



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง และยีสต์ ใน
อาหารที่มีแป้งและเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ

Power generation by microbial fuel cell of photosynthetic bacteria and
yeast in culture medium composed starch and cellulose

ผศ.ดร. สมชาย ไกรรักษ์

สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

และ

ผศ. นิศา ไกรรักษ์

ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง และยีสต์ ใน
อาหารที่มีแป้งและเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ

Power generation by microbial fuel cell of photosynthetic bacteria and
yeast in culture medium composed starch and cellulose

ผศ.ดร. สมชาย ไกรรักษ์

สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

และ

ผศ. นิสา ไกรรักษ์

ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

b00264318

RD 00025

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง และ
ยีสต์ ในอาหารที่มีแป้งและเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ

ชื่อโครงการ(ภาษาอังกฤษ)...Power generation by microbial fuel cell of photosynthetic bacteria
and yeast in culture medium composed starch and cellulose

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2555 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 266,400 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ ตุลาคม 2554 ถึง กันยายน 2555

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย

นาย สมชาย ไกรรักษ์ (หัวหน้าโครงการ)

หน่วยงาน สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า

คุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520, kksomcha@kmitl.ac.th

นาง นิสา ไกรรักษ์ (ผู้วิจัยร่วม)

หน่วยงาน ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131,

nisa@buu.ac.th

คำสำคัญ (Keywords) เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ แป้งมันสำปะหลัง เซลลูโลส

บทคัดย่อ

การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องเคียวระหว่าง *Rhodospseudomonas* sp. (S12 OS33 และ 14) และ *Saccharomyces cerevisiae* พบว่าการเจริญในอาหารกลูโคส แป้งมันสำปะหลัง และเซลลูโลส ให้การสร้างกระแสไฟฟ้า 3.7 11.3 และ 0.7 ไมโครแอมป์ ตามลำดับ แต่เมื่อใช้เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่พบการสร้างไฟฟ้าในอาหารกลูโคส และแป้งมันสำปะหลัง 0.7 7.2 และ 0.3 ไมโครแอมป์ ตามลำดับ นำเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่มาศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ทำให้สร้างไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 35.9 ไมโครแอมป์ เมื่อ *Rhodospseudomonas* sp. (S12 OS33 และ 14) เจริญในแป้งมันสำปะหลัง ที่บริเวณแอโนด ในสภาพไร้อากาศ ภายใต้แหล่งกำเนิดแสงฮาโลเจน ที่ความเข้ม 1500 ลักซ์ และใช้แผ่นเมมเบรน ultrafiltration ขนาด 5 K-Da กั้นแยกบริเวณแคโทดที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลี้ยง *Saccharomyces cerevisiae* ในกลูโคส ได้รับอากาศ 1.5 ปริมาตรอากาศต่อปริมาตรอาหารต่อ นาที ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และใช้ขั้วอิเล็กโทรดแพลตินัมรับอิเล็กตรอน ซึ่งให้การสร้างไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 5 เท่า อย่างไรก็ตามการสร้างไฟฟ้าลดลงเมื่อจุลินทรีย์ใช้สารอาหารหมดลง จึงประยุกต์ใช้การเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง พบว่าที่อัตราการไหลของอาหาร 75 ไมโครลิตรต่อนาที ส่งผลให้การสร้างไฟฟ้าเพิ่มเป็น 125-142 ไมโครแอมป์ อย่างสม่ำเสมอ ตลอดช่วงระยะเวลา 17 วัน ของการเลี้ยงเชื้อ ซึ่งเป็นผลมาจากกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นกรดอินทรีย์ อิเล็กตรอน และโปรตอน ดำเนินไปอย่างต่อเนื่อง และยังคงส่งผลให้การสร้างแอลกอฮอล์ในบริเวณ แกลโทลลดลง

Abstract

The electrical production by single-chamber microbial fuel cell (MFC) of *Rhodospseudomonas* sp. (S12 OS33 and 14) and *Saccharomyces cerevisiae* was observed. It was found that the electricity was generated at 3.7, 11.3 and 0.7 μA by cultivating in glucose, starch and CMC, respectively. In case of dual-chamber MFC, the electricity was produced by 0.7, 7.2 and 0.3 μA , respectively. The electrical production by dual-chamber MFC was optimized. The result showed that, the electricity was increased up to 35.9 μA when *Rhodospseudomonas* sp. (S12 OS33 และ 14) was grown in anodic chamber consuming starch under anaerobic condition, 1500 lux of halogen lamp intensity, while *Saccharomyces cerevisiae* was cultivated in cathodic chamber assimilating glucose with aeration rate of 1.5 VVM at 35°C. Both of anodic chamber and cathodic chamber were separated by ultrafiltration membrane (5.0 K-Da) and platinum electrodes were integrated for electron transfer. This condition, the electricity was increased up to 5 times. However, the electricity gradually decreased as the depletion of nutrients. To stabilize the electrical production, then the continuous culture was applied. By using medium feed rate at 75 μL per min., the dual-chamber MFC produced 125-142 μA of electricity constantly for 17 days of cultivation. It was concluded that, the microbial activity converted the macromolecules to organic acids and released electron and proton continuously. It also found that the ethanol, in cathodic chamber, was low.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัย “การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง และยีสต์ ในอาหารที่มีแป้งและเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ” ดำเนินงานไปได้ด้วยดี โดยได้รับความสนับสนุนจากทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2555 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมา ณ ที่นี้ นอกจากนี้ ขอขอบคุณคณาจารย์ นักวิทยาศาสตร์ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้ความสะดวกในการทำวิจัย และในทุกๆ ด้านงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ผศ.ดร. สมชาย ไกรรักษ์

ผศ. นิสา ไกรรักษ์

(คณะผู้วิจัย)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ก
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ข
สารบัญภาพ.....	ข
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน.....	3
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	6
2.1 เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ (Microbial fuel cell).....	7
2.2 ประวัติการพัฒนาเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์.....	9
2.3 จุลินทรีย์ที่ใช้สำหรับเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์.....	11
2.4 การออกแบบเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์.....	14
2.5 ประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์.....	21
2.6 การประยุกต์ใช้ประโยชน์.....	23
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 เชื้อจุลินทรีย์.....	32
3.2 สารเคมี และอาหารเลี้ยงเชื้อ.....	32
3.3 การวิเคราะห์.....	32
3.4 การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์และการเลี้ยงเชื้อ.....	33
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผล.....	40
4.1 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องเดี่ยว (single chamber).....	40
4.2 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ (dual chamber).....	49
4.3 สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตพลังงานของเซลล์ไฟฟ้าจากจุลินทรีย์.....	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ (dual chamber) ด้วยการเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง (continuous cultivaiton).....59

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ62

5.1 สรุปผลการทดลอง62

5.2 ข้อเสนอแนะ.....66

เอกสารอ้างอิง.....67

ภาคผนวก ก.....77

ภาคผนวก ข.....78



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

<u>ตารางที่ 2.1</u>	จุลินทรีย์ที่ใช้ในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์.....	12
<u>ตารางที่ 2.2</u>	แสดงองค์ประกอบพื้นฐานของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์.....	15
<u>ตารางที่ 2.3</u>	ปฏิกิริยาชีวอิเล็กโทรดของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ และความสัมพันธ์ ศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์	22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1	แผนภาพเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์พื้นฐาน ซึ่งประกอบด้วยส่วนแอโนด และแคโทด.....8
ภาพที่ 2.2	แสดงองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการส่งอิเล็กตรอนจากภายในเซลล์ไปยังขั้วแอโนดในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เมื่อใช้จุลินทรีย์ที่สามารถรีดิวซ์โลหะ (กลุ่ม <i>Geobacter species</i>) 13
ภาพที่ 2.3	แบบแผนการส่งอิเล็กตรอนผ่านสารเคมีต่างๆ ที่มีคุณสมบัติรับ-ส่งอิเล็กตรอนระหว่างกิจกรรมเคมีไฟฟ้าชีวภาพของจุลินทรีย์ และขั้วแอโนด 14
ภาพที่ 2.4	แสดงแผนภาพเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ รูปทรงกระบอก (A) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (B) รูปรางลดขนาด (C) รูปแบบการไหลขึ้นภายในทรงกระบอก (D) รูปทรงกระบอกที่มีส่วนแคโทดโค้งภายใน (E)..... 16
ภาพที่ 2.5	แสดงแผนภาพด้านบน (A) และด้านข้าง (B) ของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์แบบแผ่น flat plate MFC..... 17
ภาพที่ 2.6	แสดงเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่มีเยื่อเลือกผ่าน โปรตอนหุ้มด้านในของช่องต่อขั้วแคโทด (A) เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์รูปทรงกระบอกที่มีขั้วแอโนดและแคโทดอยู่ตรงกันข้าม (B) และเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ทรงกระบอกที่มีขั้วแคโทดด้านนอกและขั้วแอโนดด้านในบนแผ่นกราไฟต์ (C)..... 19
ภาพที่ 2.7	แสดงภาพทรงกระบอกของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ชนิด SC-MFC ซึ่งประกอบด้วย 8 แท่งกราไฟต์ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด เรียงรอบขั้วแคโทดที่อยู่ตรงกลาง 19
ภาพที่ 2.8	แสดงเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ชนิดมีสารส่งอิเล็กตรอนแต่ไม่มีแผ่นเมมเบรนกันรูปทรงกระบอก (A) และรูปทรงสี่เหลี่ยม (B) 20
ภาพที่ 2.9	แสดงเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์นำมาเรียงต่อกัน 6 ชั้น มีแท่งกราไฟท์เป็นขั้วแอโนด 21
ภาพที่ 2.10	รูปแบบเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงแบบสารส่งอิเล็กตรอน 25
ภาพที่ 2.11	เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงแบบตัวกระตุ้นทางไฟฟ้า 27
ภาพที่ 2.12	เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงร่วมกับการย่อยสลายสารอินทรีย์ 28
ภาพที่ 2.13	เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงจากตะกอนดินระหว่างพืช และจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์..... 29
ภาพที่ 2.14	เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้แสงที่ขั้วแอโนด..... 30
ภาพที่ 2.15	เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่ส่งอิเล็กตรอนจากแบคทีเรียสังเคราะห์แสงไปยังอิเล็กโทรดโดยตรง 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.16 เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงที่ขั้วแคโทดเพื่อสร้างออกซิเจน.....31

ภาพที่ 3.1 แสดงการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องเดี่ยว (single chamber)
โดยที่ A หมายถึงตำแหน่งอิเล็กโทรด และ B หมายถึงตำแหน่งที่อากาศเข้าสู่ระบบ
ซึ่งบริเวณด้านล่างต่ำกว่าตำแหน่งให้อากาศ หมายถึงบริเวณแอโนด และด้านบน
สูงกว่าตำแหน่งให้อากาศ หมายถึงบริเวณแคโทด34

ภาพที่ 3.2 แสดงการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ (dual chamber)
A) หมายถึงตำแหน่งอิเล็กโทรด โดยขดที่ 1 หมายถึงบริเวณแอโนด
และขดที่ 2 หมายถึงบริเวณแคโทด ซึ่งมีแผ่นเมมเบรนกั้นระหว่างขดทั้ง 2.....35

ภาพที่ 3.3 แสดงการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ ด้วยการเลี้ยงเชื้อแบบ
ต่อเนื่อง (continuous cultivation) โดยขดที่ 1 หมายถึงบริเวณแอโนด และ
ขดที่ 2 หมายถึงบริเวณแคโทด ซึ่งมีแผ่นเมมเบรนกั้นระหว่างขดทั้ง 2.....39

ภาพที่ 4.1 แสดงการผลิตพลังงานจากการเลี้ยงเชื้อผสม *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33
และ 14 ในอาหารเหลว AM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ในสภาพ
ไร้อากาศ ภายใต้แสง 1500 ลักซ์40

ภาพที่ 4.2 แสดงการผลิตพลังงานจากการเลี้ยงเชื้อผสม *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33
และ 14 ในอาหารเหลว AM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน
ในสภาพไร้อากาศ ภายใต้แสง 1500 ลักซ์.....41

ภาพที่ 4.3 แสดงการผลิตพลังงานจากการเลี้ยงเชื้อผสม *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33
และ 14 ในอาหารเหลว AM medium ที่มี CMC เป็นแหล่งคาร์บอน ในสภาพ
ไร้อากาศ ภายใต้แสง 1500 ลักซ์42

ภาพที่ 4.4 แสดงการผลิตพลังงานจากการเลี้ยงเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ใน
อาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ในสภาพให้อากาศ
0.5 VVM ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส.....43

ภาพที่ 4.5 แสดงการผลิตพลังงานจากการเลี้ยงเชื้อผสม *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33
และ 14 และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในอาหารเหลว AM medium
และ YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ในสภาพให้อากาศ 0.5 VVM
ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ภายใต้แสง 1500 ลักซ์.....44

ภาพที่ 4.6 แสดงการผลิตพลังงานจากการเลี้ยงเชื้อผสม *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33
และ 14 และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในอาหารเหลว AM medium
และ YM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลัง และกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพให้อากาศ 0.5 VVM ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ภายใต้แสง 1500 ลักซ์	46
ภาพที่ 4.7 แสดงการผลิตพลังงานจากการเลี้ยงเชื้อผสม <i>Rhodospseudomonas</i> sp. S12 OS33 และ 14 และเชื้อยีสต์ <i>Saccharomyces cerevisiae</i> ในอาหารเหลว AM medium และ YM medium ที่มี CMC และกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ในสภาพให้อากาศ 0.5 VVM ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ภายใต้แสง 1500 ลักซ์	47
ภาพที่ 4.8 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ ด้วยการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงด้วยกลูโคส (A) บริเวณแอโนด และเลี้ยงเชื้อยีสต์ (B) บริเวณแคโทด และให้การสร้างไฟฟ้า (C)	50
ภาพที่ 4.9 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ ด้วยการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงด้วยแป้งมันสำปะหลัง (A) บริเวณแอโนด และเลี้ยงเชื้อยีสต์ (B) บริเวณแคโทด และให้การสร้างไฟฟ้า (C)	51
ภาพที่ 4.10 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ ด้วยการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงด้วย CMC (A) บริเวณแอโนด และเลี้ยงเชื้อยีสต์ (B) บริเวณแคโทด และให้การสร้างไฟฟ้า (C)	52
ภาพที่ 4.11 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เมื่อใช้อัตราการให้อากาศในบริเวณ cathodic chamber ที่ระดับ 0.5 VVM	54
ภาพที่ 4.12 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เมื่อใช้แผ่นกั้นเมมเบรนขนาดรูพรุน 1 K-Da (○); 5 K-Da (□) และ 10 K-Da (△)	55
ภาพที่ 4.13 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เมื่อใช้อิเล็กโทรดชนิด Platinum (○); Iron (□) และ Cupper (△)	56
ภาพที่ 4.14 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เมื่อแหล่งกำเนิดแสงชนิด Tungsten lamp (○); Fluorescent lamp (□) และ Halogen lamp (△)	57
ภาพที่ 4.15 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เมื่อใช้ความเข้มแสงที่ระดับ 1500 ลักซ์ (○); 2000 ลักซ์ (□) และ 2500 ลักซ์ (△)	58
ภาพที่ 4.16 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่ใช้การเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง (continuous cultivation) A การเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงเมื่อใช้อัตราการให้อาหาร 50, 75 และ 100 ไมโครลิตรต่อนาที B การเจริญของเชื้อยีสต์ เมื่อใช้อัตราการให้อาหาร 500 ไมโครลิตรต่อนาที และ C การสร้างไฟฟ้าในระหว่างการเจริญจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงเมื่อใช้อัตราการให้อาหาร 50, 75 และ 100 ไมโครลิตรต่อนาที ตามลำดับ	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการวิจัย

การเพิ่มขึ้นของประชากรโลกเป็นเหตุผลสำคัญที่ก่อให้เกิดปัญหาความต้องการทางด้านอาหาร และพลังงาน ซึ่งนับวันจะทวีความรุนแรงเพิ่มมากขึ้น การพัฒนาของโลกอุตสาหกรรมในช่วงหลายร้อยปีที่ผ่านมาได้ทำให้คุณภาพชีวิตดีขึ้น ความเป็นอยู่ดีขึ้น ทำให้จำนวนประชากรเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้อุตสาหกรรมต้องเพิ่มขีดความสามารถขึ้นไปอีก หนึ่งในอุตสาหกรรมที่ได้รับผลกระทบอย่างมาก ได้แก่ อุตสาหกรรมอาหาร จึงต้องพัฒนาศักยภาพการผลิตเพิ่มขึ้น ใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น และมีของเหลือทิ้งเพิ่มขึ้น และก่อให้เกิดปัญหามลภาวะทางสิ่งแวดล้อมเป็นทวีคูณ ความต้องการพลังงาน และปริมาณพลังงานสำรองจึงเป็นยุทธศาสตร์ที่มีความสำคัญเร่งด่วนทั้งในปัจจุบัน และอนาคต การมองหาพลังงานทดแทนรูปแบบต่างๆ ทั้งประเภทที่ใช้แล้วหมดไป หรือนำกลับมาใช้ใหม่ได้ จึงได้รับความสนใจ และพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อสอดคล้องกับความต้องการที่เพิ่มมากขึ้น พลังงานทดแทนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้จัดเป็นการแก้ปัญหาพลังงานที่เหมาะสม และยั่งยืนที่สุด ได้แก่ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานไฮโดรเจน ไฮโดรเจนได้รับความสนใจ และมีการศึกษาวิจัยเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเป็นพลังงานทดแทนที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างไม่มีวันหมดสิ้น งานวิจัยต่างๆ มุ่งไปที่กระบวนการผลิตที่ใช้ต้นทุนทางเศรษฐกิจต่ำ แต่ก็พบปัญหาใหญ่เกี่ยวกับการเก็บรักษาผลผลิตไฮโดรเจนที่ได้ ซึ่งต้องใช้พื้นที่ และมีความเสี่ยงสูง

การผลิตไฮโดรเจนทางชีวภาพมีการวิจัยพัฒนาอย่างมาก โดยมุ่งไปในด้านพัฒนาศักยภาพการผลิตที่รวดเร็วขึ้น และเพิ่มผลได้มากขึ้น และประยุกต์ใช้แหล่งวัตถุดิบราคาถูกเพื่อกระบวนการผลิต ซึ่งเน้นไปใช้ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมเกษตร อาหาร และการหมักทางชีวภาพ (biofermentation) น้ำเสียส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยกรดอินทรีย์ น้ำตาล และแป้ง ซึ่งมีค่า COD เฉลี่ย 2000 มก.ต่อมล. นับว่าสูงมาก การแก้ปัญหาดังกล่าวต้องใช้เงินลงทุนสูง เพื่อบำบัดและกำจัดน้ำเสียเหล่านั้น ขณะเดียวกันก็สูญเสียมวลชีวะจำนวนมากที่มีอยู่ในน้ำเสียเหล่านั้นไปอย่างน่าเสียดาย จึงพัฒนากระบวนการเลี้ยงเชื้อเพื่อบำบัดน้ำเสียในสภาพไร้อากาศ และมีแสง (light anaerobic fermentation) จากจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงกลุ่มไม่สะสมซัลเฟอร์ (purple non-sulfur photosynthetic bacteria) เพื่อผลิตไฮโดรเจน ทำให้ได้ประโยชน์ทั้งในแง่การผลิตพลังงานสะอาด และบำบัดน้ำเสียไปพร้อมๆ กัน แต่อย่างไรก็ตามปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาจส่งผลกระทบต่อการศึกษา จึงมีแนวความคิดประยุกต์การเลี้ยงเชื้อร่วมกันระหว่างจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง และยีสต์ ในลักษณะของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เพื่อเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ไฮโดรเจนที่ได้ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเก็บรักษาได้ง่ายกว่า และนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายกว่า

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการสร้างเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์จากเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง และยีสต์ ในอาหารสังเคราะห์ที่มีแป้ง หรือเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบ
2. ศึกษาารูปแบบเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องเดี่ยว (single chamber) และห้องคู่ (dual chamber)
3. ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง และยีสต์ เพื่อให้การผลิตไฟฟ้าของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง และยีสต์
4. ศึกษาการเจริญและการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ ด้วยการเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงกลุ่มไม่สะสมกำมะถัน (purple non-sulfur photosynthetic bacteria) และเชื้อยีสต์ ที่เจริญในเซลล์ไฟฟ้า และมีเยื่อเมมเบรนกั้นแยกให้เชื้อทั้ง 2 เจริญในสภาวะต่างกัน ได้แก่ ร้อยออกซิเจน และมีออกซิเจน ตามลำดับ โดยใช้สารอาหารที่มีองค์ประกอบของแป้งและเซลลูโลสเป็นแหล่งคาร์บอน เพื่อใช้ย่อยสลาย และเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าต่อไป การเลี้ยงเชื้อทั้ง 2 ชนิด ในภาชนะแยกจากกัน จำเป็นต้องศึกษาในส่วนของการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงกลุ่มไม่สะสมกำมะถันเกี่ยวกับการเจริญ และการย่อยสลายสารอาหาร ผลของการได้รับแสง ความเข้มแสง สารอาหารที่เกี่ยวข้องต่อการปลดปล่อยอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด สำหรับเชื้อยีสต์จำเป็นต้องศึกษาในด้านการใช้สารอาหาร การให้อากาศ เพื่อกระตุ้นการรับอิเล็กตรอนของขั้วแคโทด ขณะเดียวกันก็จำเป็นต้องศึกษาปัจจัยของแผ่นเมมเบรนเลือกผ่าน เพื่อให้โปรตอนเคลื่อนที่จากส่วนแอโนด ไปยังส่วนแคโทดได้ดี ได้แก่ ความพรุน และขนาดแผ่นเมมเบรน การทดลองที่ผ่านมามีสามารถคัดแยกเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงกลุ่มไม่สะสมกำมะถัน และเชื้อยีสต์ที่สามารถย่อยสลายแหล่งคาร์บอนพอลิเมอร์ ประเภทแป้ง และผลิตไฮโดรเจน จึงนำมาศึกษาต่อเนื่องเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า ทดแทนการผลิตไฮโดรเจน ซึ่งทำให้ลดข้อจำกัดการเก็บรักษาไฮโดรเจนที่ได้จากเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

คัดแยกจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงกลุ่ม (purple non-sulfur photosynthetic bacteria) ที่สามารถเจริญบนอาหารที่มีแป้งมันสำปะหลัง และเซลลูโลส เป็นแหล่งอาหาร และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* มาศึกษาลักษณะ และสัณฐานวิทยาได้กล้องจุลทรรศน์ ศึกษาความสามารถในการใช้แหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ รวมทั้งแป้งมันสำปะหลัง และเซลลูโลส

1. เชื้อจุลินทรีย์

นำเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง (purple non-sulfur photosynthetic bacteria) และเชื้อยีสต์ ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มีคุณสมบัติย่อยสลายพอลิเมอร์ (แป้ง และข้าว) มาเลี้ยงเชื้อร่วมกัน โดยเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงในส่วนแอนโนด (ไร้ออกซิเจน) และเลี้ยงเชื้อยีสต์ในส่วนแคโทด (ให้ออกซิเจน) โดยมีแผ่นเมมเบรนกั้นเพื่อแยกทั้ง 2 ส่วนออกจากกัน เชื้อจุลินทรีย์ทั้ง 2 เลี้ยงในอาหารเหลวที่มีแป้งหรือเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ

2. ศึกษาการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

การเลี้ยงแบคทีเรียสังเคราะห์แสงในส่วนแอนโนด โดยใช้อาหารเหลวที่มีน้ำตาลกลูโคส แป้ง หรือเซลลูโลส เป็นองค์ประกอบ ที่ความเข้มข้นเหมาะสมต่อการเจริญ ที่อุณหภูมิ 35-40 องศาเซลเซียส ได้รับแสงความเข้ม 1000 ถึง 2500 ลักซ์ ตลอดเวลา หรือมีช่วงเวลาได้รับแสงและไม่ได้รับแสง เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์การเจริญ การย่อยสลายสารอาหาร ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวซ์ การผลิตกระแสไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

การเลี้ยงเชื้อยีสต์ในส่วนแคโทด โดยใช้อาหารเหลวที่มีน้ำตาลกลูโคสเป็นองค์ประกอบ ที่ความเข้มข้นเหมาะสมต่อการเจริญ ที่อุณหภูมิ 30-40 องศาเซลเซียส อัตราการให้อากาศระดับต่างๆ (VVM) เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์การเจริญ การย่อยสลายสารอาหาร ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ การผลิตกระแสไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

3. ศึกษาชนิดและขนาดเมมเบรนเลือกผ่านในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

แผ่นเมมเบรนเลือกผ่านที่แบ่งกั้นส่วนแอนโนดและแคโทดออกจากกันมีผลต่อการเคลื่อนที่ของโปรตอน เปรียบเทียบเมมเบรนชนิดต่างๆ ได้แก่ คาร์บอน ผ้า วัสดุชนิดต่างๆ เมมเบรนนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบรชนิดต่างๆ ต่อการสร้างพลังงาน การจับเกาะของจุลินทรีย์แล้วเกิดเป็นแผ่นฟิล์มชีว (biofilm) บนผิวหน้าเมมเบรน เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์การผลิตกระแสไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

4. ศึกษารูปทรงเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องเดี่ยว (single chamber) และห้องคู่ (dual chamber) และการเชื่อมต่อส่วนแอโนด และแคโทด มีของแผ่นเมมเบรน การได้รับแสง (ส่วนแอโนด) และการได้รับออกซิเจน (ส่วนแคโทด) และประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน และลดปัญหาเกี่ยวกับการบดบังแสงที่จุลินทรีย์ได้รับ เช่นเดียวกับรูปร่างลักษณะในส่วนแคโทดที่เหมาะสมต่อการได้รับอากาศ เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์การเจริญ การย่อยสลายสารอาหาร ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ การผลิตกระแสไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

5. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความเสถียรของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

ศึกษาการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ ด้วยการเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการไหลของอาหารเหลวต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และความเสถียรของการผลิตพลังงาน จากเซลล์ไฟฟ้า โดยทดสอบและควบคุมให้มีค่าเหมาะสมแล้วนำตัวอย่างมาวิเคราะห์การเจริญ การย่อยสลายสารอาหาร ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ การผลิตกระแสไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตพลังงาน

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

โครงการวิจัยนี้มุ่งผลสำเร็จไปที่การนำความรู้เบื้องต้นที่เคยศึกษามาแล้วจากการคัดแยกเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงที่สามารถผลิตไฮโดรเจนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์พอลิเมอร์ เช่น แป้ง และเซลลูโลส และเชื้อยีสต์ที่สามารถเจริญในแป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน การนำเชื้อทั้ง 2 ชนิด มาเลี้ยงด้วยกันในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ นำส่งผลให้การย่อยสลายได้อินทรีย์พอลิเมอร์เกิดขึ้นได้ดี ทำให้มีการปริมาณสารอินทรีย์ตั้งต้น (กรดอินทรีย์) ที่เพียงพอสำหรับให้โปรตอน (ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านเยื่อกั้นเมมเบรนไปยังห้องแคโทด แล้วไปยังขั้วแคโทดเพื่อรับอิเล็กตรอน) และอิเล็กตรอน (ซึ่งเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด แล้วไหลผ่านวงจรภายนอกไปจนถึงขั้วแคโทด) พลังงานที่ได้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เลย หรือเก็บสะสมเพื่อใช้

ในยามต้องการ ซึ่งต่างจากการผลิตไฮโดรเจนที่ต้องคำนึงถึงการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่ได้ ซึ่งมีความเสี่ยงสูง สรุปรวมแล้วผลสำเร็จของโครงการวิจัยนี้อยู่ในระดับ P



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงกลุ่มไม่สะสมกำมะถัน สามารถผลิตไฮโดรเจน จากแหล่งอาหารอินทรีย์ที่เหลือทิ้งจากชุมชนบ้านเรือน และอุตสาหกรรมอาหาร และการเกษตร ซึ่งข้อดีของวิธีนี้ นอกจากช่วยลดปริมาณสารอินทรีย์ที่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมทางน้ำแล้วยังเป็นการนำของเหลือทิ้งกลับมาใช้ และเปลี่ยนเป็นพลังงานไฮโดรเจน ซึ่งเป็นพลังงานสะอาดหมุนเวียนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ จัดเป็นการแก้ปัญหาความต้องการพลังงานที่นับวันจะเพิ่มมากขึ้น และยังได้พลังงานชนิดที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตามการผลิตพลังงานไฮโดรเจนทางชีวภาพ (รวมทั้งการกระบวนการผลิตทางเคมี และกายภาพ) ก็ประสบปัญหาในด้านการเก็บรักษาผลผลิตไฮโดรเจน ซึ่งต้องมีพื้นที่จำนวนมาก เนื่องจากไฮโดรเจนเป็นก๊าซเฉื่อยที่ไม่ทำปฏิกิริยา อีกทั้งไฮโดรเจนติดไฟได้ง่าย (จุดวาบไฟต่ำ) งานวิจัยนี้มุ่งไปที่การเปลี่ยนรูปพลังงานไฮโดรเจนไปเป็นพลังงานแบบอื่น เช่น ไฟฟ้า ภายใต้แนวความคิดที่ว่าภายในแหล่งอาหารที่มีสารอินทรีย์เป็นองค์ประกอบ (มีพลังงานเคมีสะสมอยู่ในพันธะของสารอินทรีย์) นำมาผ่านการย่อยสลายโดยแบคทีเรียสังเคราะห์ด้วยแสง ได้เป็นกรดอินทรีย์เพื่อใช้เป็นแหล่งให้โปรตอนและอิเล็กตรอนสำหรับกิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสงของจุลินทรีย์ (นำพลังงานจากแสงมาใช้) โปรตอนที่ได้นี้จะนำไปเปลี่ยนเป็นก๊าซไฮโดรเจนโดยกิจกรรมของเอนไซม์ hydrogenase และ nitrogenase แต่ถ้าหยุดกระบวนการนี้โดยใช้เทคนิคเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ โดยเลี้ยงเชื่อมร่วมกันระหว่างแบคทีเรียสังเคราะห์ด้วยแสง (ส่วนแอโนด) และเชื้อยีสต์ (ส่วนแคโทด) ในสภาพมีแสงไร้อากาศ และได้รับอากาศ (ตามลำดับ) ซึ่งมีเมมเบรนเลือกผ่านโปรตอนกันทั้งสองส่วนออกจากกัน ส่วนแอโนดที่มีเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงเจริญในสภาวะได้รับแสงและไร้อากาศ สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เป็นโปรตอน และอิเล็กตรอน ซึ่งโปรตอนที่ได้อีกจะเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนเลือกผ่านไปยังส่วนแคโทด ขณะที่อิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนดแล้วเคลื่อนที่ออกด้านนอกเซลล์ไฟฟ้าผ่านวงจรทางไฟฟ้า แล้วจึงไหลกลับเข้ามายังเซลล์ไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่งที่ขั้วแคโทด เมื่อโปรตอนผ่านเมมเบรนเข้ามาในส่วนแคโทด ก็จะไปยังขั้วแคโทดเพื่อรับอิเล็กตรอน และออกซิเจน (ส่วนนี้มีการเลี้ยงเชื้อยีสต์ในสภาพได้รับออกซิเจน) แล้วกลายเป็นน้ำ ผลที่ได้คือการผลิตพลังงานไฟฟ้า แทนการผลิตไฮโดรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงและยีสต์ จำเป็นต้องศึกษากลไกการย่อยสลายอาหารกลุ่มสารอินทรีย์พอลิเมอร์ การได้รับแสง (ส่วน แอโนด) และอากาศ (ส่วนแคโทด) อย่างเหมาะสม แล้วจึงศึกษารูปแบบเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เพื่อให้มีการส่งโปรตอนผ่านเมมเบรนเลือกผ่านอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านชนิด และรูปร่าง พื้นที่ผิว เพื่อให้การผลิตไฟฟ้ามีศักยภาพสูงสุด

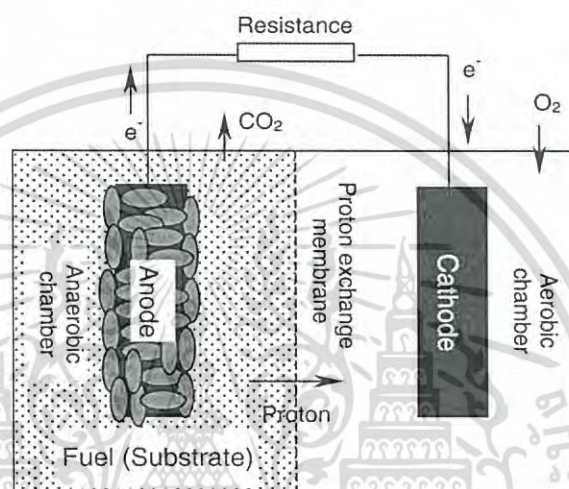
2.1 เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ (Microbial fuel cell)

เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์จัดเป็นถึงปฏิกรณ์ทางชีวภาพ สามารถเปลี่ยนพลังงานเคมี (อยู่ในรูปพันธะเคมีของสารประกอบอินทรีย์) ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้จุลินทรีย์เป็นตัวกระตุ้น ปฏิกิริยาภายใต้สภาวะไร้อากาศ ซึ่งไฟฟ้าที่ได้เป็นผลมาจากการแตกตัวของสารอินทรีย์ สภาพวิกฤตทางพลังงานทำให้ความสนใจศึกษาเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้น เพื่อเพิ่มการผลิตไฟฟ้า หรือไฮโดรเจนจากมวลชีว ที่ปราศจากการปลดปล่อยคาร์บอนเข้าสู่ระบบนิเวศน์วิทยา เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ นอกจากนี้ยัง ศึกษาถึงการนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านตัวตรวจวัดทางชีวภาพ (biosensor) ได้แก่ การติดตามระดับ ออกซิเจนที่นำไปใช้ในการย่อยสลายทางชีวภาพ (BOD) พลังงานไฟฟ้าที่ได้ และประสิทธิภาพ ความจุไฟฟ้า (Coulombic efficiency) สัมพันธ์กับชนิดของจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในส่วนแอโนด (anodic chamber) โครงสร้าง และสภาวะการทำงานของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ การประยุกต์ใช้ เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ในปัจจุบันยังมีข้อจำกัด เนื่องจากปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความหนาแน่นต่ำ (หลักพันมิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร) แต่ก็มีพยายามปรับปรุงประสิทธิภาพ และลดต้นทุนการ ก่อสร้าง และการดำเนินการของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

ปัจจุบันการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ได้แก่ น้ำมัน และก๊าซธรรมชาติ มีอัตรา เพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นวิกฤตการณ์ขาดแคลนพลังงาน แหล่งพลังงานทาง ชีวภาพจัดเป็นหนทางหนึ่งที่สามารถบรรเทาวิกฤตพลังงาน โดยมุ่งไปที่การพัฒนาพลังงาน ทางเลือก ได้แก่ การผลิตกระแสไฟฟ้า วิธีการผลิตไฟฟ้าแบบใหม่จากแหล่งธรรมชาติชนิด ใหม่ที่ปราศจากการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ จัดเป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจอย่างมาก (Lovley, 2006, Davis and Higson, 2007) เทคโนโลยีเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สามารถเปลี่ยน พลังงานที่เก็บสะสมอยู่ในพันธะเคมีของสารประกอบอินทรีย์ ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลมา จากจุลินทรีย์เป็นตัวกระตุ้น แนวทางนี้ได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์อย่างมาก (Allen and Bennetto, 1993; Gil *et al.*, 2003; Moon *et al.*, 2006; Choi *et al.*, 2003) จุลินทรีย์สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำมาใช้ในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าในระหว่างที่มีการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ หรือของเสีย (Park and Zeikus, 2000; Oh and Logan., 2005) ภาพที่ 2.1 แสดงแผนภาพพื้นฐานของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์เพื่อผลิตไฟฟ้า ซึ่งประกอบด้วยส่วนแอโนด (anodic chamber) และแคโทด (cathodic chamber) ที่แบ่งแยกออกจากกันด้วยแผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane, PEM) (Wilkinson, 2000; Gil *et al.*, 2003)



ภาพที่ 2.1 แผนภาพเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์พื้นฐาน ซึ่งประกอบด้วยส่วนแอโนด และแคโทด
ที่มา : Zhuwei *et al.*, 2007

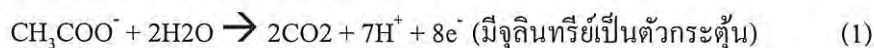
จุลินทรีย์ส่วนแอโนดของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ทำหน้าที่ออกซิไดซ์สารอินทรีย์พร้อมๆ กับการปลดปล่อยอิเล็กตรอน และโปรตอน ซึ่งมีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ร่วมของกระบวนการออกซิเดชัน แต่อย่างไรก็ตามไม่พบการปลดปล่อยคาร์บอนโดยรวม เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์ในชีวมวลในแหล่งธรรมชาติ มีจุดกำเนิดมาจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง แสดงว่ากระบวนการนี้ต่างไปจากการเผาไหม้โดยตรง เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด แล้วจึงส่งผ่านไปยังขั้วแคโทดโดยวงจรภายนอก ขณะที่โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านแผ่นเมมเบรน (หรือสะพานเกลือ) ไปยังขั้วแคโทดเพื่อรับอิเล็กตรอน แล้วเปลี่ยนเป็นน้ำ จุลินทรีย์ในส่วนแอโนดเป็นตัวแยกอิเล็กตรอน และโปรตอน ในระหว่างกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Rabaey and Verstraete, 2005) การผลิตกระแสไฟฟ้าจากจุลินทรีย์ต้องควบคุมไม่ให้ได้รับออกซิเจนหรือตัวรับอิเล็กตรอนในนอกเหนือไปจาก ขั้วแอโนด จึงจำเป็นต้องให้จุลินทรีย์เจริญอยู่ในสภาพไร้อากาศ

ปฏิกิริยาที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 แสดงดังสมการด้านล่าง โดยใช้อะซิเตทเป็นตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารอินทรีย์

ปฏิกิริยาชีวแอโนด (เมื่อใช้อะซิเตทเป็นสับสเตรท)



ปฏิกิริยาชีวแคโทด



ปฏิกิริยาโดยรวมทั้งหมดเกี่ยวข้องกับการย่อยสลายสารอินทรีย์ไปเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ พร้อมทั้งผลิตอิเล็กตรอนออกมาด้วย โดยพื้นฐานคู่อิเล็กโตรดข้างต้นอธิบายได้ว่าเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สามารถผลิตไฟฟ้าจากการไหลของอิเล็กตรอนจากส่วนแอโนดไปยังส่วนแคโทดโดยผ่านวงจรภายนอก

หลายปีที่ผ่านมาพบว่างานวิจัยเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ได้รับการพัฒนาอย่างมาก รวมทั้งรายงานการวิจัยตีพิมพ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ได้แก่ Logan *et al.* (2006) รายงานการออกแบบ จัดกลุ่ม และประสิทธิภาพเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ Rabaey and Verstraete (2005) รายงานเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่ใช้ในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ Lovley (2006) แสดงประสิทธิภาพของระบบเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ชนิด Benthic Unattended Generators (BUGs) เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานไฟฟ้าสำหรับตัวตรวจวัดระยะไกล (remote-sensing) หรืออุปกรณ์ติดตาม (monitoring devices) ภายใต้พื้นฐานสรีระวิทยาของจุลินทรีย์ Pham *et al.* (2006) สรุปข้อได้เปรียบ และเสียเปรียบของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์เทียบกับเทคโนโลยีการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (anaerobic digestion) ที่ผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน Chang *et al.* (2006) อธิบายคุณสมบัติกิจกรรมเคมีไฟฟ้าของจุลินทรีย์ที่ใช้ในระบบ “ไร้อาหารช่วยส่งอิเล็กตรอน” ของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ (mediator-less MFC) รวมถึงคอขวด (rate limiting step) ในการส่งผ่านอิเล็กตรอน Bullen *et al.* (2006) รวบรวมผลงานวิจัยต่างๆ และแสดงออกมาในรูปของเซลล์ไฟฟ้าชีวภาพ

2.2 ประวัติการพัฒนาเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

โดยทฤษฎีแล้วจุลินทรีย์ส่วนใหญ่สามารถนำมาใช้เป็นตัวกระตุ้นทางชีวภาพในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ได้ เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์อย่างง่ายสาธิตโดย Potter ปี 1990 (Ieropoulos, 2005) ซึ่งพลังงานไฟฟ้าสร้างจากการเลี้ยงเชื้อ *Escherichia coli* และ *Saccharomyces* โดยใช้อิเล็กโตรดแพลตตินัม (platinum electrodes) (Potter, 1912) แต่ปริมาณไฟฟ้าที่ได้ยังไม่เป็นที่น่าสนใจ จนกระทั่งยุค 1980s ค้นพบว่าการเติมสารส่งอิเล็กตรอน (electron mediator) มีผลให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาแน่นไฟฟ้า และไฟฟ้าที่ผลิตได้ มีค่าเพิ่มขึ้น ถ้าจุลินทรีย์ในส่วนแอนโอดไม่มีคุณสมบัติ “ความเป็นแอนโอด (anodophile)” พบว่าจุลินทรีย์นั้นไม่สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอนโอดโดยตรง เนื่องจากผนังเซลล์ด้านนอกของจุลินทรีย์ ได้แก่ peptidoglycans และ lipopolysaccharides ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ทำให้ไม่สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนจากภายในเซลล์ไปยังขั้วแอนโอดได้โดยตรง ดังนั้นการใช้สารส่งผ่านอิเล็กตรอน จึงส่งผลโดยตรงต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอนโอด (Davis and Higson, 2007) สารส่งผ่านอิเล็กตรอนมีสถานะออกซิไดซ์ ซึ่งสามารถจับกับอิเล็กตรอนได้ง่าย (ถูกรีดิวซ์ได้ง่าย) จากนั้นสารช่วยส่งอิเล็กตรอนจึงเคลื่อนที่ข้ามผนังเซลล์พร้อมทั้งปลดปล่อยอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอนโอด ทำให้ตัวสารเองกลับมามีสภาพออกซิไดซ์อีกครั้ง ซึ่งกระบวนการเปลี่ยนกลับไปมาของสารช่วยส่งอิเล็กตรอนทำให้เพิ่มอัตราการส่งอิเล็กตรอน และพลังงานไฟฟ้าที่ผลิตได้ สารช่วยส่งอิเล็กตรอนที่ดีมีคุณสมบัติต่อไปนี้ (Ieropoulos *et al.*, 2005)

- 1) สามารถเคลื่อนที่ผ่านผนังเซลล์เมมเบรนได้ง่าย
- 2) สามารถจับอิเล็กตรอน ที่ได้จากกระบวนการส่งผ่านอิเล็กตรอนภายในเซลล์ (electron transport chain)
- 3) ทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนได้อย่างรวดเร็ว
- 4) มีคุณสมบัติละลายได้ดีในส่วนแอนโอด
- 5) ไม่เป็นพิษ หรือถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์
- 6) ราคาถูก

สิ่งสำคัญที่สุดต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของสารส่งอิเล็กตรอนในสถานะออกซิไดซ์ ซึ่งมีค่าลดลงอันเป็นผลมาจากสารพลังงานสูงภายในเซลล์ (reducing power) โดยทฤษฎีแล้วสารส่งอิเล็กตรอนที่มีค่ารีดอกซ์ต่ำที่สุด ทำให้ส่วนแอนโอดมีค่ารีดอกซ์ต่ำ ส่งผลให้เกิดความต่างรีดอกซ์ระหว่างแอนโอดและแคโทดมีค่าสูงที่สุด (ความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุด) ซึ่งไม่จำเป็นสำหรับประสิทธิภาพสูงสุดต่อการผลิตอิเล็กตรอนจากสารรีดิวซ์ภายในเซลล์จุลินทรีย์ (ได้แก่ NADH, NADPH หรือ ไซโตโครมสเฟอริควิน (reduced cytochromes)) สารส่งอิเล็กตรอนที่มีศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์สูง ส่งผลให้ผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (Ieropoulos *et al.*, 2005) ได้แก่ โมเลกุลสี (dye) และสารอินทรีย์โลหะ (metallorganics) เช่น neutral red (NR), methylene blue (MB), thionine, meldola's blue (MeIB), 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone (HNQ) และ Fe(III)EDTA (Park and Zeikus, 2000; Tokuji and Kenji, 2003; Veag and Fernandez, 1987; Allen and Bennetto, 1993; Ieropoulos *et al.*, 2005) แต่สารเหล่านี้มีความเป็นพิษ และไม่เสถียร ทำให้เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้งานได้ค่อนข้างจำกัด จุลินทรีย์บางชนิดมีสารประกอบภายในเซลล์ (ได้แก่ สารเมแทบอไลต์ต่างๆ) ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวส่งผ่านอิเล็กตรอน (Endogenous mediators) ได้แก่ Humic acids, anthraquinone, อนุมูลออกซิเจนในสารประกอบซัลเฟต (oxyanions of sulphur (เช่น sulphate และ thiosulphate)) ซึ่งมีคุณสมบัติส่งอิเล็กตรอนจากด้านในผนังเซลล์เมมเบรนไปยัง ขั้วแอนโนด (Lovley, 1993) Kim *et al.*, 1999a, Chaudhuri และ Lovley, 2003 สามารถแก้ปัญหา การส่งผ่านอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอนโนดได้โดยตรง ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้มีความเสถียร และเพิ่ม ศักยภาพประจุไฟฟ้า (Chaudhuri and Lovley, 2003; Scholz and Schroder, 2003) ได้แก่ *Shewanella putrefaciens* (Kim *et al.*, 2002), *Geobacteraceae sulfurreducens* (Bond and Lovley, 2003), *Geobacter metallireducens* (Min *et al.*, 2005a) และ *Rhodospirillum rubrum* (Chaudhuri and Lovley, 2003) ซึ่งมีกิจกรรมเคมีไฟฟ้าทางชีวภาพ (bioelectrochemically active) และสร้างแผ่นฟิล์ม บนผิวหน้าขั้วแอนโนด ทำให้สามารถส่งอิเล็กตรอนโดยตรง เพราะผนังเซลล์สามารถนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นขั้วแอนโนดจึงทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย ในระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ประเภทนี้ ซึ่งเกาะติดที่ผิวหน้าขั้วแอนโนด แผ่นฟิล์มชีว (biofilm) สามารถเกิดขึ้นที่ พื้นผิวหน้าขั้วแคโทดได้เช่นกัน ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการส่งอิเล็กตรอนระหว่างจุลินทรีย์และขั้ว อิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้วแคโทดแสดงสถานะเป็นตัวให้อิเล็กตรอนแก่เชื้อ *Thiobacillus ferrooxidans* ที่อยู่ในสารละลายส่วนแคโทด (Prasad *et al.*, 2006) ซึ่งพบได้ในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่มีจุลินทรีย์ ทั้งในส่วนแอนโนด และส่วนแคโทด *G. metallireducens* และ *G. sulfurreducens* (Gregory *et al.*, 2004) หรือแผ่นฟิล์มชีวในน้ำทะเล (Bergel *et al.*, 2005) สามารถแสดงเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัว สุดท้าย โดยเข้าจับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ดังนั้นค่าใช้จ่าย สำหรับสารส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ใช้ในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ จึงตัดออกไปได้ ทำให้เซลล์ไฟฟ้า จุลินทรีย์ชนิดไร้สารส่งผ่านอิเล็กตรอนมีคุณสมบัติดีขึ้นสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำ เสีย และโรงงานผลิตกระแสไฟฟ้า (Ieropoulos *et al.*, 2005)

2.3 จุลินทรีย์ที่ใช้สำหรับเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ส่วนใหญ่มีความสามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ได้มาจากกระบวนการเมแทบอลิซึมสารอินทรีย์ไปยังขั้วแอนโนด (ดังแสดงในตารางที่ 2.1) ตะกอนดินก้นทะเล ดิน ตะกอนใต้น้ำ น้ำเสีย และสลัดจ์ (activated sludge) จัดเป็นแหล่งจุลินทรีย์ประเภทนี้ (Niessen *et al.*, 2006, Zhang *et al.*, 2006) งานวิจัยปัจจุบันสามารถคัดแยก และจัดจำแนกจุลินทรีย์ และสร้างแผนที่โครโมโซมของจุลินทรีย์เหล่านี้ที่สามารถสร้างไฟฟ้าได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Logan *et al.*, 2005; Holmes *et al.*, 2004; Back *et al.*, 2004)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

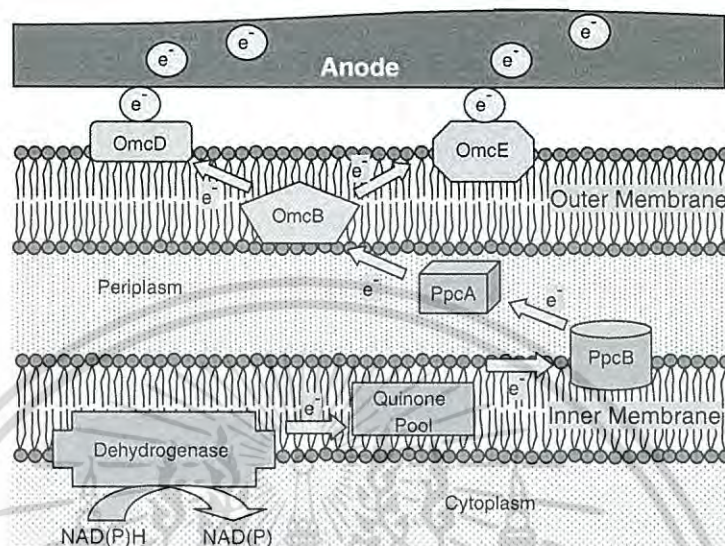
ตารางที่ 2.1 จุลินทรีย์ที่ใช้ในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

Microbes	Substrate	Applications
<i>Actinobacillus succinogenes</i>	Glucose	Neutral red or thionin as electron mediator (Park and Zeikus, 2000; Park and Zeikus, 1999; Park et al., 1999)
<i>Aeromonas hydrophila</i>	Acetate	Mediator-less MFC Pham et al. (2003)
<i>Alcaligenes faecalis</i> , <i>Enterococcus gallinarum</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Glucose	Self-mediate consortia isolated from MFC with a maximal level of 4.31 W m ⁻² . Rabaey (2004)
<i>Clostridium beijerinckii</i>	Starch, glucose, lactate, molasses	Fermentative bacterium Niessen et al. (2004b)
<i>Clostridium butyricum</i>	Starch, glucose, lactate, molasses	Fermentative bacterium (Niessen et al., 2004b; Park et al., 2001)
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	Sucrose	Sulphate/sulphide as mediator (Ieropoulos et al., 2005a; Park et al., 1997)
<i>Erwinia dissolvens</i>	Glucose	Ferric chelate complex as mediators Vega and Fernandez, (1987)
<i>Escherichia coli</i>	Glucose sucrose	Mediators such as methylene blue needed. (Schroder et al., 2003; Ieropoulos et al., 2005a; Grzebyk and Pozniak, 2005)
<i>Geobacter metallireducens</i>	Acetate	Mediator-less MFC Min et al. (2005a)
<i>Geobacter sulfurreducens</i>	Acetate	Mediator-less MFC (Bond and Lovley, 2003; Bond et al., 2002)
<i>Gluconobacter oxydans</i>	Glucose	Mediator (HNQ, resazurin or thionine) needed Lee et al. (2002)
<i>Klebsiella pneumoniae</i>	Glucose	HNQ as mediator biomineralized manganese as electron acceptor (Rhoads et al., 2005; Menicucci et al., 2006)
<i>Lactobacillus plantarum</i>	Glucose	Ferric chelate complex as mediators (Vega and Fernandez, 1987)
<i>Proteus mirabilis</i>	Glucose	Thionin as mediator (Choi et al., 2003; Thurston et al., 1985)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Glucose	Pyocyanin and phenazine-1-carboxamide as mediator (Rabaey et al., 2004, 2005a)
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	Glucose, xylose, sucrose, maltose	Mediator-less MFC (Chaudhuri and Lovley, 2003; Liu et al., 2006)
<i>Shewanella oneidensis</i>	Lactate	Anthraquinone-2,6-disulfonate (AQDS) as mediator (Ringeisen et al., 2006)
<i>Shewanella putrefaciens</i>	Lactate, pyruvate, acetate, glucose	Mediator-less MFC (Kim et al., 1999a,b); but incorporating an electron mediator like Mn (IV) or NR into the anode enhanced the electricity production (Park and Zeikus, 2002)
<i>Streptococcus lactis</i>	Glucose	Ferric chelate complex as mediators (Vega and Fernandez, 1987)

กลไกการส่งอิเล็กตรอนส่วนแอโนดในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ จัดเป็นสิ่งสำคัญที่จำเป็นต้องศึกษาเข้าใจทฤษฎีการทำงานของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์เป็นอย่างไร จากที่อธิบายข้างต้น พบว่าจุลินทรีย์ส่งอิเล็กตรอนไปยังขั้วอิเล็กโทรด โดยอาศัยระบบการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่ประกอบด้วยสารต่างๆ ที่อยู่บนผนังเซลล์เมมเบรน และสารละลายที่อยู่ในส่วนแอโนด *Geobacter* เป็นจุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถใช้โลหะ เพื่อผลิตพลังงานสำหรับใช้ในกิจกรรมทางชีวภาพซึ่งอยู่ในรูป ATP ระหว่างการใช้สารอาหาร พร้อมทั้งปฏิกิริยารีดักชันโลหะออกไซด์ภายใต้สภาวะไร้อากาศภายในดิน หรือตะกอนดินใต้น้ำ อิเล็กตรอนส่งไปยังตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย เช่น Fe₂O₃ เนื่องจากจุลินทรีย์รีดิวโลหะ (metal reducing microorganisms) สัมผัสกับ โลหะออกไซด์โดยตรง (Lovley et al., 2004; Vargas et al., 1998) ปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ใช้สารส่งอิเล็กตรอน ประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่สามารถรีดิวซ์โลหะ ซึ่งอยู่ในวงศ์ *Shewanella*, *Rhodospirillum*, และ *Geobacter* โดยขั้วแอโนดทำหน้าที่คล้ายเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย เช่นเดียวกับโลหะออกไซด์ ภาพที่ 2.2 แสดงสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับการส่งอิเล็กตรอนจากตัวรับ-ส่งอิเล็กตรอนภายในเซลล์ ไปยังโลหะของแข็งที่ใช้เป็นขั้วแอโนด โดยจุลินทรีย์ที่สามารถรีดิวซ์โลหะ (Lovley et al., 2004; Vargas et al., 1998; Holmes et al., 2004). *S. putrefaciens*, *G. sulfurreducens*, *G. metallireducens* และ *R. ferrireducens* ส่งอิเล็กตรอนไปยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอโนดด้วยวิธีการนี้

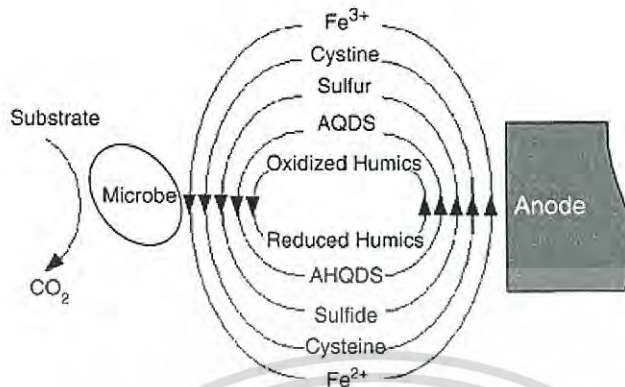


ภาพที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการส่งอิเล็กตรอนจากภายในเซลล์ไปยังขั้วแอโนดในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เมื่อใช้จุลินทรีย์ที่สามารถรีดิวซ์โลหะ (กลุ่ม *Geobacter* species) ที่มา : Lovley *et al.*, 2004

แม้ว่าเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ไร้สารส่งอิเล็กตรอน จำเป็นต้องใช้จุลินทรีย์ที่สามารถรีดิวซ์โลหะเพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ แต่ก็มีข้อยกเว้นสามารถใช้จุลินทรีย์อื่นได้ เช่น *Clostridium butyricum* (Oh and Logan, 2006; Park *et al.*, 2001) สารส่งอิเล็กตรอน เช่น โมเลกุลสี (dye molecules) และ สารประกอบฮิวมิก (humic substances) อาจส่งผลกระทบต่อเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ไร้สารส่งอิเล็กตรอน ทั้งที่ตัวจุลินทรีย์ประพติตัวเป็นแอโนด (anodophiles) สามารถส่งอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนดได้โดยตรง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระยะแรกของการสร้างแผ่นฟิล์มสารส่งอิเล็กตรอน เช่น Mn^{4+} หรือ neutral red (NR) สามารถร่วมจับกับขั้วแอโนดเมื่อใช้เชื้อ *S. putrefaciens* ทำให้ประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์มีค่าเพิ่มขึ้น (Park and Zeikus, 2002) สารส่งอิเล็กตรอนมีบทบาทสำคัญมากสำหรับจุลินทรีย์ที่ไม่สามารถส่งอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด กระบวนการพื้นฐานมีขั้นตอนแสดงในภาพที่ 2.3 (Lovley *et al.*, 1996, 2004; Ieropoulos *et al.*, 2005) พบว่าสารส่งอิเล็กตรอนมีหน้าที่รับ-ส่งอิเล็กตรอน โดยเริ่มจากจับอิเล็กตรอนจากจุลินทรีย์ แล้วจากนั้นจึงปล่อยไปยังผิวหน้าขั้วแอโนด *Actinobacillus succinogenes*, *Desulfovibrio desulfuricans*, *E. coli*, *Proteus mirabilis*, *Proteus vulgaris*, *Pseudomonas fluorescens* จำเป็นต้องได้รับสารส่งอิเล็กตรอนจากภายนอก ขณะที่จุลินทรีย์บางชนิดสามารถผลิตได้เอง ได้แก่

Pseudomonas aeruginosa สร้าง pyocyanin เพื่อรับ-ส่งอิเล็กตรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 แบบแผนการส่งอิเล็กตรอนผ่านสารเคมีต่างๆ ที่มีคุณสมบัติรับ-ส่งอิเล็กตรอนระหว่างกิจกรรมเคมีไฟฟ้าชีวภาพของจุลินทรีย์ และขั้วแอโนด

ที่มา : Lovley *et al.*, 2004

เมื่อนำเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์มาใช้งานร่วมกับดินตะกอนน้ำทะเล (marine sediments) หรือสลัดจ์ไร้อากาศ (anaerobic sludge) ทำให้มีเชื้อผสม (mixed culture) เจริญอยู่ในส่วนแอโนด (anodic microcosm) ทำให้เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพดีขึ้น เนื่องจากเชื้อผสมสามารถใช้สารอินทรีย์ได้หลากหลายชนิด ซึ่งอาจมีความหมายว่ามีประสิทธิภาพดีกว่าเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่เป็นเชื้อชนิดเดียว สำหรับเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์เชื้อผสม (จากสลัดจ์ไร้อากาศ) ซึ่งมีทั้งจุลินทรีย์ที่ชอบอิเล็กตรอน (electrophiles) และประพฤติตัวเป็นแอโนด (anodophiles) รวมทั้งจุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถใช้สารส่งอิเล็กตรอนจากธรรมชาติร่วมกันในระบบ Ieropoulos *et al.* (2005) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ได้รับ และสารประกอบซัลเฟต เพราะมักพบสารที่มีซัลเฟตเป็นองค์ประกอบในสลัดจ์ ซึ่งพบว่าประมาณ 70% ถึง 80% ของพลังงาน เกี่ยวข้องกับสัดส่วน sulphate/sulphide และอีก 20 ถึง 30% เกี่ยวข้องกับความชอบอิเล็กตรอน (electrophiles)

2.4 การออกแบบเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

2.4.1. ส่วนประกอบของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

โดยพื้นฐานของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ประกอบด้วยส่วนแอโนด (anodic chamber) และส่วนแคโทด (cathodic chamber) ซึ่งแยกจากกันด้วยแผ่นเมมเบรนเลือกผ่านโปรตอน (PEM) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 ส่วนแคโทดของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สามารถแยกออกไปจากระบบได้โดยใช้ขั้วแคโทดสัมผัสกับอากาศโดยตรง ตารางที่ 2.2 สรุปองค์ประกอบ และวัสดุที่นำมาสร้างเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ (Logan *et al.*, 2006; Rabaey and Verstraete, 2005; Bullen *et al.*, 2006;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lovley, 2006)

ตารางที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบพื้นฐานของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

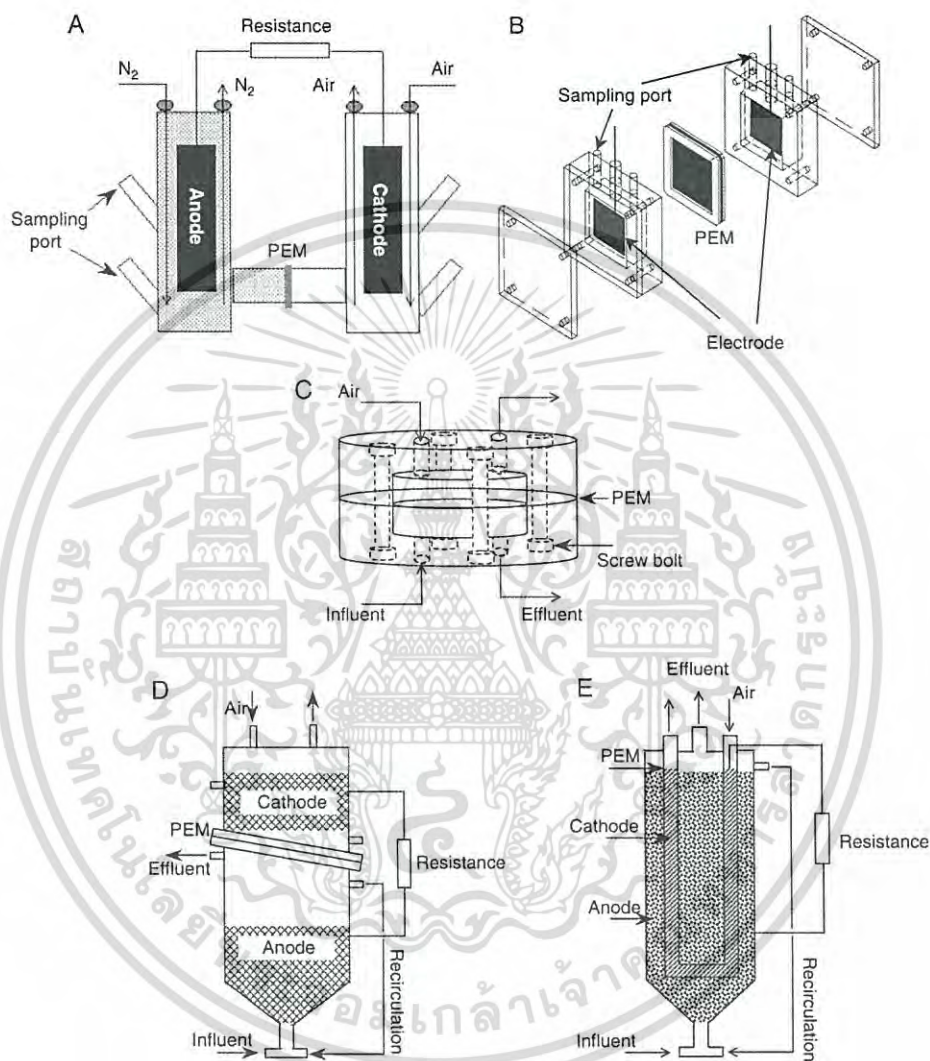
Items	Materials	Remarks
Anode	Graphite, graphite felt, carbon paper, carbon-cloth, Pt, Pt black, reticulated vitreous carbon (RVC)	Necessary
Cathode	Graphite, graphite felt, carbon paper, carbon-cloth, Pt, Pt black, RVC	Necessary
Anodic chamber	Glass, polycarbonate, Plexiglas	Necessary
Cathodic chamber	Glass, polycarbonate, Plexiglas	Optional
Proton exchange system	Proton exchange membrane: Nafion, Ultrex, polyethylene poly(styrene-co-divinylbenzene); salt bridge, porcelain septum, or solely electrolyte	Necessary
Electrode catalyst	Pt, Pt black, MnO ₂ , Fe ³⁺ , polyaniline, electron mediator immobilized on anode	Optional

2.4.2. เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่

เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ (Two-compartment MFCs) นิยมดำเนินการแบบเบ็ดเสร็จ (batch mode) โดยใช้อาหารเหลวที่ทราบองค์ประกอบแน่นอน (chemically defined medium) เช่น กลูโคส หรืออะซิเตท เพื่อผลิตพลังงาน มักพบในการวิจัยระดับห้องปฏิบัติการ เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ชนิดนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน ซึ่งแบ่งแยกออกจากกันด้วยแผ่นเมมเบรนเลือกผ่านโปรตอน หรือสะพานเกลือ (salt bridge) เพื่อให้โปรตอนเคลื่อนที่ข้ามไปยังขั้วแคโทด แต่ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนผ่านเข้าไปยังขั้วแอโนด รูปร่างเซลล์ไฟฟ้าอาจแตกต่างกันไปดังรูปแบบต่างๆ 5 ชนิดในภาพที่ 2.4 ภาพ 4C แสดงเซลล์ไฟฟ้าแบบ mini-MFC ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ซม. แต่ให้พลังงานหนาแน่นมาก (Ringeisen *et al.*, 2006) ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับตัวตรวจวัด (sensor) อติโนมิติ ได้เป็นระยะเวลานานในพื้นที่ที่เข้าถึงได้ยาก ภาพที่ 2.4D และ 2.4E แสดงเซลล์ไฟฟ้าแบบ Upflow mode MFCs ซึ่งเหมาะสำหรับระบบบำบัดน้ำเสีย เพราะสามารถขยายขนาดได้ง่าย (He *et al.*, 2005, 2006) ตัวอย่างทั้ง 2 ชนิดนี้สามารถใช้ระบบการไหลของของเหลว แต่พลังงานที่ใช้สำหรับขับเคลื่อนของเหลวอาจมีค่ามากกว่าพลังงานที่ผลิตได้ ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักในระยะแรกคงไม่เน้นไปที่การผลิตไฟฟ้า แต่เพื่อใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเอง หรือใช้พลังงานต่ำ ภาพที่ 2.4E แสดงแรงต้านทานภายในขนาด 4Ω เนื่องจากขั้วแอโนด และแคโทดอยู่ใกล้กันมากกว่าพื้นที่ผิวของเยื่อเมมเบรน เลือกว่าผ่าน โปรตอน

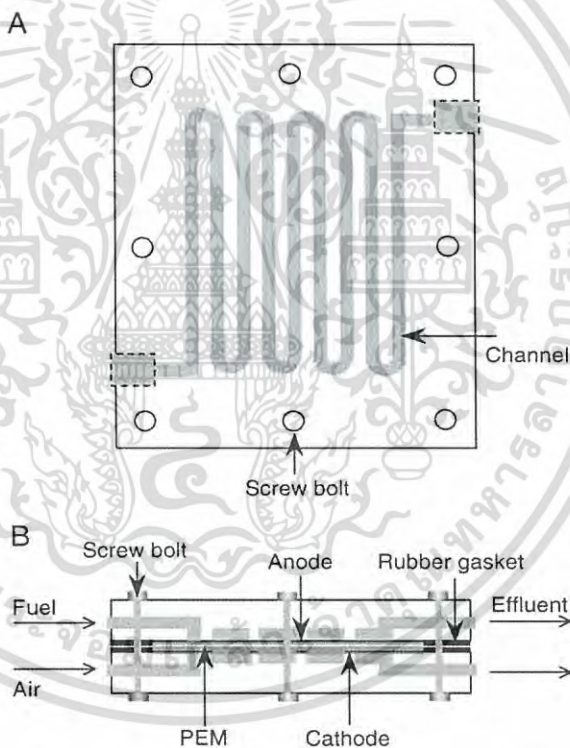


ภาพที่ 2.4 แสดงแผนภาพเซลล์ไฟฟ้าจุลทรรศน์ห้องคู่ รูปทรงกระบอก (A) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (B) รูปร่างลดขนาด (C) รูปแบบการไหลขึ้นภายในทรงกระบอก (D) รูปทรงกระบอกที่มีส่วนแคโทดโค้งภายใน (E)

ที่มา : ภาพ A จาก Min *et al.*, 2005a,b. B,C,D และ E จาก Delaney *et al.*, 1984; Allen and Bennetto, 1993; Ringeisen *et al.*, 2006; He *et al.*, 2005, 2006, ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Min and Logan (2004) ออกแบบเซลล์ไฟฟ้าแบบแผ่น Flat Plate MFC (FPMFC) (ภาพ 2.5A) ซึ่งมีอิเล็กโทรดแผ่นเดียวต่อกับแผ่นเมมเบรนเลือกผ่านโปรตอน จัดเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน คล้ายกับเซลล์ไฟฟ้าเคมี ขั้วแคโทดทำด้วยผ้าคาร์บอนที่อัดติดกับ Nafion-PEM ด้วยความร้อน นำมาต่อกับแผ่นกระดาษคาร์บอนซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด เมื่อประกอบกันได้เป็น electrode/PEM เซลล์ไฟฟ้าชนิด FPMFC ทำได้โดยนำแผ่นพอลิคาร์บอนที่ไม่นำไฟฟ้าจำนวน 2 แผ่น มาต่อเข้าด้วยกัน โดยมี PEM เป็นตัวเชื่อมส่วนแอโนด และแคโทดเข้าด้วยกันดังแสดงในภาพที่ 2.5B โดยให้น้ำเสียหรือมวลชีวะอินทรีย์ไหลผ่านเข้ามาในส่วนแอโนด และให้อากาศผ่านเข้าไปในส่วนแคโทด ซึ่งจัดเป็นเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่มีการไหลของสารอินทรีย์แบบต่อเนื่อง (Min and Logan, 2004)



ภาพที่ 2.5 แสดงแผนภาพด้านบน (A) และด้านข้าง (B) ของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์แบบแผ่น flat plate MFC

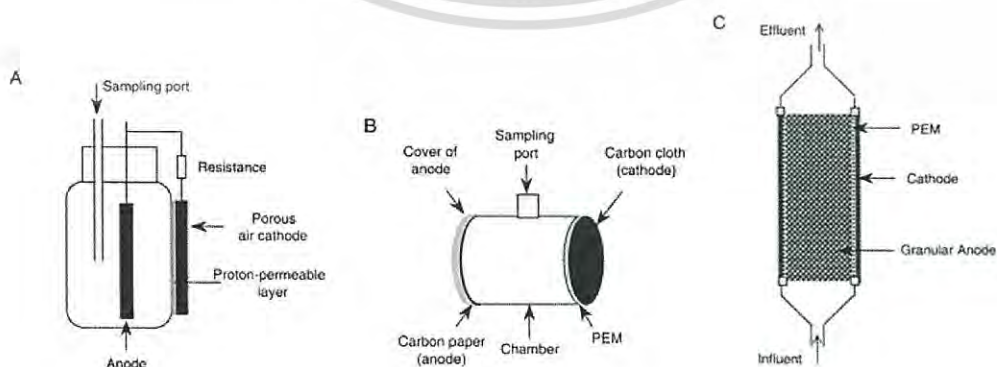
ที่มา : Min and Logan, 2004.

