 6.03 | 4800                 | 23               | 32.50               | 45.10             | 0.314         |

ตารางที่ ก-6 ผลการทดลองการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวที่มีการ  
ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

| วันที่    | จำนวน ชม. | pH   | Dissolved COD(mg/l) | Acetic Acid (mM) | Propionic Acid (mM) | Butyric Acid (mM) | Glucose (g/l) |
|-----------|-----------|------|---------------------|------------------|---------------------|-------------------|---------------|
| 8/7/2551  | 0         | 6    | 571.2               | 41.82            | 13.46               | 0.00              | 1.518         |
| 9/7/2551  | 24        | 6.75 | 2842                | 35.79            | 10.13               | 0.00              | 0.302         |
| 10/7/2551 | 48        | 6.6  | 3400                | 29.03            | 9.13                | 0.00              | 0.287         |
| 11/7/2551 | 72        | 6.62 | 3200                | 20.75            | 9.27                | 0.00              | 0.287         |
| 12/7/2551 | 96        | 6.53 | 3200                | 19.60            | 10.96               | 0.00              | 0.272         |
| 13/7/2551 | 120       | 6.58 | 3200                | 17.22            | 11.78               | 0.00              | 0.260         |
| 15/7/2551 | 168       | 6.78 | 3200                | 17.77            | 10.58               | 0.00              | 0.260         |

ตารางที่ ก-7 ผลการทดลองการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียผลิตซ็อกโกแลตที่มีการ  
ควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

| วันที่    | จำนวน ชม. | pH   | Dissolved COD(mg/l) | Acetic Acid (mM) | Propionic Acid (mM) | Butyric Acid (mM) | Glucose (g/l) |
|-----------|-----------|------|---------------------|------------------|---------------------|-------------------|---------------|
| 14/6/2551 | 0         | 6    | 1176                | 207.78           | 0.00                | 0.00              | 0.490         |
| 15/6/2551 | 24        | 6.84 | 3528                | 1775.06          | 14.77               | 0.00              | 0.321         |
| 16/6/2551 | 48        | 6.22 | 3136                | 640.60           | 26.60               | 0.00              | 0.314         |
| 17/6/2551 | 72        | 6.3  | 3200                | 538.01           | 27.0                | 0.00              | 0.314         |
| 18/6/2551 | 96        | 6.4  | 3200                | 467.54           | 29.07               | 0.00              | 0.310         |
| 19/6/2551 | 120       | 6.5  | 3200                | 423.12           | 28.01               | 0.00              | 0.304         |
| 20/6/2551 | 168       | 6.5  | 3200                | 281.96           | 24.91               | 0.00              | 0.327         |

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนของกระบวนการหมักไร้อากาศ แสดงดังตารางต่อไปนี้

### การทดลองส่วนที่ 1

ตารางที่ ข-1 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนของการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสีย  
อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง

ตารางที่ ข-2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนของการหมักไร้อากาศแบบใช้แสงของน้ำเสีย  
อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง

### การทดลองส่วนที่ 2

ตารางที่ ข-3 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนของการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสีย  
อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ข-4 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนของการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของชุด  
ควบคุมที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

### การทดลองส่วนที่ 3

ตารางที่ ข-5 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนของการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสีย  
อุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ข-6 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนของการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสีย  
อุตสาหกรรมผลิตเส้น ก๋วยเตี๋ยวที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ข-7 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนของการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสีย  
อุตสาหกรรมผลิต ซีอิ๊วโกแลตที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

ตารางที่ ข-1 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้อากาศแบบไร้อากาศของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง

| วันที่    | จำนวน (ชม.) | ก๊าซชีวภาพ (มล.) | ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.) | อัตราการเกิดก๊าซ (มล./ชม.) | ไฮโดรเจน (%) | ไฮโดรเจน (มล.) | ไฮโดรเจนสะสม (มล.) | CO (%) | CO2 (%) | Other (%) |
|-----------|-------------|------------------|----------------------|----------------------------|--------------|----------------|--------------------|--------|---------|-----------|
| 15/1/2551 | 0           | 0                | 0                    | 0.000                      | 0.000        | 0.000          | 0.000              | 0.000  | 0.000   | 0.000     |
| 16/1/2551 | 15          | 80               | 80                   | 5.333                      | 88.623       | 70.898         | 70.898             | 8.180  | 2.810   | 0.387     |
|           | 21          | 87               | 167                  | 14.500                     | 87.650       | 76.256         | 147.154            | 8.540  | 3.000   | 0.810     |
|           | 24          | 87               | 254                  | 29.000                     | 88.350       | 76.865         | 224.018            | 8.300  | 2.500   | 0.850     |
|           | 25          | 31               | 285                  | 31.000                     | 89.560       | 27.764         | 251.782            | 8.540  | 1.300   | 0.600     |
|           | 26          | 3                | 288                  | 3.000                      | 89.350       | 2.681          | 254.463            | 8.600  | 1.600   | 0.450     |
|           | 28          | 5                | 293                  | 2.500                      | 88.980       | 4.449          | 258.912            | 8.500  | 1.480   | 1.040     |
|           | 30          | 0                | 293                  | 0.000                      | 86.470       | 0.000          | 258.912            | 8.490  | 3.050   | 1.990     |
| 17/1/2551 | 37          | 0                | 293                  | 0.000                      | 82.590       | 0.000          | 258.912            | 10.540 | 4.870   | 2.000     |
|           | 46          | 0                | 293                  | 0.000                      | 80.970       | 0.000          | 258.912            | 11.760 | 5.270   | 2.000     |
|           | 49          | 0                | 293                  | 0.000                      | 79.230       | 0.000          | 258.912            | 13.460 | 7.120   | 0.190     |
|           | 52          | 0                | 293                  | 0.000                      | 72.970       | 0.000          | 258.912            | 11.260 | 11.260  | 4.510     |
| 18/1/2551 | 70          | 0                | 293                  | 0.000                      | 70.480       | 0.000          | 258.912            | 14.590 | 13.620  | 1.310     |



ตารางที่ ข-2 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้อากาศแบบใช้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง

| วันที่    | จำนวน (ชม.) | ก๊าซชีวภาพ (มล.) | ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.) | อัตราการเกิดก๊าซ (มล./ชม.) | ไฮโดรเจน (%) | ไฮโดรเจน (มล.) | ไฮโดรเจนสะสม (มล.) | CO (%) | CO2 (%) | Other (%) |
|-----------|-------------|------------------|----------------------|----------------------------|--------------|----------------|--------------------|--------|---------|-----------|
| 15/1/2551 | 0           | 0                | 0                    | 0.000                      | 0.00         | 0.000          | 0.0000             | 0.00   | 0.00    | 0.00      |
| 16/1/2551 | 12          | 3                | 3                    | 0.250                      | 93.10        | 2.793          | 2.793              | 5.89   | 0.98    | 0.03      |
|           | 21          | 123              | 126                  | 13.667                     | 93.59        | 115.116        | 117.9087           | 5.54   | 0.73    | 0.14      |
|           | 24          | 40               | 166                  | 13.333                     | 93.02        | 37.208         | 155.1167           | 4.65   | 1.91    | 0.42      |
|           | 25          | 20               | 186                  | 20.000                     | 93.55        | 18.7100        | 173.8267           | 4.54   | 1.91    | 0.00      |
|           | 26          | 18               | 204                  | 18.000                     | 91.64        | 16.495         | 190.3219           | 4.72   | 1.77    | 1.87      |
|           | 28          | 34               | 238                  | 17.000                     | 90.48        | 30.763         | 221.0851           | 7.53   | 2       | 0.00      |
|           | 30          | 32               | 270                  | 16.000                     | 84.31        | 26.979         | 248.0643           | 12.51  | 2.51    | 0.67      |
| 17/1/2551 | 37          | 21               | 291                  | 3.000                      | 83.19        | 17.469         | 265.5342           | 11.87  | 4.48    | 0.46      |
|           | 46          | 49               | 340                  | 5.444                      | 81.30        | 39.837         | 305.3712           | 13.22  | 5.47    | 0.01      |
|           | 49          | 14               | 354                  | 4.667                      | 76.24        | 10.673         | 316.0448           | 18.89  | 4.87    | 0.00      |
|           | 52          | 6                | 360                  | 2.000                      | 70.89        | 4.253          | 320.2982           | 17.93  | 6.02    | 5.16      |
| 18/1/2551 | 70          | 0                | 360                  | 0.000                      | 75.00        | 0.000          | 320.2982           | 19.06  | 5.94    | 0.00      |

ตารางที่ ข-3 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

| วันที่  | จำนวน ชม. | ก๊าซชีวภาพ (มล.) | ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.) | อัตราการเกิดก๊าซ (มล./ชม.) | H <sub>2</sub> (%) | H <sub>2</sub> % โดยน.น. | ไฮโดรเจน (มล.) | ไฮโดรเจนสะสม (มล.) | CO (%)  | CO <sub>2</sub> (%) | Other (%) |
|---------|-----------|------------------|----------------------|----------------------------|--------------------|--------------------------|----------------|--------------------|---------|---------------------|-----------|
| 31/3/51 | 0         | 0                | 0                    | 0.00                       | 0.000              | 0.00                     | 0.000          | 0.000              | 0.0000  | 0.0000              | 0.00      |
| 1/4/51  | 11        | 90               | 90                   | 8.18                       | 83.4737            | 10.36                    | 24.874         | 24.874             | 12.8904 | 3.6359              | 0.00      |
|         | 15.5      | 60               | 150                  | 13.33                      | 83.3477            | 10.29                    | 21.681         | 46.555             | 12.4572 | 4.1951              | 0.00      |
|         | 16        | 30               | 180                  | 60.00                      | 83.6919            | 10.43                    | 18.754         | 65.309             | 12.9892 | 3.3188              | 0.00      |
|         | 17        | 34               | 214                  | 34.00                      | 83.1706            | 9.57                     | 17.842         | 83.151             | 12.7944 | 4.0351              | 0.00      |
|         | 18        | 30               | 244                  | 30.00                      | 81.3063            | 9.57                     | 17.460         | 100.611            | 14.6667 | 4.0270              | 0.00      |
|         | 19        | 30               | 274                  | 30.00                      | 79.4893            | 6.86                     | 13.393         | 114.005            | 12.8213 | 3.9115              | 4.00      |
|         | 20        | 20               | 294                  | 20.00                      | 83.3819            | 8.04                     | 14.369         | 128.374            | 11.726  | 3.8591              | 1.00      |
|         | 22        | 36               | 330                  | 18.00                      | 85.7797            | 9.86                     | 18.682         | 147.056            | 10.4705 | 3.0580              | 1.00      |
|         | 23        | 40               | 370                  | 40.00                      | 87.4510            | 11.54                    | 21.660         | 168.716            | 8.9367  | 3.0290              | 1.00      |
|         | 24        | 62               | 432                  | 62.00                      | 84.4564            | 10.65                    | 22.661         | 191.376            | 10.399  | 5.1446              | 0.00      |
|         | 24.5      | 44               | 476                  | 88.00                      | 81.3790            | 8.39                     | 17.758         | 209.134            | 16.1623 | 2.4587              | 0.00      |
|         | 26        | 140              | 616                  | 93.33                      | 90.1112            | 12.26                    | 35.344         | 244.479            | 7.9095  | 1.9793              | 0.00      |
|         | 27        | 130              | 746                  | 130.00                     | 90.0249            | 12.05                    | 33.815         | 278.293            | 7.0891  | 1.8861              | 1.00      |
|         | 28        | 46               | 792                  | 46.00                      | 89.7329            | 11.63                    | 23.423         | 301.716            | 8.5305  | 1.7366              | 0.00      |
|         | 29        | 46               | 838                  | 46.00                      | 91.8300            | 11.15                    | 22.698         | 324.415            | 6.0309  | 2.1390              | 0.00      |
| 2/4/51  | 30        | 24               | 862                  | 24.00                      | 91.4871            | 9.37                     | 17.975         | 342.390            | 6.1846  | 2.3283              | 0.00      |
|         | 31        | 16               | 878                  | 16.00                      | 88.6250            | 10.65                    | 19.039         | 361.429            | 7.3011  | 2.5573              | 1.52      |
|         | 35        | 36               | 914                  | 9.00                       | 90.2512            | 10.19                    | 20.385         | 381.814            | 6.8812  | 2.8677              | 0.00      |
|         | 38        | 26               | 940                  | 8.67                       | 89.8439            | 11.25                    | 20.854         | 402.668            | 6.7386  | 3.4175              | 0.00      |

ตารางที่ ข-3 (ต่อ) ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้อากาศแบบไร้อากาศของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมัน  
สำปะหลังที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

| วันที่   | จำนวน ชม. | ก๊าซชีวภาพ<br>(มล.) | ก๊าซชีวภาพสะสม<br>(มล.) | อัตราการเกิดก๊าซ<br>(มล./ชม.) | H <sub>2</sub> (%) | H <sub>2</sub> % โดยนณ. | ไฮโดรเจน (มล.) | ไฮโดรเจนสะสม (มล.) | CO (%)  | CO <sub>2</sub> (%) | Other (%) |
|----------|-----------|---------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------|----------------|--------------------|---------|---------------------|-----------|
|          | 39.5      | 20                  | 960                     | 13.33                         | 87.5747            | 11.04                   | 19.878         | 422.547            | 11.2315 | 1.1938              | 0.00      |
|          | 42        | 14                  | 974                     | 5.60                          | 85.2972            | 11.71                   | 20.171         | 442.717            | 11.8804 | 2.8224              | 0.00      |
|          | 47        | 0                   | 974                     | 0.00                          | 85.6966            | 9.04                    | 14.909         | 457.627            | 11.7812 | 2.5222              | 0.00      |
| 3/4/51   | 63.5      | 4                   | 978                     | 0.24                          | 86.3286            | 9.75                    | 16.360         | 473.986            | 9.2274  | 3.649               | 0.80      |
|          | 65        | 16                  | 994                     | 10.67                         | 86.1353            | 8.59                    | 15.655         | 489.641            | 9.604   | 4.2607              | 0.00      |
|          | 69        | 0                   | 994                     | 0.00                          | 81.7076            | 7.53                    | 12.853         | 502.494            | 11.6919 | 4.0097              | 2.59      |
|          | 71        | 8                   | 1002                    | 4.00                          | 84.0631            | 8.02                    | 14.230         | 516.725            | 10.632  | 4.3368              | 0.97      |
| 4/4/51   | 87.5      | 0                   | 1002                    | 0.00                          | 82.4999            | 6.87                    | 11.963         | 528.688            | 13.2733 | 4.2267              | 0.00      |
|          | 90        | 14                  | 1016                    | 5.60                          | 80.3095            | 6.08                    | 11.624         | 540.312            | 14.378  | 4.0528              | 1.26      |
|          | 93        | 0                   | 1016                    | 0.00                          | 82.0609            | 7.10                    | 12.163         | 552.475            | 13.4101 | 4.529               | 0.00      |
|          | 95        | 0                   | 1016                    | 0.00                          | 80.6907            | 7.15                    | 12.232         | 564.707            | 14.418  | 4.8914              | 0.00      |
| 5/4/51   | 111.5     | 10                  | 1026                    | 0.61                          | 80.5401            | 6.14                    | 11.335         | 576.042            | 13.286  | 6.1739              | 0.00      |
|          | 113       | 14                  | 1040                    | 9.33                          | 78.8244            | 4.94                    | 9.729          | 585.771            | 14.8433 | 6.3324              | 0.00      |
|          | 117       | 6                   | 1046                    | 1.50                          | 78.4371            | 6.78                    | 11.946         | 597.717            | 15.2621 | 6.3008              | 0.00      |
|          | 118       | 10                  | 1056                    | 10.00                         | 77.2906            | 7.39                    | 13.153         | 610.870            | 14.6983 | 7.036               | 0.98      |
| 6/4/1951 | 136.5     | 0                   | 1056                    | 0.0                           | 73.7577            | 6.34                    | 10.955         | 621.825            | 21.066  | 5.1762              | 0.00      |
|          | 142       | 10                  | 1066                    | 1.82                          | 75.4138            | 6.30                    | 11.519         | 633.344            | 18.5666 | 6.0196              | 0.00      |
| 7/4/1951 | 158.5     | 0                   | 1066                    | 0.00                          | 70.253             | 5.45                    | 9.693          | 643.037            | 22.1319 | 6.3144              | 1.30      |
|          | 160.5     | 14                  | 1080                    | 7.00                          | 69.9826            | 4.76                    | 9.331          | 652.368            | 22.2804 | 7.7371              | 0.00      |
|          | 165.5     | 0                   | 1080                    | 0.00                          | 71.5631            | 5.74                    | 9.994          | 662.362            | 21.8611 | 6.5758              | 0.00      |
| 8/4/51   | 182.5     | 0                   | 1080                    | 0.00                          | 70.2484            | 5.82                    | 10.118         | 672.480            | 21.8843 | 6.7938              | 1.07      |

ตารางที่ ข-4 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของชุดควบคุมที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

| วันที่   | จำนวน ชม. | ก๊าซชีวภาพ (มล.) | ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.) | อัตราการเกิดก๊าซ (มล./ชม.) | H <sub>2</sub> (%) | H <sub>2</sub> % โดยนน. | ไฮโดรเจน (มล.) | ไฮโดรเจนสะสม (มล.) | CO (%)  | CO <sub>2</sub> (%) | Other (%) |
|----------|-----------|------------------|----------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|----------------|--------------------|---------|---------------------|-----------|
| 31/3/51  | 0         | 0                | 0                    | 0.00                       | 0.0000             | 0.00                    | 0.000          | 0.000              | 0.000   | 0.0000              | 0.00      |
| 1/4/51   | 16        | 0                | 0                    | 0.00                       | 74.7887            | 7.73                    | 11.597         | 11.597             | 24.3001 | 0.0000              | 0.91      |
|          | 17        | 6                | 6                    | 6.00                       | 74.7890            | 7.22                    | 11.256         | 22.852             | 24.3457 | 0.0000              | 0.87      |
|          | 18        | 8                | 14                   | 8.00                       | 76.4322            | 5.67                    | 9.046          | 31.898             | 23.5678 | 0.0000              | 0.00      |
|          | 25        | 12               | 26                   | 1.71                       | 75.0965            | 6.04                    | 9.845          | 41.743             | 23.6587 | 0.0000              | 1.24      |
| 2/4/52   | 31        | 0                | 26                   | 0.00                       | 74.7266            | 6.55                    | 9.823          | 51.566             | 23.9101 | 1.3633              | 0.00      |
|          | 47        | 0                | 26                   | 0.00                       | 74.6445            | 5.59                    | 8.388          | 59.953             | 22.5545 | 1.4111              | 1.39      |
| 3/4/51   | 64        | 22               | 48                   | 1.29                       | 75.1554            | 4.59                    | 7.894          | 67.847             | 22.7522 | 2.0924              | 0.00      |
|          | 65        | 6                | 54                   | 6.00                       | 73.6146            | 5.68                    | 8.621          | 76.468             | 23.1261 | 1.9738              | 1.29      |
|          | 69        | 0                | 54                   | 0.00                       | 73.8352            | 4.92                    | 7.194          | 83.662             | 22.7812 | 1.8431              | 1.54      |
|          | 71        | 4                | 58                   | 2.00                       | 75.4228            | 3.46                    | 5.137          | 88.799             | 24.5772 | 0.0000              | 0.00      |
| 4/4/51   | 88        | 12               | 70                   | 0.71                       | 72.8316            | 3.64                    | 5.696          | 94.495             | 22.4327 | 2.2670              | 2.47      |
|          | 90        | 6                | 76                   | 3.00                       | 77.5703            | 2.91                    | 4.431          | 98.926             | 22.4297 | 0.0000              | 0.00      |
|          | 93        | 0                | 76                   | 0.00                       | 73.9458            | 6.06                    | 8.787          | 107.713            | 23.6114 | 2.4429              | 0.00      |
|          | 95        | 0                | 76                   | 0.00                       | 72.5544            | 4.58                    | 6.562          | 114.275            | 23.5473 | 2.3545              | 1.54      |
| 5/4/51   | 111       | 21               | 97                   | 1.31                       | 74.1075            | 5.76                    | 9.541          | 123.816            | 22.9796 | 2.9130              | 0.00      |
|          | 113       | 12               | 109                  | 12.00                      | 72.0884            | 5.19                    | 8.218          | 132.035            | 22.9071 | 2.9055              | 2.10      |
|          | 117       | 14               | 123                  | 3.50                       | 71.299             | 5.15                    | 8.273          | 140.307            | 24.3748 | 2.8056              | 1.52      |
|          | 118       | 12               | 135                  | 12.00                      | 71.986             | 4.33                    | 6.947          | 147.254            | 21.6922 | 2.7711              | 3.55      |
| 6/4/1951 | 137       | 0                | 135                  | 0.00                       | 73.5367            | 5.12                    | 7.526          | 154.780            | 23.0702 | 3.3931              | 0.00      |

