

การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพของเชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญ
ในสภาพไร้อากาศและจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพมีอากาศ

ELECTRICAL PRODUCTION BY MICROBIAL FUEL CELL FROM
ANAEROBIC AND AEROBIC MICROORGANISM



T122881

ณรรฐภร

ชุติวรเจริญชัย

ปวีรินทร์

รังแก้ว

วันธรา

ตันเจริญ

๑๒พ.

๖๒๒๑๙๐

๒๕๕๔

เลขหมู่.....

122881

เลขทะเบียน.....

วัน, เดือน, ปี... 26 ก.ย. 2555

b. ๑๒๒๖๓๐๑๙
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2554

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ELECTRICAL PRODUCTION BY MICROBIAL FUEL CELL FROM
ANAEROBIC AND AEROBIC MICROORGANISM**



**A SAMINAR REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
IN BIOTECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2011**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพของเชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพไร้อากาศและจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพมีอากาศ
Electrical production by microbial fuel cell from anaerobic and aerobic microorganism


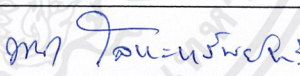
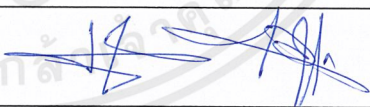
ชื่อนักศึกษา นางสาวณรรฐกร ชุติวรเจริญชัย
นางสาวปวีรินทร์ รังแก้ว
นางสาววันธรา ตันเจริญ

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพ

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สมชาย ไกรรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา
เทคโนโลยีชีวภาพ ประจำปีการศึกษา 2554

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.สรัญญา พันธุ์ฤกษ์	
ผศ.ดร.พนา โลหะทรัพย์ทวี	
ผศ.ดร.สมชาย ไกรรักษ์	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพของเชื้อจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพไร้อากาศและจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพมีอากาศ	
ชื่อนักศึกษา	นางสาวณรรฐกร	ชุติวรเจริญชัย
	นางสาวปวีณนทร์	รังแก้ว
	นางสาววันธรา	ตันเจริญ
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	เทคโนโลยีชีวภาพ	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.สมชาย ไกรรักษ์	

บทคัดย่อ

การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องคู่ ระหว่างการเลี้ยงเชื้อจากบ่อดักไขมัน (ห้องอานอน) และเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 และ *Saccharomyces cerevisiae* (ห้องคาโทด) ซึ่งกั้นด้วยเมมเบรน (10,000 ดาลตัน) จำนวน 4 ชุด ซึ่งมีพื้นที่เมมเบรนต่างกัน พบปริมาณ COD ในห้องอานอนลดลงจาก 40 กรัมต่อลิตร เหลือเพียง 27.5 7.5 20.0 และ 27.5 กรัมต่อลิตร ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพชุดที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ ขณะที่ห้องคาโทดพบการเจริญของเชื้อเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 เท่ากับ 0.353 0.203 0.220 และ 0.244 ของปริมาณแบคทีเรียโอคโคลโรฟิลล์ (OD_{770}) ที่เวลา 144 ชั่วโมงของการเลี้ยงเชื้อ ค่าพีเอชทั้งในห้องอานอน และคาโทดอยู่ในช่วงเป็นกรด (3.0) เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 1 ให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าระหว่าง ขั้วคาโทดด้านบนกับขั้วคาโทดด้านล่าง ได้สูงสุด (14.05 ไมโครแอมแปร์ ชั่วโมงที่ 192) เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 2 ผลิตปริมาณกระแสไฟฟ้าระหว่าง ขั้วคาโทดด้านบน กับขั้วอานอน ได้สูงสุด (30.26 ไมโครแอมแปร์ ชั่วโมงที่ 144) เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 3 และ 4 ให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าระหว่าง ขั้วคาโทดด้านล่าง และขั้วอานอน ได้สูงสุด (129.84 และ 26.57 ไมโครแอมแปร์ ชั่วโมงที่ 48 และ 288 ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 3 ให้กระแสไฟฟ้าสูงสุด สัมพันธ์ต่อการเจริญของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33

คำสำคัญ : เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพไร้อากาศ จุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพมีอากาศ

Title	Electrical production by microbial fuel cell from anaerobic and aerobic microorganism
Students	Nutthaporn Chootiworacharoenchai Paweenun Rangkaew Waranthara Tuncharoen
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Biotechnology
Academic Year	2011
Advisor	Asst.Prof.Dr. Somchai Krairak

ABSTRACT

The electric generation by two chamber microbial fuel cell (TCMFC) of sludge (anode chamber) and Photosynthetic bacteria isolate OS33 and *Saccharomyces cerevisiae* (cathode chamber) was studied in 4 experimental sets. Both chambers of each set were separated by 10,000 Dalton membrane with difference surface area. The initial COD in anode chamber of each set was 40 g/L and then reduced to 27.5, 7.5, 20.0 and 27.5 g/L in TCMFC set-1, -2, -3 and -4, respectively. While, in cathode chamber, the Photosynthetic bacterial strain OS33 grow up to 0.353, 0.203, 0.220 and 0.244 of bacterio-chlorophyll (OD₇₇₀) at 144 h., respectively. The culture pH in anode and cathode chamber of each set was acidic value (about 3.0). The maximum electric power of TCMFC set-1 was 14.05 μ Amp at 192 h. of cultivation. The TCMFC set-2 presented the maximal electric power at 30.26 μ Amp at 144 h. of cultivation. The TCMFC set-3 and set-4 gave the peak power of 129.84 and 26.57 μ Amp at 48 and 288 h., respectively. It was found that the electric generation in TCMCF set-3 related to the growth and viability of Photosynthetic bacteria isolate OS33.

Keywords : microbial fuel cell , anaerobic microorganism , aerobic microorganism

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการพิเศษในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องด้วยความอนุเคราะห์และเอาใจใส่จากอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษ ผศ.ดร.สมชาย ไกรรักษ์ ที่สละเวลาอันมีค่าในการให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำเทคนิคต่างๆ ตลอดจนการแก้ไขปัญหาที่เป็นประโยชน์ในการทำโครงการ รวมทั้งคณะกรรมการโครงการพิเศษ ผศ.ดร.สรัญญา พันธุ์ฤกษ์ และ ผศ.ดร.พนา โลหะทรัพย์ทวี ที่ได้ให้ความรู้ ข้อเสนอแนะ ประสบการณ์ที่เป็นประโยชน์ และให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้าน ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไขโครงการพิเศษนี้ให้สมบูรณ์ ซึ่งทางคณะผู้จัดทำซาบซึ้งในความกรุณาเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์วิชชุดา ชัยพร ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่กรุณาให้คำแนะนำ และอนุเคราะห์สารเคมีเพื่อใช้ในการทดลอง จนทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ให้ความเอื้อเฟื้อและอำนวยความสะดวกด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ต่างๆ และสารเคมี รวมทั้งข้อเสนอแนะต่างๆ ระหว่างการปฏิบัติงาน

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์โพรบซารูด และสารเคมีเพื่อใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณชมรมวิทยุสมัครเล่น สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำโครงการพิเศษ

ขอบคุณเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้กำลังใจเสมอมา

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจในการทำงาน โครงการพิเศษมาโดยตลอด

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากโครงการพิเศษเล่มนี้ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของทุกท่าน ดังกล่าวจึงใคร่ขอแสดงความขอบคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	V
สารบัญรูป	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)	4
2.2 หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง	5
2.3 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง	5
2.3.1 เซลล์เชื้อเพลิงทางเคมี (Chemical fuel cell)	5
2.3.1.1 Polymer Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)	5
2.3.1.2 Alkaline Fuel cell (AFC)	6
2.3.1.3 Moten - Carbonate Fuel Cell (MCFC)	7
2.3.1.4 Phosphoric - Acid Fuel Cell (PAFC)	8
2.3.1.5 Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)	9
2.3.1.6 Direct - Methanol Fuel Cell (DMFC)	11
2.3.2 เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพ (microbial fuel cell)	12
2.3.2.1 หลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพ	12
2.3.2.2 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพ	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ IV:ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	2.3.2.2.1 ส่วนแอโนด (Anode compartment)	13
	2.3.2.2.2 ส่วนแคโทด (Cathode compartment)	16
2.3.3	ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพ (Type of Microbial Fuel Cell)	17
	2.3.3.1 เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องคู่ (Two - Chamber Microbial Fuel Cell , TCMFC)	17
	2.3.3.2 เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องเดี่ยว (Single - Chamber Microbial Fuel Cell , SCMFC)	18
2.4	ไฮโดรเจน	19
	2.4.1 กระบวนการผลิตไฮโดรเจน	20
	2.4.1.1 กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยใช้อุณหภูมิสูง (Thermo Process)	20
	2.4.1.2 กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยใช้ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process)	20
	2.4.1.3 กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีทางชีวภาพ (Biological Processes)	21
2.5	จุลินทรีย์สำหรับผลิตไฟฟ้าทางชีวภาพ	24
	2.5.1 กลุ่มโฟโตโทรฟิเคยูคาริโอต (phototrophic eukaryote)	24
	2.5.2 กลุ่มโฟโตโทรฟิคโพรคาริโอต (phototrophic prokaryote)	24
	2.5.2.1 แบคทีเรียที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงแบบไม่มีออกซิเจน (anoxygenic photosynthetic bacteria)	24
	2.5.2.2 แบคทีเรียที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงแบบมีออกซิเจน (oxygenic photosynthetic bacteria)	26
2.6	ปัจจัยที่มีผลต่อผลิตไฮโดรเจนภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน	27
	2.6.1 ความเป็นกรด - ด่าง (pH)	27
	2.6.2 อุณหภูมิ (Temperature)	27
	2.6.3 ความเป็นด่าง (Alkalinity)	28
	2.6.4 สารอาหาร (Nutrients)	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5	ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น	29
2.6.6	กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid)	29
2.6.7	สารพิษ (Toxic substances)	29
2.6.7.1	แคตไอออนของโลหะเบา	29
2.6.7.2	แก๊สบางชนิด	30
2.6.7.3	โลหะหนัก	31
2.7	ทฤษฎีไฟฟ้าเบื้องต้น	32
2.7.1	กระแสไฟฟ้าของไอหุ้ม	32
2.7.2	กฎแรงดันไฟฟ้าของไอหุ้ม	32
2.7.3	กฎความต้านทานของไอหุ้ม	32
2.7.4	กำลังไฟฟ้าจากกฎของไอหุ้ม	33
2.8	ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand , COD)	33
2.9	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	34
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	36
3.1	เชื้อจุลินทรีย์	36
3.2	อุปกรณ์	36
3.3	วิธีการทดลอง	37
3.3.1	แบคทีเรียที่เจริญในสภาพไร้อากาศจากบ่อดักไขมัน	37
3.3.2	การเลี้ยงเชื้อบริสุทธิ์	37
3.3.2.1	เชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมกำมะถัน	37
	สายพันธุ์ OS33	
3.3.2.2	เชื้อยีสต์ <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	38
3.3.4	การศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสง	38
	สายพันธุ์ OS33 ร่วมกับเชื้อ <i>Saccharomyces cerevisiae</i> และ	
	เชื้อจากบ่อดักไขมัน	
3.3.4.1	การสร้างเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องคู่	38

3.3.4.2	การศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยสัดส่วนเชื้อเริ่มต้นระหว่างเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 และเชื้อยีสต์ <i>Saccharomyces cerevisiae</i> ที่ระดับ 1 ต่อ 2 ร่วมกับเชื้อจากบ่อดักไขมัน	39
3.3.4.3	การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total sugar)	39
3.3.4.4	การศึกษาการเจริญของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 โดยวิธีการสกัดแบคทีเรียโอสคลอโรฟิลล์	39
3.3.4.5	การวิเคราะห์ซีไอดีน้ำเสียของเชื้อจากบ่อดักไขมัน	40
3.3.4.6	การวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่าย	40
บทที่ 4	ผลการวิจัยและอภิปรายผล	42
4.1	แบคทีเรียที่เจริญในสภาพไร้อากาศจากบ่อดักไขมัน	42
4.2	การเลี้ยงเชื้อบริสุทธิ์	42
4.2.1	เชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33	42
4.2.2	เชื้อยีสต์ <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	43
4.3	การศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ร่วมกับเชื้อ <i>Saccharomyces cerevisiae</i> และเชื้อจากบ่อดักไขมัน	43
4.3.1	การสร้างเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องคู่	43
4.3.2	การศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยสัดส่วนเชื้อเริ่มต้นระหว่างเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 และเชื้อยีสต์ <i>Saccharomyces cerevisiae</i> ที่ระดับ 1 ต่อ 2 ร่วมกับเชื้อจากบ่อดักไขมัน โดยใช้พื้นที่เมมเบรนในชุดทดลองเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพที่แตกต่างกัน	45
4.3.3	การศึกษาการเจริญของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 โดยวิธีการสกัดแบคทีเรียโอสคลอโรฟิลล์	52

4.3.4	การวิเคราะห์ซีไอดี	54
4.3.5	การวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid , VFA)	54
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ		60
	เอกสารอ้างอิง	62
	ภาคผนวก ก	69
	ภาคผนวก ข	70
	ภาคผนวก ค	72



สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1	ค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต แก๊สไฮโดรเจนของเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ	28
ตารางที่ 2	แคตไอออนเพิ่มความเข้มข้นและแคตไอออนลดความเป็นพิษ	30
ตารางที่ 3	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในสภาวะการย่อย สลายแบบไม่มีออกซิเจน	31
ตารางที่ 4.1	แสดงผลของอุณหภูมิ จากการศึกษากการผลิตกระแสไฟฟ้าของแบคทีเรีย สังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 และเชื้อยีสต์ <i>Saccharomyces cerevisiae</i> ที่ระดับ 1 ต่อ 2 ในอาหารเหลวสูตร MYS ร่วมกับเชื้อจากบ่อดักไขมัน	47

สารบัญรูป

	หน้า
Figure 4.1 The configuration of microbial fuel cell unit. The front view (A) and top view (B) of unit 1 and 2. And the front view (C) and top view (D) of unit 3 and 4.	44
Figure 4.2 The current generation by microbial fuel cell unit 1 (a), unit 2 (b), unit 3 (c) and unit 4 (d). The microbial fuel cell was prepared by the mixed cultivation of OS33 and Sac. in cathode chamber and anaerobic microorganism in anode chamber.	46
Figure 4.3 pH of microbial fuel cell unit. Anode chamber (A) and cathode chamber (B).	49
Figure 4.4 Total sugar concentration of microbial fuel cell unit. Anode chamber (A) and cathode chamber (B).	51
Figure 4.5 growth curve of photosynthetic bacteria isolate OS33 in microbial fuel cell unit 1 (■), unit 2 (□), unit 3 (●) and unit 4 (○).	53

บทที่ 1

บทนำ

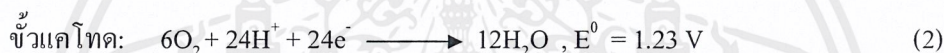
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

พลังงานมีบทบาทสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ และด้วยจำนวนประชากรโลกที่เพิ่มขึ้นในปัจจุบันทำให้ความต้องการบริโภคพลังงานมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพลังงานที่ใช้ส่วนใหญ่ได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติและน้ำมัน เป็นต้น อย่างไรก็ตามแหล่งเชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นแหล่งเชื้อเพลิงที่มีอยู่อย่างจำกัด และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในหลาย ๆ ด้าน การแสวงหาแหล่งพลังงานทดแทนใหม่ที่มีศักยภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมจะสามารถช่วยแก้ปัญหาดังกล่าวได้ ตัวอย่างพลังงานทดแทนที่สำคัญ เช่น พลังงานลม พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานคลื่น พลังงานความร้อนจากใต้พิภพโลก รวมทั้งเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell) ก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจในการพัฒนา

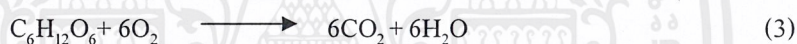
เซลล์เชื้อเพลิงมีหลายแบบขึ้นอยู่กับสารที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงชนิดที่นิยมใช้คือเซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจน-ออกซิเจน มีหลักการทำงานคล้าย ๆ แบตเตอรี่ที่จัดเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมี นั่นคือ สามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีจากปฏิกิริยาเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยตรงแต่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นแตกต่างจากแบตเตอรี่ตรงที่สามารถผลิตไฟฟ้าได้จากปฏิกิริยาเคมีของแก๊สไฮโดรเจน (เป็นแก๊สเชื้อเพลิง) และแก๊สออกซิเจนจากอากาศซึ่งสามารถผลิตไฟฟ้าได้ต่อเนื่องโดยไม่ต้องมีการชาร์ตใหม่ トラบเท่าที่มีแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจนป้อนเข้าสู่ตัวเซลล์ นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ยังไม่ทำลายชั้นบรรยากาศโอโซนเพราะไม่ก่อให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เช่นเดียวกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ (ปีตมารณ์ ธิมากุล และภาวดี อังค์วัฒน์, 2550) แต่มีข้อเสียคือต้องใช้ตัวเร่งที่มีราคาแพง ทำงานที่อุณหภูมิสูง และอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้กักครอบงั้นเซลล์เชื้อเพลิง นอกจากนี้การได้มาของเชื้อเพลิง ได้แก่ ไฮโดรเจนหรือสารไฮโดรคาร์บอน ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายสูงและสูญเสียพลังงานในกระบวนการผลิต จากสาเหตุดังกล่าวนำไปสู่การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ (microbial fuel cell) เนื่องจากสามารถทำงานภายใต้สภาวะไม่รุนแรง คือ ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ สามารถใช้อิเล็กโทรไลต์ที่เป็นกลางและตัวเร่งปฏิกิริยาราคาถูก เช่น แพลทินัม (platinum, Pt) ได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้สารตั้งต้นทางชีวภาพได้หลายชนิด เช่น คาร์โบไฮเดรต กรดไขมัน โปรตีน และน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ คือ เครื่องมือที่เปลี่ยนพลังงานทางเคมีที่มีอยู่ในสารตั้งต้นทางชีวภาพไปเป็นกระแสไฟฟ้าผ่านปฏิกิริยาแคทาลิติก (catalytic) ของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ได้แก่ ขั้วแอโนด (anode) และขั้วแคโทด (cathode) ประคบติดกับสารอิเล็กโทรไลต์ เมื่อทำการป้อนสารอินทรีย์ตั้งต้น เช่น กลูโคส เข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ สารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกจุลินทรีย์ที่อยู่รอบ ๆ ขั้วแอโนดย่อยสลายได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โปรตอน (H^+) และอิเล็กตรอน (e^-) ดังสมการที่ (1) โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านสารอิเล็กโทรไลต์ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดตามวงจรไฟฟ้า ด้านนอกไปยังขั้วแคโทดเพื่อรวมตัวกับโปรตอนและตัวรับอิเล็กตรอน เช่น ออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์คือน้ำ และเกิดกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (2) โดยความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดจะผลักดันให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอน (ขนินฐา หมูโสภิญ ,2554)



ปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แสดงดังสมการที่ 3



1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการผลิตเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพเบื้องต้น โดยนำของเสียที่ไร้ประโยชน์เพิ่มมูลค่า
2. เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการผลิตเซลล์ไฟฟ้าทางชีวภาพได้แก่ แหล่งคาร์บอน การให้ออกซิเจน
3. เพื่อศึกษารูปแบบภาชนะและแผ่นเมมเบรนที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงจุลินทรีย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น
4. เพื่อศึกษาระดับและความคงที่ของการเกิดกระแสไฟฟ้า จากจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพไร้อากาศและจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพมีอากาศ

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลเบื้องต้นในการผลิตเซลล์ไฟฟ้าจากจุลินทรีย์เชื้อเพลิง (MFCs) โดยใช้วัสดุคิบที่หาง่ายเป็นแหล่งคาร์บอนผลิตเซลล์เชื้อเพลิงจากจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพไร้อากาศและจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพมีอากาศได้
2. พัฒนาภาชนะและเมมเบรนที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตเซลล์ไฟฟ้า

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในกระบวนการผลิตเซลล์ไฟฟ้าทางชีวภาพเบื้องต้นจากจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพไร้อากาศและจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพมีอากาศ
2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของปริมาณกระแสไฟฟ้าและความคงที่ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพไร้อากาศและจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพมีอากาศ
3. สามารถผลิตพลังงานทดแทนซึ่งเป็นพลังงานสะอาด ช่วยลดมลภาวะทางอากาศ

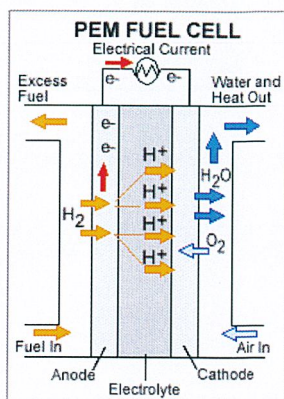
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cell)

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นปฏิกิริยาทางเคมี (Electrochemical) ซึ่งจะเปลี่ยนโมเลกุลของไฮโดรเจนกับออกซิเจนให้เป็นไฟฟ้ากับความร้อน มีหน้าที่คล้ายคลึงกับแบตเตอรี่ ซึ่งเมื่อเราใช้แบตเตอรี่จนหมดแล้วเราสามารถรีชาร์จหรืออัดไฟฟ้ากลับเข้าไปในขั้วของแบตเตอรี่ได้ เช่นเดียวกับในเซลล์เชื้อเพลิงซึ่งใช้แก๊สออกซิเจนกับไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง เมื่อแก๊สหมดเราสามารถเติมแก๊สกลับเข้าไปใหม่ได้

สารตั้งต้นที่ใช้โดยทั่วไปในเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจนที่ด้านแอโนดและแก๊สออกซิเจนที่ด้านแคโทด (เซลล์ไฮโดรเจน) เมื่อมีสารตั้งต้นไหลเข้าสู่ระบบ สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะไหลออกจากระบบไปด้วย ดังนั้นการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจึงดำเนินต่อไปตราบเท่าที่เราจะสามารถควบคุมการไหลได้ เซลล์เชื้อเพลิงจึงถูกมองว่าเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและปราศจากมลพิษเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอื่น ๆ เช่น มีเทนและแก๊สธรรมชาติซึ่งทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันที่เกิดจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง คือ น้ำ อย่างไรก็ตามยังมีความกังวลอยู่ในขั้นตอนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนซึ่งใช้พลังงานมาก เนื่องจากการผลิตไฮโดรเจนจำเป็นต้องใช้วัตถุดิบที่มีไฮโดรเจน เช่น น้ำหรือเชื้อเพลิงอื่นๆ นอกจากนั้นยังต้องใช้ไฟฟ้าซึ่งผลิตมาจากแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ ได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน หรือแม้แต่พลังงานนิวเคลียร์ ในขณะที่พลังงานทางเลือก เช่น ลมและพลังงานแสงอาทิตย์ก็สามารถใช้ได้แต่ราคาสูงมาก ดังนั้นจึงยังไม่อาจกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอิสระจากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ จนกว่าจะสามารถหาวิธีการผลิตไฮโดรเจนปริมาณมากด้วยพลังงานทดแทนหรือพลังงานนิวเคลียร์