2.4.3. ระบบเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องเดี่ยว (Single-compartment MFC systems)

เนื่องจากความซับซ้อนในการออกแบบเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์แบบ 2 ส่วน ทำให้การ

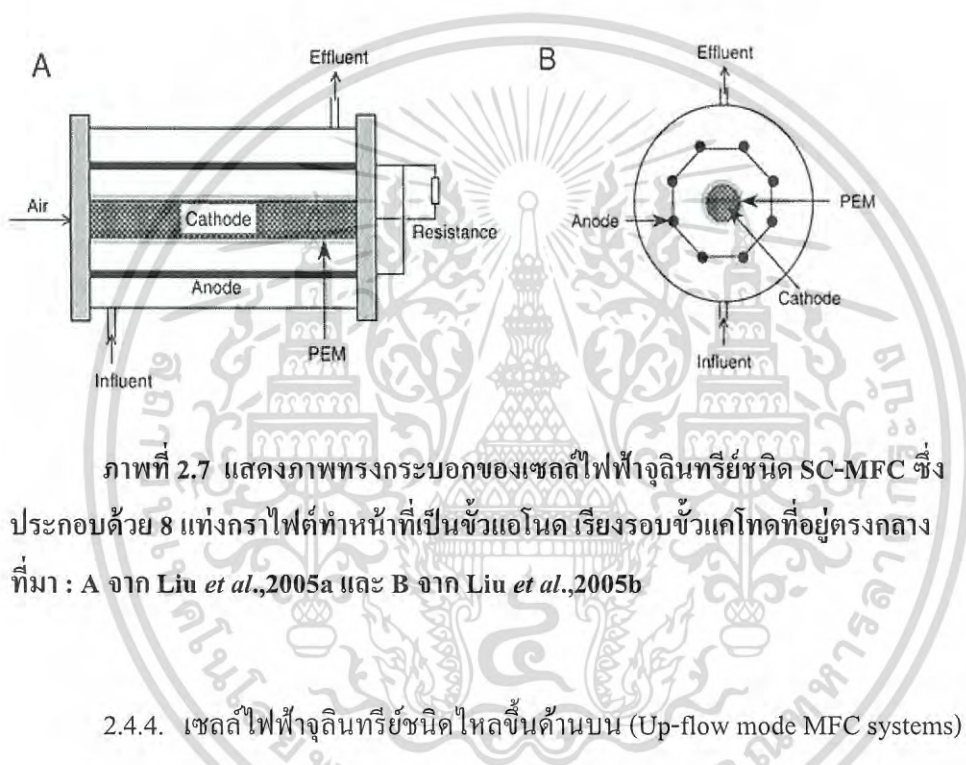
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขยายขนาดทำได้ลำบาก ทั้งที่สามารถดำเนินการได้แบบเบ็ดเสร็จและแบบต่อเนื่อง ขณะที่เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องเดี่ยวสามารถออกแบบได้ง่าย และราคาประหยัด ซึ่งมักมีเพียงส่วนแอโนดที่ไม่จำเป็นต้องมีส่วนแคโทดที่ให้อากาศไหลผ่าน Park and Zeikus (2003) ออกแบบเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องเดี่ยว ซึ่งประกอบส่วนแอโนดขนาดสี่เหลี่ยมพื้นผ้า และมีรูพรุนของขั้วแคโทดที่สัมผัสกับอากาศโดยตรง (ดังแสดงในภาพ 2.6A) โปรตอนเคลื่อนที่ผ่านสารละลายในส่วนแอโนดไปยังแผ่นรูพรุนขั้วแคโทดที่สัมผัสอากาศโดยตรง (Park and Zeikus, 2003) Liu and Logan (2004) ออกแบบเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่มีขั้วแอโนดอยู่ในท่อทรงกระบอก แต่ขั้วแคโทดอยู่ด้านนอก ภาพที่ 2.6B แสดงเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ถึงปฏิกรณ์ชีวภาพต้นแบบ (MFC bioreactor) ซึ่งขั้วแอโนดทำจากกระดาษคาร์บอนที่ชุ่มน้ำได้ ส่วนขั้วแคโทดอาจทำจาก carbon electrode/PEM โดยใช้แผ่น PEM เชื่อมต่อกับอิเล็กโทรดผ้าคาร์บอน หรืออาจใช้กระดาษคาร์บอนเพียงชนิดเดียวไม่มี PEM (Liu and Logan, 2004; Liu *et al.*, 2005a; Cheng *et al.*, 2006) เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์แบบต่อทรงกระบอกโดยใช้แผ่นกราฟไฟท์ที่มีขั้วแคโทดอยู่ด้านนอก และขั้วแอโนดอยู่ด้านใน (ดังแสดงในภาพที่ 2.6C) (Rabaey *et al.*, 2005) เมื่อไม่มีส่วนแคโทดจึงจำเป็นต้องจุ่มขั้วแคโทดลงในสารละลาย หรือผ่านสารละลายแคโทดที่ด้านนอกเพื่อป้องกันแผ่นกราฟไฟท์แห้ง Rabaey *et al.* (2005) แสดงให้เห็นว่าแคโทดชนิดสัมผัสอากาศอาจไม่เหมาะสมต่อเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์แบบถึงปฏิกรณ์ SC-MFC (Liu *et al.*, 2005a) ประกอบด้วยแอโนดและแคโทดในส่วนเดียวกัน โดยมีโครงสร้างเป็นทรงกระบอกเพลกซีกลาส (cylindrical Plexiglas chamber) ซึ่งมีแท่งกราฟไฟท์ (ขั้วแอโนด) เรียงล้อมรอบขั้วแคโทดที่อยู่ตรงกลาง (แสดงในภาพที่ 2.7) แผ่นพลาสติกที่มีด้านหนึ่งเป็นคาร์บอน และอีกด้านเป็นเยื่อเมมเบรนเลือกผ่านโปรตอน นำมาเชื่อมติดกับท่อพลาสติกเพื่อทำหน้าที่เป็นขั้วแคโทดบริเวณตรงกลางของเซลล์ไฟฟ้า (Liu *et al.*, 2005a).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

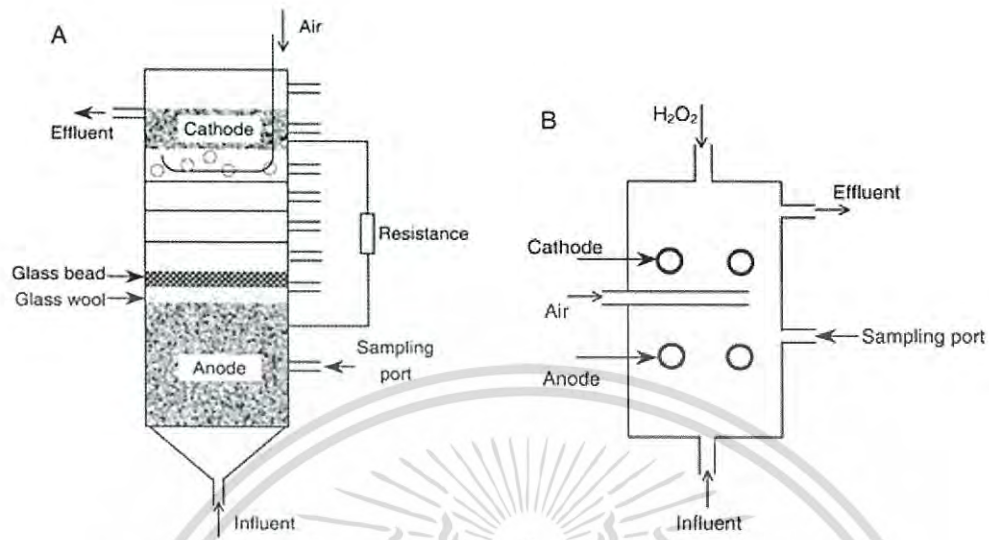
ภาพที่ 2.6 แสดงเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่มีเยื่อเลือกผ่านโปรตอนหุ้มด้านในของช่องต่อขั้วแคโทด (A) เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์รูปทรงกระบอกที่มีขั้วแอโนดและแคโทดอยู่ตรงกันข้าม (B) และเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ทรงกระบอกที่มีขั้วแคโทดด้านนอก และขั้วแอโนดด้านในบนแผ่นกราฟไฟต์ (C) ที่มา : ภาพ 6A จาก Park and Zeikus, 2003 ส่วนภาพ 6B และ C จาก Liu and Logan, 2004; Rabaey et al., 2005 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.7 แสดงภาพทรงกระบอกของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ชนิด SC-MFC ซึ่งประกอบด้วย 8 แท่งกราฟไฟต์ทำหน้าที่เป็นขั้วแอโนด เรียงรอบขั้วแคโทดที่อยู่ตรงกลาง ที่มา : A จาก Liu et al., 2005a และ B จาก Liu et al., 2005b

2.4.4. เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ชนิดไหลขึ้นด้านบน (Up-flow mode MFC systems)

Jang *et al.* (2004) ออกแบบเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ (ภาพ 2.8A) ที่ทำงานแบบต่อเนื่อง โครงสร้างเป็นท่อเพลกซิกลาสทรงกระบอก 2 ส่วน (ส่วนแอโนด และส่วนแคโทด) มีชั้นใยแก้ว และเม็ดแก้วกั้นอยู่ตรงกลาง และมีขั้วแอโนด และขั้วแคโทดอยู่ที่ก้นละด้านของท่อทรงกระบอก ภาพ 2.8B แสดงเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่มีแนวคิดคล้ายกับภาพ 2.8A แต่มีรูปร่างสี่เหลี่ยม ที่ไม่มีชั้นกั้นตรงกลาง (Tartakovskiy and Guiot, 2006) สารอาหารไหลเข้าทางด้านล่างของขั้วแอโนด ไปยังขั้วแคโทด แล้วจึงไหลออกที่ด้านบนอย่างต่อเนื่อง (Jang *et al.*, 2004; Moon *et al.*, 2005) เนื่องจากไม่แบ่งกันระหว่างส่วนแอโนด-แคโทด ดังนั้นขอบเขตการแพร่ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด ทำให้เกิดความแตกต่างของค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำ ซึ่งเหมาะสมต่อการดำเนินการของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์



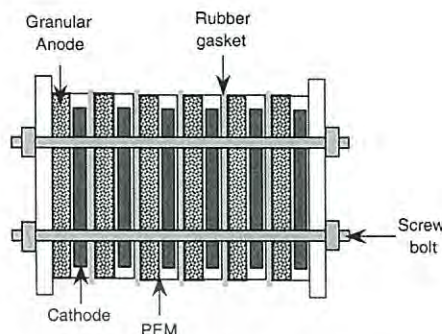
ภาพที่ 2.8 แสดงเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ชนิดมีสารส่งอิเล็กตรอนแต่ไม่มีแผ่นเมมเบรนกั้นรูปทรงกระบอก (A) และรูปทรงสี่เหลี่ยม (B)

ที่มา : ภาพดัดแปลงจาก Jang *et al.*, 2004 และ Tartakovsky and Guiot, 2006, ตามลำดับ

2.4.5. เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์แบบต่อเป็นชั้น (Stacked microbial fuel cell)

เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์เรียงต่อเป็นชั้น (แสดงในภาพที่ 2.9) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ต่างๆ ที่มาต่อกันแบบอนุกรม (series) และแบบขนาน (parallel) (Aelterman *et al.*, 2006) การเพิ่มศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า สามารถทำได้โดยนำเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์เรียงต่อกัน ซึ่งไม่พบผลกระทบในเชิงลบต่อพลังงานไฟฟ้าสูงสุดต่อเซลล์ไฟฟ้าสัมประสิทธิประจุไฟฟ้า (Coulombic efficiency) หรือเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนมาเป็นประจุไฟฟ้า หมายถึงอิเล็กตรอนที่ได้จากสับเสตรอินทรีย์ที่มีอิเล็กตรอน ผ่านเข้ามาทางอิเล็กโทรด ซึ่งไม่ใช่การวัดอัตราการไหลของอิเล็กตรอน แต่หมายถึงปริมาณสับเสตรทที่ใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ก่อนที่จะไหลออกจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ หรือชั้นเซลล์ไฟฟ้าที่เรียงซ้อนกัน ซึ่งพบว่าการเรียงเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ต่อกันแบบขนานให้ค่าสัมประสิทธิประจุไฟฟ้าสูงถึง 6 เท่า เมื่อเทียบกับการเรียงต่อกันแบบอนุกรม โดยให้อัตราการไหลของสับเสตรทเท่ากัน การเรียงต่อกันแบบขนานให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงกว่าการเรียงต่อกันแบบอนุกรม แสดงให้เห็นว่าอัตราปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าทางชีวภาพมีค่าสูงสุดเมื่อเรียงต่อเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์แบบขนาน นอกจากนี้ยังเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสารละลายอีกด้วย ดังนั้นการเรียงต่อกันของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์แบบขนานช่วยเพิ่มศักยภาพ โดยที่การไหลของเหลวไหลผ่านแต่ละชั้นต้องสัมพันธ์กันด้วย (Aelterman *et al.*, 2006).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

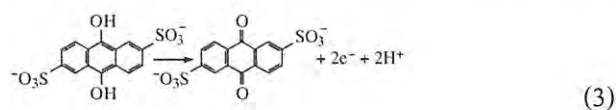


ภาพที่ 2.9 แสดงเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์นำมาเรียงต่อกัน 6 ชั้น มีแท่งกราฟไฟต์เป็นขั้วแอโนด
ที่มา : Aelterman *et al.*, 2006

2.5 ประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

2.5.1. ประสิทธิภาพเชิงอุดมคติ (Ideal performance)

ประสิทธิภาพเชิงอุดมคติของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ขึ้นกับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่เกิดขึ้นระหว่างสารอินทรีย์ที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ เช่น กลูโคส และตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าสูง เช่น ออกซิเจน (Rabaey and Verstrate, 2005) แต่อย่างไรก็ตามไม่สามารถคาดเดาศักย์ไฟฟ้าเซลล์เนื่องจากอิเล็กตรอนส่งจากสารอินทรีย์ไปยังขั้วแอโนด ผ่านกระบวนการหายใจที่ซับซ้อนที่ต่างกันไปตามชนิดของจุลินทรีย์ หรือแม้แต่จุลินทรีย์ชนิดเดียวกันที่เจริญในสภาวะต่างกัน โดยที่กระบวนการหายใจยังไม่มีการศึกษาอย่างแน่ชัด ซึ่งความสำคัญอยู่ที่ปฏิกิริยาขั้วแอโนดเพื่อหาค่าศักย์ไฟฟ้าระหว่างศักย์รีดอกซ์ที่ลดลงของสารส่งอิเล็กตรอน (ถ้าใช้ในระบบ) หรือไซโตโครมสุดท้ายในระบบ (สำหรับจุลินทรีย์ชอบอิเล็กตรอนหรือชอบแอโนด (electrophile/anodophile) และขั้วแอโนด) สำหรับจุลินทรีย์ที่ไม่สามารถปล่อยอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนดโดยตรง ซึ่งจำเป็นต้องใช้สารส่งอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด (Stirling *et al.*, 1983; Bennetto, 1984) กรณีที่ปฏิกิริยาสุดท้ายที่ขั้วแอโนด ทำให้ขั้วแอโนดได้รับอิเล็กตรอนจากสารส่งอิเล็กตรอน (สภาพรีดิวซ์) สมการที่ 3 แสดงปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดกับสาร AQDS (ทางขวาของสมการ) ซึ่งพบส่วนใหญ่ในสารประกอบฮิวมิก (humics) (Lovley *et al.*, 2004; Nevin and Lovley, 2000) ที่เป็นสารส่งอิเล็กตรอน ศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วแอโนดมีค่าเท่ากับสัดส่วน AHQDS และ AQDS



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ไร้สารส่งอิเล็กตรอน ซึ่งใช้จุลินทรีย์กลุ่มชอบเป็นแอโนด (anodophiles) ได้แก่ *G. sulfurreducens* และ *R. ferrireducens* ที่สร้างฟิล์มบนพื้นผิวแอโนด และใช้แอโนดเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในสภาวะหายใจแบบไร้อากาศ ทั้งที่กระบวนการหายใจยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด แต่ศักย์ไฟฟ้าแอโนดสามารถประมาณค่าได้จากสัดส่วนระหว่างไซโตโครมตัวสุดท้ายในสถานะรีดิวซ์และออกซิไดซ์ ปฏิริยาอเล็กโทรดของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ และความสัมพันธ์ของศักย์รีดอกซ์สารอินทรีย์ แสดงในตารางที่ 2.3 (Hernandez and Newman, 2001; Straub *et al.*, 2001; Rabaey and Verstraete, 2005; Madigan, 2000) ศักย์ไฟฟ้าเชิงอุดมคติของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สามารถคำนวณได้จากสมการ Nernst equation ของสมการเหล่านี้ ได้ผลออกมาในช่วงหลายร้อยถึงหลายพันมิลลิโวลต์

ตารางที่ 2.3 ปฏิริยาอเล็กโทรดของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์และความสัมพันธ์ศักย์ไฟฟ้ารีดอกซ์

Oxidation/reduction pairs	$E^{0'}$ (mV)
H ⁺ /H ₂	-420
NAD ⁺ /NADH	-320
S ⁰ /HS ⁻	-270
SO ₄ ²⁻ /H ₂ S	-220
Pyruvate ²⁻ /Lactate ²⁻	-185
2,6-AQDS/2,6-AHQDS	-184
FAD/FADH ₂	-180
Menaquinone ox/red	-75
Pyocyanin ox/red	-34
Humic substances ox/red (Straub <i>et al.</i> , 2001)	-200 to +300
Methylene blue ox/red	+11
Fumarate ²⁻ /Succinate ²⁻	+31
Thionine ox/red	+64
Cytochrome b(Fe ³⁺)/Cytochrome b(Fe ²⁺)	+75
Fe(III) EDTA/Fe(II) EDTA	+96
Ubiquinone ox/red	+113
Cytochrome c(Fe ³⁺)/Cytochrome c(Fe ²⁺)	+254
O ₂ /H ₂ O ₂	+275
Fe(III) citrate/Fe(II) citrate	+372
Fe(III) NTA/Fe(II) NTA	+385
NO ₃ ⁻ /NO ₂ ⁻	+421
Fe(CN) ₆ ³⁻ /Fe(CN) ₆ ⁴⁻	+430
NO ₂ ⁻ /NH ₄ ⁺	+440
O ₂ /H ₂ O	+820

2.5.3. ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้า (Effects of operating conditions)

แม้ว่าประสิทธิภาพเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่ศึกษาในห้องปฏิบัติการยังอยู่ห่างไกลจากประสิทธิภาพเชิงอุดมคติ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากหลายปัจจัย อิทธิพลที่มีผลต่อการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ ได้แก่ ชนิดจุลินทรีย์ ชนิดสารอินทรีย์ และความเข้มข้น ความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไอออน (ionic strength) ความเป็นกรดต่าง อุณหภูมิ ชนิดแผ่นเมมเบรนเลือกผ่านโปรตอน และ โครงสร้างเซลล์ไฟฟ้า (Liu *et al.*, 2005b)

2.6 การประยุกต์ใช้ประโยชน์

2.6.1. ผลิตกระแสไฟฟ้า (Electricity generation)

เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีที่เก็บในพันธะของสารอินทรีย์ และมวลชีว ให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า ด้วยการทำงานร่วมกับจุลินทรีย์

2.6.2. ผลิตไฮโดรเจนทางชีวภาพ (Biohydrogen)

เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สามารถนำมาดัดแปลงอย่างง่าย ๆ เพื่อผลิตไฮโดรเจน (แทน การผลิตไฟฟ้า) ภายใต้สภาวะปกติพบว่าโปรตอนที่ได้จากปฏิกิริยาเอนโดจะเคลื่อนที่ผ่านไปยัง ขั้วแคโทดเพื่อรับออกซิเจนแล้วกลายเป็นน้ำ ไฮโดรเจนสร้างได้จากโปรตอน และอิเล็กตรอนส รางได้จากเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ในเซลล์ไฟฟ้า ไม่เป็นไปตามสมดุลย์ (thermodynamically unfavorable) Liu *et al.* (2005b) เพิ่มกระแสไฟจากภายนอกไปยังขั้วแคโทดของเซลล์ไฟฟ้า จุลินทรีย์ พบแนวกันสมดุลย์ (thermodynamic barrier) ทำให้โปรตอนและอิเล็กตรอนที่ได้จาก ปฏิกิริยาเอนโด มารวมกันที่ขั้วแคโทดได้เป็นไฮโดรเจน พลังงานที่ต้องการจากภายนอกมีค่า ทางทฤษฎีประมาณ 110 มิลลิโวลต์ ซึ่งน้อยกว่าพลังงานที่ต้องการ (1210 มิลลิโวลต์) เพื่อแยกน้ำ (พี เอชเป็นกลาง) ด้วยไฟฟ้าให้กลายเป็นไฮโดรเจน การใช้พลังงานน้อยลงเป็นเพราะพลังงาน บางส่วนมาจากกระบวนการออกซิเดชันมวลชีวในส่วนเอนโด เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สามารถ ผลิตไฮโดรเจน 8–9 โมลต่อโมลกลูโคส เทียบกับการผลิตไฮโดรเจนทั่วไปซึ่งได้ไฮโดรเจนเพียง 4 โมลต่อโมลกลูโคส (Liu *et al.*, 2005b)

2.6.3. การบำบัดน้ำเสีย

เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์นำมาพิจารณาเพื่อใช้สำหรับบำบัดน้ำเสียในช่วงปี 1991 (Habermann and Pommer, 1991) เนื่องจากน้ำทิ้งจากครัวเรือนประกอบด้วยสารอินทรีย์หลายชนิด และมีปริมาณมาก ซึ่งเพียงพอสำหรับให้เป็นเชื้อเพลิงให้เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ ปริมาณไฟฟ้าที่ ได้จากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของไฟฟ้าที่ใช้ สำหรับการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งพลังงานไฟฟ้าส่วนใหญ่นำไปใช้ในขั้นตอนการให้อากาศสำหรับสลัดจ์ (activated sludges) เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ทำให้ปริมาณของแข็งที่ต้องกำจัดทิ้งจากระบบบำบัดน้ำ เสียมีค่าลดลงประมาณ 50%–90% (Holzman, 2005) นอกจากนี้โมเลกุลสารอินทรีย์ ได้แก่ อะซิเตท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพธิโอเนต บิวเทอเรต สามารถแตกตัวเป็นเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ

2.6.4. ตัวตรวจวัดทางชีวภาพ (Biosensor)

นอกเหนือไปจากการประยุกต์ใช้งานปกติ พบว่าเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์มีศักยภาพสำหรับใช้เป็นตัวตรวจวัดเพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารมลพิษ และติดตามและควบคุมในกระบวนการจริง (*in situ* process) (Chang *et al.*, 2004 และ 2005) ความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่างผลได้ประจุไฟฟ้า (Coulombic yield) และความเข้มข้นของน้ำเสียทำให้เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ใช้เป็นตัวตรวจวัดความต้องการออกซิเจนทางชีวภาพ (biological oxygen demand (BOD) sensors) (Kim *et al.*, 2003)

2.7 เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง (photo MFC)

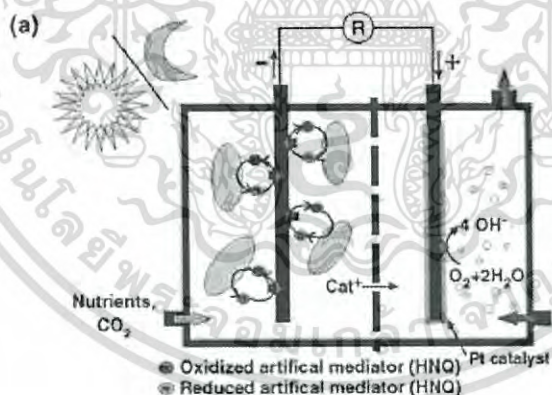
เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงพัฒนาขึ้นในช่วงปี 1960s โดยใช้ตัวกระตุ้นทางไฟฟ้าโลหะ (metal electrocatalyst) ได้แก่ จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงที่ผลิตไฮโดรเจน และชีวแอโนดชนิดตัวกระตุ้นทางไฟฟ้า และต่อมาในช่วงปี 1980s ได้ประยุกต์ใช้สารส่งอิเล็กตรอนที่ส่วนแอโนด (ใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง และสารส่งอิเล็กตรอนที่ส่วนแอโนด (Berk and Canfield, 1964; Tanaka *et al.*, 1985) เมื่อตระหนักถึงความต้องพลังงานที่ยั่งยืน ทำให้แนวความคิดเกี่ยวกับพลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความสนใจมากขึ้น ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา แนวทางใหม่ๆ นำมาใช้เพื่อเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์โดยตัวกระตุ้นทางชีวภาพ ได้พัฒนาไปเป็นเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ ซึ่งอยู่บนพื้นฐานการแยกส่วน หรือรวมพลังงานที่สงวนไว้สำหรับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และการสร้างไฟฟ้าในระยะไม่ได้รับแสง (dark period) หรือการย่อยสลายสารอินทรีย์ (heterotrophic condition) โดยไม่ใช้สารส่งอิเล็กตรอน เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงสามารถนำมาใช้สร้างไฟฟ้าทางชีวภาพ (bioelectricity generation) ไปพร้อมๆ กับการลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากชั้นบรรยากาศโดยทำงานร่วมกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Schamphelaire and Verstraete, 2009; Cao *et al.*, 2009) งานวิจัยต่างๆ เป็นการศึกษาในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม แต่ถ้านำไปขยายขนาดจำเป็นต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและได้เปรียบเชิงเศรษฐศาสตร์ Dekker *et al.* (2009) สามารถขยายขนาดเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ปริมาณ 20 ลิตร ซึ่งให้พลังงานไฟฟ้า 144 W/m³ ในสภาวะไร้แสง แต่มีต้นทุนสูงมาก การปรับปรุงระบบให้สามารถใช้พลังงานแสงได้ (เช่น ถังหมักใช้แสง, photobioreactors) ส่งผลให้มีความซับซ้อน และต้นทุนเพิ่มสูงขึ้น แต่ถ้านำเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์มาประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจวัด (sensor) ก็ไม่จำเป็นต้องให้ความสำคัญในด้านการขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาด โดยมุ่งไปที่การผลิตไฟฟ้าให้เพียงพอสำหรับงานด้านสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ห่างไกล หรือ เข้าถึงได้ยาก

2.7.1 จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงที่ขั้วแอโนด และใช้สารส่งอิเล็กตรอน

ช่วงต้นของความสนใจศึกษาเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ช่วงปี 1985–2000 มุ่งที่สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว (cyanobacteria) ในกลุ่ม *Anabaena* และ *Synechocystis* เป็นตัวกระตุ้นทางชีวภาพ และใช้สารส่งอิเล็กตรอน HNQ (ได้แก่ 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone) ซึ่งมีศักยภาพเหมาะสมสำหรับการส่งอิเล็กตรอนภายในเซลล์จุลินทรีย์ไปยังขั้วแอโนด (เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงมีสารส่งอิเล็กตรอน (mediated photoMFC) (ภาพที่ 2.10) (Tanaka et al., 1985) พบว่าการสร้างพลังงานไฟฟ้าในระยะไร้แสงมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากแหล่งคาร์บอนที่สะสมในเซลล์ (glycogen) นำมาใช้ และเซลล์ไฟฟ้ารับอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ขณะที่ระยะรับแสงมีการสร้างออกซิเจนจึงส่งผลยับยั้งการสร้างพลังงาน พร้อมๆ กับมีการสร้างแหล่งคาร์บอนสะสมภายในเซลล์อีกครั้ง (Tanaka et al., 1985) เซลล์ไฟฟ้าแบบนี้มีปัญหาด้านความเหมาะสมต่อการใช้งาน และด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากใช้สารส่งอิเล็กตรอน ทำให้เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงอาทิตย์ ไม่ได้รับความสนใจศึกษามากนัก



ภาพที่ 2.10 รูปแบบเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงแบบสารส่งอิเล็กตรอน

ที่มา : Rosenbaum et al., 2010

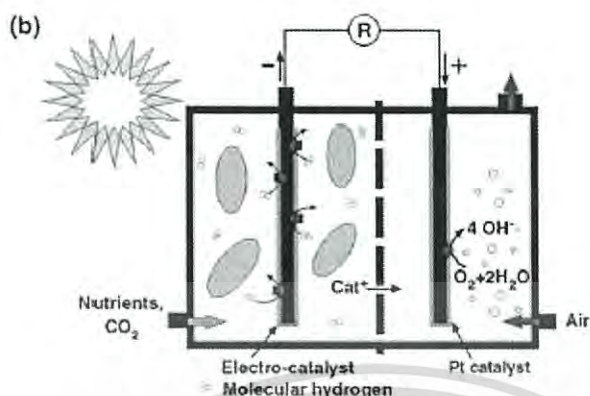
2.7.2 จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงที่สามารถผลิตไฮโดรเจน และขั้วแอโนดชนิดตัวกระตุ้นทางไฟฟ้า