ตารางที่ ข-4 (ต่อ) ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของชุดควบคุมที่มีการควบคุม  
อุณหภูมิที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

| วันที่   | จำนวน ชม. | ก๊าซชีวภาพ<br>(มล.) | ก๊าซชีวภาพสะสม<br>(มล.) | อัตราการเกิดก๊าซ<br>(มล./ชม.) | H <sub>2</sub> (%) | H <sub>2</sub> % โดยนน. | ไฮโดรเจน (มล.) | ไฮโดรเจนสะสม (มล.) | CO (%)  | CO <sub>2</sub> (%) | Other (%) |
|----------|-----------|---------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------|-------------------------|----------------|--------------------|---------|---------------------|-----------|
|          | 142       | 8                   | 143                     | 1.60                          | 71.3789            | 4.90                    | 7.577          | 162.357            | 20.1557 | 3.8977              | 4.57      |
| 7/4/1951 | 158       | 20                  | 163                     | 1.25                          | 73.7556            | 4.95                    | 8.253          | 170.610            | 22.3323 | 3.912               | 0.00      |
|          | 160       | 10                  | 173                     | 6.67                          | 74.6785            | 4.90                    | 7.682          | 178.292            | 21.955  | 3.3666              | 0.00      |
|          | 165       | 6                   | 179                     | 1.20                          | 66.8077            | 5.53                    | 8.406          | 186.698            | 21.5112 | 3.8797              | 7.80      |
| 8/4/51   | 183       | 0                   | 179                     | 0.00                          | 71.3374            | 5.32                    | 7.784          | 194.482            | 20.9619 | 3.9574              | 3.74      |

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-5 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

| วันที่    | จำนวน ชม. | ก๊าซชีวภาพ (มล.) | ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.) | อัตราการเกิดก๊าซ (มล./ชม.) | H <sub>2</sub> (%) | H <sub>2</sub> % โดยนน. | ไฮโดรเจน (มล.) | ไฮโดรเจนสะสม (มล.) | CO (%)  | CO <sub>2</sub> (%) | Other   | Glucose (mol) |
|-----------|-----------|------------------|----------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|----------------|--------------------|---------|---------------------|---------|---------------|
| 28/7/2551 | 0         | 0                | 0                    | 0.00                       | 0.0000             | 0.00                    | 0.000          | 0.000              | 0.0000  | 0.0000              | 0.0000  | 0.00000       |
| 29/7/2551 | 15        | 132              | 132                  | 8.80                       | 77.7807            | 12.50                   | 35.248         | 35.248             | 4.8296  | 3.1234              | 14.2663 | 0.00721       |
|           | 16        | 44               | 176                  | 44.00                      | 76.4717            | 9.86                    | 22.615         | 57.863             | 5.1755  | 3.1228              | 15.2300 | 0.00721       |
|           | 17        | 24               | 200                  | 24.00                      | 75.0196            | 10.90                   | 21.984         | 79.848             | 5.1752  | 3.4436              | 16.3616 | 0.00721       |
|           | 18        | 42               | 242                  | 42.00                      | 67.4425            | 10.47                   | 23.236         | 103.084            | 6.44    | 3.723               | 22.3945 | 0.00721       |
|           | 19        | 36               | 278                  | 36.00                      | 67.3341            | 10.76                   | 23.024         | 126.108            | 6.318   | 3.6343              | 22.7136 | 0.00721       |
|           | 20        | 32               | 310                  | 32.00                      | 68.7629            | 11.06                   | 23.027         | 149.135            | 5.5374  | 3.7522              | 21.9475 | 0.00721       |
|           | 21        | 26               | 336                  | 26.00                      | 66.3373            | 9.56                    | 20.199         | 169.333            | 6.0559  | 4.2181              | 23.3887 | 0.00721       |
|           | 22        | 46               | 382                  | 46.00                      | 67.2368            | 10.11                   | 23.054         | 192.387            | 6.2751  | 4.3055              | 22.1826 | 0.00721       |
|           | 23        | 28               | 410                  | 28.00                      | 57.59              | 9.80                    | 20.816         | 213.203            | 7.0647  | 4.213               | 31.1323 | 0.00721       |
|           | 24        | 16               | 426                  | 16.00                      | 60.0297            | 9.14                    | 18.734         | 231.938            | 7.2476  | 3.9204              | 28.8023 | 0.00721       |
|           | 25        | 2                | 428                  | 2.00                       | 50.9369            | 8.35                    | 16.376         | 248.313            | 8.7066  | 4.0092              | 36.3473 | 0.00721       |
| 30/7/2551 | 28        | 2                | 430                  | 0.67                       | 36.8244            | 5.26                    | 11.753         | 260.066            | 10.1963 | 5.3624              | 47.6169 | 0.00642       |
|           | 40        | 8                | 438                  | 0.67                       | 25.2111            | 4.08                    | 10.214         | 270.280            | 0.0000  | 5.0138              | 69.7751 | 0.00642       |
|           | 41        | 14               | 452                  | 14.00                      | 35.3417            | 4.90                    | 11.744         | 282.025            | 0.0000  | 5.2436              | 59.4147 | 0.00642       |
|           | 44        | 0                | 452                  | 0.00                       | 31.9777            | 4.59                    | 10.643         | 292.668            | 0.0000  | 5.2428              | 62.7795 | 0.00642       |
|           | 46        | 0                | 452                  | 0.00                       | 29.2791            | 3.78                    | 9.420          | 302.088            | 0.0000  | 5.3193              | 65.4016 | 0.00642       |
| 31/7/2551 | 65        | 0                | 452                  | 0.00                       | 18.5418            | 2.29                    | 7.190          | 309.277            | 0.0000  | 5.6356              | 75.8226 | 0.00614       |
|           | 67        | 0                | 452                  | 0.00                       | 14.3932            | 1.85                    | 6.532          | 315.810            | 0.0000  | 4.7724              | 80.8344 | 0.00614       |
|           | 72        | 0                | 452                  | 0.00                       | 14.3836            | 1.66                    | 6.240          | 322.050            | 0.0000  | 5.0262              | 80.5902 | 0.00614       |
| 1/8/2551  | 90        | 0                | 452                  | 0.00                       | 9.5866             | 1.38                    | 5.816          | 327.867            | 0.0000  | 3.259               | 87.1544 | 0.00611       |



ตารางที่ ข-5 (ต่อ) ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลังที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

| วันที่   | จำนวน ชม. | ก๊าซชีวภาพ (มล.) | ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.) | อัตราการเกิดก๊าซ (มล./ชม.) | H <sub>2</sub> (%) | H <sub>2</sub> % โดยนน. | ไฮโดรเจน (มล.) | ไฮโดรเจนสะสม (มล.) | CO (%) | CO <sub>2</sub> (%) | Other   | Glucose (mol) |
|----------|-----------|------------------|----------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|----------------|--------------------|--------|---------------------|---------|---------------|
|          | 93        | 0                | 452                  | 0.00                       | 14.6933            | 1.88                    | 6.578          | 334.444            | 0.0000 | 4.1149              | 81.1918 | 0.00611       |
| 2/8/2551 | 116       | 0                | 452                  | 0.00                       | 8.2017             | 1.14                    | 5.457          | 339.901            | 0.0000 | 4.9658              | 86.8325 | 0.00605       |
| 4/8/2551 | 138       | 0                | 452                  | 0.00                       | 0.0000             | 0.00                    | 3.751          | 343.653            | 0.0000 | 2.5448              | 97.4552 | 0.00581       |
|          | 140       | 0                | 452                  | 0.00                       | 0.0000             | 0.00                    | 3.751          | 347.404            | 0.0000 | 4.0186              | 95.9814 | 0.00581       |

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข-6 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้อากาศแบบไร้อากาศของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยวที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

| วันที่    | จำนวน ชม. | ก๊าซชีวภาพ (มล.) | ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.) | อัตราการเกิดก๊าซ (มล./ชม.) | H <sub>2</sub> (%) | H <sub>2</sub> % โดยน.น. | ไฮโดรเจน (มล.) | ไฮโดรเจนสะสม (มล.) | CO (%)  | CO <sub>2</sub> (%) | Other   | Glucose (mol) |
|-----------|-----------|------------------|----------------------|----------------------------|--------------------|--------------------------|----------------|--------------------|---------|---------------------|---------|---------------|
| 8/7/2551  | 0         | 0                | 0                    | 0.00                       | 0.0000             | 0.00                     | 0.000          | 0.00               | 0.0000  | 0.0000              | 0.0000  | 0.00000       |
| 9/7/2551  | 18        | 140              | 140                  | 7.78                       | 36.4424            | 4.89                     | 14.188         | 14.19              | 15.1808 | 2.9954              | 45.3814 | 0.00506       |
|           | 20        | 20               | 160                  | 20.00                      | 29.0259            | 3.85                     | 8.005          | 22.19              | 16.5406 | 2.7680              | 51.6655 | 0.00506       |
|           | 23        | 14               | 174                  | 14.00                      | 22.1819            | 2.77                     | 6.222          | 28.42              | 16.7432 | 3.0134              | 58.0615 | 0.00506       |
|           | 24        | 16               | 190                  | 16.00                      | 21.6112            | 2.51                     | 5.877          | 34.29              | 18.4582 | 3.2299              | 56.7007 | 0.00506       |
|           | 26        | 30               | 220                  | 15.00                      | 20.4786            | 2.03                     | 5.443          | 39.74              | 18.0623 | 3.2911              | 58.168  | 0.00506       |
|           | 27        | 10               | 230                  | 10.00                      | 18.4160            | 1.82                     | 4.768          | 44.50              | 16.177  | 3.9476              | 61.4594 | 0.00506       |
| 10/7/2551 | 43        | 10               | 240                  | 0.63                       | 0.0000             | 0.00                     | 2.032          | 46.54              | 23.8629 | 3.242               | 72.8951 | 0.00506       |
|           | 45        | 30               | 270                  | 15.00                      | 0.0000             | 0.00                     | 2.032          | 48.57              | 23.2373 | 5.3466              | 71.4161 | 0.00506       |
|           | 47        | 14               | 284                  | 7.00                       | 0.0000             | 0.00                     | 2.032          | 50.60              | 22.9128 | 5.5839              | 71.5033 | 0.00506       |
|           | 48        | 14               | 298                  | 14.00                      | 0.0000             | 0.00                     | 2.032          | 52.63              | 22.2804 | 4.4004              | 73.3192 | 0.00506       |
|           | 50        | 10               | 308                  | 5.00                       | 0.0000             | 0.00                     | 2.032          | 54.66              | 22.5468 | 5.0236              | 72.4296 | 0.00506       |
| 11/7/2551 | 67        | 0                | 308                  | 0.00                       | 0.0000             | 0.00                     | 2.032          | 56.69              | 22.4974 | 5.418               | 72.0846 | 0.00506       |
|           | 68        | 0                | 308                  | 0.00                       | 0.0000             | 0.00                     | 2.032          | 58.72              | 20.9836 | 6.4328              | 72.5836 | 0.00506       |
|           | 73        | 0                | 308                  | 0.00                       | 0.0000             | 0.00                     | 2.032          | 60.76              | 22.9011 | 5.7857              | 71.3132 | 0.00506       |
| 12/7/2551 | 94        | 0                | 308                  | 0.00                       | 0.0000             | 0.00                     | 2.032          | 62.79              | 22.3213 | 5.8499              | 71.8288 | 0.00506       |
|           | 97        | 0                | 308                  | 0.00                       | 0.0000             | 0.00                     | 2.032          | 64.82              | 23.249  | 5.9298              | 70.8212 | 0.00506       |
| 13/7/2551 | 115       | 0                | 308                  | 0.00                       | 0.0000             | 0.00                     | 2.032          | 66.85              | 23.4745 | 6.1571              | 70.3684 | 0.00506       |
|           | 118       | 0                | 308                  | 0.00                       | 0.0000             | 0.00                     | 2.032          | 68.88              | 23.8401 | 4.8245              | 71.3354 | 0.00506       |
| 14/7/2551 | 139       | 0                | 308                  | 0.00                       | 0.0000             | 0.00                     | 2.032          | 70.91              | 22.9146 | 5.5856              | 71.4998 | 0.00506       |

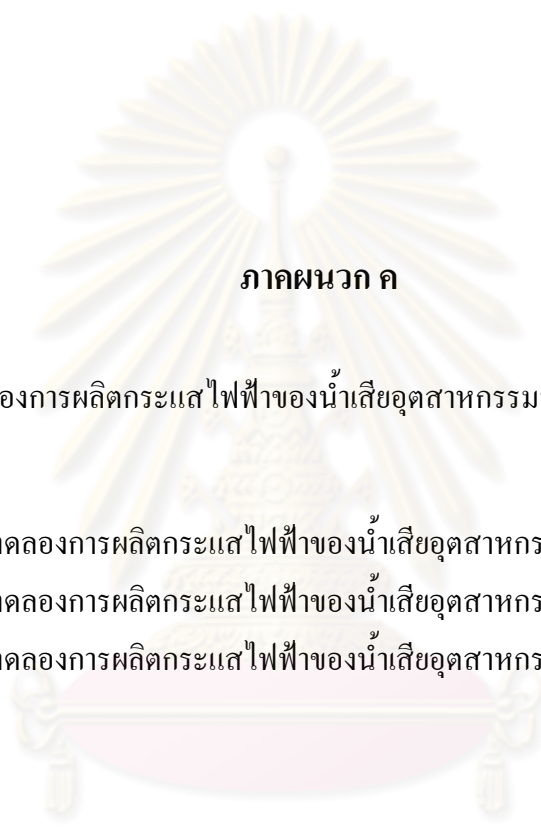
ตารางที่ ข-7 ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลตที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

| วันที่  | จำนวน ชม. | ก๊าซชีวภาพ (มล.) | ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.) | อัตราการเกิดก๊าซ (มล./ชม.) | H <sub>2</sub> (%) | H <sub>2</sub> % โดยนน. | ไฮโดรเจน (มล.) | ไฮโดรเจนสะสม (มล.) | CO (%)  | CO <sub>2</sub> (%) | Other  | Glucose (mol) |
|---------|-----------|------------------|----------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|----------------|--------------------|---------|---------------------|--------|---------------|
| 14/6/51 | 0         | 0                | 0                    | 0.00                       | 0.0000             | 0.00                    | 0.00           | 0.00               | 0.0000  | 0.0000              | 0.0000 | 0.0000        |
| 15/6/51 | 15        | 112              | 112                  | 7.47                       | 86.0845            | 9.80                    | 25.68          | 25.68              | 10.3427 | 2.4343              | 1.1385 | 0.00624       |
|         | 17        | 48               | 160                  | 24                         | 84.5697            | 8.88                    | 18.62          | 44.30              | 10.5642 | 3.4667              | 1.3994 | 0.00624       |
|         | 19        | 44               | 204                  | 22.00                      | 81.0578            | 7.90                    | 16.83          | 61.12              | 14.8945 | 4.0477              | 0.0000 | 0.00624       |
|         | 20        | 34               | 238                  | 34                         | 71.3436            | 8.11                    | 16.33          | 77.46              | 13.9414 | 3.839               | 10.876 | 0.00624       |
|         | 21        | 42               | 280                  | 42                         | 77.7823            | 7.06                    | 15.32          | 92.78              | 16.3801 | 4.7092              | 1.1284 | 0.00624       |
|         | 22        | 40               | 320                  | 40                         | 74.8846            | 6.09                    | 13.75          | 106.53             | 16.7681 | 5.2434              | 3.1039 | 0.00624       |
|         | 23        | 14               | 334                  | 14                         | 73.4607            | 7.36                    | 13.73          | 120.26             | 17.6362 | 5.2535              | 3.6496 | 0.00624       |
|         | 24        | 4                | 338                  | 4                          | 75.6829            | 6.98                    | 12.46          | 132.73             | 16.7814 | 5.6275              | 1.9082 | 0.00624       |
| 16/6/51 | 37        | 0                | 338                  | 0                          | 73.6633            | 3.71                    | 7.41           | 140.14             | 20.4672 | 5.8695              | 0.00   | 0.00611       |
|         | 39        | 2                | 340                  | 1                          | 73.3296            | 5.47                    | 10.17          | 150.30             | 20.3653 | 6.3051              | 0.00   | 0.00611       |
|         | 42        | 0                | 340                  | 0                          | 69.7386            | 5.29                    | 9.79           | 160.09             | 21.2281 | 5.1838              | 3.8495 | 0.00611       |
|         | 44        | 0                | 340                  | 0                          | 69.5228            | 5.89                    | 10.69          | 170.78             | 20.7552 | 4.348               | 5.374  | 0.00611       |
|         | 47        | 0                | 340                  | 0                          | 68.6619            | 4.92                    | 9.24           | 180.02             | 21.4317 | 5.6185              | 4.2879 | 0.00611       |
| 17/6/51 | 63        | 0                | 340                  | 0                          | 71.901             | 3.88                    | 7.67           | 187.68             | 22.1283 | 5.9707              | 0.00   | 0.00611       |
|         | 66        | 0                | 340                  | 0                          | 70.6481            | 4.00                    | 7.85           | 195.54             | 22.4778 | 5.038               | 1.8361 | 0.00611       |
|         | 69        | 0                | 340                  | 0                          | 68.8287            | 4.57                    | 8.71           | 204.25             | 21.7375 | 5.385               | 4.0488 | 0.00611       |
|         | 71        | 0                | 340                  | 0                          | 68.9097            | 4.93                    | 9.24           | 213.49             | 22.7365 | 6.9214              | 1.4324 | 0.00611       |
| 18/6/51 | 85        | 0                | 340                  | 0                          | 68.4978            | 4.65                    | 8.82           | 222.31             | 22.1021 | 5.9644              | 3.4357 | 0.00603       |
|         | 86        | 0                | 340                  | 0                          | 70.1562            | 5.58                    | 10.22          | 232.53             | 22.4971 | 7.3466              | 0.00   | 0.00603       |
|         | 88        | 0                | 340                  | 0                          | 71.6865            | 5.51                    | 10.11          | 242.64             | 21.5618 | 6.7518              | 0.00   | 0.00603       |

