การผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง

สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นางสาวศุกร์นิมิต สุจิรา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต
สาขาวิชาจุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม ภาควิชาจุลชีววิทยา
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5172480923

ELECTRICITY PRODUCTION IN DUAL CHAMBER MICROBAIL FUEL CELL USING WASTEWATER FROM CANNED FRIUT INDUSTRY

Miss Suknimit Sujira

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Industrial Microbiology

Department of Microbiology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

532223

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง
โดย	นางสาวศุกร์นิมิต สุจิรา
สาขาวิชา	จุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเทพ ธนียวัน)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ หนูพันธ์)

ศุกร์นิมิต สุจิรา : การผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง. (ELECTRICITY PRODUCTION IN DUAL CHAMBER MICROBIAL FUEL CELL USING WASTEWATER FROM CANNED FRUIT INDUSTRY) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รศ.ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์, 105 หน้า.

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์สามารถผลิตพลังงานโดยใช้จุลินทรีย์เปลี่ยนพลังงานเคมีในสารอินทรีย์ไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ปัจจุบันมีการศึกษาประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์กับกระบวนการบำบัดน้ำเสียซึ่งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องมีสารอินทรีย์สูง จึงน่าสนใจที่จะดัดแปลงระบบบำบัดน้ำเสียให้เป็นเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ งานวิจัยนี้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฟฟ้าโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทดลองใช้กับน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง ในขั้นตอนการแปรผันระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์พบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 24 และ 36 ชั่วโมง มีค่าสูงใกล้เคียงกันคือ 0.082 และ 0.081 โวลต์ตามลำดับ ขณะที่เวลา 12 ชั่วโมง มีค่าต่ำที่สุดเพียง 0.034 โวลต์ แต่เมื่อพิจารณาความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดพบว่าที่เวลา 24 ชั่วโมง มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 0.106 โวลต์ ขณะที่น้ำหนักเซลล์แขวนลอยแห้งที่เวลา 36 ชั่วโมง มีค่ามากที่สุด แต่ที่เวลา 24 ชั่วโมงกลับมีค่าต่ำใกล้เคียงกับที่เวลา 12 ชั่วโมง นอกจากนี้ปริมาณกรดระเหยง่ายที่เวลา 12 ชั่วโมงมีค่าสูงที่สุด ส่วนที่เวลา 36 ชั่วโมงมีค่าต่ำที่สุด คือ 350 และ 180 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ ในขั้นตอนการแปรผันความเป็นกรดเบสพบว่าที่พีเอช 7 และ 8 ให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและปริมาณกรดระเหยง่ายสูงกว่าที่ความเป็นกรดเบส 4 5 และ 6 เมื่อทดลองแปรผันตัวต้านทานภายนอกขนาดตั้งแต่ 100 โอห์ม ถึง 1 เมกะโอห์ม พบว่าค่าความต้านทานที่ทำให้ได้กำลังไฟฟ้ามากที่สุดคือ 300 กิโลโอห์ม โดยให้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 9.65 ไมโครวัตต์ต่อตารางเมตร ขณะที่การทดลองใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องได้ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า 6.24 ไมโครวัตต์ต่อตารางเมตร

ภาควิชา...จุลชีววิทยา.....ลายมือชื่อนิสิต...ศุกร์นิมิต สุจิรา.....
สาขาวิชา..จุลชีววิทยาทางอุตสาหกรรม...ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
ปีการศึกษา...2553.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม .....

5172480923 : MAJOR INDUSTRIAL MICROBIOLOGY

KEYWORDS: MICROBIAL FUEL CELL/ CANNED FRUIT INDUSTRIAL WASTEWATER

SUKNIMIT SUJIRA: ELECTRICITY PRODUCTION IN DUAL CHAMBER MICROBIAL FUEL CELL USING WASTEWATER FROM CANNED FRUIT INDUSTRY. ADVISOR : ASST.PROF. CHARNWIT KOSITANONT, Ph.D., CO-ADVISOR : ASSOC.PROF. PORNPOTE PIUMSOMBOON, Ph.D., 105 pp.

The microbial fuel cell (MFC) is a bio-electrochemical device that converts chemical energy in organic matter to electrical energy using microorganisms. Previous study was found that it can be adapted an anaerobic wastewater treatment system to a microbial fuel cell. Wastewater from canned fruit industry containing rich an organic matter is suitable for applying to a microbial fuel cell. The aim of the present study is to observe factors that affect to electrical generation using synthetic wastewater by testing with wastewater from canned fruit industry. By varying hydraulic retention time of synthetic wastewater in a microbial fuel cell to 12 hours, 24 hours and 36 hours, the highest maximum voltage was observed at HRT 24 hours (0.106 V). The average voltage at HRT 24 hours was comparable with HRT 36 hours (0.081 V and 0.082 V, respectively). The lowest voltage was obtained at HRT 12 hours (0.034 V). Cell dry weight at HRT 36 hours was the highest, whereas at HRT 24 hours was lower closed to HRT 12 hours. Volatile fatty acid at HRT 12 hours is highest (350 mg/L) however at HRT 36 hours is lowest (180 mg/L). By varying pH found that the average voltage and volatile fatty acid at pH 7 and 8 was higher than pH 4, 5, and 6. Resistors varying from 100 Ω to 1 MΩ reveal that the power density at 300 KΩ was the highest (9.65 $\mu W/m^2$). The power density of industrial wastewater of 6.24 $\mu W/m^2$ was obtained.

Department : Microbiology Student's Signature Suknimit Sujira

Field of Study : Industrial Microbiology Advisor's Signature C. Kositanont

Academic Year : 2010 Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา ข้อแนะนำ และให้โอกาสศิษย์ได้ศึกษาในเรื่องที่สนใจ จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ตลอดจนได้กรุณาปรับปรุงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น และยังได้กรุณาให้แง่คิดต่างๆ ทักษะการทำงาน รวมถึงอบรมสั่งสอนการดำเนินชีวิตในสังคม อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่อศิษย์

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ ที่ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมของการทำวิทยานิพนธ์ และให้โอกาสศิษย์ได้ศึกษาในเรื่องที่สนใจ จนตลอดได้กรุณาให้คำปรึกษา เพื่อให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.สุเทพ ธนียวัน ที่กรุณารับเป็นประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์ รองศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ หนูพันธ์ ที่กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.มานะ ศรียุทธศักดิ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความรู้ทางด้านไฟฟ้าเป็นอย่างดี รวมถึงวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิจัย จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พฤกษาทร ที่กรุณาให้คำปรึกษา และความรู้ รวมถึงวัสดุในการทำวิจัย

ขอขอบคุณหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ทำงานวิจัย รวมถึงอุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ในภาควิชาจุลชีววิทยาทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ทุกท่านในภาควิชาจุลชีววิทยาที่กรุณาอำนวยสะดวกในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ห้องวิจัย 453 รวมถึงเพื่อนๆ และรุ่นพี่ที่คอยให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือ และกำลังใจที่ดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติๆ ทุกคน รวมไปถึงน้องๆ ที่ได้ให้คำปรึกษา กำลังใจ ให้โอกาสในการศึกษา และให้ความช่วยเหลือสนับสนุนทุกสิ่งทุกอย่างด้วยดีตลอดมาจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฏ

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ..... ณ

บทที่

1. บทนำ..... 1

2. ปริทรรศน์วรรณกรรม..... 3

2.1 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์..... 3

2.2 กระบวนการหายใจของจุลินทรีย์..... 4

2.2.1 การหายใจแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic respiration) 5

2.2.2 การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration)..... 6

2.2.3 กระบวนการหมัก (Fermentation)..... 6

2.3 กลไกในการส่งถ่ายอิเล็กตรอนแก่ขั้วไฟฟ้า..... 6

2.3.1. การถ่ายทอดอิเล็กตรอนผ่านปฏิกิริยาการรีดิวซ์สารที่ขั้วแอโนด..... 6

2.3.2. ตัวกลางสังเคราะห์สำหรับช่วยในการขนส่งอิเล็กตรอน..... 7

2.3.3. จุลินทรีย์ผลิตตัวกลางนำพาอิเล็กตรอนขึ้นเอง..... 9

2.3.4. ถ่ายทอดอิเล็กตรอนโดยตรงที่ขั้วไฟฟ้า..... 9

2.4 รูปแบบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์..... 11

2.5 ชนิดของขั้วไฟฟ้า 13

2.6 การเพิ่มประสิทธิภาพในห้องแคโทด..... 14

2.7 ปัจจัยที่มีผลต่อความต่างศักย์ไฟฟ้าของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์..... 16

2.8 ปัจจัยที่มีผลในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์..... 18

2.9 อิทธิพลของความเป็นกรดเบสและอุณหภูมิ..... 18

2.10 อิทธิพลของแหล่งคาร์บอน..... 19

หน้า

2.11 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย..... 21
2.11.1 ประเภทของระบบบำบัดน้ำเสีย..... 22
2.11.2 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ..... 23
2.11.3 ข้อดีของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน..... 24
2.12 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์กับระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน..... 24
2.13 การวิเคราะห์ในน้ำเสีย..... 25
2.13.1 การวิเคราะห์ค่าซีโอดี..... 25
2.13.2 การวิเคราะห์กรดระเหยง่าย..... 26
2.14 แหล่งน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง..... 28
2.14.1. การใช้น้ำแต่ละสายการผลิต..... 28
2.14.2. ปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละสายการผลิต..... 29
2.14.3. คุณสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละสายการผลิต..... 29
2.15 งานวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในประเทศไทย..... 32
3. อุปกรณ์ เคมีภัณฑ์ และวิธีดำเนินงานวิจัย..... 33
อุปกรณ์..... 33
เคมีภัณฑ์..... 35
ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย..... 36
3.1 ประกอบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่
และเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์แบบไร้อากาศ..... 36
3.1.1 ประกอบถังเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์..... 36
3.1.2 วัสดุในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์..... 37
3.1.3 สารละลายในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์..... 37
3.1.4 เตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์..... 38
3.2 หาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์
ที่ประกอบขึ้น..... 39
3.2.1 เตรียมระบบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์..... 39
3.2.2 แปรผันปัจจัยในการหาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้า..... 39
3.3 ผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์โดยใช้น้ำเสียจาก
โรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง..... 40

หน้า

3.4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพของการผลิตกระแสไฟฟ้าและการบำบัดน้ำเสีย..... 41
3.4.1 วิเคราะห์ความเข้มข้นของสารอินทรีย์..... 41
3.4.2 วิเคราะห์ปริมาณกรดระเหยง่าย..... 42
3.4.3 วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล..... 43
3.4.4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพทางไฟฟ้า..... 44
4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง..... 45
4.1 หาภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ประกอบขึ้น..... 45
4.1.1 แปรผันระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์..... 45
4.1.2 แปรผันค่าความเป็นกรดเบส..... 56
4.1.3 แปรผันค่าความต้านทานภายนอก..... 61
4.2 ผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง..... 63
4.2.1 เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องมาลีสามพรานจังหวัดนครปฐม..... 63
4.2.2 ผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง..... 64
5. สรุปผลการทดลอง..... 70
รายการอ้างอิง..... 72
ภาคผนวก..... 76
ภาคผนวก ก..... 77
ภาคผนวก ข..... 78
ภาคผนวก ค..... 81
ภาคผนวก ง..... 94
ภาคผนวก จ..... 97
ภาคผนวก ฉ..... 98
ภาคผนวก ช..... 104
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 105

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางแสดงค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ โดยใช้แหล่งคาร์บอนชนิดต่างๆ แก่เชื้อจุลินทรีย์ผสม.....	13
2.2	ตารางแสดงหนาแน่นกำลังไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ให้อาหารต่างชนิดกัน โดยมีการเติมเฮกซะไซยาโนเฟอเรตในห้องแคโทด.....	15
2.3	ตารางแสดงความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ให้อาหารต่างชนิดกัน โดยมีการใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเคลือบแพลทินัมที่ขั้วแคโทด.....	15
2.4	ตารางแสดงค่ากระแส ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าโดยใช้อาหารต่างชนิดให้แก่เชื้อจุลินทรีย์เดี่ยวและจุลินทรีย์ผสมในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ โดยใช้วัสดุขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน.....	20
2.5	ตารางแสดงค่าปริมาณการใช้น้ำ ปริมาณวัตถุดิบ ปริมาณน้ำเสียในแต่ละสายกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง.....	30
2.6	ตารางแสดงค่าเฉลี่ยคุณสมบัติของน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง.....	30
2.7	ตารางแสดงค่าเฉลี่ยปริมาณความสกปรกที่เกิดขึ้นต่อวันในแต่ละกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง.....	31
2.8	ตารางแสดงค่าปริมาณความสกปรกที่เกิดขึ้นต่อตันวัตถุดิบในแต่ละกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง.....	31
2.9	ตารางแสดงคุณสมบัติของน้ำเสียก่อนและหลังผ่านระบบการบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพของระบบบำบัดของโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง.....	31
4.1	ตารางแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีต่อวัน ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่อการกำจัดซีโอดี ปริมาณกรดระเหยง่ายที่ลดลงจากเริ่มต้น และน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยที่ปริมาตรสุดท้ายที่ภาวะคงตัว ของระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ที่ 36 24 และ 12 ชั่วโมง.....	55
4.2	ตารางแสดงความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีต่อวัน ประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าต่อการกำจัดซีโอดี ปริมาณกรดระเหยง่ายที่เพิ่มขึ้นจากเริ่มต้น ค่าความเป็นด่างทั้งหมด และน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยที่ภาวะคงตัวของค่าความเป็นกรดเบส 4 5 6 7 และ 8.....	60

ตารางที่		หน้า
4.3	ตารางแสดงปริมาณน้ำตาล 3 ชนิดในน้ำเสียและตัวอย่างในถังแอโนด เมื่อทดลองใช้กับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องเป็นเวลา 6 วัน วิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC.....	66
ค.1	ตารางแสดงค่าซีโอดี ปริมาณกรดระเหยง่าย และน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 36 ชั่วโมง เมื่อให้ระบบทำงานจนเข้าสู่ภาวะคงตัว.....	81
ค.2	ตารางแสดงค่าซีโอดี ปริมาณกรดระเหยง่าย และน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 24 ชั่วโมง เมื่อให้ระบบทำงานจนเข้าสู่ภาวะคงตัว.....	83
ค.3	ตารางแสดงค่าซีโอดี ปริมาณกรดระเหยง่าย และน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์เท่ากับ 12 ชั่วโมง เมื่อให้ระบบทำงานจนเข้าสู่ภาวะคงตัว.....	85
ค.4	ตารางแสดงค่าซีโอดี ปริมาณกรดระเหยง่าย ค่าความเป็นด่างทั้งหมด และน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยที่ค่าความเป็นกรดเบสในถังแอโนดเท่ากับ 4.....	87
ค.5	ตารางแสดงค่าซีโอดี ปริมาณกรดระเหยง่าย ค่าความเป็นด่างทั้งหมด และน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยที่ค่าความเป็นกรดเบสในถังแอโนดเท่ากับ 5.....	88
ค.6	ตารางแสดงค่าซีโอดี ปริมาณกรดระเหยง่าย ค่าความเป็นด่างทั้งหมด และน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยที่ค่าความเป็นกรดเบสในถังแอโนดเท่ากับ 6.....	89
ค.7	ตารางแสดงค่าซีโอดี ปริมาณกรดระเหยง่าย ค่าความเป็นด่างทั้งหมด และน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยที่ค่าความเป็นกรดเบสในถังแอโนดเท่ากับ 7.....	90
ค.8	ตารางแสดงค่าซีโอดี ปริมาณกรดระเหยง่าย ค่าความเป็นด่างทั้งหมด และน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยที่ค่าความเป็นกรดเบสในถังแอโนดเท่ากับ 8.....	91
ค.9	ตารางแสดงค่าซีโอดี ปริมาณกรดระเหยง่าย ค่าความเป็นด่างทั้งหมด และน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยในถังแอโนด โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องมาลีสามพราน จังหวัดนครปฐม.....	92
ข.1	ตารางแสดงความหนาแน่นกระแส ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเมื่อแปรผันค่าความต้านทานภายนอกตั้งแต่ 0 ถึง 1000 กิโลโอห์ม..	104

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ภาพแสดงการปฏิกิริยาในทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ผลิตอิเล็กตรอนและโปรตอน อิเล็กตรอนไหลเข้าสู่ขั้วไฟฟ้าแอโนดเพื่อไปยังห้องแคโทดผ่านวงจรภายนอก ขณะที่โปรตอนไหลผ่านเยื่อเลือกผ่านประจุบวกไปยังห้องแคโทด จากนั้นอิเล็กตรอน โปรตอน และออกซิเจนเกิดปฏิกิริยารวมกันกลายเป็นน้ำ.....	4
2.2	ภาพแสดงการถ่ายทอดอิเล็กตรอนทางอ้อมผ่านปฏิกิริยาการรีดิวซ์สารแก่ขั้วไฟฟ้าแอโนดโดยไฮโดรเจนเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้จากกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้าแอโนดผลิตอิเล็กตรอนและโปรตอน.....	7
2.3	ภาพแสดงตัวกลางนำพาจะรับอิเล็กตรอนจากเซลล์และถ่ายทอดให้แก่ขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งรีดักชันและออกซิเดชัน จึงสามารถใช้หมุนเวียนได้.....	8
2.4	ภาพแสดงนาโนไวร์ของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน 2 ชนิด.....	10
2.5	ภาพแสดงรูปร่างลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ.....	11
2.6	รูปแสดงกราฟความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อความหนาแน่นกระแสของการเติมเปอแมงกาเนต เฮกซะไซยาไนด์ ออกซิเจนที่เสริมการเกิดปฏิกิริยาโดยใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนเคลือบแพลทินัม และออกซิเจน ในห้องแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์.....	16
2.7	กราฟโพลาไรเซชัน แสดงการสูญเสียแรงดันจากการดึงกระแสใน 3 ช่วง.....	17
3.1	รูปแสดงถังเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์แบบห้องคู่รูปทรงตัวเอชที่ทำจากอะคริลิก.....	34
3.2	รูปแสดงถังปฏิกรณ์แบบไร้อากาศจากห้องปฏิบัติการของหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.....	38
4.1	กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 36 24 และ12 ชั่วโมงเป็นเวลา 4 วัน.....	45
4.2	กราฟการแสดงเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยและค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 36 24 และ12 ชั่วโมง.....	47

รูปที่ หน้า

4.3 กราฟแสดงค่าซีโอดีในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 36 24 และ12 ชั่วโมง..... 48

4.4 กราฟแสดงประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของแต่ละระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์..... 49

4.5 กราฟแสดงน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 36 24 และ12 ชั่วโมง..... 50

4.6 กราฟแสดงน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เปรียบเทียบที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ทั้งสาม เมื่อปริมาณอาหารที่เข้าสู่ถังแอโนดมีค่าเท่ากันจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะคงตัว..... 51

4.7 กราฟแสดงปริมาณกรดระเหยง่ายในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ 36 24 และ12 ชั่วโมง..... 52

4.8 กราฟแสดงปริมาณกรดระเหยง่ายในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เปรียบเทียบที่ระยะเวลากักพักทางชลศาสตร์ทั้งสาม เมื่อปริมาณอาหารที่เข้าสู่ถังแอโนดมีค่าเท่ากันจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะคงตัว..... 53

4.9 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์เฉลี่ยทุก 1 ชั่วโมง ที่ค่าพีเอช 4 5 6 7 และ 8 ในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 96 ชั่วโมง..... 56

4.10 กราฟแสดงค่าซีโอดีที่ค่าพีเอช 4 5 6 7 และ 8 ในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 4 วัน..... 57

4.11 กราฟแสดงน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยที่ค่าพีเอช 4 5 6 7 และ 8 ในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 4 วัน..... 57

4.12 กราฟแสดงปริมาณความเป็นด่างทั้งหมดที่ค่าพีเอช 4 5 6 7 และ 8 ในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 4 วัน..... 58

4.13 กราฟแสดงปริมาณกรดระเหยง่ายที่ค่าพีเอช 4 5 6 7 และ 8 ในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 4 วัน..... 59

4.14 กราฟแสดงความหนาแน่นกำลังที่ความต้านทานต่างๆ..... 61

4.15 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ..... 62

4.16 ภาพแสดงบริเวณที่ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียรวมของโรงงาน..... 63

รูปที่ หน้า

4.17 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องมาลีสามพราน จังหวัดนครปฐม แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วัน..... 64

4.18 กราฟแสดงค่าซีโอดีในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องมาลีสามพราน จังหวัดนครปฐม แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วัน..... 66

4.19 กราฟแสดงน้ำหนักแห้งเซลล์แขวนลอยในถังเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องมาลีสามพราน จังหวัดนครปฐม แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วัน..... 67

4.20 กราฟแสดงปริมาณความเป็นด่างในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ เมื่อทดลองเดินระบบโดยใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องมาลีสามพราน จังหวัดนครปฐม แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วัน..... 68

4.21 กราฟแสดงปริมาณกรดระเหยง่ายในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋องมาลีสามพราน จังหวัดนครปฐม แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 5 วัน..... 69

ง.1 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์เมื่อค่าพีเอชในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เท่ากับ 4 แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 4 วัน 94

ง.2 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อค่าพีเอชในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เท่ากับ 5 แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 4 วัน 94

ง.3 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อค่าพีเอชในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เท่ากับ 6 แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 4 วัน..... 95

ง.4 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อค่าพีเอชในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เท่ากับ 7 แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 4 วัน..... 95

ง.5 กราฟแสดงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อค่าพีเอชในถังแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์เท่ากับ 8 แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 4 วัน 96

จ.1 กราฟมาตรฐานปริมาณน้ำตาลฟรุกโตส (กรัมต่อลิตร) ต่อพื้นที่ใต้กราฟ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC..... 97

จ.2 กราฟมาตรฐานปริมาณน้ำตาลกลูโคส (กรัมต่อลิตร) ต่อพื้นที่ใต้กราฟ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC..... 97

รูปที่ หน้า

จ.3 กราฟมาตรฐานปริมาณน้ำตาลซูโครส (กรัมต่อลิตร) ต่อพื้นที่ใต้กราฟ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง HPLC..... 97

ฉ.1 รูปแสดงการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในขั้นตอนการทดลองใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง เดินระบบเป็นเวลา 0 วัน จากการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC 98

ฉ.2 รูปแสดงการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในขั้นตอนการทดลองใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง เดินระบบเป็นเวลา 1 วัน จากการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC 99

ฉ.3 รูปแสดงการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในขั้นตอนการทดลองใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง เดินระบบเป็นเวลา 2 วัน จากการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC 100

ฉ.4 รูปแสดงการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในขั้นตอนการทดลองใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง เดินระบบเป็นเวลา 3 วัน จากการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC 101

ฉ.5 รูปแสดงการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในขั้นตอนการทดลองใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง เดินระบบเป็นเวลา 4 วัน จากการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC 102

ฉ.6 รูปแสดงการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลในเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ในขั้นตอนการทดลองใช้น้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมผลไม้กระป๋อง เดินระบบเป็นเวลา 5 วัน จากการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง HPLC 103

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

Ω	=	ค่าความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโอห์ม
μ	=	หน่วยเป็นไมโคร