ปัจจุบันเป็นที่รู้จักกันโดยทั่วเกี่ยวกับจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงมีเมแทบอลิซึมที่สามารถสร้างโมเลกุลไฮโดรเจน (Akkerman et al., 2002; Allakhverdiev et al., 2009; Beer et al.,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2009) การสร้างไฮโดรเจนทางชีวภาพด้วยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงได้รับความสนใจอย่างมาก งานวิจัยต่างๆ มุ่งไปที่การผลิตไฮโดรเจนเพื่อเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน ซึ่งเซลล์ไฟฟ้าชนิดนี้มีข้อดีที่สามารถเปลี่ยนไฮโดรเจนไปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว เพื่อแก้ปัญหาปัจจัยยับยั้งการผลิตไฮโดรเจน และเก็บรักษาก๊าซไฮโดรเจน ข้อได้เปรียบนี้สามารถทำได้โดยรักษาปริมาณไฮโดรเจนให้อยู่ในระดับต่ำ ร่วมไปกับการผลิตไฮโดรเจนทางชีวภาพ (ไม่มีปัจจัยยับยั้ง) และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไฮโดรเจนภายในเซลล์ และขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงด้วยตัวกระตุ้นทางไฟฟ้า ทำให้เพิ่มศักยภาพเทคโนโลยีผลิตพลังงานสำหรับอนาคต (เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงแบบตัวกระตุ้นทางไฟฟ้า ภาพที่ 2.11) โดยที่ไฮโดรเจนหรือโปรตอนทำหน้าที่เป็นสารส่งอิเล็กตรอนระหว่างเมแทบอลิซึมของเซลล์และชีวแอโนด (Berk and Canfield, 1964) ปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับสาหร่ายสีเขียว (*Chlamydomonas reinhardtii*) พบว่าการควบคุมปริมาณไฮโดรเจนภายในเซลล์ให้อยู่ในระดับต่ำ ทำให้การผลิตไฮโดรเจนเพิ่มสูงขึ้น (Rosenbaum *et al.*, 2005) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงกลุ่มสะสมกำมะถัน (photosynthetic purple bacteria) ซึ่งสามารถผลิตไฮโดรเจนจากสารอินทรีย์ในระหว่างการเลี้ยงเชื้อภายใต้แสงในสภาพไร้ออกซิเจน ร่วมกับอิเล็กโทรดตัวกระตุ้นทางไฟฟ้าเพื่อกำจัดไฮโดรเจนอย่างรวดเร็ว (Cho *et al.*, 2008; Rosenbaum *et al.*, 2005a) Cho *et al.* (2008) รายงานความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างกิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสง และการสร้างพลังงานของเชื้อ *Rhodobacter sphaeroides* ในสภาวะรับแสง (3 W/m^2) เทียบกับสภาวะไร้แสง (0.008 W/m^2) จุดสำคัญของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงแบบตัวกระตุ้นทางไฟฟ้า อยู่ที่ความคงตัว และประสิทธิภาพของตัวกระตุ้นทางไฟฟ้าที่คุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เยื่อเมมเบรนแลกเปลี่ยนไฮโดรเจน-โปรตอนที่ใช้ในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ อาจมีประสิทธิภาพลดลงเมื่อจุลินทรีย์เจริญเพิ่มมากขึ้น สำหรับแผ่นเพลตินัมเมื่อนำมาเคลือบด้วยพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ก็สามารถแก้ปัญหาจากปริมาณจุลินทรีย์ได้ (Schroder *et al.*, 2003; Nieben *et al.*, 2004) แต่ถ้าใช้โลหะตัวกระตุ้นทางไฟฟ้าราคาถูกเช่น ทังสเตนคาร์ไบด์ (tungsten carbide, WC) นับว่าเหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าเช่นนี้ (Rosenbaum *et al.*, 2006) แต่โลหะชนิดนี้จำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมก่อนนำไปประยุกต์ใช้งานจริง (Rosenbaum *et al.*, 2007; Harnisch *et al.*, 2009)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.11 เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงแบบตัวกระตุ้นทางไฟฟ้า

ที่มา : Rosenbaum *et al.*, 2010

2.7.3 จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงทำงานร่วมกับจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ ชีวแอโนด

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงมีการสร้างสารอินทรีย์ จากนั้นจึงนำมาย่อยสลายด้วยเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ชนิดย่อยสลายสารอินทรีย์ เพื่อสร้างพลังงานไฟฟ้า ความสัมพันธ์แบบเสริมกัน (Synergistic relationships) ระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงซึ่งเป็นผู้ผลิตและการย่อยสลายสารอินทรีย์ซึ่งเป็นผู้บริโภค สามารถพบได้ทั่วไปในระบบนิเวศวิทยา และพบกลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถหายใจแบบรับอิเล็กตรอน (anode-respiring bacteria) หลายปีที่ผ่านมา นักวิจัยศึกษากระบวนการตรึงคาร์บอน ไดออกไซด์โดยการสังเคราะห์ด้วยแสงพร้อมไปกับการสร้างพลังงานไฟฟ้าโดยย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 3 ระบบ ได้แก่

1) ความสัมพันธ์เสริมกันระหว่างจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง และกลุ่มจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในดินตะกอน

ตะกอนดินน้ำจืดและน้ำเค็ม พบสาหร่าย และกลุ่มแบคทีเรียบางชนิด (ได้แก่ สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว) เป็นผู้ผลิตสารอินทรีย์ด้วยการสังเคราะห์แสง (เช่น พอลิแซคคาไรด์) ให้กับแบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ ทำให้เกิดสมดุลของประชากรจุลินทรีย์บนผิวหน้าตะกอนดิน (microbial mats) ความสัมพันธ์นี้นำมาจำลองสร้างเป็นเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงชนิดตะกอนดิน (sediment-type photoMFC) เพื่อสร้างพลังงานไฟฟ้า (เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงร่วมกับการย่อยสลายสารอินทรีย์ (heterotrophic *in situ* photoMFC) ภาพที่ 2.12) (He *et al.*, 2009) พบว่าเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่ประชากรจุลินทรีย์เจริญเหมาะสม สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าซ้ำหลายครั้งตามรอบการได้รับแสง สอดคล้องกับการศึกษาเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สังเคราะห์ด้วยแสงในยุคแรกๆที่พบว่าการสร้างไฟฟ้ามีความสัมพันธ์ผกผันกับการได้รับแสง (ผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในระยะไร้แสง และลดการผลิตไฟฟ้าลงเมื่อได้รับแสง) การได้รับแสงตลอดเวลา มีผลยับยั้งการผลิตกระแสไฟฟ้า อาจเป็นผลมาจากการสะสมออกซิเจนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง (Zou *et al.*, 2009; He *et al.*, 2007) การศึกษาเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์จากตะกอนดินน้ำเค็มทั้งในส่วนแอโนด และแคโทด (Malik *et al.*, 2009) พบว่าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงที่ผิวหน้าตะกอนดินทำหน้าที่ผลิตออกซิเจน ที่นำไปใช้สำหรับปฏิกิริยารีดักชันออกซิเจนที่ขั้วแคโทด และการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ขั้วแอโนดในสภาวะไร้อากาศ ส่งผลให้เกิดสภาพสมดุลของการรับแสง และการผลิตไฟฟ้า การสร้างกระแสไฟฟ้าในสภาวะไร้แสง เนื่องจากระบบขึ้นกับการผลิตออกซิเจนที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยแสง ณ บริเวณแคโทด



ภาพที่ 2.12 เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงร่วมกับการย่อยสลายสารอินทรีย์

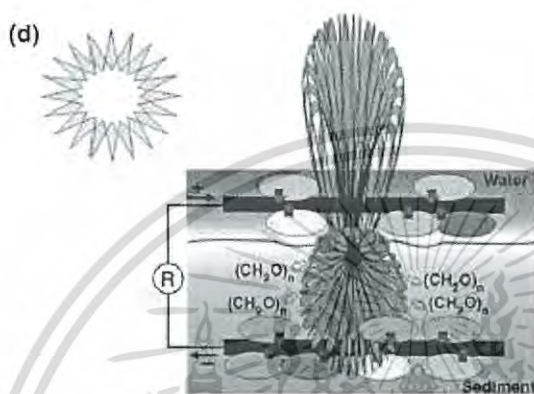
ที่มา : Rosenbaum *et al.*, 2010

2) ความสัมพันธ์แบบเสริมกันระหว่างพืชและกลุ่มจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในตะกอนดิน

พืชเป็นผู้ผลิตสารอินทรีย์แล้วไปสะสมในพื้นที่ดินและตะกอนดินใต้ทะเล เรียกว่า Rhizodeposits ซึ่งประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรต ไขมัน กรดอะมิโน ฮอร์โมน และสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ Rhizodeposits เป็นแหล่งสะสมผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืชประมาณ 40% (Strik *et al.*, 2008) จัดเป็นแหล่งเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงจากตะกอนดิน (sediment-type photo MFCs) ระหว่างพืชและจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์, heterotrophic-plant *in situ* photo MFC ภาพที่ 2.13 ผลวิจัยการใช้พืชตะกวดหญ้า (mannagrass, *Glyceria maxima*) ในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง สามารถผลิตพลังงานได้ถึง 67 mW/m^2 (Stirk *et al.*, 2008) ผลการใช้ต้นข้าวใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ ซึ่งทดสอบหลายพันชั่วโมง พบความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสง และพลังงานที่ได้รับ (เมื่อปริมาณ rhizodeposit มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่ากิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มมากขึ้น) (Schamphelaire *et al.*, 2008; Kaku *et al.*, 2008) นอกจากนี้ยังพบว่าการเจริญของต้นข้าวมีส่วนช่วยให้การผลิตไฟฟ้าเพิ่มขึ้นถึง 7 เท่า

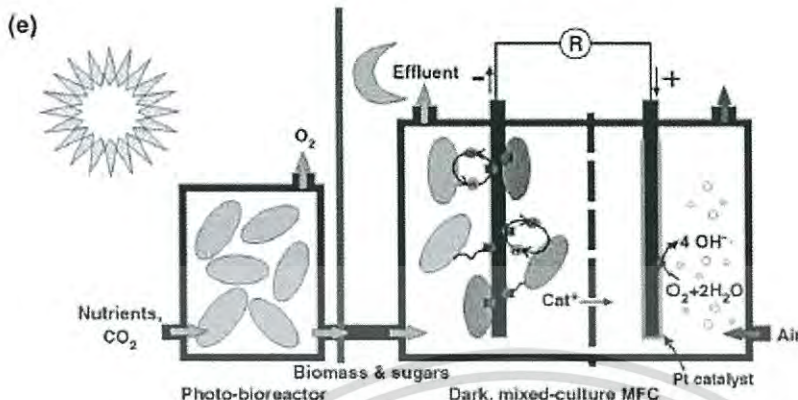


ภาพที่ 2.13 เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงจากตะกอนดินระหว่างพืชและจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์
ที่มา : Rosenbaum *et al.*, 2010

3) กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงแยกจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้แสงที่ชีวแอโนด

การผลิตสารอินทรีย์ (โดยการสังเคราะห์ด้วยแสง) จากภายนอก แล้วจึงใส่เข้ามาในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ (heterotrophic MFC) เพื่อผลิตไฟฟ้า (ภาพที่ 2.14 แสดง heterotrophic *ex situ* photoMFC) สาหร่ายนำมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงสำหรับชีวแอโนดในเซลล์ไฟฟ้า เพื่อผลิตไฟฟ้า (Velasquez-Orta *et al.*, 2009; Strik *et al.*, 2008) สาหร่ายนำมาเลี้ยงในสภาวะเหมาะสมด้วยถังหมักด้วยแสง (photobioreactor) เพื่อผลิตสารอินทรีย์สำหรับใส่เข้าเซลล์ไฟฟ้าไร้แสงเพื่อผลิตไฟฟ้า โดยจำเป็นต้องควบคุมปริมาณสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าเซลล์ไฟฟ้า ถ้าเป็นเซลล์สาหร่าย (องค์ประกอบซับซ้อน) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตประจุไฟฟ้า (coulombic efficiencies) มีค่าเพียง 2.8% (Strik *et al.*, 2008) แต่ถ้าเป็นกรดอินทรีย์ (องค์ประกอบอย่างง่าย) พบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น (Rosenbaum *et al.*, 2010)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

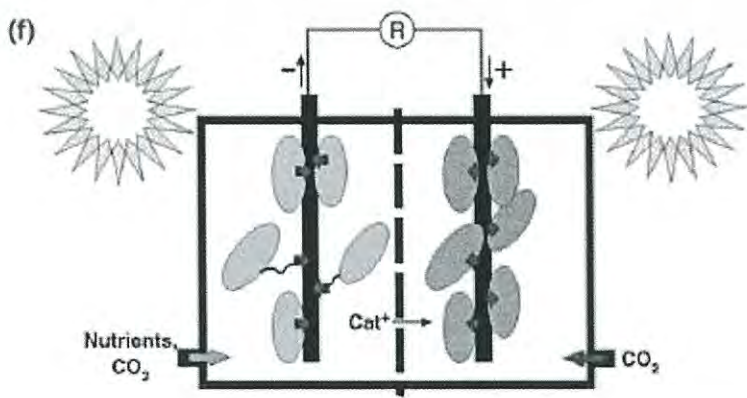


ภาพที่ 2.14 เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้แสงที่ขั้วแอโนด

ที่มา : Rosenbaum *et al.*, 2010

2.7.4 การส่งอิเล็กตรอนจากแบคทีเรียสังเคราะห์แสงไปยังอิเล็กโทรดโดยตรง

เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่มีการส่งอิเล็กตรอนจากแบคทีเรียสังเคราะห์แสงไปยังอิเล็กโทรดโดยตรง (DET) เรียกว่า DET photo MFC (ภาพที่ 2.15) ซึ่งไม่ใช่สารส่งอิเล็กตรอนรีดอกซ์ อิเล็กโทรดไฟฟ้า หรือจุลินทรีย์ใช้สารอินทรีย์ ซึ่งวิเคราะห์จากขั้วแอโนดแบบตัวกระตุ้นทางไฟฟ้า (Fe *et al.*, 2009; Furukawa *et al.*, 2006) ได้แก่ platinum หรือ polyaniline ทำให้สร้างไฮโดรเจนจากจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง Cao *et al.* (2009) พบปฏิกิริยารีดักชันไบคาร์บอเนตในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สภาวะมีแสง เพราะไม่มีการสร้างออกซิเจน จึงไม่มีตัวกระตุ้นทางไฟฟ้า ทำให้ขั้วแคโทดไม่ได้รับผลกระทบจากสารส่งอิเล็กตรอน จึงสร้างไฟฟ้าได้ดี กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงในสภาพไร้อากาศสามารถคาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่คล้ายปฏิกิริยาออกซิเดชัน Fe^{2+} ของการใช้แสงเป็นแหล่งพลังงาน และใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน (photoautotrophic bacteria) (Kappler *et al.*, 2005)



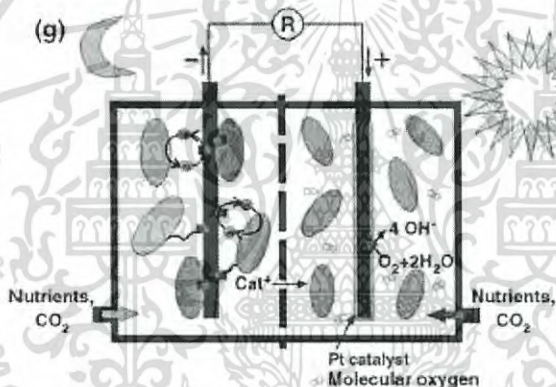
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.15 เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่ส่งอิเล็กตรอนจากแบคทีเรียสังเคราะห์แสงไปยังอิเล็กโทรดโดยตรง

ที่มา : Rosenbaum *et al.*, 2010

2.7.5 กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ชีวเคโตนเพื่อสร้างออกซิเจน

นำสารละลายที่ได้จากการเลี้ยงเชื้อในถังหมักด้วยแสง (photobioreactor) เข้าไปที่ชีวเคโตนของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง พบการสร้างออกซิเจนบนชีวเคโตนนี้ (Schampelaire *et al.*, 2009) ซึ่งใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย (โดยไม่ต้องพ่นอากาศเข้าไปในระบบ) (ให้ออกซิเจนแก่เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง, oxygen-providing photo MFC ภาพที่ 2.16)



ภาพที่ 2.16 เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงที่ชีวเคโตนเพื่อสร้างออกซิเจน

ที่มา : Rosenbaum *et al.*, 2010

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 เชื้อจุลินทรีย์

นำเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์แสง (purple non-sulfur photosynthetic bacteria) สายพันธุ์ *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 ซึ่งมีคุณสมบัติใช้กรดอินทรีย์ ย่อยสลายแป้งมันสำปะหลัง และย่อยสลายไลติ ได้ดี (ตามลำดับ) มาเลี้ยงในอาหาร AM medium (Natthanan *et al.*, 2011) โดยมีแหล่งคาร์บอน เป็นกรดอะซิติก แป้งมันสำปะหลัง และ CMC (ตามลำดับ) และโซเดียมกลูตาเมตเป็นแหล่งไนโตรเจน และเชื้อยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisiae* คัดแยกได้จากยีสต์ขนมปัง (ได้รับความอนุเคราะห์จาก ผ.ศ. นิสา ไกรรัทย์) เจริญบนอาหาร YM medium

3.2 สารเคมี และอาหารเลี้ยงเชื้อ

แป้งมันสำปะหลัง ตราปลามังกร ข้าวเสาไห้ Carboxymethyl cellulose (บริษัททองถิ่น, ประเทศไทย) ขั้วอิเล็กโทรดชนิด platinum iron copper (Sigma-Aldrich, USA) แผ่นเมมเบรน ultrafiltration ขนาดรูพรุน 1 K-Da, 5 K-Da และ 10 K-Da (ThermoScience, USA) และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์ต่างๆ มีคุณภาพระดับวิเคราะห์ (analytical grade) เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Hewlett Packard multimeter 973A, USA) เครื่องวัดแสง (Testo 545, UK) อาหารเลี้ยงเชื้อ AM medium ประกอบด้วย กลูโคส (แหล่งคาร์บอน) 10 กรัม โมโนโซเดียมกลูตาเมต 10 กรัม Na_2HPO_4 10 กรัม และ yeast extract 1 กรัม ในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร อาหารเลี้ยงเชื้อ YM medium ประกอบด้วย กลูโคส 10 กรัม peptone 5 กรัม และ yeast extract 3 กรัม ในน้ำกลั่น 1000 มิลลิลิตร

3.3 การวิเคราะห์

การวิเคราะห์ปริมาณเซลล์จุลินทรีย์สังเคราะห์แสง *Rhodospseudomonas* S12 OS33 และ 14 ด้วยวิธีการสกัดแบคทีเรียโอสโตรโรฟิลล์ (ดัดแปลงจากวิธีของ Cohen-Bazire และคณะ, 1957) และวัดปริมาณเซลล์ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ด้วยวิธีวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร (ภาคผนวก ข) (วิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ)

ปริมาณน้ำตาลน้ำตาลทั้งหมด ใช้วิธีวิเคราะห์ Total sugar (Dubois, 1956) นำตัวอย่างที่เวลาต่างๆ ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที นาน 15 นาที จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (ภาคผนวก ข) (วิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ)

ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (กลูโคส) ใช้วิธีวิเคราะห์ Somogyi Nelson (Nelson, 1944) นำตัวอย่างที่เวลาต่างๆ ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที นาน 15 นาที จากนั้นนำส่วนใสไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (ภาคผนวก ข) (วิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ)

การวัดกระแสไฟฟ้า (μA) ใช้เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (HP รุ่น Hewlett Packard multimeter 973A) โดยต่อสายวัดกระแสเข้ากับสายไฟที่ต่อออกมาจากขดลวดเลี้ยงเชื้อระหว่างบริเวณ anodic chamber และ cathodic chamber และตั้งค่าการวัดให้มีหน่วยเป็น μA

การวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ นำตัวอย่างน้ำหมัก (ประมาณ 1.5 มล.) ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10000 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที นำส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณเอทานอลโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี รุ่น shimadzu 17A chromatograph โดยใช้แก๊สฮีเลียมเป็นตัวพา คอลัมน์ที่ใช้เป็น DB-WAX ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร อุณหภูมิภายในคอลัมน์ 60 องศาเซลเซียส ตัวตรวจวัดเป็นชนิด flame ionization detector (FID) (ภาคผนวก ข) (วิเคราะห์จำนวน 3 ซ้ำ)

3.4 การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์ และการเลี้ยงเชื้อ

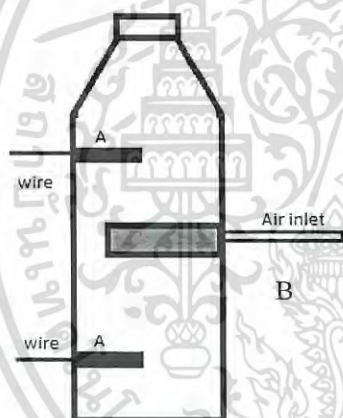
3.4.1 เชื้อจุลินทรีย์

นำเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง (purple non-sulfur photosynthetic bacteria) *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่มีคุณสมบัติย่อยสลายกรดอะซิติก แป้งมันสำปะหลัง และ Carboxy methyl cellulose (ตามลำดับ) ที่เก็บรักษาในอาหารแข็ง Ormerod's medium มาเลี้ยงในอาหารเหลว AM medium ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่บรรจุในหลอดทดสอบขนาด 15 มิลลิลิตร นำไปปฏิกายใต้ความเข้มแสง 1500 ลักซ์ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในสภาพไร้อากาศ เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำสารละลายเชื้อทั้ง 3 มาผสมกันในอัตราส่วน 1 : 1 : 1 แล้วนำไปใช้เป็นเชื้อเริ่มต้นต่อไป สำหรับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เก็บรักษาในอาหารแข็ง YM slant นำมาเลี้ยงในอาหารเหลว YM broth ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่บรรจุ

ในพลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร หลังจากลงเชื้อแล้วนำไปบ่มบนเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อ นาที อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชม. เพื่อใช้เป็นเชื้อเริ่มต้นต่อไป

3.4.2 ศึกษาการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องเดี่ยว (single chamber)

การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องเดี่ยว ด้วยวิธีการเลี้ยงเชื้อผสมระหว่าง *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 ร่วมกับเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในอาหารผสม AM medium และ YM medium ปริมาตร 400 มล. ที่บรรจุในขวดปริมาตร 500 มล. (ดังแสดงในภาพที่ 3.1) จากนั้นนำไปบ่มภายใต้แสงความเข้ม 1500 ลักซ์ อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน บันทึกผลการเจริญของเชื้อผสม (ด้วยวิธีวัดปริมาณแบคทีเรียโอสโตรฟีลล์) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด การผลิตไฟฟ้า



ภาพที่ 3.1 แสดงการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องเดี่ยว (single chamber) โดยที่ A หมายถึงตำแหน่งอิเล็กโทรด และ B หมายถึงตำแหน่งที่ให้อากาศเข้าสู่ระบบ ซึ่งบริเวณด้านล่างต่ำกว่าตำแหน่งให้อากาศ หมายถึงบริเวณแอโนด และด้านบนสูงกว่าตำแหน่งให้อากาศ หมายถึงบริเวณแคโทด

3.4.3 ศึกษาการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ (dual chamber)

การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ ด้วยวิธีการเลี้ยงเชื้อผสมระหว่าง *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 ในขวดที่ 1 ซึ่งบรรจุอาหาร AM medium ปริมาตร 200 มล. ในขวดขนาด 250 มล. นำไปเลี้ยงเชื้อในสภาพไร้อากาศ ภายใต้แสงความเข้ม 1500 ลักซ์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (anode chamber) และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในขวดที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งบรรจุอาหาร YM medium ปริมาตร 200 มล. ที่บรรจุในขวดปริมาตร 500 มล. บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ให้อากาศ 0.5 VVM (cathode chamber) ขวดที่ 1 และ 2 เชื่อมต่อกันโดยมีแผ่นเมมเบรนขนาด 1 Kda กั้นแยก และมีขั้วอิเล็กโทรด platinum ติดตั้งที่ด้านใน (ดังแสดงในภาพที่ 3.2) นำไปบ่มภายใต้แสงความเข้ม 1500 ลักซ์ อัตราการให้อากาศ 1.0 vvm อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 วัน บันทึกผลการเจริญของเชื้อ *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 (ด้วยวิธีวัดปริมาณแบคทีเรียโอสโตรอโรฟิลล์) การเจริญของเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* (ด้วยวิธีวัดค่าการดูดกลืนแสง 660 nm) ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด การผลิตไฟฟ้า



ภาพที่ 3.2 แสดงการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ (dual chamber) A) หมายถึง ตำแหน่งอิเล็กโทรด โดยขวดที่ 1 หมายถึงบริเวณแอโนด และขวดที่ 2 หมายถึงบริเวณแคโทด ซึ่งมีแผ่นเมมเบรนกั้นระหว่างขวดทั้ง 2

ก) ผลของแหล่งคาร์บอนต่อการสร้างพลังงาน

ศึกษาผลการใช้แหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ ได้แก่ กลูโคส แป้งมันสำปะหลัง และ CMC ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร (ตามลำดับ) โดยจุลินทรีย์สังเคราะห์แสงด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 ในขวดที่ 1 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว AM medium ที่มีกลูตามต 10 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งไนโตรเจน โดยนำเชื้อเริ่มต้นปริมาตร 3.0 เปอร์เซ็นต์ ไปใส่ในขวดเลี้ยงเชื้อ แล้วนำไปบ่มภายใต้แสง 1500 ลักซ์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในสภาพไร้อากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(บริเวณแอโนด) ซึ่งเชื่อมต่อกับขั้วที่ 2 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน (ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร) แล้วจึงใส่เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เริ่มต้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM (บริเวณแคโทด) ใช้เมมเบรนรูพรุนขนาด 1 K-da กั้นกลางระหว่างขั้วทั้ง 2

ข) ผลของการให้อากาศในห้อง cathode chamber ต่อการสร้างพลังงาน

ศึกษาผลของอัตราการให้อากาศในบริเวณแคโทด (cathode chamber) ที่ระดับ 0.5 VVM 1.0 VVM และ 1.5 VVM (ตามลำดับ) โดยจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 และ OS33 ในขั้วที่ 1 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว AM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัมต่อลิตร และกลูตามีน 10 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน และไนโตรเจน (ตามลำดับ) แล้วนำเชื้อเริ่มต้นปริมาตร 3.0 เปอร์เซ็นต์ ไปใส่ในขั้วเลี้ยงเชื้อ แล้วนำไปบ่มภายใต้แสง 1500 ลักซ์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในสภาพไร้อากาศ (บริเวณแอโนด) ซึ่งเชื่อมต่อกับขั้วที่ 2 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน (ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร) แล้วจึงใส่เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เริ่มต้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการให้อากาศระดับต่างๆ ซึ่งใช้เมมเบรนรูพรุนขนาด 1 K-da กั้นกลางระหว่างขั้วทั้ง 2

ค) ผลของแผ่นเมมเบรนต่อการสร้างพลังงาน

ศึกษาผลของแผ่นเมมเบรนกั้นระหว่างขั้วที่ 1 บริเวณแอโนด (anode chamber) และขั้วที่ 2 บริเวณแคโทด (cathode chamber) ที่ระดับความพรุน 1 K-da 5.0 K-da และ 10 K-da (ตามลำดับ) โดยจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 และ OS33 ในขั้วที่ 1 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว AM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัมต่อลิตร และกลูตามีน 10 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน และไนโตรเจน (ตามลำดับ) แล้วนำเชื้อเริ่มต้นปริมาตร 3.0 เปอร์เซ็นต์ ไปใส่ในขั้วเลี้ยงเชื้อ แล้วนำไปบ่มภายใต้แสง 1500 ลักซ์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในสภาพไร้อากาศ (บริเวณแอโนด) ซึ่งเชื่อมต่อกับขั้วที่ 2 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน (ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร) แล้วจึงใส่เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เริ่มต้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการให้อากาศ 1.5 VVM ซึ่งใช้เมมเบรนรูพรุนขนาดต่างๆ กั้นกลางระหว่างขั้วทั้ง 2

ง) ผลของชนิดขั้วอิเล็กโทรดต่อการสร้างพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษาผลของพลังงานที่ได้จากขั้วอิเล็กโทรดชนิดต่างๆ ได้แก่ platinum iron และ copper ที่ติดตั้งในขั้วที่ 1 บริเวณแอโนด (anode chamber) และขั้วที่ 2 บริเวณแคโทด (cathode chamber) (ตามลำดับ) โดยจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 และ OS33 ในขั้วที่ 1 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว AM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัมต่อลิตร และกลูตามัต 10 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน และไนโตรเจน (ตามลำดับ) แล้วนำเชื้อเริ่มต้นปริมาตร 3.0 เปอร์เซ็นต์ ไปใส่ในขั้วเลี้ยงเชื้อ แล้วนำไปบ่มภายใต้แสง 1500 ลักซ์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในสภาพไร้อากาศ (บริเวณแอโนด) ซึ่งเชื่อมต่อกับขั้วที่ 2 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน (ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร) แล้วจึงใส่เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เริ่มต้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการให้อากาศ 1.5 VVM ซึ่งใช้म्मเบรนรพุนขนาด 5.0 K-da กั้นกลางระหว่างขั้วทั้ง 2

จ) ผลของแหล่งกำเนิดแสงต่อการสร้างพลังงาน

ศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสง ได้แก่ tungsten lamp fluorescent lamp และ halogen lamp (ตามลำดับ) ต่อการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 และ OS33 ในขั้วที่ 1 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว AM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัมต่อลิตร และกลูตามัต 10 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน และไนโตรเจน (ตามลำดับ) แล้วนำเชื้อเริ่มต้นปริมาตร 3.0 เปอร์เซ็นต์ ไปใส่ในขั้วเลี้ยงเชื้อ แล้วนำไปบ่มภายใต้แสง 1500 ลักซ์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในสภาพไร้อากาศ (บริเวณแอโนด) ซึ่งเชื่อมต่อกับขั้วที่ 2 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน (ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร) แล้วจึงใส่เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เริ่มต้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการให้อากาศ 1.5 VVM ซึ่งใช้म्मเบรนรพุนขนาด 5.0 K-da กั้นกลางระหว่างขั้วทั้ง 2 โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดเป็น platinum

ฉ) ผลของความเข้มแสงต่อการสร้างพลังงาน

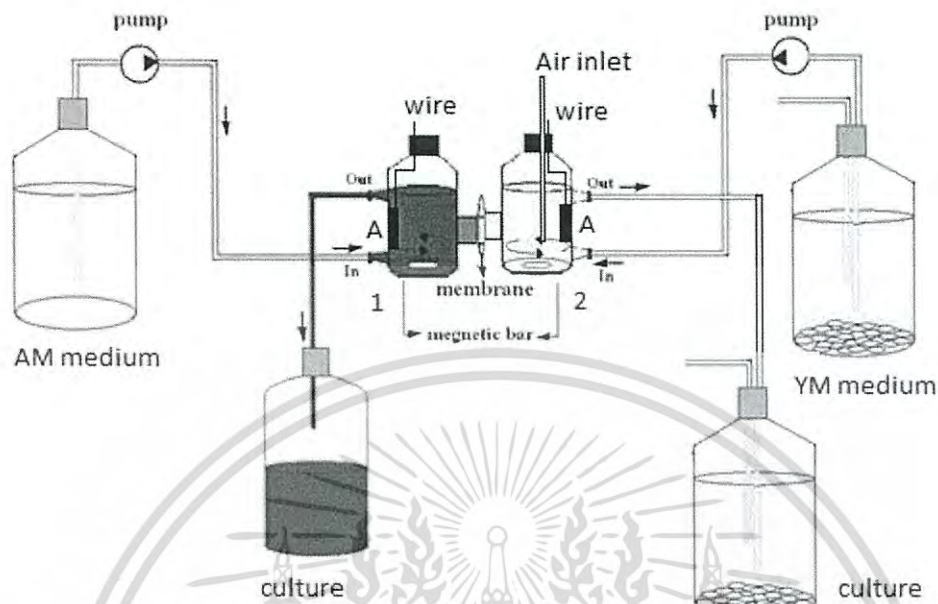
ศึกษาผลของความเข้มแสงที่ระดับ 1500 ลักซ์ 2000 ลักซ์ และ 2500 ลักซ์ (ตามลำดับ) ต่อการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 และ OS33 ในขั้วที่ 1 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว AM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัมต่อลิตร และกลูตามัต 10 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน และไนโตรเจน (ตามลำดับ) แล้วนำเชื้อเริ่มต้นปริมาตร 3.0 เปอร์เซ็นต์ ไปใส่ในขั้วเลี้ยงเชื้อ แล้วนำไปบ่มภายใต้แสงต่างๆ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็น halogen lamp ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในสภาพไร้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อากาศ (บริเวณแอโนด) ซึ่งเชื่อมต่อกับขวดที่ 2 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน (ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร) แล้วจึงใส่เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เริ่มต้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการให้อากาศ 1.5 VVM ซึ่งใช้เมมเบรนรูพรุนขนาด 5.0 K-da กั้นกลางระหว่างขวดทั้ง 2 โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดเป็น platinum

3.4.4 ศึกษาการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ด้วยการเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง (continuous cultivation)