ตารางที่ ข-7 (ต่อ) ปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซไฮโดรเจนจากการหมักไร้อากาศแบบไร้แสงของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลตที่มีการควบคุมอุณหภูมิที่ 50 องศาเซลเซียส

| วันที่  | จำนวน ชม. | ก๊าซชีวภาพ (มล.) | ก๊าซชีวภาพสะสม (มล.) | อัตราการเกิดก๊าซ (มล./ชม.) | H <sub>2</sub> (%) | H <sub>2</sub> % โดยนน. | ไฮโดรเจน (มล.) | ไฮโดรเจนสะสม (มล.) | CO (%)  | CO <sub>2</sub> (%) | Other   | Glucose (mol) |
|---------|-----------|------------------|----------------------|----------------------------|--------------------|-------------------------|----------------|--------------------|---------|---------------------|---------|---------------|
|         | 91        | 0                | 340                  | 0                          | 0                  | 0.00                    | 1.85           | 244.49             | 21.2389 | 3.7418              | 75.0193 | 0.00603       |
| 19/6/51 | 110       | 0                | 340                  | 0                          | 0                  | 0.00                    | 1.85           | 246.34             | 22.5872 | 3.0605              | 74.3523 | 0.00591       |
| 20/6/51 | 134       | 0                | 340                  | 0                          | 0                  | 0.00                    | 1.85           | 248.19             | 22.7568 | 1.4545              | 75.7887 | 0.00636       |
|         | 135       | 0                | 340                  | 0                          | 0                  | 0.00                    | 1.85           | 250.05             | 21.9657 | 1.9377              | 76.0966 | 0.00636       |
|         | 137       | 0                | 340                  | 0                          | 0                  | 0.00                    | 1.85           | 251.90             | 22.9469 | 2.8156              | 74.2375 | 0.00636       |
|         | 139       | 0                | 340                  | 0                          | 0                  | 0.00                    | 1.85           | 253.75             | 23.7236 | 3.0934              | 73.183  | 0.00636       |
| 21/6/51 | 158       | 0                | 340                  | 0                          | 0                  | 0.00                    | 1.85           | 255.60             | 22.1417 | 2.548               | 75.3103 | 0.00718       |

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ค

ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหารทั้ง 3 ประเภท

### การทดลองส่วนที่ 4

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตช็อกโกแลต

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-1 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง

| วันที่   | จำนวนชม. | Voltage (mV) | Current (A) | Current ( $\mu$ A) | Acc Current ( $\mu$ A) | Power ( $\mu$ W) | Power density ( $\mu$ W/m <sup>2</sup> ) |
|----------|----------|--------------|-------------|--------------------|------------------------|------------------|--|
| 5/8/2551 | 0        | 323.18       | 3.23E-07    | 0.3232             | 0.3232                 | 0.10445          | 53.2884                                  |
|          | 1        | 320.84       | 3.21E-07    | 0.3208             | 0.6440                 | 0.10294          | 52.5195                                  |
|          | 2        | 305.36       | 3.05E-07    | 0.3054             | 0.9494                 | 0.09324          | 47.5738                                  |
|          | 3        | 304.58       | 3.05E-07    | 0.3046             | 1.2540                 | 0.09277          | 47.3311                                  |
|          | 4        | 316.72       | 3.17E-07    | 0.3167             | 1.5707                 | 0.10031          | 51.1794                                  |
|          | 5        | 324.96       | 3.25E-07    | 0.3250             | 1.8956                 | 0.10560          | 53.8770                                  |
|          | 6        | 332.2        | 3.32E-07    | 0.3322             | 2.2278                 | 0.11036          | 56.3045                                  |
|          | 7        | 350.24       | 3.50E-07    | 0.3502             | 2.5781                 | 0.12267          | 62.5857                                  |
| 6/8/2551 | 8        | 359.04       | 3.59E-07    | 0.3590             | 2.9371                 | 0.12891          | 65.7703                                  |
|          | 9        | 367.28       | 3.67E-07    | 0.3673             | 3.3044                 | 0.13489          | 68.8238                                  |
|          | 10       | 374.74       | 3.75E-07    | 0.3747             | 3.6791                 | 0.14043          | 71.6480                                  |
|          | 11       | 379.64       | 3.80E-07    | 0.3796             | 4.0588                 | 0.14413          | 73.5339                                  |
|          | 12       | 373.96       | 3.74E-07    | 0.3740             | 4.4327                 | 0.13985          | 71.3500                                  |
|          | 13       | 375.52       | 3.76E-07    | 0.3755             | 4.8083                 | 0.14102          | 71.9466                                  |
|          | 14       | 382.98       | 3.83E-07    | 0.3830             | 5.1912                 | 0.14667          | 74.8335                                  |
|          | 15       | 370.62       | 3.71E-07    | 0.3706             | 5.5619                 | 0.13736          | 70.0812                                  |
|          | 16       | 365.72       | 3.66E-07    | 0.3657             | 5.9276                 | 0.13375          | 68.2404                                  |
|          | 17       | 355.14       | 3.55E-07    | 0.3551             | 6.2827                 | 0.12612          | 64.3492                                  |
|          | 18       | 350.24       | 3.50E-07    | 0.3502             | 6.6330                 | 0.12267          | 62.5857                                  |
|          | 19       | 357.48       | 3.57E-07    | 0.3575             | 6.9904                 | 0.12779          | 65.2000                                  |
|          | 20       | 402.36       | 4.02E-07    | 0.4024             | 7.3928                 | 0.16189          | 82.5988                                  |
|          | 21       | 413.94       | 4.14E-07    | 0.4139             | 7.8067                 | 0.17135          | 87.4216                                  |
|          | 22       | 418.84       | 4.19E-07    | 0.4188             | 8.2256                 | 0.17543          | 89.5035                                  |
|          | 23       | 419.62       | 4.20E-07    | 0.4196             | 8.6452                 | 0.17608          | 89.8372                                  |
|          | 24       | 418.84       | 4.19E-07    | 0.4188             | 9.0640                 | 0.17543          | 89.5035                                  |
|          | 25       | 444.9        | 4.45E-07    | 0.4449             | 9.5089                 | 0.19794          | 100.9878                                 |
|          | 26       | 458.82       | 4.59E-07    | 0.4588             | 9.9678                 | 0.21052          | 107.4060                                 |
|          | 27       | 459.6        | 4.60E-07    | 0.4596             | 10.4274                | 0.21123          | 107.7715                                 |
|          | 28       | 467.84       | 4.68E-07    | 0.4678             | 10.8952                | 0.21887          | 111.6705                                 |
|          | 29       | 473.52       | 4.74E-07    | 0.4735             | 11.3687                | 0.22422          | 114.3986                                 |
|          | 30       | 480.98       | 4.81E-07    | 0.4810             | 11.8497                | 0.23134          | 118.0315                                 |
|          | 31       | 484.1        | 4.84E-07    | 0.4841             | 12.3338                | 0.23435          | 119.5678                                 |
| 7/8/2551 | 32       | 502.92       | 5.03E-07    | 0.5029             | 12.8367                | 0.25293          | 129.0452                                 |
|          | 33       | 513.5        | 5.14E-07    | 0.5135             | 13.3502                | 0.26368          | 134.5318                                 |
|          | 34       | 515.06       | 5.15E-07    | 0.5151             | 13.8653                | 0.26529          | 135.3504                                 |
|          | 35       | 520.96       | 5.21E-07    | 0.5210             | 14.3862                | 0.27140          | 138.4690                                 |
|          | 36       | 524.08       | 5.24E-07    | 0.5241             | 14.9103                | 0.27466          | 140.1326                                 |
|          | 37       | 527.42       | 5.27E-07    | 0.5274             | 15.4377                | 0.27817          | 141.9244                                 |
|          | 38       | 529.98       | 5.30E-07    | 0.5300             | 15.9677                | 0.28088          | 143.3055                                 |
|          | 39       | 533.88       | 5.34E-07    | 0.5339             | 16.5016                | 0.28503          | 145.4224                                 |
|          | 40       | 533.1        | 5.33E-07    | 0.5331             | 17.0347                | 0.28420          | 144.9978                                 |
|          | 41       | 535.44       | 5.35E-07    | 0.5354             | 17.5701                | 0.28670          | 146.2735                                 |
|          | 42       | 536.22       | 5.36E-07    | 0.5362             | 18.1064                | 0.28753          | 146.6999                                 |



ตารางที่ ค-1 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมัน  
สำปะหลัง

| วันที่   | จำนวนชม. | Voltage (mV) | Current (A) | Current (µA) | Acc Current (µA) | Power (µW) | Power density (µW/m <sup>2</sup> ) |
|----------|----------|--------------|-------------|--------------|------------------|------------|------------------------------------|
|          | 43       | 541.12       | 5.41E-07    | 0.5411       | 18.6475          | 0.29281    | 149.3933                           |
|          | 44       | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396       | 19.1870          | 0.29112    | 148.5332                           |
|          | 45       | 542.9        | 5.43E-07    | 0.5429       | 19.7299          | 0.29474    | 150.3778                           |
|          | 46       | 562.5        | 5.63E-07    | 0.5625       | 20.2924          | 0.31641    | 161.4318                           |
|          | 47       | 559.16       | 5.59E-07    | 0.5592       | 20.8516          | 0.31266    | 159.5204                           |
|          | 48       | 558.38       | 5.58E-07    | 0.5584       | 21.4100          | 0.31179    | 159.0756                           |
|          | 49       | 557.6        | 5.58E-07    | 0.5576       | 21.9676          | 0.31092    | 158.6315                           |
|          | 50       | 559.16       | 5.59E-07    | 0.5592       | 22.5267          | 0.31266    | 159.5204                           |
|          | 51       | 554.26       | 5.54E-07    | 0.5543       | 23.0810          | 0.30720    | 156.7368                           |
|          | 52       | 551.92       | 5.52E-07    | 0.5519       | 23.6329          | 0.30462    | 155.4162                           |
|          | 53       | 551.92       | 5.52E-07    | 0.5519       | 24.1848          | 0.30462    | 155.4162                           |
|          | 54       | 554.26       | 5.54E-07    | 0.5543       | 24.7391          | 0.30720    | 156.7368                           |
|          | 55       | 558.38       | 5.58E-07    | 0.5584       | 25.2975          | 0.31179    | 159.0756                           |
| 8/8/2551 | 56       | 557.6        | 5.58E-07    | 0.5576       | 25.8551          | 0.31092    | 158.6315                           |
|          | 57       | 553.48       | 5.53E-07    | 0.5535       | 26.4086          | 0.30634    | 156.2960                           |
|          | 58       | 552.7        | 5.53E-07    | 0.5527       | 26.9613          | 0.30548    | 155.8558                           |
|          | 59       | 547.8        | 5.48E-07    | 0.5478       | 27.5091          | 0.30008    | 153.1045                           |
|          | 60       | 547.8        | 5.48E-07    | 0.5478       | 28.0569          | 0.30008    | 153.1045                           |
|          | 61       | 544.46       | 5.44E-07    | 0.5445       | 28.6013          | 0.29644    | 151.2432                           |
|          | 62       | 543.68       | 5.44E-07    | 0.5437       | 29.1450          | 0.29559    | 150.8102                           |
|          | 63       | 542.9        | 5.43E-07    | 0.5429       | 29.6879          | 0.29474    | 150.3778                           |
|          | 64       | 541.12       | 5.41E-07    | 0.5411       | 30.2290          | 0.29281    | 149.3933                           |
|          | 65       | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396       | 30.7686          | 0.29112    | 148.5332                           |
|          | 66       | 534.66       | 5.35E-07    | 0.5347       | 31.3032          | 0.28586    | 145.8476                           |
|          | 67       | 536.22       | 5.36E-07    | 0.5362       | 31.8395          | 0.28753    | 146.6999                           |
|          | 68       | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396       | 32.3790          | 0.29112    | 148.5332                           |
|          | 69       | 510.16       | 5.10E-07    | 0.5102       | 32.8892          | 0.26026    | 132.7874                           |
|          | 70       | 532.32       | 5.32E-07    | 0.5323       | 33.4215          | 0.28336    | 144.5738                           |
|          | 71       | 460.38       | 4.60E-07    | 0.4604       | 33.8819          | 0.21195    | 108.1376                           |
|          | 72       | 465.28       | 4.65E-07    | 0.4653       | 34.3472          | 0.21649    | 110.4518                           |
|          | 73       | 474.3        | 4.74E-07    | 0.4743       | 34.8215          | 0.22496    | 114.7758                           |
|          | 74       | 460.38       | 4.60E-07    | 0.4604       | 35.2818          | 0.21195    | 108.1376                           |
|          | 75       | 475.08       | 4.75E-07    | 0.4751       | 35.7569          | 0.22570    | 115.1536                           |
|          | 76       | 459.6        | 4.60E-07    | 0.4596       | 36.2165          | 0.21123    | 107.7715                           |
|          | 77       | 467.84       | 4.68E-07    | 0.4678       | 36.6844          | 0.21887    | 111.6705                           |
|          | 78       | 446.46       | 4.46E-07    | 0.4465       | 37.1308          | 0.19933    | 101.6972                           |
|          | 79       | 442.56       | 4.43E-07    | 0.4426       | 37.5734          | 0.19586    | 99.9282                            |
| 9/8/2551 | 80       | 452.14       | 4.52E-07    | 0.4521       | 38.0255          | 0.20443    | 104.3013                           |
|          | 81       | 444.12       | 4.44E-07    | 0.4441       | 38.4696          | 0.19724    | 100.6340                           |
|          | 82       | 434.32       | 4.34E-07    | 0.4343       | 38.9040          | 0.18863    | 96.2418                            |
|          | 83       | 433.54       | 4.34E-07    | 0.4335       | 39.3375          | 0.18796    | 95.8964                            |
|          | 84       | 445.68       | 4.46E-07    | 0.4457       | 39.7832          | 0.19863    | 101.3422                           |

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมัน  
สำปะหลัง

| วันที่    | จำนวนขม. | Voltage (mV) | Current (A) | Current ( $\mu$ A) | Acc Current ( $\mu$ A) | Power ( $\mu$ W) | Power density ( $\mu$ W/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------|--------------|-------------|--------------------|------------------------|------------------|--|
|           | 85       | 437.68       | 4.38E-07    | 0.4377             | 40.2209                | 0.19156          | 97.7366                                  |
|           | 86       | 437.66       | 4.38E-07    | 0.4377             | 40.6585                | 0.19155          | 97.7277                                  |
|           | 87       | 465.28       | 4.65E-07    | 0.4653             | 41.1238                | 0.21649          | 110.4518                                 |
|           | 88       | 472.74       | 4.73E-07    | 0.4727             | 41.5965                | 0.22348          | 114.0220                                 |
|           | 89       | 463.72       | 4.64E-07    | 0.4637             | 42.0603                | 0.21504          | 109.7124                                 |
|           | 90       | 445.68       | 4.46E-07    | 0.4457             | 42.5059                | 0.19863          | 101.3422                                 |
|           | 91       | 448.02       | 4.48E-07    | 0.4480             | 42.9540                | 0.20072          | 102.4091                                 |
|           | 92       | 444.9        | 4.45E-07    | 0.4449             | 43.3989                | 0.19794          | 100.9878                                 |
|           | 93       | 441.78       | 4.42E-07    | 0.4418             | 43.8406                | 0.19517          | 99.5763                                  |
|           | 94       | 438.44       | 4.38E-07    | 0.4384             | 44.2791                | 0.19223          | 98.0763                                  |
|           | 95       | 445.68       | 4.46E-07    | 0.4457             | 44.7248                | 0.19863          | 101.3422                                 |
|           | 96       | 447.24       | 4.47E-07    | 0.4472             | 45.1720                | 0.20002          | 102.0529                                 |
|           | 97       | 452.14       | 4.52E-07    | 0.4521             | 45.6241                | 0.20443          | 104.3013                                 |
|           | 98       | 447.24       | 4.47E-07    | 0.4472             | 46.0714                | 0.20002          | 102.0529                                 |
|           | 99       | 447.24       | 4.47E-07    | 0.4472             | 46.5186                | 0.20002          | 102.0529                                 |
|           | 100      | 450.58       | 4.51E-07    | 0.4506             | 46.9692                | 0.20302          | 103.5828                                 |
|           | 101      | 454.7        | 4.55E-07    | 0.4547             | 47.4239                | 0.20675          | 105.4858                                 |
|           | 102      | 453.92       | 4.54E-07    | 0.4539             | 47.8778                | 0.20604          | 105.1242                                 |
|           | 103      | 453.92       | 4.54E-07    | 0.4539             | 48.3317                | 0.20604          | 105.1242                                 |
| 10/8/2551 | 104      | 457.04       | 4.57E-07    | 0.4570             | 48.7888                | 0.20889          | 106.5743                                 |
|           | 105      | 460.38       | 4.60E-07    | 0.4604             | 49.2492                | 0.21195          | 108.1376                                 |
|           | 106      | 463.72       | 4.64E-07    | 0.4637             | 49.7129                | 0.21504          | 109.7124                                 |
|           | 107      | 464.5        | 4.65E-07    | 0.4645             | 50.1774                | 0.21576          | 110.0818                                 |
|           | 108      | 465.28       | 4.65E-07    | 0.4653             | 50.6427                | 0.21649          | 110.4518                                 |
|           | 109      | 465.28       | 4.65E-07    | 0.4653             | 51.1079                | 0.21649          | 110.4518                                 |
|           | 110      | 468.62       | 4.69E-07    | 0.4686             | 51.5766                | 0.21960          | 112.0432                                 |
|           | 111      | 470.18       | 4.70E-07    | 0.4702             | 52.0467                | 0.22107          | 112.7904                                 |
|           | 112      | 472.74       | 4.73E-07    | 0.4727             | 52.5195                | 0.22348          | 114.0220                                 |
|           | 113      | 490.56       | 4.91E-07    | 0.4906             | 53.0100                | 0.24065          | 122.7802                                 |
|           | 114      | 491.34       | 4.91E-07    | 0.4913             | 53.5014                | 0.24141          | 123.1709                                 |
|           | 115      | 492.12       | 4.92E-07    | 0.4921             | 53.9935                | 0.24218          | 123.5623                                 |
|           | 116      | 494.68       | 4.95E-07    | 0.4947             | 54.4882                | 0.24471          | 124.8512                                 |
|           | 117      | 498.8        | 4.99E-07    | 0.4988             | 54.9870                | 0.24880          | 126.9395                                 |
|           | 118      | 502.92       | 5.03E-07    | 0.5029             | 55.4899                | 0.25293          | 129.0452                                 |
|           | 119      | 508.6        | 5.09E-07    | 0.5086             | 55.9985                | 0.25867          | 131.9765                                 |
|           | 120      | 513.5        | 5.14E-07    | 0.5135             | 56.5120                | 0.26368          | 134.5318                                 |
|           | 121      | 519.18       | 5.19E-07    | 0.5192             | 57.0312                | 0.26955          | 137.5244                                 |
|           | 122      | 523.3        | 5.23E-07    | 0.5233             | 57.5545                | 0.27384          | 139.7158                                 |
|           | 123      | 530.76       | 5.31E-07    | 0.5308             | 58.0852                | 0.28171          | 143.7276                                 |
|           | 124      | 531.54       | 5.32E-07    | 0.5315             | 58.6168                | 0.28253          | 144.1504                                 |
|           | 125      | 534.66       | 5.35E-07    | 0.5347             | 59.1514                | 0.28586          | 145.8476                                 |
|           | 126      | 533.88       | 5.34E-07    | 0.5339             | 59.6853                | 0.28503          | 145.4224                                 |