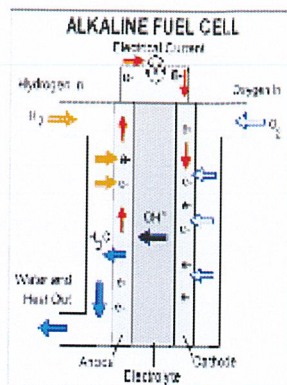


รูปที่ 2.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของ PEMFC

ที่มา : <http://www.sudeshnapaul.com/material.science/fuelcell.html>

2.3.1.2 Alkaline Fuel cell (AFC)

Alkaline Fuel Cell (AFC) คือ เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารละลายเบสของ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยหากใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส จะใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 85 % โดยน้ำหนัก แต่ถ้าใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส จะใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 35 – 50 % โดยน้ำหนัก ตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถนำมาใช้กับขั้วแคโทดและแอโนดของ เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีได้หลากหลาย เช่น นิกเกิล (Ni) เงิน (Ag) ออกไซด์ของโลหะ (Metal oxides) และโลหะมีตระกูล (Nobel metal) ต่าง ๆ ข้อจำกัดของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจนที่นำมาใช้ต้องบริสุทธิ์ ไม่มีการปนเปื้อนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูงจึงไม่เหมาะที่จะลงทุนทำการผลิตในเชิงพาณิชย์ ซึ่งมีโครงสร้าง และหลักการทำงานดังรูปที่ 2.2 (กำชัย, 2549)



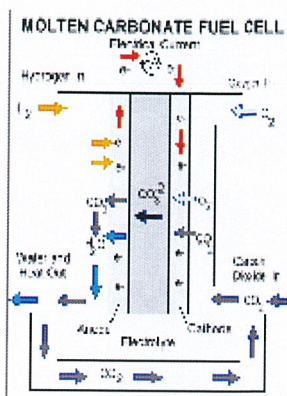
รูปที่ 2.2 โครงสร้างและหลักการทำงานของ AFC

ที่มา : <http://energypowersolutions.net/PEMCellsoftheFuture.aspx>

2.3.1.3 Moten - Carbonate Fuel Cell (MCFC)

Moten - Carbonate Fuel Cell (MCFC) คือ เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารพวกคาร์บอเนตของโลหะหมู่หนึ่งเป็นอิเล็กโทรไลต์ ภายในเซรามิกเมตริก (Ceramic matrix) ของลิเทียมอลูมินेट (LiAlO_2) เช่น สารผสมของลิเทียมคาร์บอเนต (Li_2CO_3) กับโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) และโปแตสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) เป็นต้น เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ทำงานที่อุณหภูมิสูง ($600 - 700^\circ\text{C}$) เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำของไอออนคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) จากขั้วแคโทดไปแอโนด และเนื่องจากอุณหภูมิในการดำเนินงานที่สูงมากจึงไม่มีความเหมาะสมที่จะนำตัวเร่งปฏิกิริยามาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้

ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ คือ มีประสิทธิภาพสูง มีช่วงของอุณหภูมิในการทำงานต่ำกว่าของ SOFC ทำให้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ MCFC ไม่จำเป็นต้องใช้วัสดุที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ทำให้การออกแบบมีราคาต้นทุนของวัสดุต่ำกว่า ส่วนข้อเสีย คือ เกิดการสึกกร่อนและเสื่อมสภาพขององค์ประกอบของเซลล์ เนื่องจากอุณหภูมิในการดำเนินงานที่สูง มีโครงสร้างและหลักการทำงานดังรูปที่ 2.3 (กำชัย, 2549)



รูปที่ 2.3 โครงสร้างและหลักการทำงานของ MCFC

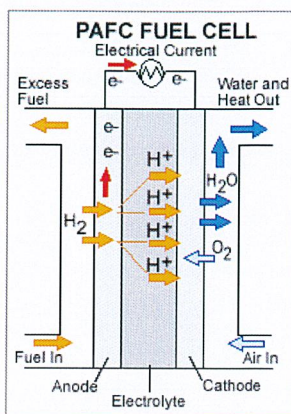
ที่มา : <http://www.sudeshnapaul.com/material.science/fuelcell.html>

2.3.1.4 Phosphoric - Acid Fuel Cell (PAFC)

Phosphoric - Acid Fuel Cell (PAFC) คือ เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้

กรดฟอสฟอริกเป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยมีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งที่ขั้วแคโทดและแอโนด โดยทั่วไปอุณหภูมิในการดำเนินงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะอยู่ระหว่าง 150 - 220 องศาเซลเซียส ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในระบบตัวต้นกำเนิดไฟฟ้าชนิดติดตั้งอยู่กับที่ขนาดเล็กๆ มีช่วงของอุณหภูมิการทำงานอยู่ในช่วงที่สูงกว่าแบบ PEMFC แต่เทคโนโลยีอุปกรณ์ PAFC จะใช้เวลาในการอุ่นเครื่องนานกว่า ทำให้ไม่ค่อยเหมาะสมสำหรับในรถยนต์ส่วนบุคคล

ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ คือ สามารถใช้ไฮโดรเจนที่มีสารปนเปื้อนเป็นเชื้อเพลิงได้ ส่วนข้อเสียคือ เซลล์เชื้อเพลิงมีขนาดใหญ่และให้กระแสไฟฟ้าน้อย มีโครงสร้างและหลักการทำงานดังรูปที่ 2.4 (กำชัย, 2549)



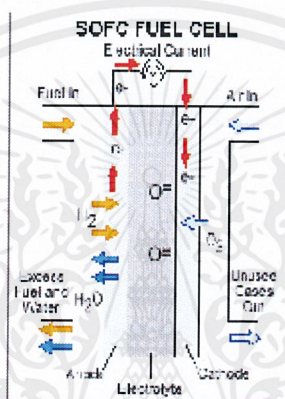
รูปที่ 2.4 โครงสร้างและหลักการทำงานของ MCFC

ที่มา : <http://www.sudeshnapaul.com/material.science/fuelcell.html>

2.3.1.5 Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) คือ เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ออกไซด์ของโลหะของแข็งเป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยทั่วไปจะใช้สารประกอบของเซอร์โคเนียม (เช่น ZrO_2) อุณหภูมิการทำงาน of เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้มีค่าสูงมาก (900 – 1000 องศาเซลเซียส) เพื่อให้เกิดการเหนี่ยวนำไอออนของออกซิเจนจากขั้วแคโทดสู่อโนด (กำชัย, 2549) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้เป็นอุปกรณ์ต้นกำลังให้แก่อุปกรณ์กำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ หรือใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในเมืองที่มีขนาดใหญ่ เทคโนโลยีอุปกรณ์ SOFC มีความเสถียรสูงมากเมื่อใช้ทำงานในลักษณะที่มีความต่อเนื่อง โดยพบว่าเทคโนโลยีอุปกรณ์ SOFC มีอายุการใช้งานที่ยาวนานกว่าเซลล์ไฟฟ้าชนิดอื่น ๆ ที่มีการเปรียบเทียบกันภายใต้เงื่อนไขของการทำงานอย่างเดียวกัน และช่วงของอุณหภูมิการทำงานที่สูงมาก ๆ นั้น มีประโยชน์อย่างมาก เพราะไอน้ำที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้ยังสามารถนำไปเป็นต้นกำลังในการหมุนใบพัดช่วยทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอีกทางหนึ่ง กระบวนการนี้มีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า การสร้างความร้อนร่วมกับพลังงาน (Co - generation of Heat and Power, CHP)

ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ คือ มีประสิทธิภาพสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาราคาถูก ส่วนข้อเสีย คือ อาจเกิดปัญหาขึ้นได้กับชั้นส่วนอุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าหรือพบว่าเกิดการแตกหักขึ้นได้ เนื่องจากมีการทำงานแบบหมุนกลับไปกลับมาซ้ำ ๆ ในช่วงของอุณหภูมิการทำงานสูง ๆ (เกรียงไกร, 2551) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ให้สามารถดำเนินงานได้ที่อุณหภูมิต่ำลงเพียง 600 องศาเซลเซียส (Oney และคณะ, 1994) มีโครงสร้างและหลักการทำงานดังรูปที่ 2.5 (กำชัย, 2549)



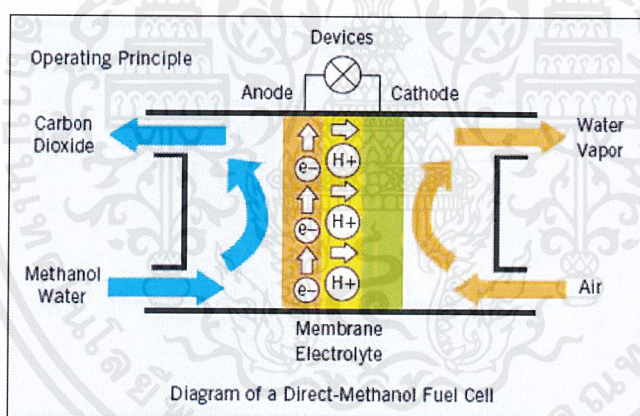
รูปที่ 2.5 โครงสร้างและหลักการทำงานของ SOFC

ที่มา : <http://www.sudeshnapaul.com/material.science/fuelcell.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.6 Direct - Methanol Fuel Cell (DMFC)

Direct - Methanol Fuel Cell (DMFC) หรือ เซลล์เชื้อเพลิงแบบป้อนสารเมทานอลโดยตรง (Direct Methanol) เป็นเซลล์ที่เพิ่งถูกพัฒนาขึ้นมาจากแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าจากเมทานอลได้โดยไม่ต้องผ่านสารเข้าระบบรีฟอร์มเมอร์ ซึ่งแตกต่างจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นที่จะทำงานโดยการป้อนไฮโดรเจนเข้าระบบโดยตรง เซลล์ชนิดนี้ทำงานที่สภาวะอุณหภูมิค่อนข้างต่ำจึงเหมาะสมที่จะพัฒนาให้เป็นแหล่งพลังงานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา เช่น คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ โทรศัพท์มือถือ หรือนำมาใช้กับรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าแบบเดิมเมทานอลด้วย เมื่อเปรียบเทียบ DMFC กับเทคโนโลยีอุปกรณ์ PEMFC แล้ว พบว่ามีประสิทธิภาพน้อยกว่าจึงทำให้เทคโนโลยีอุปกรณ์ DMFC ต้องมีการออกแบบโดยการใช้แพลทินัมเป็นจำนวนมากในการกระตุ้นระบบ ทำให้มีราคาต้นทุนในการออกแบบสูงมาก มีโครงสร้าง และหลักการทำงานดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างและหลักการทำงานของ DMFC

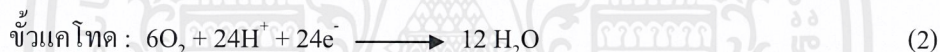
ที่มา : <http://preview.powerelectronics.com/images/Military-Operations-fig-3.jpg>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

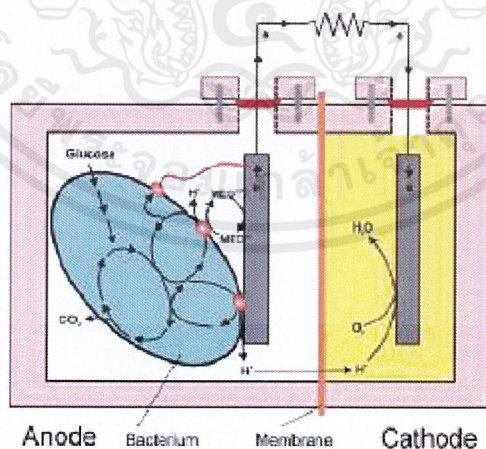
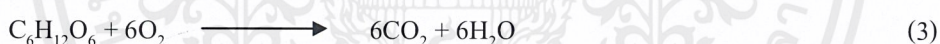
2.3.2 เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพ (microbial fuel cell)

2.3.2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพ

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ คือ เครื่องมือที่เปลี่ยนพลังงานทางเคมีที่มีอยู่ในสารตั้งต้นทางชีวภาพไปเป็นกระแสไฟฟ้าผ่านปฏิกิริยาแคทอลิก (Catalytic) ของจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ได้แก่ ขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) ประกอบติดกับสารอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เมื่อทำการป้อนสารอินทรีย์ตั้งต้น เช่น กลูโคส เข้าไปในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ สารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกจุลินทรีย์ที่ย่อยรอบ ๆ ขั้วแอโนดย่อยสลายได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โปรตอน (H^+) และอิเล็กตรอน (e^-) ดังสมการที่ (1) โดยโปรตอนเคลื่อนที่ผ่านสารอิเล็กโทรไลต์ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดตามวงจรไฟฟ้าด้านนอกไปยังขั้วแคโทดเพื่อรวมตัวกับโปรตอนและตัวรับอิเล็กตรอน เช่น ออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์ คือ น้ำ และเกิดกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (2) โดยที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดจะผลักดันให้เกิดการไหลของอิเล็กตรอน



ปฏิกิริยารวมที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์มีดังนี้



รูปที่ 2.7 องค์ประกอบพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

ที่มา : http://www.en.kku.ac.th/mis/administrator/doc_upload/20110311003252.pdf

2.2 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (Electrode) 2 ขั้วประกบติดกับสารอิเล็กโทรไลต์ การผลิตกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นโดยการผ่านแก๊สไฮโดรเจนเข้าที่ขั้วลบ (แอโนด) และผ่านแก๊สออกซิเจนเข้าที่ขั้วบวก (แคโทด) ไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาโลหะบนขั้วไฟฟ้าเกิดการแตกตัวเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะนำไปใช้เป็นพลังงานสำหรับอุปกรณ์ต่าง ๆ ส่วนโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านสารอิเล็กโทรไลต์ไปที่ขั้วแคโทดเพื่อรวมตัวกับออกซิเจนและอิเล็กตรอนกลายเป็นโมเลกุลน้ำ (H_2O) ออกมา ในเซลล์เชื้อเพลิงบางชนิด ออกซิเจนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดและเคลื่อนที่ผ่านทางอิเล็กโทรไลต์ซึ่งใช้ออกซิเจนไอออนเป็นตัวเคลื่อนที่ (Charge carrier) ในอิเล็กโทรไลต์บางชนิดอาจใช้ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เป็นตัวเคลื่อนที่ก็ได้

2.3 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง

2.3.1 เซลล์เชื้อเพลิงทางเคมี (Chemical fuel cell)

ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงทางเคมี แบ่งออกเป็น 6 ประเภท ดังนี้

2.3.1.1 Polymer Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Polymer Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) คือ เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้เมมเบรนจำพวกโพลีเมอร์ (Polymer Membrane) ที่ให้โปรตอนเคลื่อนผ่านได้ในอิเล็กโทรไลต์ เช่น Perfluorosulfonated Acid Polymer เป็นต้น ตัวเร่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่นำมาใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ แพลทินัม หากแก๊สไฮโดรเจนที่ป้อนเข้ามามีแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เจือปน โลหะผสมของแพลทินัมกับรูทีเนียม (Pt/Ru) จะถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทน โดยทั่วไป เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้จะทำงานอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 60 - 80 องศาเซลเซียส หรือ 140 - 160 องศาฟาเรนไฮต์ ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับรถยนต์ส่วนบุคคล และใช้ในครัวเรือน

ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้คือ ใช้อุณหภูมิต่ำทำให้เซลล์ไฟฟ้าใช้เวลาน้อยในการอุ่นเครื่องเพื่อเริ่มให้กระแสไฟฟ้า ไม่มีปัญหาการสึกกร่อนของอิเล็กโทรไลต์ แต่มีข้อเสียคือ ไวต่อสารปนเปื้อน (Impurity) โครงสร้างและหลักการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.1

(กำชัย, 2549)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2.2 องค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพ

เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพ (Microbial Fuel Cell, MFC) โดยทั่วไปจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนแอโนด (Anode compartment) และส่วนแคโทด (Cathode compartment) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยทั้งสองส่วนจะถูกแยกออกจากกันด้วยเยื่อเลือกผ่านโปรตอน (Proton Exchange Membrane, PEM) ซึ่งส่วนประกอบพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบ่งออกได้ดังนี้

2.3.2.2.1 ส่วนแอโนด (Anode compartment) เป็นส่วนที่สำคัญในการเกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือกระบวนการเมตาบอลิซึม (Metabolism) ของเชื้อจุลินทรีย์ กระบวนการนี้เกิดขึ้นในระดับเซลล์ ทำให้เกิดโปรตอน (H^+) และอิเล็กตรอน (e^-) ขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ ซึ่งของส่วนแอโนดประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

ก. เชื้อจุลินทรีย์ (Microbial)

การใช้เทคโนโลยีเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเก็บพลังงานในพันธะเคมีของสารประกอบอินทรีย์สำหรับสร้างพลังงานไฟฟ้า โดยทำปฏิกิริยาเพื่อย่อยสลายสารอาหาร (Substrate) ด้วยจุลินทรีย์หรือเชื้อแบคทีเรียที่ถูกนำมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้ประสบผลสำเร็จ จากการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือการบำบัดน้ำเสีย มีเชื้อจุลินทรีย์หลากหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ให้เกิดประโยชน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่มที่สามารถย่อยสลายสารประกอบมีเทนและสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ โดยเชื้อจุลินทรีย์เหล่านี้จะทำการสลายสารประกอบอินทรีย์ที่มีมีเทนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบเพื่อสร้างพลังงานจากกระบวนการหมัก และในขณะเดียวกันก็สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าไปพร้อมกันด้วย การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพสามารถสร้างพลังงานขึ้นได้โดยปราศจากคาร์บอนไดออกไซด์

เชื้อจุลินทรีย์หลายชนิดที่มีความสามารถในการขนถ่ายอิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในส่วนแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ สารตั้งต้นจะถูกออกซิไดซ์ได้ผลผลิตเป็นอิเล็กตรอน โปรตอน และได้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการ เชื้อจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ที่ใช้ในส่วนแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ส่วนใหญ่พบว่าเป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถออกซิไดซ์กลูโคสได้ ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มนี้ ได้แก่ *E. coli*, *Proteus vulgaris*, *Bacillus subtilis*, *Lacobacillus platarum*, *Streptococcus lactise*, *Erwinia disssolven* และ *Chlostridium butyricum* อย่างไรก็ตามเชื้อจุลินทรีย์ที่น่าสนใจที่สุด คือ *Klebsiella pneumoria* ซึ่งเป็นแบคทีเรีย

แกรมลบ (Gram negative) ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ แต่สามารถใช้สารอาหารในการย่อยได้ หลากหลายชนิดซึ่งรวมถึงกลูโคสและยังสามารถผลิตความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าได้สูงด้วย

ส่วนชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถขนถ่ายอิเล็กตรอนด้วยตนเองได้ (Electrochemically active metal - reducing bacterium) โดยใช้สารประกอบที่เป็นเมตาบอลิต์ของเชื้อจุลินทรีย์ซึ่งจะใช้เป็นสื่อนำไฟฟ้า ได้แก่ Humics acid Anthraquinone Oxyanions ที่มีความสามารถในการขนถ่ายอิเล็กตรอนจากภายในเซลล์ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ เชื้อจุลินทรีย์ไปยังส่วนแอนโนด ซึ่งเชื้อเพลิงจุลินทรีย์กลุ่มนี้จะทำงานได้เสถียร สร้างผลผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และได้ปริมาณสูง ได้แก่ แบคทีเรียสายพันธุ์ *Shewanella putrefaciens*, *Aeromonas hydrophila*, *Geobacteraceae sulfurreducens*, *Geobacter metallireducens* และ *Rhodoferrax ferrireducens* ซึ่งเป็นเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถกระตุ้นให้เกิดไฟฟ้าเคมีได้ เนื่องจากที่ผิวของเชื้อจุลินทรีย์เหล่านี้จะมีไซโตโครม (Cytochrome) อยู่ที่ผนังเซลล์เชื้อจุลินทรีย์ชั้นนอกเป็นจำนวนมาก ซึ่งไซโตโครมช่วยให้เกิดการขนถ่ายอิเล็กตรอนจากเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ไปที่ขั้วแอนโนดได้โดยไม่ต้องมีการเติมเมดิเอเตอร์เพื่อช่วยในการขนส่งอิเล็กตรอน

ข. อาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ (Substrate Medium)

อาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์มีบทบาทสำคัญ โดยเป็นแหล่งพลังงานในการเจริญเติบโตและดำรงชีวิตของเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการสลายสารหรือกระบวนการเมตาบอลิซึม สารอาหารเหล่านี้ ได้แก่ กลูโคส ซูโครส ไซโลส อะซิเตท บิวทิเรต เป็นต้น ซึ่งอาหารแต่ละชนิดจะมีความจำเพาะกับเชื้อจุลินทรีย์แต่ละชนิด โดยส่วนใหญ่การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพมักใช้กลูโคสเป็นแหล่งพลังงานในกระบวนการย่อยสลายอาหาร เนื่องจากกลูโคสมีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ทำให้ประสิทธิภาพและปริมาณความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง ง่าย และมีความทนทาน การศึกษาคุณสมบัติของเชื้อจุลินทรีย์นั้นจะศึกษาจากตัวอย่างของจริงจากธรรมชาติแต่เพียงอย่างเดียวนั้นว่ายังไม่เพียงพอ จึงจำเป็นต้องนำเชื้อจุลินทรีย์มาเลี้ยงและเพิ่มจำนวนในอาหารเลี้ยงเชื้อให้มีปริมาณเพียงพอที่จะใช้ในการศึกษาเพื่อสังเกตลักษณะต่าง ๆ ที่เพิ่มมากขึ้น

ค. เมดิเอเตอร์ (Mediator, MED)

การศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะมีการใช้เมดิเอเตอร์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขนถ่ายอิเล็กตรอนจากภายในเซลล์ของเชื้อเพลิงจุลินทรีย์ไปยังขั้วแอโนด โดยที่เมดิเอเตอร์จะเป็นตัวเร่งให้เกิดการขนถ่ายอิเล็กตรอนได้เร็วขึ้น ซึ่งเมดิเอเตอร์จะถูกออกซิไดซ์เพื่อให้ง่ายต่อการรีดิวซ์อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นภายในเยื่อหุ้มเมมเบรน (Cell membrane) จากนั้นเมดิเอเตอร์จะเคลื่อนที่ข้ามผ่านเยื่อหุ้มเมมเบรนและปลดปล่อยอิเล็กตรอนไปยังส่วนแอโนด หลังจากนั้นจะถูกออกซิไดซ์อีกครั้งในสารละลายที่อยู่ในส่วนแอโนด การเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction) ของวัสดุที่เป็นส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ก็เป็นสิ่งสำคัญมากที่ต้องนำมาเปรียบเทียบการลดประสิทธิภาพการรีดิวซ์อิเล็กตรอนลงของเมดิเอเตอร์ โดยการเปรียบเทียบปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox) จะเกิดปฏิกิริยาต่ำสุดในส่วนแอโนดและสูงสุดในส่วนแคโทด ซึ่งนำไฟฟ้าที่มีค่า E_0 สูงกว่าจะทำให้กำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าตัวนำไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ต่ำสุด วัฏจักรนี้แสดงให้เห็นว่า MED จะช่วยเร่งการถ่ายอิเล็กตรอนและการเพิ่มกระแสไฟฟ้าให้มากขึ้น เนื่องจากผนังเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ส่วนใหญ่จะไม่ใช่สื่อนำไฟฟ้า (Non-conductive nature) จึงทำให้อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในโซ่ขนถ่ายอิเล็กตรอน (Electron transport chain) ไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านชั้นเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ไปยังขั้วแอโนดได้ การศึกษาเมดิเอเตอร์กับระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์จึงมีความสำคัญอย่างมาก แต่การเลือกใช้เมดิเอเตอร์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ แม้จะมีข้อดีในการเพิ่มประสิทธิภาพการขนถ่ายอิเล็กตรอนจากภายในเซลล์จุลินทรีย์ไปยังขั้วแอโนด แต่ข้อเสียของเมดิเอเตอร์ คือ การเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว

ง. ขั้วแอโนด (Anode)