ช่วงแรกให้จุลินทรีย์ในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์มีการเจริญแบบ batch cultivation โดยจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 และ OS33 ในขวดที่ 1 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว AM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัมต่อลิตร และกลูตามัต 10 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน และไนโตรเจน (ตามลำดับ) แล้วนำเชื้อเริ่มต้นปริมาตร 3.0 เปอร์เซ็นต์ ไปใส่ในขวดเลี้ยงเชื้อ แล้วนำไปบ่มภายใต้ความเข้มแสง 1500 ลักซ์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็น halogen lamp ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในสภาพไร้อากาศ (บริเวณแอโนด) ซึ่งเชื่อมต่อกับขวดที่ 2 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน (ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร) แล้วจึงใส่เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เริ่มต้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการให้อากาศ 1.5 VVM ซึ่งใช้เมมเบรนรูพรุนขนาด 5.0 K-da กั้นกลางระหว่างขวดทั้ง 2 โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดเป็น platinum เมื่อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 และ OS33 (ขวดที่ 1) เจริญจนได้ปริมาณเซลล์สูงสุด (วันที่ 10 ของการเลี้ยงเชื้อ) (ซึ่งเป็นการเลี้ยงเชื้อแบบ batch cultivation) จึงเริ่มต้นการเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง (continuous cultivation) ด้วยการให้อาหารเหลว AM medium (ที่มีแหล่งคาร์บอนเป็นแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัมต่อลิตร และแหล่งไนโตรเจนเป็นกลูตามัต 10 กรัมต่อลิตร) ไหลเข้าสู่ขวดที่ 1 (ด้วยอัตราเร็ว 50 75 และ 100 ไมโครลิตรต่อนาที (ตามลำดับ)) ทางด้านล่าง แล้วไหลออกทางด้านบน ไปยังขวดเก็บเชื้อ (culture) ขณะเดียวกันก็ให้อาหารเหลว YM medium (ที่มีแหล่งคาร์บอนเป็นกลูโคส) ไหลเข้าสู่ขวดที่ 2 (ด้วยอัตราเร็ว 500 ไมโครลิตรต่อนาที) ทางด้านล่าง และไหลออกทางด้านไปยังขวดเก็บเชื้อ (culture) (ดังแสดงในภาพที่ 3.3) เก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆ เพื่อวิเคราะห์การเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง เชื้อยีสต์ น้ำตาลทั้งหมด น้ำตาลรีดิวิซ์ แอลกอฮอล์ และกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 3.3 แสดงการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ ด้วยการเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง (continuous cultivation) โดยขวดที่ 1 หมายถึงบริเวณแอโนด และขวดที่ 2 หมายถึงบริเวณแคโทด ซึ่งมีแผ่นเมมเบรนคั่นระหว่างขวดทั้ง 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

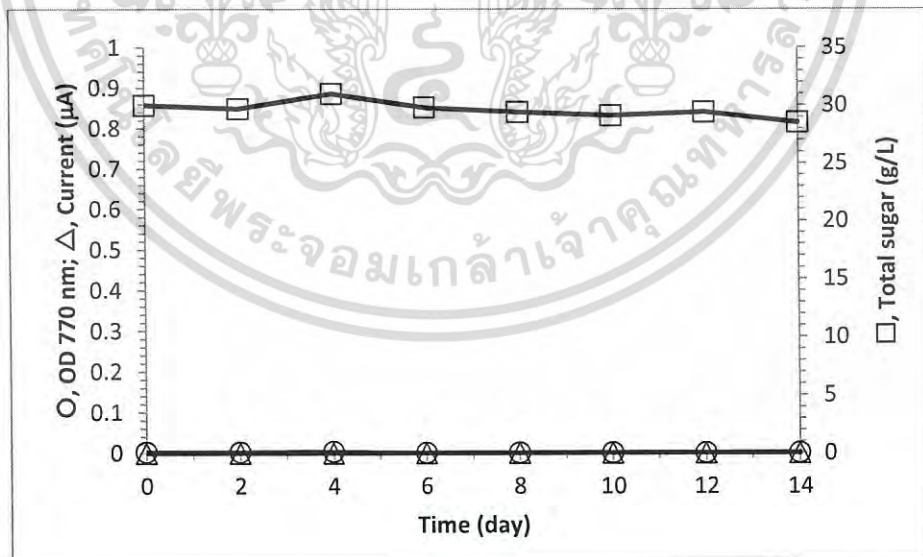
ผลการทดลอง และวิจารณ์ผล

4.1 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องเดียว (single chamber)

เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องเดียว (single chamber) เป็นการอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพของการเลี้ยงเชื้อแบ่งแยกสภาวะออกเป็นบริเวณที่ไม่ได้รับอากาศ (anodic chamber) (ซึ่งจะอยู่บริเวณด้านล่าง หรือห่างจากบริเวณที่ให้อากาศ และบริเวณที่ได้รับอากาศ (cathodic chamber) (ซึ่งจะอยู่บริเวณด้านบนของตำแหน่งที่ได้รับอากาศ หรือบริเวณผิวหน้าของอาหารเหลว

4.1.1 การผลิตพลังงานจากจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ที่เจริญในกลูโคส

นำจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทั้ง 3 สายพันธุ์ ได้แก่ *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 มาผสมกันในอัตราส่วน 1:1:1 แล้วนำไปเลี้ยงในอาหาร AM medium ซึ่งมีแหล่งคาร์บอนเป็นกลูโคสความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร บ่มเชื้อในสภาวะความเข้มแสง 1500 ลักซ์ อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.1



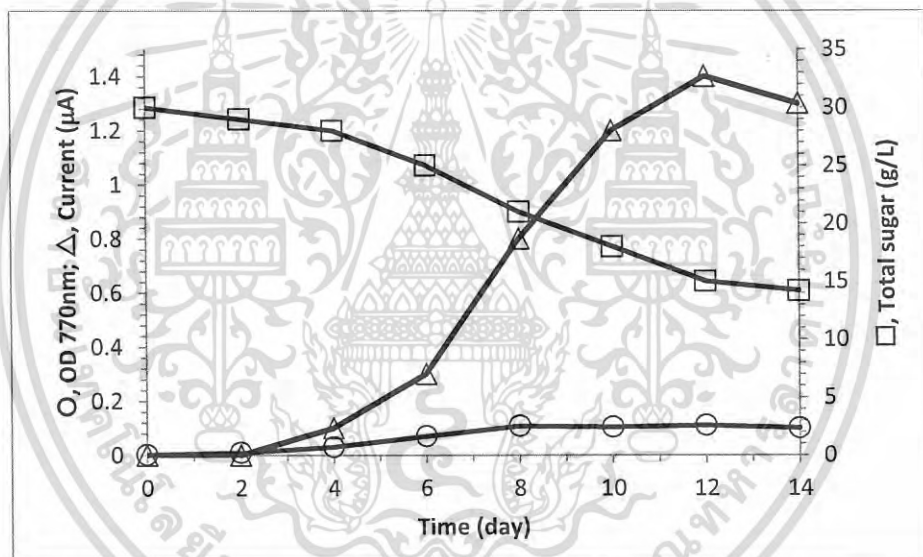
ภาพที่ 4.1 แสดงการผลิตพลังงานจากการเลี้ยงเชื้อผสม *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 ในอาหารเหลว AM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ในสภาพไร้อากาศ ภายใต้แสง 1500 ลักซ์ เมื่อ ○, ปริมาณจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง □, น้ำตาลทั้งหมด และ △, กระแสไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองพบว่าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทั้ง 3 สายพันธุ์ ไม่สามารถเจริญในอาหารที่มีแหล่งคาร์บอนเป็นกลูโคสที่ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความเข้มข้นสูงจนสามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อทั้ง 3 ได้ จึงทำให้ไม่พบการสร้างกระแสไฟฟ้า

4.1.2 การผลิตพลังงานจากจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงด้วย ที่เจริญในเบี่ยงมันสำปะหลัง

นำจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทั้ง 3 สายพันธุ์ ได้แก่ *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 มาผสมกันในอัตราส่วน 1:1:1 แล้วนำไปเลี้ยงในอาหาร AM medium ซึ่งมีแหล่งคาร์บอนเป็นเบี่ยงมันสำปะหลังความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร บ่มเชื้อในสภาวะความเข้มแสง 1500 ลักซ์ อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 แสดงการผลิตพลังงานจากการเลี้ยงเชื้อผสม *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 ในอาหารเหลว AM medium ที่มีเบี่ยงมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน ในสภาพไร้อากาศ ภายใต้แสง 1500 ลักซ์ เมื่อ ○, ปริมาณจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง □, น้ำตาลทั้งหมด และ △, กระแสไฟฟ้า

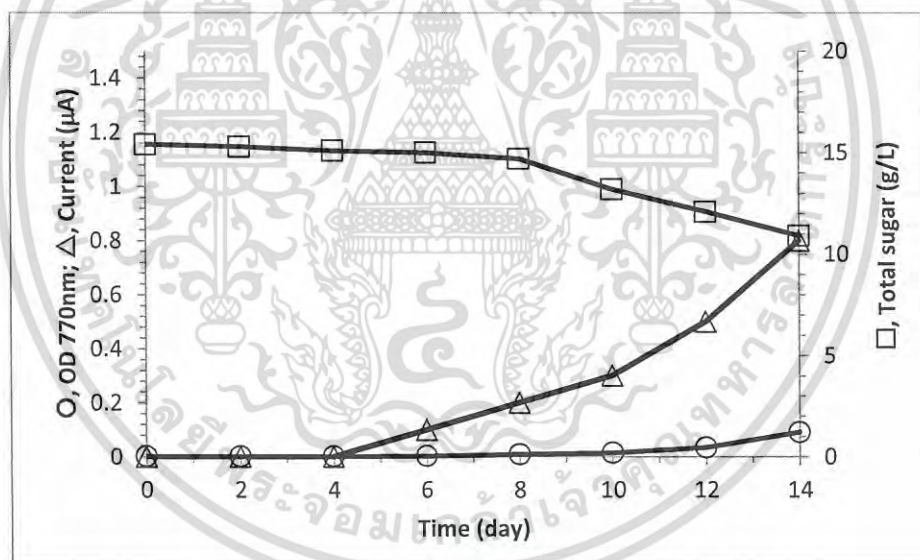
ผลการทดลองพบว่าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทั้ง 3 สายพันธุ์ สามารถเจริญในอาหารที่มีแหล่งคาร์บอนเป็นเบี่ยงมันสำปะหลังได้อย่างช้าๆ ค่อยๆ เพิ่มขึ้นจากวันที่ 4 ไปจนกระทั่งสิ้นสุดการเจริญในวันที่ 14 ของการเลี้ยงเชื้อ ขณะที่ความเข้มข้นเบี่ยงมันสำปะหลังค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ และเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยงเชื้อมีปริมาณเบี่ยงมันสำปะหลังเหลืออยู่ในระบบประมาณ 15 กรัมต่อลิตร สำหรับการสร้างไฟฟ้าพบค่าสูงสุดที่ 1.4 μA ในวันที่ 12 ของการเจริญ ซึ่งอาจเป็นผลมาจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทำงานของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงแต่ละสายพันธุ์ให้การย่อยสลายโดยเริ่มจากแป้งมันสำปะหลังค่อยๆ เปลี่ยนเป็นกลูโคสอย่างช้าๆ พร้อมทั้งเกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นอะซิเตต ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงสามารถนำไปใช้ได้อย่างดี แต่อย่างไรก็ตามการให้อากาศที่บริเวณด้านบนของอาหารเหลว อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของเชื้อ เนื่องจากการเจริญในสภาวะมีแสง (phototroph) อาจได้รับผลกระทบจากความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายน้ำ

4.1.3 การผลิตพลังงานจากจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ที่เจริญใน CMC

นำจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทั้ง 3 สายพันธุ์ ได้แก่ *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 มาผสมกันในอัตราส่วน 1:1:1 แล้วนำไปเลี้ยงในอาหาร AM medium ซึ่งมีแหล่งคาร์บอนเป็น CMC ความเข้มข้น 15 กรัมต่อลิตร บ่มเชื้อในสภาวะความเข้มแสง 1500 ลักซ์ อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.3



ภาพที่ 4.3 แสดงการผลิตพลังงานจากการเลี้ยงเชื้อผสม *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 ในอาหารเหลว AM medium ที่มี CMC เป็นแหล่งคาร์บอน ในสภาพไร้อากาศ ภายใต้แสง 1500 ลักซ์ เมื่อ O, ปริมาณจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง □, น้ำตาลทั้งหมด และ △, กระแสไฟฟ้า

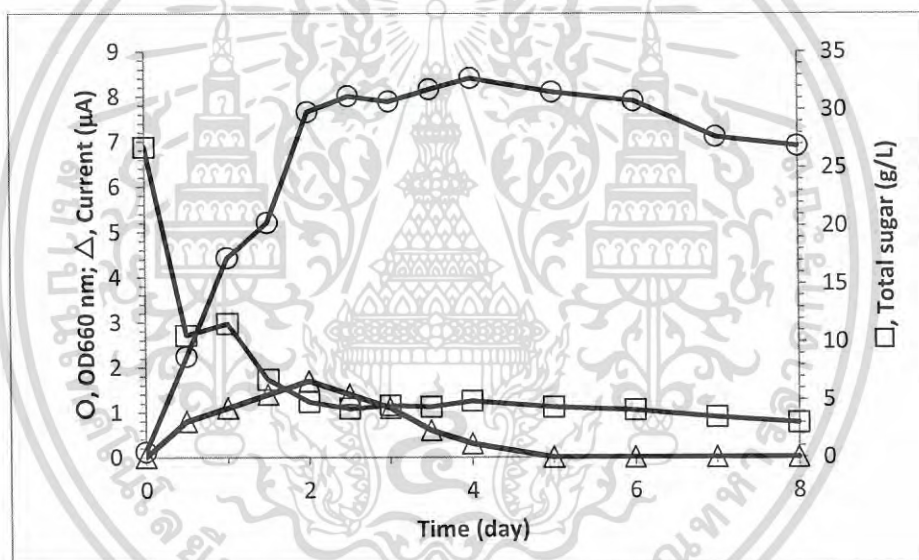
ผลการทดลองพบว่าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทั้ง 3 สายพันธุ์ สามารถเจริญในอาหารที่มีแหล่งคาร์บอนเป็น CMC ได้อย่างช้าๆ มาก โดยพบการเจริญในวันที่ 10 ถึงวันที่ 14 ของการเลี้ยงเชื้อ ขณะที่ความเข้มข้น CMC ลดลงอย่างช้าๆ ตั้งแต่วันที่ 8 ไปจนถึงสิ้นสุดการเลี้ยงเชื้อ ซึ่งมีปริมาณ CMC เหลืออยู่ประมาณ 13 กรัมต่อลิตร สำหรับการสร้างไฟฟ้าพบค่าสูงสุดที่ 0.8 µA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวันที่ 14 ของการเจริญ การใช้ CMC เป็นแหล่งคาร์บอนมักพบปัญหาเรื่องความหนืด และความแข็งแรงของโครงสร้าง CMC ทำให้เชื้อจุลินทรีย์ย่อยสลายได้ช้า จึงเริ่มพบการเจริญในระยะท้ายๆ การทดลอง นอกจากนี้สภาวะภายในขวดที่อยู่ในลักษณะการเจริญแบบไม่ใช้อากาศ อาจทำให้การส่งผ่านอิเล็กตรอนไม่ดี

4.1.4 การผลิตพลังงานจากยีสต์ ที่เจริญในกลูโคส

นำเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ไปเลี้ยงในอาหาร YM medium ซึ่งมีแหล่งคาร์บอนเป็นกลูโคสความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร บ่มเชื้อในสภาวะให้อากาศ 0.5 VVM ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.4



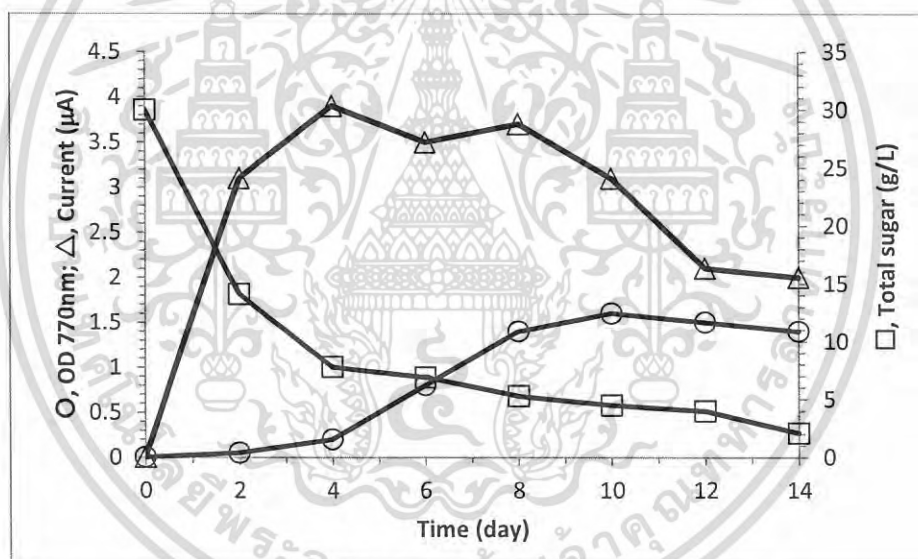
ภาพที่ 4.4 แสดงการผลิตพลังงานจากการเลี้ยงเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ในสภาวะให้อากาศ 0.5 VVM ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เมื่อ ○, ปริมาณจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง □, น้ำตาลทั้งหมด และ Δ, กระแสไฟฟ้า

ผลการทดลองพบว่าเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ให้การเจริญเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-2 วันแรก แล้วเซลล์ก็มีความเข้มข้นคงที่ไปจนถึงวันที่ 6 จากนั้นจึงค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ ขณะที่ความเข้มข้นกลูโคสลดลงอย่างรวดเร็วในระยะ 0-2 วันแรก จากนั้นจึงลดลงอย่างช้าๆ และมีค่าคงที่เมื่อสิ้นสุดการเลี้ยงเชื้อ สำหรับการสร้างไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในช่วง 0-2 วันแรก โดยให้สูงสุดที่ 1.7 μA จากนั้นปริมาณไฟฟ้าก็ค่อยๆ ลดลงจนเป็น 0 ในวันที่ 5 ของการเจริญ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณด้านบนมีการให้อากาศอย่างเพียงพอ แต่บริเวณด้านล่างมีปริมาณอากาศน้อยลงเนื่องจากเชื้อนำไปใช้ ทำให้ออกซิเจนไม่เพียงพอจึงให้การเจริญในสภาพไร้อากาศ จึงพบการสร้างแอลกอฮอล์ และสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในระยะต่อมา

4.1.5 การผลิตพลังงานจากจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงและยีสต์ ที่เจริญในกลูโคส

นำจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทั้ง 3 สายพันธุ์ ได้แก่ *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 มาผสมกันในอัตราส่วน 1:1:1 และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ไปเลี้ยงในอาหาร AM medium และ YM medium ซึ่งมีแหล่งคาร์บอนเป็นกลูโคสความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร บ่มเชื้อในสภาวะความเข้มแสง 1500 ลักซ์ อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.5



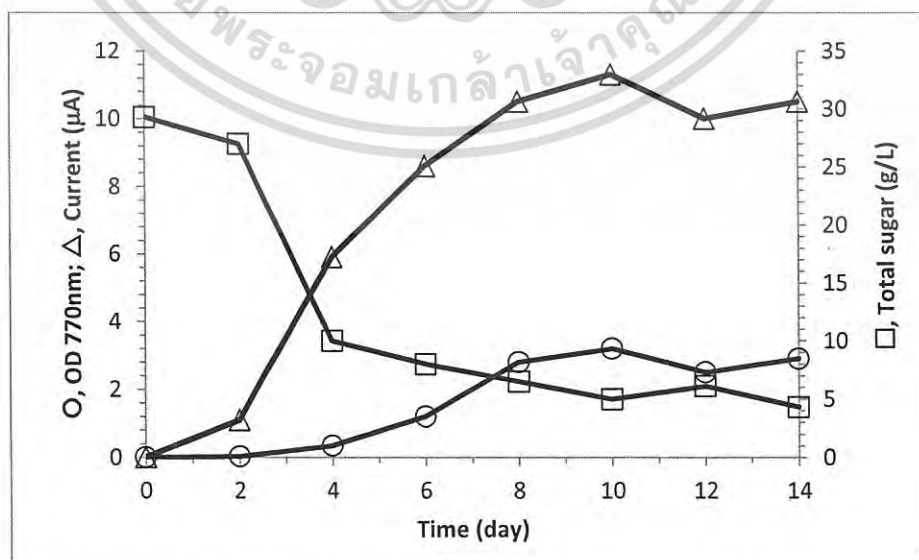
ภาพที่ 4.5 แสดงการผลิตพลังงานจากการเลี้ยงเชื้อผสม *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในอาหารเหลว AM medium และ YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ในสภาพให้อากาศ 0.5 VVM ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ภายใต้แสง 1500 ลักซ์ เมื่อ ○, ปริมาณจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง □, น้ำตาลทั้งหมด และ △, กระแสไฟฟ้า

ผลการทดลองพบว่าเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ให้การเจริญเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-2 วันแรก (โดยสังเกตจากสีของอาหารเลี้ยงเชื้อ) จากนั้นจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 มา ทั้ง 3 สายพันธุ์ จึงเริ่มการเจริญ และเจริญอย่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวดเร็วในช่วง 4-10 วันต่อมา และให้เซลล์สูงสุดในวันที่ 10 จากนั้นจึงลดลงช้าๆ เมื่อสิ้นสุดการเลี้ยงเชื้อ การเปลี่ยนแปลงของกลูโคสในช่วง 0-2 วันแรก เป็นผลมาจากการเจริญของเชื้อยีสต์ ทำให้การเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้นในวันที่ 2 และต่อเนื่องไปจนได้เซลล์สูงสุดในวันที่ 10 และให้ปริมาณเซลล์คงที่ไปจนสิ้นสุดการทดลอง ขณะที่ความเข้มข้นกลูโคสลดลงอย่างรวดเร็วในระยะ 0-2 วันแรก จากนั้นจึงลดลงอย่างช้าๆ และมีค่าคงที่เมื่อสิ้นสุดการเลี้ยงเชื้อ สำหรับการสร้างไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในช่วง 0-4 วันแรก โดยให้สูงสุดที่ $3.9 \mu\text{A}$ จากนั้นปริมาณไฟฟ้ามีค่าคงที่ไปจนถึงวันที่ 8 แล้วจึงค่อยๆ ลดลงจนกระทั่งสิ้นสุดการเลี้ยงเชื้อ การเจริญของยีสต์ในช่วงแรกทำให้ปริมาณกลูโคสลดลง ทำให้ปริมาณออกซิเจนในระบบลดลง ส่งเสริมให้การเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงให้การเจริญได้ดี การสร้างไฟฟ้าในระยะแรกเป็นไปอย่างรวดเร็ว พร้อมกับการลดลงของสารอาหาร และเมื่อสารอาหารลดลงทำให้การสร้างไฟฟ้าลดลงไปด้วย

4.1.6 การผลิตพลังงานจากจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง และยีสต์ ที่เจริญในแป้งมันสำปะหลัง และกลูโคส

นำจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทั้ง 3 สายพันธุ์ ได้แก่ *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 มาผสมกันในอัตราส่วน 1:1:1 และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ไปเลี้ยงในอาหาร AM medium และ YM medium ซึ่งมีแหล่งคาร์บอนเป็นแป้งมันสำปะหลัง และกลูโคส ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร บ่มเชื้อในสภาวะความเข้มแสง 1500 ลักซ์ อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.6



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 4.6 แสดงการผลิตพลังงานจากการเลี้ยงเชื้อผสม *Rhodopseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในอาหารเหลว AM medium และ YM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลัง และกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ในสภาพให้อากาศ 0.5 VVM ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ภายใต้แสง 1500 ลักซ์ เมื่อ ○, ปริมาณจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง □, น้ำตาลทั้งหมด และ △, กระแสไฟฟ้า

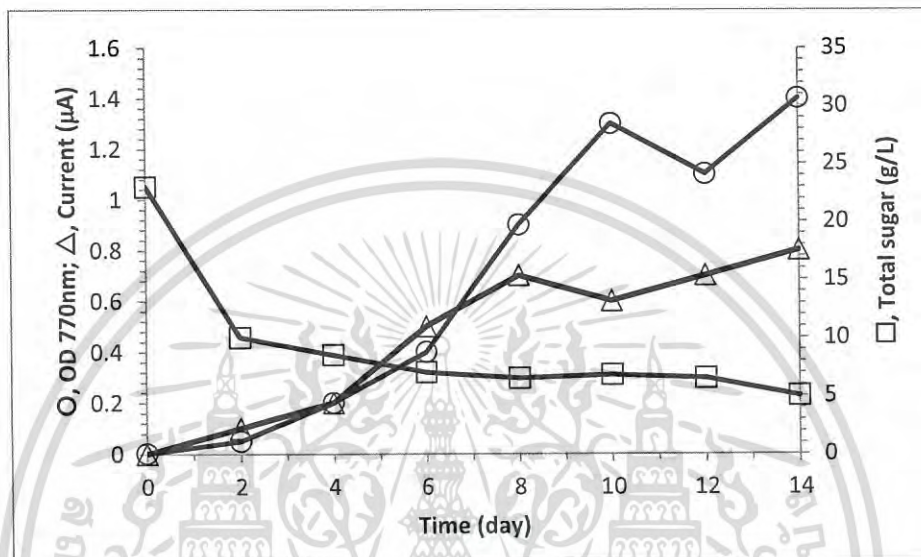
ผลการทดลองพบเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เจริญเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 0-2 วันแรก (เนื่องจากใช้กลูโคสได้อย่างดี) ขณะที่จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodopseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 มา ทั้ง 3 สายพันธุ์ เริ่มการเจริญ และเจริญอย่างรวดเร็วในช่วง 4-10 วันต่อมา และให้เซลล์สูงสุดในวันที่ 10 จากนั้นจึงคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการเลี้ยงเชื้อ การเปลี่ยนแปลงของกลูโคสในช่วง 0-2 วันแรก เป็นผลมาจากการเจริญของเชื้อยีสต์ ทำให้การเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้นในวันที่ 2 และต่อเนื่องไปจนถึงเซลล์สูงสุดในวันที่ 10 และให้ปริมาณเซลล์คงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง ส่วนความเข้มข้นกลูโคสลดลงอย่างรวดเร็วในระยะ 0-2 วันแรก จากนั้นจึงลดลงอย่างช้าๆ และมีค่าคงที่เมื่อสิ้นสุดการเลี้ยงเชื้อ สำหรับการสร้างไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในช่วง 2-10 วันแรก โดยให้ค่าสูงสุดที่ 10.0 μA จากนั้นปริมาณไฟฟ้ามีค่าคงที่ไปจนถึงวันที่ 14 ของการเลี้ยงเชื้อ การเจริญของยีสต์ในช่วงแรกทำให้ปริมาณกลูโคสลดลงและใช้ออกซิเจน ซึ่งส่งเสริมต่อการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งสามารถย่อยสลายแป้งมันสำปะหลัง ได้ดีขึ้น จึงสร้างสารเมแทบอลิต์ที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้เจริญเพิ่มมากขึ้น สารเมแทบอลิต์ที่เกิดขึ้นจึงส่งเสริมการสร้างไฟฟ้าในระยะแรกเป็นไปอย่างรวดเร็ว โดยให้ค่าไฟฟ้าสูงสุด แต่เมื่อสารอาหารลดลง ก็ส่งผลให้การสร้างไฟฟ้าคงที่ในระยะสุดท้ายของการเลี้ยงเชื้อ สภาพภายในขวดเลี้ยงเชื้ออาจไม่เหมาะสมต่อผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากการให้อากาศที่บริเวณด้านบน (cathodic chamber) และสถานะให้อากาศที่บริเวณด้านล่าง (anodic chamber) ทำให้เกิดข้อจำกัดของความต่างศักย์ จึงมีการสร้างไฟฟ้าในระดับต่ำเป็นไปตามการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ถ้าใช้ขวดที่มีความสูงมากกว่านี้ และตำแหน่งให้อากาศเหมาะสม ก็อาจส่งผลให้การสร้างไฟฟ้าสูงขึ้นได้

4.1.7 การผลิตพลังงานจากจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงและยีสต์ ที่เจริญใน CMC และ กลูโคส

นำจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทั้ง 3 สายพันธุ์ ได้แก่ *Rhodopseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 มาผสมกันในอัตราส่วน 1:1:1 และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ไปเลี้ยงใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาหาร AM medium และ YM medium ซึ่งมีแหล่งคาร์บอนเป็น CMC และกลูโคส ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร บ่มเชื้อในสภาวะความเข้มแสง 1500 ลักซ์ อัตราการให้อากาศ 0.5 VVM ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.7



ภาพที่ 4.7 แสดงการผลิตพลังงานจากการเลี้ยงเชื้อผสม *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในอาหารเหลว AM medium และ YM medium ที่มี CMC และกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ในสภาพให้อากาศ 0.5 VVM ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ภายใต้แสง 1500 ลักซ์ เมื่อ ○, ปริมาณจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง □, น้ำตาลทั้งหมด และ Δ, กระแสไฟฟ้า

ผลการทดลองให้การเจริญของเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เพิ่มขึ้นในระยะแรกในช่วง 0-2 วันแรก (เนื่องจากมีกลูโคสค่อนข้างจำกัด) ขณะที่จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 มา ทั้ง 3 สายพันธุ์ เริ่มการเจริญอย่างช้าๆ ในช่วง 2-8 วันต่อมา และให้เซลล์ค่อนข้างคงที่ไปจนกระทั่งสิ้นสุดการเลี้ยงเชื้อ การเปลี่ยนแปลงของกลูโคสในช่วง 0-2 วันแรก เป็นผลมาจากการเจริญของเชื้อยีสต์ ทำให้การเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงเพิ่มขึ้นในวันที่ 2 แต่หลังจากนั้นพบการใช้ CMC เป็นไปอย่างช้าๆ เนื่องจากโครงสร้างสับสเตรท และพบว่าเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีปริมาณ CMC คงเหลือถึง 30 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการสร้างไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในช่วง 2-8 วันแรก โดยให้ค่าเพียง 0.7 μA จากนั้นปริมาณไฟฟ้ามีค่าคงที่ไปจนถึงวันที่ 14 ของการเลี้ยงเชื้อ การเจริญของยีสต์ในช่วงแรกทำให้ปริมาณกลูโคสลดลง และใช้ออกซิเจน ซึ่งส่งเสริมต่อการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง แต่การย่อยสลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CMC ดำเนินไปอย่างช้าๆ ทำให้การสร้างสารเมแทบอลิต์ได้น้อย จึงส่งผลการเจริญ และการสร้างไฟฟ้าในระบบ

การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์แบบห้องเดี่ยว (single chamber) เมื่อใช้จุลินทรีย์เพียงชนิดเดียว พบว่าให้ผลการสร้างไฟฟ้าต่ำ อาจเป็นเพราะการเลี้ยงเชื้อ 2 สภาวะ ในภาชนะเดียวกัน โดยให้ด้านล่างของอาหารเหลวเป็นบริเวณ anodic chamber (ให้อากาศ) และด้านบนของอาหารเหลว เป็นบริเวณ cathodic chamber (ให้อากาศ) ทำให้เซลล์ต้องปรับตัวตลอดเวลาจากสภาพมีอากาศมากไปยังสภาพมีอากาศน้อย จึงส่งผลเสียต่อการสร้างไฟฟ้า อีกทั้งกรณีของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง พบว่าสภาพให้อากาศ และให้แสง อาจส่งผลเสียโดยตรงต่อการเจริญ เนื่องจากออกซิเจนที่ความเข้มข้นระดับหนึ่ง จะส่งผลยับยั้งกิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสง ขณะที่เชื้อยีสต์สามารถพัฒนาให้เจริญได้ทั้งในสภาพมีอากาศ และไร้อากาศ แต่ก็อาจทำให้กิจกรรมการส่งผ่านอิเล็กตรอนดำเนินไปแบบไม่สมบูรณ์ จึงให้ผลการสร้างไฟฟ้าต่ำ แต่เมื่อนำเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง (*Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14) และยีสต์ (*Saccharomyces cerevisiae*) มาเลี้ยงร่วมกัน พบว่าในระยะแรกยีสต์ให้การเจริญได้อย่างดี เนื่องจากสามารถใช้น้ำตาลกลูโคส ส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนในระบบลดลงมาอยู่ในระดับที่ไม่ส่งผลกระทบต่อ การเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้เชื้อทั้ง 2 ให้การเจริญร่วมกันได้อย่างดี จึงให้การสร้างไฟฟ้าสูงที่สุด แต่ในกรณีที่ใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน พบการเจริญของยีสต์ในระยะแรก และเมื่อใช้กลูโคสจนมีความเข้มข้นลดลงมาในระดับที่เหมาะสม ก็จะพบการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง แต่ในสภาพดังกล่าวกลับเป็นการแข่งขันกันใช้สับสเตรท ทำให้ส่งผลเสียทั้งในด้านการเจริญ และการสร้างไฟฟ้า สำหรับการให้ CMC เป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ให้การเจริญได้ ซึ่งเป็นผลมาจากกิจกรรมของเชื้อทั้ง 3 สายพันธุ์ ส่งเสริมซึ่งกันและกัน แต่อย่างไรก็ตามการย่อยสลาย CMC ก็เป็นไปอย่างช้า ซึ่งกลูโคสที่ได้จากการย่อยสลาย อาจถูกเชื้อยีสต์นำไปใช้เพื่อการเจริญ จึงเป็นเหตุให้การเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ดำเนินไปอย่างช้า และสร้างไฟฟ้าได้น้อยที่สุด เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงควรใช้การเลี้ยงเชื้อแบบแยกส่วน โดยใช้เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ชนิด dual chamber ซึ่งสามารถป้องกันการแข่งขันใช้สับสเตรทได้ และน่าจะส่งผลดีต่อการสร้างไฟฟ้า ดังนั้นการทดลองต่อไปจะเป็นการศึกษาเซลล์ไฟฟ้าจากจุลินทรีย์ห้องคู่ (dual chamber) โดยกำหนดให้จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง เจริญในสภาพไร้อากาศ ส่วนเชื้อยีสต์เจริญในสภาพให้อากาศ

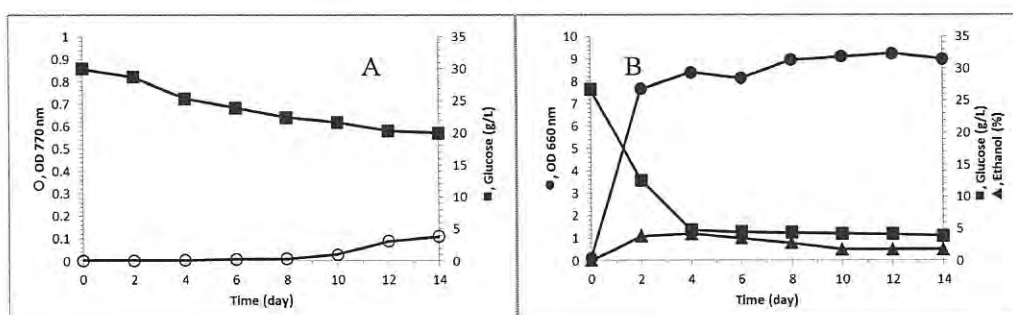
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ (dual chamber)

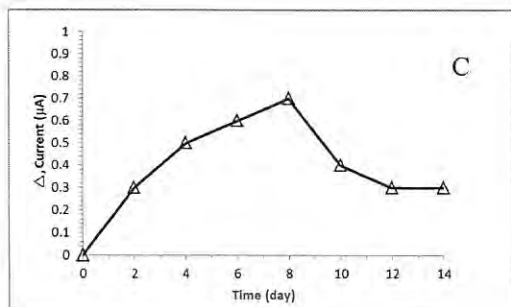
เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ (Two-compartment MFCs) นิยมใช้การเลี้ยงเชื้อแบบเบ็ดเสร็จ (batch mode) โดยใช้แหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ เช่น กลูโคส หรืออะซิเตท เพื่อผลิตพลังงาน เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ชนิดนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน ซึ่งแบ่งแยกออกจากกันด้วยแผ่นเมมเบรนเลือกผ่านโปรตอน โดยใช้แผ่นเมมเบรนขนาดรูพรุน 1 K-da เพื่อให้โปรตอนเคลื่อนที่ข้ามไปยังบริเวณแคโทด แต่ป้องกันไม่ให้ออกซิเจนผ่านเข้ามายังบริเวณแอโนด การทดลองนี้ กำหนดให้บริเวณแอโนด (anodic chamber) (ขวดที่ 1) เป็นการเลี้ยงจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 (สภาพไร้อากาศ) ซึ่งบรรจุอาหารเหลว AM medium ที่มีกลูโคส แป้งมันสำปะหลัง และ CMC (ตามลำดับ) เป็นแหล่งคาร์บอน และใช้กลูตามัต 10 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งไนโตรเจน) ปริมาณเชื้อเริ่มต้น 3.0 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้บริเวณแคโทด (cathodic chamber) (ขวดที่ 2) เป็นการเลี้ยงยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* (ในสภาพให้อากาศ 0.5 VVM) ซึ่งบรรจุอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ปริมาณเชื้อเริ่มต้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ ขวดทั้ง 2 มีแผ่นเมมเบรนขนาดรูพรุน 1 K-da กันขวดทั้ง 2 แยกจากกัน นำไปบ่มภายใต้แสง 1500 ลักซ์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

4.2.1 การผลิตพลังงานจากจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ที่เจริญในกลูโคส

นำจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทั้ง 3 สายพันธุ์ ได้แก่ *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 มาผสมกันในอัตราส่วน 1:1:1 แล้วนำไปเลี้ยงในอาหาร AM medium ซึ่งมีแหล่งคาร์บอนเป็นกลูโคสความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร ในขวดที่ 1 (สภาวะไร้อากาศ) และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เจริญในอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร ในขวดที่ 2 (สภาวะให้อากาศ 0.5 VVM) ขวดทั้ง 2 มีแผ่นเมมเบรนขนาดรูพรุน 1 K-da กันแยกส่วน จากนั้นนำไปบ่มภายใต้แสง 1500 ลักซ์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



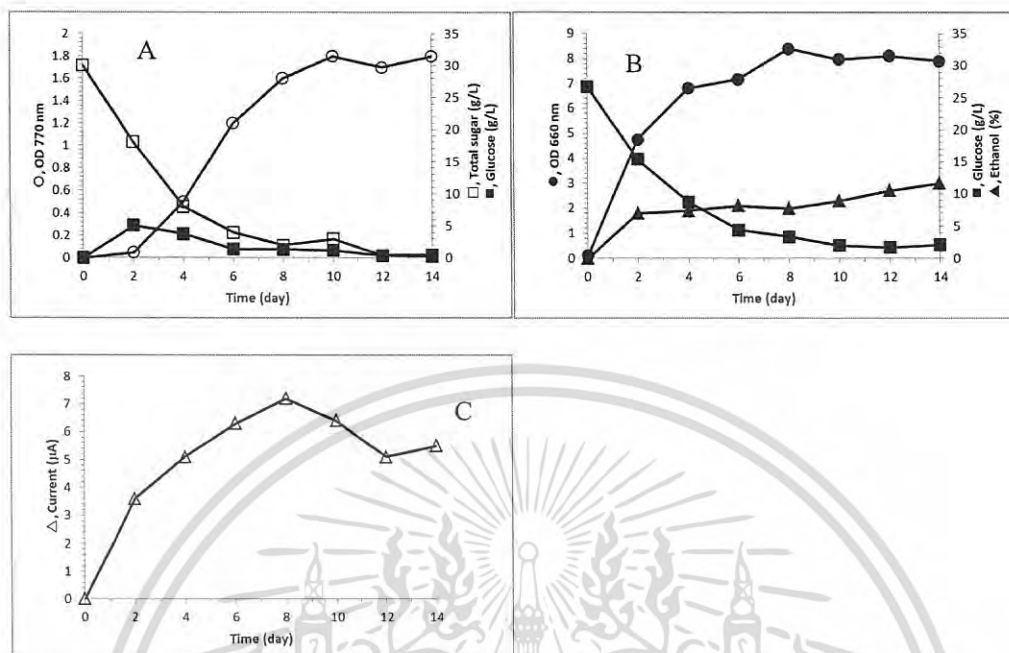
ภาพที่ 4.8 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ ด้วยการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงด้วยกลูโคส (A) บริเวณแอโนด และเลี้ยงเชื้อยีสต์ (B) บริเวณแคโทด และให้การสร้างไฟฟ้า (C) เมื่อ ○, ปริมาณจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ■, กลูโคส ▲, แอลกอฮอล์ และ △, กระแสไฟฟ้า

ภาพ 4.8A แสดงการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงในบริเวณ anodic chamber ซึ่งใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าได้รับผลกระทบจากสับสเตรท เชื้อจึงเจริญได้อย่างช้าๆ โดยตรวจพบการเจริญในวันที่ 8-14 ของการทดลอง ส่วนภาพ 4.8B แสดงการเจริญของเชื้อยีสต์ในบริเวณ cathodic chamber ซึ่งใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าให้การเจริญสูงสุดในวันที่ 2 และใช้กลูโคสอย่างรวดเร็วจนเหลือที่ระดับต่ำในวันที่ 4 ของการเจริญ จากนั้นเซลล์ก็มีปริมาณค่อนข้างคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการเลี้ยงเชื้อ ขณะที่พบการสร้างแอลกอฮอล์ในระดับต่ำ และคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง ภาพ 4.8C แสดงการสร้างไฟฟ้าตั้งแต่วันที่ 2-8 โดยให้ค่าสูงสุดเพียง 0.6 μA ซึ่งเป็นผลมาจากจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงให้การเจริญช้า และน้อยมาก เนื่องจากผลกรยับยั้งของความเข้มข้นกลูโคส จึงส่งผลต่อการสร้างสารเมแทบอลิท์ และการปล่อยอิเล็กตรอน

4.2.2 การผลิตพลังงานจากจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ที่เจริญในแป้งมันสำปะหลัง

นำจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทั้ง 3 สายพันธุ์ ได้แก่ *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 มาผสมกันในอัตราส่วน 1:1:1 แล้วนำไปเลี้ยงในอาหาร AM medium ซึ่งมีแหล่งคาร์บอนเป็นแป้งมันสำปะหลังความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร ในขวดที่ 1 (สภาวะไร้อากาศ) และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เจริญในอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร ในขวดที่ 2 (สภาวะให้อากาศ 0.5 VVM) ขวดทั้ง 2 มีแผ่นเมมเบรนขนาดรูพรุน 1 K-da กั้นแยกส่วน จากนั้นนำไปบ่มภายใต้แสง 1500 ลักซ์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



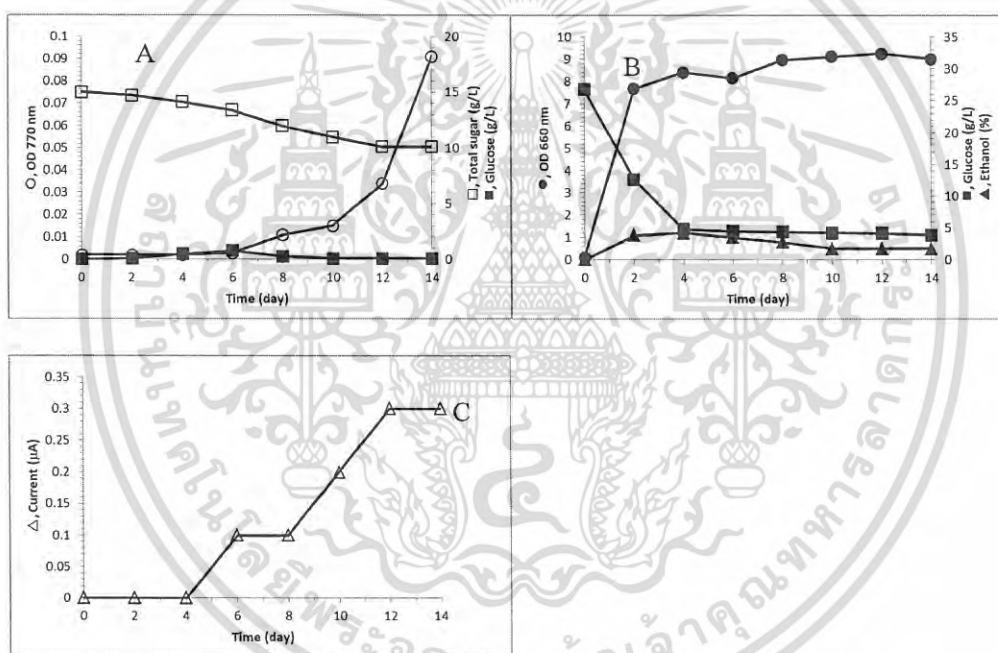
ภาพที่ 4.9 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ ด้วยการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงด้วยแป้งมันสำปะหลัง (A) บริเวณแอโนด และเลี้ยงเชื้อยีสต์ (B) บริเวณแคโทด และให้การสร้างไฟฟ้า (C) เมื่อ ○, ปริมาณจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง □, น้ำตาลทั้งหมด ■, กลูโคส ▲, แอลกอฮอล์ และ △, กระแสไฟฟ้า

ภาพ 4.9A แสดงการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงในบริเวณ anodic chamber ซึ่งใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าการเจริญดำเนินไปอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 2 และให้เซลล์สูงสุดในวันที่ 10 แล้วให้ปริมาณเซลล์คงที่ไปจนกระทั่งสิ้นสุดการเลี้ยงเชื้อ การย่อยสลายแป้งไปเป็นกลูโคสในช่วงวันที่ 2 ทำให้ความเข้มข้นกลูโคสเหมาะสมต่อการเจริญ (ซึ่งอยู่ในระดับต่ำ) และนำไปใช้ย่อยสลายต่อไปเป็นกรดอินทรีย์ต่างๆ ส่วนภาพ 4.9B แสดงการเจริญของเชื้อยีสต์ในบริเวณ cathodic chamber ซึ่งใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าการเจริญสูงสุดในวันที่ 2 และใช้กลูโคสอย่างรวดเร็วจนเหลือที่ระดับต่ำในวันที่ 10 ของการเจริญ จากนั้นเซลล์ก็มีปริมาณค่อนข้างคงที่ไปจนสิ้นสุดการเลี้ยงเชื้อ นอกจากนี้ยังพบการผลิตแอลกอฮอล์ในวันที่ 2 แล้วค่อยๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ไปจนกระทั่งสิ้นสุดการเลี้ยงเชื้อ ภาพ 4.9C แสดงการสร้างไฟฟ้าให้ค่าสูงสุดในวันที่ 8 ของการเจริญ ที่ระดับ 7.2 μA จากนั้นจึงลดลงในตอนท้ายของการเลี้ยงเชื้อ อย่างไรก็ตามการสร้างไฟฟ้าอาจส่งผลต่อการแข่งขันการใช้ออกซิเจนในบริเวณ cathodic chamber ระหว่างยีสต์ ก็เป็นไปได้ จึงทำให้การสร้างแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การผลิตพลังงานจากจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ที่เจริญใน CMC

นำจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทั้ง 3 สายพันธุ์ ได้แก่ *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 มาผสมกันในอัตราส่วน 1:1:1 แล้วนำไปเลี้ยงในอาหาร AM medium ซึ่งมีแหล่งคาร์บอนเป็น CMC ความเข้มข้น 15 กรัมต่อลิตร ในขวดที่ 1 (สภาวะไร้อากาศ) และเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เจริญในอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร ในขวดที่ 2 (สภาวะให้อากาศ 0.5 VVM) ขวดทั้ง 2 มีแผ่นเมมเบรนขนาดรูพรุน 1 K-da กันแยกส่วน จากนั้นนำไปบ่มภายใต้แสง 1500 ลักซ์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.10



ภาพที่ 4.10 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ ด้วยการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงด้วย CMC (A) บริเวณแอโนด และเลี้ยงเชื้อยีสต์ (B) บริเวณแคโทด และให้การสร้างไฟฟ้า (C) เมื่อ \circ , ปริมาณจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง \square , น้ำตาลทั้งหมด \blacksquare , กลูโคส \blacktriangle , แอลกอฮอล์ และ \triangle , กระแสไฟฟ้า

ภาพ 4.10A แสดงการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงในบริเวณ anodic chamber ซึ่งใช้ CMC เป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าเชื้อมีข้อจำกัดในการย่อยสลาย จึงเจริญได้อย่างช้ามาก ซึ่งให้ความเข้มข้นเซลล์ต่ำที่สุด โดยตรวจพบการเจริญในวันที่ 8-14 ของการทดลอง อย่างไรก็ตามพบว่ามีการย่อยสลายไปเป็นกลูโคสในระดับต่ำ ส่วนภาพ 4.10B แสดงการเจริญของยีสต์ในบริเวณ cathodic chamber ซึ่งใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าเชื้อมีข้อจำกัดในการย่อยสลาย จึงเจริญได้อย่างช้ามาก ซึ่งให้ความเข้มข้นเซลล์ต่ำที่สุด โดยตรวจพบการเจริญในวันที่ 8-14 ของการทดลอง อย่างไรก็ตามพบว่ามีการย่อยสลายไปเป็นเอทานอลในระดับต่ำ ส่วนภาพ 4.10C แสดงการสร้างไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ พบว่ามีการสร้างไฟฟ้าได้ประมาณ 0.3 μ A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของเชื้อยีสต์ในบริเวณ cathodic chamber ซึ่งใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าให้การเจริญสูงสุดในวันที่ 2 และใช้กลูโคสอย่างรวดเร็วจนเหลือที่ระดับต่ำในวันที่ 4 ของการเจริญ จากนั้นเซลล์ก็มีปริมาณค่อนข้างคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการเลี้ยงเชื้อ ขณะที่พบการสร้างแอลกอฮอล์ในระดับต่ำ และคงที่ไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง ภาพ 4.10C แสดงการสร้างไฟฟ้าตั้งแต่วันที่ 4-12 โดยให้ค่าสูงสุดเพียง $0.3 \mu\text{A}$ ซึ่งเป็นผลมาจากจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงให้การเจริญน้อยมาก เนื่องจากโครงสร้างและความแข็งแรงของพันธะใน CMC จึงส่งผลต่อการสร้างสารเมแทบอลิท์ และการปล่อยอิเล็กตรอน

แสดงให้เห็นว่าการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ (dual chamber) เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ในสภาพไร้อากาศ (anodic chamber) และใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการเจริญของเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในสภาพให้อากาศ (anodic chamber) ส่งผลมีการสร้างไฟฟ้าสูงสุด จึงนำสภาพการเลี้ยงเชื้อดังกล่าวไปศึกษาเพิ่มเติมเพื่อให้การสร้างไฟฟ้ามีศักยภาพเพิ่มขึ้น

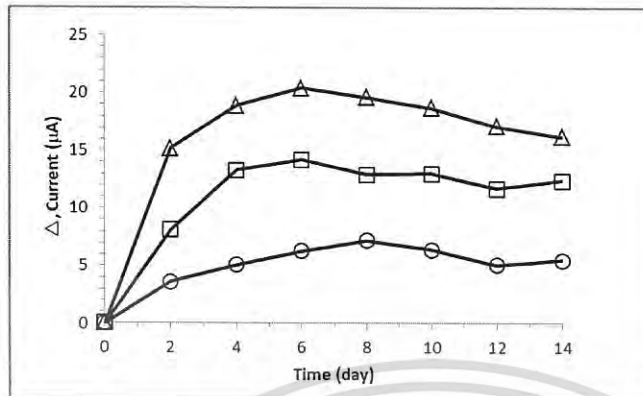
4.3 สภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตพลังงานของเซลล์ไฟฟ้าจากจุลินทรีย์

การผลิตพลังงานของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์แบบห้องคู่ (dual chamber) ให้ผลการสร้างไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงในแหล่งคาร์บอนเป็นแป้งมันสำปะหลัง จึงนำมาศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการสร้างไฟฟ้า ได้แก่ อัตราการให้อากาศในบริเวณแคโทด ความพรุนของแผ่นเมมเบรน ชนิดของอิเล็กโทรด ชนิดของแหล่งกำเนิดแสง และความเข้มแสง ต่อไป

4.3.1 ผลของการให้อากาศในบริเวณแคโทด (cathodic chamber)

ศึกษาผลของอัตราการให้อากาศในบริเวณแคโทด (cathode chamber) ที่ระดับ 0.5 VVM 1.0 VVM และ 1.5 VVM (ตามลำดับ) กำหนดให้จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 และ OS33 เจริญในขวดที่ 1 (anodic chamber) ซึ่งบรรจุอาหารเหลว AM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัมต่อลิตร และกลูตาเมต 10 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน และไนโตรเจน (ตามลำดับ) ส่วนเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เจริญในขวดที่ 2 (cathodic chamber) ซึ่งบรรจุอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน โดยใช้อัตราการให้อากาศที่ระดับ 0.5 VVM 1.0 VVM และ 1.5 VVM (ตามลำดับ) ขวดทั้ง 2 มีแผ่นเมมเบรนรูพรุนขนาด 1 K-da กั้นกลาง นำไปบ่มภายใต้แสง 1500 ลักซ์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



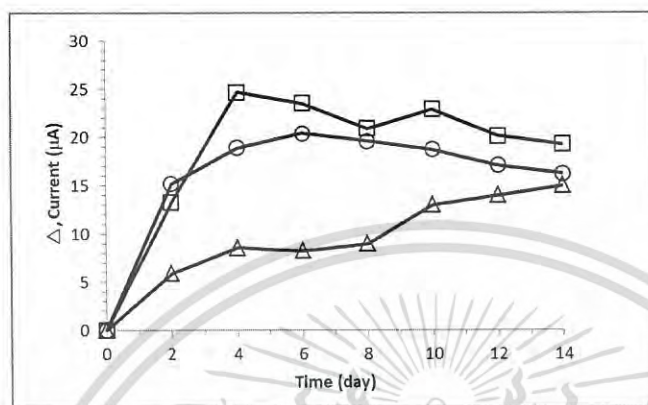
ภาพที่ 4.11 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เมื่อใช้อัตราการให้อากาศในบริเวณ cathodic chamber ที่ระดับ 0.5 VVM (○); 1.0 VVM (□) และ 1.5 VVM (△) ตามลำดับ

ผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราการให้อากาศเพิ่มขึ้น (จาก 0.5 เป็น 1.5 VVM) ส่งผลให้การสร้างไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 7.2 μA (วันที่ 8) เป็น 20.4 μA (วันที่ 6) ของการเลี้ยงเชื้อ การเพิ่มอัตราการให้อากาศยังส่งผลดีต่อการเจริญของเชื้อยีสต์ และทำให้การผลิตแอลกอฮอล์ลดลงอีกด้วย ซึ่งเป็นผลมาจากการให้ออกซิเจนเพียงพอต่อการนำไปใช้เพื่อการขนส่งอิเล็กตรอน และการใช้เพื่อการเจริญของเซลล์ยีสต์ อย่างไรก็ตามการให้อากาศในส่วน cathodic chamber ที่ระดับสูงอาจส่งผลให้ความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายน้ำ เคลื่อนข้ามผ่านแผ่นเมมเบรนไปยังส่วน anodic chamber ซึ่งส่งผลเสียโดยรวมต่อการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ ดังนั้นการใช้แผ่นเมมเบรนขนาดรูพรุน 1 K-Da อาจจำกัดการแพร่ของออกซิเจนที่ละลายน้ำไปยังส่วน anodic chamber

4.3.2 ผลของรูพรุนแผ่นเมมเบรน

ศึกษาผลของรูพรุนแผ่นเมมเบรน ที่กั้นแยกบริเวณแอโนด และบริเวณแคโทด ขนาด 1 K-Da 5 K-Da และ 10 K-Da (ตามลำดับ) กำหนดให้จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 และ OS33 เจริญในขวดที่ 1 (anodic chamber) ซึ่งบรรจุอาหารเหลว AM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัมต่อลิตร และกลูตามेट 10 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน และไนโตรเจน (ตามลำดับ) ส่วนเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เจริญในขวดที่ 2 (cathodic chamber) ซึ่งบรรจุอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน โดยใช้อัตราการให้อากาศที่ระดับ 1.5 VVM ขวดทั้ง 2 มีแผ่นเมมเบรนรูพรุน

ขนาด 1 K-Da 5 K-Da และ 10 K-Da (ตามลำดับ) กั้นกลาง นำไปบ่มภายใต้แสง 1500 ลักซ์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.12



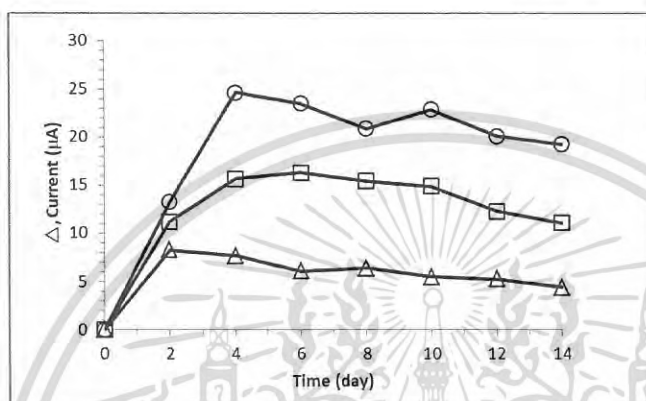
ภาพที่ 4.12 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เมื่อใช้แผ่นกั้นเมมเบรนขนาดรูพรุน 1 K-Da (○); 5 K-Da (□) และ 10 K-Da (△) ตามลำดับ

ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้แผ่นเมมเบรนขนาด 5 K-Da ให้การสร้างไฟฟ้าสูงที่สุด (24.6 μA ในวันที่ 4 ของการเจริญ) ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากรูพรุนที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ของโปรตอน ส่วนการใช้แผ่นเมมเบรนขนาด 1 K-Da ให้การสร้างไฟฟ้าต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่ารูพรุนขนาดเล็กไม่ส่งผลดีต่อการเคลื่อนที่ของโปรตอน อาจเป็นผลเนื่องมาจากการจับเกาะของเซลล์จุลินทรีย์ (Biofouling) จึงทำให้เกิดแรงต้านการเคลื่อน (membrand resistant) ก็เป็นไปได้ ขณะที่แผ่นเมมเบรนขนาด 10 K-Da ให้ผลการสร้างไฟฟ้า ที่ระดับต่ำที่สุด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ของสารโมเลกุลขนาดเล็กข้ามแผ่นเมมเบรน รวมไปถึงปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ที่ไปรบกวนกระบวนการที่เกิดขึ้นในส่วน anodic chamber ทั้งในด้านการสร้างสารเมแทบอลิท์ และความเป็นพิษของออกซิเจนต่อเซลล์จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้เกิดผลกระทบต่อ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลให้การสร้างไฟฟ้าลดลง

4.3.3 ผลของชนิดขั้วอิเล็กโทรด

ศึกษาผลของชนิดขั้วอิเล็กโทรด ที่ใช้ขั้วขั้วอิเล็กตรอนระหว่างบริเวณแอโนด และบริเวณแคโทด เป็น platinum iron และ copper (ตามลำดับ) กำหนดให้จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 และ OS33 เจริญในขวดที่ 1 (anodic chamber) ซึ่งบรรจุอาหารเหลว AM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัมต่อลิตร และกลูตาเมต 10 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน และไนโตรเจน (ตามลำดับ) ส่วนเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เจริญในขวดที่ 2 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(cathodic chamber) ซึ่งบรรจุอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน โดยใช้อัตราการให้อากาศที่ระดับ 1.5 VVM ใช้แผ่นเมมเบรนขนาด 5 K-Da กั้นระหว่างขั้วทั้ง 2 และใช้อิเล็กโทรดชนิด platinum iron และ copper (ตามลำดับ) ขนส่งอิเล็กตรอนนำไปบ่มภายใต้แสง 1500 ลักซ์ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.13



ภาพที่ 4.13 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เมื่อใช้อิเล็กโทรดชนิด Platinum (○); Iron (□) และ Copper (△) ตามลำดับ

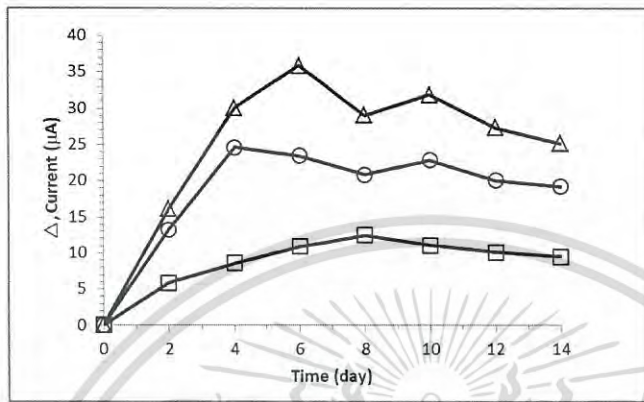
ผลการทดลองพบว่าเมื่ออิเล็กโทรดเป็น platinum ให้ผลการสร้างไฟฟ้าดีที่สุด แต่เมื่อเปลี่ยนเป็น iron และ copper พบการสร้างไฟฟ้าลดลง ตามลำดับ โดยพบการสึกกร่อนของโลหะทั้ง 2 ซึ่งอาจทำให้เกิดการสลายตัวได้เป็นประจุสารที่ละลายใน anolyte และ catholyte ทำให้เกิดผลกระทบต่อกิจกรรม และการเจริญของเซลล์จุลินทรีย์ เพื่อให้สร้างกระแสไฟฟ้าเป็นไปได้อย่างดี จึงเลือกใช้อิเล็กโทรดชนิด platinum ตลอดการทดลอง

4.3.4 ผลของแหล่งกำเนิดแสง

ศึกษาผลของแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่างๆ ได้แก่ tungsten lamp fluorescent lamp และ halogen lamp (ตามลำดับ) ที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานแสงสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง กำหนดให้จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 และ OS33 เจริญในขั้วที่ 1 (anodic chamber) ซึ่งบรรจุอาหารเหลว AM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัมต่อลิตร และกลูตาเมต 10 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน และไนโตรเจน (ตามลำดับ) ส่วนเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เจริญในขั้วที่ 2 (cathodic chamber) ซึ่งบรรจุอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน โดยใช้อัตราการให้อากาศที่ระดับ 1.5 VVM ใช้แผ่นเมมเบรนขนาด 5 K-Da กั้นระหว่างขั้วทั้ง 2 ใช้อิเล็กโทรด platinum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำไปป๋มภยไต้แสง 1500 ลักซ์ ของแหล่งกำเนิดแสงชนิด tungsten lamp fluorescent lamp และ halogen lamp (ตามลำดับ) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.14



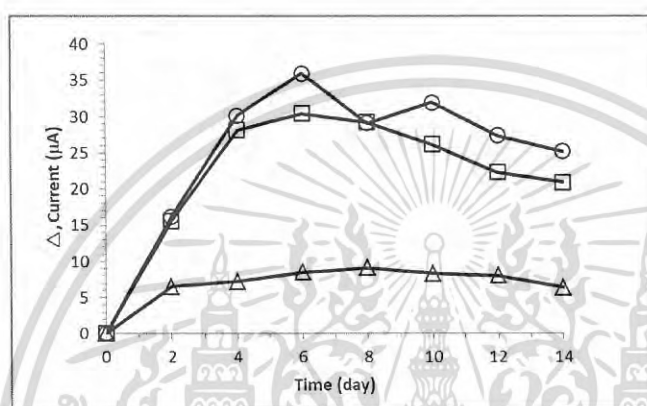
ภาพที่ 4.14 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เมื่อแหล่งกำเนิดแสงชนิด Tungsten lamp (○); Fluorescent lamp (□) และ Halogen lamp (△) ตามลำดับ

ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ halogen lamp ให้การสร้างไฟฟ้าสูงที่สุด (35.9 μA ในวันที่ 6 ของการเจริญ) ซึ่งอาจเป็นผลโดยอ้อม เนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้ในการเลี้ยงเชื้อสามารถควบคุมให้อยู่ในช่วง 35-38 องศาเซลเซียส ขณะที่การใช้ tungsten lamp ให้การสร้างไฟฟ้าน้อยกว่า น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากการควบคุมอุณหภูมิทำได้ค่อนข้างยาก มักจะอยู่ในช่วง 35-40 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การเจริญของเชื้อยีสต์เป็นสำคัญ การใช้แหล่งกำเนิดแสง fluorescent lamp ให้ผลการสร้างไฟฟ้าต่ำที่สุด เนื่องจากความยาวคลื่นแสงที่ปล่อยออกมามักอยู่ในช่วง 540-620 nm ซึ่งจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ขณะที่แหล่งกำเนิดแสงชนิด halogen lamp และ tungsten lamp ให้ความยาวคลื่นแสงในช่วง 800 nm ขึ้นไป ซึ่งเหมาะสมกับโครงสร้างดักจับแสง (light harvesting bacteriochlorophyll) ของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงสามารถเก็บพลังงานในช่วงความยาวคลื่นแสงใต้แดง (infrared) ได้ดีกว่า

4.3.5 ผลของความเข้มแสง

ศึกษาผลของความเข้มแสงที่ระดับๆ ได้แก่ 1500 2000 และ 2500 ลักซ์ (ตามลำดับ) ที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานแสงสำหรับการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง กำหนดให้ จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 และ OS33 เจริญในขวดที่ 1 (anodic chamber) ซึ่งบรรจุอาหารเหลว AM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัมต่อลิตร และกลูตามัต 10 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน และไนโตรเจน (ตามลำดับ) ส่วนเชื้อยีสต์ *Saccharomyces* เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

cerevisiae เจริญในขวดที่ 2 (cathodic chamber) ซึ่งบรรจุอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน โดยใช้อัตราการให้อากาศที่ระดับ 1.5 VVM ใช้แผ่นเมมเบรนขนาด 5 K-Da กั้นระหว่างขวดทั้ง 2 ใช้อิเล็กโทรด platinum นำไปบ่มภายใต้แสง halogen lamp ที่ความเข้ม 1500 2000 และ 2500 ลักซ์ (ตามลำดับ) อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4.15



ภาพที่ 4.15 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ เมื่อใช้ความเข้มแสงที่ระดับ 1500 ลักซ์ (○); 2000 ลักซ์ (□) และ 2500 ลักซ์ (△) ตามลำดับ

ผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้ความเข้มแสงเพิ่มเป็น 2000 ลักซ์ และ 2500 ลักซ์ ส่งผลให้การสร้างไฟฟ้าลดลงอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่สะสมในระบบ ทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ (35 องศาเซลเซียส) นอกจากนี้ยังพบการบดบังแสงกันเองของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง (shading) ส่งผลกระทบต่อการรับพลังงานจากแสง ซึ่งยังส่งผลกระทบต่อการเจริญของเชื้อยีสต์ด้วยเช่นกัน การใช้ความเข้มแสง 1500 ลักซ์ จึงเหมาะสมต่อการสร้างไฟฟ้า ทั้งในแง่ของอุณหภูมิที่สะสมในระบบ และไม่พบการบดบังแสงกันเองของจุลินทรีย์

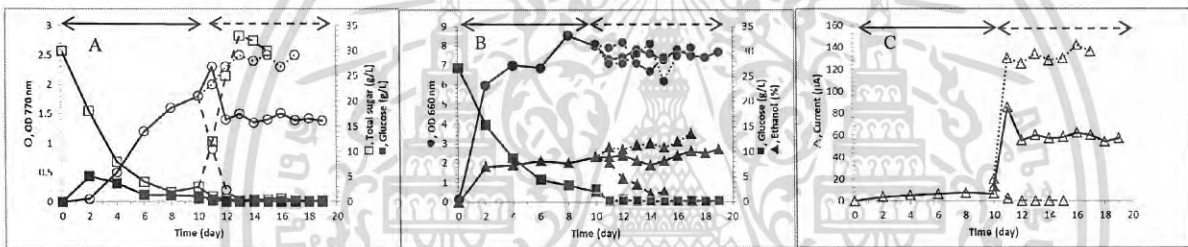
การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ (dual chamber) พบว่าจากสภาพเริ่มต้นให้การสร้างไฟฟ้าเพียง 7.2 μA เมื่อปรับปรุงสภาพการเลี้ยงเชื้อสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างไฟฟ้าได้เป็น 37.2 μA แต่อย่างไรก็ตามการสร้างไฟฟ้าดำเนินไปในช่วงแรกของการเลี้ยงเชื้อ แสดงให้เห็นว่าการสร้างไฟฟ้าจัดอยู่ในกลุ่มของผลิตภัณฑ์ชนิด primary product ซึ่งในตอนท้ายของการเลี้ยงเชื้อจะพบว่าการสร้างไฟฟ้าก็ลดลงไปด้วย เนื่องจากสารอาหารที่นำไปให้เพื่อการออกซิเดชันภายในเซลล์หมดลง ดังนั้นการเพิ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพให้เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สามารถสร้างไฟฟ้าได้มากขึ้น และเสถียรขึ้น จึงควรใช้การเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง (continuous cultivation) ดังการทดลองต่อไป

4.3 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ (dual chamber) ด้วยการเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง (continuous cultivaiton)

ช่วงแรกให้จุลินทรีย์ในเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์มีการเจริญแบบ batch cultivation (เป็นเวลา 10 วัน) โดยจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 และ OS33 ในขวดที่ 1 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว AM medium ที่มีแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัมต่อลิตร และกลูตามาต 10 กรัมต่อลิตร เป็นแหล่งคาร์บอน และไนโตรเจน (ตามลำดับ) แล้วนำเชื้อเริ่มต้นปริมาตร 3.0 เปอร์เซ็นต์ ไปใส่ในขวดเลี้ยงเชื้อ แล้วนำไปบ่มภายใต้ความเข้มแสง 1500 ลักซ์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็น halogen lamp ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ในสภาพไร้อากาศ (บริเวณแอโนด) ซึ่งเชื่อมต่อกับขวดที่ 2 ซึ่งบรรจุอาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน (ความเข้มข้น 30 กรัมต่อลิตร) แล้วจึงใส่เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* เริ่มต้น 1.0 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส อัตราการให้อากาศ 1.5 VVM ซึ่งใช้เมมเบรนรูพรุนขนาด 5.0 K-da กั้นกลางระหว่างขวดทั้ง 2 โดยใช้ขั้วอิเล็กโทรดเป็น platinum หลังจากให้จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง *Rhodospseudomonas* sp. S12 และ OS33 (ขวดที่ 1) เจริญจนได้ปริมาณเซลล์สูงสุด (วันที่ 10 ของการเลี้ยงเชื้อ) (ซึ่งเป็นการเลี้ยงเชื้อแบบ batch cultivation) จึงเริ่มต้นการเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง (continuous cultivation) ด้วยการให้อาหารเหลว AM medium ที่มีแหล่งคาร์บอนเป็นแป้งมันสำปะหลัง 30 กรัมต่อลิตร และแหล่งไนโตรเจนเป็นกลูตามาต 10 กรัมต่อลิตร ไหลด้วยอัตราเร็ว 50 75 และ 100 ไมโครลิตรต่อนาที (ตามลำดับ) ขณะเดียวกันเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* (ที่เจริญในขวดที่ 2) ก็เริ่มให้อาหารเหลว YM medium ที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน ด้วยอัตราการไหลของอาหารเหลวที่ความเร็ว 500 ไมโครลิตรต่อนาที ซึ่งขวดทั้ง 2 ควบคุมปริมาตรอาหารเหลวภายในขวดให้คงที่ตลอดเวลาการทดลอง (ผลการทดลองแสดงในภาพที่ 4.16)



ภาพที่ 4.16 การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ที่ใช้การเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง (continuous cultivation) A การเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงเมื่อใช้อัตราการให้อาหาร 50, 75 และ 100 ไมโครลิตรต่อนาที B การเจริญของเชื้อยีสต์ เมื่อใช้อัตราการให้อาหาร 500 ไมโครลิตรต่อนาที และ C การสร้างไฟฟ้าในระหว่างการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงเมื่อใช้อัตราการให้อาหาร 50, 75 และ 100 ไมโครลิตรต่อนาที ตามลำดับ

○, จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง; □, น้ำตาลทั้งหมด (g/L); ■, กลูโคส (g/L); ●, เซลล์ยีสต์; ▲, แอลกอฮอล์ (%) และ ▲, กระแสไฟฟ้า (μA);
 ↔ , batch cultivation; <---> , continuous cultivation

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพ 4.16A แสดงการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง (*Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14) ในบริเวณ anodic chamber ที่เจริญในอาหาร AM medium (แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอน) เป็นเวลา 10 วัน ในสถานะการเลี้ยงเชื้อแบบครั้งเดียว (batch cultivation) จากนั้นจึงเริ่มการเลี้ยงเชื้อแบบให้อาหาร (continuous cultivation) AM medium ที่อัตราการไหลของอาหาร (medium feeding rate) 50, 75 และ 100 ไมโครลิตรต่อนาที พบว่าช่วงแรกของการให้อาหารด้วยอัตราการไหล 50 ไมโครลิตรต่อนาที เชื่อให้การเพิ่มจำนวนอย่างรวดเร็ว จากนั้นจึงลดปริมาณเซลล์ลง แล้วมาคงที่ (ระดับค่าการดูดกลืนแสง $1.5 OD_{770nm}$) ในช่วงวันที่ 12-19 ของการทดลอง เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอาหาร เป็นความเร็ว 75 ไมโครลิตรต่อนาที พบการเพิ่มจำนวนอย่างมาก แล้วมาคงที่ (ระดับค่าการดูดกลืนแสง $2.5 OD_{770nm}$) ในช่วงวันที่ 12-17 ของการทดลอง แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของอาหาร เป็น 100 ไมโครลิตรต่อนาที พบการลดลงของเชื้ออย่างรวดเร็ว จนกระทั่งไม่มีเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ (wash out) ในวันที่ 13-14 ของการเลี้ยงเชื้อ (แสดงสีขาของอาหารเลี้ยงเชื้อ) สำหรับภาพที่ 4.16B แสดงการเจริญของเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในบริเวณ cathodic chamber ที่เจริญในอาหาร YM medium (กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน) เป็นเวลา 10 วัน ในสถานะการเลี้ยงเชื้อแบบครั้งเดียว (batch cultivation) จากนั้นจึงเริ่มการเลี้ยงเชื้อแบบให้อาหาร (continuous cultivation) YM medium ที่อัตราการไหลของอาหาร (medium feeding rate) 500 ไมโครลิตรต่อนาที ซึ่งให้การเจริญค่อนข้างคงที่ในช่วงวันที่ 12-17 ของการเลี้ยงเชื้อ เช่นเดียวกับปริมาณกลูโคสที่คงที่ในระดับต่ำสุด แต่ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์พบว่าแปรผันไปตามการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงในบริเวณ anodic chamber ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการสร้างไฟฟ้า และการแพร่ของสารเมแทบอลิซึมผ่านเมมเบรนกั้นระหว่างบริเวณทั้ง 2 ภาพที่ 4.16C แสดงการสร้างไฟฟ้าของเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ พบว่าเมื่อใช้การเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง ที่อัตราการให้อาหารความเร็ว 50 และ 75 ไมโครลิตรต่อนาที ส่งผลให้การสร้างไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (จาก $60 \mu A$ เป็น $140 \mu A$ ตามลำดับ) และคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาการให้อาหาร แต่เมื่อเพิ่มอัตราการให้อาหารเป็นความเร็ว 100 ไมโครลิตรต่อนาที ซึ่งทำให้เกิดปรากฏการณ์ wash out ในบริเวณ anodic chamber ทำให้ไม่พบการสร้างไฟฟ้า นอกจากนี้ยังพบว่าการสร้างไฟฟ้าส่งผลกระทบต่อการสร้างแอลกอฮอล์ในบริเวณ cathodic chamber ที่ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ยังคงให้การเจริญในระดับคงที่ อาจเป็นผลมาจากการแข่งขันการใช้ออกซิเจนระหว่างการสร้างไฟฟ้า และกิจกรรมเมแทบอลิซึมภายในเซลล์ยีสต์

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ โดยใช้การเลี้ยงเชื้อผสมจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง (*Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14) และเชื้อยีสต์ (*Saccharomyces cerevisiae*) ในบริเวณ anodic chamber และ cathodic chamber (ตามลำดับ) จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงสามารถเจริญในสภาพไร้อากาศ เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ (บริเวณ anodic chamber) ได้เป็นอิเล็กตรอน (เคลื่อนที่ไปยังขั้วอิเล็กโทรด) สารเมแทบอลิท์ต่างๆ และโปรตอน ซึ่งโปรตอนสามารถเคลื่อนที่ข้ามแผ่นเมมเบรนไปยังบริเวณ cathodic chamber เพื่อรับอิเล็กตรอน ในระหว่างกระบวนการนี้เซลล์ยีสต์อาจได้รับผลดีเนื่องจากสามารถใช้เป็นแหล่งอิเล็กตรอน สำหรับกระบวนการในเซลล์ ทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการใช้แหล่งคาร์บอนเพื่อสร้างเซลล์ หรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ ต่อไป การใช้เชื้อผสมระหว่าง *Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14 ให้ผลดีต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ (ในสภาพไร้อากาศ) ได้แก่ น้ำตาล และพอลิแซ็กคาไรด์ จากน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ ให้มีขนาดเล็กลงเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และกรดอินทรีย์ ตามลำดับ เมื่อกรดอินทรีย์แตกตัวก็จะส่งอิเล็กตรอนไปยังขั้วอิเล็กโทรด ขณะที่โปรตอน และอนุมูลของกรดอินทรีย์ ก็จะเคลื่อนที่ข้ามแผ่นเมมเบรนไปยังบริเวณแคโทด ทำให้ยีสต์สามารถนำไปใช้ และส่งผลดีต่อกิจกรรมภายในเซลล์ การผลิตพลังงานการเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องเดี่ยว (single chamber) เมื่อใช้แป้งมันสำปะหลัง และกลูโคส เป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าการสร้างไฟฟ้าจากจุลินทรีย์ทั้ง 2 ชนิดให้ผลต่ำ (10 μ A) ทั้งที่เซลล์ไฟฟ้าชนิดนี้ไม่ได้รับผลกระทบจากแรงต้านการเคลื่อนที่ของแผ่นเมมเบรนกัน แต่กลับได้รับผลกระทบจากระดับออกซิเจนที่ละลายน้ำ ซึ่งอาจส่งผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงเป็นสำคัญ (Sharma and Li, 2010) จึงจำเป็นต้องอาศัยคุณสมบัติทางกายภาพของขนาดการเลี้ยงเชื้อ เพื่อแบ่งแยกกระหว่างบริเวณที่ไม่ได้รับอากาศ (anodic chamber) และบริเวณที่ได้รับอากาศ (cathodic chamber) ออกจากกันอย่างสมบูรณ์ หรือเชื้อจุลินทรีย์ได้รับผลกระทบจากออกซิเจนน้อยที่สุด ซึ่ง Derek (2006) พบว่ารอยเชื่อมต่อ (semipermeable membrane) ระหว่างบริเวณ anodic chamber และ cathodic chamber เป็นเพียงรอยแยกสมมุติ เพื่อให้เห็นภาพบริเวณจำกัดการแพร่ของออกซิเจนที่ละลายน้ำ แต่โปรตอน (ที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันการย่อยสลายสารอินทรีย์) สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปยังบริเวณ cathodic chamber เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รับอิเล็กตรอน และออกซิเจนได้ นอกจากนี้ Liu and Logan (2004) และ Jang *et.al.*, (2004) แสดงให้เห็นว่าเมมเบรน PEM ไม่มีความจำเป็นต่อเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

แต่อย่างไรก็ตามการควบคุมผลกระทบของระดับออกซิเจนต่อ anodic chamber จึงนิยมใช้การผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ (dual chamber) โดยเชื้อผสมจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง (*Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14) และยีสต์ (*Saccharomyces cerevisiae*) ในบริเวณ anodic chamber และ cathodic chamber ตามลำดับ พบว่าการใช้กลูโคส และ CMC เป็นแหล่งคาร์บอน ให้ผลการสร้างไฟฟ้าในระดับต่ำ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการยับยั้งของสับสเตรท (substrate inhibition) และโครงสร้างเซลล์ulosacต่อการย่อยสลาย *Rhodospseudomonas* sp. 14 จะได้มาจากการปรับปรุงพันธุ์เพื่อย่อยสลายเซลล์ulosac ได้ดีขึ้น แต่เมื่อเลี้ยงเชื้อเป็นเวลานาน พบว่า *Rhodospseudomonas* sp. 14 เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการย่อยสลายเซลล์ulosac และมีประสิทธิภาพลดลง การใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งคาร์บอนให้ผลการผลิตไฟฟ้าดีที่สุด (7.2 μ A) จึงนำมาใช้เป็นต้นแบบเพื่อการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ ต้องมุ่งไปที่ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าเพื่อให้ดำเนินการอย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ (1) ชนิดของจุลินทรีย์ และกระบวนการเมแทบอลิซึม (2) การส่งผ่านอิเล็กตรอนของจุลินทรีย์ (3) ประสิทธิภาพของแผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane, PEM) (4) แรงต้านภายในแผ่นเมมเบรน (internal resistance) ต่อสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolytes) และ (5) ประสิทธิภาพของสารส่งอิเล็กตรอนไปยังออกซิเจนในบริเวณ cathodic chamber (Katez และคณะ, 2003) การเพิ่มอัตราการให้ออกซิเจนในบริเวณ cathodic chamber เป็น 1.5 VVM ส่งผลให้การสร้างกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น (20.4 μ A) เนื่องจากออกซิเจนที่ละลายน้ำไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านแผ่นเมมเบรนไปยังบริเวณ anodic chamber ได้ จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญ และกิจกรรมของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงในบริเวณดังกล่าว

การทดลองใช้แผ่นเมมเบรน PEM ชนิดต่างๆ ได้แก่ แผ่นคาร์บอน ผ้า ชินวุ้น พบว่าไม่สามารถกั้นของเหลวในแต่ละส่วนได้ โดยพบการซึมของของเหลว และบางครั้งพบการรั่วของของเหลว แต่เมื่อหันมาใช้แผ่นเมมเบรน ultrafiltration สามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างบริเวณทั้ง 2 ได้เป็นอย่างดี การใช้แผ่นเมมเบรน PEM ชนิด PTFE (Esfandyari *et.al.*, 2007) หรือ แผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนประจุ ได้แก่ Nafion (Bond *et.al.*, 2002, Park *et.al.*, 1999; Logan *et.al.*, 2005;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Min *et.al.*, 2005) หรือ Ultrex (Rabaey *et.al.*, 2003) ซึ่งมีแรงดันการเคลื่อนที่สูง และพบการจับเกาะของจุลินทรีย์ ขณะที่การใช้สะพานเกลือ (salt bridge) พบปัญหาแรงดันการเคลื่อนที่ต่ำ แต่ไม่สม่ำเสมอ (Min *et.al.*, 2005) สำหรับ Ultramembrane ให้ผลดีต่อการใช้เป็น PEM ซึ่ง Kim *et.al.* (2007) พบว่าการใช้ ultrafiltration (คัดแยกขนาดโมเลกุล 0.5 μ m และ 5 K-Da ให้ประสิทธิภาพเช่นเดียวกับ PEM ชนิดแลกเปลี่ยนประจุ แต่ให้ข้อดีโดยลดแรงดันการเคลื่อนที่ภายในเมมเบรน นอกจากนี้ยังพบว่า permeability ของ PEM ก็ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ด้วยเช่นกัน (Sharma and Li, 2010) โดยพบว่าการใช้แผ่นเมมเบรนขนาด 5 K-Da ให้การสร้างไฟฟ้าสูงที่สุด (24.6 μ A ในวันที่ 4 ของการเจริญ) ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องจากรูพรุนที่เหมาะสมต่อการเคลื่อนที่ของโปรตอน และสารเมแทบอลิท์บางชนิด ขณะที่แผ่นเมมเบรนขนาด 1 K-Da ให้การสร้างไฟฟ้าต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่ารูพรุนขนาดเล็กมีข้อจำกัดบางอย่างต่อการเคลื่อนที่ของโปรตอน อาจเป็นผลเนื่องมาจากการจับเกาะของเซลล์จุลินทรีย์ก็เป็นได้

ปัจจัยของชนิดของอิเล็กโทรด มีผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งปฏิกิริยาของสารละลายในบริเวณ anode chamber ทำให้เกิดการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ และมีการสร้างอิเล็กตรอน และโปรตอน (Antonopoulou *et.al.*, 2010) แล้วโปรตอนจึงเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนไปยัง cathode chamber ขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วอิเล็กโทรด แล้วไหลไปตามวงจรภายนอก (external circuit) (Rahimnejad *et.al.*, 2011) ไปยังขั้วอิเล็กโทรดในบริเวณ cathodic chamber เพื่อรวมตัวกับโปรตอน และเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับออกซิเจนไปเป็นน้ำ (Sharma and Li, 2010) แสดงให้เห็นว่าขั้วอิเล็กโทรดเป็นกลไกสำคัญต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน กิจกรรมดังกล่าวอาจทำให้ธาตุที่ให้ขั้วอิเล็กโทรดเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (การแตกตัว) และกายภาพ (สึกกร่อน) ซึ่งส่งผลกระทบต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ Liu and Logan (2004) และ Jang *et.al.* (2004) พบว่า Pt เหมาะสมสำหรับใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดที่สุด สอดคล้องกับการทดลองครั้งนี้ซึ่งพบว่าการใช้อิเล็กโทรดชนิด platinum ให้ผลการสร้างไฟฟ้าดีที่สุด แต่เมื่อเปลี่ยนเป็น iron และ copper พบการสร้างไฟฟ้าลดลง ตามลำดับ โดยพบการสึกกร่อนของโลหะทั้ง 2 การสึกกร่อนของโลหะทั้ง 2 อาจส่งผลกระทบต่ออายุของเชื้อ และเมแทบอลิซึมภายในเซลล์ก็เป็นได้

ผลของแหล่งกำเนิดแสง และความเข้มแสง ต่อการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ ให้ผลที่สอดคล้องกัน เป็นผลเนื่องจากจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงกลุ่ม purple non-sulfure สามารถรับพลังงานจากแสงด้วย bacteriochlorophyll จำเพาะ 2 ชนิด ได้แก่ B800 และ B850 ซึ่งมีความจำเพาะกับความยาวคลื่นแสงในช่วง 800 นาโนเมตร ขึ้นไป (อยู่ในช่วง infrared) (Moullisová *et.al.*, 2009; Makhneva *et.al.*, 2008) การใช้แหล่งกำเนิดแสงชนิด fluorescent lamp

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงไม่ส่งผลดี เนื่องจากให้แสงในช่วงความยาวคลื่น 540-620 นาโนเมตร ดังนั้นการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ *Rhodospseudomonas* sp. จึงให้กระแสไฟฟ้าต่ำที่สุด ส่วนแหล่งกำเนิดแสงชนิด halogen lamp และ tungsten lamp ให้แสงความยาวคลื่นที่จุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่นเดียวกับการทดลองพบว่าเมื่อใช้ halogen lamp ให้การสร้างไฟฟ้าสูงที่สุด (35.9 μA ในวันที่ 6 ของการเจริญ) ซึ่งส่งผลกระทบต่อทั้งทางตรง (ความยาวคลื่นแสงเหมาะสม) และทางผลโดยอ้อม (อุณหภูมิที่ใช้ในการเลี้ยงเชื้อสามารถควบคุมให้อยู่ในช่วง 35-38 องศาเซลเซียส) แต่เมื่อใช้ tungsten lamp ให้การสร้างไฟฟ้าต่ำกว่า น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากการควบคุมอุณหภูมิทำได้ค่อนข้างยาก มักจะอยู่ในช่วง 35-40 องศาเซลเซียส ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การเจริญของเชื้อยีสต์เป็นสำคัญ การใช้ความเข้มแสงที่ระดับ 2000 ลักซ์ และ 2500 ลักซ์ ส่งผลให้การสร้างไฟฟ้าลดลงอย่างมาก ซึ่งเป็นผลมาจากความร้อนที่สะสมในระบบ ทำให้ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมได้ (35 องศาเซลเซียส) นอกจากนี้ยังพบการบดบังแสงกันเองของจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง (shading) ส่งผลกระทบต่อ การรับพลังงานจากแสง ซึ่งยังส่งผลกระทบต่อ การเจริญของเชื้อยีสต์ด้วยเช่นกัน ดังนั้นการใช้ความเข้มแสง 1500 ลักซ์ จึงเหมาะสมต่อการสร้างไฟฟ้า ทั้งในแง่ของอุณหภูมิที่สะสมในระบบ และไม่พบการบดบังแสงกัน ของของจุลินทรีย์ (Uyar *et al.*, 2007)

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตพลังงานจากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์ห้องคู่ (dual chamber) พบว่าจากสภาพเริ่มต้นให้การสร้างไฟฟ้าเพียง 7.2 μA เมื่อปรับปรุงสภาพการเลี้ยงเชื้อ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการสร้างไฟฟ้าได้เป็น 37.2 μA แต่อย่างไรก็ตามการสร้างไฟฟ้า ดำเนินไปในช่วงแรกของการเลี้ยงเชื้อ แสดงให้เห็นว่าการสร้างไฟฟ้าจัดอยู่ในกลุ่มของผลิตภัณฑ์ ชนิด primary product ซึ่งในตอนท้ายของการเลี้ยงเชื้อจะพบว่า การสร้างไฟฟ้าก็ลดลงไปด้วย เนื่องจากสารอาหารที่นำไปให้เพื่อการออกซิเดชันภายในเซลล์หมดลง ดังนั้นการเพิ่ม ประสิทธิภาพให้เซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สามารถสร้างไฟฟ้าได้มากขึ้น และเสถียรขึ้น จึงควรใช้การ เลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง (continuous cultivation)

การประยุกต์ใช้การเลี้ยงเชื้อแบบต่อเนื่อง (continuous cultivation) เพื่อผลิตพลังงาน จากเซลล์ไฟฟ้าจุลินทรีย์สังเคราะห์ด้วยแสง (*Rhodospseudomonas* sp. S12 OS33 และ 14) พบว่า อัตราการไหลของอาหาร (medium feeding rate) ที่ความเร็ว 75 ไมโครลิตรต่อนาที สามารถสร้าง กระแสไฟฟ้าได้ถึง 140 μA และคงที่ตลอดช่วงระยะเวลาการให้อาหาร ซึ่งเป็นผลมาจากการได้รับ สัมผัสตลอดเวลา จึงเกิดกิจกรรมภายในเซลล์ การย่อยสลายสารอินทรีย์ การสร้างอิเล็กตรอน และโปรตอน ในระดับสูงที่บริเวณ anodic chamber จึงสร้างกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดเป็นเวลานาน ซึ่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตั้งผลดีต่อประสิทธิภาพของเซลล์ไฟฟ้าจากจุลินทรีย์ สอดคล้องกับการทดลองของ Rahimnejad *et.al.* (2011) และ Tyler *et.al.* (2016) แต่อย่างไรก็ตามพบว่าการเจริญของเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในบริเวณ cathodic chamber ได้รับผลบางอย่าง ซึ่งทำให้ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ในระบบมีค่าลดลง ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการสร้างไฟฟ้า และการแพร่ของสารเมแทบอลิซึมผ่านเมมเบรนกั้นระหว่างบริเวณทั้ง 2 หรืออาจรวมไปถึงกิจกรรมการแข่งขันการใช้ออกซิเจนระหว่างการสร้างไฟฟ้า และกิจกรรมเมแทบอลิซึมภายในเซลล์ยีสต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการใช้เซลล์โอสเป็นแหล่งคาร์บอน และรักษาคุณสมบัติของจุลินทรีย์ให้มีความคงตัว
2. ควรศึกษาการขยายขนาดการเลี้ยงเชื้อ เพื่อผลิตพลังงานในระดับใหญ่ขึ้น และผลของความเข้มข้นเซลล์ต่อการบดบังแสง
3. ควรเพิ่มตำแหน่งของขั้วอิเล็กโทรด เพื่อได้รับกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ทั้งการต่อแบบอนุกรม และแบบขนาน

เอกสารอ้างอิง

- Aelterman P., Rabaey K., Pham H.T., Boon N. and Verstraete W. 2006. Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells. *Environ. Sci. Technol.*, 40; 3388–94.
- Akkerman I., Janssen M., Rocha J and Wijffels R.H. 2002. Photobiological hydrogen production: photochemical efficiency and bioreactor design. *Int. J. Hydrogen Energy*. 27; 1195-1208.
- Allakhverdiev S.I., Kreslavski V.D., Thavasi V., Zharmukhamedov S.K., Klimov V.V., Nagata T., Nishihara H. and Ramakrishna S. 2009. Hydrogen photoproduction by use of photosynthetic organisms and biomimetic systems. *Photochem. Photobiol. Sci.*, 8; 148-156.
- Allen R.M. and Bennetto H.P. 1993. Microbial fuel-cells: electricity production from carbohydrates. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 40; 27–40.
- Antonopoulou, G., Stamatelatou, K., Bebelis, S. and G. Lyberatos. 2010. Electricity generation from synthetic substrates and cheese whey using a two chamber microbial fuel cell, *Biochem. Engi. J.* 50; 10–15.
- Beer L.L., Boyd E.S., Peters J.W. and Posewitz M.C. 2009. Engineering algae for biohydrogen and biofuel production. *Curr. Opin. Biotechnol.*, 20; 264-271.
- Bennetto H.P. 2005. Microbial fuel cells. *Life Chem. Rep.*, 2; 363–453.
- Bergel A., Feron D. and Mollica A. 2005. Catalysis of oxygen reduction in PEM fuel cell by seawater biofilm. *Electrochem. Commun.*, 7; 900–904.
- Berk R.S. and Canfield J.H. 1964. Bioelectrochemical energy conversion. *Appl. Microbiol.*, 12; 10-12.
- Bond D.R. and Lovley D.R. 2003. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Appl. Environ. Microbiol.*, 69; 1548–1555.
- Bond, D.R., Holmes, D.E., Tender, L.M. and Lovley D.R. 2002. Electrodereducing microorganisms that harvest energy from marine sediments. *Science*, 295, 483-485.
- Bullen R.A., Arnot T.C, Lakeman J.B and Walsh F.C. 2006. Biofuel cells and their development. *Biosens Bioelectron.*, 21; 2015–45.
- Cao X.X., Huang X., Liang P., Boon N., Fan M.Z., Zhang L. and Zhang X.Y. 2009. A completely anoxic microbial fuel cell using a photobiocathode for cathodic carbon dioxide

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- reduction. *Energy Environ. Sci.*, 2; 498-501.
- Chang I.S., Jang J.K., Gil G.C., Kim M., Kim H.J. and Cho B.W. 2004. Continuous determination of biochemical oxygen demand using microbial fuel cell type biosensor. *Biosens Bioelectron.*, 19; 607–13.
- Chang I.S., Moon H., Jang J.K. and Kim B.H. 2005. Improvement of a microbial fuel cell performance as a BOD sensor using respiratory inhibitors. *Biosens Bioelectron.*, 20; 1856–9.
- Chang I.S., Moon H., Bretschger O., Jang J.K., Park H.I. and Nealon KH. 2006. Electrochemically active bacteria (EAB) and mediator-less Microbial fuel cells. *J. Microbiol. Biotechnol.*, 16; 163–77.
- Chaudhuri S.K. and Lovley D.R. 2003. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nat. Biotechnol.*, 21; 1229–1232.
- Cheng S., Liu H. and Logan B.E. 2006. Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure. *Electrochem. Commun.*, 8; 489–494.
- Cho Y.K., Donohue T.J., Tejedor I., Anderson M.A., McMahon K.D. and Noguera D.R. 2008. Development of a solar-powered microbial fuel cell. *J. Appl. Microbiol.*, 104; 640-650.
- Choi Y., Jung E., Kim S. and Jung S. 2003. Membrane fluidity sensing microbial fuel cell. *Bioelectrochemistry*, 59; 121–127.
- Cohen-Bazire, G., W. R. Sistrom, and R. Y. Stanier. 1957. Kinetic studies of pigment synthesis by non-sulfur purple bacteria. *J. Cell. Comp. Physiol.* 49; 25 – 68.
- Davis F. and Higson S.P.J. 2007. Biofuel cells-recent advances and applications. *Biosens Bioelectron.*, 22; 1224-1235.
- Dekker A., Heijne A.T., Saakes M., Hamelers H.V.M. and Buisman C.J.N. 2009. Analysis and improvement of a scaled-up and stacked microbial fuel cell. *Environ. Sci. Technol.*, 43; 9038-9042.
- Delaney G.M., Bennetto H.P., Mason J.R., Roller S.D., Stirling J.L. and Thurston C.F. 1984. Electron-transfer coupling in microbial fuel cells. 2. Performance of fuel cells containing selected microorganism-mediatorsubstrate combinations. *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, 34B; 13–27.
- Derek, R.L. 2006. Bug juice: harvesting electricity with microorganisms, *Nature Reviews*.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Microbiology, 4; 497-508.
- Dubois M., K.A. Gilles, J.K. Hamilton, P.A. Rebers, and Smith F. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Anal. Chem.* 28; 350–356.
- Esfandyari, M., Fanaei, M.A., Gheshlaghi, R. and M.A. Mahdavi. 2007. Dynamic modeling of a continuous two-chamber microbial fuel cell with pure culture of *Shewanella*. *International Journal of hydrogen energy*, 42; 21198-21202.
- Fu C.C., Su C.H., Hung T.C., Hsieh C.H., Suryani D. and Wu W.T. 2009. Effects of biomass weight and light intensity on the performance of photosynthetic microbial fuel cells with *Spirulina platensis*. *Bioresour. Technol.*, 100; 4183-4186.
- Furukawa Y., Moriuchi T. and Morishima K. 2006. Design principle and prototyping of a direct photosynthetic/metabolic biofuel cell (DPMFC). *J. Micromech. Microeng.*, 16; S220-S225.
- Gil G.C., Chang I.S., Kim B.H., Kim M., Jang J.Y. and Park H.S. 2003. Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell. *Biosens Bioelectron.*, 18; 327–334.
- Gregory K.B., Bond D.R. and Lovley D.R. 2004. Graphite electrodes as electron donors for anaerobic respiration. *Environ. Microbiol.*, 6; 596–604.
- Habermann W. and Pommer E.H. 1991. Biological fuel cells with sulphide storage capacity. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 35; 128–33.
- Harnisch F., Schroder U., Quaas M. and Scholz F. 2009. Electrocatalytic and corrosion behaviour of tungsten carbide in near-neutral pH electrolytes. *Appl. Catal. B: Environ.*, 87; 63-69.
- He Z., Kan J., Mansfeld F., Angenent L.T. and Neelson KH. 2009. Self-sustained phototrophic microbial fuel cells based on the synergistic cooperation between photosynthetic 264 Energy biotechnology microorganisms and heterotrophic bacteria. *Environ. Sci. Technol.*, 43; 1648-1654.
- He Z., Minteer S.D. and Angenent L. 2005. Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell. *Environ. Sci. Technol.*, 39; 5262–5267.
- He Z., Wagner N., Minteer S.D. and Angenent L.T. 2006. An upflow microbial fuel cell with an interior cathode: assessment of the internal resistance by impedance spectroscopy. *Environ. Sci. Technol.*, 40; 5212–5217.

- He Z., Shao H. and Angenent LT. 2007. Increased power production from a sediment microbial fuel cell with a rotating cathode. *Biosens Bioelectron.*, 22; 3252-3255.
- Hernandez M.E. and Newman D.K. 2001. Extracellular electron transfer. *Cell. Mol. Life Sci.*, 58; 1562–1571.
- Holzman D.C. 2005. Microbe power. *Environ Health Persp.*, 113:A; 754–757.
- Ieropoulos I.A, Greenman J., Melhuish C. and Hart J. 2005. Comparative study of three types of microbial fuel cell. *Enzyme Microb. Tech.*, 37; 238–245.
- Jang J.K., Pham T.H, Chang I.S., Kang K.H., Moon H. and Cho K.S. 2004. Construction and operation of a novel mediator-and membrane-less microbial fuel cell. *Process Biochem.*, 39; 1007–1012.
- Kaku N., Yonezawa N., Kodama Y. and Watanabe K. 2008. Plant/microbe -cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 79; 43-49.
- Kappler A., Pasquero C., Konhauser K.O. and Newman D.K. 2005. Deposition of banded iron formations by anoxygenic phototrophic Fe(II)-oxidizing bacteria. *Geology*. 33; 865-868.
- Katz, E., A.N. Shipway, and I. Willner. 2003. Biochemical fuel cells, p. 355–381. In W. Vielstich, H. A. Gasteiger, and A. Lamm (ed.), *Handbook of fuel cells - fundamentals, technology and applications*, vol. 1. John Wiley & Sons, New York, N.Y.
- Kim B.H., Kim H.J., Hyun M.S. and Park DH. 1999a. Direct electrode reaction of Fe (III)-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *J. Microbiol. Biotechnol.*, 9; 127–131.
- Kim H.J., Park H.S., Hyun M.S., Chang I.S., Kim M. and Kim B.H. 2002. A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *Enzyme. Microb. Tech.*, 30; 145–152.
- Kim B.H., Chang I.S., Gil G.C., Park H.S. and Kim H.J. 2003. Novel BOD (biological oxygen demand) sensor using mediator-less microbial fuel cell. *Biotechnol. Lett.*, 25; 541–545.
- Kim, J.R., Cheng, S., Oh, S.E., and Logan, B.E. 2007. Power generation using different cation, anion, and ultrafiltration membranes in microbial fuel cells. *Environ. Sci. Technol.*, 41, 1004–1009.
- Liu H. and Logan B.E. 2004. Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environ. Sci. Technol.*, 38; 4040–4046.

- Liu H., Cheng S. and Logan B.E. 2005a. Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration. *Environ. Sci. Technol.*, 39; 5488–5493.
- Liu H., Grot S. and Logan B.E. 2005b. Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate. *Environ. Sci. Technol.*, 39; 4317–4320.
- Logan B.E., Murano C., Scott K., Gray N.D. and Head I.M. 2005. Electricity generation from cysteine in a microbial fuel cell. *Water Res.*, 39; 942–952.
- Logan B.E., Hamelers B., Rozendal R., Schroder U., Keller J. and Freguia S. 2006. Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environ. Sci. Technol.*, 40; 5181–5192.
- Lovley D.R. 1993. Dissimilatory metal reduction. *Annu. Rev. Microbiol.*, 47; 263–290.
- Lovley D.R. 2006. Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches. *Curr. Opin. Biotech.*, 17; 327–332.
- Lovley D.R., Holmes D.E. and Nevin K.P. 2004. Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) reduction. *Adv. Microb. Physiol.*, 49; 219–286.
- Madigan M.T., Martinko J.M. and Parker J. 2000. *Brock biology of microorganisms*. Upper Saddle River: Prentice Hall. 320 p.
- Makhneva, Z.K., Yu, E., Erokhin, A. and A. Moskalenko. 2008. Assembly of LH2 light-harvesting complexes in *Rhodospseudomonas palustris* cells illuminated by blue and red light. *Microbiology*, 77(3); 339–347.
- Malik S., Drott E., Grisdela P., Lee J., Lee C., Lowy D.A., Gray S. and Tender L.M. 2009. A self-assembling self-repairing microbial photoelectrochemical solar cell. *Energy Environ. Sci.*, 2; 292–298.
- Min B. and Logan B.E. 2004. Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *Environ. Sci. Technol.*, 38; 5809–5814.
- Min B., Cheng S. and Logan B.E. 2005a. Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water Res.*, 39; 1675–1686.
- Min B., Kim J.R., Oh S.E., Regan J.M. and Logan B.E. 2005b. Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells. *Water Res.*, 39; 4961–4968.
- Moon H., Chang I.S., Jang J.K. and Kim B.H. 2005. Residence time distribution in microbial fuel cell and its influence on COD removal with electricity generation. *Biochem. Eng. J.*,

27; 59–65.

- Moon H., Chang I.S. and Kim B.H. 2006. Continuous electricity production from artificial wastewater using a mediator-less microbial fuel cell. *Bioresource Technol.*, 97; 621–627.
- Moulisová, V., Luer, L., Hoseinkhani, S., Brotosudarmo, T.H., Collins, A.M., Lanzani, G., Blankenship, R.E. and R.J. Cogdell. 2009. Low light adaptation: energy transfer processes in different types of light harvesting complexes from *Rhodospseudomonas palustris*. *Biophys. J.* 97(11); 3019-3028.
- Nelson, N. 1994. A photometric adaptation of Somogyi method for the determination of glucose. *J. Biol. Chem.* 153; 375-380.
- Nevin K.P. and Lovley D.R. 2000. Lack of production of electron-shuttling compounds or solubilization of Fe(III) during reduction of insoluble Fe(III) oxide by *Geobacter metallireducens*. *Appl. Environ. Microbiol.*, 66; 2248–2251.
- Nießen J., Schroder U., Rosenbaum M. and Scholz F. 2004. Fluorinated polyanilines as superior materials for electrocatalytic anodes in bacterial batteries. *Electrochem. Commun.*, 6; 571-575.
- Niessen J., Harnisch F., Rosenbaum M., Schroder U. and Scholz F. 2006. Heat treated soil as convenient and versatile source of bacterial communities for microbial electricity generation. *Electrochem. Commun.*, 8; 869–873.
- Oh S.E. and Logan B.E. 2005. Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies. *Water Res.*, 39; 4673–4682.
- Park, D.H. and Zeikus, J.G. 1999. Utilization of electrically reduced neutral red by *Actinobacillus succinogenes*: physiological function of neutral red in membrane-driven fumarate reduction and energy conservation. *J. Bacteriol.* 1999, 181, 2403-2410.
- Park D.H. and Zeikus J.G. 2000. Electricity generation in microbial fuel cells using neutral red as an electronophore. *Appl. Environ. Microb.*, 66; 1292–1297.
- Park D.H. and Zeikus J.G. 2002. Impact of electrode composition on electricity generation in a single-compartment fuel cell using *Shewanella putrefaciens*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 59; 58–61.
- Park D.H. and Zeikus J.G. 2003. Improved fuel cell and electrode designs for producing

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- electricity from microbial degradation. *Biotechnol. Bioeng.*, 81; 348–55.
- Park H.S., Kim B.H., Kim H.S., Kim H.J., Kim G.T. and Kim M. 2001. A novel electrochemically active and Fe(III)-reducing bacterium phylogenetically related to *Clostridium butyricum* isolated from a microbial fuel cell. *Anaerobe*. 7; 297–306.
- Pham T.H., Rabaey K., Aelterman P., Clauwaert P., De Schampelaire L., Boon N. and Verstraete W. 2006. Microbial fuel cells in relation to conventional anaerobic digestion technology. *Eng. Life Sci.*, 6; 285–292.
- Potter M.C. 1912. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proc. R. Soc. Ser. B.*, 84; 260–276.
- Prasad D., Sivaram T.K., Berchmans S. and Yegnaraman V. 2006. Microbial fuel cell constructed with a micro-organism isolated from sugar industry effluent. *J. Power Sources*, 160; 991–996.
- Rabaey K. and Verstraete W. 2005. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends Biotechnol.*, 23; 291–298.
- Rabaey K., Clauwaert P., Aelterman P. and Verstraete W. 2005. Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation. *Environ. Sci. Technol.*, 39; 8077–8082.
- Rabaey, K.; Lissens, G.; Siciliano, S.D. and Verstraete, W. 2003. Amicrobial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnol. Lett.*, 25, 1531–1535.
- Rahimnejad, M., Ghoreyshi, A.A., Najafpour, G. and T. Jafary. 2011. Power generation from organic substrate in batch and continuous flow microbial fuel cell operations. *Applied Energy* 88; 3999–4004
- Rahimnejad, M., Najafpour, G. and A.A. Ghoreyshi. 2011. Effect of mass transfer on performance of microbial fuel cell. *Intech*. 5; 233–250.
- Ringelsen B.R., Henderson E., Wu P.K., Pietron J., Ray R. and Little B. 2006. High power density from a miniature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP10. *Environ. Sci. Technol.*, 40; 2629–2634.
- Rosenbaum M., Agler M.T., Fornero J.J., Venkataraman A. and Angenent LT. 2010. Integrating BES in the wastewater and sludge treatment line. In *Bioelectrochemical Systems: From Extracellular Electron Transfer to Biotechnological Application*. Edited by Rabaey K,

- Angenent LT, Schroder U, Keller J. International Water Association. 10; 393-408.
- Rosenbaum M., He Z. and Angenent L.T. 2010. Light energy to bioelectricity: photosynthetic microbial fuel cells. *Current Opinion in Biotechnology*, 21; 259–264.
- Rosenbaum M., Schroder U. and Scholz F. 2005. Utilizing the green alga *Chlamydomonas reinhardtii* for microbial electricity generation: a living solar cell. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 68; 753-756.
- Rosenbaum M., Schroder U. and Scholz F. 2005a. In situ electrooxidation of photobiological hydrogen in a photobiological fuel cell based on *Rhodobacter sphaeroides*. *Environ. Sci. Technol.*, 39; 6328-6333.
- Rosenbaum M., Zhao F., Schroder U. and Scholz F. 2006. Interfacing electrocatalysis and biocatalysis using tungsten carbide: a high performance noble-metal-free microbial fuel cell. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 45; 6658-6661.
- Rosenbaum M., Zhao F., Quaaas M., Wulff H., Schroder U. and Scholz F. 2007. Evaluation of catalytic properties of tungsten carbide for the anode of microbial fuel cells. *Appl. Catal. B: Environ.*, 74; 262-270.
- Schamphelaire D.L. and Verstraete W. 2009. Revival of the biological sunlight-to-biogas energy conversion system. *Biotechnol. Bioeng.*, 103; 296-304.
- Schamphelaire D.L., Van den Bossche L., Dang H.S., Hofte M., Boon N., Rabaey K. and Verstraete W. 2008. Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. *Environ. Sci. Technol.*, 42; 3053-3058.
- Scholz F. and Schroder U. 2003. Bacterial batteries. *Nat. Biotechnol.*, 21; 1151–1152.
- Schroder U, Nießen J. and Scholz F. 2003. A generation of microbial fuel cell with current outputs boosted by more than one order of magnitude. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 115; 2986-2989.
- Sharma, Y. and Li. B. 2010. The variation of power generation with organic substrates in single-chamber microbial fuel cells (SCMFCs), *Bioresource. Technol.* 101; 1844–1850.
- Stirling J.L., Bennetto H.P., Delaney G.M., Mason J.R., Roller S.D and Tanaka K. 1983. Microbial fuel cells. *Biochem. Soc. Trans.*, 11; 451–453.
- Strik D., Hamelers H.V.M., Snel J.F.H. and Buisman C.J.N. 2008. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *Int. J. Energy Res.*, 32; 870-876.

- Strik D., Terlouw H., Hamelers H.V.M. and Buisman C.J.N. 2008. Renewable sustainable biocatalyzed electricity production in a photosynthetic algal microbial fuel cell (PAMFC). *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 81; 659-668.
- Tanaka K, Tamamushi R, Ogawa T. 1985. Bioelectrochemical fuel-cells operated by the cyanobacterium, *Anabaena variabilis*. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 35B; 191-197.
- Tartakovsky B. and Guiot S.R. 2006. A comparison of air and hydrogen peroxide oxygenated microbial fuel cell reactors. *Biotechnol. Prog.*, 22; 241-246.
- Tokuji I and Kenji K. 2003. Vioelectrocatalyses-based application of quinoproteins and quinprotein-containing bacterial cells in biosensors and biofuel cells. *Biochim. Biophys. Acta.*, 1647; 121-126.
- Tyler, C., Pannella, R., Kannaiah, G., Daniel J.S. and P.B. Abhijeet. 2016. Effect of fed-batch vs. continuous mode of operation on microbial fuel cell performance treating biorefinery wastewater. *Biochemical Engineering Journal*. 116; 85-94
- Uyar, B., Eroglu, I., Yücel, M., Gündüz, U. and L. Türkerd. 2007. Effect of light intensity, wavelength and illumination protocol on hydrogen production in photobioreactors. *International Journal of Hydrogen Enerhy*, 32(18); 4670 - 4677.
- Vega C.A. and Fernandez I. 1987. Mediating effect of ferric chelate compounds in microbial fuel cells with *Lactobacillus plantarum*, *Streptococcus lactis* and *Erwinia dissolvens*. *Bioelectrochem. Bioenerg.*, 17; 217-222.
- Velasquez-Orta S.B., Curtis T.P. and Logan B.E. 2009. Energy from algae using microbial fuel cells. *Biotechnol. Bioeng.*, 103; 1068-1076.
- Wilkinson S. 2000. "Gastrobots"-benefits and challenges of microbial fuel cells in food powered robot applications. *Auton. Robot.* 9; 99-111.
- Zhang E., Xu W., Diao G. and Shuang C. 2006. Electricity generation from acetate and glucose by sedimentary bacterium attached to electrode in microbial-anode fuel cells. *J. Power Sources*. 161; 820-825.
- Zhuwei D., Haoran L. and Tingyue G. 2007. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, 25; 464 -482.
- Zou Y., Pisciotta J., Billmyre R.B. and Baskakov I.V. 2009. Photosynthetic microbial fuel cells

with positive light response. *Biotechnol. Bioeng.*, 104; 939-946.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

1. อาหารเลี้ยงเชื้อ

1.1 อาหารเลี้ยงเชื้อ AM medium (Nattanan *et.al.*, 2011)

แหล่งคาร์บอน	10.0	กรัม
ไซเตียมกลูตาเมต	10.0	กรัม
ยีสต์สกัด	1.0	กรัม
Na ₂ HPO ₄	10.0	กรัม

ผสมส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกัน ปรับพีเอชเป็น 6.8-7.2 จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรรวมเป็น 1000 มิลลิลิตร แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

1.2 อาหารเหลว YM medium

แหล่งคาร์บอน	10.0	กรัม
เปปโติน	5.0	กรัม
ยีสต์สกัด	3.0	กรัม

ผสมส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกัน ปรับพีเอชเป็น 6.8-7.2 จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตรรวมเป็น 1000 มิลลิลิตร แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์

1. สารเคมี

1.1 การเตรียมสารละลายฟีนอล ความเข้มข้นร้อยละ 5.0

1.1.1 ละลายฟีนอล 50.0 กรัม ในน้ำกลั่น 700 มิลลิลิตร

1.1.2 เติมน้ำกลั่น 300 มิลลิลิตร ผสมสารละลายให้เข้ากัน

1.2.3 เก็บสารละลายฟีนอล ความเข้มข้นร้อยละ 5.0 ที่ได้ไว้ในขวดสีชา

1.2 การเตรียมสารละลาย Copper reagent

1.2.1 ละลาย $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 71.0 กรัม และโปรแทสเซียมโซเดียมทาร์เทรต 40.0 กรัม ในน้ำกลั่น 700 มิลลิลิตร

1.2.2 เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.0 นอร์มอล จำนวน 100 มิลลิลิตร ตามด้วยสารละลาย $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้นร้อยละ 10.0 จำนวน 80 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน ทำให้อุ่น

1.2.3 เติมโซเดียมซัลเฟต 180.0 กรัม ละลายให้เข้ากันแล้วเติมน้ำกลั่นให้ปริมาตรสุดท้ายเท่ากับ 1.0 ลิตร เก็บในขวดสีชา ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ถ้ามีตะกอนกรองออกก่อนนำไปใช้

1.3 การเตรียมสารละลาย Nelson reagent

1.3.1 ละลาย $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 50.0 กรัม ในน้ำกลั่น 900 มิลลิลิตร

1.3.2 เติมกรดซัลฟริกเข้มข้น 21 มิลลิลิตร คนให้เข้ากัน

1.3.3 เติม $\text{AsHNa}_2\text{O}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 6 กรัม ซึ่งละลายในน้ำกลั่นลงไป คนให้เข้ากัน เก็บไว้ในขวดสีชาที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถ้ามีตะกอนกรองออกก่อนนำไปใช้

2. วิธีวิเคราะห์

2.1 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) โดยวิธี Somogyi – Nelson (ตามวิธีของ Nelson, 1994)

2.1.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานของน้ำตาลกลูโคส โดยอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 – 2 ชั่วโมง ความเข้มข้น 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 ไมโครกรัมต่อ

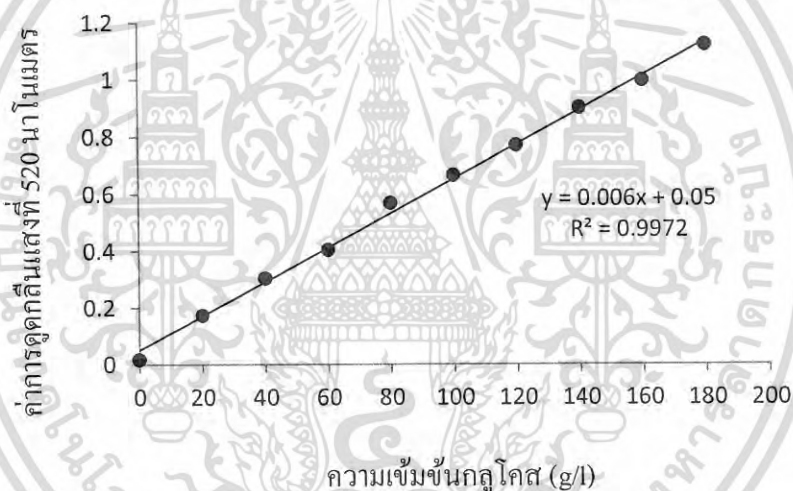
มิลลิลิตรในน้ำกลั่น บรรจุในหลอดทดสอบหลอดละ 1.0 มิลลิลิตร โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นตัวแทนเปรียบเทียบ

2.1.2 เติมสารละลาย Copper reagent 1.0 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที แล้วหยุดปฏิกิริยาโดยทำให้น้ำเย็นจัด

2.1.3 เติมสารละลาย Nelson reagent 1.0 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันทันที ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 นาที

2.1.4 เติมน้ำกลั่น 5.0 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 520 นาโนเมตร เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำตาลกลูโคสและค่าการดูดกลืนแสง

2.1.5 วิเคราะห์ตัวอย่างโดยใช้ปิเปตดูดตัวอย่างที่มีน้ำตาลกลูโคสจำนวน 1.0 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดสอบแล้วนำไปวิเคราะห์ตามวิธีการเตรียมกราฟมาตรฐานของกลูโคสข้างต้น



รูปที่ ข-1: กราฟมาตรฐานน้ำตาลกลูโคสโดยวิธี Somogyi – Nelson

2.2 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมด (Total sugar) โดยวิธีฟินอล – ซัลฟูริก (ตามวิธีของ Dubois, 1956)

2.2.1 หากกราฟมาตรฐานโดยใช้สารละลายแป้งมันสำปะหลังและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Carboxymethyl cellulose) ที่มีความเข้มข้น 0 – 180 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

2.2.2 นำสารละลายตัวอย่างละ 1.0 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดสอบ จากนั้นเติมสารละลายฟินอลความเข้มข้นร้อยละ 5 ลงไป 1.0 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน

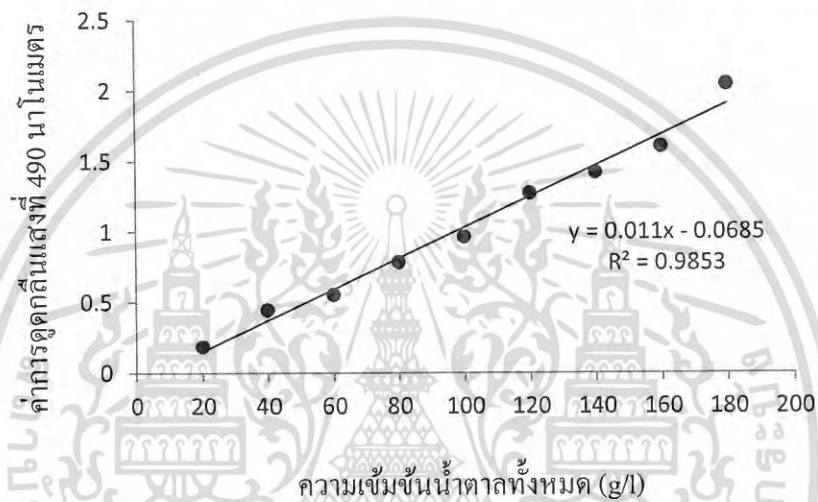
2.2.3 เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 98.0 ปริมาตร 5.0 มิลลิลิตร ลงไปอย่างรวดเร็วภายในตู้ดูดควัน โดยปล่อยให้เย็นลงไปที่ผิวหน้าของเหลวโดยตรง จะทำให้การผสมที่ดีมากกว่าการค่อยๆปล่อยลงข้างหลอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

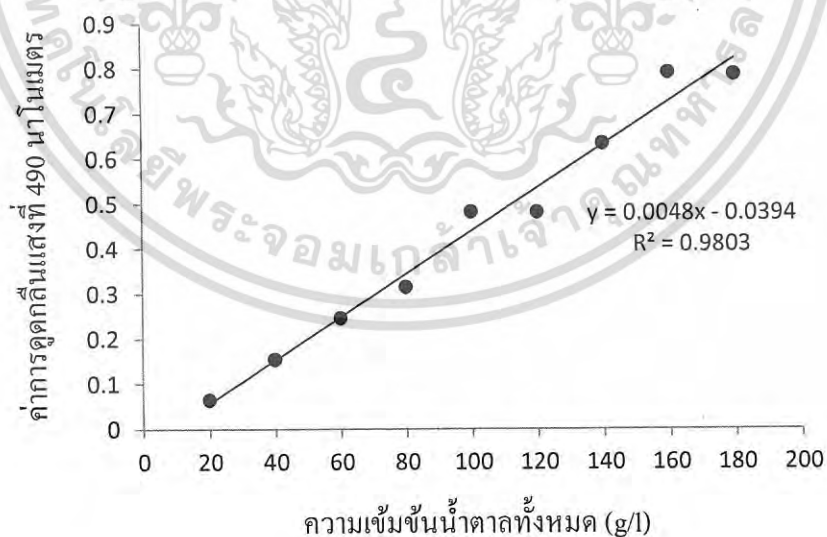
2.2.4 ตั้งหลอดทดสอบของผสมทิ้งไว้ 10 นาที จากนั้นนำมาเขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้อีก 10–20 นาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

2.2.5 นำไปแช่เย็น เป็นเวลา 20 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร เขียนกราฟมาตรฐานระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับปริมาณน้ำตาล

2.2.6 วิเคราะห์ตัวอย่าง โดยใช้ปิเปตดูดตัวอย่างจำนวน 1.0 มิลลิลิตรใส่หลอดทดสอบ แล้วนำไปวิเคราะห์ตามวิธีการเตรียมกราฟมาตรฐานของปริมาณน้ำตาลทั้งหมดในข้างต้น



รูปที่ ข-2 : กราฟมาตรฐานน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีฟินอล – ซัลฟูริก (เบ๊ง)



รูปที่ ข-3 : กราฟมาตรฐานน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธีฟินอล – ซัลฟูริก (CMC)

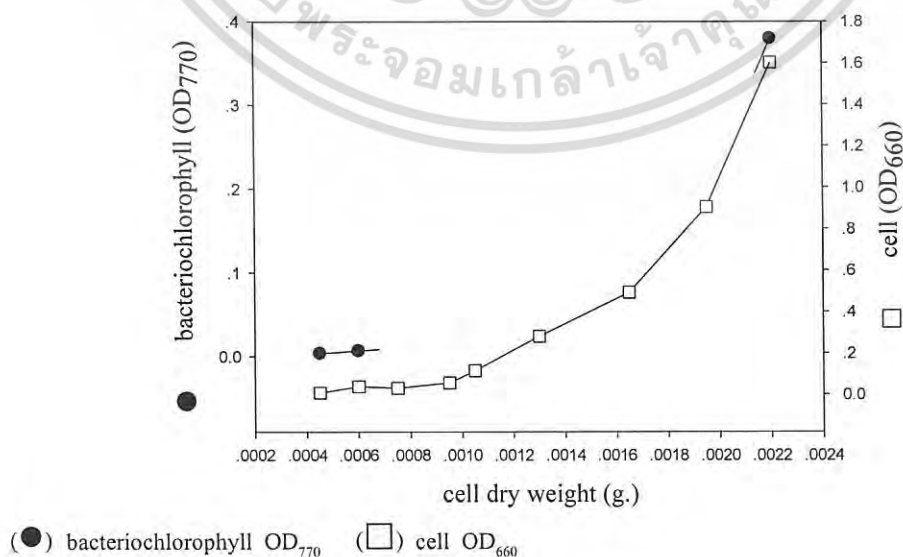
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3. การวิเคราะห์ปริมาณแบคทีริโอคลอโรฟิลล์ (Bacteriochlorophyll) ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตรและน้ำหนักเซลล์แห้ง (ดัดแปลงจากวิธีของ Cohen-Bazire และคณะ, 1957)

2.3.1 นำเชื้อแบคทีเรียสังเคราะห์แสงสีม่วงกลุ่มไม่สะสมกำมะถันที่มีกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนและโมโนโซเดียมกลูตาเมตเป็นแหล่งไนโตรเจน ที่เจริญในอาหารเหลวสูตร A อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 1 ต่อ 1 มาทำการเจือจางด้วยน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้น $\times 2x$ $4x$ $8x$ $16x$ $32x$ $64x$ $128x$ $256x$ ตามลำดับ

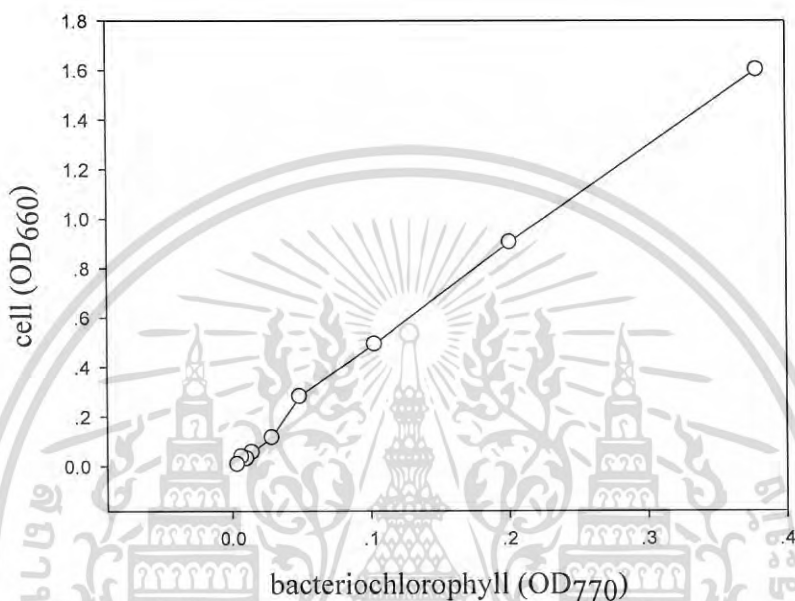
2.3.2 แบ่งแต่ละความเจือจางออกเป็นสองส่วน โดยแต่ละส่วนนำไปบรรจุในหลอดปั่นเหวี่ยงขนาดเล็กรวม 1 มิลลิลิตร โดยส่วนแรกนำไปสกัดแบคทีริโอคลอโรฟิลล์ในที่มีด โดยใช้สารละลายผสมระหว่างอะซิโตน ต่อ เมทานอล อัตราส่วน 7 ต่อ 2 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เป็นเวลา 150 นาที จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที นำส่วนใสไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 770 นาโนเมตร บันทึกผลการทดลอง สำหรับส่วนที่สองนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเทส่วนใสทิ้ง และล้างเซลล์ด้วยน้ำกลั่น แล้วนำเซลล์ในแต่ละความเจือจางไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48-96 ชั่วโมง บันทึกผลน้ำหนักเซลล์แห้งในแต่ละความเจือจาง

2.3.3 นำส่วนที่เหลือในแต่ละความเจือจางไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร บันทึกผลการทดลอง เขียนกราฟมาตรฐานระหว่างแบคทีริโอคลอโรฟิลล์ 770 นาโนเมตร ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตรและน้ำหนักเซลล์แห้ง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ข-4 กราฟมาตรฐานระหว่างแบคทีเรียโคลอโรฟิลล์ 770 นาโนเมตร ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตรและน้ำหนักเซลล์แห้ง



รูปที่ ข-5 กราฟมาตรฐานระหว่างแบคทีเรียโคลอโรฟิลล์ 770 นาโนเมตรและค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 660 นาโนเมตร

2.4 วิธีการวิเคราะห์แอลกอฮอล์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

2.4.1. วิธีการเตรียมกราฟมาตรฐานของแอลกอฮอล์

1.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานภายในโดยใช้โพรพานอล (n-propanol) ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตรเป็นสารละลายมาตรฐานภายใน (internal standard)

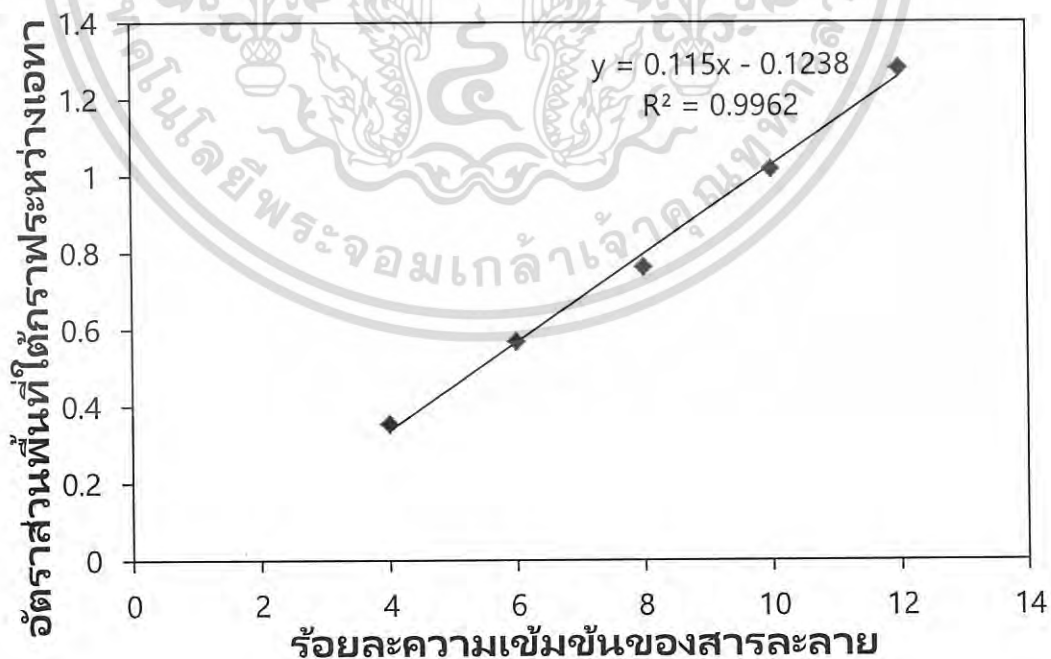
1.2 เตรียมสารละลายมาตรฐานแอลกอฮอล์ให้มีความเข้มข้นร้อยละ 4 6 8 10 และ 12 โดยปริมาตร

2.4.2. วิธีการเตรียมกราฟมาตรฐานของแอลกอฮอล์

นำสารละลายข้อ 1.1 ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลายข้อ 1.2 ปริมาตร 500 ไมโครลิตร จากนั้นนำสารละลายผสมไปบรรจุขวดแก้วขนาด 20 มิลลิลิตร แล้วปิดแผ่นยางเซปตัม (septum) ให้ด้านเทฟลอน (Teflon) สัมผัสปากขวด แล้วจึงปิดด้วยฝาอะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3. การวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ใช้เทคนิคเฮดสเปซ-แก๊สโครมาโตกราฟี (HS-GC) โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC-17A Chromatograph, Shimadzu) ต่อกับเครื่อง HSS-4A (Shimadzu) ซึ่งเป็นส่วนที่ตัวอย่างจะถูกบ่มที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที สารตัวอย่างในขวดแก้วจะระเหยกลายเป็นไอจนกระทั่งอยู่ในสมดุลไดนามิก จากนั้นเครื่องจะดูดไอปริมาตร 1 มิลลิลิตร เพื่อเข้าสู่คอลัมน์ DB-WAX (Agilent J&W GC Column) ความยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.53 มิลลิเมตร ความหนาของฟิล์ม 1 ไมครอน อุณหภูมิของคอลัมน์ 60 องศาเซลเซียส ใช้ตัวตรวจวัด (detector) ชนิด FID โดยปรับอุณหภูมิเท่ากับ 150 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของตำแหน่งฉีดสาร (injector) เท่ากับ 150 องศาเซลเซียส ใช้แก๊สฮีเลียมเป็นพาหะโดยมีความดันคอลัมน์เท่ากับ 30 kPa สภาวะในการวิเคราะห์เริ่มจากอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 15 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึง 180 องศาเซลเซียส คงไว้ที่ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที รวมเวลาในการวิเคราะห์ทั้งหมดเท่ากับ 25 นาทีต่อตัวอย่าง โครมาโตแกรมจะแสดงเวลาที่แอลกอฮอล์และโพรพานอลถูกชะออกจากคอลัมน์ นำพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) ของสารมาตรฐานแต่ละความเข้มข้นมาสร้างกราฟมาตรฐาน โดยคำนวณอัตราส่วนพื้นที่ใต้กราฟของแอลกอฮอล์ต่อโพรพานอลในแต่ละความเข้มข้น



รูปที่ ข-6 กราฟมาตรฐานเอทานอลวัดโดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