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมัน  
สำปะหลัง

| วันที่    | จำนวนขม. | Voltage (mV) | Current (A) | Current ( $\mu$ A) | Acc Current ( $\mu$ A) | Power ( $\mu$ W) | Power density ( $\mu$ W/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------|--------------|-------------|--------------------|------------------------|------------------|--|
|           | 127      | 538.78       | 5.39E-07    | 0.5388             | 60.2241                | 0.29028          | 148.1040                                 |
| 11/8/2551 | 128      | 526.64       | 5.27E-07    | 0.5266             | 60.7507                | 0.27735          | 141.5049                                 |
|           | 129      | 528.2        | 5.28E-07    | 0.5282             | 61.2789                | 0.27900          | 142.3445                                 |
|           | 130      | 508.6        | 5.09E-07    | 0.5086             | 61.7875                | 0.25867          | 131.9765                                 |
|           | 131      | 517.62       | 5.18E-07    | 0.5176             | 62.3052                | 0.26793          | 136.6992                                 |
|           | 132      | 508.6        | 5.09E-07    | 0.5086             | 62.8138                | 0.25867          | 131.9765                                 |
|           | 133      | 500.36       | 5.00E-07    | 0.5004             | 63.3141                | 0.25036          | 127.7348                                 |
|           | 134      | 492.12       | 4.92E-07    | 0.4921             | 63.8062                | 0.24218          | 123.5623                                 |
|           | 135      | 481.76       | 4.82E-07    | 0.4818             | 64.2880                | 0.23209          | 118.4146                                 |
|           | 136      | 468.62       | 4.69E-07    | 0.4686             | 64.7566                | 0.21960          | 112.0432                                 |
|           | 137      | 454.7        | 4.55E-07    | 0.4547             | 65.2113                | 0.20675          | 105.4858                                 |
|           | 138      | 456.26       | 4.56E-07    | 0.4563             | 65.6676                | 0.20817          | 106.2108                                 |
|           | 139      | 457.04       | 4.57E-07    | 0.4570             | 66.1246                | 0.20889          | 106.5743                                 |
|           | 140      | 460.38       | 4.60E-07    | 0.4604             | 66.5850                | 0.21195          | 108.1376                                 |
|           | 141      | 456          | 4.56E-07    | 0.4560             | 67.0410                | 0.20794          | 106.0898                                 |
|           | 142      | 445.68       | 4.46E-07    | 0.4457             | 67.4867                | 0.19863          | 101.3422                                 |
|           | 143      | 471.96       | 4.72E-07    | 0.4720             | 67.9586                | 0.22275          | 113.6460                                 |
|           | 144      | 469.4        | 4.69E-07    | 0.4694             | 68.4280                | 0.22034          | 112.4165                                 |
|           | 145      | 461.16       | 4.61E-07    | 0.4612             | 68.8892                | 0.21267          | 108.5044                                 |
|           | 146      | 450.5        | 4.51E-07    | 0.4505             | 69.3397                | 0.20295          | 103.5460                                 |
|           | 147      | 445.3        | 4.45E-07    | 0.4453             | 69.7850                | 0.19829          | 101.1694                                 |
|           | 148      | 442.9        | 4.43E-07    | 0.4429             | 70.2279                | 0.19616          | 100.0818                                 |
|           | 149      | 439.5        | 4.40E-07    | 0.4395             | 70.6674                | 0.19316          | 98.5511                                  |
|           | 150      | 428          | 4.28E-07    | 0.4280             | 71.0954                | 0.18318          | 93.4612                                  |
|           | 151      | 419          | 4.19E-07    | 0.4190             | 71.5144                | 0.17556          | 89.5719                                  |
| 12/8/2551 | 152      | 410          | 4.10E-07    | 0.4100             | 71.9244                | 0.16810          | 85.7653                                  |
|           | 153      | 405          | 4.05E-07    | 0.4050             | 72.3294                | 0.16403          | 83.6862                                  |
|           | 154      | 403          | 4.03E-07    | 0.4030             | 72.7324                | 0.16241          | 82.8617                                  |
|           | 155      | 403          | 4.03E-07    | 0.4030             | 73.1354                | 0.16241          | 82.8617                                  |
|           | 156      | 403          | 4.03E-07    | 0.4030             | 73.5384                | 0.16241          | 82.8617                                  |
|           | 157      | 400          | 4.00E-07    | 0.4000             | 73.9384                | 0.16000          | 81.6327                                  |
|           | 158      | 398          | 3.98E-07    | 0.3980             | 74.3364                | 0.15840          | 80.8184                                  |
|           | 159      | 386.1        | 3.86E-07    | 0.3861             | 74.7225                | 0.14907          | 76.0578                                  |
|           | 160      | 395.12       | 3.95E-07    | 0.3951             | 75.1176                | 0.15612          | 79.6530                                  |
|           | 161      | 378.86       | 3.79E-07    | 0.3789             | 75.4965                | 0.14353          | 73.2321                                  |
|           | 162      | 389.44       | 3.89E-07    | 0.3894             | 75.8859                | 0.15166          | 77.3793                                  |
|           | 163      | 387.88       | 3.88E-07    | 0.3879             | 76.2738                | 0.15045          | 76.7607                                  |
|           | 164      | 378.86       | 3.79E-07    | 0.3789             | 76.6527                | 0.14353          | 73.2321                                  |
|           | 165      | 387.88       | 3.88E-07    | 0.3879             | 77.0405                | 0.15045          | 76.7607                                  |
|           | 166      | 387          | 3.87E-07    | 0.3870             | 77.4275                | 0.14977          | 76.4128                                  |
|           | 167      | 380          | 3.80E-07    | 0.3800             | 77.8075                | 0.14440          | 73.6735                                  |
|           | 168      | 383          | 3.83E-07    | 0.3830             | 78.1905                | 0.14669          | 74.8413                                  |

ตารางที่ ค-1 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตแป้งมัน  
สำปะหลัง

| วันที่    | จำนวนขม. | Voltage (mV) | Current (A) | Current ( $\mu$ A) | Acc Current ( $\mu$ A) | Power ( $\mu$ W) | Power density ( $\mu$ W/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------|--------------|-------------|--------------------|------------------------|------------------|--|
|           | 169      | 389          | 3.89E-07    | 0.3890             | 78.5795                | 0.15132          | 77.2046                                  |
|           | 170      | 390          | 3.90E-07    | 0.3900             | 78.9695                | 0.15210          | 77.6020                                  |
|           | 171      | 393.56       | 3.94E-07    | 0.3936             | 79.3631                | 0.15489          | 79.0252                                  |
|           | 172      | 382.98       | 3.83E-07    | 0.3830             | 79.7461                | 0.14667          | 74.8335                                  |
|           | 173      | 399.24       | 3.99E-07    | 0.3992             | 80.1453                | 0.15939          | 81.3227                                  |
|           | 174      | 390.24       | 3.90E-07    | 0.3902             | 80.5356                | 0.15229          | 77.6976                                  |
|           | 175      | 373.96       | 3.74E-07    | 0.3740             | 80.9095                | 0.13985          | 71.3500                                  |
| 13/8/2551 | 176      | 371.4        | 3.71E-07    | 0.3714             | 81.2809                | 0.13794          | 70.3765                                  |
|           | 177      | 393.56       | 3.94E-07    | 0.3936             | 81.6745                | 0.15489          | 79.0252                                  |
|           | 178      | 393.56       | 3.94E-07    | 0.3936             | 82.0680                | 0.15489          | 79.0252                                  |
|           | 179      | 395.12       | 3.95E-07    | 0.3951             | 82.4632                | 0.15612          | 79.6530                                  |
|           | 180      | 397.68       | 3.98E-07    | 0.3977             | 82.8608                | 0.15815          | 80.6885                                  |
|           | 181      | 399.24       | 3.99E-07    | 0.3992             | 83.2601                | 0.15939          | 81.3227                                  |
|           | 182      | 376.3        | 3.76E-07    | 0.3763             | 83.6364                | 0.14160          | 72.2458                                  |
|           | 183      | 376.3        | 3.76E-07    | 0.3763             | 84.0127                | 0.14160          | 72.2458                                  |
|           | 184      | 370.62       | 3.71E-07    | 0.3706             | 84.3833                | 0.13736          | 70.0812                                  |
|           | 185      | 370.62       | 3.71E-07    | 0.3706             | 84.7539                | 0.13736          | 70.0812                                  |
|           | 186      | 367.28       | 3.67E-07    | 0.3673             | 85.1212                | 0.13489          | 68.8238                                  |

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-2 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว

| วันที่    | จำนวนชม. | Voltage (mV) | Current (A) | Current ( $\mu$ A) | Acc Current ( $\mu$ A) | Power ( $\mu$ W) | Power density ( $\mu$ W/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------|--------------|-------------|--------------------|------------------------|------------------|--|
| 16/7/2551 | 0        | 548.58       | 5.49E-07    | 0.5486             | 0.0000                 | 0.30094          | 153.5408                                 |
|           | 1        | 547.8        | 5.48E-07    | 0.5478             | 0.5478                 | 0.30008          | 153.1045                                 |
|           | 2        | 475.08       | 4.75E-07    | 0.4751             | 1.0229                 | 0.22570          | 115.1536                                 |
|           | 3        | 446.46       | 4.46E-07    | 0.4465             | 1.4693                 | 0.19933          | 101.6972                                 |
|           | 4        | 446.46       | 4.46E-07    | 0.4465             | 1.9158                 | 0.19933          | 101.6972                                 |
|           | 5        | 395.12       | 3.95E-07    | 0.3951             | 2.3109                 | 0.15612          | 79.6530                                  |
|           | 6        | 389.44       | 3.89E-07    | 0.3894             | 2.7004                 | 0.15166          | 77.3793                                  |
|           | 7        | 396.9        | 3.97E-07    | 0.3969             | 3.0973                 | 0.15753          | 80.3723                                  |
|           | 8        | 392.78       | 3.93E-07    | 0.3928             | 3.4900                 | 0.15428          | 78.7123                                  |
| 17/7/2551 | 9        | 394.34       | 3.94E-07    | 0.3943             | 3.8844                 | 0.15550          | 79.3388                                  |
|           | 10       | 390.22       | 3.90E-07    | 0.3902             | 4.2746                 | 0.15227          | 77.6896                                  |
|           | 11       | 396.9        | 3.97E-07    | 0.3969             | 4.6715                 | 0.15753          | 80.3723                                  |
|           | 12       | 392.78       | 3.93E-07    | 0.3928             | 5.0643                 | 0.15428          | 78.7123                                  |
|           | 13       | 388.66       | 3.89E-07    | 0.3887             | 5.4529                 | 0.15106          | 77.0697                                  |
|           | 14       | 390.22       | 3.90E-07    | 0.3902             | 5.8432                 | 0.15227          | 77.6896                                  |
|           | 15       | 393.56       | 3.94E-07    | 0.3936             | 6.2367                 | 0.15489          | 79.0252                                  |
|           | 16       | 390.22       | 3.90E-07    | 0.3902             | 6.6269                 | 0.15227          | 77.6896                                  |
|           | 17       | 390.22       | 3.90E-07    | 0.3902             | 7.0172                 | 0.15227          | 77.6896                                  |
|           | 18       | 388.66       | 3.89E-07    | 0.3887             | 7.4058                 | 0.15106          | 77.0697                                  |
|           | 19       | 378.88       | 3.79E-07    | 0.3789             | 7.7847                 | 0.14355          | 73.2398                                  |
|           | 20       | 383.76       | 3.84E-07    | 0.3838             | 8.1685                 | 0.14727          | 75.1386                                  |
|           | 21       | 378.86       | 3.79E-07    | 0.3789             | 8.5473                 | 0.14353          | 73.2321                                  |
|           | 22       | 374.74       | 3.75E-07    | 0.3747             | 8.9221                 | 0.14043          | 71.6480                                  |
|           | 23       | 373.96       | 3.74E-07    | 0.3740             | 9.2960                 | 0.13985          | 71.3500                                  |
|           | 24       | 373.96       | 3.74E-07    | 0.3740             | 9.6700                 | 0.13985          | 71.3500                                  |
|           | 25       | 376.3        | 3.76E-07    | 0.3763             | 10.0463                | 0.14160          | 72.2458                                  |
|           | 26       | 380.42       | 3.80E-07    | 0.3804             | 10.4267                | 0.14472          | 73.8364                                  |
|           | 27       | 387.88       | 3.88E-07    | 0.3879             | 10.8146                | 0.15045          | 76.7607                                  |
|           | 28       | 397.68       | 3.98E-07    | 0.3977             | 11.2123                | 0.15815          | 80.6885                                  |
|           | 29       | 418.84       | 4.19E-07    | 0.4188             | 11.6311                | 0.17543          | 89.5035                                  |
|           | 30       | 442.56       | 4.43E-07    | 0.4426             | 12.0737                | 0.19586          | 99.9282                                  |
|           | 31       | 465.28       | 4.65E-07    | 0.4653             | 12.5389                | 0.21649          | 110.4518                                 |
|           | 32       | 500.36       | 5.00E-07    | 0.5004             | 13.0393                | 0.25036          | 127.7348                                 |
| 18/7/2551 | 33       | 511.94       | 5.12E-07    | 0.5119             | 13.5512                | 0.26208          | 133.7156                                 |
|           | 34       | 514.94       | 5.15E-07    | 0.5149             | 14.0662                | 0.26516          | 135.2873                                 |
|           | 35       | 517.62       | 5.18E-07    | 0.5176             | 14.5838                | 0.26793          | 136.6992                                 |
|           | 36       | 522.52       | 5.23E-07    | 0.5225             | 15.1063                | 0.27303          | 139.2996                                 |
|           | 37       | 523.3        | 5.23E-07    | 0.5233             | 15.6296                | 0.27384          | 139.7158                                 |
|           | 38       | 528.2        | 5.28E-07    | 0.5282             | 16.1578                | 0.27900          | 142.3445                                 |
|           | 39       | 530.76       | 5.31E-07    | 0.5308             | 16.6886                | 0.28171          | 143.7276                                 |
|           | 40       | 537          | 5.37E-07    | 0.5370             | 17.2256                | 0.28837          | 147.1270                                 |
|           | 41       | 547.8        | 5.48E-07    | 0.5478             | 17.7734                | 0.30008          | 153.1045                                 |

ตารางที่ ก-2 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว

| วันที่    | จำนวนชม. | Voltage (mV) | Current (A) | Current ( $\mu$ A) | Acc Current ( $\mu$ A) | Power ( $\mu$ W) | Power density ( $\mu$ W/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------|--------------|-------------|--------------------|------------------------|------------------|--|
|           | 42       | 585.22       | 5.85E-07    | 0.5852             | 18.3586                | 0.34248          | 174.7359                                 |
|           | 43       | 583.66       | 5.84E-07    | 0.5837             | 18.9423                | 0.34066          | 173.8056                                 |
|           | 44       | 575.64       | 5.76E-07    | 0.5756             | 19.5179                | 0.33136          | 169.0619                                 |
|           | 45       | 578.76       | 5.79E-07    | 0.5788             | 20.0967                | 0.33496          | 170.8996                                 |
|           | 46       | 582.88       | 5.83E-07    | 0.5829             | 20.6795                | 0.33975          | 173.3414                                 |
|           | 47       | 592.68       | 5.93E-07    | 0.5927             | 21.2722                | 0.35127          | 179.2192                                 |
|           | 48       | 581.1        | 5.81E-07    | 0.5811             | 21.8533                | 0.33768          | 172.2843                                 |
|           | 49       | 575.64       | 5.76E-07    | 0.5756             | 22.4290                | 0.33136          | 169.0619                                 |
|           | 50       | 568.18       | 5.68E-07    | 0.5682             | 22.9971                | 0.32283          | 164.7084                                 |
|           | 51       | 566.62       | 5.67E-07    | 0.5666             | 23.5638                | 0.32106          | 163.8052                                 |
|           | 52       | 569.96       | 5.70E-07    | 0.5700             | 24.1337                | 0.32485          | 165.7420                                 |
|           | 53       | 562.5        | 5.63E-07    | 0.5625             | 24.6962                | 0.31641          | 161.4318                                 |
|           | 54       | 554.26       | 5.54E-07    | 0.5543             | 25.2505                | 0.30720          | 156.7368                                 |
|           | 55       | 555.04       | 5.55E-07    | 0.5550             | 25.8055                | 0.30807          | 157.1783                                 |
|           | 56       | 566.62       | 5.67E-07    | 0.5666             | 26.3721                | 0.32106          | 163.8052                                 |
| 19/7/2551 | 57       | 562.5        | 5.63E-07    | 0.5625             | 26.9346                | 0.31641          | 161.4318                                 |
|           | 58       | 557.6        | 5.58E-07    | 0.5576             | 27.4922                | 0.31092          | 158.6315                                 |
|           | 59       | 558.38       | 5.58E-07    | 0.5584             | 28.0506                | 0.31179          | 159.0756                                 |
|           | 60       | 562.5        | 5.63E-07    | 0.5625             | 28.6131                | 0.31641          | 161.4318                                 |
|           | 61       | 557.6        | 5.58E-07    | 0.5576             | 29.1707                | 0.31092          | 158.6315                                 |
|           | 62       | 556.82       | 5.57E-07    | 0.5568             | 29.7275                | 0.31005          | 158.1880                                 |
|           | 63       | 562.5        | 5.63E-07    | 0.5625             | 30.2900                | 0.31641          | 161.4318                                 |
|           | 64       | 560.94       | 5.61E-07    | 0.5609             | 30.8510                | 0.31465          | 160.5376                                 |
|           | 65       | 565.84       | 5.66E-07    | 0.5658             | 31.4168                | 0.32017          | 163.3545                                 |
|           | 66       | 553.48       | 5.53E-07    | 0.5535             | 31.9703                | 0.30634          | 156.2960                                 |
|           | 67       | 552.7        | 5.53E-07    | 0.5527             | 32.5230                | 0.30548          | 155.8558                                 |
|           | 68       | 552.7        | 5.53E-07    | 0.5527             | 33.0757                | 0.30548          | 155.8558                                 |
|           | 69       | 555.04       | 5.55E-07    | 0.5550             | 33.6307                | 0.30807          | 157.1783                                 |
|           | 70       | 560.94       | 5.61E-07    | 0.5609             | 34.1917                | 0.31465          | 160.5376                                 |
|           | 71       | 559.16       | 5.59E-07    | 0.5592             | 34.7508                | 0.31266          | 159.5204                                 |
|           | 72       | 559.16       | 5.59E-07    | 0.5592             | 35.3100                | 0.31266          | 159.5204                                 |
|           | 73       | 551.92       | 5.52E-07    | 0.5519             | 35.8619                | 0.30462          | 155.4162                                 |
|           | 74       | 548.58       | 5.49E-07    | 0.5486             | 36.4105                | 0.30094          | 153.5408                                 |
|           | 75       | 545.24       | 5.45E-07    | 0.5452             | 36.9557                | 0.29729          | 151.6769                                 |
|           | 76       | 545.24       | 5.45E-07    | 0.5452             | 37.5010                | 0.29729          | 151.6769                                 |
|           | 77       | 555.04       | 5.55E-07    | 0.5550             | 38.0560                | 0.30807          | 157.1783                                 |
|           | 78       | 547.8        | 5.48E-07    | 0.5478             | 38.6038                | 0.30008          | 153.1045                                 |
|           | 79       | 554.26       | 5.54E-07    | 0.5543             | 39.1581                | 0.30720          | 156.7368                                 |
|           | 80       | 551.92       | 5.52E-07    | 0.5519             | 39.7100                | 0.30462          | 155.4162                                 |
| 20/7/2551 | 81       | 548.58       | 5.49E-07    | 0.5486             | 40.2586                | 0.30094          | 153.5408                                 |
|           | 82       | 540.34       | 5.40E-07    | 0.5403             | 40.7989                | 0.29197          | 148.9629                                 |
|           | 83       | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396             | 41.3385                | 0.29112          | 148.5332                                 |
|           | 84       | 536.22       | 5.36E-07    | 0.5362             | 41.8747                | 0.28753          | 146.6999                                 |