ขั้วแอโนดทำหน้าที่ในการรีดิวซ์อิเล็กตรอนจากกระบวนการขนถ่ายอิเล็กตรอนของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ ขั้วแอโนดมีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งต้องมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี มีค่าความต้านทานต่ำ มีความทนทานสูง ไม่ทำปฏิกิริยาต่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เป็นต้น วัสดุอุปกรณ์ที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นขั้วแอโนด ได้แก่ Graphite, Graphite felt, Carbon paper, Carbon – cloth, Pt, Pt black, Activated carbon เป็นต้น ขั้วแอโนดที่สร้างจากแกรไฟต์ในรูปแบบที่แตกต่างกัน เช่น plate paper felt และ foam วัสดุเหล่านี้จะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก สามารถผลิตความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่า เนื่องจากพื้นผิวที่มีความซับซ้อน สำหรับการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์แสดงให้เห็นถึง การผลิตความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กันอย่างยิ่งกับ

พื้นผิวของขั้วแอโนด พื้นผิวของขั้วแอโนดจะมีผลต่อการผลิตกำลังไฟฟ้า โดยขั้วแอโนดที่มีขนาดใหญ่กว่าจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าต่อพื้นผิวขั้วแอโนดได้สูงกว่าขั้วแอโนดที่มีขนาดเล็กกว่า เนื่องจากพื้นที่ของขั้วแอโนดขนาดใหญ่จะสามารถทำปฏิกิริยาได้มากกว่าและมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอิเล็กตรอนได้มากกว่า

2.3.2.2.2 ส่วนแคโทด (Cathode compartment) ส่วนแคโทด มีองค์ประกอบโดยทั่วไปดังต่อไปนี้

ก. ขั้วแคโทด (Cathode)

พื้นผิวของขั้วแคโทดจะมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยกับพื้นที่ผิวแอโนด ซึ่งขนาดของขั้วแคโทดมีผลต่อความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ เนื่องจากพื้นที่ของขั้วแคโทดที่มีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่สัมผัสกับสารละลายแคโทไลต์ได้มากกว่า ทำให้เกิดการรีดิวซ์อิเล็กตรอนโปรตอนได้มากขึ้นส่งผลให้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งอัตราการเพิ่มการรีดิวซ์ของสารละลายแคโทไลต์ ยังสามารถทำได้โดยการพัฒนาประสิทธิภาพของขั้วแคโทด จากการพัฒนาวัสดุที่นำมาทำเป็นขั้วแคโทด โดยการเคลือบสารที่สามารถทำให้เกิดการรีดิวซ์ของสารละลายแคโทไลต์มากขึ้นบริเวณพื้นที่ผิวขั้วแคโทด เช่น แพลทินัม (Platinum) การเลือกแพลทินัมเป็นตัวกระตุ้นขั้วแคโทดสำคัญอย่างมากต่อการผลิตความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่สูงขึ้น

ข. สารละลายแคโทไลต์

อิเล็กตรอนและโปรตอนที่เกิดขึ้นในส่วนแอโนดจะถูกส่งมายังส่วนแคโทด โปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านโปรตอน (PEM) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปตามวงจรไฟฟ้าภายนอก (External circuit) ไปยังส่วนแคโทดเพื่อถูกรีดิวซ์ด้วยสารละลายแคโทไลต์ ซึ่งสารแคโทไลต์ที่ใช้ เช่น Potassium ferricyanide หรืออาจเลือกใช้จุลินทรีย์สายพันธุ์ *Thiobacillus ferrooxidans* เป็นตัวรีดิวซ์อิเล็กตรอน และเพื่อให้อัตราประสิทธิภาพการรีดิวซ์อิเล็กตรอนเกิดเร็วขึ้นจะมีการเติมออกซิเจน ซึ่งลักษณะออกซิเจนที่เติมจะเป็นฟองอากาศป้อนเข้าไปในส่วนของแคโทด เพื่อรีดิวซ์โปรตอน (H^+) ที่เคลื่อนที่ผ่านเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEM) ทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายในส่วนแคโทดนี้เป็นน้ำ

ค. เยื่อเลือกผ่านโปรตอน (Proton exchange membrane , PEM)

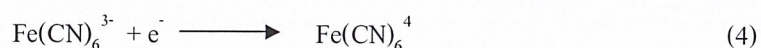
สำหรับเยื่อเลือกผ่านโปรตอน (PEM) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงแบบห้องคู่ (TCMFC) ทำหน้าที่ในการแยกโปรตอนออกจากอิเล็กตรอน ซึ่งเยื่อเลือกผ่านโปรตอนที่นิยมใช้โดยทั่วไปมีหลายชนิด เช่น Cation Exchange Membrane (CEM) Proton exchange membrane (PEM) และสะพานเกลือ (Salt bridge) เป็นต้น

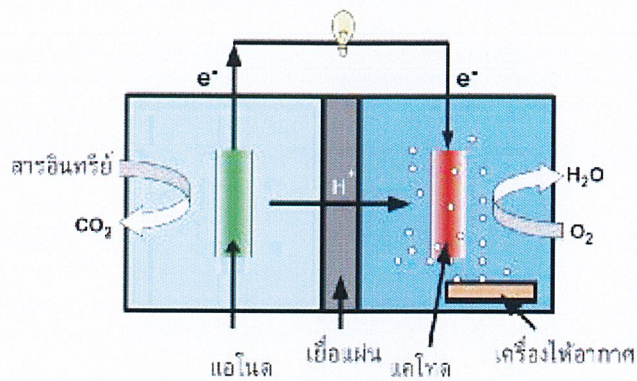
2.3.3 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพ (Type of Microbial Fuel Cell)

เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบ่งออกเป็น 2 ประเภท โดยใช้ลักษณะโครงสร้างเป็นเกณฑ์ดังต่อไปนี้

2.3.3.1 เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องคู่ (Two - Compartment Microbial Fuel Cell or Two - Chamber Microbial Fuel Cell, TCMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องคู่สามารถทำงานได้ทั้งแบบกะ (Batch) และแบบต่อเนื่อง (Continuous) และนิยมใช้ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ประกอบด้วยห้องแอโนดและห้องแคโทดที่กั้นกลางด้วยเยื่อเลือกผ่านโปรตอน (Proton Exchange Membrane) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 หรือในเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพบางชนิดอาจใช้สะพานเกลือ (Salt bridge) ที่ยอมให้โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านเป็นตัวเชื่อมระหว่างห้องแอโนดและห้องแคโทด โปรตอนจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านโปรตอนไปยังห้องแคโทดได้ แต่ออกซิเจนในห้องแคโทดไม่สามารถผ่านเยื่อเลือกผ่านโปรตอนนี้ไปยังห้องแอโนดได้ เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพบางชนิดจะใช้น้ำเป็นสารอิเล็กโทรไลต์ในห้องแคโทด หรือแคโทดไลต์ (Catholyte) โดยจะพ่นอากาศผ่านน้ำเพื่อให้ได้ออกซิเจนละลายในน้ำส่งไปที่ขั้วแคโทด วิธีนี้สิ้นเปลืองพลังงานและมีประสิทธิภาพต่ำ การใช้เฟอร์ริไซยาไนด์ (Ferricyanide) เป็นแคโทดไลต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ได้อย่างมาก แต่กระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ไม่ยั่งยืน เพราะเฟอร์ริไซยาไนด์ถูกใช้ในปฏิกิริยาในห้องแคโทด ดังสมการที่ 4 จึงจำเป็นต้องมีการเติมเฟอร์ริไซยาไนด์ในระหว่างการผลิตกระแสไฟฟ้า





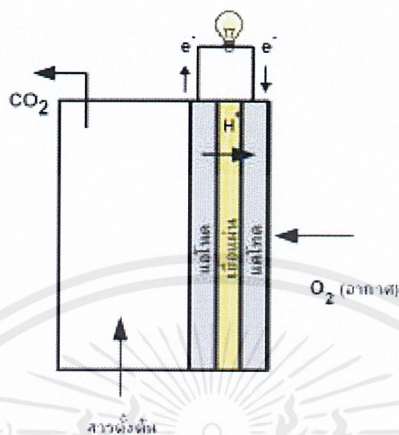
รูปที่ 2.8 เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องคู่

ที่มา : http://www.ubu.ac.th/~research/UBUJournal/DB_Journal/fileupload/13103.pdf

2.3.3.2 เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องเดี่ยว (Single - Compartment Microbial Fuel Cell หรือ Single - Chamber Microbial Fuel Cell, SCMFC)

เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องคู่มีความซับซ้อนในการออกแบบเพื่อขยายขนาด นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องคู่ยังไม่เหมาะที่จะใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสีย เนื่องจากความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าต่ำเมื่อใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน หรือจำเป็นต้องเติมสารแคโทโรไลต์ เช่น เพอร์ริโซยานินด์ จึงมีการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องเดี่ยวมาใช้งาน ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องเดี่ยวสามารถออกแบบได้ง่าย และประหยัดกว่าเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องคู่ เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องเดี่ยวโดยทั่วไปจะประกอบด้วยห้องแอโนดและในส่วนห้องแคโทดจะไม่มีการใช้ให้อากาศ เนื่องจากขั้วแคโทดสัมผัสกับอากาศโดยตรง โปรตอนจะถูกส่งถ่ายจากสารละลายอิเล็กโตรไลต์ในห้องแอโนดไปยังขั้วแคโทดซึ่งถูกติดตั้งไว้ที่ด้านบนของเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องเดี่ยว แสดงดังรูปที่ 2.3 โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องเดี่ยวนี้จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องคู่ เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ในการถ่ายโอนมวลของออกซิเจนในอากาศมีค่าสูงกว่าในน้ำ เยื่อเลือกผ่านโปรตอนในเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องเดี่ยวจะทำหน้าที่ป้องกันการแพร่ของออกซิเจนเข้าไปยังห้องแอโนด แต่เนื่องจากเยื่อเลือกผ่านโปรตอนนี้มีราคาแพง จึงพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยวไร้เยื่อเลือกผ่านโปรตอนขึ้นมา โดยการทำให้เกิดไบโอฟิล์มของแบคทีเรียพวกใช้อากาศบนพื้นผิวขั้วแคโทด ทำให้

สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากการลดความต้านทานภายใน เนื่องจากเชื้อเพลิงผ่านโปรตอน



รูปที่ 2.9 เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องเดี่ยว

ที่มา : http://www.ubu.ac.th/~research/UBUJournal/DB_Journal/fileupload/13103.pdf

2.4 ไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นธาตุเคมีที่ในตารางธาตุมีสัญลักษณ์ คือ H และมีเลขอะตอมเท่ากับ 1 ที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศมาตรฐาน ไฮโดรเจนเป็นแก๊สที่โมเลกุลมี 2 อะตอม ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ติดไฟง่าย เป็นอโลหะ มีพลังงานสะสมสูงถึง 120.7 กิโลจูลต่อกรัม และมีอิเล็กตรอนชั้นนอกสุด (เวเลนซ์อิเล็กตรอน) ตัวเดียว ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่เบาที่สุด และปรากฏในจักรวาลมากที่สุด มีอยู่ในโมเลกุลของน้ำ ในสารประกอบอินทรีย์ทุกตัว และสิ่งมีชีวิตทุกชนิด นอกจากนี้ธาตุนี้ยังใช้ในการผลิตแอมโมเนีย ใช้เป็นแก๊สสำหรับยก ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนและเป็นพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิง

ในปัจจุบันพลังงานไฮโดรเจนจัดเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่ได้ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด (Clean fuel) ไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อทำการเผาผลาญด้วยออกซิเจนจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและความร้อน เมื่อเผาไหม้ในบรรยากาศจะผลิตออกไซด์ของไฮโดรเจน ซึ่งก่อให้เกิดมลพิษน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานอื่น ๆ ปัจจุบันมีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยเทคนิคทางไฟฟ้าซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตสูงและเสี่ยงต่อการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเบิดของแก๊สไฮโดรเจน ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยทั่วโลกจึงหันมาสนใจศึกษาพลังงานไฮโดรเจนจากสิ่งมีชีวิตหรือที่เรียกว่าไบโอไฮโดรเจน (biohydrogen)

2.4.1 กระบวนการผลิตไฮโดรเจน

กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี

2.4.1.1 กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยใช้อุณหภูมิสูง (Thermo Process)

เป็นกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากแก๊สมีเทน (CH_4) หรือไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ซึ่งทำปฏิกิริยากับน้ำที่อยู่ในรูปไอน้ำ (H_2O) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง เรียกว่า กระบวนการ Steam reforming เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2)

ข้อเสียของกระบวนการดังกล่าวคือ ก่อให้เกิดมลพิษ เนื่องจากมีสารตกค้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เช่น แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ซัลเฟอร์ และโพลิอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น

2.4.1.2 กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยใช้ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process)

เป็นวิธีการใช้กระแสไฟฟ้าในกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ได้แก่ ใช้กระแสไฟฟ้าแยกโมเลกุลของน้ำโดยตรง โดยผ่านกระแสไฟฟ้าทางอิเล็กโทรดที่จุ่มอยู่ในน้ำที่เพิ่มคุณสมบัติการนำไฟฟ้าโดยการเติมสารอิเล็กโทรไลต์ เช่น กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงกว่า 2,500 องศาเซลเซียส จะได้แก๊สไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง และแก๊สออกซิเจน โดยไฮโดรเจนอะตอมจะเกาะที่อิเล็กโทรดฝั่งแคโทด อย่างไรก็ตามวิธีนี้ต้องการกระแสไฟฟ้าถึง 90 กิโลวัตต์ จึงจะผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ 1,000 ลูกบาศก์ฟุต

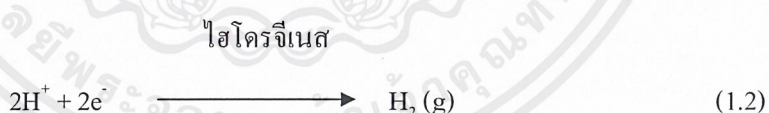
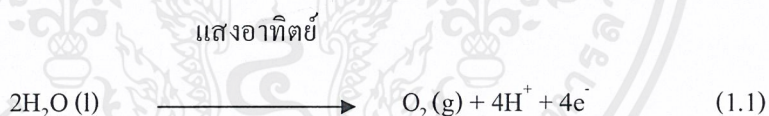
ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ต้องใช้กระแสไฟฟ้าจำนวนมากและมีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าในแต่ละขั้นตอนของการแยกสลายด้วยน้ำ และจะต้องใช้สภาวะอุณหภูมิที่สูงกว่า 2,500 องศาเซลเซียส เพื่อแยกโมเลกุลของน้ำให้ได้เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนอะตอม ทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการผลิตค่อนข้างสูง เนื่องจากต้องใช้พลังงานในการแยกแก๊สไฮโดรเจนจากน้ำมากกว่าพลังงานที่จะได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรเจน

2.4.1.3 กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีทางชีวภาพ (Biological Processes)

เป็นการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยใช้จุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์จะเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นแก๊สไฮโดรเจน แก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากวิธีการทางชีวภาพอาจเรียกว่า ไบโอไฮโดรเจน (Biohydrogen) การผลิตไบโอไฮโดรเจนเป็นวิธีที่กำลังได้รับความสนใจอย่างมากโดยสามารถแบ่งกระบวนการผลิตออกเป็น 5 วิธี (Levin และคณะ, 2004) ดังนี้

ก. วิธี Direct biophotolysis

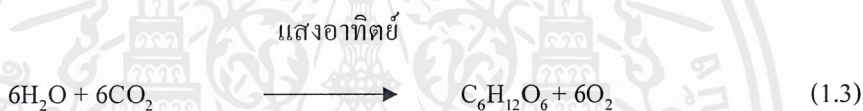
เป็นการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยใช้จุลสาหร่าย (Microalgae) ซึ่งจุลสาหร่ายประกอบด้วยสาหร่ายสีเขียวและไซยาโนแบคทีเรียที่มีการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่มีอยู่อย่างไม่จำกัดมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน และใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากอากาศเป็นแหล่งคาร์บอน จึงทำให้ช่วยลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจกในบรรยากาศ โดยจุลสาหร่ายจะสังเคราะห์เอนไซม์ไฮโดรจีเนส (Hydrogenase) ในขณะเดียวกันที่ระบบแสงที่ 1 (Photosystem I, PSI) และระบบแสงที่ 2 (Photosystem II, PSII) เมื่อมีแสงอาทิตย์ น้ำจะเกิดการแตกตัวเป็นโปรตอน อิเล็กตรอน และแก๊สออกซิเจน (ปฏิกิริยา 1.1) โดยอิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านจากเฟอร์รีดอกซิน (Ferredoxin, FD) (Ni และคณะ, 2006) เพื่อไปใช้ในการรีดิวซ์โปรตอนไปเป็นแก๊สไฮโดรเจนดังปฏิกิริยาที่ 1.2



ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่เกิดจากการสังเคราะห์แสงจะมีผลกระทบต่อการทำงานของเอนไซม์ไฮโดรจีเนส ดังนั้น จึงต้องรักษาปริมาณออกซิเจนให้น้อยกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ (Hallenbeck และ Benemann, 2002) อย่างไรก็ตาม แก๊สออกซิเจนยังเป็นแก๊สที่จำเป็นในกระบวนการหายใจของจุลินทรีย์จึงต้องมีแก๊สออกซิเจนในกระบวนการผลิตแก๊สด้วยวิธีนี้ ดังนั้น การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีนี้จึงมีประสิทธิภาพต่ำ

ข. วิธี Indirect biophotolysis

เป็นการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากไซยาโนแบคทีเรีย ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 เพาะเลี้ยงเซลล์ในสภาวะที่มีอากาศ ไซยาโนแบคทีเรียจะเกิดการสังเคราะห์แสงได้ออกซิเจน (ปฏิกิริยาที่ 1.3) เซลล์เจริญเติบโตและมีเซลล์เพิ่มขึ้น หลังจากนั้น ขั้นตอนที่ 2 นำเซลล์เข้าสู่สภาวะที่ไม่มีอากาศ ขั้นตอนนี้จะเป็นการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยกระบวนการหมักในสภาวะที่ไม่มีแสง ได้ไฮโดรเจน 4 โมลต่อโมลกลูโคส และกรดอะซิติก 2 โมลต่อโมลกลูโคส (ปฏิกิริยา 1.4) และกรดอะซิติก 2 โมลต่อโมลกลูโคสสามารถเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนได้อีก 8 โมล (ปฏิกิริยา 1.5) ปฏิกิริยารวมของการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจากกลูโคสแสดงดังปฏิกิริยาที่ 1.6 (Ni และคณะ, 2006) อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ยังอยู่ในขั้นวิจัยและพัฒนาในระดับห้องปฏิบัติการ (Yokoi และคณะ, 2002 ; Tanisho and Ishiwata, 1995)



ค. วิธี Biological water - gas shift reaction

เป็นการผลิตแก๊สออกซิเจนโดยใช้ Photoheterotrophic bacteria ที่สามารถเจริญได้ในที่มีแสง และใช้คาร์บอนมอนอกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ เพื่อสร้าง ATP ควบคู่กับการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ ไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน ดังปฏิกิริยา 1.7



Photoheterotrophic bacteria ที่สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีนี้ได้แก่ แบคทีเรียแกรมลบ เช่น *Rubrivax rubrum*, *R. gelatinosus* และ *Rhodospirillum rubrum* และ

แบคทีเรียแกรมบวก เช่น *Carboxydothemus hydrogenoformans* (Soboh และคณะ, 2002) อย่างไรก็ตาม การผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้ยังอยู่ในขั้นวิจัยและพัฒนาในระดับห้องปฏิบัติการ

ง. วิธี Photo - fermentation

เป็นการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม Photosynthetic bacteria ซึ่งมีการใช้ เอนไซม์ไนโตรจีเนส (Nitrogenase) ร่วมกับแสงอาทิตย์ในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ ได้แก่ กรดอะซิติก กรดแลคติก กรดบิวทีริก และชีวมวลให้กลายเป็นแก๊สไฮโดรเจนภายใต้สภาวะไม่ใช้อากาศโดยมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนผ่านเฟอร์รีดอกซินไปสู่เอนไซม์ไนโตรจีเนส นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยจำนวนมากที่นำจุลินทรีย์กลุ่มนี้มาผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยใช้ของเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมและการเกษตรเป็นแหล่งคาร์บอน (Kim และคณะ, 2004) อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มีข้อเสียคือ การใช้เอนไซม์ไนโตรจีเนสต้องการพลังงานสูง ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นแก๊สไฮโดรเจนต่ำ และต้องใช้พื้นที่ของถังหมักมากสำหรับการหมักในสภาวะมีแสงและไม่ใช้อากาศ

จ. วิธี Dark - fermentation

เป็นกระบวนการหมักของ Anaerobic bacteria และสำหรับบางชนิดที่ผลิตแก๊สไฮโดรเจนในสภาวะที่ไม่มีแสง ดังปฏิกิริยา 1.8 หรือปฏิกิริยา 1.9 ผลิตภัณฑ์ของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงจะแตกต่างจากกระบวนการหมักโดยใช้แสง คือ ได้แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนวิธีการหมักโดยใช้แสงจะได้แก๊สไฮโดรเจนอย่างเดียว



วิธีนี้ได้มีผู้สนใจศึกษาอย่างแพร่หลาย (Kumar and Das, 2000 ; Fan และคณะ, 2006 ; Ueno และคณะ, 1996) เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง ถังหมักใช้พื้นที่น้อย และการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศมีผลกระทบต่อวิธีนี้น้อยกว่าวิธีอื่น ๆ ทำให้มีความเป็นไปได้ที่จะผลิตในเชิงการค้า

2.5 จุลินทรีย์สำหรับผลิตไฟฟ้าทางชีวภาพ

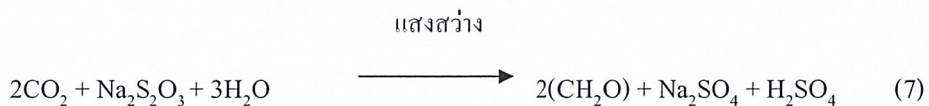
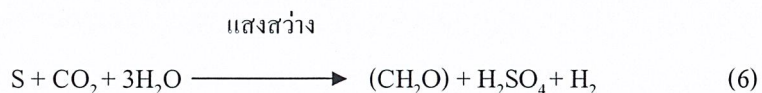
2.5.1 กลุ่มโฟโตโทรฟิยูคาริโอต (phototrophic eukaryote)

หรือพวกสาหร่ายสีเขียวที่มีความสามารถในการผลิตไฮโดรเจน ตัวอย่างเช่น *Chlamydomonas* sp. *Chlorella* sp. *Codium* sp. เป็นต้น กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนในสาหร่ายสีเขียวเกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งคล้ายกับในไซยาโนแบคทีเรีย ภายใต้สภาวะที่มีแสงจะมีการกระตุ้นให้มีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนในสาหร่ายสีเขียว แต่เมื่อความเข้มข้นแสงเพิ่มสูงขึ้น กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจะถูกยับยั้งด้วยออกซิเจนที่ได้มาจากการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthesis) โดยออกซิเจนจะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไฮโดรจีเนส การผลิตแก๊สไฮโดรเจนของสาหร่ายสีเขียวจะเกิดขึ้นเมื่อมีการปรับตัวภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งระยะเวลาในการปรับตัวนั้นแตกต่างกันไปตั้งแต่ 30 นาที ถึง 4 ชั่วโมง ในระหว่างที่มีการปรับตัวจะมีการกระตุ้นการสังเคราะห์เอนไซม์ไฮโดรจีเนส อิเล็กตรอนที่ได้มาจากการแตกตัวของน้ำในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงจะถูกส่งผ่านจากเฟอร์รีดอกซิน (Ferredoxin) เพื่อไปใช้ในการรีดิวซ์โปรตอนไปเป็นไฮโดรเจนโมเลกุลผ่านการทำงานของเอนไซม์ไฮโดรจีเนส