ตารางที่ ก-2 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว

| วันที่    | จำนวนชม. | Voltage (mV) | Current (A) | Current ( $\mu$ A) | Acc Current ( $\mu$ A) | Power ( $\mu$ W) | Power density ( $\mu$ W/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------|--------------|-------------|--------------------|------------------------|------------------|--|
|           | 85       | 538.78       | 5.39E-07    | 0.5388             | 42.4135                | 0.29028          | 148.1040                                 |
|           | 86       | 540.34       | 5.40E-07    | 0.5403             | 42.9538                | 0.29197          | 148.9629                                 |
|           | 87       | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396             | 43.4934                | 0.29112          | 148.5332                                 |
|           | 88       | 543.68       | 5.44E-07    | 0.5437             | 44.0371                | 0.29559          | 150.8102                                 |
|           | 89       | 545.24       | 5.45E-07    | 0.5452             | 44.5823                | 0.29729          | 151.6769                                 |
|           | 90       | 547.8        | 5.48E-07    | 0.5478             | 45.1301                | 0.30008          | 153.1045                                 |
|           | 91       | 545.8        | 5.46E-07    | 0.5458             | 45.6759                | 0.29790          | 151.9886                                 |
|           | 92       | 557.6        | 5.58E-07    | 0.5576             | 46.2335                | 0.31092          | 158.6315                                 |
|           | 93       | 547.8        | 5.48E-07    | 0.5478             | 46.7813                | 0.30008          | 153.1045                                 |
|           | 94       | 551.92       | 5.52E-07    | 0.5519             | 47.3332                | 0.30462          | 155.4162                                 |
|           | 95       | 545.24       | 5.45E-07    | 0.5452             | 47.8785                | 0.29729          | 151.6769                                 |
|           | 96       | 543.68       | 5.44E-07    | 0.5437             | 48.4221                | 0.29559          | 150.8102                                 |
|           | 97       | 543.68       | 5.44E-07    | 0.5437             | 48.9658                | 0.29559          | 150.8102                                 |
|           | 98       | 546.02       | 5.46E-07    | 0.5460             | 49.5118                | 0.29814          | 152.1111                                 |
|           | 99       | 538.78       | 5.39E-07    | 0.5388             | 50.0506                | 0.29028          | 148.1040                                 |
|           | 100      | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396             | 50.5902                | 0.29112          | 148.5332                                 |
|           | 101      | 544.46       | 5.44E-07    | 0.5445             | 51.1346                | 0.29644          | 151.2432                                 |
|           | 102      | 540.34       | 5.40E-07    | 0.5403             | 51.6750                | 0.29197          | 148.9629                                 |
|           | 103      | 540.34       | 5.40E-07    | 0.5403             | 52.2153                | 0.29197          | 148.9629                                 |
|           | 104      | 533.88       | 5.34E-07    | 0.5339             | 52.7492                | 0.28503          | 145.4224                                 |
| 21/7/2551 | 105      | 537          | 5.37E-07    | 0.5370             | 53.2862                | 0.28837          | 147.1270                                 |
|           | 106      | 529.98       | 5.30E-07    | 0.5300             | 53.8162                | 0.28088          | 143.3055                                 |
|           | 107      | 529.98       | 5.30E-07    | 0.5300             | 54.3462                | 0.28088          | 143.3055                                 |
|           | 108      | 527.42       | 5.27E-07    | 0.5274             | 54.8736                | 0.27817          | 141.9244                                 |
|           | 109      | 529.64       | 5.30E-07    | 0.5296             | 55.4032                | 0.28052          | 143.1217                                 |
|           | 110      | 527.42       | 5.27E-07    | 0.5274             | 55.9306                | 0.27817          | 141.9244                                 |
|           | 111      | 525.86       | 5.26E-07    | 0.5259             | 56.4565                | 0.27653          | 141.0861                                 |
|           | 112      | 524.08       | 5.24E-07    | 0.5241             | 56.9806                | 0.27466          | 140.1326                                 |
|           | 113      | 520.96       | 5.21E-07    | 0.5210             | 57.5015                | 0.27140          | 138.4690                                 |
|           | 114      | 511.94       | 5.12E-07    | 0.5119             | 58.0135                | 0.26208          | 133.7156                                 |
|           | 115      | 462.94       | 4.63E-07    | 0.4629             | 58.4764                | 0.21431          | 109.3436                                 |
|           | 116      | 443.34       | 4.43E-07    | 0.4433             | 58.9198                | 0.19655          | 100.2808                                 |
|           | 117      | 442.56       | 4.43E-07    | 0.4426             | 59.3623                | 0.19586          | 99.9282                                  |
|           | 118      | 438.44       | 4.38E-07    | 0.4384             | 59.8008                | 0.19223          | 98.0763                                  |
|           | 119      | 433.54       | 4.34E-07    | 0.4335             | 60.2343                | 0.18796          | 95.8964                                  |
|           | 120      | 433.54       | 4.34E-07    | 0.4335             | 60.6678                | 0.18796          | 95.8964                                  |
|           | 121      | 433.54       | 4.34E-07    | 0.4335             | 61.1014                | 0.18796          | 95.8964                                  |
|           | 122      | 429.42       | 4.29E-07    | 0.4294             | 61.5308                | 0.18440          | 94.0824                                  |
|           | 123      | 424.52       | 4.25E-07    | 0.4245             | 61.9553                | 0.18022          | 91.9476                                  |
|           | 124      | 426.08       | 4.26E-07    | 0.4261             | 62.3814                | 0.18154          | 92.6246                                  |
|           | 125      | 429.42       | 4.29E-07    | 0.4294             | 62.8108                | 0.18440          | 94.0824                                  |
|           | 126      | 431.98       | 4.32E-07    | 0.4320             | 63.2428                | 0.18661          | 95.2075                                  |
|           | 127      | 433.54       | 4.34E-07    | 0.4335             | 63.6763                | 0.18796          | 95.8964                                  |

ตารางที่ ค-2 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว

| วันที่    | จำนวนชม. | Voltage (mV) | Current (A) | Current ( $\mu$ A) | Acc Current ( $\mu$ A) | Power ( $\mu$ W) | Power density ( $\mu$ W/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------|--------------|-------------|--------------------|------------------------|------------------|--|
|           | 128      | 429.42       | 4.29E-07    | 0.4294             | 64.1058                | 0.18440          | 94.0824                                  |
| 22/7/2551 | 129      | 425.3        | 4.25E-07    | 0.4253             | 64.5311                | 0.18088          | 92.2858                                  |
|           | 130      | 420.4        | 4.20E-07    | 0.4204             | 64.9515                | 0.17674          | 90.1715                                  |
|           | 131      | 418.84       | 4.19E-07    | 0.4188             | 65.3703                | 0.17543          | 89.5035                                  |
|           | 132      | 415.5        | 4.16E-07    | 0.4155             | 65.7858                | 0.17264          | 88.0818                                  |
|           | 133      | 415.5        | 4.16E-07    | 0.4155             | 66.2013                | 0.17264          | 88.0818                                  |
|           | 134      | 411.38       | 4.11E-07    | 0.4114             | 66.6127                | 0.16923          | 86.3436                                  |
|           | 135      | 405.7        | 4.06E-07    | 0.4057             | 67.0184                | 0.16459          | 83.9758                                  |
|           | 136      | 404.96       | 4.05E-07    | 0.4050             | 67.4233                | 0.16399          | 83.6697                                  |
|           | 137      | 406.48       | 4.06E-07    | 0.4065             | 67.8298                | 0.16523          | 84.2990                                  |
|           | 138      | 398.46       | 3.98E-07    | 0.3985             | 68.2283                | 0.15877          | 81.0053                                  |
|           | 139      | 405.7        | 4.06E-07    | 0.4057             | 68.6340                | 0.16459          | 83.9758                                  |
|           | 140      | 409.82       | 4.10E-07    | 0.4098             | 69.0438                | 0.16795          | 85.6900                                  |

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค-3 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต

| วันที่    | จำนวนชม. | Voltage (mV) | Current (A) | Current ( $\mu$ A) | Acc Current ( $\mu$ A) | Power ( $\mu$ W) | Power density ( $\mu$ W/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------|--------------|-------------|--------------------|------------------------|------------------|--|
| 24/6/2551 | 0        | 543          | 5.43E-07    | 0.5430             | 0.0000                 | 0.29485          | 150.4332                                 |
|           | 1        | 540.26       | 5.40E-07    | 0.5403             | 0.5403                 | 0.29188          | 148.9188                                 |
|           | 2        | 540.28       | 5.40E-07    | 0.5403             | 1.0805                 | 0.29190          | 148.9298                                 |
|           | 3        | 539.48       | 5.39E-07    | 0.5395             | 1.6200                 | 0.29104          | 148.4891                                 |
|           | 4        | 530.28       | 5.30E-07    | 0.5303             | 2.1503                 | 0.28120          | 143.4678                                 |
|           | 5        | 525.48       | 5.25E-07    | 0.5255             | 2.6758                 | 0.27613          | 140.8823                                 |
|           | 6        | 523.46       | 5.23E-07    | 0.5235             | 3.1992                 | 0.27401          | 139.8012                                 |
|           | 7        | 520.69       | 5.21E-07    | 0.5207             | 3.7199                 | 0.27112          | 138.3255                                 |
|           | 8        | 515.89       | 5.16E-07    | 0.5159             | 4.2358                 | 0.26614          | 135.7870                                 |
| 25/6/2551 | 9        | 510.25       | 5.10E-07    | 0.5103             | 4.7461                 | 0.26036          | 132.8342                                 |
|           | 10       | 509.46       | 5.09E-07    | 0.5095             | 5.2555                 | 0.25955          | 132.4232                                 |
|           | 11       | 508.26       | 5.08E-07    | 0.5083             | 5.7638                 | 0.25833          | 131.8001                                 |
|           | 12       | 500.48       | 5.00E-07    | 0.5005             | 6.2643                 | 0.25048          | 127.7960                                 |
|           | 13       | 495.56       | 4.96E-07    | 0.4956             | 6.7598                 | 0.24558          | 125.2958                                 |
|           | 14       | 480.26       | 4.80E-07    | 0.4803             | 7.2401                 | 0.23065          | 117.6784                                 |
|           | 15       | 468.23       | 4.68E-07    | 0.4682             | 7.7083                 | 0.21924          | 111.8568                                 |
|           | 16       | 450.78       | 4.51E-07    | 0.4508             | 8.1591                 | 0.20320          | 103.6748                                 |
|           | 17       | 440.26       | 4.40E-07    | 0.4403             | 8.5994                 | 0.19383          | 98.8923                                  |
|           | 18       | 430.78       | 4.31E-07    | 0.4308             | 9.0301                 | 0.18557          | 94.6793                                  |
|           | 19       | 398.5        | 3.99E-07    | 0.3985             | 9.4286                 | 0.15880          | 81.0216                                  |
|           | 20       | 406          | 4.06E-07    | 0.4060             | 9.8346                 | 0.16484          | 84.1000                                  |
|           | 21       | 409.5        | 4.10E-07    | 0.4095             | 10.2441                | 0.16769          | 85.5563                                  |
|           | 22       | 410.5        | 4.11E-07    | 0.4105             | 10.6546                | 0.16851          | 85.9746                                  |
|           | 23       | 412          | 4.12E-07    | 0.4120             | 11.0666                | 0.16974          | 86.6041                                  |
|           | 24       | 412          | 4.12E-07    | 0.4120             | 11.4786                | 0.16974          | 86.6041                                  |
|           | 25       | 412          | 4.12E-07    | 0.4120             | 11.8906                | 0.16974          | 86.6041                                  |
|           | 26       | 422          | 4.22E-07    | 0.4220             | 12.3126                | 0.17808          | 90.8592                                  |
|           | 27       | 421          | 4.21E-07    | 0.4210             | 12.7336                | 0.17724          | 90.4291                                  |
|           | 28       | 421          | 4.21E-07    | 0.4210             | 13.1546                | 0.17724          | 90.4291                                  |
|           | 29       | 435.8        | 4.36E-07    | 0.4358             | 13.5904                | 0.18992          | 96.8988                                  |
|           | 30       | 438.8        | 4.39E-07    | 0.4388             | 14.0292                | 0.19255          | 98.2375                                  |
|           | 31       | 438.5        | 4.39E-07    | 0.4385             | 14.4677                | 0.19228          | 98.1032                                  |
|           | 32       | 440.9        | 4.41E-07    | 0.4409             | 14.9086                | 0.19439          | 99.1800                                  |
| 26/6/2551 | 33       | 442.5        | 4.43E-07    | 0.4425             | 15.3511                | 0.19581          | 99.9011                                  |
|           | 34       | 445.76       | 4.46E-07    | 0.4458             | 15.7969                | 0.19870          | 101.3786                                 |
|           | 35       | 455.89       | 4.56E-07    | 0.4559             | 16.2528                | 0.20784          | 106.0386                                 |
|           | 36       | 460.57       | 4.61E-07    | 0.4606             | 16.7134                | 0.21212          | 108.2269                                 |
|           | 37       | 468.53       | 4.69E-07    | 0.4685             | 17.1819                | 0.21952          | 112.0002                                 |
|           | 38       | 468.59       | 4.69E-07    | 0.4686             | 17.6505                | 0.21958          | 112.0289                                 |
|           | 39       | 480.61       | 4.81E-07    | 0.4806             | 18.1311                | 0.23099          | 117.8500                                 |
|           | 40       | 485.21       | 4.85E-07    | 0.4852             | 18.6163                | 0.23543          | 120.1167                                 |
|           | 41       | 490.56       | 4.91E-07    | 0.4906             | 19.1069                | 0.24065          | 122.7802                                 |

ตารางที่ ค-3 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต

| วันที่    | จำนวนชม. | Voltage (mV) | Current (A) | Current ( $\mu$ A) | Acc Current ( $\mu$ A) | Power ( $\mu$ W) | Power density ( $\mu$ W/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------|--------------|-------------|--------------------|------------------------|------------------|--|
|           | 42       | 500.78       | 5.01E-07    | 0.5008             | 19.6076                | 0.25078          | 127.9493                                 |
|           | 43       | 524.36       | 5.24E-07    | 0.5244             | 20.1320                | 0.27495          | 140.2824                                 |
|           | 44       | 535          | 5.35E-07    | 0.5350             | 20.6670                | 0.28623          | 146.0332                                 |
|           | 45       | 541          | 5.41E-07    | 0.5410             | 21.2080                | 0.29268          | 149.3270                                 |
|           | 46       | 543          | 5.43E-07    | 0.5430             | 21.7510                | 0.29485          | 150.4332                                 |
|           | 47       | 548          | 5.48E-07    | 0.5480             | 22.2990                | 0.30030          | 153.2163                                 |
|           | 48       | 548          | 5.48E-07    | 0.5480             | 22.8470                | 0.30030          | 153.2163                                 |
|           | 49       | 548          | 5.48E-07    | 0.5480             | 23.3950                | 0.30030          | 153.2163                                 |
|           | 50       | 547.8        | 5.48E-07    | 0.5478             | 23.9428                | 0.30008          | 153.1045                                 |
|           | 51       | 545.24       | 5.45E-07    | 0.5452             | 24.4880                | 0.29729          | 151.6769                                 |
|           | 52       | 543.68       | 5.44E-07    | 0.5437             | 25.0317                | 0.29559          | 150.8102                                 |
|           | 53       | 540.36       | 5.40E-07    | 0.5404             | 25.5721                | 0.29199          | 148.9739                                 |
|           | 54       | 538.78       | 5.39E-07    | 0.5388             | 26.1109                | 0.29028          | 148.1040                                 |
|           | 55       | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396             | 26.6504                | 0.29112          | 148.5332                                 |
|           | 56       | 538.78       | 5.39E-07    | 0.5388             | 27.1892                | 0.29028          | 148.1040                                 |
| 27/6/2551 | 57       | 537          | 5.37E-07    | 0.5370             | 27.7262                | 0.28837          | 147.1270                                 |
|           | 58       | 538.78       | 5.39E-07    | 0.5388             | 28.2650                | 0.29028          | 148.1040                                 |
|           | 59       | 538.78       | 5.39E-07    | 0.5388             | 28.8038                | 0.29028          | 148.1040                                 |
|           | 60       | 538.78       | 5.39E-07    | 0.5388             | 29.3425                | 0.29028          | 148.1040                                 |
|           | 61       | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396             | 29.8821                | 0.29112          | 148.5332                                 |
|           | 62       | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396             | 30.4217                | 0.29112          | 148.5332                                 |
|           | 63       | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396             | 30.9612                | 0.29112          | 148.5332                                 |
|           | 64       | 540.34       | 5.40E-07    | 0.5403             | 31.5016                | 0.29197          | 148.9629                                 |
|           | 65       | 541.12       | 5.41E-07    | 0.5411             | 32.0427                | 0.29281          | 149.3933                                 |
|           | 66       | 542.9        | 5.43E-07    | 0.5429             | 32.5856                | 0.29474          | 150.3778                                 |
|           | 67       | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396             | 33.1251                | 0.29112          | 148.5332                                 |
|           | 68       | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396             | 33.6647                | 0.29112          | 148.5332                                 |
|           | 69       | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396             | 34.2043                | 0.29112          | 148.5332                                 |
|           | 70       | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396             | 34.7438                | 0.29112          | 148.5332                                 |
|           | 71       | 538.78       | 5.39E-07    | 0.5388             | 35.2826                | 0.29028          | 148.1040                                 |
|           | 72       | 540.34       | 5.40E-07    | 0.5403             | 35.8229                | 0.29197          | 148.9629                                 |
|           | 73       | 540.34       | 5.40E-07    | 0.5403             | 36.3633                | 0.29197          | 148.9629                                 |
|           | 74       | 540.34       | 5.40E-07    | 0.5403             | 36.9036                | 0.29197          | 148.9629                                 |
|           | 75       | 539.56       | 5.40E-07    | 0.5396             | 37.4432                | 0.29112          | 148.5332                                 |
|           | 76       | 538.78       | 5.39E-07    | 0.5388             | 37.9820                | 0.29028          | 148.1040                                 |
|           | 77       | 535.44       | 5.35E-07    | 0.5354             | 38.5174                | 0.28670          | 146.2735                                 |
|           | 78       | 534.66       | 5.35E-07    | 0.5347             | 39.0521                | 0.28586          | 145.8476                                 |
|           | 79       | 533.88       | 5.34E-07    | 0.5339             | 39.5859                | 0.28503          | 145.4224                                 |
|           | 80       | 532.32       | 5.32E-07    | 0.5323             | 40.1183                | 0.28336          | 144.5738                                 |
| 28/6/2551 | 81       | 532.32       | 5.32E-07    | 0.5323             | 40.6506                | 0.28336          | 144.5738                                 |
|           | 82       | 532.32       | 5.32E-07    | 0.5323             | 41.1829                | 0.28336          | 144.5738                                 |
|           | 83       | 533.88       | 5.34E-07    | 0.5339             | 41.7168                | 0.28503          | 145.4224                                 |

ตารางที่ ค-3 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต

| วันที่    | จำนวนชม. | Voltage (mV) | Current (A) | Current ( $\mu$ A) | Acc Current ( $\mu$ A) | Power ( $\mu$ W) | Power density ( $\mu$ W/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------|--------------|-------------|--------------------|------------------------|------------------|--|
|           | 84       | 535.44       | 5.35E-07    | 0.5354             | 42.2522                | 0.28670          | 146.2735                                 |
|           | 85       | 534.66       | 5.35E-07    | 0.5347             | 42.7869                | 0.28586          | 145.8476                                 |
|           | 86       | 537          | 5.37E-07    | 0.5370             | 43.3239                | 0.28837          | 147.1270                                 |
|           | 87       | 537          | 5.37E-07    | 0.5370             | 43.8609                | 0.28837          | 147.1270                                 |
|           | 88       | 537          | 5.37E-07    | 0.5370             | 44.3979                | 0.28837          | 147.1270                                 |
|           | 89       | 537          | 5.37E-07    | 0.5370             | 44.9349                | 0.28837          | 147.1270                                 |
|           | 90       | 537          | 5.37E-07    | 0.5370             | 45.4719                | 0.28837          | 147.1270                                 |
|           | 91       | 538.78       | 5.39E-07    | 0.5388             | 46.0107                | 0.29028          | 148.1040                                 |
|           | 92       | 538.78       | 5.39E-07    | 0.5388             | 46.5494                | 0.29028          | 148.1040                                 |
|           | 93       | 537          | 5.37E-07    | 0.5370             | 47.0864                | 0.28837          | 147.1270                                 |
|           | 94       | 537          | 5.37E-07    | 0.5370             | 47.6234                | 0.28837          | 147.1270                                 |
|           | 95       | 537          | 5.37E-07    | 0.5370             | 48.1604                | 0.28837          | 147.1270                                 |
|           | 96       | 537          | 5.37E-07    | 0.5370             | 48.6974                | 0.28837          | 147.1270                                 |
|           | 97       | 538          | 5.38E-07    | 0.5380             | 49.2354                | 0.28944          | 147.6755                                 |
|           | 98       | 537.2        | 5.37E-07    | 0.5372             | 49.7726                | 0.28858          | 147.2367                                 |
|           | 99       | 538.9        | 5.39E-07    | 0.5389             | 50.3115                | 0.29041          | 148.1700                                 |
|           | 100      | 536.7        | 5.37E-07    | 0.5367             | 50.8482                | 0.28805          | 146.9627                                 |
|           | 101      | 536          | 5.36E-07    | 0.5360             | 51.3842                | 0.28730          | 146.5796                                 |
|           | 102      | 535          | 5.35E-07    | 0.5350             | 51.9192                | 0.28623          | 146.0332                                 |
|           | 103      | 534          | 5.34E-07    | 0.5340             | 52.4532                | 0.28516          | 145.4878                                 |
|           | 104      | 534.8        | 5.35E-07    | 0.5348             | 52.9880                | 0.28601          | 145.9240                                 |
| 29/6/2551 | 105      | 535.2        | 5.35E-07    | 0.5352             | 53.5232                | 0.28644          | 146.1424                                 |
|           | 106      | 535.8        | 5.36E-07    | 0.5358             | 54.0590                | 0.28708          | 146.4702                                 |
|           | 107      | 533          | 5.33E-07    | 0.5330             | 54.5920                | 0.28409          | 144.9434                                 |
|           | 108      | 530.9        | 5.31E-07    | 0.5309             | 55.1229                | 0.28185          | 143.8035                                 |
|           | 109      | 525          | 5.25E-07    | 0.5250             | 55.6479                | 0.27563          | 140.6250                                 |
|           | 110      | 478.42       | 4.78E-07    | 0.4784             | 56.1264                | 0.22889          | 116.7784                                 |
|           | 111      | 496.24       | 4.96E-07    | 0.4962             | 56.6226                | 0.24625          | 125.6399                                 |
|           | 112      | 489          | 4.89E-07    | 0.4890             | 57.1116                | 0.23912          | 122.0005                                 |
|           | 113      | 470.18       | 4.70E-07    | 0.4702             | 57.5818                | 0.22107          | 112.7904                                 |
|           | 114      | 477.4        | 4.77E-07    | 0.4774             | 58.0592                | 0.22791          | 116.2810                                 |
|           | 115      | 480          | 4.80E-07    | 0.4800             | 58.5392                | 0.23040          | 117.5510                                 |
|           | 116      | 450.8        | 4.51E-07    | 0.4508             | 58.9900                | 0.20322          | 103.6840                                 |
|           | 117      | 425.3        | 4.25E-07    | 0.4253             | 59.4153                | 0.18088          | 92.2858                                  |
|           | 118      | 432.76       | 4.33E-07    | 0.4328             | 59.8480                | 0.18728          | 95.5516                                  |
|           | 119      | 434.32       | 4.34E-07    | 0.4343             | 60.2824                | 0.18863          | 96.2418                                  |
|           | 120      | 435.1        | 4.35E-07    | 0.4351             | 60.7175                | 0.18931          | 96.5878                                  |
|           | 121      | 438.44       | 4.38E-07    | 0.4384             | 61.1559                | 0.19223          | 98.0763                                  |
|           | 122      | 437.66       | 4.38E-07    | 0.4377             | 61.5936                | 0.19155          | 97.7277                                  |
|           | 123      | 438.44       | 4.38E-07    | 0.4384             | 62.0320                | 0.19223          | 98.0763                                  |
|           | 124      | 438.44       | 4.38E-07    | 0.4384             | 62.4704                | 0.19223          | 98.0763                                  |
|           | 125      | 437.66       | 4.38E-07    | 0.4377             | 62.9081                | 0.19155          | 97.7277                                  |

ตารางที่ ค-3 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต

| วันที่    | จำนวนชม. | Voltage (mV) | Current (A) | Current ( $\mu$ A) | Acc Current ( $\mu$ A) | Power ( $\mu$ W) | Power density ( $\mu$ W/m <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------|--------------|-------------|--------------------|------------------------|------------------|--|
|           | 126      | 437.66       | 4.38E-07    | 0.4377             | 63.3458                | 0.19155          | 97.7277                                  |
|           | 127      | 436.88       | 4.37E-07    | 0.4369             | 63.7826                | 0.19086          | 97.3797                                  |
|           | 128      | 436.88       | 4.37E-07    | 0.4369             | 64.2195                | 0.19086          | 97.3797                                  |
| 30/6/2551 | 129      | 436.88       | 4.37E-07    | 0.4369             | 64.6564                | 0.19086          | 97.3797                                  |
|           | 130      | 437.66       | 4.38E-07    | 0.4377             | 65.0941                | 0.19155          | 97.7277                                  |
|           | 131      | 437.66       | 4.38E-07    | 0.4377             | 65.5317                | 0.19155          | 97.7277                                  |
|           | 132      | 436.88       | 4.37E-07    | 0.4369             | 65.9686                | 0.19086          | 97.3797                                  |
|           | 133      | 434.32       | 4.34E-07    | 0.4343             | 66.4029                | 0.18863          | 96.2418                                  |
|           | 134      | 436.88       | 4.37E-07    | 0.4369             | 66.8398                | 0.19086          | 97.3797                                  |
|           | 135      | 439.22       | 4.39E-07    | 0.4392             | 67.2790                | 0.19291          | 98.4256                                  |
|           | 136      | 441.78       | 4.42E-07    | 0.4418             | 67.7208                | 0.19517          | 99.5763                                  |
|           | 137      | 442.56       | 4.43E-07    | 0.4426             | 68.1634                | 0.19586          | 99.9282                                  |
|           | 138      | 442.56       | 4.43E-07    | 0.4426             | 68.6059                | 0.19586          | 99.9282                                  |

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

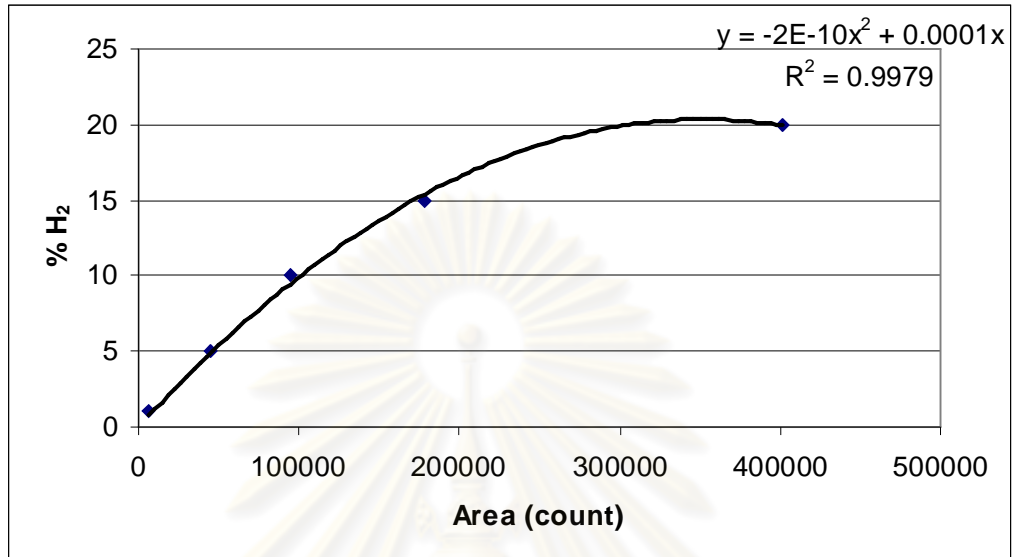




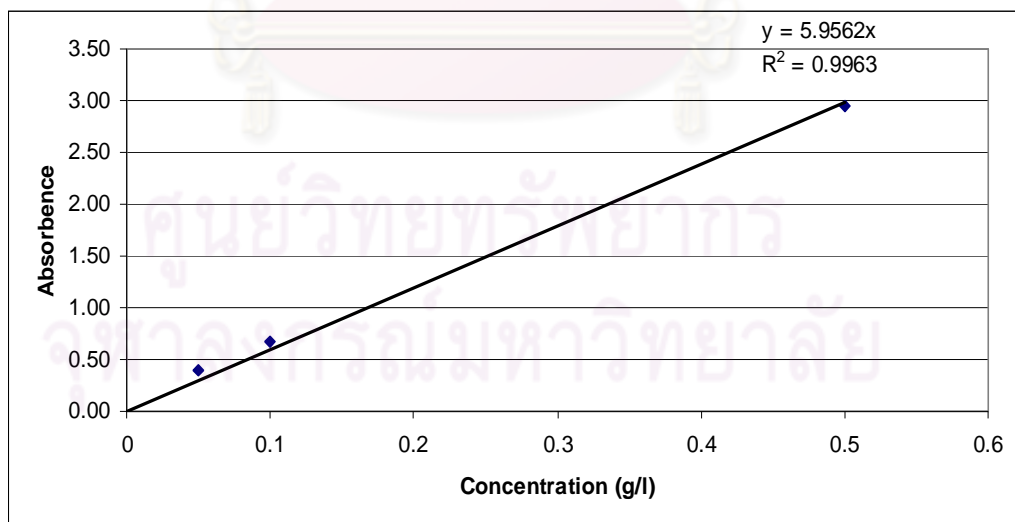
ภาคผนวก ง

กราฟมาตรฐานต่างๆ

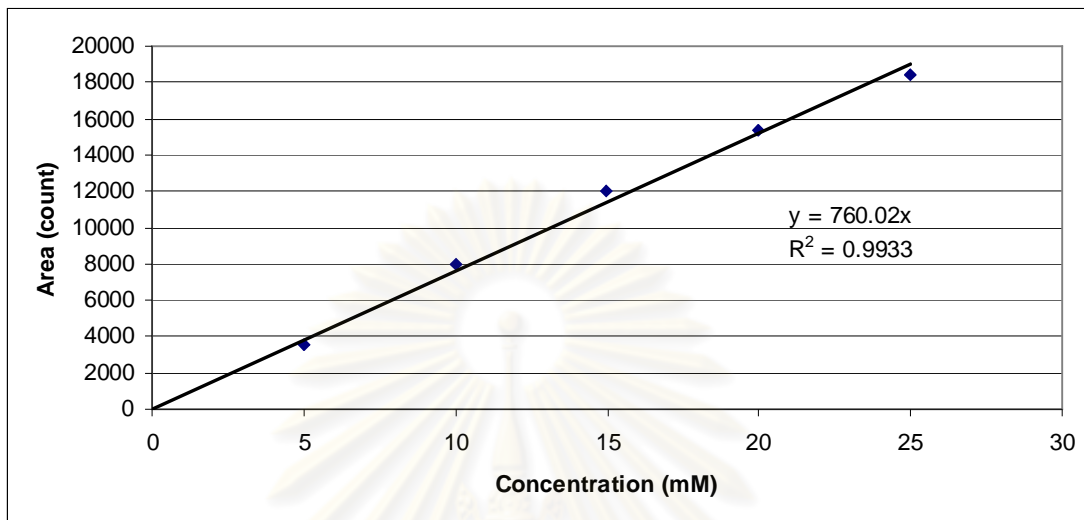
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



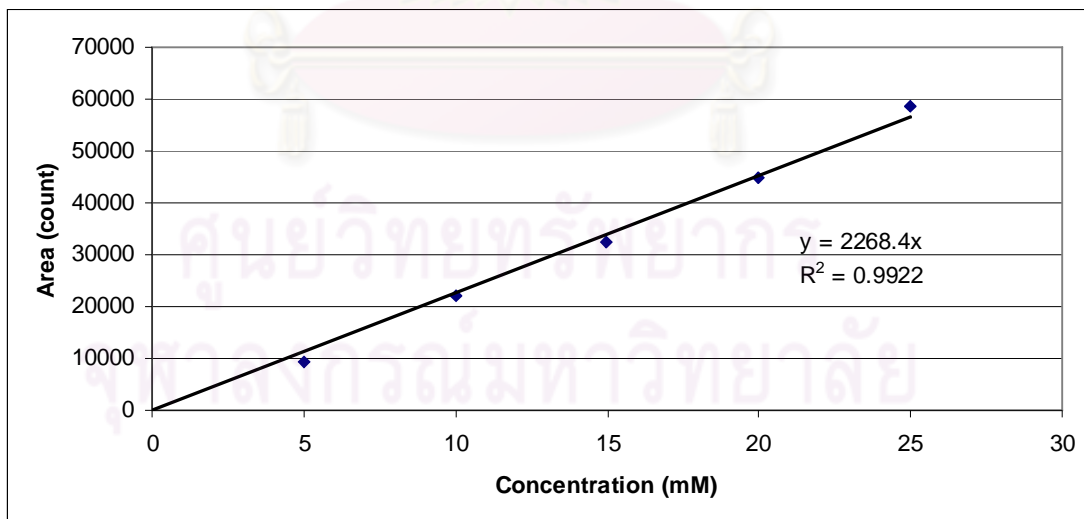
รูปที่ ง-1 กราฟมาตรฐานไฮโดรเจน



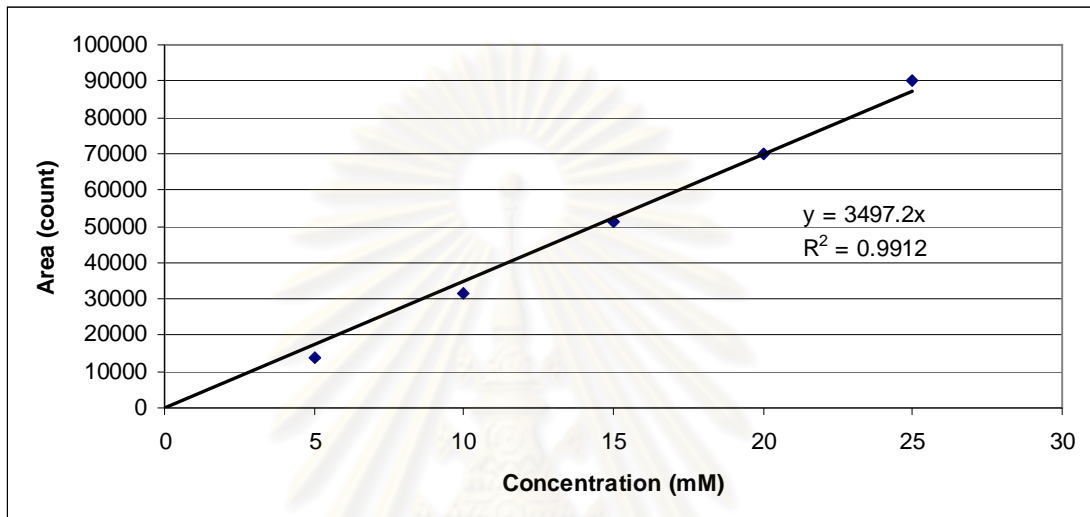
รูปที่ ง-2 กราฟมาตรฐานกลูโคส



รูปที่ ง-3 กราฟมาตรฐานกรดอะซิติก



รูปที่ ง-4 กราฟมาตรฐานกรดโพธิ์ฟอนิก



รูปที่ ๓-กราฟมาตรฐานกรดบิวไทริก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Sigmaplot 10 และสมการ Gompertz