2.5.2 กลุ่มโฟโตโทรฟิโพรคาริโอต (phototrophic prokaryote)

2.5.2.1 แบคทีเรียที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงแบบไม่มีออกซิเจน (Anoxygenic photosynthetic bacteria) สามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มย่อยคือ

ก. แบคทีเรียสีม่วงที่ใช้ซัลเฟอร์ (Sulfur purple bacteria) ได้แก่วงศ์ Chromatiaceae และวงศ์ Thiorethodaceae ซึ่งเป็นแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วง พบว่าสามารถเจริญได้ดีในสภาพโฟโตออโตโทรฟ (Photoautotroph) ซึ่งสามารถใช้สารประกอบซัลเฟอร์ ซัลไฟด์ และไทโอซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเพื่อรีดิวซ์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นสารอาหารภายในเซลล์ได้ (Imhoff, 1992, VanNiel, 1944) แสดงสมการดังนี้ และแบคทีเรียสังเคราะห์แสงในวงศ์ Chromatiaceae จะสะสมกำมะถันไว้ในเซลล์ ตัวอย่างแบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ *Thiocystis* และ *Thiospirillum*



ข. แบคทีเรียสีม่วงที่ไม่ใช่ซัลเฟอร์ (Non - sulfur purple bacteria) ได้แก่ วงศ์ Rhodospirillaceae เซลล์มีรูปร่างกลม ท่อน และเกลียว เพิ่มจำนวนโดยการแตกหน่อหรือแบ่งตัว ส่วนใหญ่เคลื่อนที่ได้ จัดเป็นแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่สามารถใช้ซัลไฟด์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนเพื่อรีดิวซ์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ไปเป็นสารอาหารภายในเซลล์ได้ และมีการสังเคราะห์ (metabolism) ดีกว่าแบคทีเรียสีม่วงที่ใช้ซัลเฟอร์ เนื่องจากสามารถเจริญได้ทั้งแบบโฟโตเฮเทอโรโทรฟและโฟโตออโตโทรฟ โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ซึ่งส่วนใหญ่แบคทีเรียกลุ่มนี้จะทนต่อสภาพที่มีออกซิเจน จึงสามารถเจริญได้ภายใต้สภาวะแบบเฮเทอโรโทรฟที่มีอากาศ ไม่มีแสง มีแบคทีเรียโอฟิลล์ เอ และแคโรทีนอยด์ หลายชนิดในการสังเคราะห์แสง ทำให้ปัจจุบันแบคทีเรียสังเคราะห์แสงโดยเฉพาะอย่างยิ่งแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่ใช่ซัลเฟอร์ได้รับความสนใจในด้านการศึกษาและวิจัยอย่างกว้างขวาง มีการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพกันอย่างแพร่หลาย

แบคทีเรียกลุ่มนี้สามารถพบได้ทั่วไปตามแหล่งน้ำธรรมชาติในชั้นน้ำที่มีแสงสว่างส่องถึง มีสารอินทรีย์ และพบการรวมตัวกันเป็นกลุ่มในแหล่งน้ำที่ไม่มีออกซิเจน มีแสงเล็กน้อย ในแหล่งน้ำจืดที่มีซัลไฟด์อยู่จะพบน้อยมาก แต่บางชนิดก็อาศัยอยู่ได้ในที่มีปริมาณซัลไฟด์อยู่สูง (Imhoff, 1992) นอกจากนี้ยังพบได้ในพื้นดินสระน้ำ คลอง หรือแหล่งน้ำที่สกปรก เช่น บ่อบำบัดน้ำเสีย ซึ่งมีปริมาณสารอินทรีย์สูง จึงเป็นแหล่งที่แบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่มดังกล่าวเจริญได้ดี ตัวอย่างแบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ *Rhodospirillum* *Rhodocyclus* และ *Rhodopseudomonas*

ค. แบคทีเรียสีเขียวที่ใช้อัลเฟอร (Green sulfur bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้จะอยู่ในวงศ์ Chlorobiaceae ซึ่งเป็นแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีเขียว มีลักษณะเซลล์เป็นแบบเส้นสาย ไม่มีระบบอินตราไซโตพลาสติกเมมเบรน (Intracytoplasmic membrane system) มีโครงสร้างพิเศษ คือ คลอโรเวสิค (Chlorobium vesicle) หรือ คลอโรโซม (Chlorosome) จะพบอยู่ภายในไซโตพลาสติก หรือติดอยู่ที่ผิวของไซโตพลาสติกเมมเบรน คลอโรโซมมีขนาดใหญ่ ประกอบด้วย แบคทีเรียโอคโคลโรฟิลล์ ซี ดี และ อี มีโครงสร้างในการจับพลังงานแสง (Light-harvesting) ศูนย์กลางปฏิกิริยาของแบคทีเรียกลุ่มนี้จะพบอยู่ในไซโตพลาสติกเมมเบรน อยู่ติดกับ คลอโรโซม (Imhoff, 1992) และจะไม่สะสมกำมะถันไว้ในเซลล์

2.5.2.2 แบคทีเรียที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงแบบมีออกซิเจน (Oxygenic photosynthetic bacteria)

แบคทีเรียกลุ่มนี้ ได้แก่ ไชยาโนแบคทีเรียหรือแบคทีเรียสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green bacteria) ที่มีกระบวนการหายใจแบบใช้ออกซิเจน โดยมีกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ประกอบด้วยระบบแสง 2 ระบบ และมีคลอโรฟิลล์เอ (Chlorophyll a) เป็นรงควัตถุเหมือนในสาหร่ายสีเขียวและพืช โดยทั่วไปแล้ว ไชยาโนแบคทีเรียสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้เหมือนกับในสาหร่ายสีเขียว อีกทั้งยังสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนผ่านกระบวนการหมักพอลิแซ็กคาไรด์ที่สะสมได้จากกระบวนการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ ภายใต้สภาวะไม่มีแสงและไม่มีแก๊สออกซิเจน ได้ผลพลอยได้เป็นตัวรีดิวซ์ภายในเซลล์ (Reducing power) ซึ่งจะถูกรีดิวซ์ด้วยเอนไซม์ไฮโดรจีเนสเพื่อผลิตไฮโดรเจน นอกจากนี้ ไชยาโนแบคทีเรียชนิดที่สามารถตรึงไนโตรเจนได้ (Diazotrophic cyanobacteria) และยังสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการตรึงไนโตรเจน

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อผลิตไฮโดรเจนภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน

2.6.1 ความเป็นกรด – ด่าง (pH)

ความเป็นกรด – ด่าง เป็นปัจจัยที่สำคัญของกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจน มีรายงานว่าเชื้อแบคทีเรียมีความสามารถในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนในช่วงความเป็นกรด – ด่างที่กว้าง คือ ความเป็นกรด – ด่างอยู่ในช่วง 4 - 7 (Kumar and Das, 2000) อย่างไรก็ตาม ช่วงความเป็นกรด – ด่างที่เหมาะสมที่แบคทีเรียสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้สูงอยู่ในช่วง 5.5 - 6.7 (Van Ginkel และคณะ, 2001, Fang and Liu, 2000, Hawkes และคณะ, 2002, Lin and Lay, 2005) ซึ่งเชื้อแบคทีเรียแต่ละชนิดจะมีความเป็นกรด – ด่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วงต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 1 ปฏิกริยาการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจะเกิดกรดอินทรีย์เพิ่มมากขึ้น จึงจำเป็นต้องเติมบัฟเฟอร์ลงในอาหาร

2.6.2 อุณหภูมิ (Temperature)

การผลิตแก๊สไฮโดรเจนภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจน ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ในอาหารขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการควบคุมในการระบบ โดยทั่วไปแบคทีเรียที่สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนมี 2 กลุ่ม ได้แก่ แบคทีเรียที่เจริญได้ดีในช่วงอุณหภูมิปานกลาง (Mesophilic bacteria) ซึ่งทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 30 - 40 องศาเซลเซียส และแบคทีเรียกลุ่มที่เจริญได้ดีที่อุณหภูมิสูง (Thermophilic bacteria) ซึ่งจะทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 50 - 60 องศาเซลเซียส อัตราเร็วของปฏิกิริยาและประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน Mesophilic bacteria จะดีกว่า Thermophilic bacteria เนื่องจาก Thermophilic bacteria ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้น้อยกว่า Mesophilic bacteria ดังนั้น การควบคุมระบบจึงมีความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของระบบสูง และยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของระบบอีกด้วย ตัวอย่าง Mesophilic bacteria ที่ผลิตแก๊สไฮโดรเจนแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าความเป็นกรด – ด่าง และอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนของเชื้อแบคทีเรียชนิดต่างๆ

ชนิดของเชื้อ	ความเป็นกรด – ด่างเริ่มต้น	ความเป็นกรด – ด่างควบคุมที่เหมาะสม	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	เอกสารอ้างอิง
<i>C. butyricum</i> CGS5	-	5.5	37	Chen และคณะ, (2005)
<i>E. cloacae</i> IIT-BT 08	-	5.0-6.0	36	Kumar and Das, (2000)
<i>E.aerogenes</i> E.82005	-	6.0	36	Tanisho and Ishiwata , (1995)
<i>B. coagulans</i> IIT-BT S1	6.5	-	37	Kotay and Das , (2007)
<i>E. coli</i> BL-21	6.0	-	37	Chittibabu และคณะ, (2006)
<i>K. oxytoca</i> HP1	7.0	-	38	Minnan และคณะ, (2005)
<i>C. pasteurianum</i>	7.4-7.6	-	35	Zhang และคณะ, (2005)

2.6.3 ความเป็นด่าง (Alkalinity)

หมายถึง ความสามารถของน้ำในการรับอนุภาคโปรตอน (อยู่ในรูปมิลลิกรัมต่อลิตรของ CaCO_3) สภาพด่างในน้ำส่วนใหญ่มาจากไบคาร์บอเนต คาร์บอเนต และไฮดรอกไซด์ จำนวนอนุโมลเหล่านี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด - ด่าง ถ้าในระบบมีค่าความเป็นด่างสูงแสดงว่าระบบหมักสามารถรักษาสภาพความเป็นกรด - ด่าง (Buffer capacity) ให้คงอยู่ได้นานเมื่อปริมาณกรดเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากระบบมีค่าความเป็นด่างต่ำแสดงว่ามีการสะสมของกรดอินทรีย์ค่อนข้างสูง เนื่องจากภายในระบบจะเกิดความเป็นกรดได้ง่ายทำให้ระบบล้มเหลว

2.6.4 สารอาหาร (Nutrients)

ธาตุอาหารที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ มี 2 ชนิด คือ สารอาหารหลัก ได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส กำมะถัน และสารอาหารรอง ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม สังกะสี แมงกานีส ทองแดง โคบอลต์ เหล็ก นิกเกิล โดยแบคทีเรียต้องการ คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในการสังเคราะห์พลังงาน โปรตีน และกรดนิวคลีอิก ซึ่งปริมาณคาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัสที่จุลินทรีย์ต้องการนั้นต้องมีอัตราส่วน BOD : N : P

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 100 : 1.1 : 0.2 ดังนั้น ในการควบคุมสถานะให้เหมาะสมจึงต้องใส่อาหารให้เพียงพอแก่ความต้องการของจุลินทรีย์ ส่วนสารอาหารรอนั้นจุลินทรีย์ต้องการน้อยมาก

2.6.5 ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น

ปริมาณจุลินทรีย์เริ่มต้นมีผลต่ออัตราการผลิตแก๊สไฮโดรเจน กล่าวคือ ถ้ามีเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในการหมักน้อย จะต้องใช้เวลานานในการเกิดแก๊สไฮโดรเจน แต่ถ้ามีเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในการหมักมากเกินไป ก็จะทำให้จุลินทรีย์นำแหล่งคาร์บอนไปผลิตองค์ประกอบของเซลล์จุลินทรีย์มากกว่าผลิตแก๊สไฮโดรเจน จากการศึกษาพบว่า ปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสมคือ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตรของจุลินทรีย์ต่อปริมาตรอาหาร (Kotay and Das, 2007 Wang และคณะ, 2003)

2.6.6 กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid)

ในกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน จะมีแบคทีเรียอยู่ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วให้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย และกลุ่มที่ใช้กรดอินทรีย์เหล่านี้เป็นอาหารเกิดเป็นแก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยทั่วไปในกระบวนการหมักจะมีการสร้างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายมากกว่าใช้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย เกิดการสะสมกรดอินทรีย์ในช่วงแรก ค่าความเป็นด่างของระบบจะลดลงจนกระทั่งหมด ทำให้ความเป็นกรด - ด่างลดลง แต่ถ้ายังคงมีการสะสมกรดต่อไป ค่าความเป็นกรด - ด่างจะลดลงเรื่อยๆ จนทำให้ระบบล้นเหลวได้

2.6.7 สารพิษ (Toxic substances)

สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เกือบทุกชนิด ถ้ามีปริมาณมากเกินไปในการหมักก็จะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ได้ ตัวอย่างของสารพิษได้แก่

2.6.7.1 ประจุบวกของโลหะเบา

ประจุบวกของโลหะเบา ได้แก่ โซเดียม โพแทสเซียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์หรือการเติมสารเคมีเพื่อปรับความเป็นกรด - ด่างในระบบซึ่งจะมีพิษต่อจุลินทรีย์ โดยความเป็นพิษของสารเหล่านี้เป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปริมาณของประจุบวกว่ามีมากน้อยเพียงไร

ความเป็นพิษของประจุบวกแต่ละชนิดจะรุนแรงไม่เท่ากัน โดยความเป็นพิษของประจุบวกจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีวาเลนซ์เพิ่มขึ้น ประจุบวกที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 1 จะมีพิษต่อแบคทีเรียน้อยกว่าประจุบวกที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 2 นั่นคือ พิษของแคลเซียมและแมกนีเซียมจะมากกว่าพิษของโซเดียมและโพแทสเซียมถึง 10 เท่า (McCarty, 1964)

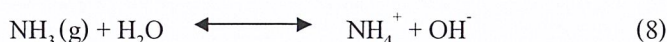
ความเป็นพิษของประจุบวกซึ่งมีพิษต่อแบคทีเรียมากกว่า 1 ชนิดสามารถลดลงได้ ในบางครั้งการทำปฏิกิริยากันแล้วความเป็นพิษลดลง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Antagonism ในทางตรงกันข้าม ความเป็นพิษของประจุบวกอาจเพิ่มความรุนแรงขึ้นเมื่อมีประจุบวกอีกชนิดเพิ่มขึ้น มา ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า Synergism ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ประจุบวกเพิ่มความเป็นพิษและประจุบวกลดความเป็นพิษ (EPA, 1979)

ประจุบวก	เพิ่มความเป็นพิษ	ลดความเป็นพิษ
แอมโมเนียมไนโตรเจน	แคลเซียม แมกนีเซียม โพแทสเซียม	โซเดียม
แคลเซียม	แอมโมเนียมไนโตรเจน แมกนีเซียม	โซเดียม โพแทสเซียม
แมกนีเซียม	แอมโมเนียมไนโตรเจน แมกนีเซียม	โซเดียม โพแทสเซียม
โพแทสเซียม	-	โซเดียม โพแทสเซียม
โซเดียม	แอมโมเนียมไนโตรเจน แมกนีเซียม แคลเซียม	โพแทสเซียม

2.6.7.2 แก๊สบางชนิด

1) แอมโมเนีย เป็นสารที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยไนโตรเจน ภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจน เช่น โปรตีนถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียมไนโตรเจน ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) หรือแก๊สแอมโมเนียม (NH_3) ดังปฏิกิริยา ซึ่งแอมโมเนียจะมีผลกระทบต่อแบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจนน้อยกว่าแบคทีเรียที่สร้างมีเทน (Methanogenic bacteria)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าความเป็นกรด - ด่างต่ำกว่า 7.2 จะมี NH_4^+ มากกว่า แต่ถ้าความเป็นกรด - ด่างสูงกว่า 7.2 จะมี NH_3 มากกว่า ซึ่ง NH_3 จะยับยั้งการทำงานและมีพิษต่อจุลินทรีย์มากกว่า NH_4^+ โดย NH_3 จะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วน NH_4^+ จะเป็นพิษเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 7,000 - 9,000 มิลลิกรัมต่อลิตร (EPA, 1978)

2) แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นสารที่เกิดจากการย่อยสลายซัลเฟตหรือการย่อยโปรตีนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำเท่านั้น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นพิษเพราะสามารถเข้าสู่เซลล์โดยจะมีความเป็นพิษที่มีความเข้มข้นมากกว่า 200 มิลลิกรัมต่อลิตร (EPA, 1987)

2.6.7.3 โลหะหนัก

โลหะหนักบางชนิดเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ซึ่งความเข้มข้นที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียดังแสดงในตารางที่ 3 ความเป็นพิษของไอออนโลหะหนักเหล่านี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายน้ำของเกลือของโลหะหนักและความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีอยู่ เพราะไฮโดรเจนซัลไฟด์จะรวมตัวกับโลหะหนักเกิดเป็นเกลือซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำและตกตะกอน ทำให้พิษของโลหะหนักลดลง การเติมเกลือซัลไฟด์หรือเกลือซัลเฟตลงไปในถังหมัก จะเป็นการเพิ่มไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้กับระบบได้ เนื่องจากเกลือซัลไฟด์หรือเกลือซัลเฟตจะถูกรีดิวซ์กลายเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ภายใต้สภาวะไม่มีออกซิเจนได้ (Hayes and Theis, 1978)

ตารางที่ 3 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในสภาวะการย่อยสลายแบบไม่มีออกซิเจน (Hayes and Theis, 1978)

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)		
	ยับยั้งการทำงาน	เป็นพิษ	หยุดการทำงาน
โครเมียม (Cr_3^+)	130	260	< 200
โครเมียม (Cr_6^+)	110	420	< 180
ทองแดง	40	70	< 50
นิกเกิล	10	30	> 30
แคดเมียม	-	> 20	> 10
ตะกั่ว	340	> 340	> 250
สังกะสี	400	600	< 1700

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ทฤษฎีไฟฟ้าเบื้องต้น

กฎของโอห์มเป็นกฎของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้า และความต้านทาน โดยวงจรไฟฟ้าใด ๆ ค่ากระแสและแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้า และจะแปรผกผันกับความต้านทาน ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.7.1 กระแสไฟฟ้าของโอห์ม

กระแสไฟฟ้าที่นำพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังส่วนที่ต้องการใช้ไฟฟ้ามักมีหน่วยเป็นแอมแปร์ (Ampere) โดยกระแสไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับแรงดันไฟฟ้าและจะแปรผกผันกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ดังสมการที่ 9

$$I = V / R \quad (9)$$

2.7.2 กฎแรงดันไฟฟ้าของโอห์ม

พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียไประหว่างจุด 2 จุด มีหน่วยเป็น โวลต์ (Voltage) ถ้าความต้านทานภายในเซลล์ไฟฟ้ามีค่าน้อยมากจนไม่มีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า ขณะที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่านเซลล์ไฟฟ้า ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ภายนอกของเซลล์ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและตกคร่อมอุปกรณ์ไฟฟ้าใด ๆ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้ากับความต้านทานของอุปกรณ์นั้น แรงดันไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับค่ากระแสไฟฟ้า และแปรผันตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ดังสมการที่ 10

$$V = IR \quad (10)$$

2.7.3 กฎความต้านทานของโอห์ม

สมบัติของตัวนำที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้มากหรือน้อยต่างกัน มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) ความต้านทาน 1 โอห์ม คือ ความต้านทานของตัวนำ เมื่อต่อปลายทั้งสองของตัวนำเข้ากับความต่างศักย์ 1 โวลต์ และมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำนั้น 1 แอมแปร์ ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวนำกับความต้านทานกับค่าของกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ 11

$$R = V / I \quad (11)$$

2.7.4 กำลังไฟฟ้าจากกฎของโอห์ม

กำลังไฟฟ้า หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานหรืออัตราการทำงานจากลักษณะหนึ่งไปสู่อีกลักษณะหนึ่ง หรือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปในเวลา 1 วินาที เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ P และมีหน่วยเป็นวัตต์ (W) หรือจูลต่อวินาที กำลังไฟฟ้าจากกฎของโอห์มเป็นผลคูณของแรงดันไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าดังสมการที่ 12

$$P = VI \quad (12)$$

2.8 ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD)

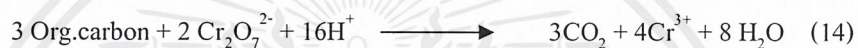
ซีโอดี หมายถึง ปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ต้องการ เพื่อใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยที่สารอินทรีย์เกือบทั้งหมด (95 - 100 %) จะถูกออกซิไดซ์โดยตัวเติมออกซิเจนอย่างแรง (Strong oxidizing agent) ภายใต้สภาวะที่เป็นกรด ดังสมการที่ 13



สมการการเกิดปฏิกิริยาของซีโอดี คล้ายกับบีโอดี (Biochemical Oxygen demand, BOD) คือสารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดซ์จนได้คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ แต่ต่างกันตรงที่บีโอดีนั้นใช้แบคทีเรียในการย่อยสลาย ส่วนซีโอดีใช้ตัวเติมออกซิเจน (Oxidizer) โดยปกติค่าซีโอดีจะสูงกว่าค่าบีโอดี ทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์คาร์บอนจะถูกออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการดูดซึมทางชีวะ (Biological assimilation) ของสารเหล่านั้น เช่น กลูโคส ลิกนิน เซลลูโลส โดยเฉพาะ ถ้าน้ำเสียนั้นมีสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถถูกออกซิไดซ์ทางชีวะปนอยู่ด้วย จะทำให้ค่าซีโอดีสูงกว่าค่าบีโอดีมาก ในกรณีที่น้ำเสียนั้นมีสารอินทรีย์บางพวก เช่น สารประกอบอะลิฟาติกที่ต่อกันเป็นสายยาวหรือต่อกันเป็นโซ่ตรง (Straight - chain aliphatic compound) อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic hydrocarbon) ไพริดีน (Pyridine) และบีเทน (Betaine) ปะปนอยู่ ซึ่งสารเหล่านี้จะไม่ถูกออกซิไดซ์ทางเคมี ค่าซีโอดีจะน้อยกว่าค่าบีโอดี ไอออนของสารอินทรีย์บางตัว เช่น ฮาโลเจน (F^- , Cl^- , Br^-), NO_2^- , S^{2-} และ Fe^{2+} มีผลทำให้ค่าซีโอดีมีค่ามากกว่าความเป็นจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเติมออกซิเจนอย่างแรงที่ใช้ในการหาค่าซีโอดีมีด้วยกันหลายตัว คือ โปแตสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) เฟอริกซัลเฟต (Ferric sulfate) โพแทสเซียมไอโอเดต (Potassium iodate) และโปแตสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate) การหาค่าซีโอดีโดยใช้โปแตสเซียมไดโครเมตเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากเพราะให้ผลที่น่าเชื่อถือและแน่นอน หลักการของวิธีนี้คือ สารอินทรีย์คาร์บอนจะถูกออกซิไดซ์ (Oxidized) โดยโปแตสเซียมไดโครเมตในสภาวะที่เป็นกรดอย่างรุนแรง ดังนั้นจึงใช้การรีฟลักซ์ (Reflux) เพื่อป้องกันการระเหยสูญหายของสารเคมี จากนั้นจึงไทเทรตหาปริมาณ โปแตสเซียมไดโครเมตที่เหลืออยู่ด้วย เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต (Ferrous ammonium sulfate) โดยใช้เฟอโรอิน (Ferroin) เป็นอินดิเคเตอร์ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นดังนี้



การรีฟลักซ์มี 2 วิธี คือ แบบเปิด (Open Reflux) และแบบปิด (Closed Reflux) ทั้งสองวิธีการมีหลักการเหมือนกัน ต่างกันตรงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ และแบบปิดสารอินทรีย์ที่ระเหยจะสามารถถูกออกซิไดซ์ได้มากกว่าระบบเปิด เพราะมีเวลาในการสัมผัสกับสารออกซิไดซ์ได้นานกว่า

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Bennetto และคณะ (1981) ได้ทำการศึกษาพัฒนาและสาธิตการปรับปรุงเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพโดยทำการคัดเลือกสายพันธุ์เชื้อจุลินทรีย์ในการผลิตอิเล็กตรอนและเมดิเอเตอร์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมดิเอเตอร์สามารถเพิ่มทั้งประสิทธิภาพของการขนถ่ายอิเล็กตรอน (Electron transfer) และอัตราการขนถ่ายอิเล็กตรอน (Electron rate) ให้สูงขึ้น

E.M. Siedlecka และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาหาวิธีในการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายจากตัวอย่างน้ำในธรรมชาติในช่วงความเข้มข้น 1 - 5,000 พีพีเอ็ม โดยวิธีการต่าง ๆ คือ การไทเทรต การวัดการดูดกลืนแสง และการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่าวิธีการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟี สามารถวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายที่มีความเข้มข้นน้อย ๆ ได้ โดยปริมาณที่วิเคราะห์ได้น้อยที่สุดคือ 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ค่าความเชื่อมั่น 92 เปอร์เซ็นต์ ส่วนวิธีการไทเทรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และการวัดการดูดกลืนแสงนั้น สามารถวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายที่มีความเข้มข้นน้อยที่สุดเท่ากับ 11 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 28 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ จึงสรุปว่าวิธีการวิเคราะห์ด้วยแก๊สโครมาโทกราฟีเป็นวิธีที่เหมาะสมในการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายที่มีความเข้มข้นต่ำได้

Sangeun Oh และคณะ (2004) พบว่าการเลือกข้าวแคโทดที่เหมาะสมนั้นจะสามารถเพิ่มปริมาณการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ จึงได้ทำการทดลองโดยใช้คาร์บอนอิเล็กโตรดที่เคลือบด้วยแพลทินัมเปรียบเทียบกับคาร์บอนอิเล็กโตรดที่ไม่ได้เคลือบแพลทินัม แล้วทำการทดลองการสว้างเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่ ปรากฏว่าการใช้ข้าวแคโทดที่เคลือบด้วยแพลทินัมให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าได้สูงที่สุดเท่ากับ 0.097 มิลลิวัตต์ ภายในเวลา 12 ชั่วโมงหลังจากการลงเชื้อในอาหารครั้งแรก (ประกอบด้วยน้ำเสีย และอะซิเตตความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์) และการผลิตกระแสไฟฟ้าเริ่มลงที่ทันทีที่ได้ทำการเปลี่ยนอาหาร (ไม่มีน้ำเสีย)



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 เชื้อจุลินทรีย์

1. เชื้อแบคทีเรียที่เจริญได้ในสภาพไร้อากาศได้มาจากบ่อดักไขมันของโรงอาหารสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. เชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมกำมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่ได้รับจากกลุ่มโครงการพิเศษ ปีการศึกษา 2553 เรื่อง “ การผลิตเซลล์ไฟฟ้าทางชีวภาพโดยการเลี้ยงเชื้อร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสังเคราะห์แสงและ “*Saccharomyces cerevisiae*”
3. เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae*

3.2 อุปกรณ์

1. กระจกพลาสติกแข็งขนาด 10,450 ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. ขวดโหลพลาสติกแข็งทรงกระบอกขนาด 3,770 ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. ก่อ่งพลาสติกแข็งสีเหลี่ยมขนาด 5,775 ลูกบาศก์เซนติเมตร
4. เมมเบรน (Membrane) ขนาด 10,000 ดาลตัน
5. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำจากแพลทินัม (Pt)
6. ลวดทองแดง (Copper wire)
7. สายออกซิเจน (Oxygen tube)
8. สายยางซิลิโคน (Silicone tube)
9. เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Volt meter) (Fluke 289 true rms multimeter)
10. ปั๊มลมเพิ่มออกซิเจนแบบลูกสูบ (Electromagnetic Air Pump)(Yamano รุ่น AP – 30)
11. เครื่องเขย่า (Incubator shaker) (Comthrem scientific รุ่น polar 1000)
12. ตู้บ่มเชื้อ (Incubator) (Comthrem scientific รุ่น polar 1000)
13. ออโตปิเปต (Autopipette) ขนาด 0.5 – 1 มิลลิลิตร (Pipetman รุ่น GIL SON)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

14. เครื่องนึ่งความดันไอ (Autoclave) (Hirayama รุ่น HV – 50)
15. เครื่องวัดความเป็นกรด – ด่าง (pH meter) (Cyberscan 2000)
16. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (Mettler – Toledo (Thailand) Ltd. รุ่น AG204)
17. ตู้เขี่ยเชื้อ (Lamina air flow) (ISSCO รุ่น BVT 123)
18. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) (Shimadzu รุ่น UV 1201v)
19. เครื่องปั่นเหวี่ยงขนาดเล็ก (Mini centrifuge) (National labnet รุ่น C – 1200)
20. เครื่องผสมสาร (Vortex) (Scientific industries รุ่น Vortex – 2 Genie)
21. เครื่องวัดความเข้มแสง (Lux/Light meter)
22. คอลัมน์แก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography Column) (Agilent J&W รุ่น DB -WAX 125 – 7032)

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 แบคทีเรียที่เจริญในสภาพไร้อากาศจากบ่อดักไขมัน

เก็บเชื้อตัวอย่างซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพไร้อากาศจากบ่อดักไขมันของโรงอาหารสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำการวัดข้อมูลเบื้องต้น ได้แก่ ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) วัดโดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรด - ด่าง (pH meter) อุณหภูมิ วัดโดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer) และการวิเคราะห์หาซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ตามวิธีการวิเคราะห์ในภาคผนวก ข บรรจุลงในขวดพลาสติกปริมาตร 5 ลิตร และเติมน้ำกลั่น จากนั้นทำการบ่มเป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นเติมข้าวสุกซึ่งเป็นอาหารที่เป็นแหล่งคาร์บอนลงไปและบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์ก่อนนำไปใช้

3.3.2 การเลี้ยงเชื้อบริสุทธิ์

3.3.2.1 เชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33

นำเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่ได้รับจากกลุ่มโครงการพิเศษ ปีการศึกษา 2553 เรื่อง “ การผลิตเซลล์ไฟฟ้าทางชีวภาพโดยการเลี้ยงเชื้อร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสังเคราะห์แสงและ “*Saccharomyces cerevisiae*” นำมาเลี้ยง

ในอาหารเหลวสูตร A โดยใช้ปิเปตดูดเชื้อมา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในอาหารเหลวสูตร A ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ปิดผิวหน้าอาหารด้วยน้ำมันพาราฟิน (Parafin oil) แล้วนำไปบ่มภายใต้ความเข้มแสง 1000 ลักซ์ ซึ่งวัดด้วยเครื่องวัดความเข้มแสง (Lux/Light meter) ที่อุณหภูมิประมาณ 35 - 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ตรวจสอบลักษณะเชื้อที่เป็นสีแดง และนำไปส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ว่าได้เชื้อที่บริสุทธิ์จึงนำไปเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร MYS (ภาคผนวก ก.)

3.3.2.2 เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae*

นำเชื้อยีสต์มาลากลบนอาหารแข็ง MYS ที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน และเปปโตเนนเป็นแหล่งไนโตรเจน (ภาคผนวก ก) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจสอบลักษณะของโคโลนีที่มีลักษณะเดี่ยวๆ และส่องผ่านกล้องจุลทรรศน์ว่าได้เชื้อที่บริสุทธิ์ จึงนำไปเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร MYS

3.3.4 การศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ร่วมกับเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* และเชื้อจากบ่อตกไขมัน

3.3.4.1 การสร้างเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องคู่

ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ห้องแอโนดและห้องแคโทด โดยห้องแคโทดจะใช้กระบะพลาสติกแข็งขนาด 10,450 ลูกบาศก์เซนติเมตร เจาะฝาด้านบนเพื่อใช้สำหรับเก็บตัวอย่าง ด้านข้างของกระบะเจาะรูสำหรับใส่สายออกซิเจนและรูสำหรับใส่ขั้วไฟฟ้าด้านบนสำหรับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* และด้านล่างสำหรับแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ส่วนห้องแอโนดจะมีความแตกต่างกัน ดังนี้

ชุดที่ 1 และชุดที่ 2 ใช้กล่องพลาสติกแข็งสี่เหลี่ยมขนาด 5,775 ลูกบาศก์เซนติเมตร เจาะกล่องพลาสติกแข็งสี่เหลี่ยมเป็นช่องขนาด 1 x 3 เซนติเมตร จำนวน 4 แถวแถวละ 3 ช่อง โดยชุดที่ 1 จะเจาะเพียงด้านใดด้านหนึ่งของกล่องเท่านั้น ส่วนชุดที่ 2 จะเจาะทั้งสองด้าน จากนั้นติดเมมเบรนปิดช่องที่เจาะไว้ด้วยกาวยาง โดยให้พื้นที่เมมเบรนชุดที่ 1 เท่ากับ 225 ตารางเซนติเมตร ชุดที่ 2 มีพื้นที่เมมเบรนเท่ากับ 450 ตารางเซนติเมตร ที่ฝาด้านบนของกล่องพลาสติกเจาะรูสำหรับใส่ขั้วไฟฟ้า

ชุดที่ 3 และชุดที่ 4 ใช้ขวดโหลพลาสติกแข็งทรงกระบอกขนาด 3,770 ลูกบาศก์เซนติเมตร เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร รอบขวดโหล จากนั้นใช้ขวดน้ำพลาสติกซึ่งทำการติดเมมเบรน โดยชุดที่ 3 มีพื้นที่เมมเบรนเท่ากับ 225 ตารางเซนติเมตร ชุดที่ 4

มีพื้นที่เมมเบรนเท่ากับ 450 ตารางเซนติเมตร ไล่ลงไปในช่วงโวล ที่ผาด้านบนของขวดโวลเจาะรู สำหรับใส่ขั้วไฟฟ้า

ห้องแอนโตนันทำให้มีสภาพไร้อากาศโดยการปิดฝาขวดให้แน่นเพื่อ ป้องกันอากาศเข้า สำหรับห้องแคโทดทำให้มีสภาพมีอากาศที่ด้านบนสำหรับเลี้ยงเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ด้วยการใส่สายออกซิเจนและให้อากาศจากปั๊มลม

3.3.4.2 การศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยสัดส่วนเชื้อเริ่มต้นระหว่างเชื้อ แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ที่ระดับ 1 ต่อ 2 ร่วมกับเชื้อจากบ่อดักไขมัน

ใส่หัวเชื้อแบคทีเรียที่เจริญในสภาพไร้อากาศจากบ่อดักไขมันในห้อง แอนโตนร้อยละ 10 เติมน้ำกลั่นเพื่อเจือจาง แล้วใส่ขั้ววสุกร้อยละ 30 เพื่อเป็นแหล่งคาร์บอน ใส่ เปปโตนความเข้มข้นร้อยละ 0.5 เพื่อปรับสภาพให้มีความเป็นกรดน้อยลง ปิดฝาขวดให้แน่น เพื่อให้อยู่ในสภาพไร้อากาศ (Anaerobe) ส่วนห้องแคโทด ใส่สัดส่วนเชื้อเริ่มต้นระหว่างเชื้อ แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ที่ระดับ 1 ต่อ 2 โดยใช้อาหาร MYS โดยทำการพ่นอากาศที่ด้านบนซึ่งเป็นส่วนของยีสต์โดยสายออกซิเจนที่ เชื่อมต่อกับปั๊มลมแบบลูกสูบเพื่อให้อยู่ในสภาพมีอากาศ (Aerobe) จากนั้นบ่มไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์เพื่อให้หัวเชื้อเกิดการย่อยสลายขั้ววสุก แล้วบันทึกกระแสไฟฟ้าด้วยเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า

3.3.4.3 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total sugar)

ดูตัวอย่างเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสาย พันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* และเชื้อจากบ่อดักไขมัน มาปั่น เหยียงด้วยความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที นำส่วนใส มาทำการเจือจางที่ระดับความเจือจางต่าง ๆ แล้วดูตัวอย่างแต่ละความเจือจางมา 1.0 มิลลิลิตร มา ตรวจวัดหาปริมาณน้ำตาลทั้งหมดด้วยวิธีฟินอล – ซัลฟูริก (ภาคผนวก ค) วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร บันทึกการเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่าง ๆ เปรียบเทียบกับกราฟ มาตรฐานน้ำตาลทั้งหมด

3.3.4.4 การศึกษาการเจริญของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสม ก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 โดยวิธีการสกัดแบคทีเรียโอคคโล โรฟิลล์

ดูตัวอย่างเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสาย

พันธุ์ OS33 จากอาหารสูตร MYS มา 1 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อ นาที เป็นเวลา 5 นาที นำส่วนใสทิ้งและล้างเซลล์ด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาทีอีกครั้ง นำมาทำให้แห้งและนำไปสกัดด้วยสารละลายผสมระหว่างอะซิโตนต่อ เมทานอล 7 ต่อ 2 หลอดละ 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันจากนั้นนำไปวางในเครื่องหมุนวนสารในที่มืดเป็นเวลา 150 นาที นำเซลล์ที่สกัดเบคทีเรียออกคลอโรฟิลล์มาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที และนำส่วนใสไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 770 นาโนเมตร

3.3.4.5 การวิเคราะห์ซีไอดีน้ำเสียของเชื้อจากบ่อดักไขมัน

นำน้ำเสียของเชื้อจากบ่อดักไขมันของเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพทั้ง 4 ชุด ในช่วงเวลาที่ 0 และช่วงเวลาที่ 288 มาทำการวิเคราะห์ โดยซิงเจอร์คิวรีซัลเฟต (HgSO_4) 0.4 กรัม ใส่ในขวดกันกลม เติมน้ำ 20 มิลลิลิตร หรือส่วนของตัวอย่างที่เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ ปริมาตร 20 มิลลิลิตร จากนั้นเติมสารละลายมาตรฐาน โปแทสเซียมไดโครเมต 10 มิลลิลิตร แล้วค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไป 30 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายทั้งหมดให้เข้ากันดี นำขวดต่อเข้ากับเครื่องควบแน่น กลั่นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาดังที่ให้เขียน แล้วนำมาไทเทรตด้วย สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต โดยใช้เฟอร์โรอินเป็นอินดิเคเตอร์ จนกระทั่งสีของ สารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเขียวเป็นสีน้ำตาลแดงแสดงว่าถึงจุดยุติ จากนั้นนำไปคำนวณค่าซีไอดี โดยเปรียบเทียบกับแบลนด์ (ภาคผนวก ก)

3.3.4.6 การวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่าย

ในการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่าย โดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography) โดยทำการเก็บตัวอย่างของเชื้อบ่อดักไขมัน และเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมกำมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ทุกๆ 48 ชั่วโมง มาอย่างละ 5 มิลลิลิตร นำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที นำส่วนใสมาวิเคราะห์หากรดไขมันระเหยง่ายด้วยเครื่อง แก๊สโครมาโตกราฟี โดยใช้ Hydrogen - Flame Ionization Detector (FID) เป็นตัวตรวจวัด ซึ่งมี แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สพา ใช้เข็มดูดตัวอย่าง 2 ไมโครลิตร โหลดเข้าคอลัมน์ชนิด FID รุ่น DB - WAX 125 - 7032 โดยให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่คอลัมน์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส มีอัตราการเพิ่มของ อุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส กำหนดให้อุณหภูมิที่

ดีเทกเตอร์เท่ากับ 250 องศาเซลเซียส เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการวิเคราะห์ นำพื้นที่ได้กราฟที่ได้เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดไขมันระเหยง่าย (ภาคผนวก ค)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 แบคทีเรียที่เจริญในสภาพไร้อากาศจากบ่อดักไขมัน

เก็บเชื้อตัวอย่างซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่เจริญในสภาพไร้อากาศจากบ่อดักไขมันของโรงอาหารสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยทำการวัดข้อมูลเบื้องต้น ได้แก่ ค่าความเป็นกรด - ด่าง (pH) วัดโดยใช้เครื่องวัดความเป็นกรด - ด่าง (pH meter) พบว่ามีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 4.02 วัดอุณหภูมิโดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ (Thermometer) พบว่ามีค่าเท่ากับ 38 องศาเซลเซียส และวิเคราะห์หาซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) ตามวิธีการวิเคราะห์ในภาคผนวก ข พบว่ามีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 180 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร จากนั้นบรรจุลงในขวดพลาสติกปริมาตร 5 ลิตร และเติมน้ำกลั่น ทำการบ่มเป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้นเติมข้าวสุกซึ่งเป็นอาหารที่เป็นแหล่งคาร์บอนลงไป และบ่มทิ้งไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์ก่อนนำไปใช้

4.2 การเลี้ยงเชื้อบริสุทธิ์

4.2.1 เชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33

นำเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่ได้รับจากกลุ่มโครงการพิเศษ ปีการศึกษา 2553 เรื่อง “ การผลิตเซลล์ไฟฟ้าทางชีวภาพโดยการเลี้ยงเชื้อร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสังเคราะห์แสงและ *Saccharomyces cerevisiae* ” มาเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร A โดยใช้ปิเปตดูดเชื้อมา 1 มิลลิลิตร ใส่ลงในอาหารเหลวสูตร A ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปิดฝิขวดอาหารด้วยน้ำมันพาราฟิน (Paraffin oil) แล้วนำไปบ่มภายใต้ความเข้มแสง 1000 ลักซ์ อุณหภูมิประมาณ 35 - 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน พบเชื้อมีลักษณะเป็นสีแดง และส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ว่าได้เชื้อที่บริสุทธิ์จึงนำไปเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร MYS (ภาคผนวก ก.)

4.2.2 เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae*

นำเชื้อยีสต์มาตากลงบนอาหารแห้ง MYS ที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน และเปปโตนเป็นแหล่งไนโตรเจน (ภาคผนวก ก) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบโคโลนีเดี่ยว ๆ ที่มีลักษณะกลมมน สีขาว และนำไปส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบว่าได้เชื้อที่บริสุทธิ์ จึงนำไปเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร MYS ต่อไป

4.3 การศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ร่วมกับเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* และเชื้อจากบ่อดักไขมัน

4.3.1 การสร้างเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพแบบห้องคู่

เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพประกอบด้วยห้องแอโนดและห้องแคโทด โดยห้องแคโทดจะใช้กระบะพลาสติกแข็งขนาด 10,450 ลูกบาศก์เซนติเมตร เจาะฝาด้านบนเพื่อเก็บตัวอย่างด้านข้างของกระบะเจาะรูสำหรับใส่สายออกซิเจนและรูสำหรับใส่ขั้วไฟฟ้าด้านบนสำหรับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* และขั้วไฟฟ้าด้านล่างสำหรับแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ส่วนห้องแอโนดจะมีความแตกต่างกัน โดยเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 1 และ 2 ใช้กล่องพลาสติกแข็งสี่เหลี่ยมขนาด 5,775 ลูกบาศก์เซนติเมตร ชุดที่ 3 และ 4 ใช้ขวดโหลพลาสติกแข็งทรงกระบอกขนาด 3,770 ลูกบาศก์เซนติเมตร และเจาะฝาด้านบนสำหรับเก็บตัวอย่าง ดังรูปที่ 4.1

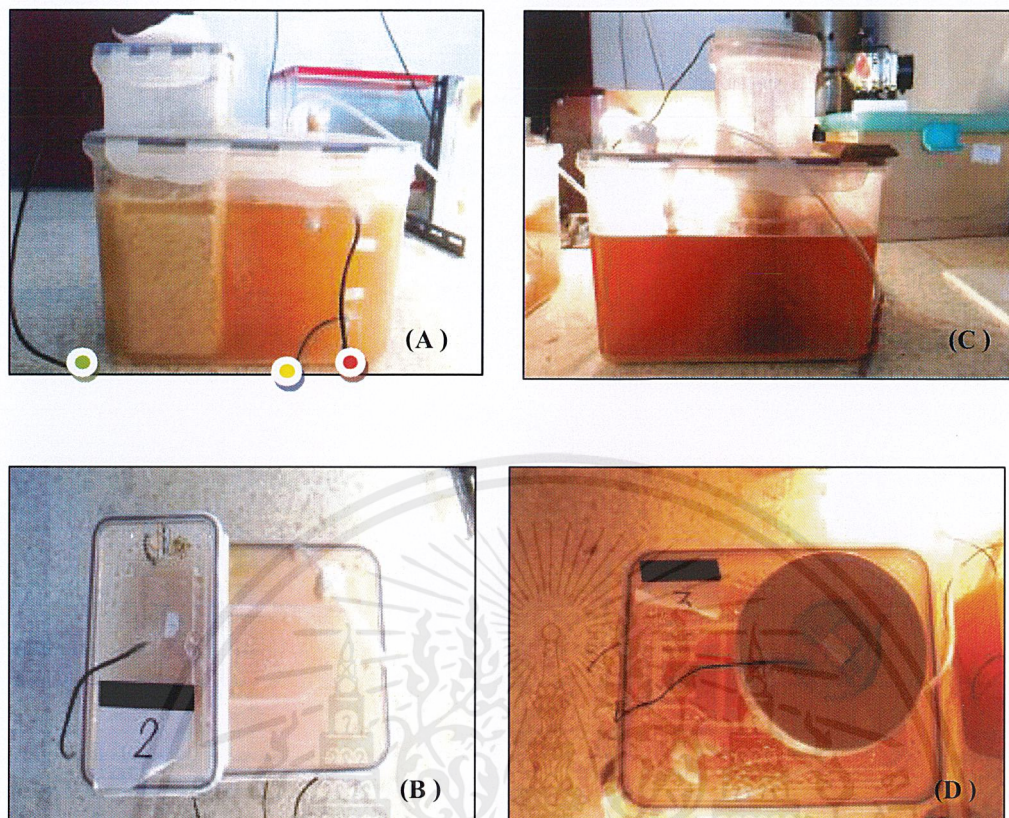





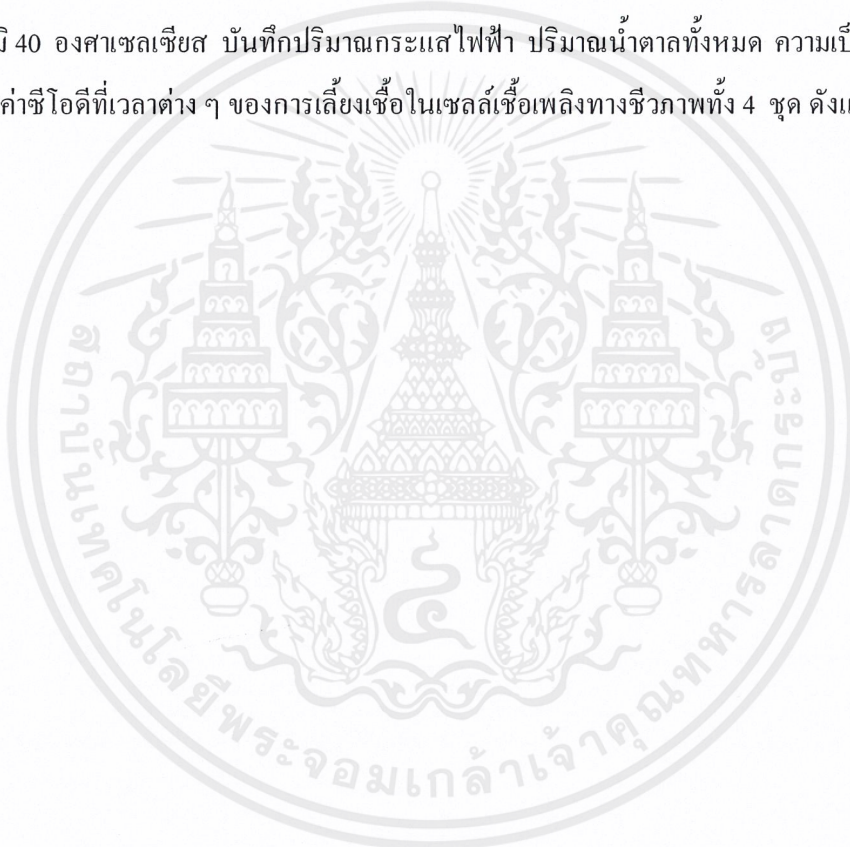
Figure 4.1 The configuration of microbial fuel cell unit. The front view (A) and top view (B) of unit 1 and 2. And the front view (C) and top view (D) of unit 3 and 4.

-  : The electrode (A) in upper cathode chamber
-  : The electrode (B) in lower cathode chamber
-  : The electrode (C) in anode chamber

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยสัดส่วนเชื้อเริ่มต้นระหว่างเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ที่ระดับ 1 ต่อ 2 ร่วมกับเชื้อจากบ่อดักไขมัน โดยใช้พื้นที่เมมเบรนในชุดทดลองเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพที่แตกต่างกัน

ศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากการเลี้ยงเชื้อผสมระหว่างเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในอาหารเหลวสูตร MYS โดยใช้สัดส่วนเริ่มต้นที่ระดับ 1 ต่อ 2 ร่วมกับเชื้อจากบ่อดักไขมัน ซึ่งในชุดทดลองเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพทั้ง 4 ชุด มีขนาดพื้นที่ของเมมเบรนที่แตกต่างกัน จากนั้นนำไปบ่มภายใต้ความเข้มแสง 1,500 ลักซ์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส บันทึกปริมาณกระแสไฟฟ้า ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีไอดีที่เวลาต่างๆ ของการเลี้ยงเชื้อในเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพทั้ง 4 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 4.2



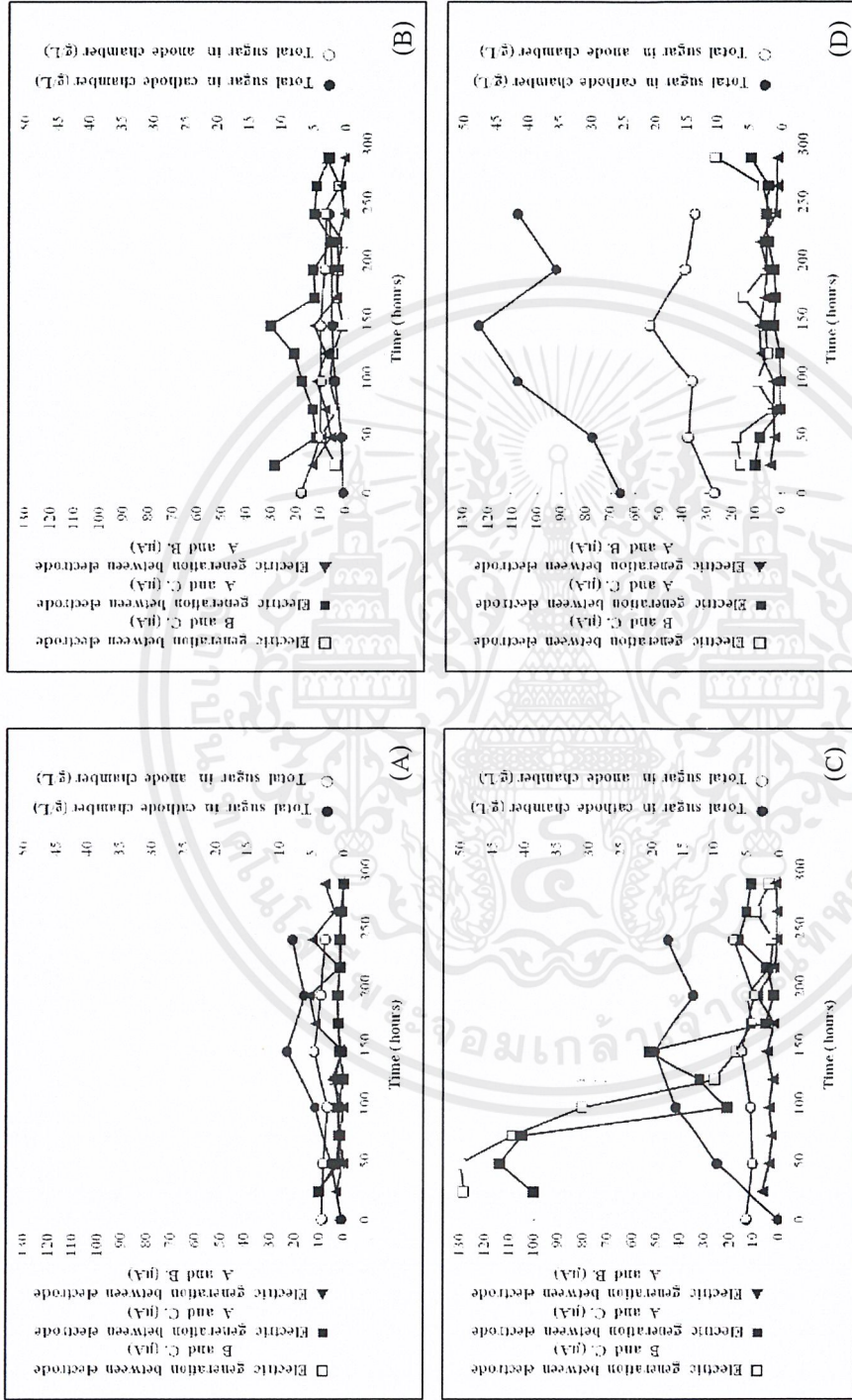


Figure 4.2 The current generation by microbial fuel cell unit 1 (a), unit 2 (b), unit 3 (c) and unit 4 (d). The microbial fuel cell was prepared by the mixed cultivation of OS33 and Sac. in cathode chamber and anaerobic microorganism in anode chamber.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลของอุณหภูมิ จากการศึกษากการผลิตรกระแสไฟฟ้าของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ที่ระดับ 1 ต่อ 2 ในอาหารเหลวสูตร MYS ร่วมกับเชื้อจากบ่อดักไขมัน

เวลา (ชั่วโมง)	อุณหภูมิ (° C)			
	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4
0	41.00	39.00	40.00	39.00
48	44.00	42.00	44.00	43.00
96	41.60	39.80	40.20	42.00
144	40.30	39.60	40.10	41.20
192	41.00	39.80	43.30	39.60
240	42.30	40.30	40.10	41.90
288	41.30	39.90	39.80	40.20

จากการศึกษากการผลิตรกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ทางชีวภาพทั้ง 4 ชุด ซึ่งมีขนาดพื้นที่ของเมมเบรนที่แตกต่างกัน พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ทั้ง 4 ชุด มีการผลิตรกระแสไฟฟ้าที่ไม่คงที่ ดังนั้นเราจึงทำการพิจารณาจากขั้วไฟฟ้าที่ให้กระแสไฟฟ้าสูงที่สุด โดยเปรียบเทียบชุดเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่มีขนาดพื้นที่ของเมมเบรนขนาดเท่ากัน ได้แก่ชุดที่ 1 กับชุดที่ 3 ซึ่งมีขนาดพื้นที่ของเมมเบรนเท่ากับ 225 ตารางเซนติเมตร และชุดที่ 2 กับชุดที่ 4 ซึ่งมีขนาดพื้นที่ของเมมเบรนเท่ากับ 450 ตารางเซนติเมตร พบว่าชุดที่ 1 มีการผลิตรกระแสไฟฟ้าระหว่างสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* กับสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ได้สูงที่สุดเท่ากับ 14.05 ไมโครแอมแปร์ ในชั่วโมงที่ 192 ชุดที่ 3 มีการผลิตรกระแสไฟฟ้าระหว่างสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 กับสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อแบคทีเรียจากบ่อดักไขมันได้สูงที่สุดเท่ากับ 129.84 ไมโครแอมแปร์ ในชั่วโมงที่ 48 ชุดที่ 2 มีการผลิตรกระแสไฟฟ้าระหว่างสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* กับสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อแบคทีเรียจากบ่อดักไขมันได้สูงที่สุดเท่ากับ 30.26 ไมโครแอมแปร์ ในชั่วโมงที่ 144 และชุดที่ 4 มีการผลิตรกระแสไฟฟ้าระหว่างสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 กับสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อแบคทีเรียจากบ่อดักไขมันได้สูงที่สุดเท่ากับ 26.57 ไมโคร-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอมแปร์ ในชั่วโมงที่ 288 อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพทั้ง 4 ชุดจะมีปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุดรวมทั้งชั่วโมงไฟฟ้าที่ให้ค่าการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่แตกต่างกัน แต่ชั่วโมงหลังจากการผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดนั้น พบว่าการผลิตกระแสไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง ยกเว้นชุดที่ 4 ที่พบว่าการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุดเกิดขึ้นในชั่วโมงสุดท้ายของการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

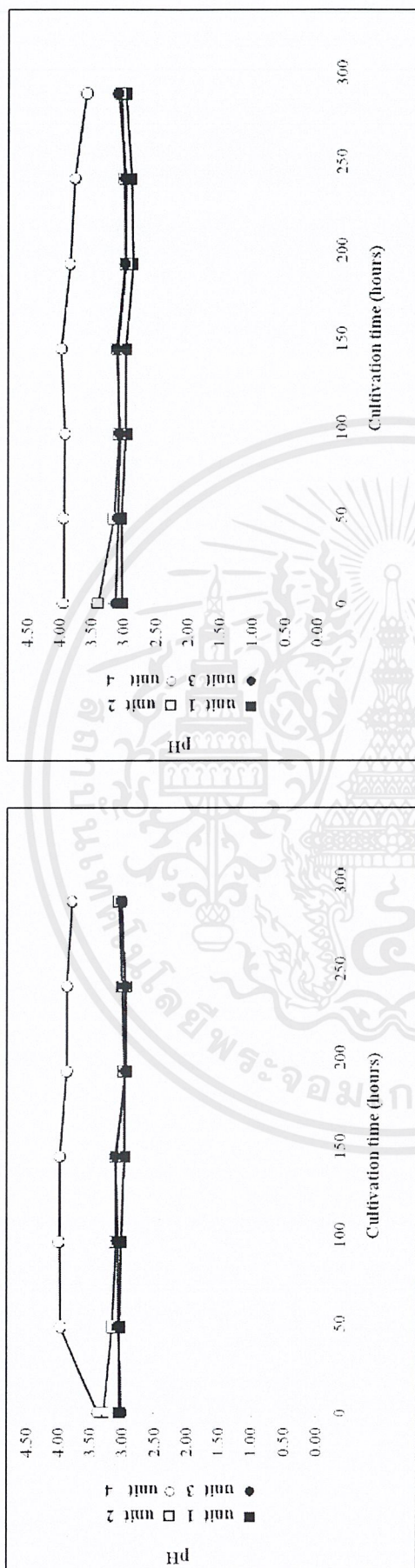


Figure 4.3 pH of microbial fuel cell unit. Anode chamber (A) and cathode chamber (B).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นกรด - ด่างของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์ แสงสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ของเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพทั้ง 4 ชุด ในชั่วโมงที่ 0 มีค่าความเป็นกรด - ด่าง ก่อนข้างต่ำ คือ มีค่าเริ่มต้นที่ประมาณ 3 จากนั้นในระหว่างการทดลองจนสิ้นสุดการทดลองในชั่วโมงที่ 288 พบว่าค่าความเป็นกรด - ด่างมีค่าลดลงจากชั่วโมงที่ 0 โดยเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 1, 2, 3 และ 4 มีค่าความเป็นกรด - ด่างเท่ากับ 2.98, 3.05, 3.09 และ 3.58 ตามลำดับ จึงแสดงให้เห็นว่าค่าความเป็นกรด - ด่างน่าจะมีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการผลิตกระแสไฟฟ้าและความเป็นกรด - ด่าง จะเห็นได้ว่าในช่วงแรกนั้นการผลิตกระแสไฟฟ้ามีค่าค่อนข้างสูงและค่อย ๆ ลดระดับลงมาเรื่อยๆ เป็นไปได้ว่าแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 นอกจากจะสามารถนำน้ำตาลมาใช้ในการเจริญแล้ว ยังสามารถใช้ผลผลิตพลอยได้เป็นแหล่งคาร์บอน เช่น กรดไขมันระเหยง่าย ที่ได้จากการย่อยแ่่งของเชื้อจากบ่อดักไขมันเพื่อใช้เป็นสับสเตรทในการเจริญและการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น แต่เนื่องจากค่าความเป็นกรด - ด่างของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* มีค่าต่ำมากอยู่แล้วการที่ได้รับกรดไขมันระเหยง่าย และสารต่าง ๆ ที่ได้จากการย่อยแ่่งของเชื้อจากบ่อดักไขมันที่ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด - ด่างมีค่าลดลงกว่าเดิม ก็อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้เชื้อหยุดกระบวนการย่อยและการหมัก ส่งผลให้เชื้อตายและทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้าในช่วงชั่วโมงท้าย ๆ นั้นลดลง หรืออาจจะไม่เกิดการผลิตกระแสไฟฟ้า

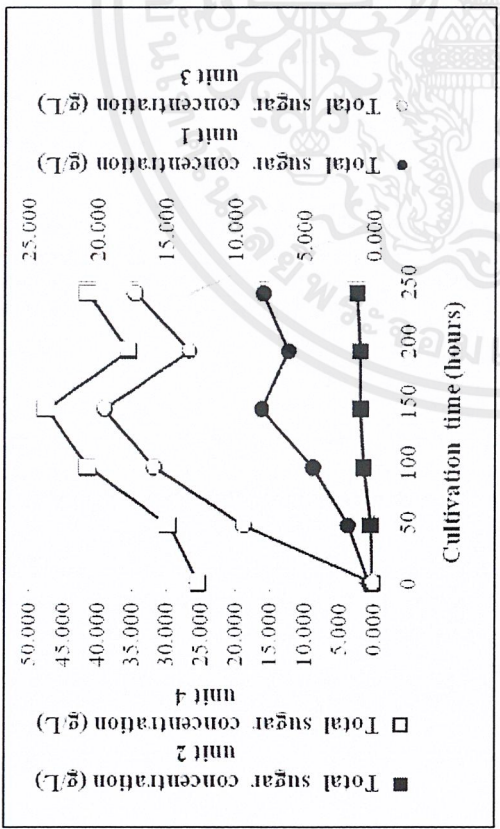
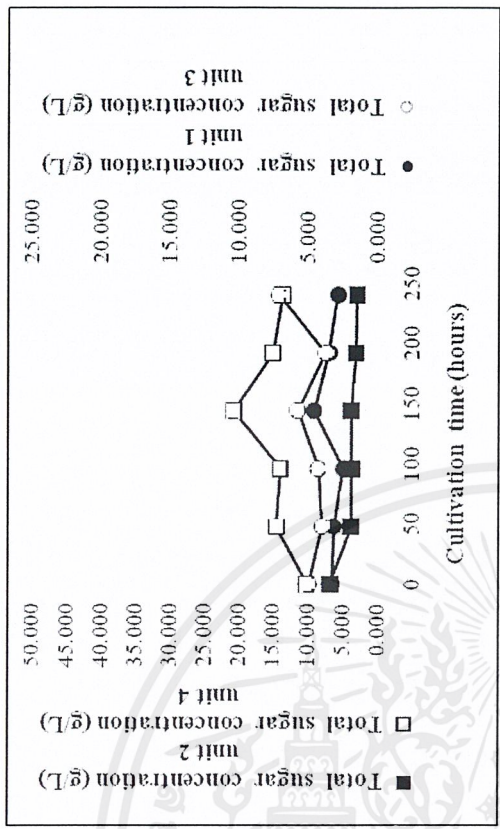


Figure 4.4 Total sugar concentration of microbial fuel cell unit. Anode chamber (A) and cathode chamber (B).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูป 4.4 เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมดในเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพทั้ง 4 ชุด ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 0 ถึงชั่วโมงที่ 288 พบว่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่วัดได้ของเชื้อจากบ่อคอกไขมันมีค่าสูงกว่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่วัดได้จากเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ยกเว้นชุดที่ 2 ที่มีผลตรงกันข้าม โดยปริมาณน้ำตาลทั้งหมดของเชื้อจากบ่อคอกไขมันชุดที่ 1, 3 และ 4 อยู่ในช่วง 0.407 – 8.659, 0.114 – 20.559 และ 26.873 – 49.650 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่วัดได้ของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* อยู่ในช่วง 2.660 – 4.791, 4.014 – 7.634 และ 10.981 – 21.816 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนชุดที่ 2 ซึ่งมีผลปริมาณน้ำตาลทั้งหมดแตกต่างจาก 3 ชุดก่อนหน้านั้น พบว่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมดของเชื้อจากบ่อคอกไขมันอยู่ในช่วง 0.326 – 2.700 กรัมต่อลิตร ในขณะที่ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดที่วัดได้ของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* อยู่ในช่วงที่สูงกว่า นั่นคือ 3.190 – 7.886 กรัมต่อลิตร

4.3.3 การศึกษาการเจริญของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมกัมมะถันสายพันธุ์ OS33 โดยวิธีการสกัดแบคทีเรียโคลิกโครฟีลล์

นำเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมกัมมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่เจริญในอาหารสูตร MYS มาเลี้ยงในชุดการทดลองเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพทั้ง 4 ชุด ในอาหารเหลวสูตร MYS ซึ่งเลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในสัดส่วนเชื้อเริ่มต้นที่ระดับ 1 ต่อ 2 โดยมีแหล่งคาร์บอนคือ แป้งมันสำปะหลัง บ่มภายใต้ความเข้มแสง 1,000 – 1,500 ลักซ์ ซึ่งวัดความเข้มแสงด้วยเครื่องวัดความเข้มแสง ที่อุณหภูมิ 35 – 40 องศาเซลเซียส และเก็บตัวอย่างเชื้อทุก ๆ 48 ชั่วโมง โดยการคัดตัวอย่างเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่มไม่สะสมกัมมะถันสายพันธุ์ OS33 มาชุดละ 1 มิลลิลิตร แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที นำส่วนใสทิ้งและล้างเซลล์ด้วยน้ำกลั่นแล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาทีอีกครั้ง นำมาทำให้แห้งและนำไปสกัดด้วยสารละลายผสมระหว่างอะซิโตนต่อเมทานอล 7 ต่อ 2 หลอดละ 1 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันจากนั้นนำไปวางในเครื่องหมุนวนสารในที่มืดเป็นเวลา 150 นาที นำเซลล์ที่สกัดแบคทีเรียโคลิกโครฟีลล์มาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 5 นาที และนำส่วนใสไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 770 นาโนเมตร ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.5

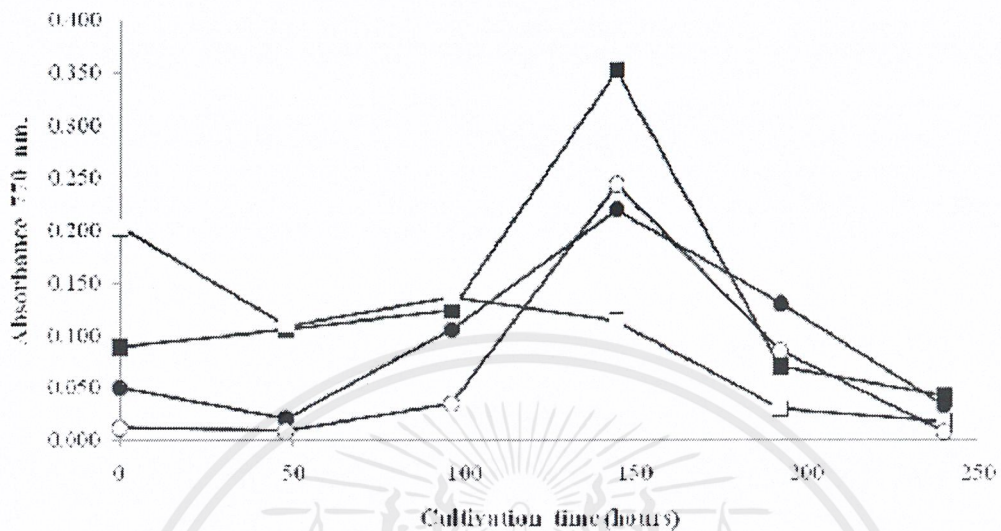


Figure 4.5 growth curve of photosynthetic bacteria isolate OS33 in microbial fuel cell unit 1 (■), unit 2 (□), unit 3 (●) and unit 4 (○).

จากรูปที่ 4.5 จากการวัดการเจริญของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 ด้วยวิธีการสกัดแบคทีเรียโอคลโรฟิลล์ และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 770 นาโนเมตร พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 1, 2, 3 และ 4 มีปริมาณแบคทีเรียโอคลโรฟิลล์สูงสุดเท่ากับ 0.353, 0.203, 0.220 และ 0.244 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 สามารถเจริญและย่อยแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนและให้ปริมาณแบคทีเรียโอคลโรฟิลล์สูงสุดในเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 1 มากที่สุด และในเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 2 น้อยที่สุด โดยในเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 1 มีปริมาณแบคทีเรียโอคลโรฟิลล์สูงสุดเท่ากับ 0.353 ในชั่วโมงที่ 144 และในเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 2 มีปริมาณแบคทีเรียโอคลโรฟิลล์สูงสุดเท่ากับ 0.203 ในชั่วโมงที่ 0

4.3.4 การวิเคราะห์ซีไอโอดี

เพื่อศึกษาว่าในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพโดยใช้เชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 กับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ร่วมกับเชื้อจากบ่อดักไขมันซึ่งเป็นแหล่งน้ำเสียตามธรรมชาตินั้น จะเป็นการบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพดีขึ้นหรือไม่ เราจึงทำการวิเคราะห์ซีไอโอดีของเชื้อจากบ่อดักไขมัน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์พบว่าค่าซีไอโอดีเริ่มต้นของเชื้อจากบ่อดักไขมันมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 40000 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร หลังจากทำการเลี้ยงเชื้อจากบ่อดักไขมันร่วมกับแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 กับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* และเกิดการผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาจนกระทั่งสิ้นสุดการผลิตกระแสไฟฟ้าในช่วงที่ 288 พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพทั้ง 4 ชุดนั้น มีค่าซีไอโอดีเหลือเท่ากับ 275000, 75000, 20000 และ 275000 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าซีไอโอดีของเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพทั้ง 4 ชุด หลังจากสิ้นสุดการทดลองนั้นมีค่าลดลงจากค่าซีไอโอดีเริ่มต้น ซึ่งแสดงว่าในการทดลองครั้งนี้เซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพมีประสิทธิภาพที่จะผลิตกระแสไฟฟ้าร่วมกับการบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพดีขึ้น

4.3.5 การวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid, VFA)

4.4.5.1 เชื้อจากบ่อดักไขมัน

จากผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีของเชื้อบ่อดักไขมันทุก ๆ 48 ชั่วโมง นำพื้นที่ใต้กราฟที่ได้เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดไขมันระเหยง่ายและได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.6

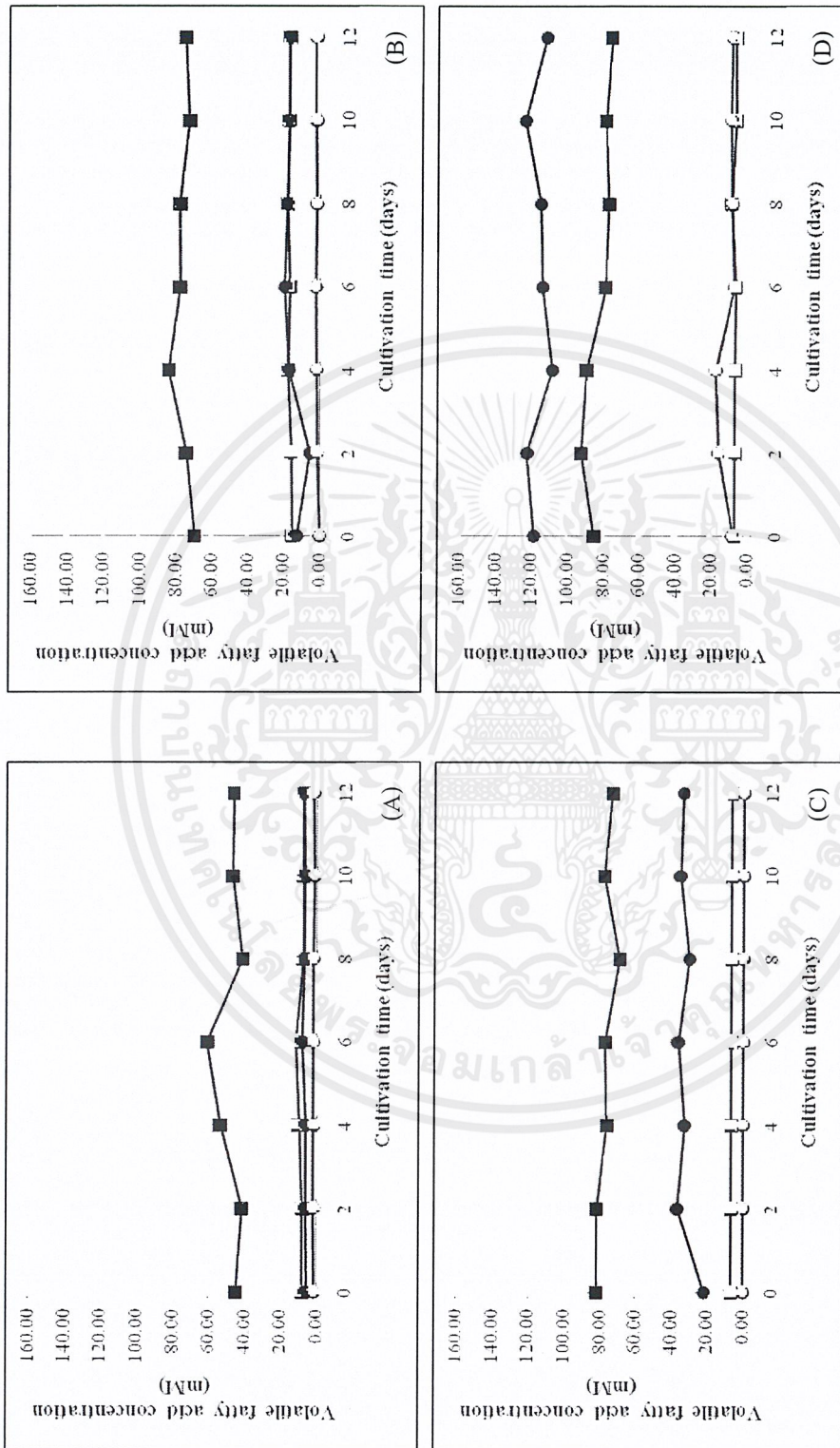


Figure 4.6 Concentration of volatile fatty acid in anode chamber by microbial fuel cell unit 1 (A), unit 2 (B), unit 3 (C) and unit 4 (D). Acetic acid (■), Propionic acid (□), Butyric acid (●) and Valeric acid (○).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.5.2 เชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์

Saccharomyces cerevisiae

จากผลการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟีของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ทุก ๆ 48 ชั่วโมง นำพื้นที่ใต้กราฟที่ได้เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดไขมันระเหยง่ายและได้ผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4.5



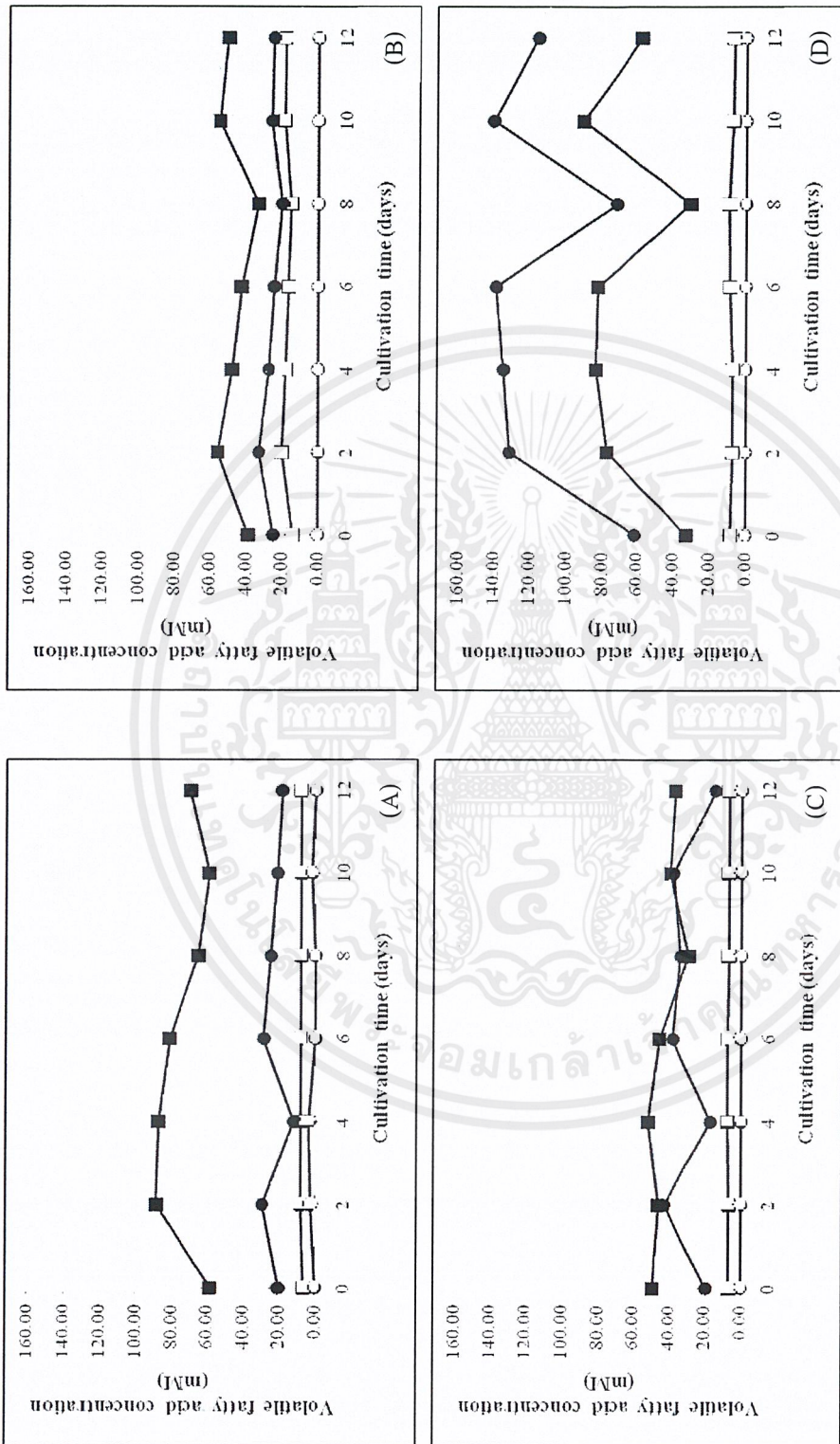


Figure. 4.7 Concentration of volatile fatty acid in cathode chamber by microbial fuel cell unit 1 (A), unit 2 (B), unit 3 (C) and unit 4 (D).

Acetic acid (■), Propionic acid (□), Butyric acid (●) and Valeric acid (○).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายโดยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี (ภาคผนวก ค) พบว่า เชลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 1, 2 และ 3 มีความเข้มข้นของกรดอะซิดิกสูงที่สุดทั้งเชื้อจากบ่อดักไขมัน และเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* โดยเชลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 1, 2 และ 3 ของเชื้อจากบ่อดักไขมันมีความเข้มข้นของกรดอะซิดิกสูงที่สุดเท่ากับ 22.83, 45.82 และ 43.83 มิลลิโมลาร์ตามลำดับ ส่วนเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* มีความเข้มข้นของกรดอะซิดิกสูงที่สุดเท่ากับ 88.20, 55.63 และ 51.26 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ สำหรับเชลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 4 มีความเข้มข้นของกรดบิวทีริกสูงที่สุด โดยเชื้อจากบ่อดักไขมันมีความเข้มข้นของกรดบิวทีริกสูงที่สุดเท่ากับ 116.35 มิลลิโมลาร์ และเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* มีความเข้มข้นของกรดบิวทีริกสูงที่สุดเท่ากับ 131.31 มิลลิโมลาร์ สำหรับกรดโพรพิโอนิกและกรดวาเลอริก พบว่ามีปริมาณเล็กน้อยและค่อนข้างคงที่ทั้งเชื้อจากบ่อดักไขมัน และเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในเชลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพทั้ง 4 ชุดการทดลอง

อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าในเชลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพทั้ง 4 ชุดการทดลอง พบว่าชุดการทดลองที่ 1 และ 4 มีการเจริญของเชื้อจากบ่อดักไขมันไม่ค่อยดีพอ ๆ กัน โดยสังเกตจากค่า COD ที่เหลืออยู่มาก เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของน้ำตาลที่เหลือในฝั่งของเชื้อจากบ่อดักไขมัน พบว่า มีความเข้มข้นของน้ำตาลสูงมาก ทำให้เกิด Carbon inhibition ยับยั้งการเจริญของเชื้อ แต่เมื่อพิจารณาที่การเจริญของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 โดยวิธีการสกัดแบคทีเรียโอสคลอโรฟิลล์ พบว่า เชื้อมีการเจริญดีมาก แต่ให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าน้อย อาจเป็นเพราะเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ที่มีการเจริญดีมาก จึงสร้างผนังเซลล์ที่แข็งแรงมากทำให้ปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาได้น้อย ประกอบกับปริมาณกรดบิวทีริกที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งมีฤทธิ์รุนแรง ทำให้การเจริญของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ลดลงอย่างรวดเร็ว และทำ

ให้ค่าความเป็นกรด - ด่างภายในชุดการทดลองมีค่าต่ำมาก จึงไม่เหมาะสมต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า

ชุดการทดลองที่ 2 ค่า COD เหลือน้อยที่สุด ปริมาณน้ำตาลมีความเข้มข้นต่ำทั้งฝั่งของเชื้อจากบ่อดักไขมัน และฝั่งของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 แสดงว่าเชื้อใช้น้ำตาลในการเจริญ และย่อยสลายสารอินทรีย์ เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายแล้ว พบว่ามีความเข้มข้นของกรดอะซิติกสูงมากในฝั่งของบ่อดักไขมัน แต่มีความเข้มข้นของกรดอะซิติกต่ำในฝั่งของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ใช้กรดอะซิติกในการเจริญ แต่เมื่อพิจารณาปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชุดการทดลองที่ 2 แล้วพบว่า ได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าน้อย อาจเป็นเพราะเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 เจริญเติบโตจึงสร้างผนังเซลล์ที่แข็งแรงมาก ทำให้ปลดปล่อยอิเล็กตรอนได้น้อย

สำหรับชุดการทดลองที่ 3 ค่า COD ลดลงเหลือครึ่งหนึ่งจากเริ่มต้น ปริมาณน้ำตาลในฝั่งของเชื้อจากบ่อดักไขมันมีความเข้มข้นสูง แสดงว่าเชื้อสามารถย่อยข้าวสุกได้ดี แต่เอาไปใช้ในการเจริญได้น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลองที่ 2 เมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย และการเจริญของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 โดยวิธีการสกัดแบคทีเรียโอสคลอโรฟิลล์ พบว่าให้ผลการทดลองเช่นเดียวกับชุดการทดลองที่ 2 แต่ได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงกว่าการทดลองชุดอื่น ๆ ในช่วงแรก ๆ ของระยะเวลาในการการทดลอง โดยได้กระแสไฟฟ้าสูงสุดในชั่วโมงที่ 48 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟการเจริญของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 โดยวิธีการสกัดแบคทีเรียโอสคลอโรฟิลล์แล้ว พบว่าอยู่ในช่วง lag phase ที่มีอัตราการเจริญคงที่แบบ Stationary phase ซึ่งเป็นช่วงของการผลิต secondary production ซึ่งก็คือกระแสไฟฟ้า

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

เชื้อแบคทีเรียที่เจริญในสภาพไร้อากาศที่ได้จากบ่อตกไขมันของโรงอาหารสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อนำมาเลี้ยงโดยใช้ข้าวสุกเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าเชื้อมีการย่อยสลายข้าวสุกอย่างต่อเนื่อง โดยสังเกตได้จากข้าวที่เปียกชุ่ม และมีแก๊สเกิดขึ้น

เชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมกัมมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่ได้รับจากกลุ่มโครงการพิเศษ ปีการศึกษา 2553 เรื่อง “การผลิตเซลล์ไฟฟ้าทางชีวภาพโดยการเลี้ยงเชื้อร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสังเคราะห์แสงและ *Saccharomyces cerevisiae*” เมื่อนำมาเลี้ยงในอาหารเหลวสูตร MYS ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 6.8 ซึ่งมีแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าเชื้อมีการเจริญเติบโตอย่างเห็นได้ชัดในช่วงเวลาประมาณ 5 วัน ซึ่งมีลักษณะสีแดงแดงอมชมพู รวมตัวกันเป็นกลุ่มบริเวณก้นขวดอาหาร เมื่อทำการหมุนวนขวดอาหารเพื่อให้เชื้อที่บริเวณก้นขวดได้มีการใช้อาหารพบว่าเชื้อมีการสร้างไบโอฟิล์มที่มีลักษณะเป็นเมือก สีขาวขุ่น อยู่บริเวณก้นขวดอาหาร

และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ที่เมื่อลากลงบนอาหารแข็ง MYS ที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน และเปปโตเนเป็นแหล่งไนโตรเจน เมื่อศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยตรวจดูลักษณะของโคโลนีที่มีลักษณะเดี่ยวๆ พบว่าโคโลนีส่วนใหญ่ มีสีขาวขุ่น ลักษณะโค้งนูน ขอบเรียบ มันวาว มีใต้อยู่ตรงกลางโคโลนี เมื่อนำมาศึกษาลักษณะภายใต้กล้องจุลทรรศน์พบว่า มีลักษณะเป็นวงรี และมีการแตกหน่อ

เมื่อศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ทางชีวภาพทั้ง 4 ชุด ซึ่งมีขนาดพื้นที่ของเมมเบรนที่แตกต่างกัน พบว่าชุดที่ 1 มีการผลิตกระแสไฟฟ้าระหว่างสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* กับสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 ได้สูงที่สุดเท่ากับ 14.05 ไมโครแอมแปร์ ในชั่วโมงที่ 192 ชุดที่ 3 มีการผลิตกระแสไฟฟ้าระหว่างสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 กับสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อแบคทีเรียจากบ่อตกไขมันได้สูงที่สุดเท่ากับ 129.84 ไมโครแอมแปร์ ในชั่วโมงที่ 48 ชุดที่ 2 มีการผลิตกระแสไฟฟ้าระหว่างสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* กับสายขั้วไฟฟ้า

ของเชื้อแบคทีเรียจากบอดักไขมันได้สูงที่สุดเท่ากับ 30.26 ไมโครแอมแปร์ ในชั่วโมงที่ 144 และ ชุดที่ 4 มีการผลิตกระแสไฟฟ้าระหว่างสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 กับสายขั้วไฟฟ้าของเชื้อแบคทีเรียจากบอดักไขมันได้สูงที่สุดเท่ากับ 26.57 ในชั่วโมงที่ 288

เมื่อศึกษาการเจริญของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้ง 4 ชุด โดยวิธีการสกัดแบคทีเรียโพลีโกลโรฟิลล์ พบว่าแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 สามารถเจริญและย่อยแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนและให้ปริมาณแบคทีเรียโพลีโกลโรฟิลล์สูงสุดในเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 1 มากที่สุด และในเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 2 น้อยที่สุด โดยมีปริมาณแบคทีเรียโพลีโกลโรฟิลล์สูงสุดเท่ากับ 0.353 ในชั่วโมงที่ 144 และ 0.203 ในชั่วโมงที่ 0 ตามลำดับ

เมื่อทำการวิเคราะห์ซีไอดี พบว่าค่าซีไอดีเริ่มต้นของเชื้อจากบอดักไขมันมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 80 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร หลังจากทำการเลี้ยงเชื้อจากบอดักไขมันร่วมกับแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสายพันธุ์ OS33 กับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* และเกิดการผลิตกระแสไฟฟ้าออกมาจนกระทั่งสิ้นสุดการผลิตกระแสไฟฟ้าในชั่วโมงที่ 288 พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพทั้ง 4 ชุดมีค่าซีไอดีเท่ากับ 27500, 7500, 20000 และ 27500 มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร ตามลำดับ

เมื่อทำการวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายของเชื้อจากบอดักไขมันและเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 1, 2 และ 3 มีความเข้มข้นของกรดอะซิติกสูงที่สุดทั้งเชื้อจากบอดักไขมัน และเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* โดยเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 1, 2 และ 3 ของเชื้อจากบอดักไขมันมีความเข้มข้นของกรดอะซิติกสูงที่สุดเท่ากับ 22.83, 45.82 และ 43.83 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ส่วนเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* มีความเข้มข้นของกรดอะซิติกสูงที่สุดเท่ากับ 88.20, 55.63 และ 51.26 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงทางชีวภาพชุดที่ 4 มีความเข้มข้นของกรดบิวทีริกสูงที่สุด โดยเชื้อจากบอดักไขมันมีความเข้มข้นของกรดบิวทีริกสูงที่สุดเท่ากับ 116.35 มิลลิโมลาร์ และเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงกลุ่มไม่สะสมก้ำมะถันสายพันธุ์ OS33 ที่เลี้ยงร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* มีความเข้มข้นของกรดบิวทีริกสูงที่สุดเท่ากับ 131.31 มิลลิโมลาร์ สำหรับกรดโพรพิโอนิกและกรดวาเลอริก พบว่ามีปริมาณเล็กน้อยและค่อนข้างคงที่

เอกสารอ้างอิง

กัมปนาท และธีราภรณ์ มะลิวัลย์. 2551. การศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจน. ปรินูญานิพนธ์ วิทยา
ศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง.

กำชัย นุ้ยศิริกุล. 2550. Hydrogen : ทางเลือกใหม่ในอนาคต. วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี, 33 (189),
118 -120.

กิตติมา สมชื่น และวณัสนันท์ มะริโตปะนะ. 2550. การพัฒนาชุดรวมเชื้อเพลิงเปลี่ยนโปรตอน
ขั้วไฟฟ้าสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์. ปรินูญานิพนธ์ วิศวกรรม
ศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง.

เกรียงไกร แซมสีม่วง. 2551. Fuel Cell พลังงานทดแทนตัวใหม่ ไม่ทำลายสิ่งแวดล้อม.
Mechanical Technology , 40 – 45.

ขนิษฐา หมูโสภิญ. 2553 . ไบโอดีไฮโดรเจน พลังงานทางเลือกใหม่ Biohydrogen : A New
Alternative Energy Source. วารสารศูนย์บริการวิชาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 18 (3-4) :
15 – 20.

จิตาพร มั่นจัน และวณิชยา ผดุงฮะ. 2551. อิทธิพลของโบริมเลนและหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อการบำบัด
น้ำเสียจากบ่อกึ่ง. ปรินูญานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

ธันยนันท์ ไชยอินปัน และณัฐวุฒิ เชื้ออินแก้ว. 2553. การผลิตไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดย
กระบวนการเติบโตของพืชในส่วนราก. ปรินูญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชา
วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

นริศรา อินทรจันทร์. 2554. ซีโอดี (chemical Oxygen Demand, COD) โดยวิธีไดโครเมตรี
ปลั๊กซ์. คู่มือการปฏิบัติการวิศวกรรมเคมีสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร.

บูรณะศักดิ์ มาดหมาย . 2548 . พลังงานชีวมวล (Biomass) ทางเลือกใหม่ของการใช้พลังงาน.

Industrial Technology Review , 10 (139): 173-177.

บูรณะศักดิ์ มาดหมาย. 2552. การใช้เทคโนโลยีพลังงานชีวภาพ. วารสารส่งเสริม

เทคโนโลยี, 36

(205) : 60 -63.

ปัทมาภรณ์ ธิมากุล และภาวดี อังคัวัฒนา. 2550. ไฮโดรเจนและเซลล์เชื้อเพลิง : พลังงานทางเลือก

ใหม่สำหรับวันพรุ่งนี้. วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี, 5 (49), 79.

มันสิน ตันกุลเวสน์. 2542. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ; โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย.

รัชนิกร วันจันทิก. 2554. แก๊สไฮโดรเจน : ความคาดหวังเพื่อเป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืน. Burapha

Sci. J, 16 (1), 131-140.

วารุณี บัวลา. 2551. การผลิตไบโอไฮโดรเจนจากแบคทีเรียที่แยกได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางชีวภาพ.

ปริญญาานิพนธ์ วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีสิ่งแวดล้อมสถาบันเทคโนโลยีพระจอม

เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

สมัย ไจอินทร์. 2550. พลังงานทดแทนสำหรับวันพรุ่งนี้ ไฮโดรเจนและเซลล์เชื้อเพลิง. พลังงาน

ทดแทน, 2 : 11-13.

สาวิตรี ระงับพิช. 2549. เซลล์เชื้อเพลิงพลังงานแห่งโลกอนาคต. เอ็นจิเนียริง ทูเดย์, 4: 52-56

สุทธิพร วารีสุงเนิน และกันยรัตน์ โหละสุด. 2549. พลังงานรูปแบบใหม่จากเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ.

เอกสารประกอบการสัมมนา วิจัยพลังงาน สร้างฐานเศรษฐกิจพอเพียง โดยกองทุนเพื่อ

ส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและพลังงาน, วันที่ 13-14 ธันวาคม 2549

ณ โรงแรมปรีnceพาเลซ, 142

อนันต์ จรุงโรจน์. 2552. เซลล์ไฟฟ้าไฮโดรเจนพลังงานทดแทนแห่งอนาคตอันใกล้. Mechanical

Technology, 8 (93) : 53 – 58.

Aelterman Peter, Rabaey Korneel, Pham Hai The, Boon Nico and Verstraete Willy. 2006.

Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial

fuel cells. Journal of Environment Science Technology, 40: 3388-3394

Bennetto H.P. 1990. Electricity generation by micro-organisms. Journal of Biotechnology

Education, 4: 163-168.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Blumen L.J.M.J., Mugerwa, M.N. 1993. *Fuel Cell System*. Plenum Press New York.
- Bond, D.R. and Lovley, D.R. 2003. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Journal of Applied Environment Microbial*, 69(3), 1548-1555.
- Change In Seop, Jang Jae Kyung, Gil Geun Cheol, Kim Mia, Kim Hyung Joo, Cho Byung Won, Kim Byung Hong. 2004. Continuous determination of biochemical oxygen demanding microbial fuel cell type biosensor. *Journal of Biosensors and Bioelectronics*, 19 : 607 - 613.
- C.H. Lay, C.Y. Lin. 2005. A nutrient formulation for fermentative hydrogen production using anaerobic sewage sludge microflora. *International journal of hydrogen energy*, 30(3),285-292.
- Chen WM, Tseng ZJ, Lee KS, Chang JS. 2005. Fermentative hydrogen production with *Clostridium butyricum* GCS5 isolated from anaerobic sewage sludge. *Int J Hydrogen Energy*, 30 : 1063-70.
- Doo H.P. and Zeikus G.J. 2000. Electricity generation in microbial fuel cells using neutral red as electronphore, *Journal of Applied and Environmental Microbiology*, 66: 1292-1297.
- Du, Z., Li H., and Gu, T.A. 2007. State of the art review on microbial fuel cell: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Journal of Biotechnology Advances*, 25: 464-482.
- E.M. Siedlecka, J. Kumirska, T. Ossowski, P. Glamowski, M. Golebiowski, J. Gajdus, Z. Kaczynski, P. Stepnowski. 2008 . Determination of volatile fatty acids in environmental aqueous samples. *Polish J. of Environ. Stud* , 17 (3) : 351-356.
- Fan, Y., Zhang, Y., Zhang, S., Hou, H., Ren, B., 2006. Efficient conversion of wheat straw wastes into biohydrogen gas by cow dung compost. *Bioresource Technology*, 97 (3), 500-505.
- G. Chittibabu, Kaushik Nath, Debabrata Das. 2006. Feasibility studies on the fermentative hydrogen production by recombinant *Escherichia coli* BL-21. *Process biochemistry*, 41(3) : 682-688.
- Hallenbecka Patrick C. 2002. Biological hydrogen production; fundamentals and limiting

- Processes, 27 : 1185 – 1193.
- Hawkes, F.R.; Dinsdale, R.; Hawkes, D.L. and Hussy, I. (2002). Sustainable fermentative hydrogen production: challenges for process optimisation. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 27, no. 11-12, p. 1339-1347.
- Herbert H.P. Fang, Hong Liu. 2002. Effect of pH on hydrogen production from glucose by a mixed culture. *Bioresource technology*, 87-93.
- Ieropoulos Ioannis, Greenman John, Melhuish Chris and Hart John. 2005. Energy accumulation and improved performance in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 145 : 253-256.
- Jung Rae Kim . Booki Min . Bruce E. Logan. 2004. Evaluation of procedures to acclimate a microbial fuel cell for electricity production. *Appl Microbiol Biotechnol*, 68 : 23 – 30
- Pham T.H., Jang J.K., Moon H., Chang I. S. and Kim B.H.. 2005. Construction and Operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell. *Journal of Process Biochemistry*, 89: 1007-1012.
- Kanyarat Holasut, Kittima ngamsai, Suthiporn Wareesongnone and Kiattisat Kumwachara. 2008. Electricity generation from wastewater by using membrane-less single chamber microbial fuel cell., *Journal of Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2008)*, at Sofitel Raja Orchid, Kho Kaen, Faculty of Engineering, Khon kaen University, 28-29 January 2008.
- Kim S-H, Han S-K and Shin H-S (2004). Feasibility of biohydrogen production by anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge. *Int J Hydrogen Energy* 29:1607-1616.
- Kum langhan et al. 2007. Microbial fuel cell-based biosensor for fast analysis of biodegradable organic matter. *Journal of Biosensor and Bioelectronics*.
- Kumar, N., Das, D., 2000. Enhancement of hydrogen production by *Enterobacter cloacae* IIT-BT 08. *Process Biochemistry* 35 (6), 589 – 593.
- Levin, D.B., Pitt, L., Love, M., 2004. Biohydrogen production: prospects and limitations to practical application. *Int. J. Hydrogen Energy* 29.
- L. Minnan, H. Jinli, W. Xiaobin, X. Huijuan, C. Jinzao, L. Chuannan, Z. Fengzhang,

- X. Liangshu. 2005. Isolation and characterization of a high H₂-producing strain *Klebsiella oxytoca* HP1 from a hot spring. *Research in microbiology*, 156(1) : 78-61.
- Lohan, Bruce E., Hamelers Bert and Rozendal Rene. 2006. Microbial fuel cell: methodology and technology. *Journal of Environmental Science & Technology*, 40(17): 5181-5192.
- Min Booki and Logan Bruce E . 2004. Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell, *Journal of Environmental Science Technology*,38: 5809-5814.
- Min Booki, Kim JungRae, Oh SangEun, Regan John M. and Logan Bruce E. 2005. Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells. *Water Res*, 39 (20) : 4961-4968.
- Moon Hyunsoo, Chang In Seop and Kim Byung Hong. 2006. Continuous electricity production from artificial wastewater using a mediator-less microbial degradation. *Journal of Biotechnology Bioengineer*, 97: 621-627.
- Muradov, N.Z. 1998 , in Bolcich, J.C., Veziroglu, T.N. (Eds.) *Hydrogen Energy Progress XII*, vol. 1, Int. Association for Hydrogen Energy, Coral Gables, FL: 523-532
- Ni, M., D. Y. C. Leung and K. Sumathy. 2006, 'An overview of hydrogen production from biomass', *Fuel Processing Technology*, 2006;87:461-472.
- Oney F.,Vezirolu T. N. and Dulger Z. 1994 . Evaluation of pipeline transportation of hydrogen and natural gas mixtures *Int. J. Hydrogen Energy*, 19: 813-822.
- Park, D.H. and Zeikus, J.G. 2003 Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation. *Journal of Biotechnology Bioengineer*, 81(3) : 348-355.
- Perry L. McCarty. 1964. *Anaerobic Waste Treatment Fundamentals*. Chemistry and Microbiology.
- Roller. SD, Bennetto HP, Delaney. GM, Mason. JR, Stirling. JL, Thurston. CF. Electron-transfer coupling in microbial fuel cells: 1. Comparison of redox-mediator reduction rates and respiratory rates of bacteria. *J. CHEM. TECHNOL. BIOTECHNOL.*, B. Vol. 34B, no. 1, pp. 3-12.
- Sangeun Oh, Booki Min, and Bruce E. Logan. 2004 . Cathode performance as factor in electricity

- generation in microbial fuel cell. Pennsylvania.
- Sherif S.A., Barbir F. and Veziroglu T N. 2005. Wind energy and the hydrogen economy review of the technology. *Solar Energy*, 78: 647-660.
- Shireen Meher Kotay, Debabrata Das. 2007. Microbial hydrogen production with *Bacillus coagulans* IIT-BT S1 isolated from anaerobic sewage sludge. *Bioresource energy*, 98(6) : 1183-1190.
- S. Tanisho, Y. Ishiwata. 1995. Continuous hydrogen production from molasses by fermentation using urethane foam as a support of flocks. *International journal of hydrogen energy*, 20(7) : 541 - 545.
- S Van Ginkel, S Sung, JJ Lay. 2001. Biohydrogen production as a function of pH and substrate concentration. 4726-4730.
- Thomas D. Hayes, Thomas L. Theis. 1978. The Distribution of Heavy Metals in Anaerobic Digestion. *Journal Water Pollution Control Federation* January 1978, p 61-72.
- Tanisho S, Ishiwata Y (1995) Continuous hydrogen production from molasses by fermentation using urethane foam as a support of flocks. *Int J hydrogen Energy* 20(7) : 541-545
- Ueno Y, Otauka S, Morimoto M., 1996. Hydrogen production from industrial wastewater by anaerobic microUora in chemostat culture. *J Ferment Bioeng*, 82 : 194 – 7.
- U.S. EPA (Environmental Protection Agency). (1979) Water-related environmental fate of 129 priority pollutants. Vol. 1. Introduction and technical background metals and inorganics, pesticides and PCBs. Prepared for the Office of Water Plann...
- Van Niel, C. B. 1944. The culture, general physiology, morphology, and classification of the non-sulfur purple and brown bacteria. *Bacteriol.*
- Wang, Y.; Chu, W. Y.; Qiao, L. J. and Su, Y. J. (2003). Hydrogen-induced delayed fracture of PZT ceramics during dynamic charging under constant load, *Materials Science and Engineering B*, Vol. 98, No.1, pp. 1-5, ISSN 0921-5107
- Yurum Y. 1995 . Hydrogen energy system, utilization of hydrogen and future aspects, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Yokoi H, Maki R, Hirose J, Hayashi S. Microbial production of hydrogen from starch manufacturing wastes. *Biomass Bioenerg* 2002;22:389–95

Zhang, C.; Xing, X.H. and Lou, K. (2005). Rapid detection of a gfp-marked Enterobacter aerogenes under anaerobic conditions by aerobic fluorescence recovery. FEMS Microbiology Letters, Vol. 249, pp. 211–281.

Chemical Oxygen Demand (COD). 1997. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Retrieved January 13, 2012 from http://www.norweco.com/html/lab/test_methods/5220bfp.htm

New Method Converts Organic Matter To Hydrogen Fuel Easily And Efficiently.(Nov.12, 2007). ScienceDaily . Retrieved February 25, 2012 from <http://www.sciencedaily.com/releases/2007/11/071112172203.htm>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

อาหารเลี้ยงเชื้อ

1. อาหารเลี้ยงเชื้อสูตร A

แหล่งคาร์บอน	10	กรัมต่อลิตร
โมโนโซเดียมกลูตาเมต	10	กรัมต่อลิตร
Na_2HPO_4	10	กรัมต่อลิตร
Yeast extract	1	กรัมต่อลิตร

แหล่งคาร์บอนและแหล่งไนโตรเจน จะเปลี่ยนแปลงตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง
ปรับความเป็นกรด – ค่าของอาหารเลี้ยงเชื้อเท่ากับ 6.8 – 7.2

2. อาหารเลี้ยงเชื้อสูตร MYS

Maltose extract	3	กรัมต่อลิตร
Peptone	5	กรัมต่อลิตร
เป็งมันสำปะหลัง	20	กรัมต่อลิตร
Yeast extract	3	กรัมต่อลิตร
Agar	12	กรัมต่อลิตร

แหล่งคาร์บอนเป็นเป็งมันสำปะหลัง และแหล่งไนโตรเจนเป็นเปปโตน ปรับความเป็น
กรด – ค่าของอาหารเลี้ยงเชื้อเท่ากับ 6.8

ภาคผนวก ข

สารเคมี

1. การเตรียมสารละลายฟีนอล ความเข้มข้นร้อยละ 5.0

- 1.1 ละลายฟีนอล 50.0 ในน้ำกลั่น 700 มิลลิลิตร
- 1.2 เติมน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร ผสมสารละลายให้เข้ากัน
- 1.3 เก็บสารละลายฟีนอล ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 ที่ได้ไว้ในขวดสีชา

2. การเตรียมสารละลายแป้งมันสำปะหลัง (Starch) มาตรฐาน

- 2.1 ชั่งแป้งมันสำปะหลัง 1.0 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่น แล้วนำไปต้มจนแป้งละลายในน้ำหมด
- 2.2 เทน้ำแป้งสุกใส่ในขวดปรับปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
- 2.3 เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตรครบ 100 มิลลิลิตร เก็บเป็น stock solution
- 2.4 นำ stock solution มาเจือจางให้ได้สารละลายมาตรฐานที่มีแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น
0 - 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 0.0417 M

- 3.1 ละลายโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 12.259 กรัม (อบที่ 103 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง) ลงในน้ำกลั่น
- 3.2 ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตรด้วยน้ำกลั่น ในขวดปรับปริมาตร
- 3.3 เก็บสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 0.0417 M ในขวดสีชา

4. การเตรียมสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต 0.25 M

- 4.1 ละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต [$Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$] ชนิดเออาร์ 98.0 กรัม ในน้ำกลั่น
- 4.2 เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20.0 มิลลิลิตร ลงไป ทำให้เย็นแล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร

การหาความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

นำสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต 10.0 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 100.0 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 30.0 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น นำมาไทเทรตด้วยสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต โดยใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด

$$\text{โมลาริตี (M)} = \frac{(\text{มิลลิลิตรของโพแทสเซียมไดโครเมต}(0.0417 \text{ M}) \times 0.25)}{\text{มิลลิลิตรของเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต}}$$

มิลลิลิตรของเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

วิธีวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total sugar) โดยวิธีฟินอล – ซัลไฟวริก (ตามวิธีของ dubois, 1956)

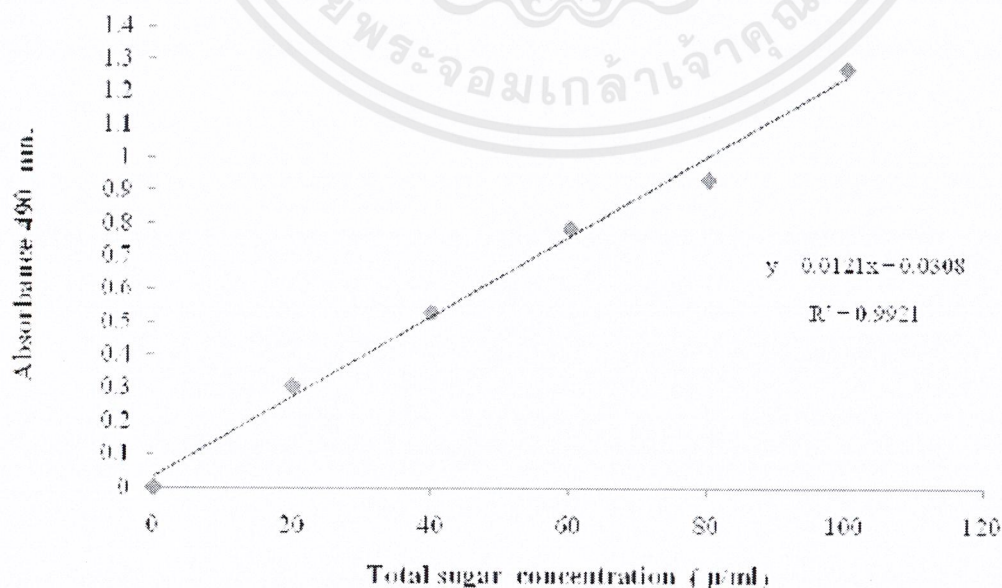
1.1 หากกราฟมาตรฐาน โดยใช้แป้งมันสำปะหลังสุกที่มีความเข้มข้น 0 - 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

1.2 นำสารละลายตัวอย่างละ 1.0 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดสอบ เดิมสารละลายฟินอล ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 ลงไป 1.0 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน

1.3 เติมกรดซัลไฟวริกความเข้มข้นร้อยละ 98.0 ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร ลงไปอย่างรวดเร็วภายในตู้ดูดควัน โดยปล่อยกรดลงไปทีผิวหน้าของเหลวโดยตรง จะทำให้การผสมดีมากกว่าการค่อยๆ ปล่อยลงข้างหลอด

1.4 ตั้งหลอดทดสอบของสารละลายผสมทิ้งไว้ 10 นาที จากนั้นนำมาเขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้อีก 10 - 20 นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

1.5 นำไปแช่เย็นเป็นเวลา 20 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร เขียนกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับปริมาณน้ำตาล เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การวิเคราะห์ซีโอดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด/การไตเตรท (Closed Reflux , Titrimetric Method)

2.1 ชั่งเมอร์คิวรีซัลเฟต (HgSO_4) 0.4 กรัม ใส่ในขวดก้นกลม

2.2 เติมตัวอย่างน้ำ 20.0 มิลลิลิตร หรือส่วนของตัวอย่างที่เจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้

ปริมาตร 20.0 มิลลิลิตร

2.3 เติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต 10 มิลลิลิตร จากนั้นค่อยๆ เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไป 30.0 มิลลิลิตร

2.4 เขย่าสารละลายทั้งหมดให้เข้ากันดี นำขวดต่อเข้ากับเครื่องควบแน่น กลั่นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาดังตั้งให้เย็น ล้างเครื่องควบแน่นด้วยน้ำกลั่นก่อนที่จะถอดเครื่อง

2.5 ไทเทรตสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลือด้วยสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต โดยใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์ (2 - 3 หยด) จนกระทั่งสีของสารละลายเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง แสดงว่าถึงจุดยุติ

2.6 ทำแบลนด์โดยใช้ น้ำกลั่น แทนตัวอย่างน้ำ และดำเนินการเช่นเดียวกันกับตัวอย่างทุก

ประการ

การคำนวณ

ซีโอดี (มิลลิกรัมออกซิเจนต่อลิตร) = $[(A - B) \times C \times 8000] / \text{มิลลิลิตรของน้ำตัวอย่าง}$

เมื่อ A = มิลลิลิตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้กับแบลนด์

B = มิลลิลิตรของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟตที่ใช้กับตัวอย่างน้ำ

C = โมลาริตี (M) ของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

หมายเหตุ ในขณะที่กลั่นตัวอย่างน้ำกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ถ้าสารละลายในขวดเปลี่ยนจากสีส้มเป็นสีเขียวแสดงว่าใช้น้ำตัวอย่างมากเกินไปต้องนำมาทำใหม่ โดยใช้ปริมาตรน้ำน้อยกว่าเดิมหรือนำมาทำให้เจือจางลง

3. การวิเคราะห์กรดไขมันระเหยง่าย (Bouskova และคณะ, 2005)

Gas Chromatography (GC)

3.1 หากกราฟมาตรฐาน โดยใช้กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทีริก และกรดวาเลอริก ที่มีความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์ มาเจือจางที่ระดับความเจือจางต่างๆ

3.2 ใช้เข็มฉีดยาอย่างดูดสารตัวอย่าง 2 ไมโครลิตร จากนั้นโหลดสารตัวอย่างเข้าคอลัมน์ โดยให้อุณหภูมิเริ่มต้นที่คอลัมน์เท่ากับ 100 องศาเซลเซียส โดยให้อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิ 230 องศาเซลเซียส และกำหนดอุณหภูมิที่สี่เทกเตอร์เท่ากับ 250 องศาเซลเซียส

3.3 นำกราฟที่ได้มาคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟ

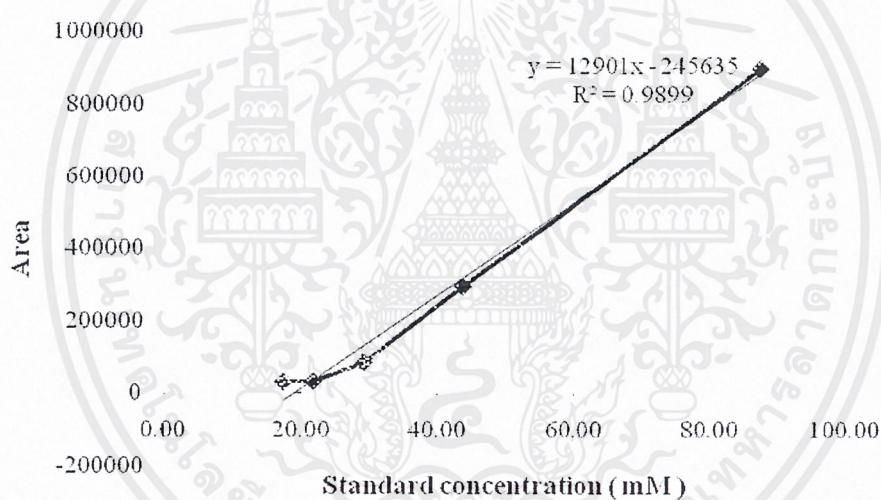


Fig. 3.1 Acetic acid standard curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

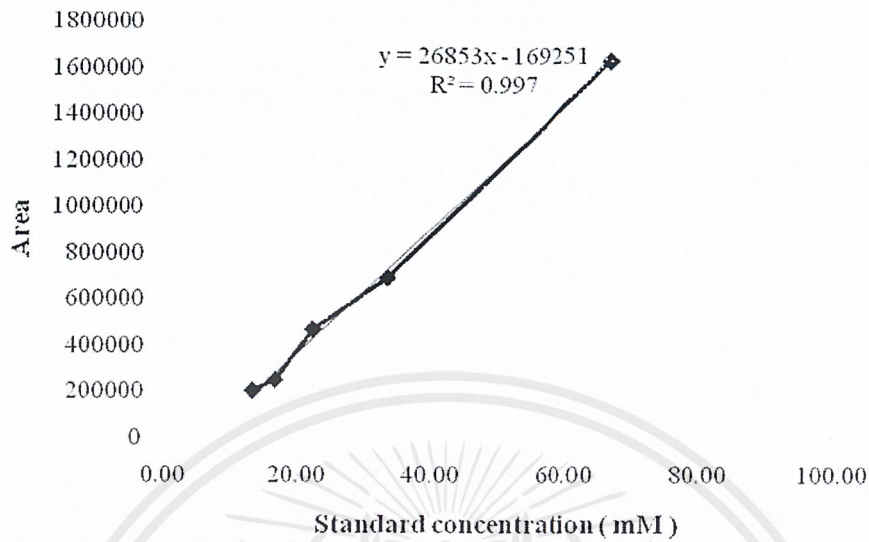


Fig.2 Propionic acid standard curve

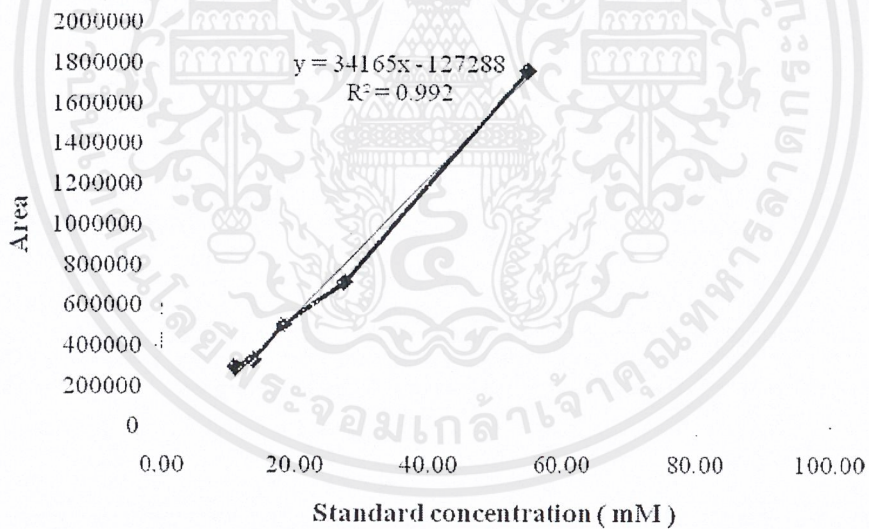


Fig.3 Butyric acid standard curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

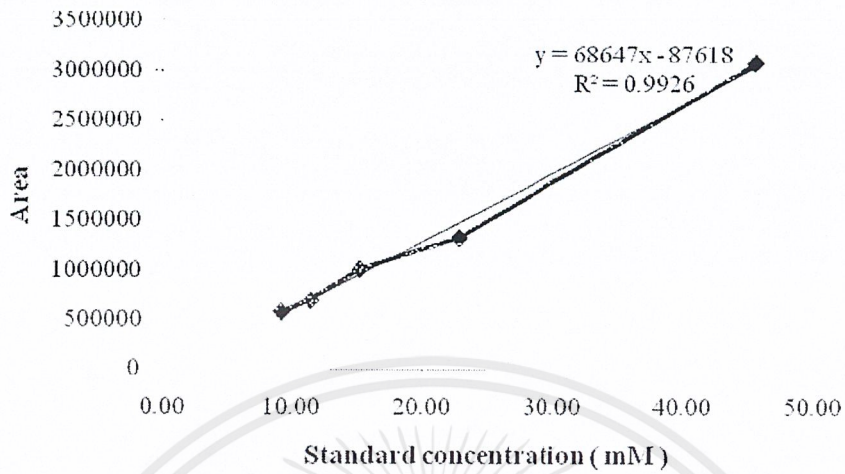


Fig.4 Valeric acid standard curve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้