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ-1 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Sigmaplot 10 และสมการ Gompertz ของน้ำ  
 เสียดอุตสาหกรรมผลิตแป้งมันสำปะหลัง

**Nonlinear Regression**

Data Source: Data 1 in Data Gompertz

Equation: User-Defined, Gompertz, 3 Parameter pum

$$f=a*\exp(-\exp((b*2.718*(x0-x)/a+1)))$$

| R      | Rsqr        | Adj Rsqr   | Standard Error of Estimate |         |         |
|--------|-------------|------------|----------------------------|---------|---------|
| 0.9884 | 0.9769      | 0.9748     | 17.0848                    |         |         |
|        | Coefficient | Std. Error | t                          | P       | VIF     |
| a      | 317.2848    | 5.0636     | 62.6599                    | <0.0001 | 1.0429  |
| b      | 22.8307     | 2.0531     | 11.1199                    | <0.0001 | 5.5115< |
| x0     | 13.4713     | 0.6122     | 22.0035                    | <0.0001 | 5.4146< |

**Analysis of Variance:**

Uncorrected for the mean of the observations:

|            | DF | SS           | MS          |
|------------|----|--------------|-------------|
| Regression | 3  | 1549821.1295 | 516607.0432 |
| Residual   | 22 | 6421.6057    | 291.8912    |
| Total      | 25 | 1556242.7352 | 62249.7094  |

Corrected for the mean of the observations:

|            | DF | SS          | MS          | F        | P       |
|------------|----|-------------|-------------|----------|---------|
| Regression | 2  | 271115.5484 | 135557.7742 | 464.4120 | <0.0001 |
| Residual   | 22 | 6421.6057   | 291.8912    |          |         |
| Total      | 24 | 277537.1541 | 11564.0481  |          |         |

**Statistical Tests:**

**PRESS** 7686.1218

**Durbin-Watson Statistic** 0.3172 Failed

**Normality Test** Passed (P = 0.5342)

K-S Statistic = 0.1568 Significance Level = 0.5342

**Constant Variance Test** Failed (P = <0.0001)

Power of performed test with alpha = 0.0500: 1.0000

**Regression Diagnostics:**

| Row | Std. Res.    | Stud. Res.   | Stud. Del. Res. |
|-----|--------------|--------------|-----------------|
| 2   | -6.5091E-016 | -6.5091E-016 | -6.3595E-016    |
| 3   | -0.4108      | -0.4688      | -0.4603         |
| 4   | -0.1524      | -0.1738      | -0.1700         |
| 5   | -0.0775      | -0.0867      | -0.0847         |
| 6   | -0.0193      | -0.0210      | -0.0205         |
| 7   | -0.0055      | -0.0059      | -0.0057         |
| 8   | 0.0279       | 0.0297       | 0.0290          |
| 9   | -0.0443      | -0.0473      | -0.0462         |
| 10  | 0.1391       | 0.1501       | 0.1467          |
| 11  | 0.2970       | 0.3239       | 0.3172          |
| 12  | 0.4460       | 0.4902       | 0.4816          |
| 13  | 0.5704       | 0.6288       | 0.6199          |
| 14  | -0.6257      | -0.6793      | -0.6708         |
| 15  | -2.4717      | -2.5657<     | -2.9945<        |
| 16  | -1.8336      | -1.9044      | -2.0360<        |



|    |         |         |         |
|----|---------|---------|---------|
| 17 | -1.3125 | -1.3659 | -1.3949 |
| 18 | -0.8026 | -0.8363 | -0.8304 |
| 19 | -0.4666 | -0.4884 | -0.4798 |
| 20 | -0.0849 | -0.0889 | -0.0869 |
| 21 | 0.2795  | 0.2926  | 0.2864  |
| 22 | 0.6194  | 0.6485  | 0.6398  |
| 23 | 1.0044  | 1.0516  | 1.0543  |
| 24 | 1.3238  | 1.3861  | 1.4175  |
| 25 | 1.5434  | 1.6160  | 1.6818  |
| 26 | 1.7629  | 1.8459  | 1.9617  |

**Influence Diagnostics:**

| Row | Cook's Dist | Leverage    | DFFITS       |
|-----|-------------|-------------|--------------|
| 2   | 1.1032E-059 | 7.8115E-029 | -5.6207E-030 |
| 3   | 0.0221      | 0.2319      | -0.2529      |
| 4   | 0.0030      | 0.2318      | -0.0934      |
| 5   | 0.0006      | 0.2008      | -0.0425      |
| 6   | 2.8073E-005 | 0.1600      | -0.0090      |
| 7   | 1.7017E-006 | 0.1292      | -0.0022      |
| 8   | 3.9266E-005 | 0.1179      | 0.0106       |
| 9   | 0.0001      | 0.1245      | -0.0174      |
| 10  | 0.0012      | 0.1412      | 0.0595       |
| 11  | 0.0066      | 0.1592      | 0.1380       |
| 12  | 0.0167      | 0.1721      | 0.2196       |
| 13  | 0.0284      | 0.1771      | 0.2876       |
| 14  | 0.0275      | 0.1516      | -0.2836      |
| 15  | 0.1702      | 0.0720      | -0.8340      |
| 16  | 0.0951      | 0.0730      | -0.5711      |
| 17  | 0.0516      | 0.0767      | -0.4020      |
| 18  | 0.0200      | 0.0791      | -0.2434      |
| 19  | 0.0076      | 0.0874      | -0.1485      |
| 20  | 0.0003      | 0.0876      | -0.0269      |
| 21  | 0.0027      | 0.0877      | 0.0888       |
| 22  | 0.0135      | 0.0878      | 0.1985       |
| 23  | 0.0355      | 0.0878      | 0.3272       |
| 24  | 0.0617      | 0.0878      | 0.4399       |
| 25  | 0.0838      | 0.0878      | 0.5219       |
| 26  | 0.1094      | 0.0878      | 0.6088       |

**95% Confidence:**

| Row | Predicted   | 95% Conf-L   | 95% Conf-U  | 95% Pred-L | 95% Pred-U |
|-----|-------------|--------------|-------------|------------|------------|
| 2   | 1.1121E-014 | -3.0203E-013 | 3.2428E-013 | -35.4318   | 35.4318    |
| 3   | 42.2668     | 25.2030      | 59.3307     | 2.9402     | 81.5935    |
| 4   | 60.4665     | 43.4073      | 77.5258     | 21.1419    | 99.7912    |
| 5   | 81.1717     | 65.2938      | 97.0496     | 42.3450    | 119.9984   |
| 6   | 103.4132    | 89.2415      | 117.5848    | 65.2524    | 141.5739   |
| 7   | 126.2014    | 113.4670     | 138.9359    | 88.5507    | 163.8521   |
| 8   | 148.6582    | 136.4939     | 160.8225    | 111.1965   | 186.1199   |
| 9   | 170.0901    | 157.5885     | 182.5916    | 132.5175   | 207.6626   |
| 10  | 190.0110    | 176.6972     | 203.3248    | 152.1604   | 227.8616   |
| 11  | 208.1297    | 193.9927     | 222.2667    | 169.9818   | 246.2776   |

|    |          |          |          |          |          |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 12 | 224.3173 | 209.6166 | 239.0180 | 185.9569 | 262.6777 |
| 13 | 238.5685 | 223.6562 | 253.4807 | 200.1265 | 277.0104 |
| 14 | 270.7565 | 256.9600 | 284.5529 | 232.7334 | 308.7795 |
| 15 | 312.5079 | 303.0013 | 322.0144 | 275.8229 | 349.1928 |
| 16 | 313.3512 | 303.7810 | 322.9213 | 276.6497 | 350.0526 |
| 17 | 315.0911 | 305.2798 | 324.9024 | 278.3260 | 351.8561 |
| 18 | 315.7996 | 305.8337 | 325.7655 | 278.9929 | 352.6062 |
| 19 | 317.2486 | 306.7717 | 327.7254 | 280.3003 | 354.1968 |
| 20 | 317.2603 | 306.7762 | 327.7444 | 280.3100 | 354.2106 |
| 21 | 317.2756 | 306.7814 | 327.7698 | 280.3224 | 354.2287 |
| 22 | 317.2845 | 306.7835 | 327.7855 | 280.3294 | 354.2396 |
| 23 | 317.2846 | 306.7835 | 327.7857 | 280.3295 | 354.2398 |
| 24 | 317.2848 | 306.7835 | 327.7860 | 280.3296 | 354.2400 |
| 25 | 317.2848 | 306.7835 | 327.7860 | 280.3296 | 354.2400 |
| 26 | 317.2848 | 306.7835 | 327.7860 | 280.3296 | 354.2400 |

**Fit Equation Description:**

[Variables]

x = col(1) ' {{prevmin: 0.000000}} {{prevmax: 10.000000}}

y = col(2)

reciprocal\_y = 1/abs(y)

reciprocal\_ysquare = 1/y^2

'Automatic Initial Parameter Estimate Functions

F(q)=ape(x,ln(-ln((y-min(y))/(max(y)-min(y))))),1,0,1)

[Parameters]

a = max(y)-min(y) "Auto {{previous: 317.285}}

b = 2.48 ' {{previous: 22.8307}}

x0 = -F(0)[1]/F(0)[2] "Auto {{previous: 13.4713}}

[Equation]

f=a\*exp(-exp((b\*2.718\*(x0-x)/a+1)))

fit f to y

"fit f to y with weight reciprocal\_y

"fit f to y with weight reciprocal\_ysquare

[Constraints]

[Options]

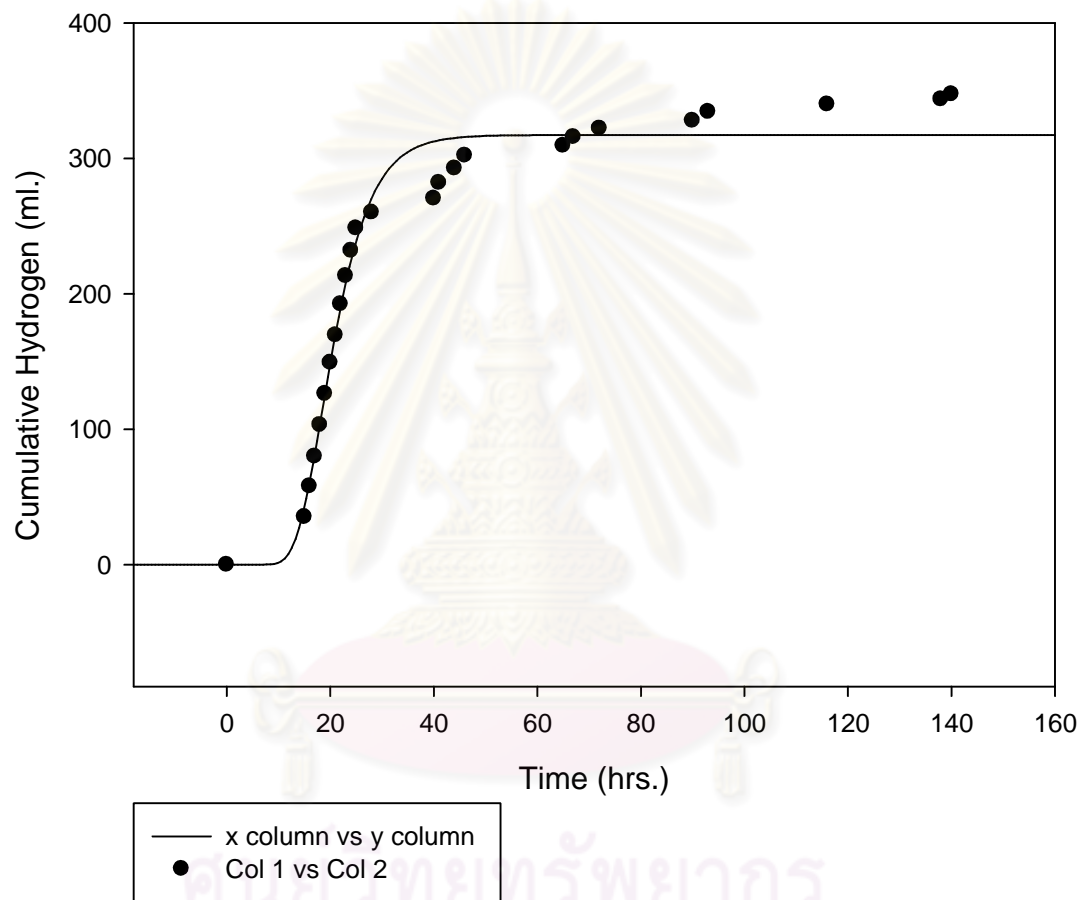
tolerance=1e-10

stepsize=1

iterations=200

Number of Iterations Performed = 16

## Gompertz Cassava



คู่มือปฏิบัติการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ-2 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Sigmaplot 10 และสมการ Gompertz ของน้ำ  
เสียอุตสาหกรรมผลิตเส้นก๋วยเตี๋ยว

**Nonlinear Regression**

Data Source: Data 1 in Notebook1

Equation: User-Defined, Gompertz, 3 Parameter pum

$$f=a*\exp(-\exp((b*2.718*(x_0-x)/a+1)))$$

| R      | Rsqr        | Adj Rsqr   | Standard Error of Estimate |         |         |
|--------|-------------|------------|----------------------------|---------|---------|
| 0.9739 | 0.9485      | 0.9424     | 4.6066                     |         |         |
|        | Coefficient | Std. Error | t                          | P       | VIF     |
| a      | 65.9331     | 2.1619     | 30.4983                    | <0.0001 | 1.4224  |
| b      | 1.2902      | 0.1715     | 7.5240                     | <0.0001 | 8.4127< |
| x0     | 0.4015      | 3.6159     | 0.1110                     | 0.9129  | 7.4324< |

**Analysis of Variance:**

Uncorrected for the mean of the observations:

|            | DF | SS         | MS         |
|------------|----|------------|------------|
| Regression | 3  | 51458.9854 | 17152.9951 |
| Residual   | 17 | 360.7479   | 21.2205    |
| Total      | 20 | 51819.7333 | 2590.9867  |

Corrected for the mean of the observations:

|            | DF | SS        | MS        | F        | P       |
|------------|----|-----------|-----------|----------|---------|
| Regression | 2  | 6642.1313 | 3321.0656 | 156.5030 | <0.0001 |
| Residual   | 17 | 360.7479  | 21.2205   |          |         |
| Total      | 19 | 7002.8792 | 368.5726  |          |         |

**Statistical Tests:**

PRESS 515.2482

Durbin-Watson Statistic 0.9014 Failed

Normality Test Passed (P = 0.6023)

K-S Statistic = 0.1657 Significance Level = 0.6023

Constant Variance Test Passed (P = 0.1396)

Power of performed test with alpha = 0.0500: 1.0000

**Regression Diagnostics:**

| Row | Std. Res. | Stud. Res. | Stud. Del. Res. |
|-----|-----------|------------|-----------------|
| 1   | -0.8907   | -1.0255    | -1.0272         |
| 2   | -1.8487   | -2.0984<   | -2.3650<        |
| 3   | -0.6708   | -0.7442    | -0.7341         |
| 4   | -0.1535   | -0.1663    | -0.1614         |
| 5   | 0.8490    | 0.9149     | 0.9103          |
| 6   | 1.4942    | 1.5992     | 1.6833          |
| 7   | 2.2673    | 2.4223<    | 2.9039<         |
| 8   | -0.6934   | -0.7500    | -0.7399         |
| 9   | -0.5640   | -0.6093    | -0.5977         |
| 10  | -0.4109   | -0.4429    | -0.4321         |
| 11  | -0.1053   | -0.1133    | -0.1099         |
| 12  | 0.0815    | 0.0874     | 0.0848          |
| 13  | -0.9226   | -0.9671    | -0.9651         |
| 14  | -0.5357   | -0.5613    | -0.5497         |
| 15  | -0.3281   | -0.3441    | -0.3350         |

|    |         |         |         |
|----|---------|---------|---------|
| 16 | -0.4173 | -0.4483 | -0.4375 |
| 17 | -0.0151 | -0.0163 | -0.0158 |
| 18 | 0.2867  | 0.3163  | 0.3077  |
| 19 | 0.7149  | 0.7908  | 0.7817  |
| 20 | 1.1058  | 1.2400  | 1.2614  |

**Influence Diagnostics:**

| Row | Cook's Dist | Leverage | DFBETS  |
|-----|-------------|----------|---------|
| 1   | 0.1142      | 0.2457   | -0.5863 |
| 2   | 0.4234      | 0.2239   | -1.2702 |
| 3   | 0.0427      | 0.1878   | -0.3529 |
| 4   | 0.0016      | 0.1479   | -0.0673 |
| 5   | 0.0450      | 0.1389   | 0.3657  |
| 6   | 0.1241      | 0.1271   | 0.6422  |
| 7   | 0.2765      | 0.1239   | 1.0919  |
| 8   | 0.0319      | 0.1452   | -0.3050 |
| 9   | 0.0207      | 0.1430   | -0.2441 |
| 10  | 0.0106      | 0.1391   | -0.1737 |
| 11  | 0.0007      | 0.1366   | -0.0437 |
| 12  | 0.0004      | 0.1309   | 0.0329  |
| 13  | 0.0308      | 0.0898   | -0.3031 |
| 14  | 0.0103      | 0.0893   | -0.1721 |
| 15  | 0.0039      | 0.0905   | -0.1056 |
| 16  | 0.0103      | 0.1335   | -0.1717 |
| 17  | 1.4587E-005 | 0.1409   | -0.0064 |
| 18  | 0.0072      | 0.1782   | 0.1433  |
| 19  | 0.0467      | 0.1829   | 0.3699  |
| 20  | 0.1320      | 0.2048   | 0.6401  |

**95% Confidence:**

| Row | Predicted | 95% Conf-L | 95% Conf-U | 95% Pred-L | 95% Pred-U |
|-----|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 1   | 4.1029    | -0.7150    | 8.9208     | -6.7447    | 14.9505    |
| 2   | 22.7045   | 18.1058    | 27.3032    | 11.9524    | 33.4566    |
| 3   | 25.2833   | 21.0719    | 29.4946    | 14.6911    | 35.8755    |
| 4   | 29.1223   | 25.3840    | 32.8606    | 18.7092    | 39.5355    |
| 5   | 30.3814   | 26.7585    | 34.0042    | 20.0091    | 40.7537    |
| 6   | 32.8522   | 29.3876    | 36.3167    | 22.5341    | 43.1702    |
| 7   | 34.0592   | 30.6385    | 37.4799    | 23.7558    | 44.3626    |
| 8   | 49.7294   | 46.0255    | 53.4333    | 39.3286    | 60.1303    |
| 9   | 51.1651   | 47.4897    | 54.8405    | 40.7744    | 61.5559    |
| 10  | 52.4913   | 48.8665    | 56.1161    | 42.1184    | 62.8643    |
| 11  | 53.1149   | 49.5225    | 56.7073    | 42.7532    | 63.4766    |
| 12  | 54.2863   | 50.7697    | 57.8030    | 43.9507    | 64.6220    |
| 13  | 60.9435   | 58.0313    | 63.8556    | 50.7975    | 71.0894    |
| 14  | 61.1924   | 58.2882    | 64.0966    | 51.0487    | 71.3360    |
| 15  | 62.2680   | 59.3445    | 65.1914    | 52.1188    | 72.4171    |
| 16  | 64.7104   | 61.1594    | 68.2615    | 54.3630    | 75.0578    |
| 17  | 64.8893   | 61.2405    | 68.5382    | 54.5080    | 75.2707    |
| 18  | 65.5305   | 61.4273    | 69.6336    | 54.9808    | 76.0801    |
| 19  | 65.5897   | 61.4332    | 69.7462    | 55.0192    | 76.1602    |
| 20  | 65.8205   | 61.4225    | 70.2186    | 55.1528    | 76.4883    |

**Fit Equation Description:**

[Variables]

x = col(1) ' {{prevm: 0.000000}} {{prevm: 10.000000}}

y = col(2)

reciprocal\_y = 1/abs(y)

reciprocal\_ysquare = 1/y^2

'Automatic Initial Parameter Estimate Functions

F(q)=ape(x,ln(-ln((y-min(y))/(max(y)-min(y))))),1,0,1)

[Parameters]

a = max(y)-min(y) "Auto {{previous: 65.9331}}

b = 0.51 ' {{previous: 1.29021}}

x0 = -F(0)[1]/F(0)[2] "Auto {{previous: 0.401467}}

[Equation]

f=a\*exp(-exp((b\*2.718\*(x0-x)/a+1)))

fit f to y

"fit f to y with weight reciprocal\_y

"fit f to y with weight reciprocal\_ysquare

[Constraints]

[Options]

tolerance=1e-10

stepsize=1

iterations=200

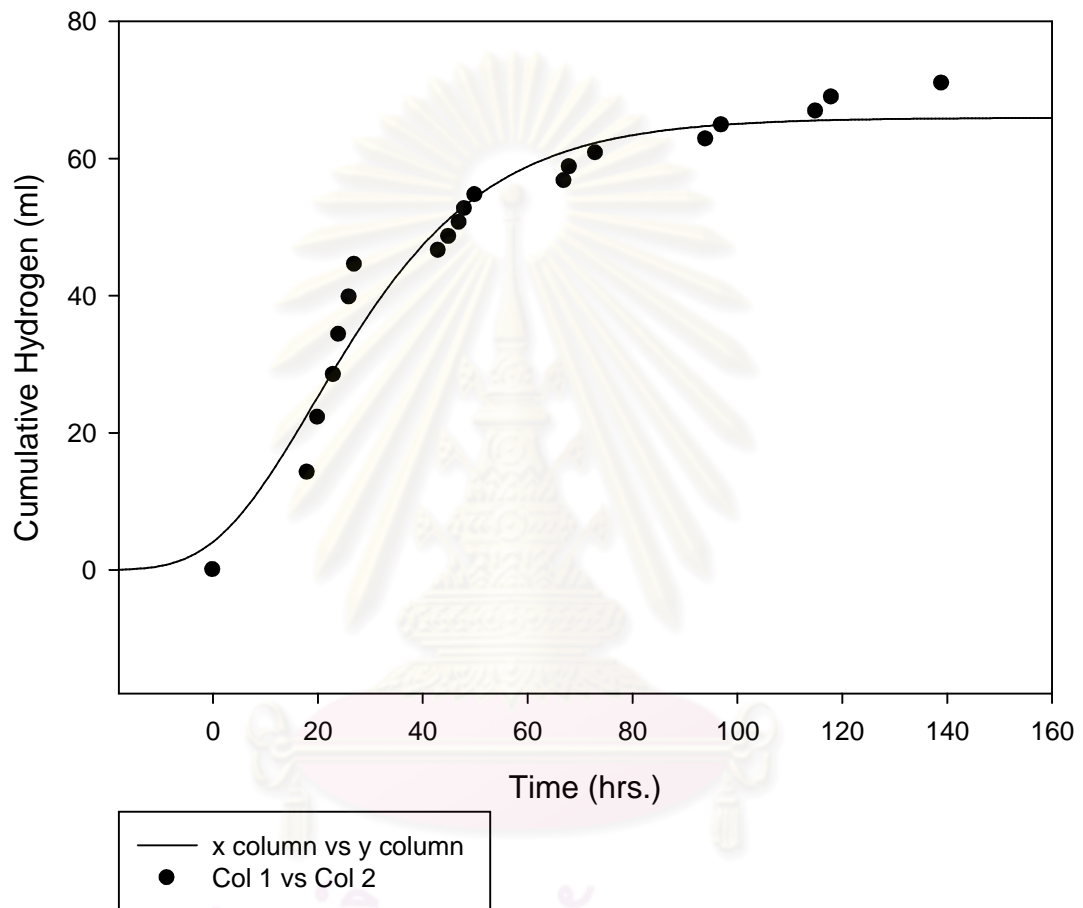
Number of Iterations Performed = 14



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## Gompertz Noodle



ศูนย์เวชศาสตร์พยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จ-3 ผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Sigmaplot 10 และสมการ Gompertz ของน้ำ  
เสียอุตสาหกรรมผลิตซ็อกโกแลต

**Nonlinear Regression**

Data Source: Data 1 in Pum CU[1]

Equation: User-Defined, Gompertz, 3 Parameter pum

$$f=a*\exp(-\exp((b*2.718*(x0-x)/a+1)))$$

| R      | Rsqr        | Adj Rsqr   | Standard Error of Estimate |         |         |
|--------|-------------|------------|----------------------------|---------|---------|
| 0.9791 | 0.9587      | 0.9555     | 17.1980                    |         |         |
|        | Coefficient | Std. Error | t                          | P       | VIF     |
| a      | 247.2991    | 6.7079     | 36.8667                    | <0.0001 | 1.3568  |
| b      | 4.2030      | 0.4156     | 10.1124                    | <0.0001 | 5.5508< |
| x0     | 2.0247      | 2.6150     | 0.7743                     | 0.4458  | 4.8685< |

**Analysis of Variance:**

Uncorrected for the mean of the observations:

|            | DF | SS          | MS          |
|------------|----|-------------|-------------|
| Regression | 3  | 947109.1414 | 315703.0471 |
| Residual   | 26 | 7690.0483   | 295.7711    |
| Total      | 29 | 954799.1897 | 32924.1100  |

Corrected for the mean of the observations:

|            | DF | SS          | MS         | F        | P       |
|------------|----|-------------|------------|----------|---------|
| Regression | 2  | 178583.2360 | 89291.6180 | 301.8943 | <0.0001 |
| Residual   | 26 | 7690.0483   | 295.7711   |          |         |
| Total      | 28 | 186273.2843 | 6652.6173  |          |         |

**Statistical Tests:**

PRESS 9583.2512

Durbin-Watson Statistic 0.5487 Failed

Normality Test Passed (P = 0.4181)

K-S Statistic = 0.1596 Significance Level = 0.4181

Constant Variance Test Failed (P = 0.0294)

Power of performed test with alpha = 0.0500: 1.0000

**Regression Diagnostics:**

| Row | Std. Res. | Stud. Res. | Stud. Del. Res. |
|-----|-----------|------------|-----------------|
| 1   | -0.7269   | -0.7596    | -0.7533         |
| 2   | -2.0073   | -2.1631<   | -2.3424<        |
| 3   | -1.7387   | -1.8608    | -1.9598         |
| 4   | -1.1112   | -1.1821    | -1.1916         |
| 5   | -0.6033   | -0.6381    | -0.6306         |
| 6   | 0.1068    | 0.1127     | 0.1105          |
| 7   | 0.7562    | 0.7957     | 0.7899          |
| 8   | 1.3126    | 1.3783     | 1.4038          |
| 9   | 1.8672    | 1.9574     | 2.0787<         |
| 10  | 2.3476    | 2.4580<    | 2.7509<         |
| 11  | -0.2288   | -0.2427    | -0.2383         |
| 12  | -0.0468   | -0.0498    | -0.0489         |
| 13  | -0.0561   | -0.0600    | -0.0588         |
| 14  | 0.2042    | 0.2187     | 0.2146          |
| 15  | 0.2366    | 0.2535     | 0.2489          |

|    |         |         |         |
|----|---------|---------|---------|
| 16 | -1.3091 | -1.3756 | -1.4008 |
| 17 | -1.1122 | -1.1636 | -1.1719 |
| 18 | -0.8364 | -0.8717 | -0.8675 |
| 19 | -0.4379 | -0.4554 | -0.4483 |
| 20 | -0.6314 | -0.6532 | -0.6459 |
| 21 | -0.0733 | -0.0759 | -0.0744 |
| 22 | 0.4472  | 0.4631  | 0.4560  |
| 23 | 0.4640  | 0.4811  | 0.4738  |
| 24 | 0.2086  | 0.2193  | 0.2152  |
| 25 | 0.1398  | 0.1494  | 0.1466  |
| 26 | 0.2435  | 0.2604  | 0.2557  |
| 27 | 0.3437  | 0.3680  | 0.3618  |
| 28 | 0.4446  | 0.4764  | 0.4692  |
| 29 | 0.5116  | 0.5519  | 0.5443  |

**Influence Diagnostics:**

| Row | Cook's Dist | Leverage | DFBETS  |
|-----|-------------|----------|---------|
| 1   | 0.0177      | 0.0844   | -0.2287 |
| 2   | 0.2516      | 0.1389   | -0.9408 |
| 3   | 0.1678      | 0.1269   | -0.7472 |
| 4   | 0.0614      | 0.1164   | -0.4326 |
| 5   | 0.0161      | 0.1059   | -0.2171 |
| 6   | 0.0005      | 0.1011   | 0.0371  |
| 7   | 0.0226      | 0.0968   | 0.2586  |
| 8   | 0.0650      | 0.0931   | 0.4497  |
| 9   | 0.1264      | 0.0900   | 0.6538  |
| 10  | 0.1937      | 0.0878   | 0.8533  |
| 11  | 0.0025      | 0.1117   | -0.0845 |
| 12  | 0.0001      | 0.1179   | -0.0179 |
| 13  | 0.0002      | 0.1250   | -0.0222 |
| 14  | 0.0023      | 0.1279   | 0.0822  |
| 15  | 0.0032      | 0.1291   | 0.0958  |
| 16  | 0.0657      | 0.0944   | -0.4522 |
| 17  | 0.0426      | 0.0863   | -0.3602 |
| 18  | 0.0218      | 0.0793   | -0.2545 |
| 19  | 0.0056      | 0.0753   | -0.1280 |
| 20  | 0.0100      | 0.0658   | -0.1713 |
| 21  | 0.0001      | 0.0662   | -0.0198 |
| 22  | 0.0052      | 0.0673   | 0.1225  |
| 23  | 0.0058      | 0.0697   | 0.1297  |
| 24  | 0.0017      | 0.0952   | 0.0698  |
| 25  | 0.0011      | 0.1248   | 0.0553  |
| 26  | 0.0032      | 0.1257   | 0.0969  |
| 27  | 0.0066      | 0.1275   | 0.1383  |
| 28  | 0.0112      | 0.1291   | 0.1807  |
| 29  | 0.0166      | 0.1407   | 0.2202  |

**95% Confidence:**

| Row | Predicted | 95% Conf-L | 95% Conf-U | 95% Pred-L | 95% Pred-U |
|-----|-----------|------------|------------|------------|------------|
| 1   | 12.5010   | 2.2311     | 22.7709    | -24.3115   | 49.3135    |
| 2   | 44.5212   | 31.3455    | 57.6970    | 6.7947     | 82.2478    |

|    |          |          |          |          |          |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 3  | 55.5817  | 42.9876  | 68.1759  | 18.0544  | 93.1091  |
| 4  | 63.4079  | 51.3444  | 75.4713  | 26.0552  | 100.7605 |
| 5  | 71.4999  | 59.9945  | 83.0053  | 34.3237  | 108.6761 |
| 6  | 75.6195  | 64.3791  | 86.8600  | 38.5245  | 112.7146 |
| 7  | 79.7746  | 68.7773  | 90.7718  | 42.7525  | 116.7966 |
| 8  | 83.9549  | 73.1710  | 94.7388  | 46.9957  | 120.9141 |
| 9  | 88.1508  | 77.5435  | 98.7581  | 51.2427  | 125.0589 |
| 10 | 92.3529  | 81.8802  | 102.8256 | 55.4832  | 129.2225 |
| 11 | 144.0720 | 132.2561 | 155.8878 | 106.7986 | 181.3454 |
| 12 | 151.1077 | 138.9696 | 163.2458 | 113.7309 | 188.4845 |
| 13 | 161.0541 | 148.5559 | 173.5522 | 123.5588 | 198.5494 |
| 14 | 167.2662 | 154.6260 | 179.9064 | 129.7233 | 204.8091 |
| 15 | 175.9477 | 163.2479 | 188.6476 | 138.3848 | 213.5107 |
| 16 | 210.1956 | 199.3357 | 221.0555 | 173.2141 | 247.1771 |
| 17 | 214.6643 | 204.2793 | 225.0492 | 177.8195 | 251.5091 |
| 18 | 218.6319 | 208.6789 | 228.5850 | 181.9065 | 255.3573 |
| 19 | 221.0221 | 211.3204 | 230.7238 | 184.3640 | 257.6802 |
| 20 | 233.1685 | 224.1038 | 242.2333 | 196.6738 | 269.6632 |
| 21 | 233.7887 | 224.6964 | 242.8810 | 197.2871 | 270.2902 |
| 22 | 234.9507 | 225.7808 | 244.1206 | 198.4297 | 271.4716 |
| 23 | 236.5133 | 227.1792 | 245.8473 | 199.9508 | 273.0758 |
| 24 | 242.7565 | 231.8480 | 253.6651 | 205.7607 | 279.7523 |
| 25 | 245.7908 | 233.3033 | 258.2783 | 208.2990 | 283.2825 |
| 26 | 245.8586 | 233.3252 | 258.3921 | 208.3516 | 283.3657 |
| 27 | 245.9854 | 233.3643 | 258.6066 | 208.4490 | 283.5219 |
| 28 | 246.1011 | 233.3977 | 258.8044 | 208.5369 | 283.6653 |
| 29 | 246.8004 | 233.5415 | 260.0592 | 209.0447 | 284.5560 |

**Fit Equation Description:**

[Variables]

x = col(1) ' {{prevmin: 0.000000}} {{prevmax: 10.000000}} }

y = col(2)

reciprocal\_y = 1/abs(y)

reciprocal\_ysquare = 1/y^2

'Automatic Initial Parameter Estimate Functions

F(q)=ape(x,ln(-ln((y-min(y))/(max(y)-min(y))))),1,0,1)

[Parameters]

a = max(y)-min(y) "Auto {{previous: 247.299}} }

b = 1.62 ' {{previous: 4.20302}} }

x0 = -F(0)[1]/F(0)[2] "Auto {{previous: 2.0247}} }

[Equation]

f=a\*exp(-exp((b\*2.718\*(x0-x)/a+1)))

fit f to y

"fit f to y with weight reciprocal\_y

"fit f to y with weight reciprocal\_ysquare

[Constraints]

[Options]

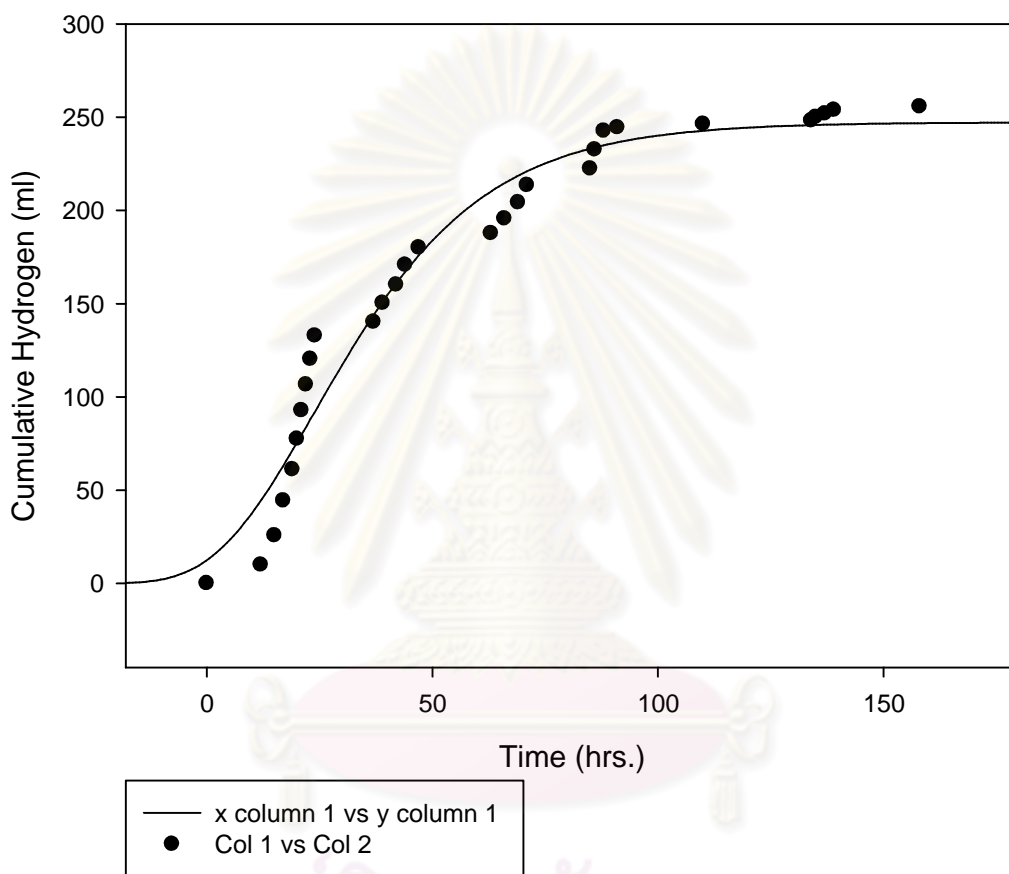
tolerance=1e-10

stepsize=1

iterations=200

Number of Iterations Performed = 13

## Gompertz Chocolate



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุภาภรณ์ สุภวิทยานันท์ เกิดวันที่ 10 มิถุนายน พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดราชบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย เมื่อ พ.ศ.2543 และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี ในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีในปี พ.ศ. 2547 ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2549



ศูนย์วิทยพัชร์พยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย