

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกร

นายภาณุภูมิ อุตตศิริลักษณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

EFFICIENCY OF SINGLE CHAMBER MICROBIAL FUEL CELL IN ELECTRICITY
GENERATION FROM SWINE WASTEWATER

Mr. Parkpoom Attasiluck

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวในการ
ผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกร

โดย

นายภาคภูมิ อรรถศิริลักษณ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภา ชินเวชกิจวานิชย์)

ภาคภูมิ อัครศิริลักษณ์ : ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกร. (Efficiency of Single Chamber Microbial Fuel Cell in Electricity Generation from Swine Wastewater) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ.ดร.วิบูลย์ลักษณ์ ฟิ่งรัมย์, 193 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดน้ำเสียด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียว โดยตั้งปฏิกรณ์ทำจากอะคริลิกใสทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 ซม. สูง 56 ซม. มีปริมาตรรวม 7.4 ลิตร ขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทดทำจากแท่งแกรไฟท์กลวงและผ้าคาร์บอนเคลือบแพลตทินัม ในช่วงแรกทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากน้ำตาลทรายมีค่าซีโอดีประมาณ 5,000 มก./ล. ภายใต้สภาวะการทดลองแบบแบทช์ที่กำหนดให้ขนาดและระยะห่างระหว่างขั้วคองที่เท่ากับ 30 ซม. เก็บบันทึกข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทุกๆ ชั่วโมงโดยอัตโนมัติลงคอมพิวเตอร์ด้วยตัวต้านทานภายนอกระหว่างขั้วไฟฟ้าขนาด 1 กิโลโอห์ม ผลการทดลองพบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพผลิตได้มีค่าเท่ากับ 761 ± 35.75 มิลลิโวลต์ คิดเป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 0.761 ± 0.04 มิลลิแอมแปร์ โดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถบำบัดซีโอดีได้ 90.76 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นเมื่อทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดน้ำเสียด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียว ผลการทดลองพบว่า ขนาดของขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสมคือ 424 ตร.ซม. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดที่เหมาะสมคือ 10 ซม. และอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสมคือ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยคิดเป็นค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1.160 ± 0.03 มิลลิแอมแปร์ และมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเท่ากับ 83.72 เปอร์เซ็นต์ โดยเมื่อทดลองนำค่าสภาวะต่างๆ ดังกล่าวไปทดสอบเพื่อหาศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าควบคู่กับการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรพบว่า ได้ค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1.356 ± 0.04 มิลลิแอมแปร์ และมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงสุดคิดเป็น 92.54 เปอร์เซ็นต์

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา2554.....

5170423821 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : Microbial Fuel Cell / Electricity Generation / Wastewater Treatment / Swine Wastewater

PARKPOOM ATTASIRILUCK : EFFICIENCY OF SINGLE CHAMBER MICROBIAL FUEL CELL IN ELECTRICITY GENERATION FROM SWINE WASTEWATER. ADVISOR: ASST.PROF. WIBOONLUK PUNGRASMI, Ph.D., 193 pp.

This research investigated the efficiency of Single Chamber Microbial Fuel Cell (SCMFC) in electricity generation and wastewater treatment. In this work, the SCMFC was made from cylindrical acrylic with 13 cm. diameter, 56 cm. heights and total reactor volume was 7.4 litres. The anode was a graphite tube while the cathode was made of a carbon cloth coated with platinum catalyst. In the first experiment, the efficiency of SCMFC in electricity generation and wastewater treatment was tested and operated in batch condition. Artificial wastewater was prepared from sucrose solution to the COD concentration about 5,000 mg/l. The electrode size and distance between cathode and anode was fixed of 30 cm. The voltage data was automatically recorded by computer every hour, using 1 kΩ resistor as a load of the external resistance. The batch result revealed that maximum average voltage was 761 ± 35.75 mV which equal to maximum average current of 0.761 ± 0.04 mA. Moreover, the COD could effectively remove over 90.76% together with the electricity generation process. Then, the SCMFC was operated in continuous mode to discover for the best operation conditions. The best conditions were 424 cm² 10 cm. and 2.22 kg.COD/m³-day. The outcome clearly detected the maximum average current of 1.160 ± 0.03 mA, when the COD could effectively remove over 83.72%. Then, the SCMFC was operated in continuous mode with swine wastewater. The maximum average current of 1.356 ± 0.04 mA, when the COD could effectively remove over 92.54%

Department : Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year : 2011

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะ พิ้งรัมย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำปรึกษาให้กำลังใจ แนะนำแนวทางที่ตี่ๆ หลักการขั้นตอนต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ และแก้ไขในสิ่งที่ยังบกพร่องมาตลอดในระหว่างดำเนินงานวิจัย ซึ่งมีส่วนสำคัญมากในการทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. สุธา ขาวเชียร ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ เตชะเสน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสภา ชินเวชกิจวานิชย์ ที่ได้แนะนำและตรวจเล่มวิทยานิพนธ์จนสำเร็จได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่ช่วยให้คำชี้แนะ ให้ความช่วยเหลืองานด้านเอกสาร และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือในห้องปฏิบัติการวิจัยเสมอมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการของเสี่ยอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการบิควิสิตอุปกรณ์ในการทดลอง

ขอขอบคุณประชาฟาร์มที่ให้ความอนุเคราะห์หั่วเชื้อจุลชีพและน้ำเสียฟาร์มสุกร

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยบางส่วนจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนอุดหนุนการวิจัยจากกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน และทุนสนับสนุนเพิ่มเติมจากทุนอุดหนุนการวิจัยประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2553 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

ขอบคุณเพื่อนๆ และพี่ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลกันและกันในช่วงการทำวิจัยมาโดยตลอด

ท้ายสุดนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และทุกๆ คนในครอบครัว ซึ่งสนับสนุนส่งเสริมและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 น้ำเสียฟาร์มสุกร.....	4
2.2 แนวทางการจัดการมูลสุกรและน้ำเสียจากฟาร์มสุกร.....	5
2.3 ค่ามาตรฐานการควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร.....	6
2.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ.....	7
2.5 สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับกระบวนการไร้อากาศ.....	11
2.6 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการไร้อากาศ.....	14
2.7 พลังงานทดแทน.....	15
2.8 ประวัติของเซลล์เชื้อเพลิง.....	18
2.9 หลักการพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิง.....	18
2.10 เทคโนโลยีของเซลล์เชื้อเพลิง.....	19
2.11 การออกแบบเซลล์เชื้อเพลิง.....	20
2.12 การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิง.....	20
2.13 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง.....	21
2.14 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ.....	23

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	35
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	40
3.1 แผนการวิจัย.....	40
3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี.....	42
3.3 การคำนวณค่าทางไฟฟ้า.....	47
3.4 การดำเนินการวิจัย.....	48
3.5 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์.....	61
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	62
4.1 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวในการผลิตกระแสไฟฟ้า และบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์.....	63
4.1.1 ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้า.....	63
4.1.2 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย.....	65
4.2 สภาพที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวใน การผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์.....	67
4.2.1 ผลของขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด.....	67
4.2.2 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด.....	72
4.2.3 ผลของอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์.....	77
4.2.4 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย.....	81
4.3 สักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าควบคู่กับการบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียฟาร์มสุกร ด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการเดิน ระบบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์.....	83
4.3.1 การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบ ห้องเดียว.....	84
4.3.2 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย.....	88

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	91
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	91
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	92
รายการอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ก. ผลการทดลอง.....	98
ภาคผนวก ข. รายการคำนวณ.....	187
ภาคผนวก ค. กราฟมาตรฐาน.....	191
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	193

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการ เลี้ยงสุกร	7
2.2	ความเข้มข้นของอ๊อนบวกที่กระตุ้นและยับยั้งปฏิกิริยาแบบ ไร้ อากาศ.....	12
2.3	ความเข้มข้นของโลหะหนักที่จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียแบบ ไร้ อากาศ	12
2.4	ผลของแอม โมเนียในโตรเจนที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบ ไร้ อากาศ.....	13
2.5	แสดงข้อมูลเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการบำบัดแบบ ไร้ อากาศ.....	14
2.6	การใช้พลังงานหมุนเวียนจำแนกตามประเภทพลังงานและสาขาเศรษฐกิจ พ.ศ. 2547	16
2.7	ปริมาณการนำเข้าและส่งออกพลังงานจำแนกตามประเภทพลังงานและ ปีกิจกรรม	17
2.8	สรุปการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภท	22
3.1	รายละเอียดขั้วไฟฟ้าแอม โนดขนาดต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย	46
3.2	ตัวแปรต่างๆ ในการทดลองส่วนที่ 1.....	51
3.3	ตัวแปรต่างๆ ในการทดลองส่วนที่ 2.1.....	55
3.4	ตัวแปรต่างๆ ในการทดลองส่วนที่ 2.2	56
3.5	ตัวแปรต่างๆ ในการทดลองส่วนที่ 2.3.....	57
3.6	ตัวแปรต่างๆ ในการทดลองส่วนที่ 3.....	60
3.7	พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ความถี่และวิธีการวิเคราะห์.....	61
4.1	การเปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าจากการแปรค่าขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอม โนด แตกต่างกัน.....	70
4.2	เปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าจากการแปรค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอม โนดและ แคโทด.....	76

ตารางที่	หน้า
4.3	เปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าจากการแปรค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 79
4.4	พารามิเตอร์เบื้องต้นของน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ใช้ในงานวิจัย..... 84
4.5	ปริมาณสูงสุดของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสีย สังเคราะห์และน้ำเสียฟาร์มสุกรเมื่อเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ห้องเดี่ยวแบบต่อเนื่อง..... 87
4.6	การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วย เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพของงานวิจัยอื่นๆ กับงานวิจัยนี้..... 90
ก-1	ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิง จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบเบทซ์..... 99
ก-2	ผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวระหว่างการเดินระบบแบบเบทซ์..... 110
ก-3	ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 170 ตร.ซม. 111
ก-4	ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 254 ตร.ซม. ... 116
ก-5	ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 339 ตร.ซม.121
ก-6	ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 424 ตร.ซม.125
ก-7	ผลการทดลองการหาประสิทธิภาพเชิงkulomb ที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้า แอโนดต่างๆ กัน 4 ขนาด..... 128
ก-8	ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนด และแคโทด 25 ซม. 129
ก-9	ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนด และแคโทด 20 ซม. 133
ก-10	ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนด และแคโทด 15 ซม. 136
ก-11	ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนด และแคโทด 10 ซม. 139
ก-12	ผลการทดลองการหาประสิทธิภาพเชิงkulomb ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า แอโนดและแคโทดแตกต่างกัน 4 ระยะ..... 143

ตารางที่	หน้า
ก-13 ผลการทดลองการหาค่าความนำไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดแตกต่างกัน 4 ระยะ.....	143
ก-14 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 8.86 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน.....	144
ก-15 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 6.64 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน.....	148
ก-16 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4.43 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน.....	151
ก-17 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน.....	154
ก-18 ผลการทดลองการหาประสิทธิภาพเชิงkulombปีที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน 4 ค่า.....	158
ก-19 ผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	159
ก-20 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	160
ก-21 ผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง	186

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างพื้นที่การเลี้ยงสุกรของฟาร์มทั่วไป.....	4
2.2	ลักษณะน้ำเสียและการรวบรวมน้ำเสียลงสู่บ่อรวมน้ำเสียก่อนการบำบัด.....	5
2.3	ลำดับชั้นโดยรวมของปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัด แบบไร้อากาศ.....	8
2.4	ตัวอย่างหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ	23
2.5	ตัวอย่างกลไกการเกิดกระแสไฟฟ้าโดยการส่งผ่านอิเล็กตรอนของจุลชีพ ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ.....	25
2.6	การส่งผ่านของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่บนเส้นลวดนาโน ไปยังขั้วไฟฟ้าแอโนด	27
2.7	ตัวอย่างการเกิดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพและการไปใช้ประโยชน์...	28
2.8	หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่มีสารพาอิเล็กตรอน.....	31
2.9	หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ไม่มีสารพาอิเล็กตรอน.....	31
2.10	ตัวอย่างรูปแบบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว.....	33
2.11	ตัวอย่างรูปแบบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่.....	34
3.1	แผนผังรวมสรุปขั้นตอนการทดลองทั้งหมดของงานวิจัยนี้.....	41
3.2	ไดอะแกรมแสดงชุดถังปฏิกรณ์.....	45
3.3	รูปถ่ายเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่ใช้ในงานวิจัย.....	45
3.4	ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย.....	46
3.5	ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้า.....	46
3.6	แผนผังการทดลองส่วนที่ 1	50
3.7	การเชื่อมต่อถังปฏิกรณ์เข้ากับชุดอุปกรณ์ทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ แบบห้องเดี่ยวที่ใช้ในการวิจัยสำหรับการเดินระบบแบบเบตซ์.....	52
3.8	แผนผังการทดลองส่วนที่ 2.....	54
3.9	การเชื่อมต่อถังปฏิกรณ์เข้ากับชุดอุปกรณ์ทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบ ห้องเดี่ยวที่ใช้ในการวิจัยสำหรับการเดินระบบแบบต่อเนื่อง.....	58

ภาพที่	หน้า	
3.10	แผนผังการทดลองส่วนที่ 3.....	59
4.1	การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากการเดินระบบแบบ แบบทซ์ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว.....	64
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและ ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าจากการเดินระบบแบบทซ์ของเซลล์เชื้อเพลิง จุลชีพแบบห้องเดี่ยว.....	65
4.3	การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ระหว่างการเดินระบบ เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวแบบแบบทซ์.....	66
4.4	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว ระหว่างการเดินระบบแบบแบบทซ์.....	66
4.5	การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า เมื่อแปรค่าขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดแตกต่างกัน 4 ขนาด.....	68
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเมื่อแปรค่าขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนด แตกต่างกัน.....	70
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดกับประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์เมื่อ แปรค่าขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดต่างๆ กัน 4 ขนาด.....	71
4.8	การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อแปรค่าระยะห่าง ระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดแตกต่างกัน 4 ระยะ.....	73
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดแตกต่างกัน 4 ระยะ.....	74
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเมื่อแปรค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและ แคโทดแตกต่างกัน.....	75
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดกับประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์ เมื่อแปรค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดแตกต่างกัน 4 ระยะ.....	76

ภาพที่	หน้า
4.12	การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าเมื่อแปรค่าอัตราภาระ บรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน 4 ค่า..... 78
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเมื่อแปรค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เข้า ระบบแตกต่างกัน..... 79
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดกับประสิทธิภาพเชิงकुलोमीเมื่อ แปรค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน 4 ค่า..... 80
4.15	การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ระหว่างเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิง จุลชีพห้องเดี่ยวแบบต่อเนื่อง 3 สภาวะการทดลอง..... 81
4.16	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบ ห้องเดี่ยวระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง 3 สภาวะการทดลอง..... 82
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงकुलोमीและกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด เมื่อทำการแปรค่าขนาดพื้นที่ผิวขั้วแอโนด ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนด และแคโทด และอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์..... 83
4.18	การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าจากการเดินระบบเซลล์ เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยน้ำเสียฟาร์มสุกร..... 86
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเมื่อเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพด้วยน้ำเสียจริง จากฟาร์มสุกร..... 87
4.20	การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีของน้ำเสียฟาร์มสุกรระหว่างการเดินระบบ เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวแบบต่อเนื่อง..... 88
4.21	ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียฟาร์มสุกรของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ แบบห้องเดี่ยวระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง..... 89
ค-1	กราฟมาตรฐานซูโครส..... 192

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในภาวะปัจจุบันที่พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญในการผลักดันให้เกิดการพัฒนาประเทศ ประกอบกับภาวะวิกฤติการณ์ราคาน้ำมันแพงและภาวะโลกร้อนที่เกิดจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ทำให้กระแสดemand การพลังงานสะอาดเพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้รับความสนใจมากขึ้น เป็นเหตุให้หลายประเทศทั่วโลก รวมถึงประเทศไทยด้วย ได้เล็งเห็นและตระหนักถึงความสำคัญของการแสวงหาแหล่งพลังงานที่จะนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลซึ่งก่อให้เกิดปัญหามลพิษ โดยหากเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศ และอีกทั้งนับวันเชื้อเพลิงเหล่านี้อันได้แก่ น้ำมันปิโตรเลียม ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน จะมีปริมาณลดลงเรื่อยๆ ดังนั้นหลายประเทศจึงได้เริ่มศึกษา ค้นคว้า และพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนที่เป็นพลังงานสะอาดอย่างจริงจัง ซึ่งพลังงานทดแทนเหล่านี้ได้แก่ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ ก๊าซชีวภาพ และพลังงานไฮโดรเจน นอกจากนี้อีกทางเลือกหนึ่งของพลังงานทดแทนที่น่าสนใจคือ การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

โดยหลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะเป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานเคมีในสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียไปเป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นการสร้างกระแสไฟฟ้าจากกระบวนการย่อยสลายหรือการเผาผลาญสารอินทรีย์ผ่านสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยองค์ประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะประกอบด้วยส่วนของขั้วแอโนด และขั้วแคโทด ซึ่งในกระบวนการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพนี้จะไม่มีการเผาไหม้เกิดขึ้นในปฏิกิริยา จึงไม่ก่อให้เกิดก๊าซที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Logan, 2008) และกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้แทนแบตเตอรี่สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กได้ อีกทั้งกระบวนการที่เกิดขึ้นยังเป็นการบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียควบคู่ไปอีกด้วย

สำหรับงานวิจัยนี้สนใจที่จะทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าและการบำบัดน้ำเสียด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่ออกแบบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อพิจารณาแนวทางและความเป็นไปได้ในการผลิตพลังงานทดแทนควบคู่ไปกับการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยคาดว่าในอนาคตการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพอาจเป็นแหล่งพลังงานทดแทนใหม่ที่สนใจต่อไปหากมีความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อการ

ผลิตรกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพอย่างถ่องแท้ โดยน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นน้ำเสียจากฟาร์มสุกรก่อนเข้าระบบบำบัดซึ่งมีสารอินทรีย์ปนเปื้อนในปริมาณสูง จึงมีศักยภาพและความเป็นไปได้ในการใช้เป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอนเพื่อผลิตรกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยกระบวนการที่เกิดขึ้นจัดเป็นการใช้หลักการทางชีวภาพในการผลิตพลังงานทดแทนที่ควบคู่ไปกับการบำบัดน้ำเสียผ่านกิจกรรมที่เกิดขึ้นภายในเซลล์จุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพและไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวในการผลิตรกระแสไฟฟ้าและบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์
2. เพื่อศึกษาสถานะที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวในการผลิตรกระแสไฟฟ้าและบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์
3. เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตรกระแสไฟฟ้าควบคู่กับการบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวภายใต้สถานะที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้จะดำเนินการ ณ อุณหภูมิห้อง ที่ห้องปฏิบัติการวิจัยภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเป็นการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการที่มีการกำหนดขอบเขตของการวิจัยต่างๆ ดังนี้

1. ในช่วงแรกของการทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะดำเนินการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากน้ำตาลทราย โดยกำหนดให้มีค่าความเข้มข้นในรูปชีโอดี 5,000 มก./ล.
2. ในช่วงหลังจะดำเนินการทดลองโดยใช้น้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรเพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตรกระแสไฟฟ้าและการบำบัดชีโอดีภายใต้สถานะที่เหมาะสมจากการทดลองช่วงแรก
3. หัวเชื้อ (Seed) ที่ใช้ในการเริ่มเดินระบบเป็นหัวเชื้อแอนแอโรบิคจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ

4. ทำการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่ทำการเดินระบบแบบแบบทซ์ในการทดลองส่วนที่ 1 และทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องในการทดลองส่วนที่ 2 และ 3 โดยใช้แกรไฟต์เป็นขั้วแอโนด และผ้าคาร์บอนเคลือบด้วยแพลตทินัมเป็นขั้วแคโทด
5. ปัจจัยที่ทำการศึกษาคือ ขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนด 4 ขนาด ได้แก่ 170 254 339 และ 424 ตร.ซม. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 4 ระยะ ได้แก่ 10 15 20 และ 25 ซม. และอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 ค่า ได้แก่ 2.22 4.43 6.64 และ 8.86 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยประเมินประสิทธิภาพเพื่อให้ได้ค่าปัจจัยที่เหมาะสมต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจากปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้ควบคู่กับการบำบัดซีโอดีในน้ำเสียดังเคราะห์
6. ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆตามวิธีมาตรฐานที่ระบุใน Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1998)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อนำความรู้ที่ได้รับไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียควบคู่ไปกับการผลิตกระแสไฟฟ้า
2. เป็นแนวทางในการพัฒนาและปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวรูปแบบไหลขึ้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดน้ำเสีย
3. เพื่อให้ทราบถึงศักยภาพเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร
4. เป็นทางเลือกที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงในการจัดการน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยได้กระแสไฟฟ้าเป็นพลังงานทางเลือกที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียฟาร์มสุกร

ลักษณะสมบัติของน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกรแต่ละแห่งจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับการจัดการของแต่ละฟาร์ม ดังแสดงในรูปที่ 2.1 โดยน้ำเสียส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วย มูลสัตว์ ยูเรีย (Urea) และอาหารสัตว์ ซึ่งทำให้น้ำเสียประเภทนี้มีปริมาณสารประกอบอินทรีย์และไนโตรเจนเข้มข้นสูง นอกจากนี้จะรวมถึงน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากการล้างทำความสะอาดคอกสุกร น้ำเสียจากน้ำที่ใช้ฉีดล้างตัวสุกร น้ำเสียจากรางระบายน้ำของคอกสุกร และปัสสาวะของสุกร เป็นต้น ทั้งนี้องค์ประกอบของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรโดยทั่วไป พบว่า ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นของแข็ง ได้แก่ มูลสุกร ซึ่งเฉลี่ยแล้วสุกรจะถ่ายมูลประมาณ 2.2 กก./ตัว/วัน และของแข็งอื่นๆ เช่น ซากสุกร เศษอาหาร ถูงใส่อาหาร วัสดุรองพื้น และเศษขยะ เป็นต้น และส่วนที่เป็นของเหลว ได้แก่ น้ำจากการล้างคอกสุกร และปัสสาวะของสุกร ซึ่งมีประมาณร้อยละ 3 ของน้ำหนักตัว โดยน้ำเสียที่เกิดขึ้นจะถูกรวบรวมลงสู่บ่อรวมน้ำเสียก่อนนำไปบำบัดต่อไป ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างพื้นที่การเลี้ยงสุกรของฟาร์มทั่วไป



รูปที่ 2.2 ลักษณะน้ำเสียและการรวบรวมน้ำเสียลงสู่บ่อรวมน้ำเสียก่อนการบำบัด

2.2 แนวทางการจัดการมูลสุกรและน้ำเสียจากฟาร์มสุกร

การเลี้ยงสุกรนอกจากจะทำให้เกิดน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงแล้ว ยังทำให้เกิดปัญหากลิ่นเหม็นและแมลงวันรบกวนซึ่งอาจทำให้เกิดความเดือดร้อนแก่ชุมชนใกล้เคียงได้ ดังนั้นฟาร์มสุกรจึงจำเป็นต้องมีแนวทางการจัดการของเสียและน้ำเสียจากฟาร์มสุกรอย่างเหมาะสม โดยกรมควบคุมมลพิษได้มีการออกประกาศค่ามาตรฐานน้ำทิ้งเพื่อควบคุมให้ฟาร์มสุกรต้องมีการบำบัดน้ำเสียให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดก่อนจะระบายทิ้งลงสู่แหล่งน้ำหรือออกสู่สิ่งแวดล้อม แต่ทั้งนี้ต้องอาศัยความร่วมมือของเกษตรกรและผู้ประกอบการเป็นสำคัญเพื่อเป็นการช่วยกันดูแลรักษาทรัพยากรน้ำและสิ่งแวดล้อมที่ดีไว้ตลอดไปรวมทั้งเพื่อให้ฟาร์มสุกรสามารถอยู่ร่วมกับชุมชนได้อย่างยั่งยืน

2.2.1 การจัดการมูลสุกร

การเลี้ยงสุกรทำให้เกิดมูลสุกรเป็นจำนวนมากหากไม่มีการจัดการที่ดีโดยเฉพาะด้านความสะอาด จะเป็นแหล่งที่ก่อให้เกิดกลิ่นเหม็น โดยเฉพาะบนพื้นคอกที่มีการหมักหมมของมูลสุกรและได้พื้นคอกที่มีการตกค้างของมูลสุกร ปัสสาวะและน้ำจากการล้างคอก นอกจากนี้มูลสุกรที่เก็บกวาดออกจากพื้นคอกเมื่อนำมาตากแห้งต้องมีการดูแลโดยไม่ควรกองมูลทิ้งไว้เป็นเวลานานเพราะความชื้นในอากาศและอุณหภูมิ จะทำให้เกิดปฏิกิริยากลายเป็นก๊าซที่มีกลิ่นได้ มูลสุกรที่เก็บกวาดออกก่อนที่จะทำการฉีดล้างคอกสุกรอาจจะนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น นำไปขายสดนำไปทำปุ๋ยคอก นำไปทำเป็นอาหารปลา และนำไปผลิตก๊าซชีวภาพโดยการนำมูลสุกรและน้ำเสียไปหมักในสภาพไร้อากาศ (Kim และคณะ, 2008) ซึ่งก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายรูปแบบ เช่น เป็นเชื้อเพลิงในการหุงต้ม จุดตะเกียง กกลูกหมู หรือผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น และสำหรับมูลสุกรที่ผ่านการหมักแล้วสามารถนำไปเป็นปุ๋ยสำหรับปลูกพืชได้เป็นอย่างดี

2.2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียของฟาร์มสุกร

การบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากฟาร์มสุกรนั้นนิยมใช้กระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศ (Anaerobic biological process) เนื่องจากเป็นระบบที่สามารถบำบัดของเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงๆ ได้ดี ลดปัญหาเรื่องกลิ่นเหม็นและแมลงวันซึ่งเป็นตัวก่อปัญหาข้อขัดแย้งระหว่างชุมชนใกล้เคียงกับฟาร์มสุกร ใช้พลังงานน้อยเนื่องจากไม่ต้องเติมอากาศและยังได้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นผลผลิตจากกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้นี้สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนภายในฟาร์มสุกร (Min และคณะ, 2005) และสามารถช่วยเกษตรกรลดรายจ่ายด้านการใช้พลังงานได้อย่างมีศักยภาพ แต่อย่างไรก็ดีน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดโดยกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศหรือระบบบำบัดน้ำเสียแบบผลิตก๊าซชีวภาพอาจมีค่าความสกปรกไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง ซึ่งทำให้ฟาร์มสุกรต้องมีระบบบำบัดตามเพื่อทำการบำบัดน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยฟาร์มสุกรบางแห่งจะเลือกใช้วิธีการเก็บกักน้ำทิ้งเหล่านี้ไว้ในบ่อพักน้ำในพื้นที่ของฟาร์มก่อนเพื่อลดค่าความสกปรกลงจนได้ตามเกณฑ์มาตรฐานจึงระบายออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรเป็นระบบที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สูง ซึ่งส่วนใหญ่ได้รับการออกแบบให้ประกอบไปด้วยระบบบำบัดน้ำเสียขั้นต้น ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพและระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สามเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนบางชนิดที่ไม่สามารถทำการบำบัดได้ด้วยระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ อาทิเช่น ระบบกำจัดฟอสฟอรัส ไนโตรเจน และโลหะหนัก เป็นต้น อย่างไรก็ตามฟาร์มสุกรขนาดเล็กและขนาดกลางอาจมีเพียงระบบบำบัดทางชีวภาพซึ่งไม่มีการติดตั้งระบบบำบัดขั้นหลัง ดังนั้นจึงมีแต่กระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต้นทำหน้าที่แยกส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลวออกจากกันโดยกระบวนการต่างๆ เช่น ลานกรองทราย ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมในระบบฟาร์มสุกรขนาดเล็กและขนาดกลาง ส่วนของแข็งที่แยกได้จะนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นปุ๋ยมูลสัตว์หรือปุ๋ยคอกในการทำการเกษตร (Farmland fertilizer) ส่วนน้ำที่ได้หลังจากผ่านระบบบำบัดแล้วจะถูกส่งเข้าระบบบำบัดทางชีวภาพเพื่อทำการบำบัดน้ำให้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรต่อไป

2.3 ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากฟาร์มเลี้ยงสุกร

เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินคุณภาพน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทฟาร์มเลี้ยงสุกรตามประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม (2548 ก, ข) แบ่งออกได้เป็น 2 เกณฑ์มาตรฐานตามประเภทของฟาร์มสุกร กล่าวคือ มาตรฐานประเภท ก สำหรับฟาร์มสุกรขนาดใหญ่มากกว่า 5,000 ตัว มาตรฐานประเภท ข ฟาร์มสุกรขนาดกลางจำนวนสุกร 500 ถึง 5,000 ตัว และ มาตรฐานประเภท ค สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็กจำนวนสุกร 50 ตัวแต่น้อยกว่า 500 ตัว โดย

พิจารณาลักษณะน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรด้วยค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้ ค่าความเป็นกรดและด่าง ค่าบีโอดี ค่าซีโอดี ปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด และค่าไนโตรเจนรวม ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ตารางที่ 2.1 ค่ามาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษประเภทการเลี้ยงสุกร

พารามิเตอร์	หน่วย	เกณฑ์มาตรฐานสูงสุด	
		ประเภท ก	ประเภท ข และ ค
ความเป็นกรดและด่าง	-	5.5 - 9	5.5 - 9
บีโอดี	มก./ล.	60	100
ซีโอดี	มก./ล.	300	400
ปริมาณสารแขวนลอยทั้งหมด	มก./ล.	150	200
ไนโตรเจนรวม	มก./ล.	120	200

(ที่มา : ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม 2548 ก, ข)

หมายเหตุ

มาตรฐานประเภท ก สำหรับฟาร์มสุกรขนาดใหญ่มากกว่า 5,000 ตัว

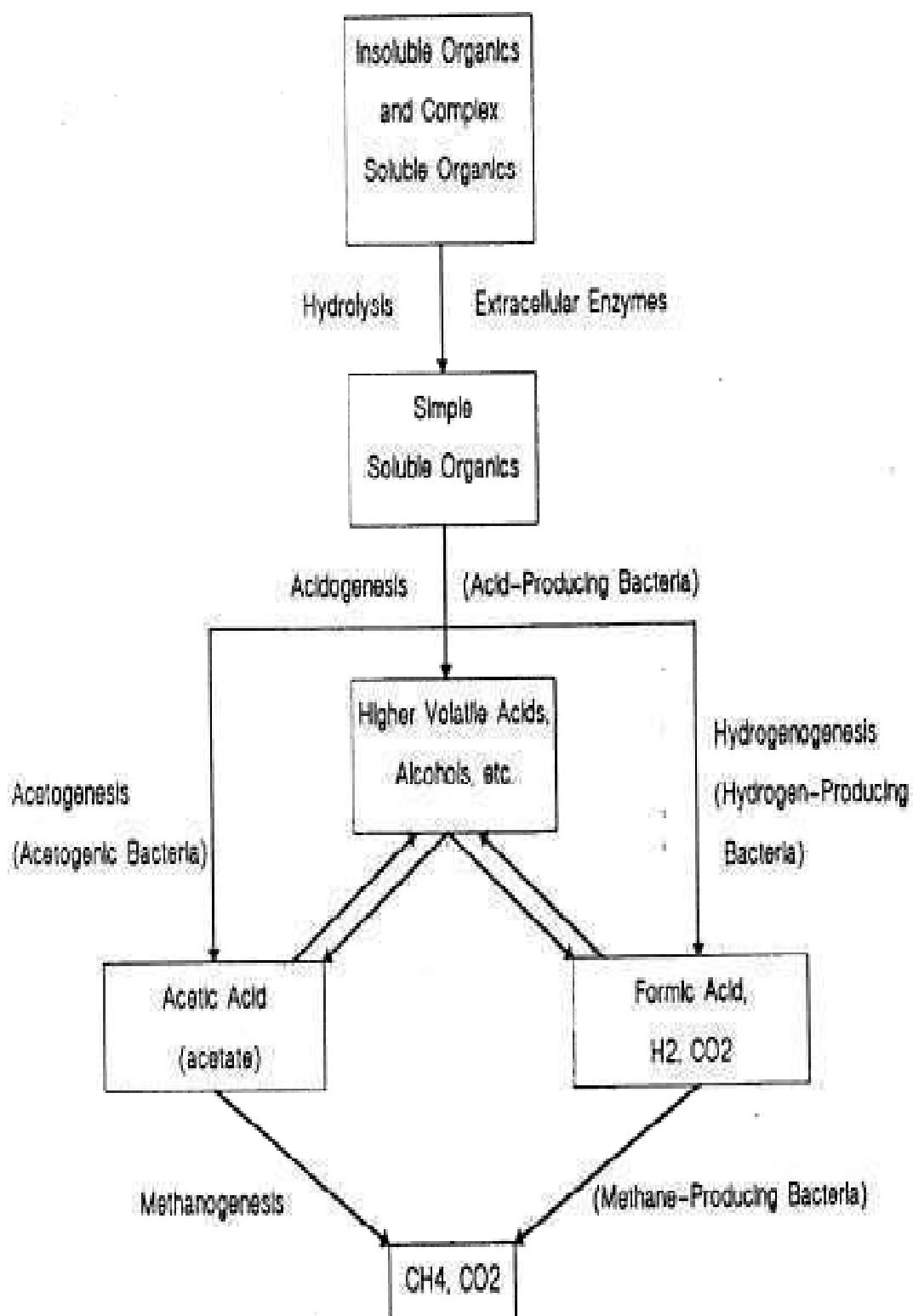
มาตรฐานประเภท ข ฟาร์มสุกรขนาดกลาง จำนวนสุกร 500 ถึง 5,000 ตัว

มาตรฐานประเภท ค สำหรับฟาร์มสุกรขนาดเล็ก จำนวนสุกร 50 ตัวแต่น้อยกว่า 500 ตัว

2.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศหรือแบบไม่ใช้ออกซิเจนเป็นกระบวนการที่ดำเนินการภายใต้สภาวะที่ไม่มีก๊าซออกซิเจนอิสระละลายอยู่ในน้ำ การย่อยสลายสารอินทรีย์เกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์หลายชนิดที่ไม่ใช้อากาศทำให้เกิดการย่อยสลาย คูดซับและเปลี่ยนรูปมลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีค่าความสกปรกน้อยลง ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นแบคทีเรียกลุ่มที่จะทำการเปลี่ยนรูปของสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนไปเป็นก๊าซมีเทน

ปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการไร้อากาศจะได้พลังงานน้อย เซลล์ของจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นใหม่จึงมีจำนวนไม่มากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการที่ใช้อากาศ สำหรับกลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการไร้อากาศเป็นปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน 4 ขั้นตอน ดังแสดงแผนภาพโดยสรุปในรูปที่ 2.3 โดยมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.3 ลำดับขั้นโดยรวมของปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

(Speece, 1996)

ขั้นตอนที่ 1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

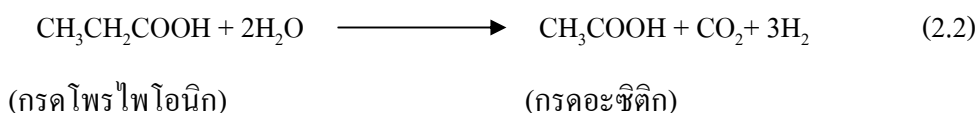
ในขั้นตอนนี้สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน จะถูกแบคทีเรียย่อยสลายให้กลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น กลูโคส กรดอะมิโน และกรดไขมัน เพื่อให้ง่ายต่อการลำเลียงข้ามสู่เชื้อเซลล์ได้ ความเร็วของกระบวนการย่อยสลายขึ้นอยู่กับเอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาจากแบคทีเรีย รวมถึงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิและการสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น ในขั้นตอนนี้ยังไม่มีการลดค่าซีโอดี

ขั้นตอนที่ 2 กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis)

กรดอะมิโนและน้ำตาลจะถูกย่อยสลายโดยปฏิกิริยาการหมัก (Fermentation) ซึ่งสารอินทรีย์จะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะถูกแบคทีเรียสร้างกรดนำไปใช้เพื่อผลิตกรดไขมันระเหย เช่น กรดอะซิติก โพรไพโอนิก บิวไทริก เป็นต้น โดยชนิดของผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสารตั้งต้น (Substrate) และความดันพาร์เชียลของไฮโดรเจน (Hydrogen Partial Pressure)

ขั้นตอนที่ 3 กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis)

กรดไขมันระเหยที่ได้จากกระบวนการสร้างกรดจะถูกเปลี่ยนให้กลายเป็นกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในการสร้างมีเทนโดยการทำงานของอะซิโตเจนิกแบคทีเรีย (Acetogenic bacteria) หรือแบคทีเรียที่สร้างอะซิเตตและไฮโดรเจน (Acetate and H₂-producing bacteria) ได้แก่ *Syntrobacter wolinii* และ *Syntrophomonas wolfei* แบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องการความดันไฮโดรเจนต่ำสำหรับการเปลี่ยนรูปของกรดไขมันระเหย กรณีที่มีความดันไฮโดรเจนค่อนข้างสูง การเกิดอะซิเตตจะลดลงและซับซ้อนจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริก และเอทานอลมากกว่ามีเทน อะซิโตเจนิกแบคทีเรียและเมทาโนเจน (แบคทีเรียที่สร้างมีเทน) จะมีความสัมพันธ์ที่เอื้อกัน เมทาโนเจนจะช่วยให้เกิดความดันไฮโดรเจนต่ำสำหรับอะซิโตเจนิกแบคทีเรีย อย่างไรก็ตามอะซิโตเจนิกแบคทีเรียเจริญเร็วกว่าแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจนมาก โดยการทำงานของอะซิโตเจนิกแบคทีเรียเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาต่อไปนี้



2.5 สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมกับกระบวนการไร้อากาศ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจะใช้เวลานานมากในการเริ่มต้นเดินระบบบำบัด รวมทั้งจุลินทรีย์กลุ่มต่างๆ ในระบบจะต้องการช่วงเวลาเพื่อปรับตัวให้เข้าสู่สภาพแวดล้อมของน้ำเสีย โดยเมื่อสภาพแวดล้อมเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง สารพิษ และสารยับยั้งปฏิกิริยาต่างๆ หรือแม้กระทั่งอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ จะส่งผลโดยตรงต่อการเดินระบบและการทำงานของจุลินทรีย์ในบำบัดน้ำเสีย นั่นคือ ก่อเกิดเปลี่ยนแปลงทั้งด้านคุณภาพและปริมาณจุลินทรีย์ จึงมีผลทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบด้อยลง ซึ่งปัจจัยต่างๆ ทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการทำงานของกระบวนการไร้อากาศสามารถสรุปได้ดังนี้

- อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อการดำเนินงานของระบบไร้อากาศคล้ายกับการดำเนินการทางชีวเคมีอื่นๆ ขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงหนึ่งอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะของจุลชีพจะเพิ่มขึ้น ผลนี้สำคัญโดยเฉพาะในระบบไร้อากาศเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างจุลชีพต่างชนิดกันจะมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในปริมาณที่ต่างกัน ดังนั้นการรักษาอุณหภูมิให้สม่ำเสมอจึงมีความสำคัญมากกว่าการรักษาอุณหภูมิที่ให้อัตราสูงสุดที่เป็นไปได้ เนื่องจากจุลชีพในระบบส่วนใหญ่เป็นกลุ่มที่ชอบอุณหภูมิปานกลางในช่วง 30 – 35°C (Mesophilic microorganisms) จึงเหมาะกับการนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียในประเทศเขตร้อน

- พีเอช และสภาพความเป็นด่าง

ในการเดินระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศควรควบคุมค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.5-7.5 โดยต้องมีการเติมด่างเพื่อป้องกันการลดลงของค่าพีเอช และต้องควบคุมค่าอัตราส่วน VFA : ALK ให้อยู่ในช่วง 0.3-0.4 สภาพความเป็นด่างในระบบบำบัดแบบไร้อากาศจะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต ซึ่งจะทำหน้าที่ในการสะเทินคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดไขมันระเหยง่ายเพื่อให้พีเอชเป็นกลาง หากอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่างในรูปของไบคาร์บอเนตของน้ำเข้าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง หากอัตราส่วนสูงกว่า 0.8 แสดงว่ากำลังบัฟเฟอร์ของระบบมีค่าต่ำมาก พีเอชอาจลดลงได้อย่างรวดเร็ว สภาพความเป็นด่างอาจได้จากเกลือของแอมโมเนียมที่มาจากคาร์บอนไดออกไซด์ เช่นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตและแอมโมเนียมอะซิเตต สำหรับปริมาณไบคาร์บอเนตที่เหมาะสมควรมีค่าความเป็นด่างไม่ควรน้อยกว่า 1,000 มก./ล. ในเทอมของหินปูน ในกรณีที่ความเป็นด่างไม่พอเพียงควรเติมด่างเช่น โซดาไฟ ปูนขาวหรือ โซเดียมไบคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสารเคมีที่เหมาะสมที่สุดเพราะให้ไบคาร์บอเนตโดยตรง แต่มีข้อเสีย

คือมีราคาแพง นอกจากนี้อาจใช้วิธีหมุนเวียนน้ำที่บางส่วนเข้าระบบเพื่อนำสภาพความเป็นด่างในน้ำที่กลับเข้าระบบอีกครั้ง

- สารพิษและสารยับยั้งปฏิกิริยา

ควรควบคุมไม่ให้เกิดสารพิษหรือสารที่ออกฤทธิ์ยับยั้งปฏิกิริยาขึ้นในระบบไร้อากาศ เนื่องจากจะส่งผลกระทบต่อหรือยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรดและแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน โดยสารยับยั้งปฏิกิริยามีหลายกลุ่มได้แก่ อีออนบวก โลหะหนัก และแอมโมเนีย ซึ่งถ้ามีเพียงเล็กน้อยก็ไม่ใช่ปัญหา โดยช่วงค่าที่อีออนบวกอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของปฏิกิริยาแบบไร้อากาศแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นของอีออนบวกที่กระตุ้นและยับยั้งปฏิกิริยาแบบไร้อากาศ

ชนิดของอีออนบวก	ความเข้มข้น (มก./ล.)		
	กระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งมาก
Na ⁺	100 - 200	3,500 - 5,500	> 8,000
K ⁺	200 - 400	2,500 - 4,500	> 12,000
Ca ²⁺	100 - 200	2,500 - 4,500	> 8,000
Mg ²⁺	75 - 150	1,000 - 1,500	> 3,000

(ที่มา : McCarty, 1964)

ส่วนสารพิษกลุ่มโลหะหนักต่างๆ เช่น แคดเมียม เหล็ก นิกเกิล และอื่นๆ มีช่วงค่าที่มีผลต่อแบคทีเรียแบบไร้อากาศแสดงในตารางที่ 2.3 ทั้งนี้โลหะหนักบางส่วนจะตกตะกอนเป็นโลหะซัลไฟด์ทำให้ลดความเป็นพิษลงได้

ตารางที่ 2.3 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่จะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียแบบไร้อากาศ

โลหะหนัก	ความเข้มข้น (มก./ล.)
Arsenic (As)	0.5 - 1.0
Cadmium (Cd)	0.01 - 0.02
Chromium (Cr ⁶⁺)	1.0 - 1.5
Copper (Cu)	0.5 - 1.0
Nickel (Ni)	1.0 - 2.0
Zinc (Zn)	0.5 - 1.0

(ที่มา : Mignone, 2005)

แอมโมเนียเป็นอีกสารหนึ่งซึ่งสามารถเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ แอมโมเนียเกิดขึ้นจากการย่อยสลายโปรตีนโดยในขณะโปรตีนสลายตัว ในโตรเจนจะถูกปล่อยออกมาในรูปแอมโมเนีย รูปของแอมโมเนียจะเป็นแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) หรือแอมโมเนียอิสระละลาย (NH_3) ขึ้นอยู่กับพีเอชของระบบ ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะเพิ่มขึ้นถ้าพีเอชมีค่าสูง ซึ่งแอมโมเนียจะมีความเป็นพิษมากกว่าแอมโมเนียมไอออน โดยที่ผลของแอมโมเนียในโตรเจนที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ผลของแอมโมเนียในโตรเจนที่มีต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ

แอมโมเนียในโตรเจน (มก./ล.)	ผลต่อระบบ
50 - 200	ปริมาณพอเหมาะ
200 - 1,000	ยังไม่เกิดผลชัด
1,500 - 3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อมีค่าพีเอชสูง
> 3,000	เป็นพิษโดยตรง

(ที่มา : McCarty, 1964)

- ศักยภาพการให้และรับอิเล็กตรอน (ORP)

ใช้บอกแนวโน้มในการให้และรับอิเล็กตรอนของน้ำเสีย ซึ่งค่าโออาร์พีสูงแสดงว่ามีแนวโน้มในการรับอิเล็กตรอน ส่วนถ้าค่าโออาร์พีต่ำแสดงว่ามีแนวโน้มในการให้อิเล็กตรอน ซึ่งค่าโออาร์พีควรมีค่า เป็นลบโดยปกติควรมีน้อยกว่า -300 มิลลิโวลต์

- ธาตุอาหาร

ควรควบคุมค่าสัดส่วน BOD : N : P ไว้ที่ 100 : 1.1 : 0.2 หรือ COD : N : P เท่ากับ 150 : 1.1 : 0.2 และต้องมีการเติมธาตุโลหะและธาตุอาหารอื่นๆ ที่จำเป็นตามความเหมาะสม

- ระยะเวลาพักพักกลศาสตร์ (HRT) และเวลาพักของแข็งหรืออายุตะกอน (SRT)

ระยะเวลาพักกลศาสตร์ต้องสูงพอเพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ทันและต้องเก็บสลัดจ์ไว้ในระบบให้ได้ (SRT ควรมากกว่า HRT)

2.6 ข้อดีและข้อเสียของกระบวนการไร้อากาศ

ระบบบำบัดแบบไร้อากาศเหมาะสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีความสกปรกมากๆ นั่นคือมีค่าบีโอดี หรือซีโอดีสูงๆ และเนื่องจากจุลชีพในระบบส่วนใหญ่เป็นกลุ่มที่ชอบออกหมุมิปานกลางจึงเหมาะกับการนำมาใช้บำบัดน้ำเสียในประเทศเขตร้อน ทำให้ไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการเดินระบบเหมือนระบบใช้อากาศที่ต้องใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อเติมอากาศ นอกจากนี้ยังได้มีเทนเป็นเชื้อเพลิงทดแทนอีกด้วย โดยตารางที่ 2.5 แสดงข้อมูลโดยสรุปของการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

ตารางที่ 2.5 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ประหยัดพลังงานและไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเติมอากาศ	1. เป็นกระบวนการที่ใช้เวลานาน โดยเฉพาะช่วงเริ่มต้นกระบวนการเนื่องจากจุลชีพโตช้า และใช้เวลาในการปรับตัวนาน
2. มีการสร้างเซลล์จุลชีพต่ำกว่ากระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศประมาณ 3-20 เท่า	2. เป็นกระบวนการที่ล้มเหลวได้ง่ายเนื่องจากอ่อนไหวต่อสารพิษต่างๆ ที่อาจเกิดขึ้นได้ในระบบไร้อากาศ
3. ได้ก๊าซมีเทนเป็นผลผลิตซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ได้ เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิง	3. ต้องการผู้ควบคุมระบบที่มีความรู้และมีประสบการณ์ในการดำเนินการ
4. ต้องการไนโตรเจนและฟอสฟอรัสน้อย	4. การดำเนินการและการดูแลรักษาต้องกระทำอย่างสม่ำเสมอ
5. เหมาะสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูงๆ	5. อาจลงทุนสูงสำหรับน้ำเสียที่มีความสกปรกน้อย
6. กากที่ได้จากการหมักนำไปใช้เป็นปุ๋ยได้	6. หากระบบล้มเหลวอาจส่งกลิ่นเหม็นได้
7. กำจัดกลิ่นและแมลงวันรบกวนในฟาร์มลงได้	7. ต้องควบคุมพีเอชให้ดี
8. ลดปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ได้	8. ต้องการพีเอชบัฟเฟอร์มาก

2.7 พลังงานทดแทน

พลังงานทดแทน หมายถึง พลังงานที่นำมาใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิง สามารถแบ่งตามแหล่งที่ได้มาเป็น 2 ประเภทคือพลังงานทดแทนจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป อาจเรียกว่า พลังงานสิ้นเปลือง ได้แก่ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ นิวเคลียร์ หินน้ำมัน และทรายน้ำมัน เป็นต้น และพลังงานทดแทนอีกประเภทหนึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วสามารถหมุนเวียนมาใช้ได้อีก เรียกว่า พลังงานหมุนเวียน ได้แก่ แสงอาทิตย์ ลม ชีวมวล น้ำ ไฮโดรเจน และเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน : <http://www.dede.go.th/dede/index.php?id=35>) โดยในปัจจุบันประเทศไทยได้เริ่มมีการใช้พลังงานหมุนเวียนจากแหล่งต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 และพลังงานส่วนใหญ่เป็นพลังงานที่ได้จากการนำเข้าและเพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการนำเข้าพลังงาน จึงควรที่จะคิดค้นหาแหล่งพลังงานใหม่ที่เป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด และมีประสิทธิภาพที่สามารถนำมาใช้ในอนาคตเพื่อรองรับการขยายตัวทางเศรษฐกิจในทุกภาคส่วนของประเทศ โดยตารางที่ 2.7 แสดงการนำเข้าพลังงานที่ส่วนใหญ่มีปริมาณมากกว่าพลังงานที่ส่งออก

ตารางที่ 2.6 การใช้พลังงานหมุนเวียนจำแนกตามประเภทพลังงานและสาขาเศรษฐกิจ พ.ศ. 2547

ประเภทพลังงานหมุนเวียน	สาขาเศรษฐกิจ							Renewable energy type
	เกษตรกรรม	เหมืองแร่	อุตสาหกรรมการผลิต	การก่อสร้าง	บ้านอยู่อาศัย	ธุรกิจการค้า	การขนส่ง	
เชื้อเพลิงชีวภาพของเหลว	-	-	-	-	-	-	45.0	LIQUID BIOFUELS
ก๊าซชีวภาพ	0.4	-	21.7	-	-	0.4	-	BIOGAS
พลังงานชีวมวลของแข็ง	-	-	4869.0	-	5647.0	-	-	SOLID BIOMAS ENERGY
พลังงานความร้อนใต้พิภพ	-	-	-	-	-	-	-	GEOHERMAL ENERGY
พลังงานน้ำ	-	-	-	-	-	-	-	HYDRO ENERGY
พลังงานแสงอาทิตย์เชิงไฟฟ้า	-	-	-	-	0.4	0.5	-	PHOTO VALTAIC
พลังงานแสงอาทิตย์เชิงความร้อน	-	-	-	-	-	0.2	-	SOLAR REDIATION
พลังงานคลื่นน้ำขึ้น น้ำลง	-	-	-	-	-	-	-	WAVE/TIDAL ENERGY
พลังงานลม	-	-	-	-	-	-	-	WIND ENERGY

(ที่มา : รายงานพลังงานของประเทศไทย ปี 2547 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวง

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

ตารางที่ 2.7 ปริมาณการนำเข้าและส่งออกพลังงานจำแนกตามประเภทพลังงานและปีกิจกรรม

ประเภทพลังงาน	หน่วย	ปริมาณพลังงานนำเข้า			ปริมาณพลังงานส่งออก		
		2545	2546	2547	2545	2546	2547
พลังงานปรุภูมิ							
ถ่านหิน	พันตัน	5,596	7,107	7,536	-	-	-
หินน้ำมันและทรายน้ำมัน	ตัน	-	-	-	-	-	-
พลังงานชีวมวลของแข็ง							
ฟืน	ตัน	83	337	581	232	32	0
ถ่านไม้	ตัน	14,539	2,471	33,910	3,864	4,776	5,125
แกลบ	ตัน	22	21	61	230	97	12
เชื้อเพลิงชีวภาพของเหลว							
เอทานอล	พันลิตร	3,858	15,160	5,315	106,072	66,721	87,555
น้ำมันปาล์ม	ตัน	26,606	42,161	106,904	173,689	223,897	254,847
น้ำมันมะพร้าว	ตัน	72	90	47	1,612	1,800	3,529
ก๊าซชีวภาพ	ล้านลบ.ม.	-	-	-	-	-	-
พลังงานนิวเคลียร์	ตัน	-	-	-	-	-	-
ก๊าซธรรมชาติ	ล้านลบ.ฟุต	263,120	285,125	309,587	-	-	-
ก๊าซมีเทนจากเหมืองถ่านหิน	ล้านลบ.ฟุต	-	-	-	-	-	-
พลังงานไฮโดรเจน	ล้านลบ.ฟุต	4	94	NA	1.2	-	NA
พลังงานลม	เมกะวัตต์	-	-	-	-	-	-
พลังงานคลื่น	เมกะวัตต์	-	-	-	-	-	-
พลังงานน้ำขึ้น น้ำลง	เมกะวัตต์	-	-	-	-	-	-
พลังงานแสงอาทิตย์	เมกะวัตต์	-	-	-	-	-	-
พลังงานแสงอาทิตย์เพื่อไฟฟ้า	เมกะวัตต์	-	-	-	-	-	-
พลังงานความร้อนใต้พิภพ	เมกะวัตต์	-	-	-	-	-	-
พลังงานทุติยภูมิ							
ไฟฟ้า (พลังงานน้ำ)	ชั่วโมง	2,812	2,479	3,388	273	296	372

NA : ไม่มีการตรวจวัด

(ที่มา : กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน :

<http://www.dede.go.th/dede/fileadmin/usr/wpd/static/alter-energy47/37table27.pdf>)

2.8 ประวัติของเซลล์เชื้อเพลิง (สุภาภรณ์ ศุภวิทยานันท์, 2551)

เซลล์เชื้อเพลิงถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวสวิสชื่อ คริสเตียน เฟรดริช ซอนเบียร์ (Christian Friedrich Schönbein) ในปี ค.ศ. 1838 และตีพิมพ์ในเดือนมกราคมปีถัดมาในหนังสือ "Philosophical Magazine" เมื่ออาศัยหลักการจากบทความชิ้นนี้เซลล์เชื้อเพลิงได้ถูกสร้างขึ้นโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเวลส์ชื่อ เซอร์ วิลเลียม โกรฟ (Sir William Grove) ต้นแบบของเขาได้ตีพิมพ์ในปี 1843 จนกระทั่งในปี 1959 วิศวกรชาวอังกฤษชื่อ ฟรานซิส โทมัส เบคอน (Francis Thomas Bacon) ได้สร้างเซลล์เชื้อเพลิงขนาด 5 กิโลวัตต์ได้สำเร็จและในปีเดียวกันนี้เองที่กลุ่มวิจัยที่นำโดย แฮร์รี่ ไอฮ์ริง (Harry Irlig) ได้ผลิตแทรกเตอร์ขนาด 15 กิโลวัตต์ที่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงให้กับบรรณาธิการ Allis-Chalmers ได้สำเร็จ ซึ่งผลงานของเขาได้ถูกนำไปแสดงทั่วสหรัฐอเมริกา ระบบนี้ใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ไฮโดรเจนอัดและก๊าซออกซิเจนเป็นสารตั้งต้น ในปีเดียวกันนี้เองที่ Bacon และทีมงานได้สร้างเครื่องผลิตไฟฟ้าขนาด 5 กิโลวัตต์ที่ใช้งานได้จริงสำหรับเรือเชื่อม ซึ่งนำไปสู่สิทธิบัตรของ Bacon ในช่วง 1960s ซึ่งหลักการเดียวกันนี้ก็ถูกนำไปใช้ในโครงการอวกาศของสหรัฐอเมริกาด้วยเพื่อผลิตน้ำดื่มและพลังงาน ในระยะแรกต้นทุนของเซลล์เชื้อเพลิงในช่วงต้นนี้ยังสูงอยู่มากเพราะมีค่าวัสดุที่แพงมากๆ นอกจากนี้ยังทำงานในอุณหภูมิที่สูงมากจนเป็นปัญหาในการประยุกต์ใช้ แต่อย่างไรก็ตามเซลล์เชื้อเพลิงยังดูเป็นตัวเลือกที่ดีเนื่องจากเป็นเชื้อเพลิงที่หาง่าย (ไฮโดรเจนและออกซิเจน) และการใช้งานที่สะอาด

การพัฒนาต่อไปในช่วงปี 1980s และ 1990s โดยเจฟฟรีย์ บาลลาด (Geoffrey Ballard) เจ้าของบริษัทเซลล์เชื้อเพลิงในประเทศแคนาดาที่โด่งดังของบริษัท Ballard Power Systems Inc. นำมาซึ่งการใช้เนฟฟออน (Nafion) ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกลงและทนทานเพื่อเป็นอิเล็กโทรไลต์ ลดการใช้แพลตทินัม ทำให้อายุการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิงสำหรับผู้บริโภคมีความเป็นไปได้มากขึ้น เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์

2.9 หลักการพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell) เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีอย่างหนึ่งคล้ายกับแบตเตอรี่ แต่แตกต่างกันที่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นออกแบบมาให้มีการเติมสารตั้งต้นเข้าสู่ระบบตลอดเวลา คือการเติมไฮโดรเจนและออกซิเจนตลอดเวลา ซึ่งช่วยขจัดปัญหาความจุที่จำกัดของแบตเตอรี่ออกไป นอกจากนี้ที่ขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะเข้าทำปฏิกิริยาเมื่อมันถูกอัดประจุหรือคายประจุ ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและค่อนข้างเสถียร

สารตั้งต้นที่ใช้โดยทั่วไปในเซลล์เชื้อเพลิงได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนที่ด้านแอโนด และก๊าซออกซิเจนที่ด้านแคโทด (เซลล์ไฮโดรเจน) โดยปกติแล้วเมื่อมีสารตั้งต้นไหลเข้าสู่ระบบสาร

ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นก็จะไหลออกจากระบบไปด้วย ดังนั้นการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจึงดำเนินต่อไปได้เรื่อยๆ ครอบคลุมเท่าที่สามารถควบคุมการไหลได้

เซลล์เชื้อเพลิงมักจะถูกมองว่าเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการใช้พลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงและปราศจากมลพิษเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เชื้อเพลิง เช่น มีเทนและก๊าซธรรมชาติซึ่งทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ในขณะที่ผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันที่เกิดจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงคือน้ำ อย่างไรก็ตามยังมีความกังวลอยู่ในขั้นตอนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซึ่งใช้พลังงานมาก การผลิตไฮโดรเจนจำเป็นต้องใช้วัตถุดิบที่มีไฮโดรเจน เช่น น้ำ หรือเชื้อเพลิงอื่นๆ นอกจากนั้นยังต้องใช้ไฟฟ้าซึ่งก็ผลิตมาจากแหล่งพลังงานแบบดั้งเดิม ได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน หรือแม้แต่พลังงานนิวเคลียร์ ในขณะที่พลังงานทางเลือก เช่น ลมและพลังงานแสงอาทิตย์ก็อาจสามารถใช้ได้ แต่ราคาก็ยังสูงมากในปัจจุบัน ดังนั้นจึงยังไม่อาจกล่าวได้ว่าเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอิสระจากเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ จนกว่าจะสามารถหาวิธีการผลิตไฮโดรเจนปริมาณมากด้วยพลังงานทดแทนหรือพลังงานนิวเคลียร์ได้

2.10 เทคโนโลยีของเซลล์เชื้อเพลิง

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงไม่ได้ถูกจำกัดด้วยประสิทธิภาพในระบบของวัฏจักรการโน้ตซึ่งใช้กับระบบเครื่องยนต์ที่มีการสันดาป เนื่องจากเซลล์เชื้อเพลิงไม่ได้มีการทำงานเป็นวัฏจักรที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจึงสามารถมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าได้

ตัวอย่างของเซลล์เชื้อเพลิงแบบ Hydrogen/Oxygen Proton-Exchange Membrane หรือ Polymer Electrolyte (PEMFC) พอลิเมอร์ที่ให้โปรตอนผ่านได้จะแยกฝั่งแอโนดและแคโทดออกจากกัน โดยแต่ละด้านจะมีขั้วไฟฟ้าของตัวเอง ส่วนใหญ่แล้วจะเป็นแผ่นคาร์บอนเคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลตตินัม ในด้านของแอโนดไฮโดรเจนจะแพร่เข้าสู่ตัวเร่งปฏิกิริยาด้านแอโนดทำให้แตกตัวออกเป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน โปรตอนจะวิ่งผ่านเยื่อกั้นไปที่แคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนจะถูกบังคับให้วิ่งเข้าสู่วงจรไฟฟ้าภายนอก (ให้พลังงานออกมา) เพราะว่าเยื่อกั้นนั้นไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ ในด้านของตัวเร่งปฏิกิริยาที่แคโทด โมเลกุลของออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนซึ่งวิ่งมาจากแอโนดผ่านวงจรภายนอกและมาพบกับออกซิเจนและโปรตอนที่ด้านนี้กลายเป็นน้ำ ในตัวอย่างนี้ของเสียที่เกิดขึ้นคือไอน้ำหรือน้ำที่เป็นของเหลวเท่านั้นแม้ในสภาวะเยือกแข็งน้ำก็ต้องถูกกำจัดออกจากระบบ ประสิทธิภาพและอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิต่ำลงนอกจากนี้ปัญหาอีกอย่างหนึ่งได้แก่ ปัญหาความทนทานต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ของแอโนดซึ่งค่อนข้างจำกัด

ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงคือไม่สามารถเก็บพลังงานได้เหมือนกับแบตเตอรี่ แต่ในบางสถานการณ์ มันสามารถทำงานร่วมกับ Electrolyzer และระบบเก็บสะสมพลังงานเพื่อเก็บพลังงานไว้ได้

นอกจากไฮโดรเจนบริสุทธิ์ นักวิจัยยังได้ใช้เชื้อเพลิงที่มีไฮโดรเจนประเภทอื่น เช่น ดีเซล เมทานอล และสารเคมีที่เก็บไฮโดรเจนได้ เช่น โลหะบางชนิด

เซลล์เชื้อเพลิงโดยทั่วไปสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ถึงราว 50 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพนี้ขึ้นอยู่กับกระแสที่ไหลผ่านเซลล์ ยิ่งกระแสถูกดึงไปมากประสิทธิภาพก็ลดลงมาก

รูปแบบการใช้งานอีกอย่างหนึ่งในประเทศที่อากาศหนาวเย็น คือ การใช้เซลล์เชื้อเพลิงให้พลังงานไฟฟ้าและความร้อนไปพร้อมกัน ในระบบนี้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าไม่จำเป็นต้องสูงมากนัก ปกติแล้วอยู่ที่ 15-20 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากความร้อนก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ความร้อนบางส่วนสูญเสียไปกับก๊าซที่ปล่อยออกจากระบบ เช่นเดียวกับระบบที่มีการเผาไหม้ทั่วไป

2.11 การออกแบบเซลล์เชื้อเพลิง

การจัดการน้ำเป็นปัญหาสำคัญใน Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs) ซึ่งเยื่อกันต้องชุ่มน้ำอยู่ตลอดเวลาทำให้น้ำที่ระเหยออกไปต้องเท่ากับน้ำที่ผลิตขึ้นมา ถ้าน้ำระเหยเร็วเกินไป น้ำจะแห้งจากเยื่อกันและทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและเยื่อกันจะแตกออกทำให้เกิดการลัดวงจรของก๊าซ ซึ่งไฮโดรเจนและออกซิเจนจะรวมกันโดยตรงทำให้เกิดความร้อนสูงทำลายเซลล์ไปได้ แต่ถ้าน้ำระเหยออกช้าเกินไปขั้วไฟฟ้าจะถูกน้ำท่วมทำให้สารตั้งต้นไม่อาจเข้าทำปฏิกิริยากับตัวเร่งได้และทำให้ประสิทธิภาพสิ้นสุด

ปัจจัยอื่นๆ ก็มีความสำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิตลอดทั้งเซลล์ ซึ่งบางครั้งอาจเปลี่ยนแปลงและทำลายเซลล์ได้ สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ในลำดับต่างๆ ของเซลล์แต่ละชนิด การเลือกวัสดุต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่างประกอบกัน นอกจากนี้สำหรับเซลล์บางประเภทจะเน้นที่ความทนทานและอายุการใช้งาน ในขณะที่บางประเภทจะเน้นที่พลังงาน

2.12 การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงมีประโยชน์อย่างยิ่งในการใช้งานในที่ห่างไกล เช่น ในยานอวกาศ สถานีตรวจอากาศที่ห่างไกล สวนสาธารณะขนาดใหญ่ ชนบท และการประยุกต์ใช้ทางการทหาร เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนสามารถมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหว

การประยุกต์ใช้ในอาคารอันใกล้นี้ซึ่งจะเป็นระบบไฟฟ้าและพลังงานความร้อน Combined Heat and Power (CHP) สำหรับอาคารสำนักงานและโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งระบบนี้จะ

ผลิตไฟฟ้าในอัตราที่คงที่ สามารถขายไฟฟ้าคืนสู่ระบบส่งได้เมื่อไม่ใช้งาน นอกจากนี้ยังผลิตอากาศอุ่นได้เป็นผลพวงมาจากความร้อนที่สูญเสียออกมาระหว่างการทำงาน Phosphoric-Acid Fuel Cells (PAFC) เป็นระบบที่ใช้กันมากสำหรับการผลิตไฟฟ้าและให้ความร้อนร่วมกัน ซึ่งประสิทธิภาพรวมสูงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ (45-50 เปอร์เซ็นต์ เป็นพลังงานไฟฟ้า ส่วนที่เหลือเป็นพลังงานความร้อน) นอกจากนี้ยังมีการใช้งาน Molten-Carbonate Fuel Cells ในรูปแบบนี้ด้วยบ้าง รวมไปถึงการใช้งาน Solid-Oxide Fuel Cell ในขั้นทดลอง

2.13 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกันหลายประเภทโดยแบ่งตามชนิดของสารอิเล็กโทรไลต์ที่นำมาใช้ได้แก่

1. เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cell ; AFC)
2. เซลล์เชื้อเพลิงแบบฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cell ; PAFC)
3. เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cell ; MCFC)
4. เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็ง (Solid Oxide Fuel Cell ; SOFC)
5. เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell ; PEMFC) หรือเซลล์เชื้อเพลิงแบบโพลีเมอร์ของแข็ง (Solid Polymer Fuel Cell ; SPFC)

โดยตารางที่ 2.8 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียและสรุปการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงทั้ง 5 ประเภท

ตารางที่ 2.8 สรุปการใช้งานของเซลล์เชื้อเพลิงแต่ละประเภท

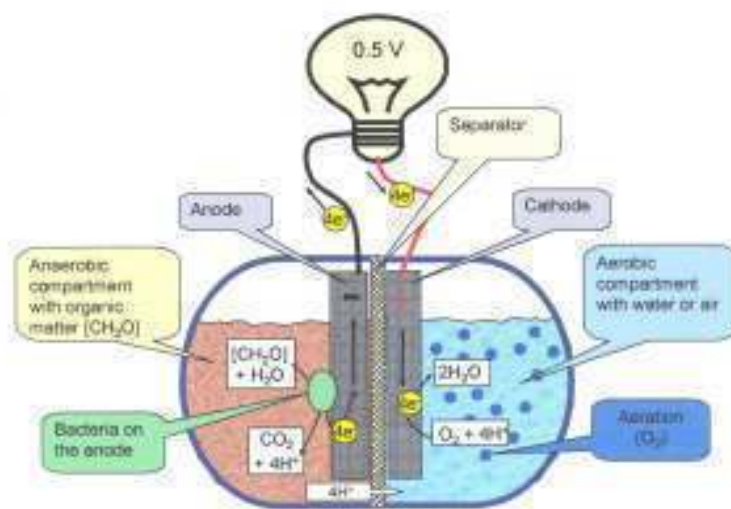
ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิง	อิเล็กโทรไลต์	ทำงานที่อุณหภูมิ (°C)	การประยุกต์ใช้งาน	ข้อดี	ข้อเสีย
อัลคาไลน์	โพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์ (KOH)	90 - 100	- การขนส่ง - การทหาร - ยานอวกาศ - เรือดำน้ำ	- ปฏิกิริยาที่แอโนดเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว	ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นผลิตภัณฑ์
กรดฟอสฟอริก	กรดฟอสฟอริก (H ₃ PO ₄)	175 - 200	- การขนส่ง - โรงไฟฟ้าแบบความร้อนร่วม	- ประสิทธิภาพ 85% - ใช้ไฮโดรเจนที่มีสิ่งเจือปนเป็นเชื้อเพลิงได้	- ใช้แพลตตินัมซึ่งมีราคาแพงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา - ให้กระแสไฟฟ้าน้อย - มีขนาดใหญ่
คาร์บอนเนตหลอมเหลว	โซเดียมคาร์บอเนต (Na ₂ CO ₃)	600 - 800	- โรงไฟฟ้าแบบความร้อนร่วม	- ประสิทธิภาพสูง - ปรับชนิดของเชื้อเพลิงได้หลายแบบ	ใช้อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการสึกกร่อนและสารประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงเสียไป
ออกไซด์แข็ง	เซอร์โคเนียมออกไซด์ (ZrO ₂)	600 - 1000	- โรงไฟฟ้าแบบความร้อนร่วม	- ประสิทธิภาพสูง - ตัวเร่งปฏิกิริยาราคาถูก	ใช้อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการสึกกร่อนและสารประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงเสียไป
เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน	โพลีเมอร์	60-80	- การขนส่ง - ยานพาหนะ - โรงไฟฟ้า - อุปกรณ์ไฟฟ้าแบบพกพา	- ไม่ต้องใช้เวลาในการอุ่นเครื่อง - ใช้อุณหภูมิต่ำ - ไม่มีปัญหาการสึกกร่อนของอิเล็กโทรไลต์	ไวต่อเชื้อเพลิงที่มีสิ่งปนเปื้อน

(ที่มา : มหาวิทยาลัยมหิดล, 2549)

ต่อมาได้มีการพัฒนานำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียที่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตและปริมาณสารอินทรีย์สูง โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงนี้จะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าควบคู่ไปกับการบำบัดน้ำเสียได้ (Oh และ Logan, 2005) เซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวนี้คือ เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

2.14 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ (Microbial fuel cell ; MFC) (กันยรัตน์ โทละสุด และคณะ, 2550)

การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพอาศัยหลักการของการเปลี่ยนพลังงานเคมีในสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งเป็นการสร้างพลังงานไฟฟ้าจากกระบวนการย่อยสลาย หรือการเผาผลาญสารอินทรีย์ผ่านสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว โดยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะประกอบด้วยส่วนของขั้วแอโนดและขั้วแคโทด ในภาชนะที่บรรจุสารอินทรีย์ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ส่วนของขั้วลบจะเป็นส่วนที่ใช้น้ำเสียเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาของจุลชีพ ซึ่งจะเกิดการเผาผลาญอาหาร โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้น ซึ่งสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวจะดึงเอาพลังงานจากสารอินทรีย์มาใช้และปลดปล่อยอิเล็กตรอนและโปรตอนออกมา อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านขั้วลบโดยไหลผ่านสายไฟไปตามวงจรไฟฟ้าที่อยู่นอกเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพไปยังขั้วบวก แล้วก่อให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าซึ่งจะไหลจากขั้วบวกไปยังขั้วลบ (ไหลตรงข้ามกับอิเล็กตรอน) ส่วนโปรตอนจะถูกส่งถ่ายจากขั้วลบไปยังขั้วบวก ที่บริเวณขั้วบวกจะมีการเติมสารออกซิไดส์เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยทั่วไปจะใช้ออกซิเจนที่ได้จากการเติมอากาศหรือออกซิเจนที่มีอยู่ในบรรยากาศเข้าไปในส่วน of ขั้วแคโทดเพื่อมาคอยรับอิเล็กตรอนเพื่อไปรวมกับ โปรตอนและจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำขึ้นมา จะเห็นได้ว่าในกระบวนการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพนี้จะไม่มีการเผาไหม้เกิดขึ้นในปฏิกิริยา จึงไม่ก่อให้เกิดก๊าซที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมโดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้แทนแบตเตอรี่สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กได้ อีกทั้งยังเป็นการบำบัดน้ำเสียอีกด้วย สำหรับกรณีที่ใช้ในการชี้วัดคุณภาพน้ำที่สามารถติดตามผลได้ง่ายที่สุดคือค่าซีโอดีเนื่องจากใช้ระยะเวลาในการวิเคราะห์น้อยกว่าวิธีอื่น

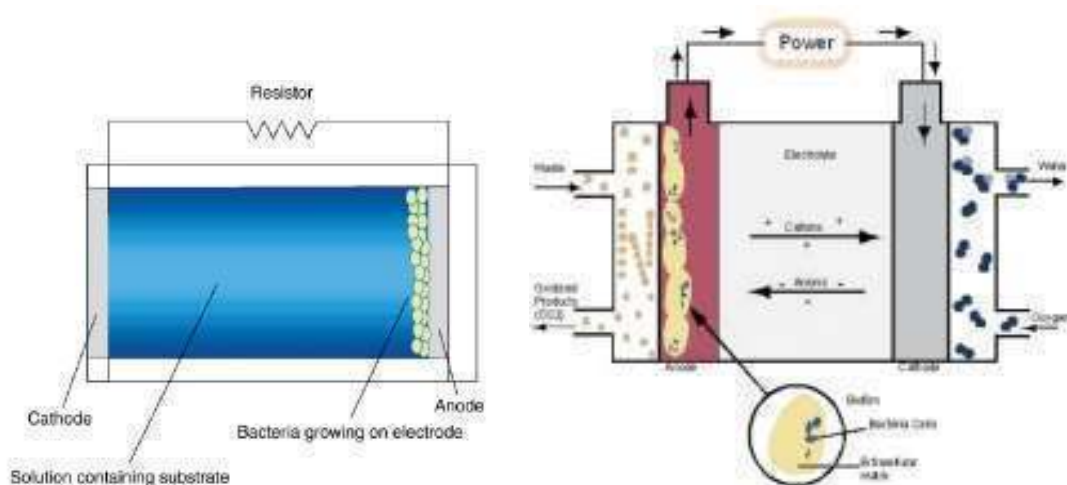


รูปที่ 2.4 ตัวอย่างหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

โดยทั่วไปแล้วเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบใช้เมมเบรน (Membrane Microbial Fuel Cell, MMFC) หรือแบบห้องคู่ (Two Chamber Microbial Fuel Cell, TCMFC) และเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบไม่ใช้เมมเบรน (Membrane-less Microbial Fuel Cell, MLMFC) หรือแบบห้องเดี่ยว (Single Chamber Microbial Fuel Cell, SCMFC)

ในระยะแรกเริ่มที่ได้มีการศึกษาการทำงานของ MMFC ส่วนใหญ่การวิจัยจะมีการใช้เมดิเอเตอร์ (Mediator) ทำหน้าที่ช่วยดึงอิเล็กตรอนออกจากเซลล์ของสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว เนื่องจากจุลชีพส่วนใหญ่จะไม่นำไฟฟ้า (Non-conductive nature) จึงทำให้อิเล็กตรอนในโซ่ขนถ่ายอิเล็กตรอน (Electron transport chain) ไม่สามารถเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ไปให้ขั้วไฟฟ้าได้ แต่จากการศึกษาต่อมาได้พบข้อเสียของเมดิเอเตอร์ คือเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียว จึงทำให้มีการศึกษาค้นคว้าหาเชื้อจุลชีพที่สามารถส่งถ่ายอิเล็กตรอนด้วยตนเองได้ (Kim และคณะ, 2002) และพบว่ามีแบคทีเรียบางชนิดที่สามารถส่งถ่ายอิเล็กตรอนได้ด้วยตัวเองได้แก่ แบคทีเรียสายพันธุ์ *Shewanella putrefaciens* แบคทีเรียตระกูล Geobacteraceae ที่พบในใต้ทะเลและแบคทีเรียสายพันธุ์ *Aeromonas hydrophila* รวมทั้งเชื้อจุลชีพอีกหลายชนิดที่ได้จากการเพิ่มจำนวนเชื้อ (Enrichment) จากน้ำเสียภายใต้สภาวะไร้อากาศ เนื่องจากที่ผิวของเชื้อเหล่านี้จะมีไซโตโครม (Cytochrome) อยู่ที่ผนังเซลล์ด้านนอกจำนวนมาก ซึ่งไซโตโครมมีความสำคัญในการช่วยให้เกิดการส่งถ่ายอิเล็กตรอนจากเซลล์ของเชื้อจุลชีพไปที่ขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยตัวอย่างแสดงกลไกการส่งถ่ายอิเล็กตรอนของจุลชีพแสดงดังรูปที่ 2.5

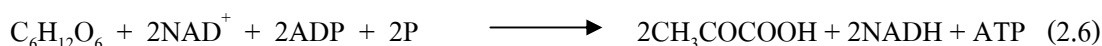
หลังจากที่ได้มีการค้นพบเชื้อจุลชีพที่สามารถส่งถ่ายอิเล็กตรอนโดยไม่ใช้เมดิเอเตอร์แล้ว นักวิจัยยังได้พยายามสร้าง MLMFC เนื่องจากในปัจจุบันเมมเบรนยังมีราคาสูงมาก และมีปัญหาเรื่องความแข็งแรงเมื่อมีขนาดใหญ่ จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาในเรื่องของการศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าของจุลชีพแบบไม่ใช้เมมเบรนและไม่ใช้เมดิเอเตอร์ โดยที่ได้มีการศึกษาทดลองสร้าง MLMFC ในห้องปฏิบัติการโดยการสร้างคอตัมน์หรือเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่มีการแบ่งชั้นเป็นส่วนของขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งใช้ระยะห่างระหว่างขั้วที่เหมาะสมเป็นตัวแทนทำให้ไม่ต้องใช้เมมเบรน พร้อมทั้งศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยในส่วนของขั้วลบจะมีการเติมเชื้อจุลชีพที่ได้จากการเพิ่มจำนวนเชื้อจากน้ำเสียภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Lorenzo และคณะ, 2009)



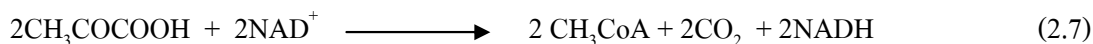
รูปที่ 2.5 ตัวอย่างกลไกการเกิดกระแสไฟฟ้าโดยการส่งผ่านอิเล็กตรอนของจุลชีพในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

2.14.1 การเกิดอิเล็กตรอนและโปรตอนจากการย่อยสลายกลูโคส (มันสิน ตันฑุลเวศม์, 2542 และ Shukla และคณะ, 2004)

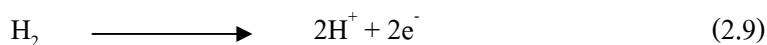
โดยทั่วไปแบคทีเรียจะดูดซึมกลูโคสเข้าไปย่อยสลายภายในเซลล์ภายใต้วิถีทางชีวเคมีแบบ EMP (Embden-Meyerhof Pathway) โดยกลูโคสจะถูกออกซิไดซ์กลายเป็นกรดไพรูวิก ดังสมการ



และกรดไพรูวิกที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์ต่อกลายเป็นอะเซทิล โคเอ (CH₃CoA)



NAD (Nicotinamide Adenine Dinucleotide) จะถูกใช้เป็นพาหะของอิเล็กตรอนและไฮโดรเจน ทำให้เกิด NADH เนื่องจาก NAD⁺ มีอย่างจำกัด จึงต้องมีการปลดปล่อย H⁺ ออกจาก NADH ให้กลายเป็น NAD⁺ ใหม่เพื่อให้มีพาหะสำหรับขนส่งอิเล็กตรอนตลอดไป โดยปฏิกิริยาฟอสโฟรีลาคชันของ NAD⁺ เกิดขึ้นได้ดังสมการ



อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านไปที่ขั้วแอโนดโดยมีตัวพาอิเล็กตรอน (Mediator) หรือไม่มีก็ได้ ส่วนโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเมมเบรนข้ามไปที่ขั้วแคโทด เมื่อรวมกับอิเล็กตรอนและออกซิเจน จะทำให้เกิดเป็นโมเลกุลของน้ำ

2.14.2 วิถีเมตาบอลิซึมและโซ่ขนส่งอิเล็กตรอน (Logan, 2008)

เซลล์ของสิ่งมีชีวิตทั้งสัตว์ พืชและจุลชีพหลายชนิดได้รับพลังงานจากการออกซิโดซีสสารประกอบอินทรีย์ต่างๆ ที่อยู่ในสภาพถูกรีดิวซ์ เช่น คาร์โบไฮเดรตและไขมัน (บางครั้งอาจจะเป็นโปรตีน) ซึ่งเซลล์อาจได้รับพลังงานจากภายนอกเข้าไปหรือที่เซลล์ได้เก็บสะสมไว้ภายในเซลล์ ในขณะที่เกิดการออกซิเดชัน อิเล็กตรอนจะถูกส่งจากสารประกอบดังกล่าวไปตามตัวขนส่งอิเล็กตรอนหลายชนิดที่เรียงตัวติดต่อกันเป็นลำดับเกิดเป็นโซ่ขนส่งอิเล็กตรอนหรือโซ่การหายใจ (Electron transport chain หรือ Respiratory chain) สำหรับตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายนั้นส่วนใหญ่มักจะเป็นโมเลกุลของออกซิเจน แต่ในจุลชีพบางชนิดตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายอาจจะเป็นสารประกอบอินทรีย์ เช่น ฟิวมาเรต หรือเป็นสารประกอบอนินทรีย์ เช่น ไนเตรต ซัลเฟต และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น โดยในขณะที่มีการขนส่งอิเล็กตรอนไปตามโซ่ขนส่งอิเล็กตรอนจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานเหล่านี้จะถูกอนุรักษ์ไว้และนำไปใช้ในการสังเคราะห์ ATP จาก ADP และ P_i ซึ่งวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นเป็นวิธีการสำคัญที่สิ่งมีชีวิตชนิดที่ไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้จะได้รับพลังงานเพื่อนำไปใช้ผลักดันให้กระบวนการเชิงชีวภาพต่างๆ

โซ่ขนส่งอิเล็กตรอนในสิ่งมีชีวิตทุกชนิดจะมีความคล้ายคลึงกันอยู่หลายประการ ตัวอย่างเช่น ตัวขนส่งอิเล็กตรอนจะเรียงตัวอยู่ในเยื่อหุ้มเซลล์หรือองค์ประกอบของเซลล์เสมอ โดยในเซลล์ยูคาริโอตจะอยู่ที่เยื่อของไมโทคอนเดรียและคลอโรพลาสต์ ส่วนในโปรคาริโอตหรือจุลชีพจะเรียงตัวอยู่ที่เยื่อเซลล์และเยื่อของโครโมโซม ในการขนส่งอิเล็กตรอนของทุกระดับที่กล่าวมาขณะที่อิเล็กตรอนถูกส่งไปตามตัวขนส่งอยู่ในโซ่ขนส่งอิเล็กตรอน พร้อมกันนี้จะมีการปล่อยพลังงานออกมา ซึ่งเซลล์จะมีกลไกที่ทำให้สามารถนำพลังงานนี้ไปสร้าง ATP ได้ (พัชรา วีระกะลัส, 2549)

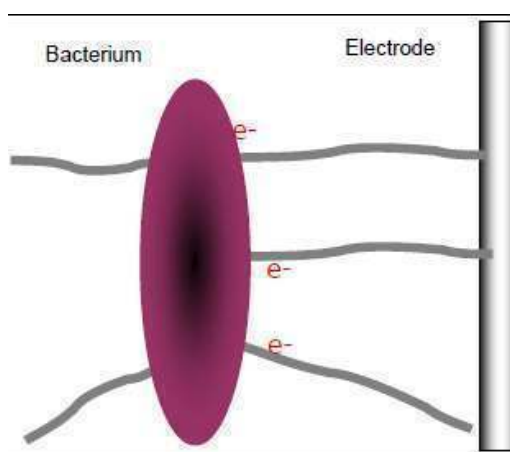
สำหรับกระบวนการเมตาบอลิซึมเป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ที่มีชีวิตประกอบด้วย 2 กระบวนการ ได้แก่ แอนาบอลิซึม (Anabolism) ซึ่งเป็นการสร้างสารโมเลกุลใหญ่จากสารที่ได้จากการย่อยสลาย เป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานเข้าช่วยเพื่อให้มีผลในการสร้างส่วนต่างๆ ของเซลล์ ทำให้เซลล์เจริญเติบโต อีกกระบวนการหนึ่งคือ แคทาบอลิซึม (Catabolism) เป็นการย่อยสลายสารอาหารโมเลกุลใหญ่ให้เล็กลง เพื่อเป็นวัตถุดิบในการสร้างส่วนต่างๆ ของเซลล์ กระบวนการนี้จะได้พลังงานเกิดขึ้นโดยผ่านการหายใจ ซึ่งการหายใจเป็นการเปลี่ยนแปลง

แบบออกซิเดชัน-รีดักชันภายในเซลล์ เพื่อให้สารโมเลกุลใหญ่เปลี่ยนเป็นสารโมเลกุลเล็กและได้พลังงานออกมา การหายใจแบ่งเป็น 3 แบบ คือ

- 1) การหายใจแบบใช้ออกซิเจนอิสระ (Aerobic respiration) คือ การใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอนทำให้ได้น้ำเกิดขึ้น
- 2) การหายใจแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic respiration) คือ การหายใจที่ใช้สารอินทรีย์อื่นๆ เช่น ซัลเฟต ไนเตรต คาร์บอเนต เป็นตัวรับอิเล็กตรอน
- 3) กระบวนการหมัก (Fermentation) เป็นการสร้างพลังงานโดยใช้สารอินทรีย์เป็นทั้งตัวรับและให้อิเล็กตรอน ทำให้ได้ผลผลิตหลายชนิด เช่น กรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ

2.14.3 การส่งผ่านอิเล็กตรอนของจุลชีพ

จุลชีพที่สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนออกสู่ภายนอกเซลล์ด้วยตนเองได้จะมีโครงสร้างที่สามารถนำไฟฟ้าได้ (Logan, 2008) ซึ่งเรียกว่า “microbial nanowires” โดยโครงสร้างนี้จะมีอยู่ในจุลชีพบางชนิด เช่น *Geobacter* และ *Shewanella* ซึ่งจุลชีพดังกล่าวสามารถสร้างฟิล์มเกาะติดกับผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดได้ (Lu และคณะ, 2009) และยังสามารถอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่ไม่มีอากาศได้ เมื่อจุลชีพชนิดนี้มาอยู่รวมกันเป็นกลุ่มๆ แล้วจะเกิดการสังเคราะห์เส้นลวดนาโน (Nanowire) ขึ้นมา ซึ่งลักษณะของเส้นลวดนาโนนั้นมีขนาดความกว้าง 3-5 นาโนเมตร (เล็กกว่าเส้นผมมนุษย์ถึง 20,000 เท่า) แต่มีความทนทานและมีความยาวมากกว่า 1,000 เท่าของความกว้าง ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้ โดยจะช่วยให้เกิดการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากเซลล์จุลชีพไปยังขั้วไฟฟ้าแอโนดที่อยู่ในเซลล์เชื้อเพลิง จุลชีพดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การส่งผ่านของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่บนเส้นลวดนาโนไปยังขั้วไฟฟ้าแอโนด

2.14.4 การเกิดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ (Moon และคณะ, 2006)

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเกิดจากการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะสามารถเคลื่อนที่ได้ก็ต่อเมื่อบริเวณสองบริเวณมีความต่างศักย์ไม่เท่ากัน กล่าวคือ กระแสอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำไปยังบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า ถ้าศักย์ไฟฟ้าเท่ากันจะไม่มีกระแสไหลของกระแสอิเล็กตรอน ในขณะที่เกิดการไหลของกระแสอิเล็กตรอนจะมีการไหลของกระแสไฟฟ้าในทิศทางตรงข้ามกัน กระแสไฟฟ้าจะไหลจากบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงไปยังบริเวณที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่าเหมือนการไหลของน้ำ (Bard และ Faulkner, 1980) โดยการไหลของกระแสอิเล็กตรอนและกระแสไฟฟ้าจะไหลผ่านตัวนำที่เชื่อมระหว่างความต่างศักย์สองบริเวณที่ต่างกัน ซึ่งสามารถวัดออกมาในรูปของความต่างศักย์ไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยการต่อเชื่อมเครื่องมือวัดความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltmeter) คร่อมระหว่างจุด 2 จุดที่ต้องการวัดค่าความต่างศักย์ และนำมาหาปริมาณกำลังไฟฟ้าได้จากสูตร

$$P = IV \quad (2.10)$$

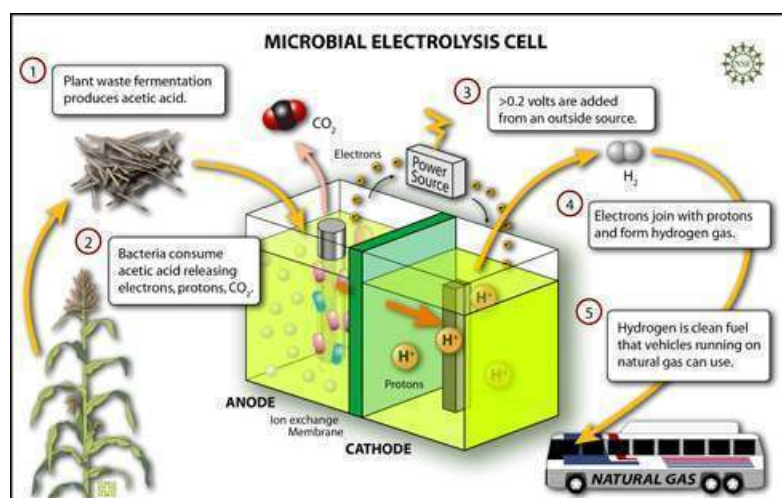
$$V = IR \quad (2.11)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์)

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ หรือ คูลอมป์/วินาที)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

R คือ ความต้านทานภายนอก (โอห์ม)



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างการเกิดกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพและการไปใช้ประโยชน์

2.14.5 ประสิทธิภาพเชิงกลออมปี (Logan, 2008)

กลออมปีเป็นหน่วยวัดปริมาณไฟฟ้าหน่วยหนึ่งของประจุไฟฟ้าซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

จากการที่จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียทำให้เกิดการส่งผ่านประจุไฟฟ้าหรืออิเล็กตรอนขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งประสิทธิภาพเชิงกลออมปีแสดงถึงอิเล็กตรอนที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นกระแสไฟฟ้าเมื่อคิดเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ โดยประสิทธิภาพเชิงกลออมปี (C_E) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$C_E = \frac{8I}{Fq\Delta COD} \quad (2.12)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น (แอมแปร์ หรือ กลออมปี/วินาที)

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ 96,500 (กลออมปี/โมล)

q คือ อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าระบบ (ลบ.ม./วินาที)

ΔCOD คือ ค่าซีโอดีที่เปลี่ยนแปลง (กรัม/ลิตร)

โดยที่ประสิทธิภาพเชิงกลออมปีคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้จากสมการที่ 2.13

$$C_E\% = \frac{8I}{Fq\Delta COD} \times 100 \quad (2.13)$$

2.14.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

อัตราการส่งถ่ายอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าแอโนดมายังขั้วไฟฟ้าแคโทดถ้ามีความสมดุลกันก็จะส่งผลทำให้กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้มีความต่อเนื่อง ถ้าพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ทำจากแกรไฟต์หรือคาร์บอนมีขนาดใหญ่จะทำให้มีพื้นที่ผิวในการเกาะติดของจุลชีพได้มากขึ้น (Scott และคณะ, 2007) ซึ่งจะส่งผลให้เกิดอัตราการส่งถ่ายอิเล็กตรอนได้สูงขึ้นและถ้าพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าแคโทดถ้ามีขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ที่สัมผัสกับออกซิเจนได้มากกว่าทำให้เกิดการออกซิไดซ์อิเล็กตรอนได้มากขึ้น ทำให้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้สูงขึ้น ซึ่งอัตราการเพิ่มการออกซิไดซ์ของออกซิเจนยังสามารถทำได้โดยการพัฒนาประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าแคโทดจากการพัฒนาวัสดุที่นำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้า (Sangeun และคณะ, 2004) โดยทำการเคลือบสารที่สามารถทำให้เกิดการออกซิไดซ์ของออกซิเจนมากขึ้นบนขั้วไฟฟ้าแคโทด เช่น แพลตทินัม (Jang และคณะ, 2004) ส่วนถ้าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแคโทดและขั้วไฟฟ้าแอโนดยิ่งใกล้กันมากขึ้นจะส่งผลต่อการส่งถ่ายโปรตอนเร็วขึ้นหรืออาจจะเกิดจากอัตราการส่งถ่ายโปรตอนสมดุลกับอัตราการส่งถ่าย

อิเล็กตรอนจึงทำให้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงขึ้น กล่าวคือ การเกิดกระแสไฟฟ้าจะมากหรือน้อยก็จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแคโทดและขั้วไฟฟ้าแอโนดด้วย (Liu และคณะ, 2008) ซึ่งระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจะแปรผกผันกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น โดยการที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดลดลงทำให้ค่าความต้านทานภายในลดลงซึ่งเป็นผลมาจากค่าความนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นโดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.14 (Bard และ Faulkner, 1980) และเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียสมดุลกับอัตราการป้อนน้ำเสียจะทำให้สามารถผลิตอิเล็กตรอนได้สูงขึ้นและมีความต่อเนื่อง ส่วนการใช้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างกันจะพบว่าอัตราการผลิตพลังงานจะสูงขึ้นตามอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ลดลง (Mohan และคณะ, 2008)

$$R = \frac{L}{C \times A} \quad (2.14)$$

เมื่อ R คือ ความต้านทานภายใน (โอห์ม)

L คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด (ซม.)

C คือ ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสีย (ซีเมนส์/ซม.)

A คือ พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดที่สัมผัสกับน้ำเสีย (ตร.ซม.)

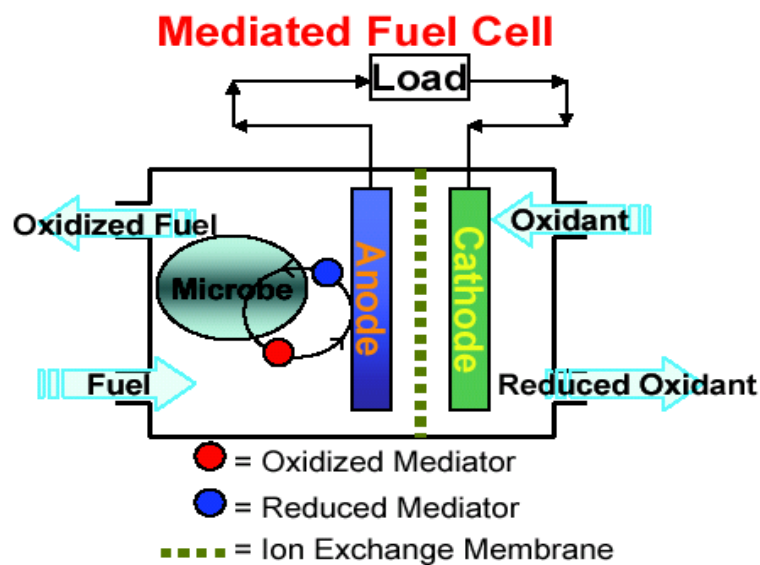
2.14.7 ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์

เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่แบ่งตามสารพาอิเล็กตรอนมี 2 ชนิด ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่มีสารพาอิเล็กตรอน และเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่ไม่มีสารพาอิเล็กตรอน

1.1 เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ที่มีสารพาอิเล็กตรอน (Mediator Microbial Fuel Cell)

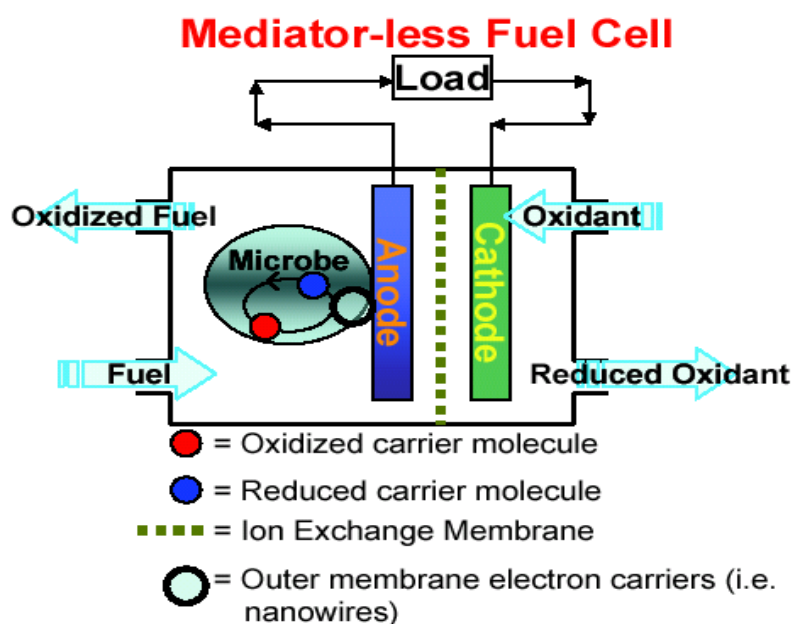
เซลล์เชื้อเพลิงแบบนี้ อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นเนื่องจากมีสารพาอิเล็กตรอนเป็นตัวนำไปส่งยังขั้วแอโนด (ดังแสดงในรูปที่ 2.8) เช่น Potassium ferric cyanide, Thionine, Methyl viologen (Methyl blue), Neutral red แต่สารพาอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะมีราคาแพงและมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรีย



รูปที่ 2.8 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่มีสารพาอิเล็กตรอน

1.2 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ไม่มีสารพาอิเล็กตรอน (*Mediator-less Microbial fuel cell*)

สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปที่ขั้วแอโนดได้ โดยอาศัยแบคทีเรียซึ่งมีบทบาทในการเป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบเป็นตัวพาอิเล็กตรอนไปที่ขั้วแคโทดโดยตรง (สุทธิพร, 2550) (ดังแสดงในรูปที่ 2.9) เช่น *Shewanella putrefaciens*, *Aeromonas hydrophila* และอื่น ๆ



รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ไม่มีสารพาอิเล็กตรอน

2. เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่แบ่งตามสารรับอิเล็กตรอนที่ขั้วแคโทดซึ่งสามารถจำแนกได้ออกเป็น เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว (Single chamber MFC) และเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่ (Two chamber MFC)

2.1 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว (Single chamber MFC)

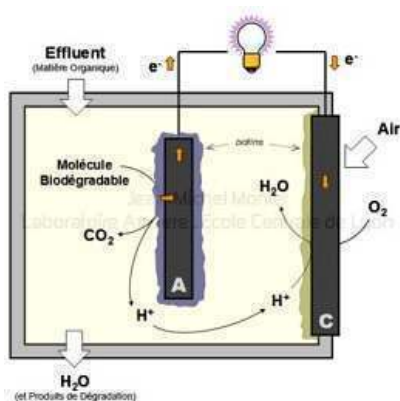
เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพประเภทนี้ จะประกอบด้วยส่วนที่ทำปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในภาชนะใบเดี่ยว ซึ่งบรรจุขั้วแอโนดและแคโทดรวมกันให้น้ำเสียท่วมทั้งสองขั้ว โดยเป็นแบบไม่ใช้เมมเบรน (Yoo และคณะ, 2009) ซึ่งบริเวณขั้วแอโนดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดอิเล็กตรอนขึ้น ส่วนบริเวณขั้วแคโทดจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยมีออกซิเจนจากอากาศผ่านเข้าไปเพื่อใช้เป็นสารรับอิเล็กตรอน (แสดงผังรูปที่ 2.10)

ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว ได้แก่

- ได้กระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้
- ความต้านทานภายในต่ำกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่ทำให้ได้พลังงานมากกว่า
- ง่ายต่อการออกแบบและขยายขนาด
- ไม่มีค่าใช้จ่ายในเรื่องของเมมเบรน
- ช่วยบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียทำให้มีค่าความสกปรกลดลง
- ไม่สร้างมลภาวะเนื่องจากการเผาไหม้

ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว ได้แก่

- ให้กระแสไฟฟ้าในปริมาณที่ไม่มากนัก



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างรูปแบบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว

2.2 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่ (Two chamber MFC)

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพประเภทนี้ ขั้วแอโนดและแคโทดจะแยกกันเกิดปฏิกิริยาในภาชนะคนละใบซึ่งมีการใช้เมมเบรนกัน (ทวิทย์ และคณะ, 2550) โดยภาชนะที่บรรจุขั้วแอโนดจะบรรจุน้ำเสียหรือตัวให้อิเล็กตรอน ส่วนที่ขั้วแคโทดจะประกอบด้วยน้ำหรือสารละลายเฟอร์ริกไซยาไนด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน (กิตติมา และคณะ, 2551) (แสดงดังรูปที่ 2.11)

ข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่ ได้แก่

- ได้กระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่งพลังงานทดแทน
- ใช้สารเมดิเอเตอร์ช่วยดึงอิเล็กตรอนออกจากเซลล์จุลชีพทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น
- สามารถบำบัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้
- ไม่สร้างมลภาวะเนื่องจากการเผาไหม้

ข้อเสียของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่ ได้แก่

- ให้กระแสไฟฟ้าในปริมาณที่ไม่มากนัก
- เมมเบรนมีราคาสูงมาก
- มีปัญหาเรื่องความแข็งแรงเมื่อออกแบบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น
- มีความต้านทานภายในสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างรูปแบบต่างๆ ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่

2.14.8 ภาพรวมของประโยชน์และข้อจำกัดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจัดเป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่ผลิตไฟฟ้าอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งอาศัยหลักการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยจุลชีพในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์นั้นจะทำให้ได้พลังงานไฟฟ้าและน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งในกระบวนการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพนี้จะไม่มีการเผาไหม้เกิดขึ้นในปฏิกิริยาจึงไม่ก่อให้เกิดก๊าซที่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม โดยกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้แทนแบตเตอรี่สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กได้อีกทั้งยังสามารถบำบัดน้ำเสียควบคู่ไปด้วย ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจึงนับเป็นอีกแนวทางเลือกหนึ่งสำหรับการผลิตพลังงานสะอาดหรือนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนพลังงานในรูปแบบอื่นๆ ต่อไป

ประโยชน์

- 1) ได้พลังงานเป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียของจุลชีพ
- 2) ผลิตภัณฑ์ที่ได้ (อิเล็กตรอน) สามารถนำไปผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้า
- 3) น้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดมีความสกปรกน้อยลง

ข้อจำกัด

- 1) เทคโนโลยีนี้ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาวิจัยในระดับห้องปฏิบัติการ การพัฒนาขึ้นเป็นต้นแบบขนาดใหญ่ยังไม่ได้รับความนิยมนแพร่หลายเนื่องจากค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง
- 2) ได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าเพียงจำนวนน้อย ซึ่งยังอยู่ในระหว่างขั้นตอนการพัฒนาเพื่อให้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ปริมาณที่มากขึ้น จนสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดต่างๆ ในชีวิตประจำวันได้
- 3) มีความซับซ้อนและยุ่งยากในการดูแลระบบเพื่อเลี้ยงจุลชีพ รวมทั้งมีค่าใช้จ่ายสูงในการลงทุนและติดตั้งระบบ

2.15 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Min และคณะ (2005) ศึกษาทดลองโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมาเป็นแนวทางในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ประเภทสุกรซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในปริมาณที่สูงทำให้มีศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยในขั้นต้นได้ทำการทดสอบด้วยการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่ที่บรรจุน้ำที่ขั้วแคโทดซึ่งสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้จากน้ำเสียฟาร์มสุกรที่มีค่า SCOD เท่ากับ 8,320 มก./ล. ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 45 มิลลิวัตต์/ตร.ม. และต่อมาได้มีการทดสอบด้วยการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่มีขั้วด้านแคโทดสัมผัสกับอากาศซึ่งสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เท่ากับ 261 มิลลิวัตต์/ตร.ม. โดยใช้ตัวต้านทานเท่ากับ 200 โอห์ม

Oh และLogan (2005) ทดลองผลิตไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร โดยใช้กระบวนการหมักในการผลิตไฮโดรเจน พบว่าน้ำที่เหลือจากกระบวนการหมักยังมีสารอินทรีย์อยู่ประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ จึงได้นำมาทดลองผลิตกระแสไฟฟ้าต่อด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพชนิดภาชนะใบเดียวและเปรียบเทียบปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ได้กับการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะสองใบ จากผลการทดลองพบว่าน้ำเสียตั้งต้นจากอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารภายหลังผ่านกระบวนการหมักจะเปลี่ยนรูปเป็นกรดอินทรีย์ระเหยซึ่งสามารถนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้เช่นกันซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพชนิดภาชนะใบเดียวจะมีประสิทธิภาพดีกว่าชนิดภาชนะสองใบ โดยน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีสูงจะสามารถผลิตไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้าได้สูงด้วย และเมื่อผ่านขั้นตอนการผลิตกระแสไฟฟ้าแล้วพบว่าน้ำเสียจะมีปริมาณสารอินทรีย์ลดลงถึง 95 เปอร์เซ็นต์ (95% removal) แสดงให้เห็นได้ว่าการนำเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมาใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจะทำให้สามารถบำบัดน้ำเสียควบคู่กันไปได้อีกด้วย

He และคณะ (2005) ศึกษาทดลองเพื่อพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบป้อนน้ำเสียจากด้านล่างเพื่อใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าควบคู่ไปกับการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำตาลทราย โดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องมีค่ากระแสประจุสารอินทรีย์เท่ากับ 2 กรัมซีโอดีต่อลิตรต่อวัน และในระบบมีการหมุนเวียนน้ำเสียบางส่วนกลับไปทางด้านล่างของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพซึ่งทำให้สามารถเก็บกักตะกอนจุลชีพไว้ภายในระบบได้มากขึ้น ซึ่งผลการทดลองพบว่าได้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่สูงที่สุดเท่ากับ 170 มิลลิวัตต์/ตร.ม. ที่ความต้านทานภายในเท่ากับ 84 โอห์ม และพบว่าประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

Moon และคณะ (2006) ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสำหรับใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องจากผลการศึกษาพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพชนิดไม่ใช้เมดิเอเตอร์มีประสิทธิภาพในการผลิตค่ากำลังไฟฟ้าได้สูงสุด 0.56 วัตต์/ตร.ม. เมื่อทำการป้อนน้ำเสียน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 300 มก./ล. ต่อเนื่องด้วยอัตรา 0.53 มล./นาที่ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

Cheng และคณะ (2006) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวโดยการพัฒนาขั้วไฟฟ้าแคโทดด้วยการใช้แผ่นวัสดุที่ทำจากโพลีเอทเธอร์ฟลูออโรเอทิลีนมาเคลือบเรียงเป็นชั้นๆ ที่บริเวณฝ้ายคาร์บอนด้านขั้วไฟฟ้าแคโทดที่สัมผัสกับอากาศ ผลการทดลองพบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเป็น 117 มิลลิโวลต์ เมื่อใช้แผ่นวัสดุที่เคลือบเรียงเป็นจำนวน 4 ชั้น เปรียบเทียบกับถ้าใช้ฝ้ายคาร์บอนอย่างเดียวโดยไม่มีวัสดุเคลือบบนผิวพบว่ามีความต่างศักย์ไฟฟ้าน้อยกว่า 10 มิลลิโวลต์ ซึ่งการใช้แผ่นวัสดุที่เคลือบบนฝ้ายคาร์บอนทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 538 ไปจนถึง 766 มิลลิวัตต์/ ตร.ม.

กันยรัตน์และคณะ (2550) ศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวชนิดคอลัมน์สูงในแนวตั้ง (ไม่ใช่เมมเบรนและเมดิเอเตอร์) ซึ่งได้พบว่ากำลังไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงระดับคงที่ที่ 0.38 มิลลิวัตต์/ตร.ม. หลังจาก 12 วัน ซึ่งมีการบันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติลงในคอมพิวเตอร์โดยใช้เครื่องแปลงสัญญาณต่อเข้ากับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวเพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวสามารถบำบัดน้ำเสียโดยลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 92 ในเวลาหนึ่งสัปดาห์ พร้อมทั้งได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกำลังและกระแสไฟฟ้า เช่น อัตราการไหลของอากาศ ขนาดของขั้วไฟฟ้าแคโทด ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและอัตราการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์

ทวิทย์และคณะ (2550) ศึกษาการเพิ่มกำลังไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่แบบอนุกรม ขนาน และผสม (ระหว่างขนานกับอนุกรม) จำนวน 6 เซลล์ต่อชุด ที่มีกรรป้อนอาหารแบบต่อเนื่อง พบว่าการต่อเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่แบบอนุกรมสามารถเพิ่มความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 63.47 วัตต์/ตร.ม. ของขั้วไฟฟ้าแอโนดและมีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงกว่าการต่อเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่แบบขนานและผสมถึง 5 และ 2 เท่า ตามลำดับ โดยในระหว่างการต่อเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่แบบอนุกรมประสิทธิภาพการเพิ่มความหนาแน่นกำลังไฟฟาลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับการผลิตกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่เซลล์เดี่ยวที่มีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 12.52 วัตต์/ตร.ม. (มีประสิทธิภาพการผลิตประจุเท่ากับ 36 เปอร์เซ็นต์) เนื่องจากความต้านทานภายในเพิ่มขึ้น ซึ่งพิจารณาจากความสัมพันธ์ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงพบว่าค่าความชันของกราฟจะบอกถึงค่าประสิทธิภาพความต้านทานภายในของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่

Yoo และคณะ (2009) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวชนิดขั้วแคโทดสัมผัสกับอากาศโดยการเพิ่มพื้นที่ผิวด้วยการใช้ภาชนะฐานกว้างในแนวนอน เมื่อทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องโดยใช้แกรไฟต์และผ้าคาร์บอนเคลือบด้วยแพลตทินัมเป็นขั้วแอโนดและขั้วแคโทดตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ 4 อันมาต่ออนุกรมกันแล้วเดินระบบต่อเนื่องที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 15.38 กก.ซีไอดี/ลบ.ม./วัน ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 119.7 มิลลิวัตต์/ตร.ม. และกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจาก 60.35 ไปเป็น 121.68 มิลลิวัตต์/ตร.ม. เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วลดลงจาก 2.8 เหลือ 1.2 ซม.

Mohan และคณะ (2008) ศึกษาการใช้อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างกันโดยใช้ถังปฏิกริยาขนาด 35 ลิตร ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว รับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จากกลูโคส 2.64 และ 3.54 กิโลกรัมซีไอดี/ลบ.ม.-วัน พบว่าอัตราการผลิตพลังงานจะสูงขึ้นตามอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์โดยได้พลังงานสูงสุดเป็น 98.13 มิลลิแอมแปร์/ตร.ม. และ 111.29 มิลลิแอมแปร์/ตร.ม.

Liu และคณะ (2008) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าคือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งพบว่าเมื่อลดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าลงจาก 4 เซนติเมตร เป็น 2 เซนติเมตร โดยใช้อะซิเตทเป็นสารอาหารทำให้ได้พลังงานสูงสุดเพิ่มจาก 720 มิลลิวัตต์/ตร.ม. เป็น 1,210 มิลลิวัตต์/ตร.ม. ซึ่งการที่พลังงานเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการลดลงของความต้านทานภายใน จึงแสดง

ให้เห็นว่าถ้าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทดยิ่งใกล้กันมากขึ้นก็จะทำให้มีโอกาสเกิดกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น

Kim และคณะ (2002) ศึกษาชนิดของเชื้อที่สามารถส่งถ่ายอิเล็กตรอนด้วยตนเองได้ โดยใช้แบคทีเรียสายพันธุ์ *Shewanella putrefaciens* ในการทดลองซึ่งแบคทีเรียสายพันธุ์นี้จะกินธาตุเหล็กเป็นอาหาร จึงทำให้มีตัวกระตุ้นการเกิดออกซิเดชันคือ ไฮโดรเจนจำนวนมากซึ่งไฮโดรเจนจะทำหน้าที่ส่งถ่ายอิเล็กตรอนไปที่ขั้วไฟฟ้าแอโนด จึงทำให้ไม่ต้องใช้เมดิเอเตอร์เป็นตัวช่วยส่งถ่ายอิเล็กตรอน

Sangeun และคณะ (2004) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าในส่วนของขั้วแคโทด โดยได้ศึกษาเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้า 2 ชนิดคือ แผ่นคาร์บอนที่เคลือบด้วยแพลตทินัมกับแผ่นคาร์บอนที่ไม่เคลือบแพลตทินัม ภายใต้สภาวะที่แตกต่าง 2 สภาวะคือ เดิมเฟอร์ริไซยาไนต์หรือเดิมออกซิเจนในส่วนของแคโทด จากการทดลองพบว่า ที่ขนาดเท่ากันของขั้วทั้ง 2 ชนิด ในสภาวะที่มีการเติมเฟอร์ริไซยาไนต์ในส่วนของแคโทดค่าความต่างศักย์ที่ได้ไม่แตกต่างกันมากนักและภายใต้สภาวะที่มีการเติมออกซิเจนในส่วนของแคโทดพบว่า แผ่นคาร์บอนที่เคลือบด้วยแพลตทินัมจะให้ค่าความต่างศักย์สูงกว่าแผ่นคาร์บอนที่ไม่เคลือบแพลตทินัมและยังพบอีกว่าการใช้ออกซิเจนเป็นสารรับอิเล็กตรอนนั้นเป็นการเพิ่มความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า

Kim และคณะ (2008) ศึกษาโดยการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวมาใช้ในการจัดการน้ำเสียฟาร์มสุกรซึ่งพบว่าสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้เป็นพลังงานทางเลือกและยังเป็นการบำบัดน้ำเสียควบคู่กันไปได้อีกด้วย โดยที่เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 228 มิลลิวัตต์/ตร.ม. และกำจัดซีโอดีได้ 84 เปอร์เซ็นต์ ภายในระยะเวลา 11 วัน

Scott และคณะ (2007) ศึกษาผลของความแตกต่างระหว่างวัสดุที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวพบว่าขั้วแกรไฟต์มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยซึ่งสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ 28.4 มิลลิวัตต์/ตร.ม.

Lu และคณะ (2009) ศึกษาการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมาผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียแป้งซึ่งพบว่าสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้เท่ากับ 239.4 มิลลิวัตต์/ตร.ม. ที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดเท่ากับ 490.8 มิลลิโวลต์ อีกทั้งยังสามารถลดค่าซีโอดีได้เช่นกัน

สรุปจากงานวิจัยทั้งหมดจะพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพรูปแบบต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวหรือแบบห้องคู่ก็มีศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมอีกทั้งยังสามารถบำบัดน้ำเสียที่มีปริมาณความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงๆ เช่น น้ำเสียฟาร์มสุกร น้ำเสียจากฟาร์มคาร์โบไฮเดรต เป็นต้น และในปัจจุบันยังมีการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเพื่อให้ได้ปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างเช่น มีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกระแสไฟฟ้าโดยการพัฒนาวัสดุที่เอามาทำเป็นขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทด การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ฯลฯ เป็นต้น

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการวิจัย

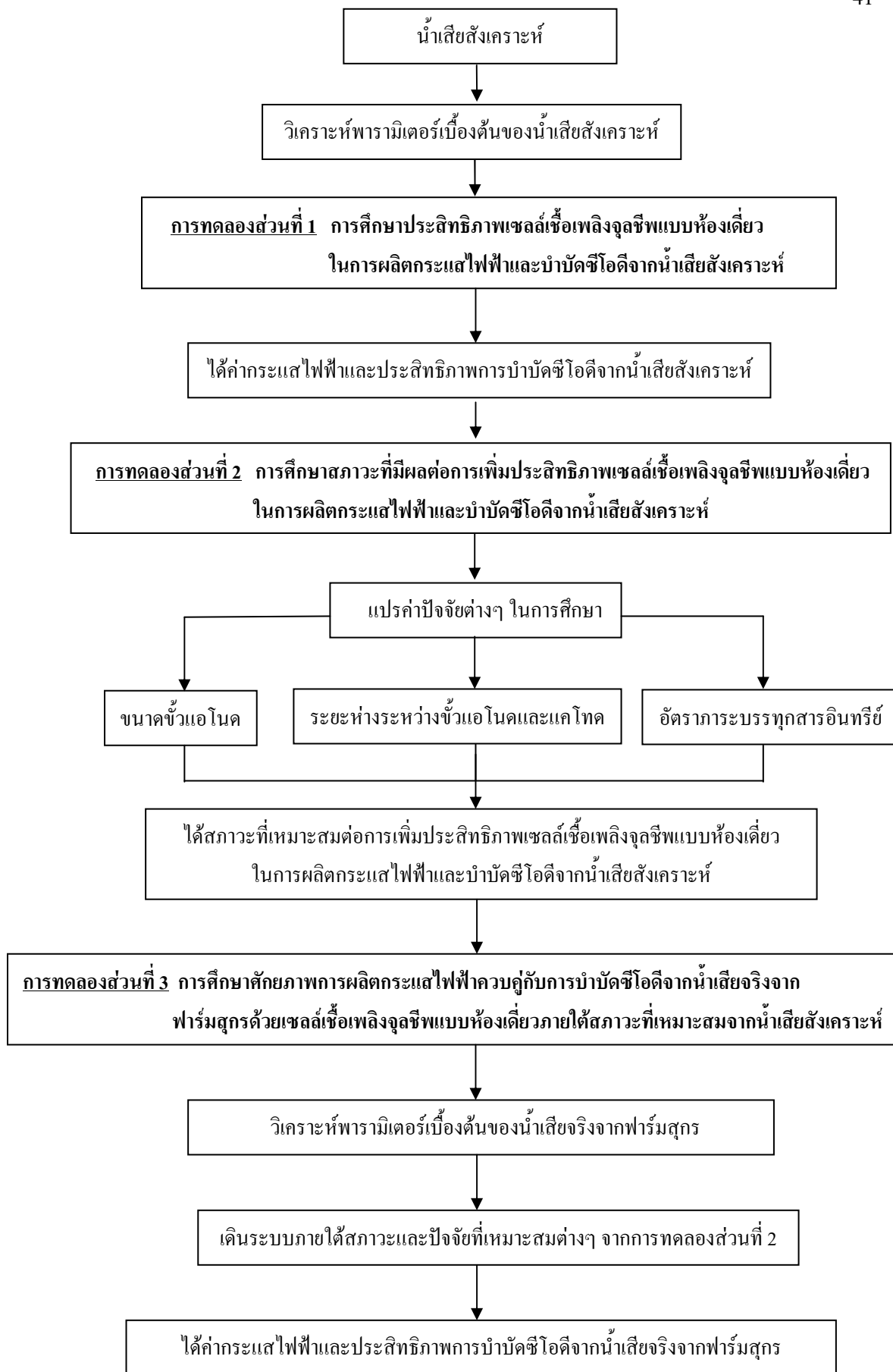
งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้าและการบำบัดน้ำเสียด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่ออกแบบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อพิจารณาแนวทางและความเป็นไปได้ในการผลิตพลังงานทดแทนควบคู่ไปกับการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยภาพรวมของงานวิจัยสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.1

งานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน โดยมีรายละเอียดดังนี้

การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเป็นการทดสอบการทำงานเบื้องต้นของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ประกอบขึ้น เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่สามารถระบุศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าและแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าชีโอดีที่เกิดขึ้นจากการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ระหว่างการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว

การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาสภาวะที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเป็นการแปรค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลองได้แก่ อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ ขนาดของขั้วแอโนด และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแคโทดและแอโนด เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการติดตั้งและเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว โดยได้ค่าการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงสุดควบคู่ไปกับการบำบัดชีโอดีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การทดลองส่วนที่ 3 การศึกษาศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าควบคู่กับการบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเป็นการใช้สภาวะการทดลองที่ได้จากช่วงการทดลองที่ 2 มาทดสอบและประเมินศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร เพื่อเป็นแนวทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมในการจัดการน้ำเสียฟาร์มสุกรได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป



รูปที่ 3.1 แผนผังรวมสรุปขั้นตอนการทดลองทั้งหมดของงานวิจัยนี้

3.2 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.2.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- เครื่องชั่งน้ำหนักชนิดละเอียด
- เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง
- เครื่องวัดความต่างศักย์
- เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า
- เครื่องวัดความนำไฟฟ้า
- เครื่องคอมพิวเตอร์
- เครื่องสูบน้ำแบบไดอะแฟรม
- เตาอบอุณหภูมิสูง
- เครื่องกวนไฟฟ้าพร้อมแท่งแม่เหล็ก
- โถทำแห้ง พร้อมสารดูดความชื้น
- กระดาษกรอง GF/C
- เครื่องดูดสุญญากาศ
- ถังพลาสติกสำหรับใส่น้ำเสีย
- กระจบอกและขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่าง
- บีกเกอร์
- ขวดปรับปริมาตร
- หลอดแก้วพร้อมฝาปิด
- กระจบอกดวง
- ช้อนตักสาร
- แท่งแก้วคนสาร
- ปิเปต
- บิวเรต
- ลูกยาง
- สายไฟแบบมีปากคีบ
- แผ่นยางกันรั่ว
- สายยางสำหรับต่อท่อน้ำทางเข้าและออก
- กาวซิลิโคน

- เทปพันเกลียว
- ประแจและไขควง
- น็อต
- เหล็กฉาก
- วาล์วทองเหลือง

2. สารเคมี

- น้ำตาลทราย
- โซเดียมไบคาร์บอเนต
- เฟอร์ริกคลอไรด์
- โพรแตสซีเอ็มไดไฮโดรเจนฟอสเฟต
- ยูเรีย
- กรดซัลฟิวริกเข้มข้น
- สารละลายโพรแตสซีเอ็มไดโครเมต (0.1 นอร์มัล)
- สารละลายกรดซัลฟิวริก (ที่มีซิลเวอร์ซัลเฟต)
- สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์
- สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (0.1 นอร์มัล)
- กรดบอริก
- โพรแตสซีเอ็มไดโครเมต
- เมอร์คิวรีซัลเฟต
- โคบอลต์คลอไรด์
- นิกเกิลคลอไรด์
- ซิงค์คลอไรด์
- คอปเปอร์คลอไรด์
- แมงกานีสซัลเฟต
- แอมโมเนียม โมลิบเดต
- โพรแตสซีเอ็มคลอไรด์
- แคลเซียมคลอไรด์
- แมกนีเซียมคลอไรด์
- น้ำกลั่น

3.2.2 วัสดุอุปกรณ์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว

ชุดเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ส่วนต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

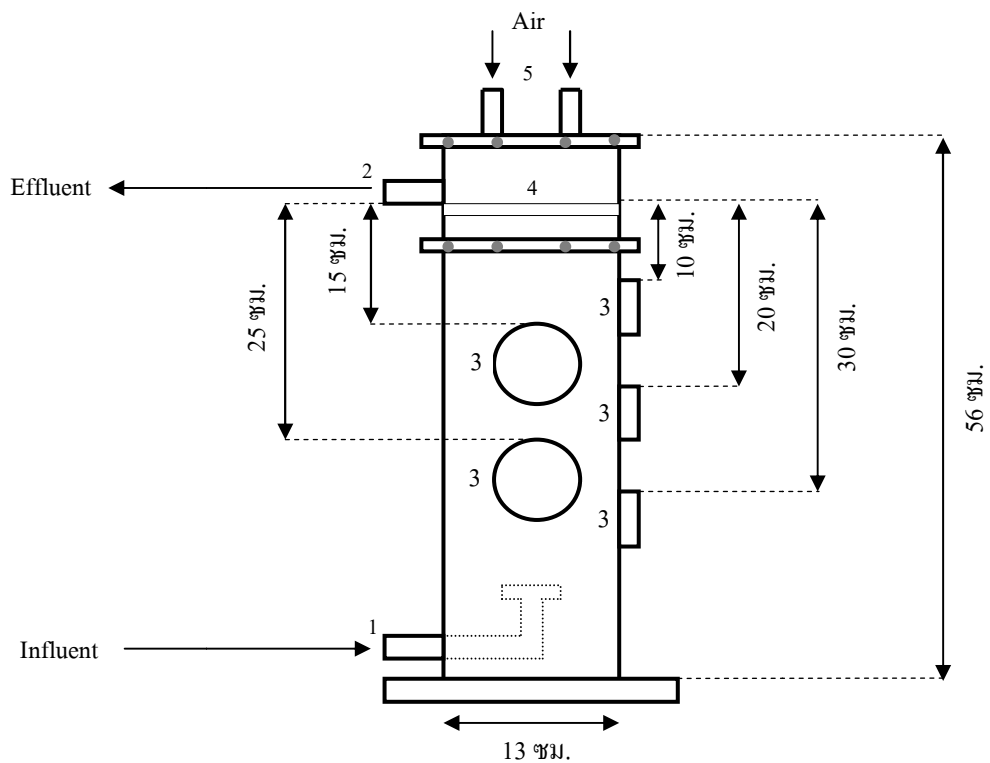
1. ถังปฏิกรณ์ เป็นถังทรงกระบอกสูง สร้างขึ้นจากอะคริลิกใส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 ซม. สูง 56 ซม. มีปริมาตรรวม 7.4 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3

2. ขั้วไฟฟ้า ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ขั้วไฟฟ้าแอโนด ทำจากแท่งแกรไฟต์รูปทรงกระบอกกลวง จากบริษัท สุธิ ยูไนเต็ดคาร์บอน จำกัด มีความยาว 18 ซม. มีขนาดต่างๆ กัน 5 ขนาดในแต่ละการทดลอง คือ XS S M L และ XL โดยพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าทั้ง 5 ขนาดในส่วนที่สัมผัสกับน้ำเสียในถังปฏิกรณ์มีความยาวเท่ากับ 13 ซม. คิดเป็นพื้นที่ผิวของการเกิดปฏิกิริยาเท่ากับ 125 170 254 339 และ 424 ตร.ซม. ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ รูปที่ 3.4 ก

- ขั้วไฟฟ้าแคโทด ทำจากฝ้ายคาร์บอนเคลือบด้วยแพลตตินั่มหนา 0.5 มก./ตร.ซม. จากบริษัท Clean Fuel Cell Energy, LLC โดยตัดให้มีขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของถังปฏิกรณ์คือ 13 ซม. คิดเป็นพื้นที่ผิวรวมที่สัมผัสกับน้ำเสียเท่ากับ 133 ตร.ซม. ดังแสดงใน รูปที่ 3.4 ข

3. ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้า ทำการบันทึกข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยอัตโนมัติทุกๆ ชั่วโมง ที่ความต้านทานภายนอก 1 กิโลโอห์ม ด้วยชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลที่บันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นหน่วยมิลลิโวลต์ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยแสดงผลเป็นดิจิทัล (Digital) ด้วยแผงวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วย Operational Amplifiers ซึ่งช่วยให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มีค่าเที่ยงตรงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ก และรูปที่ 3.5 ข



รูปที่ 3.2 ไดอะแกรมแสดงชุดถังปฏิกรณ์ที่ประกอบด้วย 1. ช่องน้ำเสียขาเข้า 2. ช่องน้ำเสียขาออก 3. ช่องใส่ขั้วไฟฟ้าแอนโนด 4. ขั้วไฟฟ้าแคโทด 5. ช่องรับอากาศจากภายนอก



รูปที่ 3.3 รูปถ่ายเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่ใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดขั้วไฟฟ้าแอโนดขนาดต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัย

ขนาด	ความยาว (ซม.)		พื้นที่ผิว (ตร.ซม.)		เส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)	
	ทั้งหมด	ในถังปฏิกรณ์	ทั้งหมด	ในถังปฏิกรณ์	ภายใน	ภายนอก
XS	18	13	174	125	1	2
S	18	13	239	170	1	3
M	18	13	358	254	2	4
L	18	13	478	339	3	5
XL	18	13	597	424	4	6

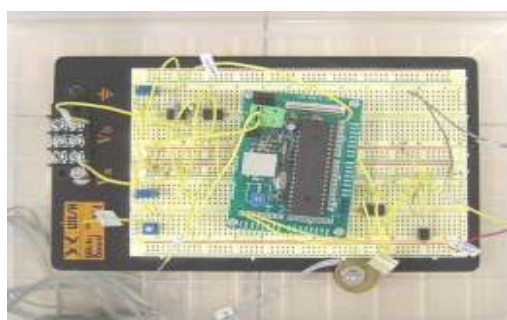


(ก) ขั้วแอโนด



(ข) ขั้วแคโทด

รูปที่ 3.4 ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในงานวิจัย



(ก) แผงวงจรไฟฟ้า



(ข) ชุดคอมพิวเตอร์เก็บข้อมูล

รูปที่ 3.5 ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้า

3.2.3 น้ำเสียที่ใช้ในการทดลอง

- น้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองในช่วงที่ 1 และ 2 จะดำเนินการโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากการใช้น้ำตาลทรายเป็นแหล่งสารอินทรีย์คาร์บอน โดยมีค่าซีโอดีประมาณ 5,000 มก./ล. และเติมสารอาหารเพื่อให้มีค่าสัดส่วน COD:N:P เท่ากับ 150:1.1:0.2 (McCarty, 1964) โดยแหล่งของไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่ใช้ได้แก่ ยูเรีย และ โปแตสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ตามลำดับ นอกจากนี้ยังเติมธาตุอาหารอื่นๆ ที่จำเป็นลงในน้ำเสีย และเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตในสัดส่วน 6 กรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร (Speece, 1996) เพื่อช่วยรักษาค่าสภาพด่างในระบบ

- น้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร

ในช่วงการทดลองที่ 3 จะดำเนินการโดยใช้ตัวอย่างน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยได้รับความอนุเคราะห์จากประชาฟาร์ม ซึ่งเป็นฟาร์มเลี้ยงสุกรขนาดกลางตั้งอยู่ที่ อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม โดยเก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อพักน้ำเสียรวมที่ระบายออกจากคอกเลี้ยงสุกรก่อนผ่านเข้าสู่ระบบบำบัด ทั้งนี้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียแบบผสม (Composite sampling) เพื่อให้สามารถใช้เป็นตัวแทนของน้ำเสียทั้งหมด ซึ่งในขั้นตอนการเก็บตัวอย่างน้ำจะใช้อุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำเสียจ้วงตักน้ำตัวอย่างจากบ่อพักน้ำเสีย แล้วบรรจุลงในถังพลาสติก ทำการรักษาสภาพตัวอย่างน้ำเสียด้วยการเติมกรดซัลฟิวริกให้มีพีเอชต่ำกว่า 2 และเก็บแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 °ซ

3.3 การคำนวณค่าทางไฟฟ้า

จากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าสามารถนำมาแปลงเป็นค่ากระแสไฟฟ้าและคำนวณเป็นค่ากำลังไฟฟ้าได้จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) ตามลำดับ ตลอดจนสามารถนำค่ากระแสไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้ามาคิดเป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดได้จากสมการที่ (3.3) และ (3.4) ตามลำดับ และประสิทธิภาพเชิงकुलोมนีสามารถคำนวณคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้จากสมการที่ (3.5)

$$V = IR \quad (3.1)$$

$$P = IV \quad (3.2)$$

$$\text{Current density} = \frac{I}{A_{\text{anode}}} \quad (3.3)$$

$$\text{Power density} = \frac{P}{A_{\text{anode}}} \quad (3.4)$$

$$C_E \% = \frac{8I}{Fq \Delta \text{COD}} \times 100 \quad (3.5)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์)

I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ หรือ คูลอมป์/วินาที)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

R คือ ความต้านทานภายนอก (โอห์ม)

A_{anode} คือ ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด (ตร.ม.)

Current density คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์/ตร.ม.)

Power density คือ ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์/ตร.ม.)

F คือ ค่าคงที่ของฟาราเดย์ 96,500 (คูลอมป์/โมล)

q คือ อัตราการป้อนน้ำเสียเข้าระบบ (ลบ.ม.วินาที)

Δ COD คือ ค่าซีโอดีที่เปลี่ยนแปลง (กรัม/ลิตร)

3.4 การดำเนินการวิจัย

การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยแผนผังรายละเอียดการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.6 และตัวแปรต่างๆ ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.2

1. เริ่มต้นเลี้ยงหัวเชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศให้คุ้นเคยกับน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการเลี้ยงแบบแบทช์ในภาชนะปิดไม่ให้อากาศเข้าภายใต้สภาวะที่มีการกวนผสมเป็นเวลา 7-10 วัน

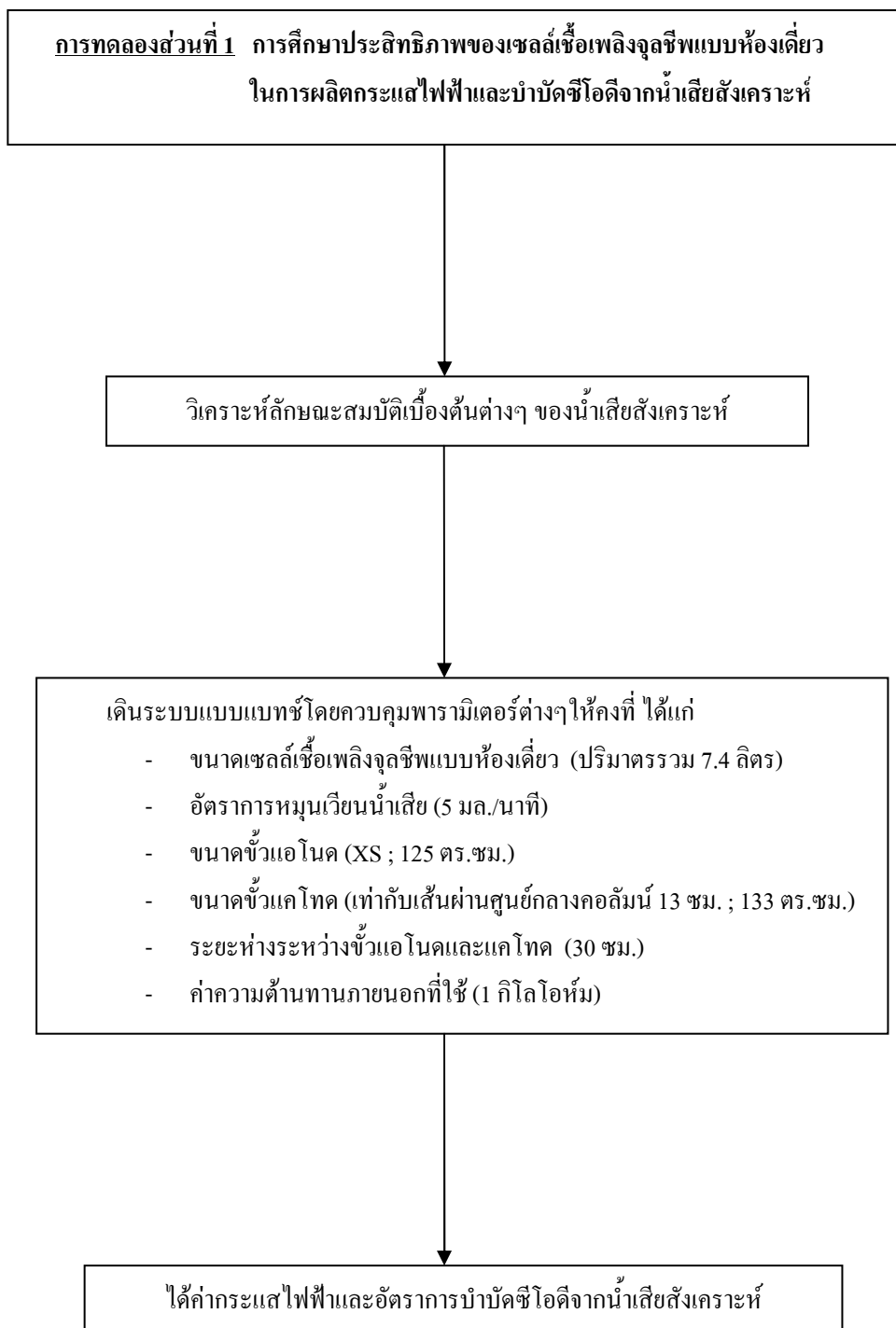
2. บรรจุหัวเชื้อที่ผ่านการปรับสภาพลงในถังปฏิกรณ์ในสัดส่วน 0.4 % น้ำหนัก/ปริมาตร และเริ่มเดินระบบโดยติดตั้งถังปฏิกรณ์เข้ากับชุดอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

3. ทำการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เข้าทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์โดยให้ไหลผ่านบริเวณขั้วแอโนด ด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 5 มล./นาที ในสภาวะที่กำหนดขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดเท่ากับ 125 ตร.ซม. และ 133 ตร.ซม. ตามลำดับ และมีระยะห่างระหว่าง

ขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดเท่ากับ 30 ซม. โดยน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจะไหลผ่านขั้วแคโทดและระบายออกที่ส่วนบนบริเวณด้านข้างของถังปฏิกรณ์จากนั้นจะถูกหมุนเวียนกลับเข้าถังปฏิกรณ์ใหม่

4. ทำการบันทึกข้อมูลความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยอัตโนมัติทุกๆ ชั่วโมงที่ความต้านทานภายนอกระหว่างขั้วทั้งสอง 1 กิโลโอห์ม ด้วยชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูลที่บันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นหน่วยมิลลิโวลต์ลงในเครื่องคอมพิวเตอร์ กำหนดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่สามารถระบุศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้า และทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดีจากน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจากถังปฏิกรณ์เป็นระยะเพื่อประเมินประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียว

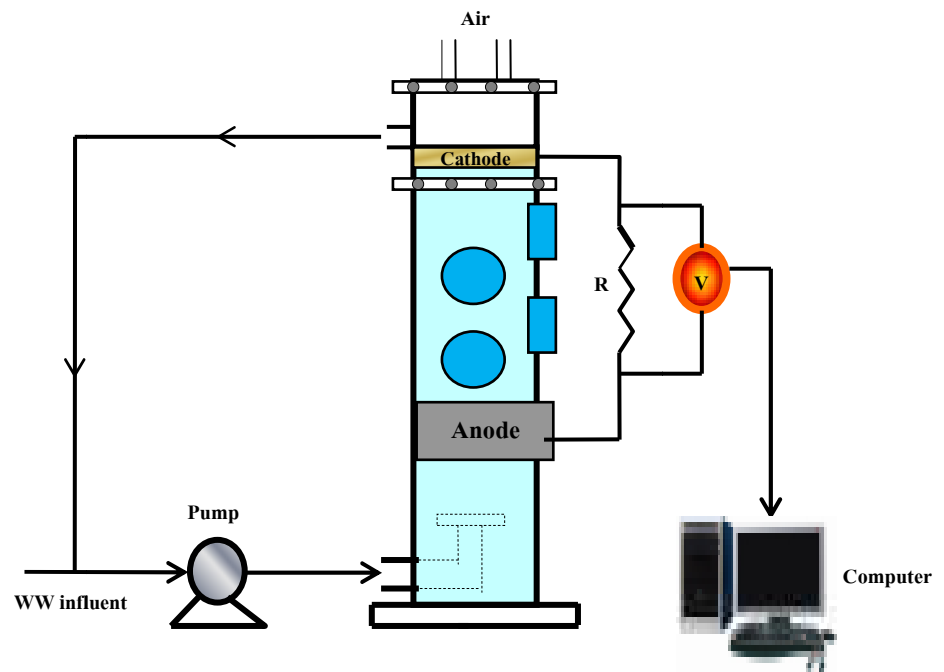
5. เตินระบบแบบเบทซ์ในสถานะที่มีการหมุนเวียนน้ำเสียกลับเข้าระบบด้วยอัตรา 5 มล./นาที่ ไปจนกว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีแนวโน้มคงที่



รูปที่ 3.6 แผนผังการทดลองส่วนที่ 1

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต่างๆ ในการทดลองส่วนที่ 1

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์	น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำตาลทรายโดยมีค่าความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 5,000 มก./ล.
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชุดอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	ติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.7
2. ปริมาณหัวเชื้อเริ่มต้น	0.4% (W/V) (Oh และ Logan, 2005)
3. ขนาดเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	ปริมาตรรวม 7.4 ลิตร
4. ขนาดขั้วไฟฟ้าแอโนด	XS (125 ตร.ซม.)
5. ขนาดขั้วไฟฟ้าแคโทด	เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 13 ซม. (133 ตร.ซม.)
6. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด	30 ซม.
7. ค่าความต้านทานภายนอกที่ใช้	1 กิโลโอห์ม
ตัวแปรตาม	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
1. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ ได้แก่ พีเอช ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และซีโอดี	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1998)
2. ความต่างศักย์ไฟฟ้า	ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูล
3. กระแสไฟฟ้า	คำนวณจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า



รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อถึงอุปกรณ์เข้ากับชุดอุปกรณ์ทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีวะแบบห้องเดียว
ที่ใช้ในการวิจัยสำหรับการเดินระบบแบบเบทซ์

การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาสถานะที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องและแปรค่าปัจจัยต่างๆ ในการเดินระบบ ได้แก่ ขนาดขั้วไฟฟ้าแอโนด ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด และค่าอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน โดยแผนผังรายละเอียดการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.8 แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วนย่อย ได้แก่

การทดลองที่ 2.1 การศึกษาขนาดของขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสม โดยทำการแปรค่าขนาดของขั้วไฟฟ้าแอโนดต่างๆ กัน 4 ค่า ได้แก่ 170 (S) 254 (M) 339 (L) และ 424 (XL) ตร.ซม. โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ ให้คงที่ดังมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 3.3

การทดลองที่ 2.2 การศึกษาระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดที่เหมาะสม โดยทำการแปรค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดต่างๆ กัน 4 ค่า ได้แก่ 10 15 20 และ 25 ซม. โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ ให้คงที่และใช้ขนาดของขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1 ดังมีรายละเอียดตัวแปรต่างๆ ในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.4

การทดลองที่ 2.3 การศึกษาอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม โดยทำการแปรค่าอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ กัน 4 ค่า ได้แก่ 2.22 4.43 6.64 และ 8.86 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน โดยการแปรค่าอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบแตกต่างกันเท่ากับ 2 4 6 และ 8 มล./นาที่ ตามลำดับ และควบคุมค่าซีโอดีเข้าระบบคงที่ โดยใช้ขนาดของขั้วไฟฟ้าแอโนดและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2.1 และ 2.2 ดังมีรายละเอียดตัวแปรต่างๆ ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.5

ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ตลอดจนประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจากการทดลองทั้งสามส่วน เพื่อให้ได้สถานะที่เหมาะสมในการติดตั้งและเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวอย่างมีประสิทธิภาพ

การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาสถานะที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์

2.1 แปรค่าขนาดของขั้วไฟฟ้าแอโนด 170 254 339 และ 424 ตร.ซม.

โดยควบคุมปัจจัยอื่นให้คงที่ ได้แก่

- ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด (30 ซม.)
- ขนาดของขั้วแคโทด (เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์)
- ค่าความต้านทานภายนอก (1 กิโลโอห์ม)

2.2 แปรค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 10 15 20 และ 25 ซม.

โดยควบคุมปัจจัยอื่นให้คงที่ ได้แก่

- ขนาดของขั้วแคโทด (เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์)
- ขนาดของขั้วแอโนด (ผลจากการทดลองที่ 2.1)
- ค่าความต้านทานภายนอก (1 กิโลโอห์ม)

2.3 แปรค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 2.22 4.43 6.64 และ 8.86 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

โดยควบคุมปัจจัยอื่นให้คงที่ ได้แก่

- ขนาดของขั้วแคโทด (เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์)
- ขนาดของขั้วแอโนด (ผลจากการทดลองที่ 2.1)
- ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด (ผลจากการทดลองที่ 2.2)
- ค่าความต้านทานภายนอก (1 กิโลโอห์ม)

ได้สถานะที่เหมาะสมต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์

รูปที่ 3.8 แผนผังการทดลองส่วนที่ 2

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต่างๆ ในการทดลองส่วนที่ 2.1

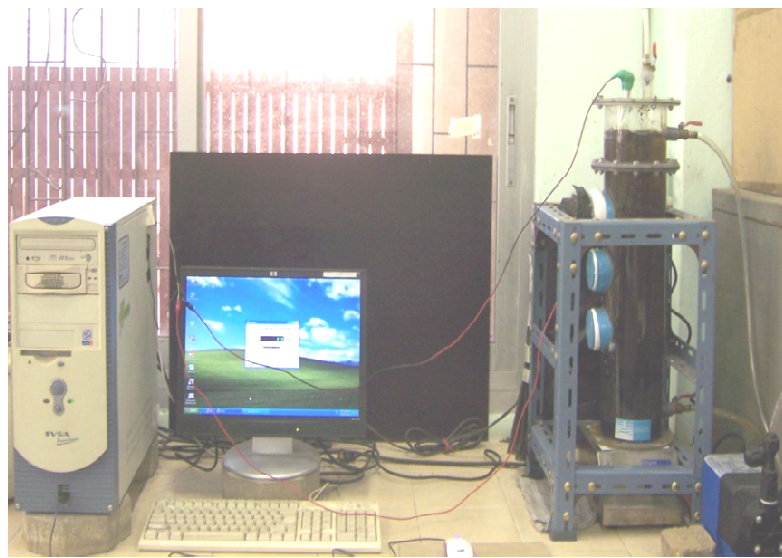
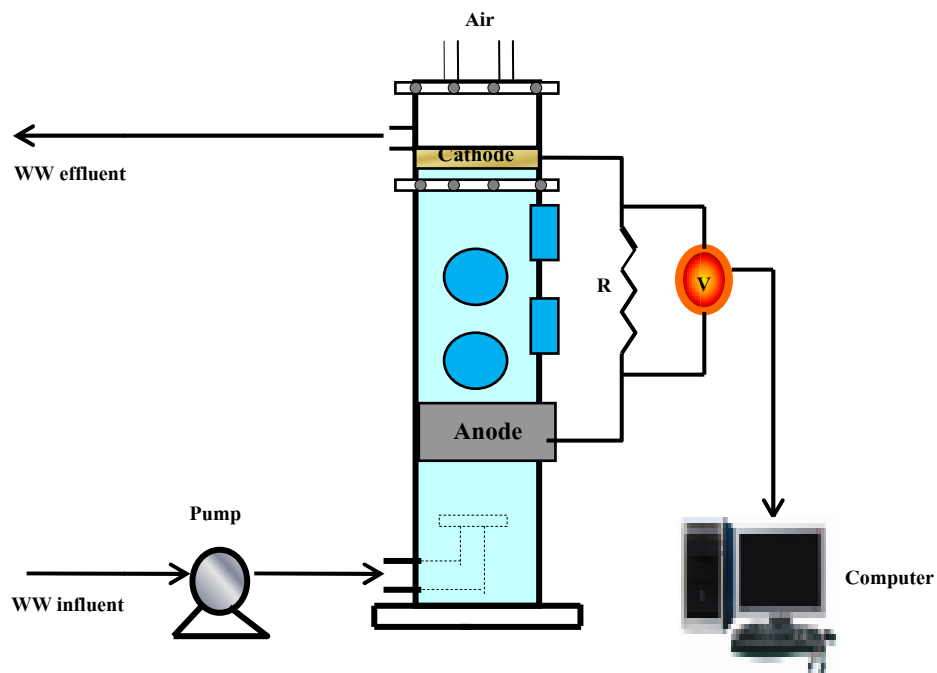
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ขนาดขั้วไฟฟ้าแอโนด 4 ขนาด	170 (S) 254 (M) 339 (L) และ 424 (XL) ตร.ชม.
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชุดอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	ติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.9
2. ปริมาณหัวเชื้อเริ่มต้น	0.4% (W/V) (Oh และ Logan, 2005)
3. ขนาดเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	ปริมาตรรวม 7.4 ลิตร
4. ขนาดขั้วไฟฟ้าแคโทด	เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 13 ซม. (133 ตร.ชม.)
5. ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์	น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำตาลทรายโดยมีค่า ความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 5,000 มก./ล.
6. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด	30 ซม.
7. ค่าความต้านทานภายนอกที่ใช้	1 กิโลโอห์ม
ตัวแปรตาม	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
1. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ ได้แก่ พีเอช ของแข็ง แขวนลอยทั้งหมด และ ซีโอดี	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1998)
2. ความต่างศักย์ไฟฟ้า	ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูล
3. กระแสไฟฟ้า	คำนวณจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรต่างๆ ในการทดลองส่วนที่ 2.2

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด	10 15 20 และ 25 ซม.
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชุดอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	ติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.9
2. ปริมาณหัวเชื้อเริ่มต้น	0.4% (W/V) (Oh และ Logan, 2005)
3. ขนาดเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	ปริมาตรรวม 7.4 ลิตร
4. ขนาดขั้วไฟฟ้าแคโทด	เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 13 ซม. (133 ตร.ซม.)
5. ขนาดขั้วไฟฟ้าแอโนด	ผลจากการทดลองที่ 2.1
6. ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์	น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำตาลทรายโดยมีค่าความเข้มข้นซีไอดีเท่ากับ 5,000 มก./ล.
7. ค่าความต้านทานภายนอกที่ใช้	1 กิโลโอห์ม
ตัวแปรตาม	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
1. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ ได้แก่ พีเอช ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และ ซีไอดี	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1998)
2. ความต่างศักย์ไฟฟ้า	ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูล
3. กระแสไฟฟ้า	คำนวณจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรต่างๆ ในการทดลองส่วนที่ 2.3

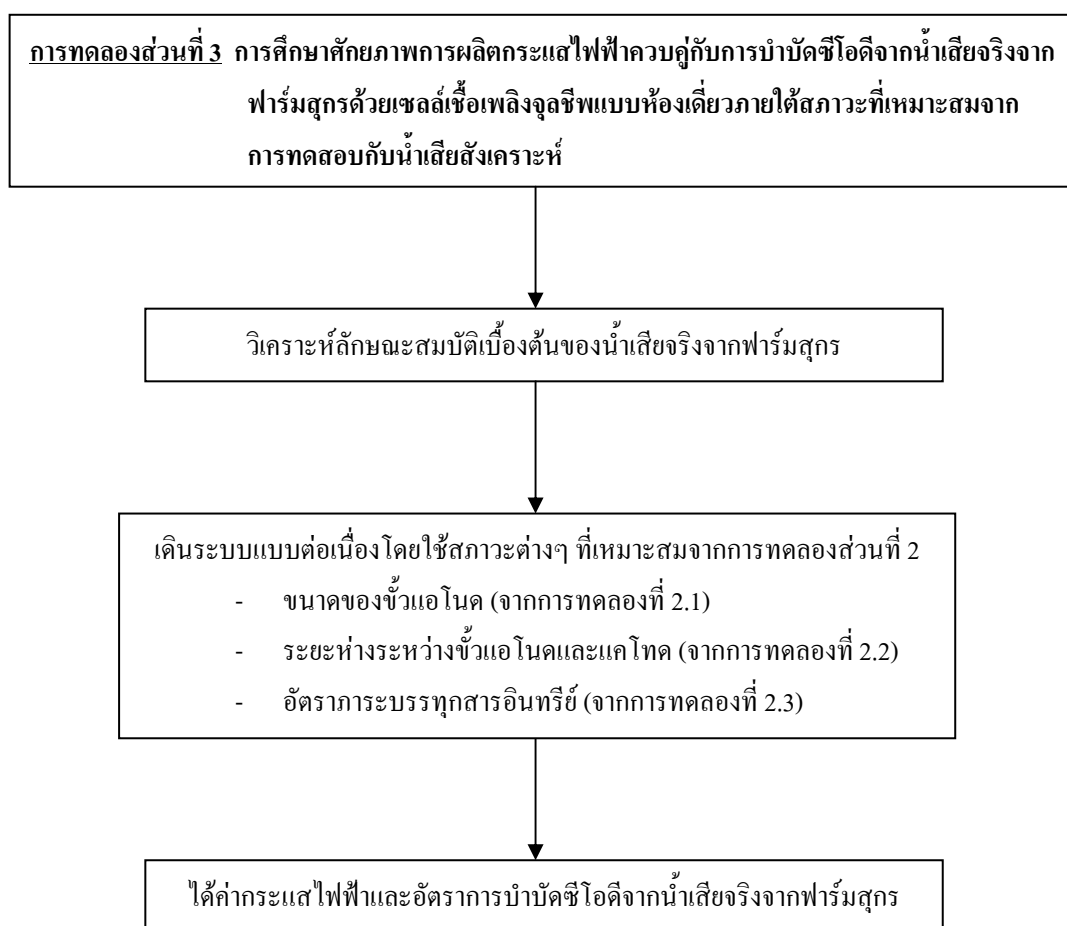
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์	2.22 4.43 6.64 และ 8.86 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน
2. อัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบ	2 4 6 และ 8 มล./นาที่
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชุดอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	ติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.9
2. ปริมาณหัวเชื้อเริ่มต้น	0.4% (W/V) (Oh และ Logan, 2005)
3. ขนาดเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	ปริมาตรรวม 7.4 ลิตร
4. ขนาดขั้วไฟฟ้าแคโทด	เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 13 ซม. (133 ตร.ซม.)
5. ขนาดขั้วไฟฟ้าแอโนด	ผลจากการทดลองที่ 2.1
6. ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์	น้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากน้ำตาลทรายโดยมีค่า ความเข้มข้นซีโอดีเท่ากับ 5,000 มก./ล.
7. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด	ผลจากการทดลองที่ 2.2
8. ค่าความต้านทานภายนอกที่ใช้	1 กิโลโอห์ม
ตัวแปรตาม	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
1. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ ได้แก่ พีเอช ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด และ ซีโอดี	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1998)
2. ความต่างศักย์ไฟฟ้า	ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูล
3. กระแสไฟฟ้า	คำนวณจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า



รูปที่ 3.9 การเชื่อมต่อถึงปฏิกรณ์เข้ากับชุดอุปกรณ์ทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีวะแบบห้องเดี่ยว
ที่ใช้ในการวิจัยสำหรับการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

การทดลองส่วนที่ 3 การศึกษาศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าควบคู่กับการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์

ทำการเดินระบบโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองส่วนที่ 2 เพื่อประเมินศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าควบคู่กับการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร โดยแผนผังรายละเอียดการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.10 และตัวแปรต่างๆ ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.10 แผนผังการทดลองส่วนที่ 3

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรต่างๆ ในการทดลองส่วนที่ 3

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของน้ำเสีย	น้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชุดอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	ติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.9
2. ปริมาณหัวเชื้อเริ่มต้น	0.4% (W/V) (Oh และ Logan, 2005)
3. ขนาดเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	ปริมาตรรวม 7.4 ลิตร
4. ขนาดขั้วไฟฟ้าแคโทด	เท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางคอลัมน์ 13 ซม. (133 ตร.ซม.)
5. ขนาดขั้วไฟฟ้าแอโนด	ผลจากการทดลองที่ 2.1
6. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด	ผลจากการทดลองที่ 2.2
7. อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์	ผลจากการทดลองที่ 2.3
8. ค่าความต้านทานภายนอกที่ใช้	1 กิโลโอห์ม
ตัวแปรตาม	วิธีวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์
1. พารามิเตอร์ทางคุณภาพน้ำ ได้แก่ พีเอช ของแข็งแขวนลอย และ ซีโอดี	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 1998)
2. ความต่างศักย์ไฟฟ้า	ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูล
3. กระแสไฟฟ้า	คำนวณจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

3.5 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ที่ทำการวิเคราะห์ความถี่และวิธีการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีการวิเคราะห์/เครื่องมือวิเคราะห์	ความถี่	จุดเก็บตัวอย่าง		
			น้ำเข้า	น้ำออก	ในคอลัมน์
พีเอช	เครื่องวัดพีเอช	ทุกวัน	√	√	
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	อบที่อุณหภูมิ 103-105 °ซ	เริ่มต้นการทดลอง	√		
ซีโอดี	รีฟลักซ์แบบปิด	ทุกวัน	√	√	
ความต่างศักย์ไฟฟ้า	ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูล	ทุกวัน			√
กระแสไฟฟ้า	ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูล	ทุกวัน			√
ความนำไฟฟ้า	เครื่องวัดความนำไฟฟ้า	ทุกสัปดาห์			√

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพและสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดน้ำเสียด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่ออกแบบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยทำการทดลองกับน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร เพื่อให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่จะระบุศักยภาพและปรับปรุงสมรรถนะการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวรูปแบบใหม่ขึ้น ในการนำไปประยุกต์ใช้จริงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าควบคู่ไปกับการบำบัดน้ำเสีย โดยการศึกษาทั้งหมดในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

การทดลองส่วนที่ 1 การศึกษาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยเป็นการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานเบื้องต้นของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากน้ำตาลทรายมีค่าชีโอดีประมาณ 5,000 มก./ล. ภายใต้สภาวะการทดลองแบบแบทช์ ที่กำหนดให้ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแคโทด ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด และความต้านทานภายนอกระหว่างขั้วทั้งสองขงที่เท่ากับ 125 ตร.ซม. 133 ตร.ซม. 30 ซม. และ 1 กิโลโอห์มตามลำดับ

การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาสภาวะที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดน้ำเสียของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว โดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมขึ้นจากน้ำตาลทรายมีค่าชีโอดีประมาณ 5,000 มก./ล. และแปรค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการทดลองได้แก่ ขนาดของขั้วไฟฟ้าแอโนด ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด และอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดชีโอดีสูงสุด

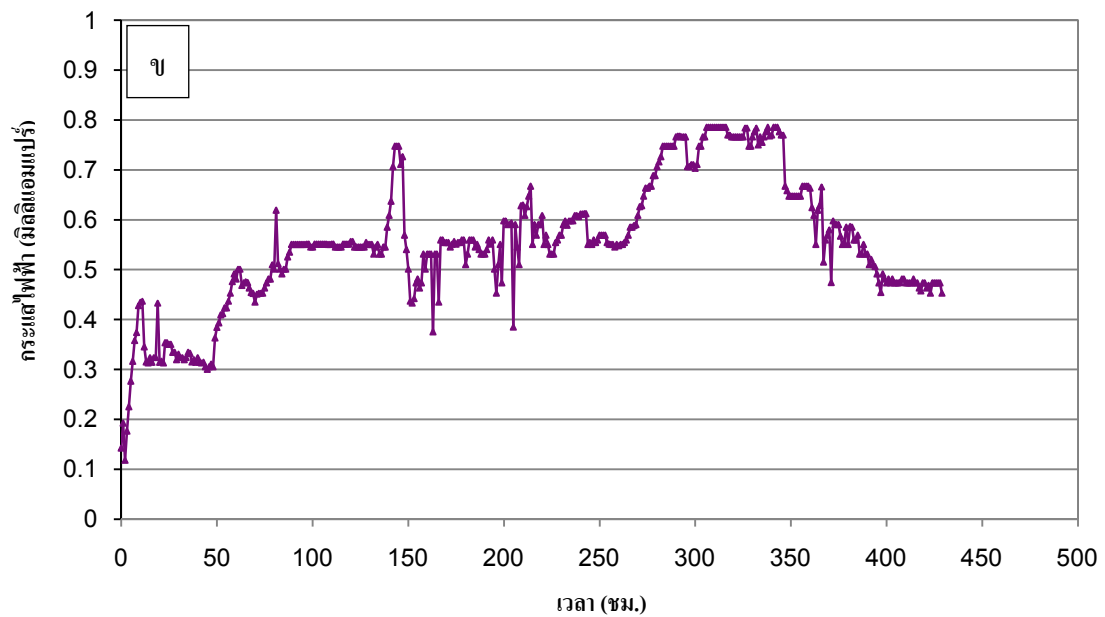
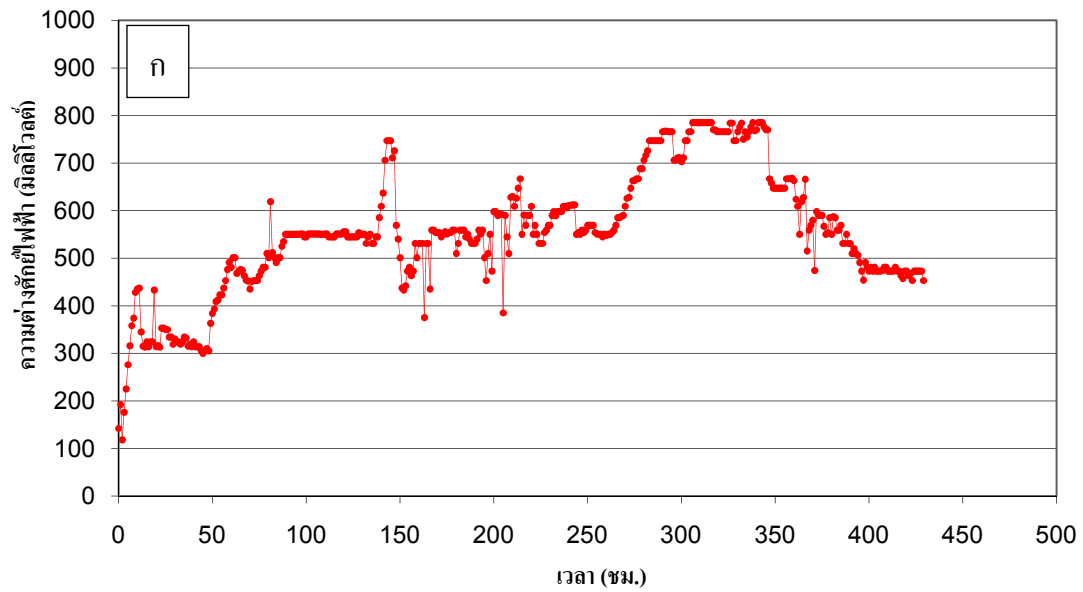
การทดลองส่วนที่ 3 การศึกษาศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าควบคู่กับการบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร โดยทำการเดินระบบแบบต่อเนื่องด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว ภายใต้สภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมจากการทดลองส่วนที่ 2 เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะประเมินศักยภาพเบื้องต้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร

4.1 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์

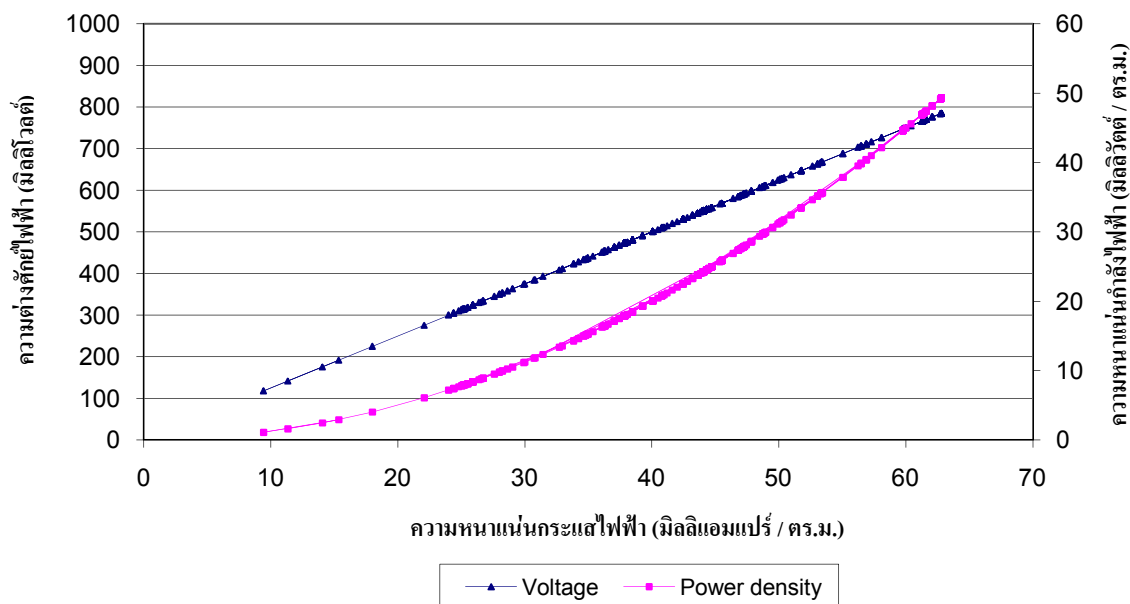
4.1.1 ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้า

ภายหลังการเริ่มเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 5,000 มก./ล. พบว่าในช่วงแรกเมื่อจุลินทรีย์ได้รับสารอาหารค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ในช่วง 50 - 300 ชม. แรก จนเข้าสู่สภาวะคงตัวเมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 300 - 350 จากนั้นค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเริ่มลดลง อาจเนื่องมาจากระบบการทดลองนี้ดำเนินการแบบแบทช์ จึงทำให้สารอาหารถูกใช้หมดไปและไม่เพียงพอต่อจุลินทรีย์ที่จะใช้เพื่อสร้างกระแสไฟฟ้าได้อีก ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนดและไหลผ่านวงจรภายนอกออกไปยังขั้วแคโทดมีปริมาณลดน้อยลง จึงทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าลดลงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ก) และการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟฟ้างแสดงในรูปที่ 4.1(ข)

ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากการย่อยสลายสารอาหารในน้ำเสียผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ในระบบ โดยเส้นกราฟการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้ามีความสอดคล้องกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นั่นคือ ในช่วงแรกจุลินทรีย์จะปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมในระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ได้ติดตั้งไว้ จากนั้นจะเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนมากขึ้นจากการย่อยสลายสารอาหารในน้ำเสียทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ (Prasad และคณะ, 2006) จนเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงเวลา 300 - 350 ชม. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 761 ± 35.75 มิลลิโวลต์ และหลังจากผ่านสภาวะคงที่ไปแล้วความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเริ่มลดลง เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าจากการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวแบบแบทช์พบว่าได้ผลดังรูปที่ 4.2 โดยแสดงให้เห็นว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นจะมีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วยความสัมพันธ์แบบแปรผันตรง นั่นคือ เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวสามารถผลิตได้ในสภาวะการทดลองแบบแบทช์ ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าซีโอดีเริ่มต้นเท่ากับ 5,000 มก./ล. มีค่าเท่ากับ 761 ± 35.75 มิลลิโวลต์ 60.85 ± 2.86 มิลลิแอมแปร์/ตร.ม. และ 46.38 ± 4.13 มิลลิวัตต์/ตร.ม. ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) และกระแสไฟฟ้า (ข)
จากการเดินระบบแบบเบตซ์ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว

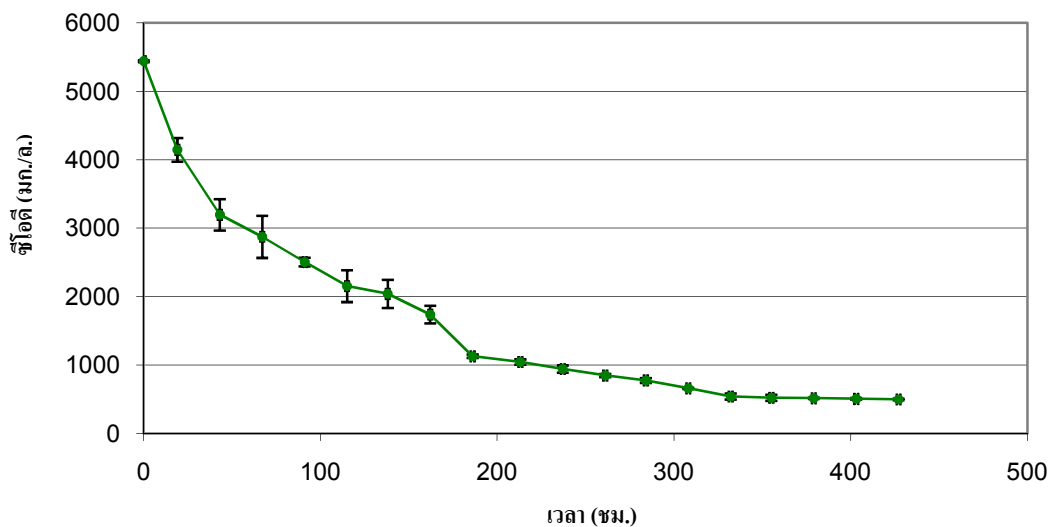


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าจากการเดินระบบแบบเบแททซ์ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว

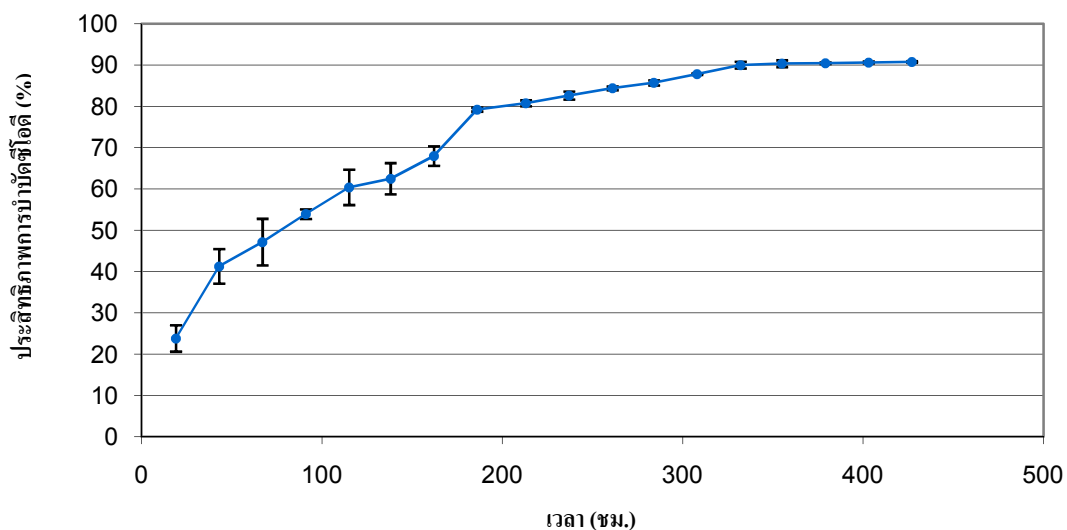
4.1.2 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

ในระหว่างการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวภายใต้สภาวะการทดลองแบบเบแททซ์ พบว่านอกจากระบบจะผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียแล้วยังสามารถบำบัดน้ำเสียควบคู่ไปด้วย โดยในระหว่างการทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียมาทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดีเป็นระยะๆ ซึ่งพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ในการทดลองสามารถบำบัดซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์จากประมาณ 5,000 มก./ล. ลดลงเหลือประมาณ 500 มก./ล. ได้ภายในเวลาประมาณ 400 ชม. ดังแสดงในรูปที่ 4.3 กล่าวคือระบบมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงสุดคิดเป็น 90.76 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4

จากประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าและการบำบัดน้ำเสียเมื่อทำการทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์ภายใต้สภาวะการทดลองแบบเบแททซ์ ผลการทดลองยืนยันได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวรูปแบบไหลขึ้นที่ออกแบบไว้มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดซีโอดีควบคู่ไปด้วยกัน ในการทดลองต่อไปจึงทำการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพห้องเดี่ยวแบบต่อเนื่อง เพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะนำไปพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดซีโอดีด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวรูปแบบไหลขึ้น โดยได้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดและบำบัดน้ำเสียได้ดี



รูปที่ 4.3 การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ระหว่างการเดินระบบ
เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวแบบแบทช์



รูปที่ 4.4 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว
ระหว่างการเดินระบบแบบแบทช์

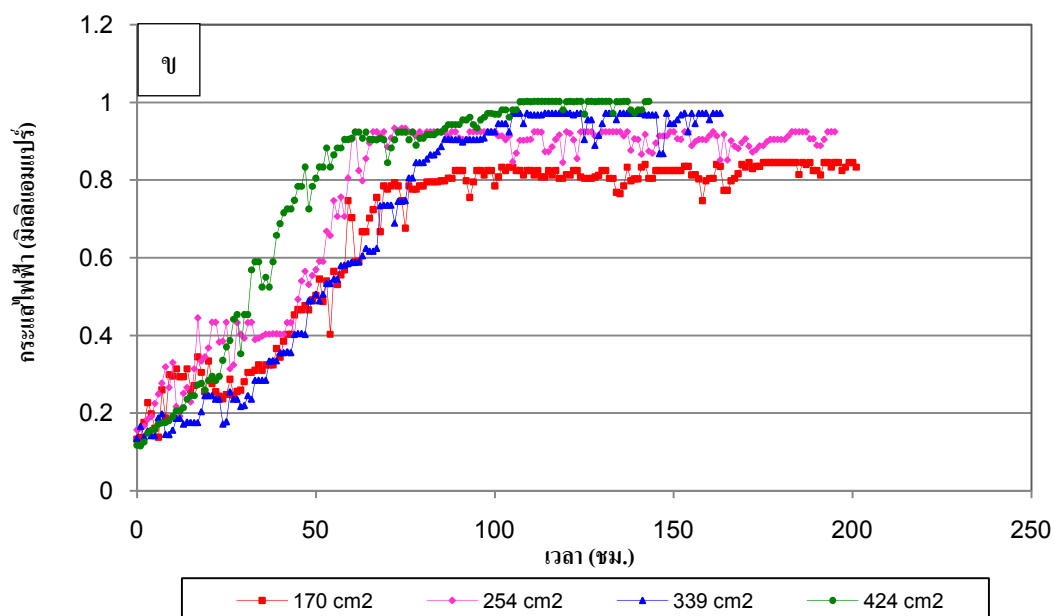
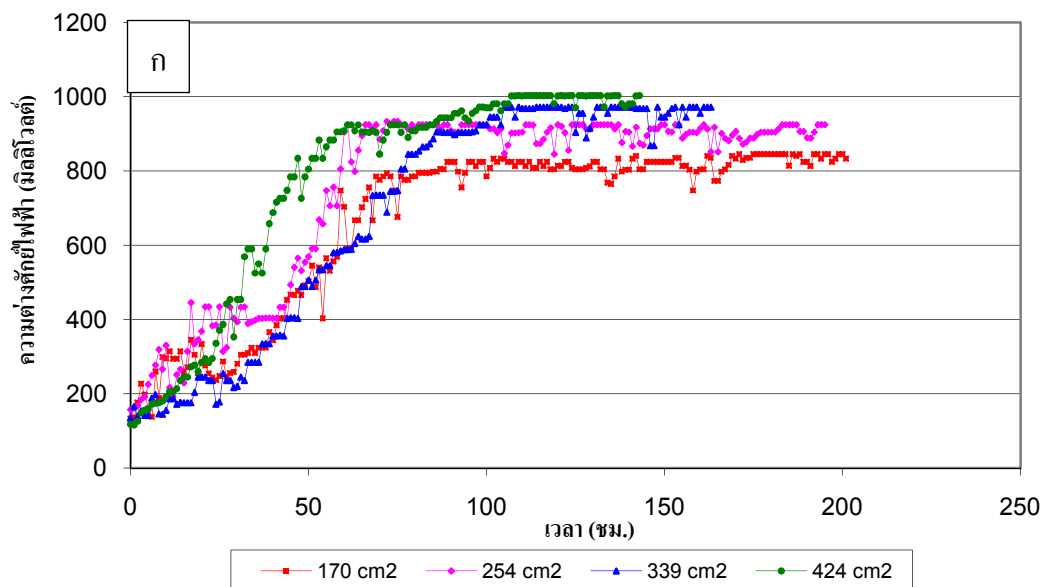
4.2 สถานะที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์

การทดลองในช่วงนี้เป็นการหาสถานะที่เหมาะสมในการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวรูปแบบไหลขึ้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดซีโอดีในน้ำเสีย ด้วยการเดินระบบการทดลองแบบต่อเนื่อง โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วนย่อย มีรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

4.2.1 ผลของขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด

จากการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวภายใต้สถานะที่แปรค่าขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดแตกต่างกัน 4 ขนาด ได้แก่ 170 (S) 254 (M) 339 (L) และ 424 (XL) ตร.ซม. โดยควบคุมปัจจัยอื่นๆ ให้คงที่ ได้แก่ ขนาดขั้วไฟฟ้าแคโทด ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด และความต้านทานภายนอกระหว่างขั้วทั้งสองเท่ากับ 133 ตร.ซม. 30 ซม. และ 1 กิโลโอห์มตามลำดับ พบว่าได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5 นั่นคือแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าสำหรับทุกขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยภายหลังการเริ่มเดินระบบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ในช่วง 50 ชั่วโมงแรก เนื่องมาจากจุลินทรีย์เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ป้อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว โดยระหว่างที่เปลี่ยนสถานะการทดลองทำให้ต้องมีการทิ้งน้ำเสียบางส่วน จึงทำให้จุลินทรีย์อาจหลุดออกไปจากระบบ จึงทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นเกิดขึ้นใหม่จากค่าต่ำไปค่าสูง โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่สถานะที่มีแนวโน้มคงที่หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 100 ชม. ซึ่งเป็นช่วงสภาวะคงตัวของระบบ โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่ผลิตได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เพิ่มขึ้น คือมีค่าเท่ากับ 821 ± 20.16 904 ± 20.57 958 ± 24.58 และ 994 ± 13.07 มิลลิโวลต์ สำหรับขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนด 170 (S) 254 (M) 339 (L) และ 424 (XL) ตร.ซม. ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการสะสมของจุลินทรีย์ที่บริเวณขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็นจำนวนมาก จนเกิดเป็นการเติบโตแบบไบโอฟิล์มที่ขั้วไฟฟ้าแอโนด โดยภายในไบโอฟิล์มจะมีการอาศัยอยู่ร่วมกันของกลุ่มจุลินทรีย์หลากหลายชนิด เช่น *Geobacter* ซึ่งสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะไร้อากาศภายในระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวโดยน้ำเสียในระบบมีค่าไออาร์พีเท่ากับ -390 ± 17.67 มิลลิโวลต์ ซึ่งจุลินทรีย์ดังกล่าวจะช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ จนเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมาเป็นจำนวนมาก ซึ่งอิเล็กตรอนดังกล่าวจะถูกส่งออกสู่ภายนอกเซลล์ทำให้มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าแอโนดและไหลผ่านวงจรภายนอกไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทดมากขึ้น (Franks และ Nevin, 2010) ดังนั้น

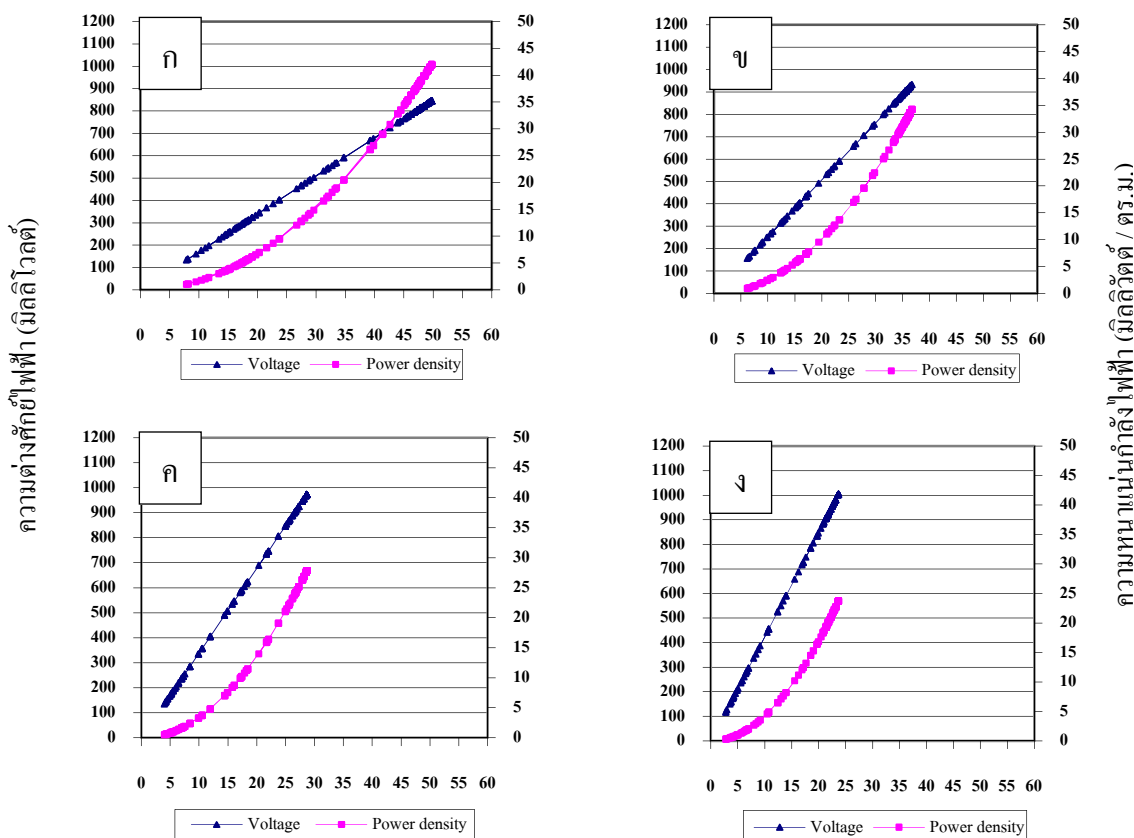
จึงอาจกล่าวได้ว่า ขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสมสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีวะแบบห้องเดี่ยวรูปแบบไหลขึ้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 424 ตร.ซม. โดยคิดเป็นค่าปริมาณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดได้เท่ากับ 0.994 ± 0.01 มิลลิแอมแปร์



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) และกระแสไฟฟ้า (ข) เมื่อแปรค่าขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดแตกต่างกัน 4 ขนาด

เมื่อทดลองเขียนกราฟเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว ที่ทำการแปรค่าขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดในสภาวะการทดลองแบบต่อเนื่องพบว่า ได้ผลดังรูปที่ 4.6 นั่นคือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นจะมีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า โดยเป็นผลมาจากการเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดมากขึ้นจะทำให้เกิดการกระจายตัวของกระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าอย่างสม่ำเสมอ เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่าความหนาแน่นไฟฟ้าต่อพื้นที่จึงมีค่าต่ำลง ซึ่งค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่ได้จากการแปรค่าขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดในงานวิจัยนี้ พบว่าสอดคล้องและไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดลองของ Dewan และคณะ (2008) ที่พบว่าขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดเท่ากับ 1.92 ตร.ซม. ซึ่งเป็นค่าที่น้อยที่สุดที่ใช้ในการทดลอง เมื่อนำมาคำนวณเป็นค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดจะมีค่าเท่ากับ 0.329 มิลลิวัตต์/ตร.ซม. แต่เมื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดเป็น 155 ตร.ซม. ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่อพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดที่คำนวณได้จะมีค่าต่ำลง โดยมีค่าเท่ากับ 0.141 มิลลิวัตต์/ตร.ซม.

โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวสามารถผลิตได้ เมื่อทำการแปรค่าขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนด 4 ขนาด ผลการทดลองดังตารางที่ 4.1 พบว่าขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดเท่ากับ 424 ตร.ซม. ให้ค่าต่างๆ ดีที่สุด คือค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 994 ± 13.07 มิลลิโวลต์ 23.45 ± 0.31 มิลลิแอมแปร์/ตร.ม. และ 23.32 ± 0.61 มิลลิวัตต์/ตร.ม. ตามลำดับ โดยแนวโน้มของผลการทดลองสื่อให้เห็นว่า ขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดยิ่งมากจะยิ่งให้ผลดี ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าหากทำการเพิ่มขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดให้ใหญ่ขึ้น (ใหญ่กว่าค่าที่ใช้ในการทดลองนี้) ก็อาจส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย โดยอาจเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดจะมีผลทำให้มีพื้นที่ผิวในการยึดเกาะของจุลินทรีย์ได้สูงขึ้น



ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์ / ตร.ม.)

รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

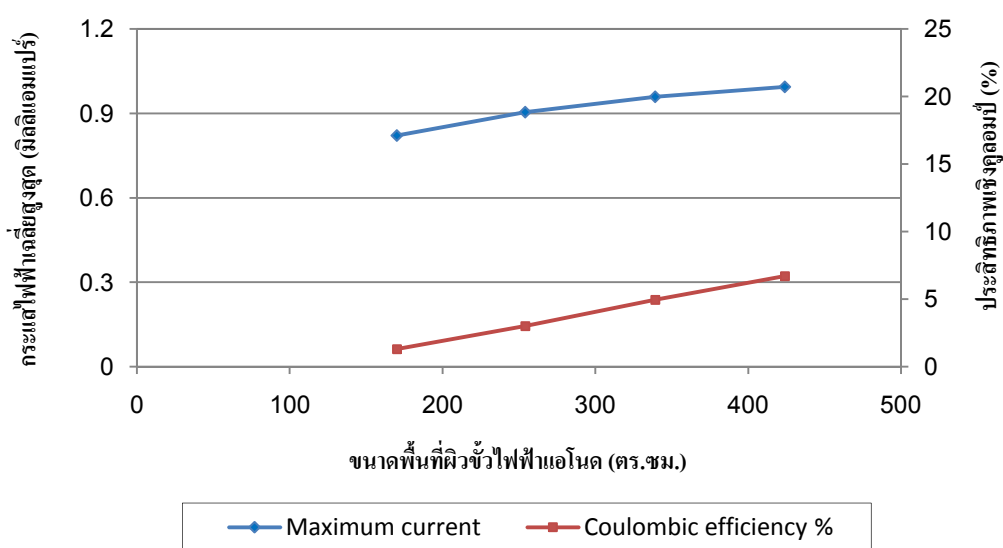
และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเมื่อแปรค่าขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าเอโนดแตกต่างกัน

- (ก) ขั้วไฟฟ้าเอโนดขนาด 170 ตร.ซม. (S) (ข) ขั้วไฟฟ้าเอโนดขนาด 254 ตร.ซม. (M)
- (ค) ขั้วไฟฟ้าเอโนดขนาด 339 ตร.ซม. (L) (ง) ขั้วไฟฟ้าเอโนดขนาด 424 ตร.ซม. (XL)

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าจากการแปรค่าขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าเอโนดแตกต่างกัน

ค่าทางไฟฟ้า	ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าเอโนด (ตร.ซม.)			
	170 (S)	254 (M)	339 (L)	424 (XL)
ความต่างศักย์ไฟฟ้า (มิลลิโวลต์)	821 ± 20.16	904 ± 20.57	958 ± 24.58	994 ± 13.07
กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	0.821 ± 0.02	0.904 ± 0.02	0.958 ± 0.02	0.994 ± 0.01
กำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์)	0.67 ± 0.03	0.82 ± 0.04	0.92 ± 0.05	0.99 ± 0.03
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์/ตร.ม.)	48.27 ± 1.19	35.59 ± 0.81	28.26 ± 0.73	23.45 ± 0.31
ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์/ตร.ม.)	39.64 ± 1.92	32.19 ± 1.45	27.09 ± 1.35	23.32 ± 0.61

เมื่อทำการประเมินประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์ (Coulombic efficiency) ระหว่างการแปรค่าขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดแตกต่างกัน 4 ขนาด ได้แก่ 170 (S) 254 (M) 339 (L) และ 424 (XL) ตร.ซม. ในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว ผลการทดลองดังรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อขนาดขั้วไฟฟ้าแอโนดเพิ่มมากขึ้นย่อมส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์แสดงถึง ปริมาณอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียที่ถูกเปลี่ยนไปเป็นกระแสไฟฟ้าเมื่อคิดเป็นจำนวนเปอร์เซ็นต์ ดังนั้นค่านี้ยิ่งมีค่ามากจะยิ่งดี นั่นหมายถึง อิเล็กตรอนจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ถูกนำไปใช้ในการสร้างกระแสไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์จะแปรผันตรงกับค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดและขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนด จากการทดลองนี้พบว่าพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดขนาดใหญ่ที่สุดที่ใช้ในการทดลอง (XL) ซึ่งมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 424 ตร.ซม. มีค่าประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์และค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 6.71 เปอร์เซ็นต์ และ 0.994 ± 0.01 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกใช้ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดค่านี้สำหรับการทดลองในช่วงต่อไป



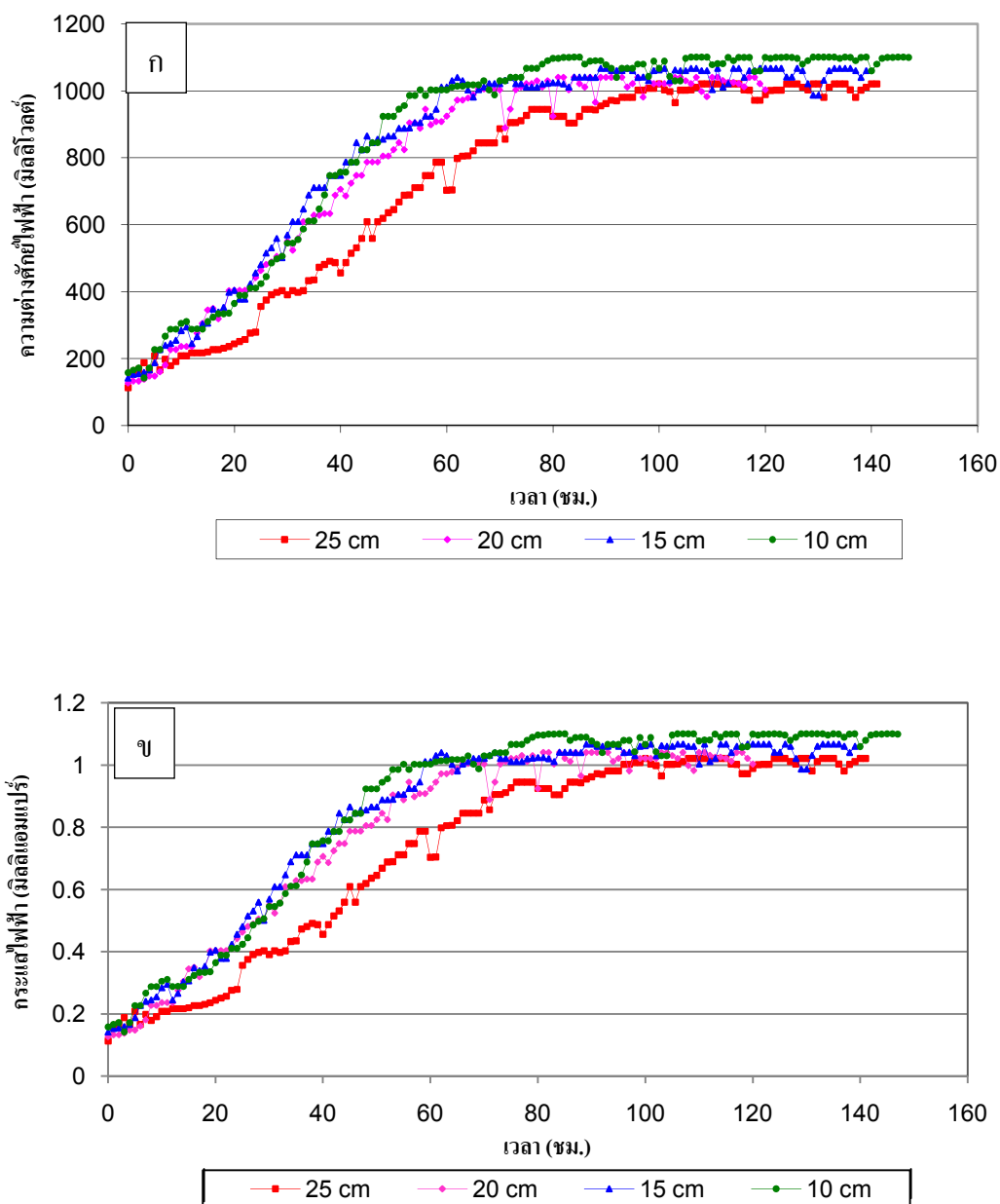
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดกับประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์เมื่อแปรค่าขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดต่างๆ กัน 4 ขนาด

4.2.2 ผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด

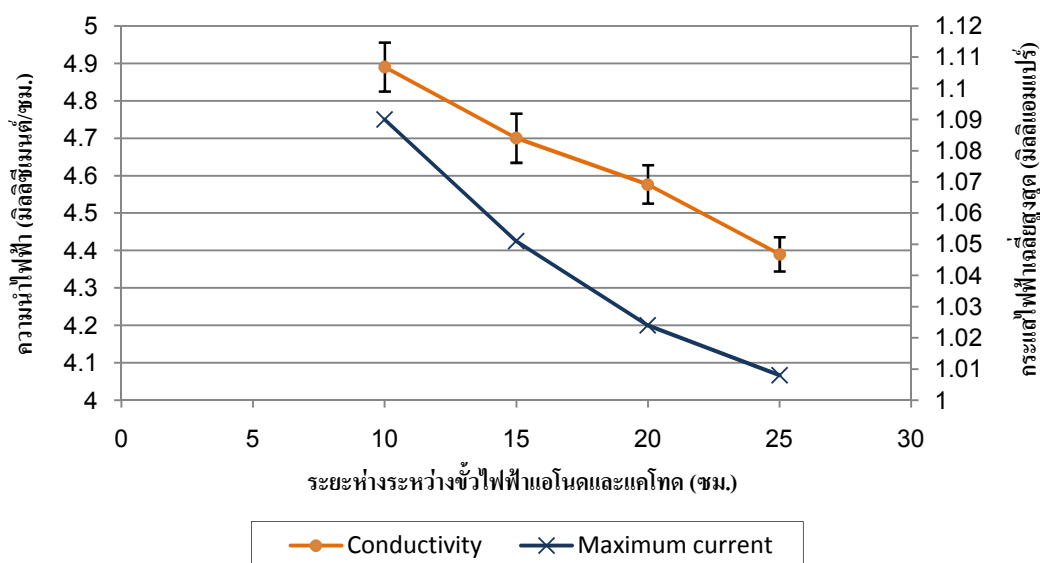
เมื่อทำการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพห้องเดี่ยวแบบต่อเนื่อง โดยแปรค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดที่แตกต่างกัน 4 ระยะ ได้แก่ 10 15 20 และ 25 ซม. โดยใช้ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดที่ได้จากการทดลองที่ 2.1 คือเท่ากับ 424 ตร.ซม. และควบคุมปัจจัยอื่นๆ ให้คงที่ได้แก่ ขนาดขั้วไฟฟ้าแคโทด และความต้านทานภายนอกระหว่างขั้วไฟฟ้า เท่ากับ 133 ตร.ซม. และ 1 กิโลโอห์ม ตามลำดับ พบว่าได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.8 ทุกระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดที่ทำการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าคล้ายคลึงกัน นั่นคือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ในระยะแรกในช่วง 50 - 80 ซม. จนเข้าสู่สภาวะที่มีแนวโน้มคงที่หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 80 ซม. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดมีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ $1,008 \pm 15.61$ $1,024 \pm 15.74$ $1,051 \pm 22.83$ และ $1,090 \pm 18.74$ มิลลิโวลต์ เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดลดลงจาก 25 20 15 และ 10 ซม. ตามลำดับ นั่นคือยิ่งระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดน้อยลง จะส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจาก ระยะห่างระหว่างขั้วดังกล่าวถ้าหากสั้นก็อาจส่งผลต่อการส่งถ่ายโปรตอนจากขั้วไฟฟ้าแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าแคโทดให้เกิดขึ้นได้เร็วขึ้น จึงทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย (Liu และคณะ, 2008) โดยสำหรับการทดลองนี้ค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดที่เหมาะสม คือ 10 ซม. คิดเป็นค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่ผลิตได้เท่ากับ 1.090 ± 0.02 มิลลิแอมแปร์

เมื่อทำการวัดค่าความนำไฟฟ้าของน้ำเสียที่สภาวะการทดลองต่างๆ เมื่อแปรค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดแตกต่างกัน 4 ระยะ ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 พบว่ายิ่งระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดน้อย หรือขั้วไฟฟ้าทั้งสองอยู่ใกล้กันมากขึ้น จะส่งผลให้น้ำเสียมีแนวโน้มของค่าความนำไฟฟ้าสูงขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.89 ± 0.07 มิลลิซีเมนส์/ซม. สำหรับงานวิจัยนี้เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดเท่ากับ 10 ซม. ซึ่งเหตุผลอาจเนื่องมาจากเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดลดลง ทำให้ระยะทางในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสั้นลง การส่งผ่านอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้าจึงเกิดขึ้นได้ดี เป็นผลทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย โดยคิดเป็นค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1.090 ± 0.02 มิลลิแอมแปร์ นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดลดลงตามลำดับจาก 25 20 15 และ 10 ซม. จะมีผลทำให้ค่าความต้านทานภายในลดลงเช่นกัน โดยมีค่าเท่ากับ 0.0134 0.0103 0.0075 และ 0.0048 โอห์ม ตามลำดับ โดยความต้านทานภายในเหล่านี้ได้จากการคำนวณตามสมการที่ 2.14 (บทที่ 2) ดังจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Cheng และ

Logan (2011) ที่ศึกษาผลของค่าความนำไฟฟ้าที่มีต่อกระแสไฟฟ้าจากการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิง จูลชีพแบบห้องเดี่ยว โดยใช้ขั้วไฟฟ้าทั้งสองที่ทำจากผ้าคาร์บอน ซึ่งผลการทดลองพบว่า เมื่อค่าความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 1.7 มิลลิซีเมนต์/ซม. เป็น 7.8 มิลลิซีเมนต์/ซม. อันเนื่องมาจากค่าความต้านทานภายในที่ลดลง จึงส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเพิ่มขึ้นเป็น 2.8 แอมแปร์/ตร.ม.

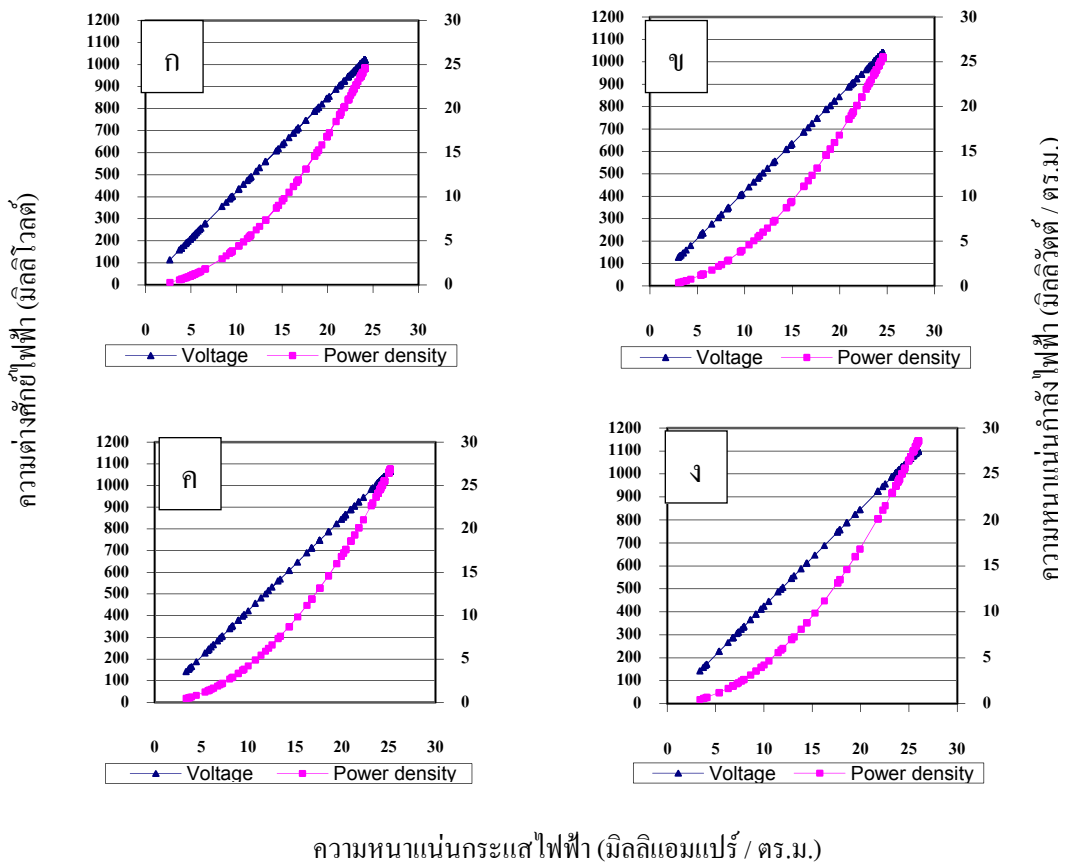


รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) และกระแสไฟฟ้า (ข) เมื่อแปรค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดแตกต่างกัน 4 ระยะ



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความนำไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด
ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอนโอดและแคโทดแตกต่างกัน 4 ระยะ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของการทดลองเมื่อแปรค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอนโอดและแคโทดแตกต่างกัน ผลการทดลองพบว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นจะมีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นด้วย ซึ่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผกผันตรงกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า โดยรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอนโอดและแคโทดลดลง ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่สามารถผลิตได้จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ $1,090 \pm 18.74$ มิลลิโวลต์ 25.70 ± 0.44 มิลลิแอมแปร์/ตร.ม. และ 28.01 ± 0.95 มิลลิวัตต์/ตร.ม. ตามลำดับ เมื่อทำการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยใช้ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอนโอดเท่ากับ 424 ตร.ซม. และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอนโอดและแคโทดเท่ากับ 10 ซม. ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 4.2



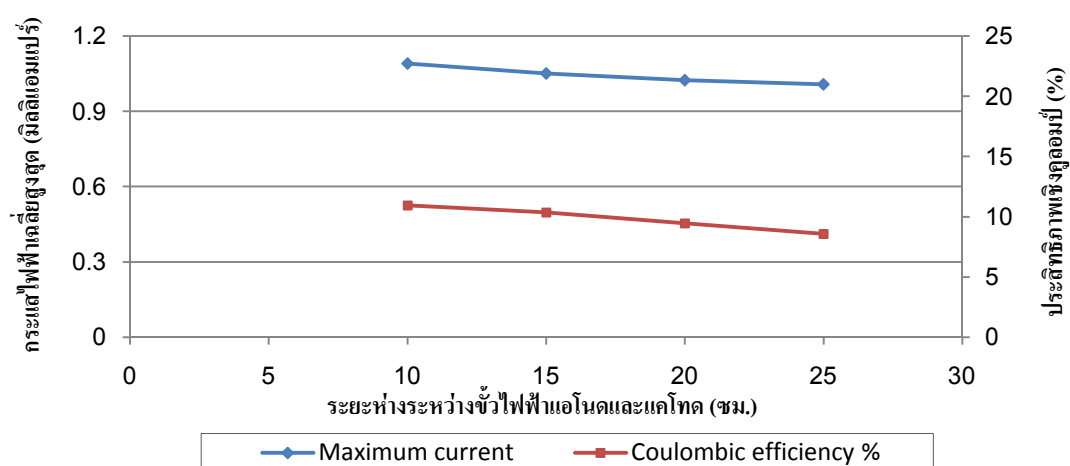
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเมื่อแปรค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดแตกต่างกัน

- (ก) ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 25 ซม.
- (ข) ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 20 ซม.
- (ค) ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 15 ซม.
- (ง) ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 10 ซม.

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าจากการแปรค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด

ค่าทางไฟฟ้า	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด (ซม.)			
	10	15	20	25
ความต่างศักย์ไฟฟ้า (มิลลิโวลต์)	1,090 ± 18.74	1,051 ± 22.83	1,024 ± 15.74	1,008 ± 15.61
กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	1.090 ± 0.02	1.051 ± 0.02	1.024 ± 0.02	1.008 ± 0.02
กำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์)	1.19 ± 0.04	1.11 ± 0.05	1.05 ± 0.03	1.02 ± 0.03
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์/ตร.ม.)	25.70 ± 0.44	24.79 ± 0.54	24.16 ± 0.37	23.77 ± 0.37
ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์/ตร.ม.)	28.01 ± 0.95	26.08 ± 1.11	24.75 ± 0.75	23.96 ± 0.74

ส่วนประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์จากการศึกษาผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดแตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 10 15 20 และ 25 ซม. พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดลดลง นอกจากจะมีผลทำให้ประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแล้วยังส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์สูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง โดยค่าประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์จะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 4.11 โดยที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดเท่ากับ 10 ซม. มีค่าประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์สูงสุดเท่ากับ 10.95 เปอร์เซ็นต์ และค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1.090 ± 0.02 มิลลิแอมแปร์ จึงเลือกใช้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดค่านี้สำหรับการทดลองในช่วงต่อไป

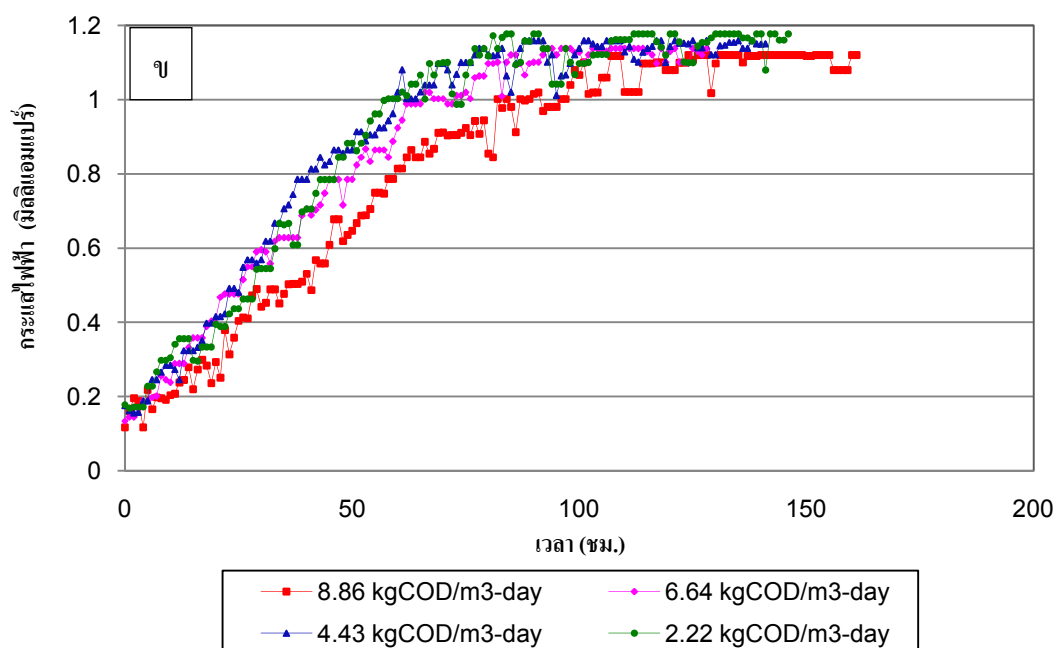
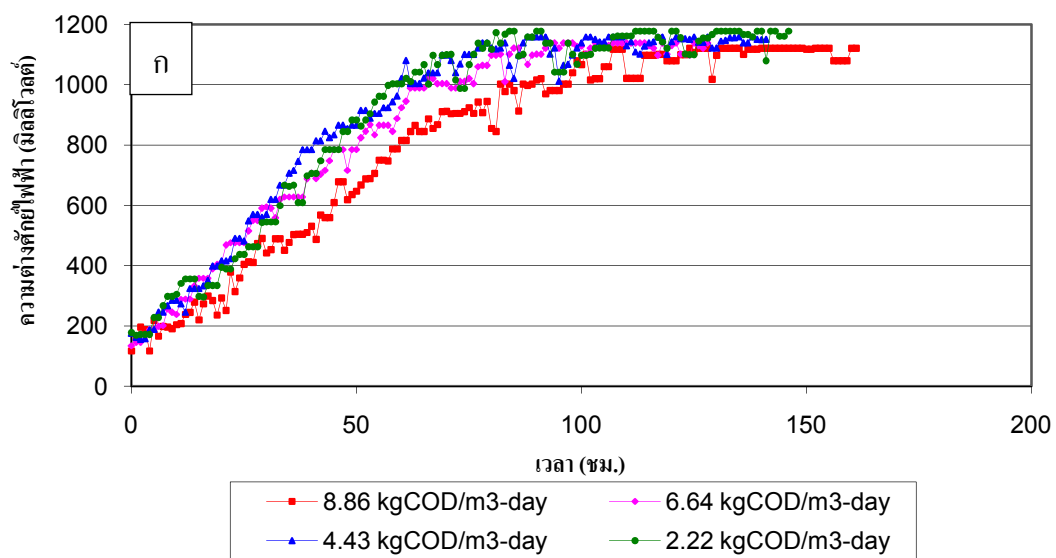


รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดกับประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์เมื่อแปรค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดแตกต่างกัน 4 ระยะ

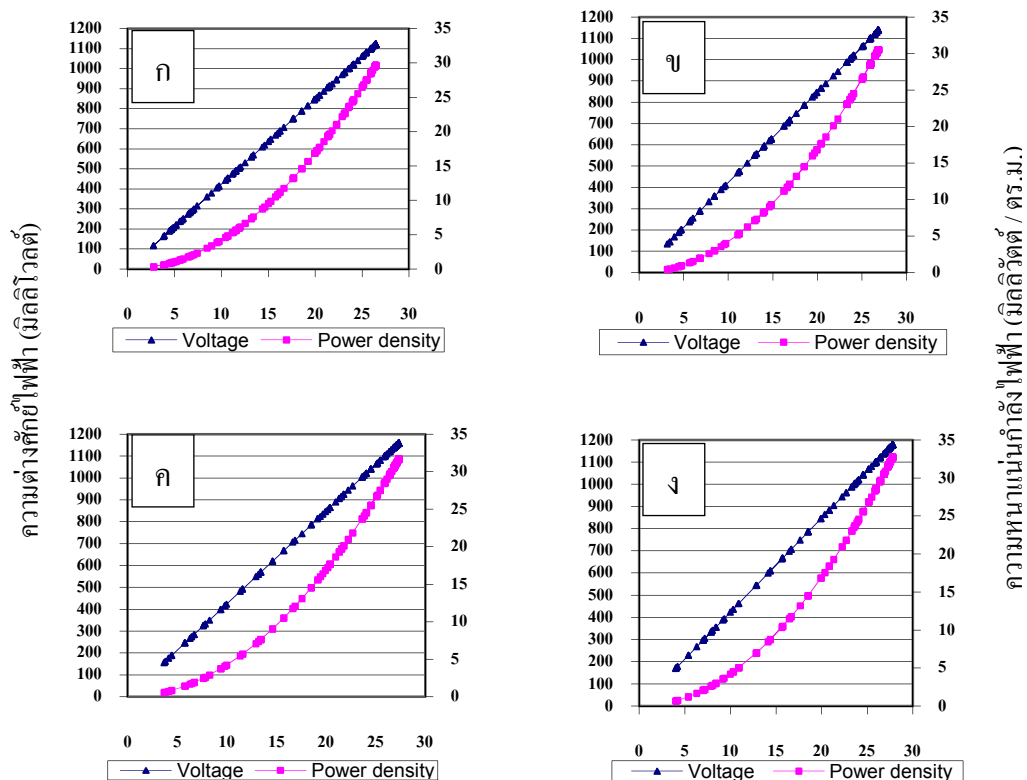
4.2.3 ผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

เมื่อทำการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพห้องเดี่ยวแบบต่อเนื่อง โดยแปรค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 2.22 4.43 6.64 และ 8.86 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน โดยการเปลี่ยนค่าอัตราการไหลของน้ำเสียเข้าระบบแตกต่างกันเท่ากับ 2 4 6 และ 8 มล./นาที ตามลำดับ ซึ่งควบคุมค่าซีไอดีคงที่เท่ากับ 5,000 มก./ล. โดยใช้ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดจากการทดลองที่ 2.1 เท่ากับ 424 ตร.ซม. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดจากการทดลองที่ 2.2 เท่ากับ 10 ซม. และควบคุมปัจจัยอื่นๆ ให้คงที่ได้แก่ ขนาดขั้วไฟฟ้าแคโทด และความต้านทานภายนอกระหว่างขั้วไฟฟ้า เท่ากับ 133 ตร.ซม. และ 1 กิโลโอห์ม ตามลำดับ พบว่าได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.12 นั่นคือ ภายหลังจากการเดินระบบจะพบการเพิ่มสูงขึ้นของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง 100 ชม. แรก จนเข้าสู่สภาวะที่มีแนวโน้มคงที่หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 100 ชม. ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการป้อนน้ำเสียเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่ต่างกัน จะไม่มีผลทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ผลิตได้แตกต่างกันมากนัก โดยอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ค่าต่ำมีแนวโน้มที่จะให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์สูง โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดมีค่าเท่ากับ $1,102 \pm 30.39$ $1,127 \pm 14.98$ $1,145 \pm 15.76$ และ $1,160 \pm 26.40$ มิลลิโวลต์ เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ลดลงจาก 8.86 6.64 4.43 และ 2.22 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าในรูปที่ 4.13 ดังจะเห็นได้ว่าเมื่อทำการแปรค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแตกต่างกัน ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนั้นจะมีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับการทดลองที่ผ่านมา โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า นั่นคือ ค่าต่างๆ เหล่านี้จะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ลดลง โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถผลิตได้มีค่าเท่ากับ $1,160 \pm 26.40$ มิลลิโวลต์ 27.36 ± 0.62 มิลลิแอมแปร์/ตร.ม. และ 31.76 ± 1.42 มิลลิวัตต์/ตร.ม. ตามลำดับ เมื่อใช้ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดเท่ากับ 424 ตร.ซม. กำหนดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดเท่ากับ 10 ซม. และควบคุมอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เข้าระบบเท่ากับ 2.22 กก. ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน ตามรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.12 การเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) และกระแสไฟฟ้า (ข) เมื่อแปรค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน 4 ค่า



ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์ / ตร.ม.)

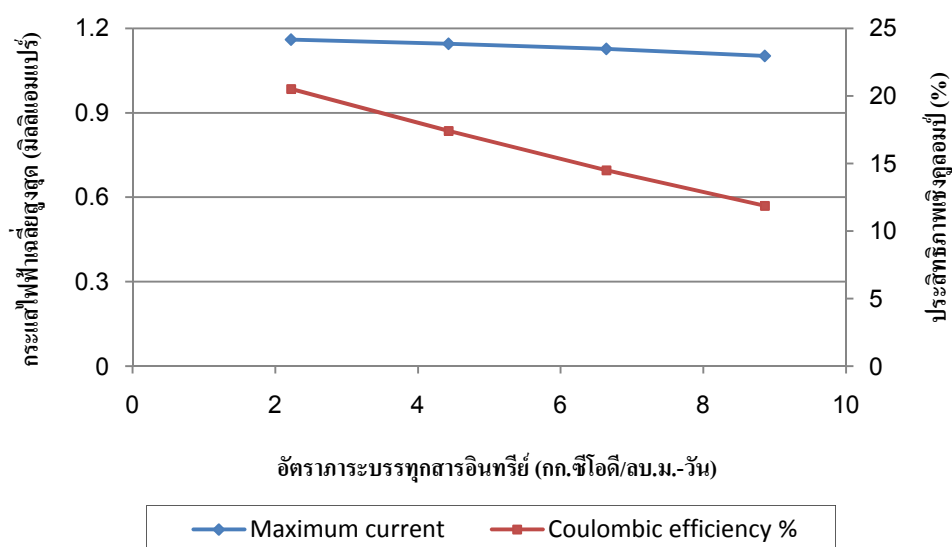
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเมื่อแปรค่าอัตราสารอินทรีย์เข้าระบบแตกต่างกัน

- (ก) อัตราสารอินทรีย์ 8.86 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน
- (ข) อัตราสารอินทรีย์ 6.64 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน
- (ค) อัตราสารอินทรีย์ 4.43 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน
- (ง) อัตราสารอินทรีย์ 2.22 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าทางไฟฟ้าจากการแปรค่าอัตราสารอินทรีย์

ค่าทางไฟฟ้า	อัตราสารอินทรีย์ (กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน)			
	2.22	4.43	6.64	8.86
ความต่างศักย์ไฟฟ้า (มิลลิโวลต์)	1,160 ± 26.40	1,145 ± 15.76	1,127 ± 14.98	1,102 ± 30.39
กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	1.160 ± 0.03	1.145 ± 0.02	1.127 ± 0.01	1.102 ± 0.03
กำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์)	1.35 ± 0.06	1.31 ± 0.04	1.27 ± 0.03	1.21 ± 0.07
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์/ตร.ม.)	27.36 ± 0.62	27.00 ± 0.37	26.57 ± 0.35	25.98 ± 0.72
ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์/ตร.ม.)	31.76 ± 1.42	30.91 ± 0.84	29.94 ± 0.79	28.64 ± 1.54

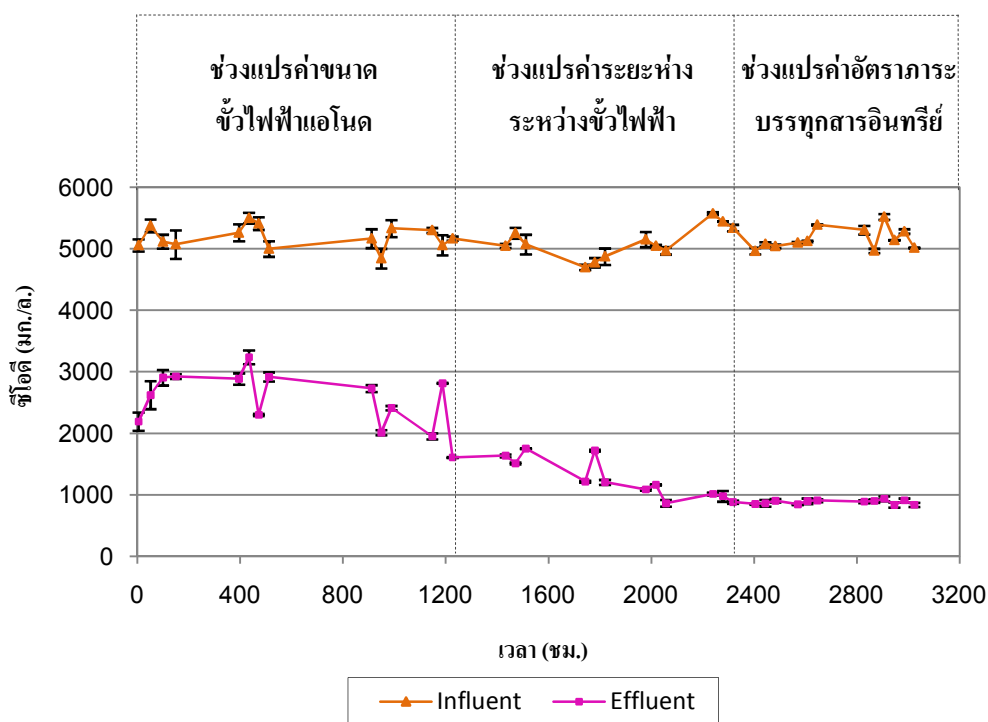
เมื่อพิจารณาค่าประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์พบว่า ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน 4 ค่า ได้แก่ 2.22 4.43 6.64 และ 8.86 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เมื่ออัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลอง อาจเนื่องมาจากเมื่อทำการป้อนน้ำเสียเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่ำ คือ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน เชื้อจุลินทรีย์ในระบบจะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ในอัตราที่สมดุล ทำให้อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกมาเมื่อเปรียบเทียบกับ การป้อนน้ำเสียที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ค่าอื่นๆ ที่สูงขึ้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่า อัตราการส่งถ่ายอิเล็กตรอนของการป้อนน้ำเสียที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ค่าต่ำไปยังขั้วไฟฟ้าแอโนดจะเกิดขึ้นได้มากและดีกว่า ทำให้มีแนวโน้มของการเกิดกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่า ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lorenzo และคณะ (2009) ที่ศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว พบว่าเมื่อลดค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จาก 32.2 เป็น 16 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ทำให้ประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์เพิ่มขึ้นจาก 63 เป็น 68 เปอร์เซ็นต์ โดยสำหรับงานวิจัยนี้ค่าประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์จะแปรผกผันกับค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่เข้าระบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยจะเห็นได้ว่า อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน จะมีค่าประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์สูงสุดเท่ากับ 20.51 เปอร์เซ็นต์ และค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1.160 ± 0.03 มิลลิแอมแปร์ จึงเลือกใช้ค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์นี้ในการเดินระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวต่อไป



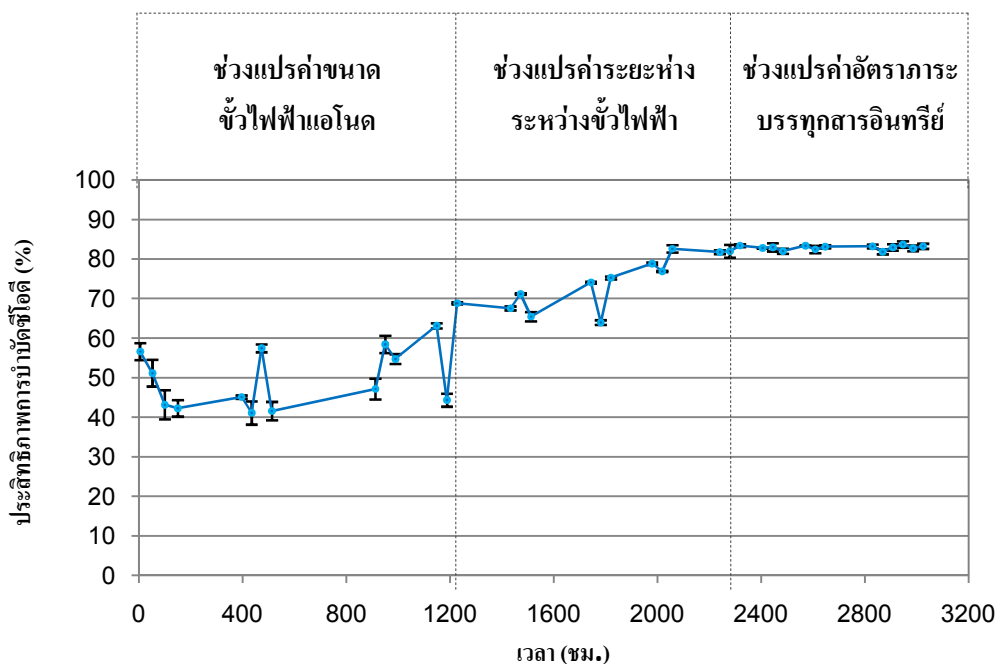
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดกับประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์ เมื่อแปรค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์แตกต่างกัน 4 ค่า

4.2.4 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

ในระหว่างการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวแบบต่อเนื่องทั้ง 3 สภาวะ ได้แก่ การแปรค่าขนาดขั้วไฟฟ้าแอโนด การแปรค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด และการแปรค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เป็นเวลาทั้งสิ้นประมาณ 3,000 ชม. นั้น พบว่า นอกจากระบบจะผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์แล้วยังสามารถบำบัดน้ำเสียควบคู่ไปได้อีกด้วย ซึ่งพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ในการทดลองสามารถบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นจากการที่จุลินทรีย์ในระบบย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ทำให้เกิดอิเล็กตรอนจำนวนมากถูกส่งผ่านและเคลื่อนที่ไปมาระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดส่งผลให้ค่าชีโอดีของน้ำเสียมีค่าลดลง ดังผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.15 โดยค่าชีโอดีของน้ำเสียเข้าระบบลดลงจาก 5,141 มก./ล. จนเหลือ 837 มก./ล. ซึ่งคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีสูงสุดของการทดลองได้เท่ากับ 83.72 เปอร์เซ็นต์ เมื่อการเดินระบบเข้าสู่ชั่วโมงที่ 2,946 ดังแสดงในรูปที่ 4.16



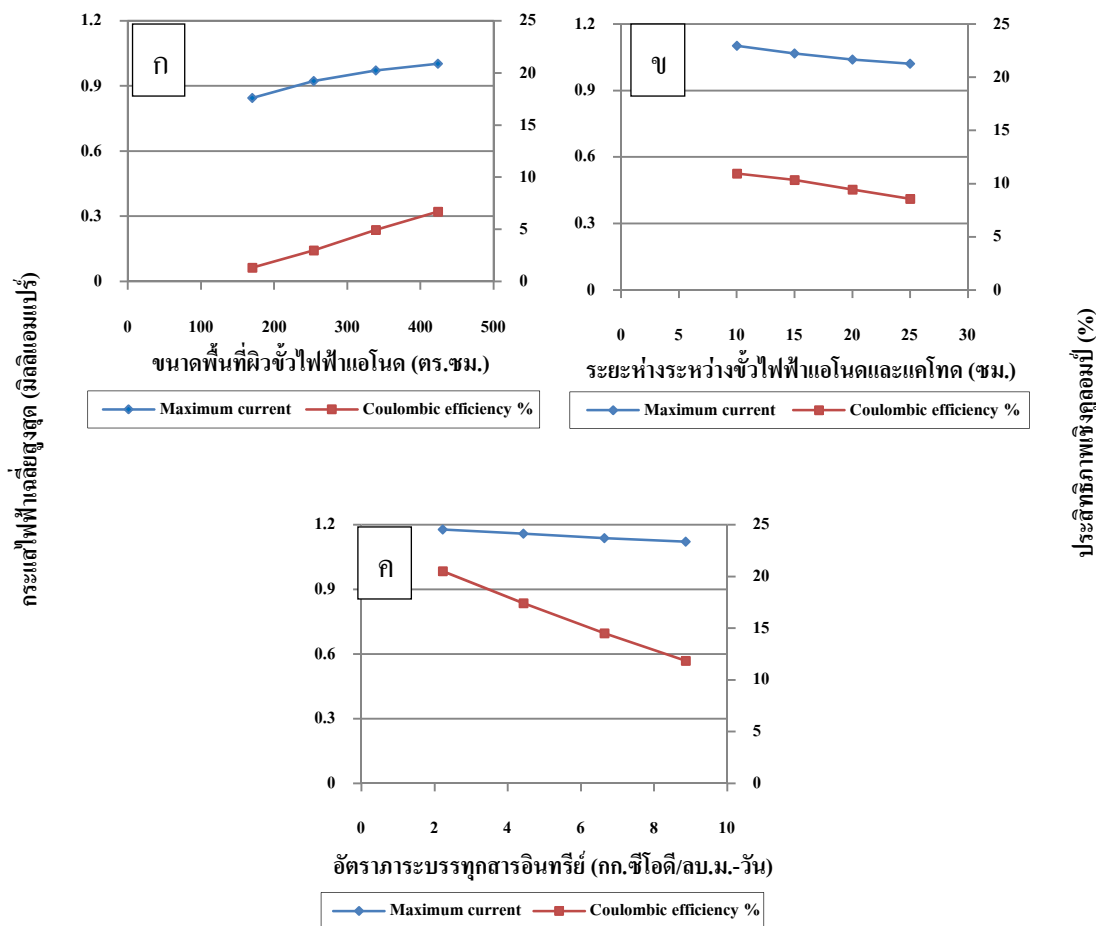
รูปที่ 4.15 การเปลี่ยนแปลงค่าชีโอดีของน้ำเสียสังเคราะห์ระหว่างเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวแบบต่อเนื่อง 3 สภาวะการทดลอง



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว ระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง 3 สภาวะการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งหมดที่ผ่านมาสามารถสรุปสภาวะที่ดีที่สุดของการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ได้ว่า ขนาดพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนด ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด และอัตราการประจุสารอินทรีย์ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 424 ตร.ซม. 10 ซม. และ 2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ ซึ่งสภาวะเหล่านี้ทำให้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นได้สูงสุดเมื่อทำการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบต่อเนื่อง โดยค่าสภาวะการทดลองทั้งสามสามารถนำมาประเมินประสิทธิภาพได้จากความสัมพันธ์ระหว่างการแปรค่าขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด การแปรค่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด และการแปรค่าอัตราการประจุสารอินทรีย์เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพเชิงकुलोอมป์และกระแสไฟฟ้าสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งพบว่า การแปรค่าอัตราการประจุสารอินทรีย์เป็นปัจจัยที่มีผลมากกว่าปัจจัยอื่นๆ เนื่องจากค่าประสิทธิภาพเชิงकुलोอมป์จะขึ้นกับอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบ โดยหากมีความเหมาะสมก็จะเกิดการถ่ายเทพลังงานไฟฟ้าหรือทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปมาระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดได้มากขึ้น ส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพเชิงकुलोอมป์สูง โดยที่อัตราการประจุสารอินทรีย์เท่ากับ 2.22

กค.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน มีค่าประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์สูงสุดเท่ากับ 20.51 เปอร์เซ็นต์ และค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 1.178 มิลลิแอมแปร์



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเมื่อทำการแปรค่าขนาดพื้นที่ขั้วแอโนด (ก) ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด (ข) และอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (ค)

4.3 ศึกษาการผลิตกระแสไฟฟ้าควบคู่กับการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการเดินระบบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียฟาร์มสุกรที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียที่เก็บตัวอย่างจากบ่อรวบรวมน้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดของฟาร์มสุกรขนาดกลางในจังหวัดนครปฐม (ประชาฟาร์ม) โดยเมื่อวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพเบื้องต้นพบว่า น้ำเสียมีสีเข้มเกือบดำ กลิ่นเหม็น มีลักษณะขุ่นเนื่องจากมีปริมาณของแข็งแขวนลอยอยู่มาก เมื่อเก็บตัวอย่างนำมาวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ทางเคมีใน

ห้องปฏิบัติการพบว่า ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.4 คือ มีค่าพีเอชเป็นกลาง (ประมาณ 7) มีค่าซีไอดีเท่ากับ $4,082 \pm 158.09$ มก./ล. มีค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยเท่ากับ $2,580 \pm 105.83$ มก./ล. และมีค่าความนำไฟฟ้าเท่ากับ 30.70 ± 0.03 มิลลิซีเมนต์/ซม.

ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์เบื้องต้นของน้ำเสียฟาร์มสุกรที่ใช้ในงานวิจัย

พารามิเตอร์	ปริมาณ	หน่วย
พีเอช	7.34 ± 0.04	-
ซีไอดี	$4,082 \pm 158.09$	มิลลิกรัมต่อลิตร
ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด	$2,580 \pm 105.83$	มิลลิกรัมต่อลิตร
ความนำไฟฟ้า	30.70 ± 0.03	มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

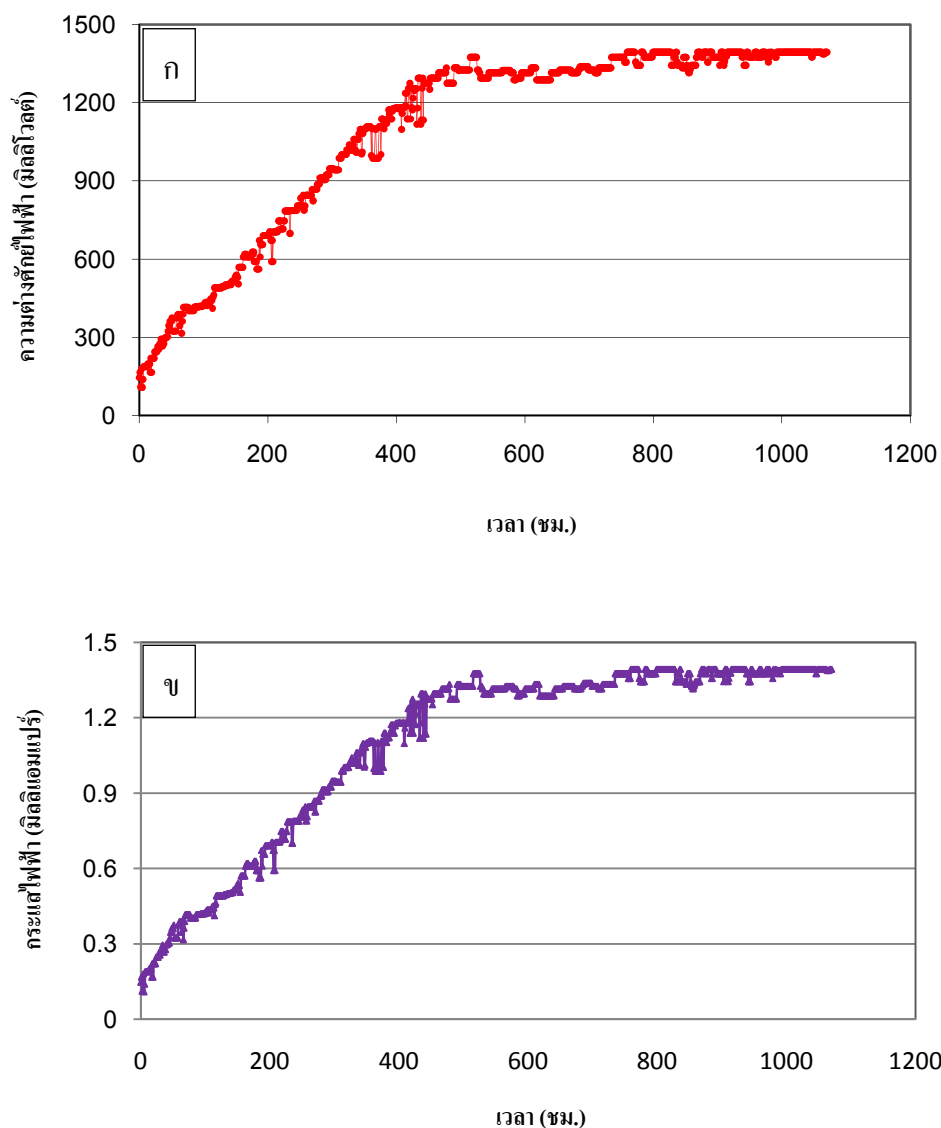
(หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์จำนวน 3 ครั้ง)

4.3.1 การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียว

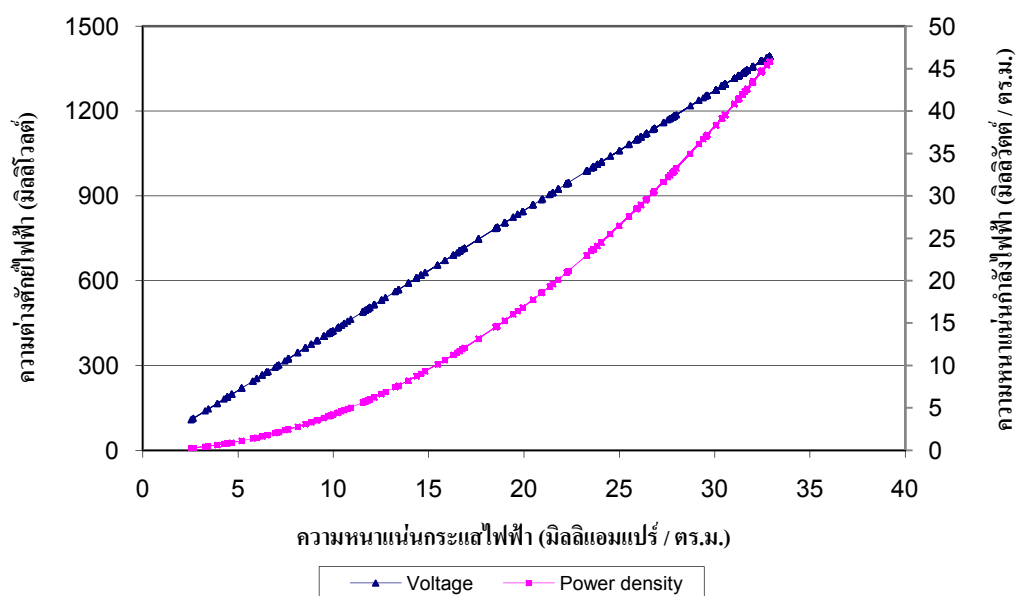
เมื่อทำการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพห้องเดียวแบบต่อเนื่องด้วยน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองส่วนที่ 2 ได้แก่ ใช้ขนาดขั้วไฟฟ้าแอโนดเท่ากับ 424 ตร.ซม. กำหนดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดเท่ากับ 10 ซม. และควบคุมค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ของน้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 2.22 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน พร้อมทั้งควบคุมปัจจัยอื่นๆ ให้คงที่ ได้แก่ ขนาดขั้วไฟฟ้าแคโทด และความต้านทานภายนอกระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 133 ตร.ซม. และ 1 กิโลโอห์ม ตามลำดับ เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าและประเมินประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีจากน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร ผลการทดลองพบว่า ในช่วง 200 - 400 ชั่วโมงแรกหลังการเริ่มเดินระบบค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนเข้าสู่สภาวะที่มีแนวโน้มคงที่หลังจากเวลาผ่านไปประมาณ 500 ชม. ดังแสดงในรูปที่ 4.18 ซึ่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพผลิตได้มีค่าเท่ากับ $1,356 \pm 35.49$ มิลลิโวลต์ ภายหลังจากผ่านไป 800 ชั่วโมงไปแล้ว โดยสามารถคิดเป็นปริมาณกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1.356 ± 0.04 มิลลิแอมแปร์ และมีประสิทธิภาพเชิงกลออมป์เท่ากับ 28.17 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้เหล่านี้กับค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ ที่ผลิตได้จากการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ภายใต้สภาวะเดียวกัน พบว่า น้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรมีศักยภาพในการนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวได้ดีกว่าน้ำเสียสังเคราะห์ในสัดส่วนค่าซีไอดี ที่ใกล้เคียงกัน นั่นคือให้ปริมาณความต่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า และ

ประสิทธิภาพเชิงกลอุมปีที่สูงกว่า ดังผลการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.5 นอกจากนี้การเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพยังสามารถบำบัดซีโอดีในน้ำเสียฟาร์มสุกรได้ โดยมีประสิทธิภาพคิดเป็น 92.54 เปอร์เซ็นต์

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเช่นเดียวกับการเดินระบบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเมื่อเดินระบบด้วยน้ำเสียฟาร์มสุกรจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า โดยค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดที่สามารถผลิตได้มีค่าเท่ากับ $1,356 \pm 35.49$ มิลลิโวลต์ 31.97 ± 0.84 มิลลิแอมแปร์/ตร.ม. และ 43.38 ± 2.26 มิลลิวัตต์/ตร.ม. ตามลำดับ ซึ่งหากเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาของ Min และคณะ (2005) ที่ทำการทดลองผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว พบว่า สามารถผลิตค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้ถึง 261 มิลลิวัตต์/ตร.ม. ซึ่งมีปริมาณสูงกว่างานวิจัยนี้ถึง 5 เท่า โดยสาเหตุอาจเนื่องมาจากงานวิจัยดังกล่าวทำการเดินระบบภายใต้สภาวะที่ควบคุมปัจจัยต่างๆ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ดีกว่า กล่าวคือ การใช้ผ้าคาร์บอนเคลือบแพลตทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าทั้งแอโนดและแคโทด ซึ่งแพลตทินัมที่เคลือบอยู่จะมีคุณสมบัติช่วยในการส่งถ่ายอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองได้ดีขึ้น ซึ่งผลงานวิจัยของ Cheng และคณะ (2006) ได้ช่วยยืนยันเหตุผลในประเด็นดังกล่าว โดยการเคลือบแพลตทินัมที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะทำให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจากขั้วไฟฟ้าที่ไม่เคลือบแพลตทินัม โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 538 เป็น 620 มิลลิวัตต์/ตร.ม. นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยของ Scott และ Murano (2007) ที่ทำการทดลองผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรเช่นกัน แต่ใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่ที่เชื่อมต่อกันด้วยแผ่นเมมเบรน พบว่างานวิจัยนี้สามารถผลิตค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้สูงกว่าถึง 9 เท่า โดยงานวิจัยดังกล่าวสามารถผลิตค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้เพียง 5 มิลลิวัตต์/ตร.ม. โดยอาจเนื่องมาจากการใช้แผ่นเมมเบรนเป็นเชื้อเลือกผ่านให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่จะมีผลทำให้เกิดความต้านทานภายในที่สูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว จึงทำให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าน้อยลง นอกจากนี้การใช้แผ่นเมมเบรนยังทำให้เกิดข้อจำกัดในการออกแบบขยายขนาดเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพให้ใหญ่ขึ้นอีกด้วย โดยเป็นผลมาจากปัจจัยในด้านราคาของแผ่นเมมเบรนที่มีราคาสูง



รูปที่ 4.18 การเปลี่ยนแปลงค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า (ก) และกระแสไฟฟ้า (ข) จากการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีวะแบบห้องเดี่ยวด้วยน้ำเสียฟาร์มสุกร



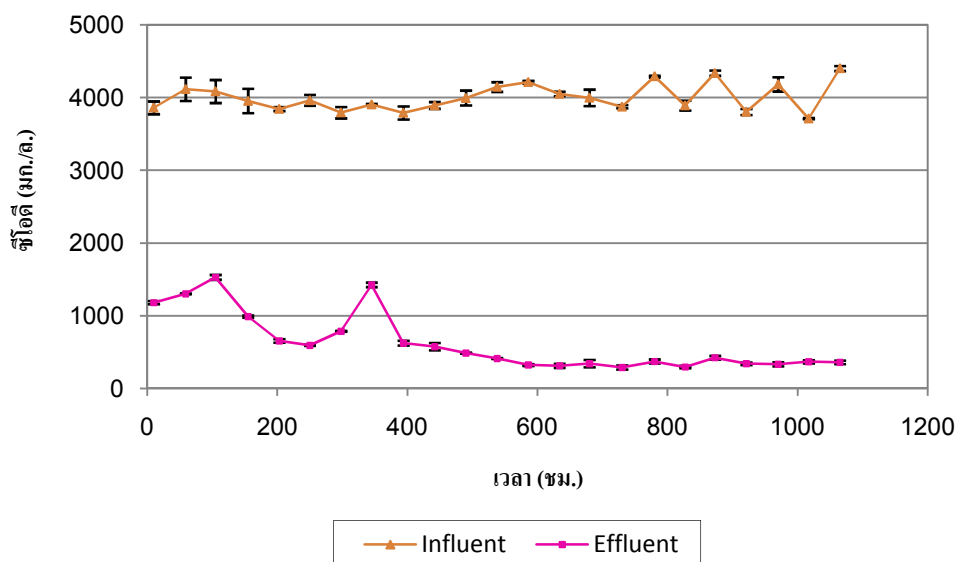
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเมื่อเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพด้วยน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกร

ตารางที่ 4.5 ปริมาณสูงสุดของพารามิเตอร์ต่างๆ ในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียฟาร์มสุกรเมื่อเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพห้องเดี่ยวแบบต่อเนื่อง

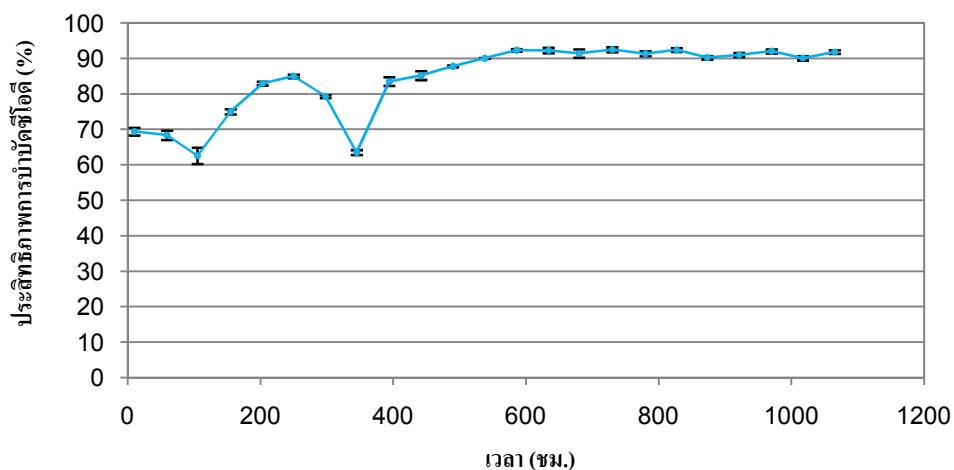
พารามิเตอร์	ปริมาณสูงสุด		หน่วย
	น้ำเสียสังเคราะห์	น้ำเสียฟาร์มสุกร	
ความต่างศักย์ไฟฟ้า	1,160 ± 26.40	1,356 ± 35.49	มิลลิโวลต์
กระแสไฟฟ้า	1.160 ± 0.03	1.356 ± 0.04	มิลลิแอมแปร์
กำลังไฟฟ้า	1.35 ± 0.06	1.84 ± 0.10	มิลลิวัตต์
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	27.36 ± 0.62	31.97 ± 0.84	มิลลิแอมแปร์/ตร.ม.
ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า	31.76 ± 1.42	43.38 ± 2.26	มิลลิวัตต์/ตร.ม.
ประสิทธิภาพเชิงคูลอมป์	20.51	28.17	เปอร์เซ็นต์
ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดี	83.72	92.54	เปอร์เซ็นต์

4.3.2 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

ในระหว่างการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพห้องเดี่ยวแบบต่อเนื่องด้วยน้ำเสียฟาร์มสุกร ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองส่วนที่ 2 พบว่าในระหว่างที่ทำการเดินระบบสามารถบำบัดค่าความสกปรกในน้ำเสียได้ควบคู่ไปกับการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ โดยซีโอดีในน้ำเสียฟาร์มสุกรที่มีค่าในช่วงประมาณ 4,000 มก./ล. สามารถถูกบำบัดได้อย่างรวดเร็วตั้งแต่ช่วงแรกของการทดลอง คือ มีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีถึง 70 เปอร์เซ็นต์ โดยประสิทธิภาพดังกล่าวมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเดินระบบต่อเนื่อง จนมีค่าสูงสุดมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 600 เป็นต้นไป ดังผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.20 และ 4.21 นั่นคือจุลินทรีย์ในระบบจะใช้สารอินทรีย์ในน้ำเสียเพื่อการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว โดยย่อยสลายและผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว (Jang และคณะ, 2004) ซึ่งจากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีกับการเดินระบบด้วยน้ำเสียสังเคราะห์พบว่า การเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยใช้น้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรนั้น ระบบจะมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีที่สูงกว่า ซึ่งสอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพเชิงकुलोอมป์ที่เกิดขึ้นมากกว่า แสดงให้เห็นว่าค่าซีโอดีในน้ำเสียฟาร์มสุกรนั้นสามารถเปลี่ยนไปเป็นกระแสไฟฟ้าได้มากกว่า ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีสูงสุดคิดเป็น 92.54 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.20 การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีของน้ำเสียฟาร์มสุกรระหว่างการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวแบบต่อเนื่อง



รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีจากน้ำเสียฟาร์มสุกรของเชลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

เมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากเชลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ พบว่าได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดดังแสดงในตารางที่ 4.6 นั่นคือในแต่ละระบบของเชลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะให้ผลการทดลองที่ต่างกันมาก โดยสาเหตุดังกล่าวอาจเป็นผลมาจากความแตกต่างกันของปัจจัยหลายด้านในการทดลอง ได้แก่ ประเภทและองค์ประกอบของน้ำเสียที่แตกต่างกัน สภาพะที่ทำการเดินระบบต่างกัน ตลอดจนประเภทและรูปแบบของเชลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ต่างกัน เป็นต้น

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดจากการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพของงานวิจัยอื่นๆ กับงานวิจัยนี้

ประเภทน้ำเสีย	ชนิดเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ	กำลังไฟฟ้าสูงสุด	เอกสารอ้างอิง
น้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลทราย	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบภาชนะใบเดียว	170 mW/m ²	He และคณะ, 2005
น้ำเสียฟาร์มสุกร	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่ด้านข้างแคโทดสัมผัสกับอากาศ	261 mW/m ²	Min และคณะ, 2005
น้ำตาลกลูโคส	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่ไม่มีการเติมเมดิเอเตอร์	0.56 W/m ²	Moon และคณะ, 2006
น้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลทราย	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	6.73 mW/m ²	Ghangrekar และ Shinde, 2006
น้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่	5 mW/m ²	Scott และ Murano, 2007
น้ำเสียโรงงานผลิตเบียร์	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่ด้านข้างแคโทดสัมผัสกับอากาศ	264 mW/m ²	Wen และคณะ, 2009
อะซิเตท	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่ที่ต่อเชื่อมด้วยเมมเบรน	8 mW/m ²	An และคณะ, 2009
น้ำเสียกระบวนการผลิตแป้ง	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่ด้านข้างแคโทดสัมผัสกับอากาศ	239.40 mW/m ²	Lu และคณะ, 2009
น้ำตาลทราย	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	36.72 W/m ³	Behera, 2009
น้ำเสียชุมชน	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	8.3 W/m ³	Cheng และ Logan, 2011
น้ำเสียชุมชน	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	33 mW/m ²	Cheng และคณะ, 2011
น้ำตาลกลูโคส	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	37.40 mW/m ²	Zhu และคณะ, 2011
น้ำเสียสังเคราะห์จากน้ำตาลทราย	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	31.76 mW/m ²	ผลการวิจัยนี้
น้ำเสียฟาร์มสุกร	เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว	43.38 mW/m ²	ผลการวิจัยนี้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดน้ำเสียด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่ออกแบบให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ในช่วงแรกจะทำการเดินระบบการทดลองแบบเบทซ์ด้วยน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อทดสอบสมรรถภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ และทำการหาค่าสภาวะต่างๆ ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง จากนั้นจะทำการศึกษาโดยใช้น้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรเพื่อระบุนิสัยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าและการบำบัดชีโอดีด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองด้วยน้ำเสียสังเคราะห์ โดยสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวที่ได้ออกแบบพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ มีศักยภาพที่จะผลิตกระแสไฟฟ้าควบคู่กับการบำบัดน้ำเสีย

5.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวชนิดไหลขึ้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดชีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ คือ ขนาดขั้วไฟฟ้าแอโนด ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด และอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ของน้ำเสียเข้าระบบ โดยพบว่า ค่าที่เหมาะสมคือ 424 ตร.ซม. 10 ซม. และ 2.22 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน ตามลำดับ ซึ่งที่สภาวะดังกล่าวเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดได้เท่ากับ 1.160 ± 0.03 มิลลิแอมแปร์ มีประสิทธิภาพเชิงกลอุมป์เท่ากับ 20.51 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีสูงสุดคิดเป็น 83.72 เปอร์เซ็นต์

5.1.3 น้ำเสียฟาร์มสุกรมีศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว โดยมีค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 1.356 ± 0.04 มิลลิแอมแปร์ และมีประสิทธิภาพเชิงกลอุมป์เท่ากับ 28.17 เปอร์เซ็นต์ โดยระหว่างการผลิตกระแสไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถบำบัดน้ำเสียควบคู่ไปด้วย โดยมีประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีสูงสุดคิดเป็น 92.54 เปอร์เซ็นต์

5.1.4 เมื่อเปรียบเทียบค่าปริมาณทางไฟฟ้าต่างๆ ที่ผลิตได้จากการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียฟาร์มสุกรพบว่า น้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรมีศักยภาพในการนำไปใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงกว่า อีกทั้งยังสามารถบำบัดชีโอดีควบคู่ไปได้อีกทางหนึ่งด้วย จึงเป็นแนวทางเลือกหนึ่งที่เหมาะสมในการจัดการน้ำเสียฟาร์มสุกร

5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรมีการศึกษาผลของปัจจัยอื่นๆ เพิ่มเติม เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียว ดังนี้

1. การเพิ่มพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทดเพื่อทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้ามากขึ้น
2. การพิจารณาเลือกชนิดวัสดุที่นำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้าแอโนดและขั้วไฟฟ้าแคโทด
3. การใช้สารเมดิเอเตอร์ในการช่วยส่งผ่านอิเล็กตรอนไปที่บริเวณขั้วไฟฟ้าแอโนด
4. การต่อชุดเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเพิ่มในระหว่างการเดินระบบเพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้า
5. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมและการเพิ่มประสิทธิภาพในการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดน้ำเสียจากน้ำเสียฟาร์มสุกร

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

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

กันยรัตน์ โหละสุด, ประสาท โปธินุ่มแดง, ทวิทย์ จันทรัสด, กิตติมา งามสาย และสุทธิพร วารีสูงเนิน. การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 17, 2550.

กิตติมา งามสาย, ทวิทย์ จันทรัสด, เกียรติศักดิ์ คมวัชระ และกันยรัตน์ โหละสุด. ผลของค่าซีโอดีต่อค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 18, 2551.

ทวิทย์ จันทรัสด, กิตติมา งามสาย, ประสงค์ วงศ์วิชา และกันยรัตน์ โหละสุด. ผลของการจัดเรียงเซลล์ต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่. ใน การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, 2550.

พีชรา วีระกะลัส. พลังงานและการเมแทบอลิซึม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2549.

มหาวิทยาลัยมหิดล. เซลล์เชื้อเพลิง. [ออนไลน์]. 2549. แหล่งที่มา:

http://mulinet6.li.mahidol.ac.th/cd-om/cd-rom0306/web/5fuel_kind6.html: [12 มกราคม 2550]

มันสิน ตันฑุลเวศม์. เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม. เล่ม 2, พิมพ์ครั้งที่ 1.

กรุงเทพฯ: แชน.อี.68 คอนซัลติงเอ็นจิเนียริ่ง, 2542.

สุทธิพร วารีสูงเนิน. การผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวโดยไม่ใช้เมดิเอเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2550.

สุภาภรณ์ ศุภวิทยานันท์. การผลิตไฮโดรเจนและกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียอุตสาหกรรมอาหาร, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.

ภาษาอังกฤษ

- An, J., Kim, D., Chun, Y., Lee, S.J., Ng, H.Y. and Chang, I.S., 2009. Floating-type microbial fuel cell (FT-MFC) for treating organic-contaminated water. Environmental Science Technology 43 : 1642-1647.
- APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. Washington, DC. : American Public Health association, 1998.
- Bard, A.J. and Faulkner, L.R. Electrochemical Methods : Fundamentals and Applications., New York : Wiley, 1980.
- Behera, M., Jana, P.S. and Ghangrekar, M.M., 2009. Performance evaluation of low cost microbial fuel cell fabricated using earthen pot with biotic and abiotic cathode. Bioresource Technology 101 : 1183-1189.
- Cheng, S., Liu, H. and Logan, B.E., 2006. Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure. Electrochemistry Communications 8 : 489-494.
- Cheng, S. and Logan, B.E., 2011. Increasing power generation for scaling up single-chamber air cathode microbial fuel cells. Bioresource Technology 102 : 4468-4473.
- Dewan, A., Beyenal, H. and Lewandowski, Z., 2008. Scaling up microbial fuel cells. Environmental Science Technology 42 : 7643-7648.
- Franks, A.E. and Nevin, K.P., 2010. Microbial fuel cells, a current review. Energies 3 : 899-919.
- Ghangrekar, M.M. and Shinde, V.B.. Wastewater treatment in microbial fuel cell and electricity generation : a sustainable approach. The 12th International Sustainable Development Research Conference. April 6-8, 2006, Hong Kong, pp.1-9.
- He, Z., Minteer, S.D. and Angenent, L.T., 2005. Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell. Environmental Science Technology 39 : 5262-5267.
- Jang, J.K., Pham, H., Chang, I.S., Kang, K.H., Moon, H., Cho, K.S. and Kim, B.H., 2004. Construction and operation of a novel mediator - and membrane – less microbial fuel cell. Process Biochemistry 89 : 1007 – 1012.
- 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, *Shewallnella putrefaciens*. Enzyme and Microbial Technology 30 : 145-152.

- Kim, J.R., Dec, J., Bruns, M.A. and Logan, B.E., 2008. Removal of odors from swine wastewater by using microbial fuel cells. Applied and Environmental Microbiology 74 : 2540-2543.
- Liu, H., Cheng, S., Huang, L. and Logan, B.E., 2008. Scale-up of membrane-free single-chamber microbial fuel cells. Journal of Power Sources 179 : 274-279.
- Logan, B.E. Microbial Fuel Cells. J. New Jersey: Wiley & Sons, 2008.
- Lorenzo, M.D., Scott, K., Curtis, T.P. and Head, I.M., 2009. Effect of increasing anode surface area on the performance of a single chamber microbial fuel cell. Chemical Engineering Journal 156 : 40-48.
- Lu, N., Zhou, S.G., Zhuang, L., Zhang, J.T. and Ni, J.R., 2009. Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology. Biochemical Engineering Journal 43 : 246-251.
- McCarty, P., 1964. Anaerobic Waste Treatment Fundamentals. J. Public Works 9 : 107-112.
- Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering Treatment and Reuse. 4th Ed. New York: McGraw-Hill, 2004.
- Mignone, A.N. Biological Inhibition / Toxicity Control In Municipal Anaerobic Digestion Facilities[Online]. 2005. Available from : [http://www.awpca.net/Biological Inhibition.pdf](http://www.awpca.net/Biological%20Inhibition.pdf) [2005, July]
- Min, B., Kim, J., Oh, S., Regan, J.M. and Logan, B.E., 2005. Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells. Water Research 39 : 4961-4968.
- Mohan, Y., Manoj Muthu Kumar, S. and Das, D., 2008. Electricity generation using microbial fuel cells. International Journal of Hydrogen Energy 33 : 423-426.
- Moon, H., Chang, I.S. and Kim, B.H., 2006. Continuous electricity production from artificial wastewater using a mediator-less microbial fuel cell. Bioresource Technology 97: 621-627.
- Nam, J.Y., Kim, H.W., Lim, K.H. and Shin, H.S., 2009. Effects of organic loading rates on the continuous electricity generation from fermented wastewater using a single-chamber microbial fuel cell. Bioresource Technology 101 : S33-S37.
- Oh, S.E. and Logan, B.E., 2005. Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies. Water Research 39: 4673-4682.

- Prasad, D., Sivaram, T.K., Berchmans, S. and Yegnaraman, V., 2006. Microbial fuel cell constructed with a micro-organism isolated from sugar industry effluent. Power Sources 160 : 991-996.
- Sangeun, O.H., Booki, M. and Logan, B.E., 2004. Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cell. Environmental Science Technology 38 : 4900-4904.
- Scott, K. and Murano, C., 2007. A study of a microbial fuel cell battery using manure sludge waste. Journal of Chemical Technology and Biotechnology 82 : 809-817.
- Scott, K., Rimbu, G.A., Katuri, K.P., Prasad, K.K. and Head, I.M., 2007. Application of modified carbon anodes in microbial fuel cells. Process Safety and Environmental Protection 85(B5) : 481-488.
- Shukla, A.K., Suresh, P. and Rajendran, A., 2004. Biological fuel cells and their applications. Current Science. 87 (August): 455-468.
- Speece, R.E. 1996. Anaerobic Technology for Industrial Wastewaters. Archae Press, Tennessee.
- Wen, Q., Wu, Y., Cao, D., Zhao, L. and Sun, Q., 2009. Electricity generation and modeling of microbial fuel cell from continuous beer brewery wastewater. Bioresource Technology 100 : 4171-4175.
- Yoo, K., Song, Y.C., Lee, S.K. and Paik, B.C., 2009. Characteristics of electricity generation using microbial fuel cell. The 15th Thailand-Korea Conference on Environmental Engineering 15 : 59-63.
- Zhu, F., Wang, W., Zhang, X. and Tao, G., 2011. Electricity generation in a membrane-less microbial fuel cell with down-flow feeding onto the cathode. Bioresource Technology 102 : 7324-7328.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

การทดลองส่วนที่ 1 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวในการผลิตกระแสไฟฟ้า
และบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ ก-1 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
จุลชีพแบบห้องเดียวด้วยการเดินระบบแบบเบทซ์

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)	
26/7/2553	0	142	0.14	0.02	11.36	1.61	
	1	192	0.19	0.04	15.36	2.95	
	2	118	0.12	0.01	9.44	1.11	
	3	176	0.18	0.03	14.08	2.48	
	4	225	0.23	0.05	18	4.05	
27/7/2553	5	276	0.28	0.08	22.08	6.09	
	6	316	0.32	0.10	25.28	7.99	
	7	358	0.36	0.13	28.64	10.25	
	8	374	0.37	0.14	29.92	11.19	
	9	428	0.43	0.18	34.24	14.65	
	10	435	0.44	0.19	34.8	15.14	
	11	437	0.44	0.19	34.96	15.28	
	12	345	0.35	0.12	27.6	9.52	
	13	315	0.32	0.10	25.2	7.94	
	14	313	0.31	0.10	25.04	7.84	
	15	324	0.32	0.10	25.92	8.40	
	16	314	0.31	0.10	25.12	7.89	
	17	324	0.32	0.10	25.92	8.40	
	18	324	0.32	0.10	25.92	8.40	
	19	433	0.43	0.19	34.64	15.00	
	20	314	0.31	0.10	25.12	7.89	
	21	316	0.32	0.10	25.28	7.99	
	22	313	0.31	0.10	25.04	7.84	
	23	353	0.35	0.12	28.24	9.97	
	24	353	0.35	0.12	28.24	9.97	
	25	350	0.35	0.12	28	9.80	
	26	350	0.35	0.12	28	9.80	
	27	334	0.33	0.11	26.72	8.92	
	28	334	0.33	0.11	26.72	8.92	
	29	319	0.32	0.10	25.52	8.14	
	28/7/2553	30	330	0.33	0.11	26.4	8.71
		31	324	0.32	0.10	25.92	8.40
		32	324	0.32	0.10	25.92	8.40
		33	319	0.32	0.10	25.52	8.14
34		324	0.32	0.10	25.92	8.40	
35		334	0.33	0.11	26.72	8.92	
36		332	0.33	0.11	26.56	8.82	

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบเบทซ์

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	37	315	0.32	0.10	25.2	7.94
	38	319	0.32	0.10	25.52	8.14
	39	314	0.31	0.10	25.12	7.89
	40	324	0.32	0.10	25.92	8.40
	41	314	0.31	0.10	25.12	7.89
	42	313	0.31	0.10	25.04	7.84
	43	314	0.31	0.10	25.12	7.89
	44	305	0.31	0.09	24.4	7.44
	45	300	0.30	0.09	24	7.20
	46	305	0.31	0.09	24.4	7.44
	47	310	0.31	0.10	24.8	7.69
	48	305	0.31	0.09	24.4	7.44
	49	363	0.36	0.13	29.04	10.54
	50	384	0.38	0.15	30.72	11.80
	51	393	0.39	0.15	31.44	12.36
	52	409	0.41	0.17	32.72	13.38
	53	412	0.41	0.17	32.96	13.58
29/7/2553	54	423	0.42	0.18	33.84	14.31
	55	423	0.42	0.18	33.84	14.31
	56	437	0.44	0.19	34.96	15.28
	57	453	0.45	0.21	36.24	16.42
	58	476	0.48	0.23	38.08	18.13
	59	491	0.49	0.24	39.28	19.29
	60	481	0.48	0.23	38.48	18.51
	61	501	0.50	0.25	40.08	20.08
	62	501	0.50	0.25	40.08	20.08
	63	468	0.47	0.22	37.44	17.52
	64	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	65	476	0.48	0.23	38.08	18.13
	66	474	0.47	0.22	37.92	17.97
	67	463	0.46	0.21	37.04	17.15
	68	454	0.45	0.21	36.32	16.49
	69	452	0.45	0.20	36.16	16.34
	70	435	0.44	0.19	34.8	15.14
	71	451	0.45	0.20	36.08	16.27
	72	453	0.45	0.21	36.24	16.42
	73	453	0.45	0.21	36.24	16.42
	74	453	0.45	0.21	36.24	16.42
	75	463	0.46	0.21	37.04	17.15
	76	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	77	481	0.48	0.23	38.48	18.51
30/7/2553	78	481	0.48	0.23	38.48	18.51

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบเบทซ์

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	79	510	0.51	0.26	40.8	20.81
	80	501	0.50	0.25	40.08	20.08
	81	619	0.62	0.38	49.52	30.65
	82	512	0.51	0.26	40.96	20.97
	83	501	0.50	0.25	40.08	20.08
	84	491	0.49	0.24	39.28	19.29
	85	501	0.50	0.25	40.08	20.08
	86	501	0.50	0.25	40.08	20.08
	87	525	0.53	0.28	42	22.05
	88	535	0.54	0.29	42.8	22.90
	89	550	0.55	0.30	44	24.20
	90	550	0.55	0.30	44	24.20
	91	550	0.55	0.30	44	24.20
	92	550	0.55	0.30	44	24.20
	93	550	0.55	0.30	44	24.20
	94	550	0.55	0.30	44	24.20
	95	550	0.55	0.30	44	24.20
	96	550	0.55	0.30	44	24.20
	97	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	98	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	99	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	100	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	101	551	0.55	0.30	44.08	24.29
31/7/2553	102	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	103	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	104	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	105	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	106	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	107	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	108	550	0.55	0.30	44	24.20
	109	550	0.55	0.30	44	24.20
	110	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	111	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	112	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	113	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	114	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	115	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	116	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	117	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	118	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	119	551	0.55	0.30	44.08	24.29

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบเบทซ์

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	120	556	0.56	0.31	44.48	24.73
	121	556	0.56	0.31	44.48	24.73
	122	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	123	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	124	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	125	545	0.55	0.30	43.6	23.76
1/8/2553	126	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	127	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	128	554	0.55	0.31	44.32	24.55
	129	550	0.55	0.30	44	24.20
	130	550	0.55	0.30	44	24.20
	131	550	0.55	0.30	44	24.20
	132	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	133	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	134	550	0.55	0.30	44	24.20
	135	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	136	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	137	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	138	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	139	585	0.59	0.34	46.8	27.38
	140	609	0.61	0.37	48.72	29.67
	141	637	0.64	0.41	50.96	32.46
	142	706	0.71	0.50	56.48	39.87
	143	747	0.75	0.56	59.76	44.64
	144	747	0.75	0.56	59.76	44.64
	145	747	0.75	0.56	59.76	44.64
	146	711	0.71	0.51	56.88	40.44
	147	726	0.73	0.53	58.08	42.17
	148	569	0.57	0.32	45.52	25.90
	149	540	0.54	0.29	43.2	23.33
2/8/2553	150	501	0.50	0.25	40.08	20.08
	151	437	0.44	0.19	34.96	15.28
	152	433	0.43	0.19	34.64	15.00
	153	442	0.44	0.20	35.36	15.63
	154	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	155	481	0.48	0.23	38.48	18.51
	156	463	0.46	0.21	37.04	17.15
	157	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	158	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	159	501	0.50	0.25	40.08	20.08
	160	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	161	531	0.53	0.28	42.48	22.56

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จูลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบเบทซ์

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	162	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	163	375	0.38	0.14	30	11.25
	164	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	165	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	166	435	0.44	0.19	34.8	15.14
	167	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	168	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	169	554	0.55	0.31	44.32	24.55
	170	554	0.55	0.31	44.32	24.55
	171	554	0.55	0.31	44.32	24.55
	172	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	173	551	0.55	0.30	44.08	24.29
3/8/2553	174	556	0.56	0.31	44.48	24.73
	175	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	176	554	0.55	0.31	44.32	24.55
	177	554	0.55	0.31	44.32	24.55
	178	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	179	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	180	510	0.51	0.26	40.8	20.81
	181	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	182	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	183	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	184	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	185	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	186	550	0.55	0.30	44	24.20
	187	540	0.54	0.29	43.2	23.33
	188	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	189	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	190	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	191	540	0.54	0.29	43.2	23.33
	192	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	193	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	194	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	195	501	0.50	0.25	40.08	20.08
	196	453	0.45	0.21	36.24	16.42
	197	510	0.51	0.26	40.8	20.81
4/8/2553	198	550	0.55	0.30	44	24.20
	199	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	200	598	0.60	0.36	47.84	28.61
	201	598	0.60	0.36	47.84	28.61
	202	590	0.59	0.35	47.2	27.85

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบเบทซ์

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	203	591	0.59	0.35	47.28	27.94
	204	593	0.59	0.35	47.44	28.13
	205	385	0.39	0.15	30.8	11.86
	206	590	0.59	0.35	47.2	27.85
	207	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	208	510	0.51	0.26	40.8	20.81
	209	628	0.63	0.39	50.24	31.55
	210	630	0.63	0.40	50.4	31.75
	211	609	0.61	0.37	48.72	29.67
	212	626	0.63	0.39	50.08	31.35
	213	647	0.65	0.42	51.76	33.49
	214	667	0.67	0.44	53.36	35.59
	215	550	0.55	0.30	44	24.20
	216	591	0.59	0.35	47.28	27.94
	217	569	0.57	0.32	45.52	25.90
	218	590	0.59	0.35	47.2	27.85
	219	590	0.59	0.35	47.2	27.85
	220	609	0.61	0.37	48.72	29.67
	221	550	0.55	0.30	44	24.20
5/8/2553	222	569	0.57	0.32	45.52	25.90
	223	550	0.55	0.30	44	24.20
	224	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	225	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	226	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	227	554	0.55	0.31	44.32	24.55
	228	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	229	569	0.57	0.32	45.52	25.90
	230	569	0.57	0.32	45.52	25.90
	231	590	0.59	0.35	47.2	27.85
	232	598	0.60	0.36	47.84	28.61
	233	589	0.59	0.35	47.12	27.75
	234	598	0.60	0.36	47.84	28.61
	235	598	0.60	0.36	47.84	28.61
	236	598	0.60	0.36	47.84	28.61
	237	609	0.61	0.37	48.72	29.67
	238	609	0.61	0.37	48.72	29.67
	239	606	0.61	0.37	48.48	29.38
	240	611	0.61	0.37	48.88	29.87
	241	611	0.61	0.37	48.88	29.87
	242	612	0.61	0.37	48.96	29.96
	243	612	0.61	0.37	48.96	29.96
	244	550	0.55	0.30	44	24.20

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบเบทซ์

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	245	554	0.55	0.31	44.32	24.55
6/8/2553	246	550	0.55	0.30	44	24.20
	247	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	248	554	0.55	0.31	44.32	24.55
	249	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	250	569	0.57	0.32	45.52	25.90
	251	569	0.57	0.32	45.52	25.90
	252	569	0.57	0.32	45.52	25.90
	253	569	0.57	0.32	45.52	25.90
	254	554	0.55	0.31	44.32	24.55
	255	551	0.55	0.30	44.08	24.29
	256	550	0.55	0.30	44	24.20
	257	550	0.55	0.30	44	24.20
	258	545	0.55	0.30	43.6	23.76
	259	550	0.55	0.30	44	24.20
	260	548	0.55	0.30	43.84	24.02
	261	550	0.55	0.30	44	24.20
	262	550	0.55	0.30	44	24.20
	263	554	0.55	0.31	44.32	24.55
	264	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	265	569	0.57	0.32	45.52	25.90
	266	585	0.59	0.34	46.8	27.38
	267	585	0.59	0.34	46.8	27.38
	268	588	0.59	0.35	47.04	27.66
	269	590	0.59	0.35	47.2	27.85
7/8/2553	270	609	0.61	0.37	48.72	29.67
	271	626	0.63	0.39	50.08	31.35
	272	628	0.63	0.39	50.24	31.55
	273	647	0.65	0.42	51.76	33.49
	274	663	0.66	0.44	53.04	35.17
	275	663	0.66	0.44	53.04	35.17
	276	667	0.67	0.44	53.36	35.59
	277	667	0.67	0.44	53.36	35.59
	278	688	0.69	0.47	55.04	37.87
	279	688	0.69	0.47	55.04	37.87
	280	706	0.71	0.50	56.48	39.87
	281	716	0.72	0.51	57.28	41.01
	282	726	0.73	0.53	58.08	42.17
	283	747	0.75	0.56	59.76	44.64
	284	747	0.75	0.56	59.76	44.64
	285	747	0.75	0.56	59.76	44.64
	286	747	0.75	0.56	59.76	44.64

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบเบทซ์

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	287	747	0.75	0.56	59.76	44.64
	288	747	0.75	0.56	59.76	44.64
	289	747	0.75	0.56	59.76	44.64
	290	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	291	767	0.77	0.59	61.36	47.06
	292	767	0.77	0.59	61.36	47.06
	293	766	0.77	0.59	61.28	46.94
8/8/2553	294	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	295	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	296	706	0.71	0.50	56.48	39.87
	297	706	0.71	0.50	56.48	39.87
	298	711	0.71	0.51	56.88	40.44
	299	711	0.71	0.51	56.88	40.44
	300	703	0.70	0.49	56.24	39.54
	301	711	0.71	0.51	56.88	40.44
	302	747	0.75	0.56	59.76	44.64
	303	747	0.75	0.56	59.76	44.64
	304	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	305	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	306	785	0.79	0.62	62.8	49.30
	307	785	0.79	0.62	62.8	49.30
	308	785	0.79	0.62	62.8	49.30
	309	785	0.79	0.62	62.8	49.30
	310	785	0.79	0.62	62.8	49.30
	311	785	0.79	0.62	62.8	49.30
	312	785	0.79	0.62	62.8	49.30
	313	785	0.79	0.62	62.8	49.30
	314	785	0.79	0.62	62.8	49.30
	315	785	0.79	0.62	62.8	49.30
	316	785	0.79	0.62	62.8	49.30
	317	770	0.77	0.59	61.6	47.43
9/8/2553	318	770	0.77	0.59	61.6	47.43
	319	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	320	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	321	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	322	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	323	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	324	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	325	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	326	784	0.78	0.61	62.72	49.17
	327	784	0.78	0.61	62.72	49.17

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบเบทซ์

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	328	747	0.75	0.56	59.76	44.64
	329	747	0.75	0.56	59.76	44.64
	330	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	331	776	0.78	0.60	62.08	48.17
	332	784	0.78	0.61	62.72	49.17
	333	750	0.75	0.56	60	45.00
	334	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	335	755	0.76	0.57	60.4	45.60
	336	766	0.77	0.59	61.28	46.94
	337	776	0.78	0.60	62.08	48.17
	338	785	0.79	0.62	62.8	49.30
	339	768	0.77	0.59	61.44	47.19
	340	770	0.77	0.59	61.6	47.43
	341	785	0.79	0.62	62.8	49.30
10/8/2553	342	785	0.79	0.62	62.8	49.30
	343	785	0.79	0.62	62.8	49.30
	344	776	0.78	0.60	62.08	48.17
	345	770	0.77	0.59	61.6	47.43
	346	770	0.77	0.59	61.6	47.43
	347	667	0.67	0.44	53.36	35.59
	348	658	0.66	0.43	52.64	34.64
	349	647	0.65	0.42	51.76	33.49
	350	647	0.65	0.42	51.76	33.49
	351	647	0.65	0.42	51.76	33.49
	352	647	0.65	0.42	51.76	33.49
	353	647	0.65	0.42	51.76	33.49
	354	647	0.65	0.42	51.76	33.49
	355	647	0.65	0.42	51.76	33.49
	356	667	0.67	0.44	53.36	35.59
	357	667	0.67	0.44	53.36	35.59
	358	667	0.67	0.44	53.36	35.59
	359	668	0.67	0.45	53.44	35.70
	360	663	0.66	0.44	53.04	35.17
	361	624	0.62	0.39	49.92	31.15
	362	609	0.61	0.37	48.72	29.67
	363	550	0.55	0.30	44	24.20
	364	619	0.62	0.38	49.52	30.65
	365	628	0.63	0.39	50.24	31.55
11/8/2553	366	666	0.67	0.44	53.28	35.48
	367	515	0.52	0.27	41.2	21.22
	368	559	0.56	0.31	44.72	25.00

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบเบทซ์

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	369	569	0.57	0.32	45.52	25.90
	370	580	0.58	0.34	46.4	26.91
	371	474	0.47	0.22	37.92	17.97
	372	598	0.60	0.36	47.84	28.61
	373	590	0.59	0.35	47.2	27.85
	374	591	0.59	0.35	47.28	27.94
	375	590	0.59	0.35	47.2	27.85
	376	567	0.57	0.32	45.36	25.72
	377	550	0.55	0.30	44	24.20
	378	554	0.55	0.31	44.32	24.55
	379	585	0.59	0.34	46.8	27.38
	380	550	0.55	0.30	44	24.20
	381	587	0.59	0.34	46.96	27.57
	382	585	0.59	0.34	46.8	27.38
	383	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	384	559	0.56	0.31	44.72	25.00
	385	569	0.57	0.32	45.52	25.90
	386	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	387	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	388	550	0.55	0.30	44	24.20
	389	531	0.53	0.28	42.48	22.56
12/8/2553	390	531	0.53	0.28	42.48	22.56
	391	510	0.51	0.26	40.8	20.81
	392	520	0.52	0.27	41.6	21.63
	393	510	0.51	0.26	40.8	20.81
	394	506	0.51	0.26	40.48	20.48
	395	491	0.49	0.24	39.28	19.29
	396	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	397	454	0.45	0.21	36.32	16.49
	398	491	0.49	0.24	39.28	19.29
	399	481	0.48	0.23	38.48	18.51
	400	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	401	481	0.48	0.23	38.48	18.51
	402	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	403	481	0.48	0.23	38.48	18.51
	404	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	405	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	406	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	407	474	0.47	0.22	37.92	17.97
	408	481	0.48	0.23	38.48	18.51
	409	481	0.48	0.23	38.48	18.51

ตารางที่ ก-1 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จูลซีพแบบห้องเดียวด้วยการเดินระบบแบบเบทซ์

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	410	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	411	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	412	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	413	473	0.47	0.22	37.84	17.90
13/8/2553	414	481	0.48	0.23	38.48	18.51
	415	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	416	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	417	463	0.46	0.21	37.04	17.15
	418	457	0.46	0.21	36.56	16.71
	419	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	420	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	421	463	0.46	0.21	37.04	17.15
	422	468	0.47	0.22	37.44	17.52
	423	453	0.45	0.21	36.24	16.42
	424	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	425	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	426	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	427	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	428	473	0.47	0.22	37.84	17.90
	429	453	0.45	0.21	36.24	16.42

ตารางที่ ก-2 ผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวระหว่างการเดินระบบแบบเบทซ์

Date	Time (hr)	COD (mg/L)	COD Removal Efficiency (%)
26/7/2553	0	5443	-
27/7/2553	19	4147	23.81
28/7/2553	43	3197	41.26
29/7/2553	67	2877	47.14
30/7/2553	91	2508	53.92
31/7/2553	115	2156	60.39
1/8/2553	138	2042	62.48
2/8/2553	162	1742	68.00
3/8/2553	186	1131	79.22
4/8/2553	213	1048	80.75
5/8/2553	237	945	82.64
6/8/2553	261	850	84.38
7/8/2553	284	779	85.69
8/8/2553	308	663	87.82
9/8/2553	332	545	89.99
10/8/2553	355	526	90.34
11/8/2553	379	518	90.48
12/8/2553	403	510	90.63
13/8/2553	427	503	90.76

การทดลองส่วนที่ 2 การศึกษาสถานะที่มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดียวในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

การทดลองที่ 2.1 ผลการทดลองผลของขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เหมาะสม

ตารางที่ ก-3 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 170 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
31/8/2553	0	133	0.13	0.02	7.82	1.04
	1	137	0.14	0.02	8.06	1.10
	2	176	0.18	0.03	10.35	1.82
	3	227	0.23	0.05	13.35	3.03
	4	198	0.20	0.04	11.65	2.31
	5	161	0.16	0.03	9.47	1.52
	6	138	0.14	0.02	8.12	1.12
	7	260	0.26	0.07	15.29	3.98
	8	188	0.19	0.04	11.06	2.08
	9	299	0.30	0.09	17.59	5.26
	10	295	0.30	0.09	17.35	5.12
	11	314	0.31	0.10	18.47	5.80
	12	294	0.29	0.09	17.29	5.08
	13	294	0.29	0.09	17.29	5.08
1/9/2553	14	314	0.31	0.10	18.47	5.80
	15	260	0.26	0.07	15.29	3.98
	16	271	0.27	0.07	15.94	4.32
	17	345	0.35	0.12	20.29	7.00
	18	305	0.31	0.09	17.94	5.47
	19	255	0.26	0.07	15.00	3.83
	20	334	0.33	0.11	19.65	6.56
	21	276	0.28	0.08	16.24	4.48
	22	255	0.26	0.07	15.00	3.83
	23	244	0.24	0.06	14.35	3.50
	24	237	0.24	0.06	13.94	3.30
	25	248	0.25	0.06	14.59	3.62
	26	287	0.29	0.08	16.88	4.85
	27	246	0.25	0.06	14.47	3.56
	28	256	0.26	0.07	15.06	3.86
	29	259	0.26	0.07	15.24	3.95
	30	281	0.28	0.08	16.53	4.64
	31	305	0.31	0.09	17.94	5.47
	32	305	0.31	0.09	17.94	5.47
	33	310	0.31	0.10	18.24	5.65
	34	324	0.32	0.10	19.06	6.18

ตารางที่ ก-3 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 170 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	35	310	0.31	0.10	18.24	5.65
	36	324	0.32	0.10	19.06	6.18
	37	324	0.32	0.10	19.06	6.18
	38	324	0.32	0.10	19.06	6.18
2/9/2553	39	366	0.37	0.13	21.53	7.88
	40	344	0.34	0.12	20.24	6.96
	41	385	0.39	0.15	22.65	8.72
	42	403	0.40	0.16	23.71	9.55
	43	403	0.40	0.16	23.71	9.55
	44	453	0.45	0.21	26.65	12.07
	45	467	0.47	0.22	27.47	12.83
	46	466	0.47	0.22	27.41	12.77
	47	477	0.48	0.23	28.06	13.38
	48	466	0.47	0.22	27.41	12.77
	49	492	0.49	0.24	28.94	14.24
	50	503	0.50	0.25	29.59	14.88
	51	545	0.55	0.30	32.06	17.47
	52	487	0.49	0.24	28.65	13.95
	53	540	0.54	0.29	31.76	17.15
	54	403	0.40	0.16	23.71	9.55
	55	565	0.57	0.32	33.24	18.78
	56	531	0.53	0.28	31.24	16.59
	57	556	0.56	0.31	32.71	18.18
	58	569	0.57	0.32	33.47	19.04
	59	747	0.75	0.56	43.94	32.82
	60	703	0.70	0.49	41.35	29.07
	61	590	0.59	0.35	34.71	20.48
	62	591	0.59	0.35	34.76	20.55
3/9/2553	63	667	0.67	0.44	39.24	26.17
	64	667	0.67	0.44	39.24	26.17
	65	702	0.70	0.49	41.29	28.99
	66	724	0.72	0.52	42.59	30.83
	67	755	0.76	0.57	44.41	33.53
	68	667	0.67	0.44	39.24	26.17
	69	785	0.79	0.62	46.18	36.25
	70	776	0.78	0.60	45.65	35.42
	71	785	0.79	0.62	46.18	36.25
	72	793	0.79	0.63	46.65	36.99
	73	785	0.79	0.62	46.18	36.25
	74	747	0.75	0.56	43.94	32.82
	75	676	0.68	0.46	39.76	26.88

ตารางที่ ก-3 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 170 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	76	785	0.79	0.62	46.18	36.25
	77	776	0.78	0.60	45.65	35.42
	78	776	0.78	0.60	45.65	35.42
	79	785	0.79	0.62	46.18	36.25
	80	785	0.79	0.62	46.18	36.25
	81	795	0.80	0.63	46.76	37.18
	82	795	0.80	0.63	46.76	37.18
	83	795	0.80	0.63	46.76	37.18
	84	795	0.80	0.63	46.76	37.18
	85	798	0.80	0.64	46.94	37.46
	86	798	0.80	0.64	46.94	37.46
4/9/2553	87	805	0.81	0.65	47.35	38.12
	88	804	0.80	0.65	47.29	38.02
	89	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	90	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	91	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	92	798	0.80	0.64	46.94	37.46
	93	755	0.76	0.57	44.41	33.53
	94	795	0.80	0.63	46.76	37.18
	95	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	96	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	97	813	0.81	0.66	47.82	38.88
	98	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	99	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	100	785	0.79	0.62	46.18	36.25
	101	808	0.81	0.65	47.53	38.40
	102	833	0.83	0.69	49.00	40.82
	103	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	104	833	0.83	0.69	49.00	40.82
	105	833	0.83	0.69	49.00	40.82
	106	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	107	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	108	813	0.81	0.66	47.82	38.88
	109	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	110	824	0.82	0.68	48.47	39.94
5/9/2553	111	813	0.81	0.66	47.82	38.88
	112	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	113	808	0.81	0.65	47.53	38.40
	114	808	0.81	0.65	47.53	38.40
	115	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	116	813	0.81	0.66	47.82	38.88
	117	824	0.82	0.68	48.47	39.94

ตารางที่ ก-3 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 170 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	118	804	0.80	0.65	47.29	38.02
	119	804	0.80	0.65	47.29	38.02
	120	814	0.81	0.66	47.88	38.98
	121	813	0.81	0.66	47.82	38.88
	122	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	123	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	124	808	0.81	0.65	47.53	38.40
	125	804	0.80	0.65	47.29	38.02
	126	804	0.80	0.65	47.29	38.02
	127	804	0.80	0.65	47.29	38.02
	128	808	0.81	0.65	47.53	38.40
	129	812	0.81	0.66	47.76	38.78
	130	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	131	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	132	804	0.80	0.65	47.29	38.02
	133	804	0.80	0.65	47.29	38.02
	134	768	0.77	0.59	45.18	34.70
6/9/2553	135	765	0.77	0.59	45.00	34.43
	136	785	0.79	0.62	46.18	36.25
	137	833	0.83	0.69	49.00	40.82
	138	798	0.80	0.64	46.94	37.46
	139	803	0.80	0.64	47.24	37.93
	140	803	0.80	0.64	47.24	37.93
	141	833	0.83	0.69	49.00	40.82
	142	840	0.84	0.71	49.41	41.51
	143	804	0.80	0.65	47.29	38.02
	144	804	0.80	0.65	47.29	38.02
	145	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	146	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	147	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	148	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	149	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	150	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	151	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	152	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	153	835	0.84	0.70	49.12	41.01
	154	835	0.84	0.70	49.12	41.01
	155	813	0.81	0.66	47.82	38.88
	156	814	0.81	0.66	47.88	38.98
	157	803	0.80	0.64	47.24	37.93
	158	747	0.75	0.56	43.94	32.82
7/9/2553	159	798	0.80	0.64	46.94	37.46

ตารางที่ ก-3 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 170 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	160	804	0.80	0.65	47.29	38.02
	161	804	0.80	0.65	47.29	38.02
	162	840	0.84	0.71	49.41	41.51
	163	835	0.84	0.70	49.12	41.01
	164	773	0.77	0.60	45.47	35.15
	165	773	0.77	0.60	45.47	35.15
	166	798	0.80	0.64	46.94	37.46
	167	804	0.80	0.65	47.29	38.02
	168	816	0.82	0.67	48.00	39.17
	169	840	0.84	0.71	49.41	41.51
	170	833	0.83	0.69	49.00	40.82
	171	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	172	829	0.83	0.69	48.76	40.43
	173	835	0.84	0.70	49.12	41.01
	174	835	0.84	0.70	49.12	41.01
	175	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	176	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	177	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	178	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	179	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	180	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	181	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	182	845	0.85	0.71	49.71	42.00
8/9/2553	183	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	184	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	185	814	0.81	0.66	47.88	38.98
	186	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	187	840	0.84	0.71	49.41	41.51
	188	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	189	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	190	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	191	813	0.81	0.66	47.82	38.88
	192	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	193	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	194	833	0.83	0.69	49.00	40.82
	195	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	196	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	197	824	0.82	0.68	48.47	39.94
	198	833	0.83	0.69	49.00	40.82
	199	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	200	845	0.85	0.71	49.71	42.00
	201	833	0.83	0.69	49.00	40.82

ตารางที่ ก-4 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 254 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
15/9/2553	0	157	0.16	0.02	6.18	0.97
	1	161	0.16	0.03	6.34	1.02
	2	167	0.17	0.03	6.57	1.10
	3	184	0.18	0.03	7.24	1.33
	4	191	0.19	0.04	7.52	1.44
	5	225	0.23	0.05	8.86	1.99
	6	249	0.25	0.06	9.80	2.44
	7	277	0.28	0.08	10.91	3.02
	8	319	0.32	0.10	12.56	4.01
	9	266	0.27	0.07	10.47	2.79
	10	330	0.33	0.11	12.99	4.29
	11	217	0.22	0.05	8.54	1.85
	12	192	0.19	0.04	7.56	1.45
	13	251	0.25	0.06	9.88	2.48
	14	266	0.27	0.07	10.47	2.79
	15	229	0.23	0.05	9.02	2.06
	16	314	0.31	0.10	12.36	3.88
	17	445	0.45	0.20	17.52	7.80
16/9/2553	18	334	0.33	0.11	13.15	4.39
	19	345	0.35	0.12	13.58	4.69
	20	368	0.37	0.14	14.49	5.33
	21	434	0.43	0.19	17.09	7.42
	22	434	0.43	0.19	17.09	7.42
	23	383	0.38	0.15	15.08	5.78
	24	385	0.39	0.15	15.16	5.84
	25	434	0.43	0.19	17.09	7.42
	26	314	0.31	0.10	12.36	3.88
	27	324	0.32	0.10	12.76	4.13
	28	433	0.43	0.19	17.05	7.38
	29	403	0.40	0.16	15.87	6.39
	30	393	0.39	0.15	15.47	6.08
	31	433	0.43	0.19	17.05	7.38
	32	434	0.43	0.19	17.09	7.42
	33	389	0.39	0.15	15.31	5.96
	34	393	0.39	0.15	15.47	6.08
	35	398	0.40	0.16	15.67	6.24
	36	403	0.40	0.16	15.87	6.39
	37	403	0.40	0.16	15.87	6.39
	38	404	0.40	0.16	15.91	6.43
	39	404	0.40	0.16	15.91	6.43
	40	403	0.40	0.16	15.87	6.39
	41	403	0.40	0.16	15.87	6.39
17/9/2553	42	433	0.43	0.19	17.05	7.38

ตารางที่ ก-4 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 254 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	43	433	0.43	0.19	17.05	7.38
	44	403	0.40	0.16	15.87	6.39
	45	493	0.49	0.24	19.41	9.57
	46	540	0.54	0.29	21.26	11.48
	47	565	0.57	0.32	22.24	12.57
	48	531	0.53	0.28	20.91	11.10
	49	554	0.55	0.31	21.81	12.08
	50	569	0.57	0.32	22.40	12.75
	51	591	0.59	0.35	23.27	13.75
	52	590	0.59	0.35	23.23	13.70
	53	668	0.67	0.45	26.30	17.57
	54	657	0.66	0.43	25.87	16.99
	55	747	0.75	0.56	29.41	21.97
	56	706	0.71	0.50	27.80	19.62
	57	756	0.76	0.57	29.76	22.50
	58	706	0.71	0.50	27.80	19.62
	59	805	0.81	0.65	31.69	25.51
	60	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	61	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	62	824	0.82	0.68	32.44	26.73
	63	798	0.80	0.64	31.42	25.07
	64	855	0.86	0.73	33.66	28.78
	65	895	0.90	0.80	35.24	31.54
18/9/2553	66	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	67	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	68	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	69	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	70	885	0.89	0.78	34.84	30.84
	71	908	0.91	0.82	35.75	32.46
	72	933	0.93	0.87	36.73	34.27
	73	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	74	933	0.93	0.87	36.73	34.27
	75	933	0.93	0.87	36.73	34.27
	76	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	77	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	78	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	79	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	80	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	81	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	82	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	83	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	84	924	0.92	0.85	36.38	33.61

ตารางที่ ก-4 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 254 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	85	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	86	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	87	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	88	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	89	924	0.92	0.85	36.38	33.61
19/9/2553	90	908	0.91	0.82	35.75	32.46
	91	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	92	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	93	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	94	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	95	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	96	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	97	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	98	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	99	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	100	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	101	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	102	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	103	903	0.90	0.82	35.55	32.10
	104	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	105	847	0.85	0.72	33.35	28.24
	106	869	0.87	0.76	34.21	29.73
	107	902	0.90	0.81	35.51	32.03
	108	902	0.90	0.81	35.51	32.03
	109	903	0.90	0.82	35.55	32.10
	110	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	111	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	112	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	113	923	0.92	0.85	36.34	33.54
20/9/2553	114	873	0.87	0.76	34.37	30.01
	115	873	0.87	0.76	34.37	30.01
	116	885	0.89	0.78	34.84	30.84
	117	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	118	916	0.92	0.84	36.06	33.03
	119	845	0.85	0.71	33.27	28.11
	120	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	121	920	0.92	0.85	36.22	33.32
	122	903	0.90	0.82	35.55	32.10
	123	855	0.86	0.73	33.66	28.78
	124	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	125	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	126	924	0.92	0.85	36.38	33.61

ตารางที่ ก-4 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 254 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	127	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	128	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	129	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	130	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	131	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	132	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	133	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	134	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	135	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	136	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	137	924	0.92	0.85	36.38	33.61
21/9/2553	138	876	0.88	0.77	34.49	30.21
	139	906	0.91	0.82	35.67	32.32
	140	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	141	866	0.87	0.75	34.09	29.53
	142	917	0.92	0.84	36.10	33.11
	143	874	0.87	0.76	34.41	30.07
	144	869	0.87	0.76	34.21	29.73
	145	895	0.90	0.80	35.24	31.54
	146	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	147	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	148	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	149	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	150	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	151	906	0.91	0.82	35.67	32.32
	152	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	153	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	154	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	155	888	0.89	0.79	34.96	31.05
	156	898	0.90	0.81	35.35	31.75
	157	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	158	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	159	903	0.90	0.82	35.55	32.10
	160	914	0.91	0.84	35.98	32.89
	161	924	0.92	0.85	36.38	33.61
22/9/2553	162	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	163	851	0.85	0.72	33.50	28.51
	164	917	0.92	0.84	36.10	33.11
	165	851	0.85	0.72	33.50	28.51
	166	901	0.90	0.81	35.47	31.96
	167	887	0.89	0.79	34.92	30.98
	168	881	0.88	0.78	34.69	30.56

ตารางที่ ก-4 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 254 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	169	896	0.90	0.80	35.28	31.61
	170	906	0.91	0.82	35.67	32.32
	171	887	0.89	0.79	34.92	30.98
	172	872	0.87	0.76	34.33	29.94
	173	878	0.88	0.77	34.57	30.35
	174	888	0.89	0.79	34.96	31.05
	175	888	0.89	0.79	34.96	31.05
	176	898	0.90	0.81	35.35	31.75
	177	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	178	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	179	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	180	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	181	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	182	913	0.91	0.83	35.94	32.82
	183	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	184	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	185	924	0.92	0.85	36.38	33.61
23/9/2553	186	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	187	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	188	906	0.91	0.82	35.67	32.32
	189	906	0.91	0.82	35.67	32.32
	190	889	0.89	0.79	35.00	31.12
	191	888	0.89	0.79	34.96	31.05
	192	904	0.90	0.82	35.59	32.17
	193	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	194	924	0.92	0.85	36.38	33.61
	195	924	0.92	0.85	36.38	33.61

ตารางที่ ก-5 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 339 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
8/10/2553	0	135	0.14	0.02	3.98	0.54
	1	166	0.17	0.03	4.90	0.81
	2	139	0.14	0.02	4.10	0.57
	3	154	0.15	0.02	4.54	0.70
	4	142	0.14	0.02	4.19	0.59
9/10/2553	5	142	0.14	0.02	4.19	0.59
	6	188	0.19	0.04	5.55	1.04
	7	198	0.20	0.04	5.84	1.16
	8	146	0.15	0.02	4.31	0.63
	9	145	0.15	0.02	4.28	0.62
	10	156	0.16	0.02	4.60	0.72
	11	187	0.19	0.03	5.52	1.03
	12	187	0.19	0.03	5.52	1.03
	13	172	0.17	0.03	5.07	0.87
	14	177	0.18	0.03	5.22	0.92
	15	176	0.18	0.03	5.19	0.91
	16	176	0.18	0.03	5.19	0.91
	17	176	0.18	0.03	5.19	0.91
	18	204	0.20	0.04	6.02	1.23
	19	245	0.25	0.06	7.23	1.77
	20	245	0.25	0.06	7.23	1.77
	21	245	0.25	0.06	7.23	1.77
	22	236	0.24	0.06	6.96	1.64
	23	236	0.24	0.06	6.96	1.64
	24	172	0.17	0.03	5.07	0.87
	25	178	0.18	0.03	5.25	0.93
	26	255	0.26	0.07	7.52	1.92
	27	236	0.24	0.06	6.96	1.64
	28	236	0.24	0.06	6.96	1.64
10/10/2553	29	217	0.22	0.05	6.40	1.39
	30	220	0.22	0.05	6.49	1.43
	31	245	0.25	0.06	7.23	1.77
	32	236	0.24	0.06	6.96	1.64
	33	285	0.29	0.08	8.41	2.40
	34	285	0.29	0.08	8.41	2.40
	35	285	0.29	0.08	8.41	2.40
	36	285	0.29	0.08	8.41	2.40
	37	334	0.33	0.11	9.85	3.29
	38	335	0.34	0.11	9.88	3.31
	39	335	0.34	0.11	9.88	3.31
	40	356	0.36	0.13	10.50	3.74
	41	356	0.36	0.13	10.50	3.74
	42	358	0.36	0.13	10.56	3.78

ตารางที่ ก-5 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 339 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	43	356	0.36	0.13	10.50	3.74
	44	403	0.40	0.16	11.89	4.79
	45	405	0.41	0.16	11.95	4.84
	46	405	0.41	0.16	11.95	4.84
	47	403	0.40	0.16	11.89	4.79
	48	489	0.49	0.24	14.42	7.05
	49	489	0.49	0.24	14.42	7.05
	50	506	0.51	0.26	14.93	7.55
	51	489	0.49	0.24	14.42	7.05
	52	506	0.51	0.26	14.93	7.55
11/10/2553	53	534	0.53	0.29	15.75	8.41
	54	534	0.53	0.29	15.75	8.41
	55	545	0.55	0.30	16.08	8.76
	56	545	0.55	0.30	16.08	8.76
	57	580	0.58	0.34	17.11	9.92
	58	581	0.58	0.34	17.14	9.96
	59	585	0.59	0.34	17.26	10.10
	60	588	0.59	0.35	17.35	10.20
	61	588	0.59	0.35	17.35	10.20
	62	589	0.59	0.35	17.37	10.23
	63	605	0.61	0.37	17.85	10.80
	64	624	0.62	0.39	18.41	11.49
	65	617	0.62	0.38	18.20	11.23
	66	617	0.62	0.38	18.20	11.23
	67	624	0.62	0.39	18.41	11.49
	68	734	0.73	0.54	21.65	15.89
	69	735	0.74	0.54	21.68	15.94
	70	735	0.74	0.54	21.68	15.94
	71	735	0.74	0.54	21.68	15.94
	72	689	0.69	0.47	20.32	14.00
	73	745	0.75	0.56	21.98	16.37
	74	745	0.75	0.56	21.98	16.37
	75	747	0.75	0.56	22.04	16.46
	76	805	0.81	0.65	23.75	19.12
12/10/2553	77	805	0.81	0.65	23.75	19.12
	78	845	0.85	0.71	24.93	21.06
	79	845	0.85	0.71	24.93	21.06
	80	845	0.85	0.71	24.93	21.06
	81	854	0.85	0.73	25.19	21.51
	82	865	0.87	0.75	25.52	22.07
	83	865	0.87	0.75	25.52	22.07
	84	873	0.87	0.76	25.75	22.48
	85	886	0.89	0.78	26.14	23.16

ตารางที่ ก-5 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 339 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	86	905	0.91	0.82	26.70	24.16
	87	905	0.91	0.82	26.70	24.16
	88	904	0.90	0.82	26.67	24.11
	89	904	0.90	0.82	26.67	24.11
	90	904	0.90	0.82	26.67	24.11
	91	898	0.90	0.81	26.49	23.79
	92	904	0.90	0.82	26.67	24.11
	93	904	0.90	0.82	26.67	24.11
	94	904	0.90	0.82	26.67	24.11
	95	904	0.90	0.82	26.67	24.11
	96	905	0.91	0.82	26.70	24.16
	97	908	0.91	0.82	26.78	24.32
	98	924	0.92	0.85	27.26	25.19
	99	924	0.92	0.85	27.26	25.19
	100	924	0.92	0.85	27.26	25.19
13/10/2553	101	945	0.95	0.89	27.88	26.34
	102	945	0.95	0.89	27.88	26.34
	103	945	0.95	0.89	27.88	26.34
	104	924	0.92	0.85	27.26	25.19
	105	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	106	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	107	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	108	945	0.95	0.89	27.88	26.34
	109	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	110	968	0.97	0.94	28.55	27.64
	111	968	0.97	0.94	28.55	27.64
	112	968	0.97	0.94	28.55	27.64
	113	968	0.97	0.94	28.55	27.64
	114	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	115	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	116	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	117	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	118	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	119	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	120	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	121	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	122	968	0.97	0.94	28.55	27.64
	123	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	124	972	0.97	0.94	28.67	27.87
14/10/2553	125	904	0.90	0.82	26.67	24.11
	126	955	0.96	0.91	28.17	26.90
	127	955	0.96	0.91	28.17	26.90

ตารางที่ ก-5 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 339 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	128	889	0.89	0.79	26.22	23.31
	129	915	0.92	0.84	26.99	24.70
	130	945	0.95	0.89	27.88	26.34
	131	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	132	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	133	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	134	955	0.96	0.91	28.17	26.90
	135	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	136	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	137	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	138	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	139	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	140	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	141	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	142	968	0.97	0.94	28.55	27.64
	143	968	0.97	0.94	28.55	27.64
	144	968	0.97	0.94	28.55	27.64
	145	968	0.97	0.94	28.55	27.64
	146	868	0.87	0.75	25.60	22.22
	147	868	0.87	0.75	25.60	22.22
	148	972	0.97	0.94	28.67	27.87
15/10/2553	149	945	0.95	0.89	27.88	26.34
	150	945	0.95	0.89	27.88	26.34
	151	955	0.96	0.91	28.17	26.90
	152	968	0.97	0.94	28.55	27.64
	153	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	154	924	0.92	0.85	27.26	25.19
	155	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	156	945	0.95	0.89	27.88	26.34
	157	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	158	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	159	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	160	955	0.96	0.91	28.17	26.90
	161	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	162	972	0.97	0.94	28.67	27.87
	163	972	0.97	0.94	28.67	27.87

ตารางที่ ก-6 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 424 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
19/10/2553	0	118	0.12	0.01	2.78	0.33
	1	116	0.12	0.01	2.74	0.32
	2	126	0.13	0.02	2.97	0.37
	3	149	0.15	0.02	3.51	0.52
	4	156	0.16	0.02	3.68	0.57
20/10/2553	5	159	0.16	0.03	3.75	0.60
	6	172	0.17	0.03	4.06	0.70
	7	175	0.18	0.03	4.13	0.72
	8	176	0.18	0.03	4.15	0.73
	9	181	0.18	0.03	4.27	0.77
	10	192	0.19	0.04	4.53	0.87
	11	206	0.21	0.04	4.86	1.00
	12	206	0.21	0.04	4.86	1.00
	13	214	0.21	0.05	5.05	1.08
	14	236	0.24	0.06	5.57	1.31
	15	245	0.25	0.06	5.78	1.42
	16	245	0.25	0.06	5.78	1.42
	17	273	0.27	0.07	6.44	1.76
	18	277	0.28	0.08	6.53	1.81
	19	260	0.26	0.07	6.13	1.59
	20	284	0.28	0.08	6.70	1.90
	21	295	0.30	0.09	6.96	2.05
	22	284	0.28	0.08	6.70	1.90
	23	295	0.30	0.09	6.96	2.05
	24	336	0.34	0.11	7.92	2.66
	25	371	0.37	0.14	8.75	3.25
	26	387	0.39	0.15	9.13	3.53
	27	442	0.44	0.20	10.42	4.61
	28	454	0.45	0.21	10.71	4.86
21/10/2553	29	353	0.35	0.12	8.33	2.94
	30	454	0.45	0.21	10.71	4.86
	31	454	0.45	0.21	10.71	4.86
	32	569	0.57	0.32	13.42	7.64
	33	590	0.59	0.35	13.92	8.21
	34	590	0.59	0.35	13.92	8.21
	35	525	0.53	0.28	12.38	6.50
	36	550	0.55	0.30	12.97	7.13
	37	525	0.53	0.28	12.38	6.50
	38	590	0.59	0.35	13.92	8.21
	39	658	0.66	0.43	15.52	10.21
	40	688	0.69	0.47	16.23	11.16
	41	716	0.72	0.51	16.89	12.09
	42	726	0.73	0.53	17.12	12.43

ตารางที่ ก-6 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 424 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	43	726	0.73	0.53	17.12	12.43
	44	748	0.75	0.56	17.64	13.20
	45	784	0.78	0.61	18.49	14.50
	46	784	0.78	0.61	18.49	14.50
	47	834	0.83	0.70	19.67	16.40
	48	726	0.73	0.53	17.12	12.43
	49	784	0.78	0.61	18.49	14.50
	50	805	0.81	0.65	18.99	15.28
	51	834	0.83	0.70	19.67	16.40
	52	834	0.83	0.70	19.67	16.40
22/10/2553	53	883	0.88	0.78	20.83	18.39
	54	834	0.83	0.70	19.67	16.40
	55	865	0.87	0.75	20.40	17.65
	56	883	0.88	0.78	20.83	18.39
	57	883	0.88	0.78	20.83	18.39
	58	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	59	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	60	908	0.91	0.82	21.42	19.44
	61	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	62	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	63	908	0.91	0.82	21.42	19.44
	64	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	65	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	66	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	67	904	0.90	0.82	21.32	19.27
	68	908	0.91	0.82	21.42	19.44
	69	904	0.90	0.82	21.32	19.27
	70	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	71	883	0.88	0.78	20.83	18.39
	72	904	0.90	0.82	21.32	19.27
	73	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	74	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	75	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	76	904	0.90	0.82	21.32	19.27
23/10/2553	77	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	78	890	0.89	0.79	20.99	18.68
	79	908	0.91	0.82	21.42	19.44
	80	908	0.91	0.82	21.42	19.44
	81	917	0.92	0.84	21.63	19.83
	82	917	0.92	0.84	21.63	19.83
	83	917	0.92	0.84	21.63	19.83
	84	924	0.92	0.85	21.79	20.14

ตารางที่ ก-6 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 424 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	85	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	86	933	0.93	0.87	22.00	20.53
	87	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	88	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	89	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	90	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	91	955	0.96	0.91	22.52	21.51
	92	955	0.96	0.91	22.52	21.51
	93	962	0.96	0.93	22.69	21.83
	94	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	95	934	0.93	0.87	22.03	20.57
	96	955	0.96	0.91	22.52	21.51
	97	962	0.96	0.93	22.69	21.83
	98	972	0.97	0.94	22.92	22.28
	99	972	0.97	0.94	22.92	22.28
	100	970	0.97	0.94	22.88	22.19
24/10/2553	101	970	0.97	0.94	22.88	22.19
	102	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	103	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	104	962	0.96	0.93	22.69	21.83
	105	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	106	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	107	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	108	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	109	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	110	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	111	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	112	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	113	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	114	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	115	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	116	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	117	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	118	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	119	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	120	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	121	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	122	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	123	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	124	1003	1.00	1.01	23.66	23.73

ตารางที่ ก-6 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนด 424 ตร.ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
25/10/2553	125	970	0.97	0.94	22.88	22.19
	126	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	127	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	128	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	129	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	130	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	131	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	132	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	133	972	0.97	0.94	22.92	22.28
	134	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	135	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	136	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	137	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	138	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	139	972	0.97	0.94	22.92	22.28
	140	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	141	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	142	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	143	1003	1.00	1.01	23.66	23.73

ตารางที่ ก-7 ผลการทดลองการหาประสิทธิภาพเชิงกลออมป์ที่ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดต่างๆ
กัน 4 ขนาด

ขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้า แอโนด (ตร.ซม.)	ประสิทธิภาพเชิงกลออมป์ (%)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด (มิลลิแอมแปร์)
170	1.32	0.821
254	3.01	0.904
339	4.96	0.958
424	6.71	0.994

การทดลองที่ 2.2 ผลการทดลองผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดที่เหมาะสม

ตารางที่ ก-8 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 25 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
1/11/2553	0	113	0.11	0.01	2.67	0.30
	1	158	0.16	0.02	3.73	0.59
	2	167	0.17	0.03	3.94	0.66
	3	188	0.19	0.04	4.43	0.83
	4	166	0.17	0.03	3.92	0.65
2/11/2553	5	208	0.21	0.04	4.91	1.02
	6	166	0.17	0.03	3.92	0.65
	7	198	0.20	0.04	4.67	0.92
	8	179	0.18	0.03	4.22	0.76
	9	191	0.19	0.04	4.50	0.86
	10	208	0.21	0.04	4.91	1.02
	11	208	0.21	0.04	4.91	1.02
	12	217	0.22	0.05	5.12	1.11
	13	217	0.22	0.05	5.12	1.11
	14	217	0.22	0.05	5.12	1.11
	15	220	0.22	0.05	5.19	1.14
	16	227	0.23	0.05	5.35	1.22
	17	227	0.23	0.05	5.35	1.22
	18	231	0.23	0.05	5.45	1.26
	19	236	0.24	0.06	5.57	1.31
	20	244	0.24	0.06	5.75	1.40
	21	251	0.25	0.06	5.92	1.49
	22	257	0.26	0.07	6.06	1.56
	23	276	0.28	0.08	6.51	1.80
	24	279	0.28	0.08	6.58	1.84
	25	356	0.36	0.13	8.40	2.99
	26	375	0.38	0.14	8.84	3.32
	27	391	0.39	0.15	9.22	3.61
	28	398	0.40	0.16	9.39	3.74
3/11/2553	29	403	0.40	0.16	9.50	3.83
	30	391	0.39	0.15	9.22	3.61
	31	403	0.40	0.16	9.50	3.83
	32	398	0.40	0.16	9.39	3.74
	33	403	0.40	0.16	9.50	3.83
	34	433	0.43	0.19	10.21	4.42
	35	435	0.44	0.19	10.26	4.46
	36	473	0.47	0.22	11.16	5.28

ตารางที่ ก-8 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 25 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	37	481	0.48	0.23	11.34	5.46
	38	491	0.49	0.24	11.58	5.69
	39	487	0.49	0.24	11.49	5.59
	40	456	0.46	0.21	10.75	4.90
	41	487	0.49	0.24	11.49	5.59
	42	515	0.52	0.27	12.15	6.26
	43	531	0.53	0.28	12.52	6.65
	44	559	0.56	0.31	13.18	7.37
	45	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	46	559	0.56	0.31	13.18	7.37
	47	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	48	619	0.62	0.38	14.60	9.04
	49	636	0.64	0.40	15.00	9.54
	50	645	0.65	0.42	15.21	9.81
	51	668	0.67	0.45	15.75	10.52
	52	688	0.69	0.47	16.23	11.16
4/11/2553	53	689	0.69	0.47	16.25	11.20
	54	711	0.71	0.51	16.77	11.92
	55	711	0.71	0.51	16.77	11.92
	56	747	0.75	0.56	17.62	13.16
	57	747	0.75	0.56	17.62	13.16
	58	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	59	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	60	703	0.70	0.49	16.58	11.66
	61	704	0.70	0.50	16.60	11.69
	62	798	0.80	0.64	18.82	15.02
	63	805	0.81	0.65	18.99	15.28
	64	806	0.81	0.65	19.01	15.32
	65	821	0.82	0.67	19.36	15.90
	66	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	67	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	68	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	69	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	70	887	0.89	0.79	20.92	18.56
	71	856	0.86	0.73	20.19	17.28
	72	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	73	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	74	911	0.91	0.83	21.49	19.57
	75	927	0.93	0.86	21.86	20.27
	76	945	0.95	0.89	22.29	21.06
5/11/2553	77	945	0.95	0.89	22.29	21.06
	78	945	0.95	0.89	22.29	21.06

ตารางที่ ก-8 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 25 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	79	945	0.95	0.89	22.29	21.06
	80	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	81	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	82	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	83	904	0.90	0.82	21.32	19.27
	84	904	0.90	0.82	21.32	19.27
	85	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	86	945	0.95	0.89	22.29	21.06
	87	945	0.95	0.89	22.29	21.06
	88	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	89	955	0.96	0.91	22.52	21.51
	90	962	0.96	0.93	22.69	21.83
	91	972	0.97	0.94	22.92	22.28
	92	970	0.97	0.94	22.88	22.19
	93	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	94	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	95	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	96	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	97	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	98	1008	1.01	1.02	23.77	23.96
	99	1008	1.01	1.02	23.77	23.96
	100	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
6/11/2553	101	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	102	998	1.00	1.00	23.54	23.49
	103	965	0.97	0.93	22.76	21.96
	104	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	105	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	106	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	107	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	108	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	109	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	110	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	111	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	112	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	113	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	114	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	115	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	116	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	117	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	118	972	0.97	0.94	22.92	22.28
	119	972	0.97	0.94	22.92	22.28

ตารางที่ ก-8 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 25 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	120	989	0.99	0.98	23.33	23.07
	121	1001	1.00	1.00	23.61	23.63
	122	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	123	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	124	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
7/11/2553	125	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	126	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	127	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	128	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	129	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	130	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	131	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	132	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	133	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	134	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	135	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	136	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	137	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	138	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	139	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	140	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	141	1021	1.02	1.04	24.08	24.59

ตารางที่ ก-9 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 20 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Curent density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
15/11/2553	0	127	0.13	0.02	3.00	0.38
	1	133	0.13	0.02	3.14	0.42
	2	133	0.13	0.02	3.14	0.42
	3	138	0.14	0.02	3.25	0.45
	4	148	0.15	0.02	3.49	0.52
16/11/2553	5	148	0.15	0.02	3.49	0.52
	6	161	0.16	0.03	3.80	0.61
	7	181	0.18	0.03	4.27	0.77
	8	227	0.23	0.05	5.35	1.22
	9	227	0.23	0.05	5.35	1.22
	10	236	0.24	0.06	5.57	1.31
	11	236	0.24	0.06	5.57	1.31
	12	236	0.24	0.06	5.57	1.31
	13	276	0.28	0.08	6.51	1.80
	14	305	0.31	0.09	7.19	2.19
	15	345	0.35	0.12	8.14	2.81
	16	350	0.35	0.12	8.25	2.89
	17	319	0.32	0.10	7.52	2.40
	18	345	0.35	0.12	8.14	2.81
	19	403	0.40	0.16	9.50	3.83
	20	404	0.40	0.16	9.53	3.85
	21	404	0.40	0.16	9.53	3.85
	22	404	0.40	0.16	9.53	3.85
	23	411	0.41	0.17	9.69	3.98
	24	442	0.44	0.20	10.42	4.61
	25	463	0.46	0.21	10.92	5.06
	26	481	0.48	0.23	11.34	5.46
	27	489	0.49	0.24	11.53	5.64
	28	505	0.51	0.26	11.91	6.01
17/11/2553	29	505	0.51	0.26	11.91	6.01
	30	550	0.55	0.30	12.97	7.13
	31	524	0.52	0.27	12.36	6.48
	32	558	0.56	0.31	13.16	7.34
	33	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	34	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	35	628	0.63	0.39	14.81	9.30
	36	628	0.63	0.39	14.81	9.30
	37	633	0.63	0.40	14.93	9.45
	38	633	0.63	0.40	14.93	9.45
	39	688	0.69	0.47	16.23	11.16

ตารางที่ ก-9 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 20 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Curent density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	40	706	0.71	0.50	16.65	11.76
	41	686	0.69	0.47	16.18	11.10
	42	724	0.72	0.52	17.08	12.36
	43	747	0.75	0.56	17.62	13.16
	44	747	0.75	0.56	17.62	13.16
	45	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	46	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	47	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	48	805	0.81	0.65	18.99	15.28
	49	805	0.81	0.65	18.99	15.28
	50	824	0.82	0.68	19.43	16.01
	51	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	52	824	0.82	0.68	19.43	16.01
18/11/2553	53	904	0.90	0.82	21.32	19.27
	54	904	0.90	0.82	21.32	19.27
	55	888	0.89	0.79	20.94	18.60
	56	945	0.95	0.89	22.29	21.06
	57	898	0.90	0.81	21.18	19.02
	58	908	0.91	0.82	21.42	19.44
	59	908	0.91	0.82	21.42	19.44
	60	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	61	945	0.95	0.89	22.29	21.06
	62	972	0.97	0.94	22.92	22.28
	63	972	0.97	0.94	22.92	22.28
	64	978	0.98	0.96	23.07	22.56
	65	988	0.99	0.98	23.30	23.02
	66	1005	1.01	1.01	23.70	23.82
	67	1005	1.01	1.01	23.70	23.82
	68	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	69	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	70	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	71	889	0.89	0.79	20.97	18.64
	72	945	0.95	0.89	22.29	21.06
	73	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	74	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	75	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	76	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
19/11/2553	77	1030	1.03	1.06	24.29	25.02
	78	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	79	1030	1.03	1.06	24.29	25.02
	80	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	81	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	82	1040	1.04	1.08	24.53	25.51

ตารางที่ ก-9 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 20 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Curent density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	83	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	84	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	85	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	86	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	87	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	88	965	0.97	0.93	22.76	21.96
	89	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	90	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	91	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	92	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	93	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	94	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	95	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	96	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	97	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	98	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	99	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	100	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
20/11/2553	101	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	102	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	103	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	104	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	105	1030	1.03	1.06	24.29	25.02
	106	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	107	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	108	998	1.00	1.00	23.54	23.49
	109	982	0.98	0.96	23.16	22.74
	110	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	111	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	112	1031	1.03	1.06	24.32	25.07
	113	1025	1.03	1.05	24.17	24.78
	114	1025	1.03	1.05	24.17	24.78
	115	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	116	1012	1.01	1.02	23.87	24.15
	117	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	118	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	119	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	120	1003	1.00	1.01	23.66	23.73

ตารางที่ ก-10 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 15 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
26/11/2553	0	142	0.14	0.02	3.35	0.48
	1	153	0.15	0.02	3.61	0.55
	2	155	0.16	0.02	3.66	0.57
	3	159	0.16	0.03	3.75	0.60
	4	166	0.17	0.03	3.92	0.65
27/11/2553	5	188	0.19	0.04	4.43	0.83
	6	227	0.23	0.05	5.35	1.22
	7	240	0.24	0.06	5.66	1.36
	8	245	0.25	0.06	5.78	1.42
	9	255	0.26	0.07	6.01	1.53
	10	284	0.28	0.08	6.70	1.90
	11	295	0.30	0.09	6.96	2.05
	12	245	0.25	0.06	5.78	1.42
	13	266	0.27	0.07	6.27	1.67
	14	303	0.30	0.09	7.15	2.17
	15	306	0.31	0.09	7.22	2.21
	16	348	0.35	0.12	8.21	2.86
	17	339	0.34	0.11	8.00	2.71
	18	353	0.35	0.12	8.33	2.94
	19	398	0.40	0.16	9.39	3.74
	20	404	0.40	0.16	9.53	3.85
	21	378	0.38	0.14	8.92	3.37
	22	378	0.38	0.14	8.92	3.37
	23	423	0.42	0.18	9.98	4.22
	24	456	0.46	0.21	10.75	4.90
	25	481	0.48	0.23	11.34	5.46
	26	515	0.52	0.27	12.15	6.26
	27	531	0.53	0.28	12.52	6.65
	28	559	0.56	0.31	13.18	7.37
28/11/2553	29	501	0.50	0.25	11.82	5.92
	30	569	0.57	0.32	13.42	7.64
	31	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	32	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	33	647	0.65	0.42	15.26	9.87
	34	689	0.69	0.47	16.25	11.20
	35	711	0.71	0.51	16.77	11.92
	36	711	0.71	0.51	16.77	11.92
	37	711	0.71	0.51	16.77	11.92
	38	747	0.75	0.56	17.62	13.16
	39	747	0.75	0.56	17.62	13.16
	40	747	0.75	0.56	17.62	13.16

ตารางที่ ก-10 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 15 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	41	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	42	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	43	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	44	824	0.82	0.68	19.43	16.01
	45	865	0.87	0.75	20.40	17.65
	46	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	47	855	0.86	0.73	20.17	17.24
	48	855	0.86	0.73	20.17	17.24
	49	865	0.87	0.75	20.40	17.65
	50	865	0.87	0.75	20.40	17.65
	51	888	0.89	0.79	20.94	18.60
	52	888	0.89	0.79	20.94	18.60
29/11/2553	53	889	0.89	0.79	20.97	18.64
	54	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	55	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	56	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	57	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	58	945	0.95	0.89	22.29	21.06
	59	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	60	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	61	1030	1.03	1.06	24.29	25.02
	62	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	63	1030	1.03	1.06	24.29	25.02
	64	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	65	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	66	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	67	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	68	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	69	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	70	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	71	1031	1.03	1.06	24.32	25.07
	72	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	73	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	74	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	75	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	76	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
30/11/2553	77	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	78	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	79	1022	1.02	1.04	24.10	24.63
	80	1024	1.02	1.05	24.15	24.73
	81	1024	1.02	1.05	24.15	24.73
	82	1020	1.02	1.04	24.06	24.54

ตารางที่ ก-10 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 15 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	83	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	84	1041	1.04	1.08	24.55	25.56
	85	1041	1.04	1.08	24.55	25.56
	86	1041	1.04	1.08	24.55	25.56
	87	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	88	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	89	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	90	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	91	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	92	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	93	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	94	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	95	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	96	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	97	1041	1.04	1.08	24.55	25.56
	98	1030	1.03	1.06	24.29	25.02
	99	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	100	1062	1.06	1.13	25.05	26.60
1/12/2553	101	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	102	1030	1.03	1.06	24.29	25.02
	103	1062	1.06	1.13	25.05	26.60
	104	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	105	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	106	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	107	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	108	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	109	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	110	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	111	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	112	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	113	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	114	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	115	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	116	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	117	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	118	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	119	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	120	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	121	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	122	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	123	1067	1.07	1.14	25.17	26.85

ตารางที่ ก-10 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 15 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	124	1041	1.04	1.08	24.55	25.56
2/12/2553	125	1041	1.04	1.08	24.55	25.56
	126	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	127	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	128	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	129	987	0.99	0.97	23.28	22.98
	130	987	0.99	0.97	23.28	22.98
	131	1031	1.03	1.06	24.32	25.07
	132	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	133	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	134	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	135	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	136	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	137	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	138	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	139	1060	1.06	1.12	25.00	26.50

ตารางที่ ก-11 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 10 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
8/12/2553	0	158	0.16	0.02	3.73	0.59
	1	166	0.17	0.03	3.92	0.65
	2	172	0.17	0.03	4.06	0.70
	3	142	0.14	0.02	3.35	0.48
	4	172	0.17	0.03	4.06	0.70
	5	227	0.23	0.05	5.35	1.22
	6	227	0.23	0.05	5.35	1.22
	7	267	0.27	0.07	6.30	1.68
	8	288	0.29	0.08	6.79	1.96
9/12/2553	9	288	0.29	0.08	6.79	1.96
	10	305	0.31	0.09	7.19	2.19
	11	311	0.31	0.10	7.33	2.28
	12	288	0.29	0.08	6.79	1.96
	13	289	0.29	0.08	6.82	1.97
	14	288	0.29	0.08	6.79	1.96
	15	311	0.31	0.10	7.33	2.28

ตารางที่ ก-11 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 10 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Curent density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	16	324	0.32	0.10	7.64	2.48
	17	334	0.33	0.11	7.88	2.63
	18	334	0.33	0.11	7.88	2.63
	19	336	0.34	0.11	7.92	2.66
	20	365	0.37	0.13	8.61	3.14
	21	389	0.39	0.15	9.17	3.57
	22	389	0.39	0.15	9.17	3.57
	23	411	0.41	0.17	9.69	3.98
	24	411	0.41	0.17	9.69	3.98
	25	424	0.42	0.18	10.00	4.24
	26	445	0.45	0.20	10.50	4.67
	27	486	0.49	0.24	11.46	5.57
	28	498	0.50	0.25	11.75	5.85
	29	506	0.51	0.26	11.93	6.04
	30	545	0.55	0.30	12.85	7.01
	31	545	0.55	0.30	12.85	7.01
	32	556	0.56	0.31	13.11	7.29
10/12/2553	33	587	0.59	0.34	13.84	8.13
	34	611	0.61	0.37	14.41	8.80
	35	612	0.61	0.37	14.43	8.83
	36	647	0.65	0.42	15.26	9.87
	37	689	0.69	0.47	16.25	11.20
	38	747	0.75	0.56	17.62	13.16
	39	747	0.75	0.56	17.62	13.16
	40	757	0.76	0.57	17.85	13.52
	41	757	0.76	0.57	17.85	13.52
	42	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	43	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	44	824	0.82	0.68	19.43	16.01
	45	824	0.82	0.68	19.43	16.01
	46	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	47	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	48	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	49	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	50	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	51	945	0.95	0.89	22.29	21.06
	52	956	0.96	0.91	22.55	21.56
	53	986	0.99	0.97	23.25	22.93
	54	986	0.99	0.97	23.25	22.93
	55	1003	1.00	1.01	23.66	23.73

ตารางที่ ก-11 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 10 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Curent density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	56	986	0.99	0.97	23.25	22.93
11/12/2553	57	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	58	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	59	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	60	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	61	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	62	1014	1.01	1.03	23.92	24.25
	63	1014	1.01	1.03	23.92	24.25
	64	1018	1.02	1.04	24.01	24.44
	65	1018	1.02	1.04	24.01	24.44
	66	1018	1.02	1.04	24.01	24.44
	67	1030	1.03	1.06	24.29	25.02
	68	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	69	988	0.99	0.98	23.30	23.02
	70	1030	1.03	1.06	24.29	25.02
	71	1030	1.03	1.06	24.29	25.02
	72	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	73	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	74	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	75	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	76	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	77	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	78	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	79	1090	1.09	1.19	25.71	28.02
	80	1097	1.10	1.20	25.87	28.38
12/12/2553	81	1097	1.10	1.20	25.87	28.38
	82	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	83	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	84	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	85	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	86	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	87	1089	1.09	1.19	25.68	27.97
	88	1090	1.09	1.19	25.71	28.02
	89	1090	1.09	1.19	25.71	28.02
	90	1078	1.08	1.16	25.42	27.41
	91	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	92	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	93	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	94	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	95	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	96	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	97	1080	1.08	1.17	25.47	27.51

ตารางที่ ก-11 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 10 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Curent density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	98	1043	1.04	1.09	24.60	25.66
	99	1089	1.09	1.19	25.68	27.97
	100	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	101	1089	1.09	1.19	25.68	27.97
	102	1043	1.04	1.09	24.60	25.66
	103	1030	1.03	1.06	24.29	25.02
	104	1030	1.03	1.06	24.29	25.02
13/12/2553	105	1097	1.10	1.20	25.87	28.38
	106	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	107	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	108	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	109	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	110	1078	1.08	1.16	25.42	27.41
	111	1081	1.08	1.17	25.50	27.56
	112	1081	1.08	1.17	25.50	27.56
	113	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	114	1090	1.09	1.19	25.71	28.02
	115	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	116	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	117	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	118	1058	1.06	1.12	24.95	26.40
	119	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	120	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	121	1097	1.10	1.20	25.87	28.38
	122	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	123	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	124	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	125	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	126	1097	1.10	1.20	25.87	28.38
	127	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	128	1090	1.09	1.19	25.71	28.02
14/12/2553	129	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	130	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	131	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	132	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	133	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	134	1097	1.10	1.20	25.87	28.38
	135	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	136	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	137	1090	1.09	1.19	25.71	28.02
	138	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	139	1101	1.10	1.21	25.97	28.59

ตารางที่ ก-11 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทด 10 ซม.

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Curent density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	140	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	141	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	142	1097	1.10	1.20	25.87	28.38
	143	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	144	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	145	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	146	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	147	1100	1.10	1.21	25.94	28.54

ตารางที่ ก-12 ผลการทดลองการหาประสิทธิภาพเชิงกลอุมป์ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดแตกต่างกัน 4 ระยะ

ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า แอโนดและแคโทด (ซม.)	ประสิทธิภาพเชิงกลอุมป์ (%)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด (มิลลิแอมแปร์)
25	8.58	1.008
20	9.46	1.024
15	10.35	1.051
10	10.95	1.090

ตารางที่ ก-13 ผลการทดลองการหาค่าความนำไฟฟ้าที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดแตกต่างกัน 4 ระยะ

ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า แอโนดและแคโทด (ซม.)	ความนำไฟฟ้า (มิลลิซีเมนต์/ซม.)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด (มิลลิแอมแปร์)
25	4.39	1.008
20	4.58	1.024
15	4.70	1.051
10	4.89	1.090

การทดลองที่ 2.3 ผลการทดลองผลของอัตรากระบรทุกสารอินทรีย์ที่เหมาะสม

ตารางที่ ก-14 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์

8.86 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
16/12/2553	0	117	0.12	0.01	2.76	0.32
	1	161	0.16	0.03	3.80	0.61
	2	196	0.20	0.04	4.62	0.91
	3	188	0.19	0.04	4.43	0.83
	4	117	0.12	0.01	2.76	0.32
	5	218	0.22	0.05	5.14	1.12
	6	166	0.17	0.03	3.92	0.65
	7	198	0.20	0.04	4.67	0.92
	8	196	0.20	0.04	4.62	0.91
	9	191	0.19	0.04	4.50	0.86
	10	204	0.20	0.04	4.81	0.98
	11	208	0.21	0.04	4.91	1.02
	12	238	0.24	0.06	5.61	1.34
	13	245	0.25	0.06	5.78	1.42
	14	279	0.28	0.08	6.58	1.84
	15	220	0.22	0.05	5.19	1.14
	16	273	0.27	0.07	6.44	1.76
	17	299	0.30	0.09	7.05	2.11
	18	284	0.28	0.08	6.70	1.90
	19	236	0.24	0.06	5.57	1.31
17/12/2553	20	293	0.29	0.09	6.91	2.02
	21	251	0.25	0.06	5.92	1.49
	22	379	0.38	0.14	8.94	3.39
	23	314	0.31	0.10	7.41	2.33
	24	359	0.36	0.13	8.47	3.04
	25	404	0.40	0.16	9.53	3.85
	26	413	0.41	0.17	9.74	4.02
	27	411	0.41	0.17	9.69	3.98
	28	473	0.47	0.22	11.16	5.28
	29	490	0.49	0.24	11.56	5.66
	30	442	0.44	0.20	10.42	4.61
	31	453	0.45	0.21	10.68	4.84
	32	489	0.49	0.24	11.53	5.64
	33	489	0.49	0.24	11.53	5.64
	34	451	0.45	0.20	10.64	4.80
	35	477	0.48	0.23	11.25	5.37
	36	503	0.50	0.25	11.86	5.97
	37	504	0.50	0.25	11.89	5.99
	38	504	0.50	0.25	11.89	5.99

ตารางที่ ก-14 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตรากระบวนการทุกสารอินทรีย์

8.86 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	39	510	0.51	0.26	12.03	6.13
	40	531	0.53	0.28	12.52	6.65
	41	487	0.49	0.24	11.49	5.59
	42	568	0.57	0.32	13.40	7.61
	43	559	0.56	0.31	13.18	7.37
18/12/2553	44	559	0.56	0.31	13.18	7.37
	45	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	46	678	0.68	0.46	15.99	10.84
	47	678	0.68	0.46	15.99	10.84
	48	619	0.62	0.38	14.60	9.04
	49	636	0.64	0.40	15.00	9.54
	50	647	0.65	0.42	15.26	9.87
	51	668	0.67	0.45	15.75	10.52
	52	688	0.69	0.47	16.23	11.16
	53	689	0.69	0.47	16.25	11.20
	54	706	0.71	0.50	16.65	11.76
	55	750	0.75	0.56	17.69	13.27
	56	750	0.75	0.56	17.69	13.27
	57	747	0.75	0.56	17.62	13.16
	58	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	59	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	60	815	0.82	0.66	19.22	15.67
	61	815	0.82	0.66	19.22	15.67
	62	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	63	865	0.87	0.75	20.40	17.65
	64	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	65	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	66	887	0.89	0.79	20.92	18.56
	67	855	0.86	0.73	20.17	17.24
19/12/2553	68	868	0.87	0.75	20.47	17.77
	69	911	0.91	0.83	21.49	19.57
	70	912	0.91	0.83	21.51	19.62
	71	904	0.90	0.82	21.32	19.27
	72	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	73	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	74	911	0.91	0.83	21.49	19.57
	75	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	76	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	77	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	78	908	0.91	0.82	21.42	19.44
	79	945	0.95	0.89	22.29	21.06
	80	855	0.86	0.73	20.17	17.24
	81	845	0.85	0.71	19.93	16.84

ตารางที่ ก-14 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตรากระบวรทุกสารอินทรีย์

8.86 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	82	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	83	978	0.98	0.96	23.07	22.56
	84	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	85	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	86	913	0.91	0.83	21.53	19.66
	87	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	88	998	1.00	1.00	23.54	23.49
	89	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	90	1016	1.02	1.03	23.96	24.35
	91	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
20/12/2553	92	970	0.97	0.94	22.88	22.19
	93	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	94	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	95	981	0.98	0.96	23.14	22.70
	96	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	97	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	98	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	99	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	100	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	101	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	102	1016	1.02	1.03	23.96	24.35
	103	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	104	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	105	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	106	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	107	1118	1.12	1.25	26.37	29.48
	108	1118	1.12	1.25	26.37	29.48
	109	1118	1.12	1.25	26.37	29.48
	110	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	111	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	112	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	113	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	114	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	115	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
21/12/2553	116	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	117	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	118	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	119	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	120	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	121	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	122	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	123	1100	1.10	1.21	25.94	28.54

ตารางที่ ก-14 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตรากระบวรทุกสารอินทรีย์

8.86 กก.ซีโอไซด์/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	124	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	125	1108	1.11	1.23	26.13	28.95
	126	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	127	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	128	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	129	1018	1.02	1.04	24.01	24.44
	130	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	131	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	132	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	133	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	134	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	135	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	136	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	137	1118	1.12	1.25	26.37	29.48
	138	1118	1.12	1.25	26.37	29.48
	139	1118	1.12	1.25	26.37	29.48
22/12/2553	140	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	141	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	142	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	143	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	144	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	145	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	146	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	147	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	148	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	149	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	150	1118	1.12	1.25	26.37	29.48
	151	1118	1.12	1.25	26.37	29.48
	152	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	153	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	154	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	155	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	156	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	157	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	158	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	159	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	160	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	161	1121	1.12	1.26	26.44	29.64

ตารางที่ ก-15 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

6.64 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Curent density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
24/12/2553	0	134	0.13	0.02	3.16	0.42
	1	145	0.15	0.02	3.42	0.50
	2	145	0.15	0.02	3.42	0.50
	3	167	0.17	0.03	3.94	0.66
	4	188	0.19	0.04	4.43	0.83
	5	188	0.19	0.04	4.43	0.83
	6	198	0.20	0.04	4.67	0.92
	7	201	0.20	0.04	4.74	0.95
	8	256	0.26	0.07	6.04	1.55
	9	245	0.25	0.06	5.78	1.42
	10	238	0.24	0.06	5.61	1.34
	11	288	0.29	0.08	6.79	1.96
	12	289	0.29	0.08	6.82	1.97
	13	289	0.29	0.08	6.82	1.97
	14	332	0.33	0.11	7.83	2.60
25/12/2553	15	358	0.36	0.13	8.44	3.02
	16	358	0.36	0.13	8.44	3.02
	17	358	0.36	0.13	8.44	3.02
	18	389	0.39	0.15	9.17	3.57
	19	403	0.40	0.16	9.50	3.83
	20	411	0.41	0.17	9.69	3.98
	21	468	0.47	0.22	11.04	5.17
	22	476	0.48	0.23	11.23	5.34
	23	476	0.48	0.23	11.23	5.34
	24	476	0.48	0.23	11.23	5.34
	25	476	0.48	0.23	11.23	5.34
	26	515	0.52	0.27	12.15	6.26
	27	550	0.55	0.30	12.97	7.13
	28	550	0.55	0.30	12.97	7.13
	29	590	0.59	0.35	13.92	8.21
	30	595	0.60	0.35	14.03	8.35
	31	590	0.59	0.35	13.92	8.21
	32	558	0.56	0.31	13.16	7.34
	33	619	0.62	0.38	14.60	9.04
	34	628	0.63	0.39	14.81	9.30
	35	628	0.63	0.39	14.81	9.30
	36	628	0.63	0.39	14.81	9.30
	37	628	0.63	0.39	14.81	9.30
	38	628	0.63	0.39	14.81	9.30
26/12/2553	39	688	0.69	0.47	16.23	11.16
	40	706	0.71	0.50	16.65	11.76

ตารางที่ ก-15 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตรากระบวรทุกสารอินทรีย์

6.64 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Curent density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	41	689	0.69	0.47	16.25	11.20
	42	703	0.70	0.49	16.58	11.66
	43	716	0.72	0.51	16.89	12.09
	44	748	0.75	0.56	17.64	13.20
	45	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	46	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	47	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	48	716	0.72	0.51	16.89	12.09
	49	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	50	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	51	824	0.82	0.68	19.43	16.01
	52	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	53	867	0.87	0.75	20.45	17.73
	54	834	0.83	0.70	19.67	16.40
	55	865	0.87	0.75	20.40	17.65
	56	865	0.87	0.75	20.40	17.65
	57	865	0.87	0.75	20.40	17.65
	58	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	59	888	0.89	0.79	20.94	18.60
	60	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	61	945	0.95	0.89	22.29	21.06
	62	989	0.99	0.98	23.33	23.07
27/12/2553	63	989	0.99	0.98	23.33	23.07
	64	989	0.99	0.98	23.33	23.07
	65	989	0.99	0.98	23.33	23.07
	66	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	67	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	68	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	69	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	70	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	71	989	0.99	0.98	23.33	23.07
	72	989	0.99	0.98	23.33	23.07
	73	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	74	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	75	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	76	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	77	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	78	1064	1.06	1.13	25.09	26.70
	79	1064	1.06	1.13	25.09	26.70
	80	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	81	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	82	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	83	1010	1.01	1.02	23.82	24.06

ตารางที่ ก-15 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์

6.64 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Curent density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	84	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	85	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	86	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
28/12/2553	87	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	88	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	89	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	90	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	91	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	92	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	93	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	94	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	95	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	96	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	97	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	98	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	99	1128	1.13	1.27	26.60	30.01
	100	1128	1.13	1.27	26.60	30.01
	101	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	102	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	103	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	104	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	105	1130	1.13	1.28	26.65	30.12
	106	1130	1.13	1.28	26.65	30.12
	107	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	108	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	109	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	110	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
29/12/2553	111	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	112	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	113	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	114	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	115	1130	1.13	1.28	26.65	30.12
	116	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	117	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	118	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	119	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	120	1130	1.13	1.28	26.65	30.12
	121	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	122	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	123	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	124	1098	1.10	1.21	25.90	28.43

ตารางที่ ก-15 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์

6.64 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	125	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	126	1130	1.13	1.28	26.65	30.12
	127	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	128	1138	1.14	1.30	26.84	30.54

ตารางที่ ก-16 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์

4.43 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
5/1/2554	0	175	0.18	0.03	4.13	0.72
	1	161	0.16	0.03	3.80	0.61
	2	155	0.16	0.02	3.66	0.57
	3	157	0.16	0.02	3.70	0.58
	4	187	0.19	0.03	4.41	0.82
	5	188	0.19	0.04	4.43	0.83
	6	245	0.25	0.06	5.78	1.42
	7	245	0.25	0.06	5.78	1.42
	8	266	0.27	0.07	6.27	1.67
6/1/2554	9	284	0.28	0.08	6.70	1.90
	10	284	0.28	0.08	6.70	1.90
	11	273	0.27	0.07	6.44	1.76
	12	245	0.25	0.06	5.78	1.42
	13	324	0.32	0.10	7.64	2.48
	14	324	0.32	0.10	7.64	2.48
	15	324	0.32	0.10	7.64	2.48
	16	332	0.33	0.11	7.83	2.60
	17	350	0.35	0.12	8.25	2.89
	18	398	0.40	0.16	9.39	3.74
	19	398	0.40	0.16	9.39	3.74
	20	415	0.42	0.17	9.79	4.06
	21	415	0.42	0.17	9.79	4.06
	22	423	0.42	0.18	9.98	4.22
	23	491	0.49	0.24	11.58	5.69
	24	491	0.49	0.24	11.58	5.69
	25	481	0.48	0.23	11.34	5.46
	26	548	0.55	0.30	12.92	7.08
	27	569	0.57	0.32	13.42	7.64
	28	569	0.57	0.32	13.42	7.64
	29	559	0.56	0.31	13.18	7.37

ตารางที่ ก-16 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตรากระบวรทุกสารอินทรีย์

4.43 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	30	569	0.57	0.32	13.42	7.64
	31	619	0.62	0.38	14.60	9.04
7/1/2554	32	619	0.62	0.38	14.60	9.04
	33	667	0.67	0.44	15.73	10.49
	34	667	0.67	0.44	15.73	10.49
	35	706	0.71	0.50	16.65	11.76
	36	716	0.72	0.51	16.89	12.09
	37	745	0.75	0.56	17.57	13.09
	38	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	39	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	40	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	41	813	0.81	0.66	19.17	15.59
	42	813	0.81	0.66	19.17	15.59
	43	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	44	824	0.82	0.68	19.43	16.01
	45	834	0.83	0.70	19.67	16.40
	46	865	0.87	0.75	20.40	17.65
	47	865	0.87	0.75	20.40	17.65
	48	855	0.86	0.73	20.17	17.24
	49	865	0.87	0.75	20.40	17.65
	50	865	0.87	0.75	20.40	17.65
	51	914	0.91	0.84	21.56	19.70
	52	914	0.91	0.84	21.56	19.70
	53	889	0.89	0.79	20.97	18.64
	54	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	55	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	56	924	0.92	0.85	21.79	20.14
8/1/2554	57	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	58	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	59	962	0.96	0.93	22.69	21.83
	60	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	61	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	62	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	63	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	64	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	65	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	66	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	67	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	68	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	69	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	70	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	71	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	72	1040	1.04	1.08	24.53	25.51

ตารางที่ ก-16 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตรากระบวนการทุกสารอินทรีย์

4.43 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	73	1068	1.07	1.14	25.19	26.90
	74	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	75	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	76	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	77	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	78	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	79	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	80	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
9/1/2554	81	1118	1.12	1.25	26.37	29.48
	82	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	83	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	84	1064	1.06	1.13	25.09	26.70
	85	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	86	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	87	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	88	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	89	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	90	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	91	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	92	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	93	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	94	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	95	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	96	1064	1.06	1.13	25.09	26.70
	97	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	98	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	99	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	100	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	101	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	102	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	103	1150	1.15	1.32	27.12	31.19
	104	1143	1.14	1.31	26.96	30.81
10/1/2554	105	1143	1.14	1.31	26.96	30.81
	106	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	107	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	108	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	109	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	110	1129	1.13	1.27	26.63	30.06
	111	1143	1.14	1.31	26.96	30.81
	112	1109	1.11	1.23	26.16	29.01
	113	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	114	1128	1.13	1.27	26.60	30.01
	115	1138	1.14	1.30	26.84	30.54

ตารางที่ ก-16 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์

4.43 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	116	1143	1.14	1.31	26.96	30.81
	117	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	118	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	119	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	120	1143	1.14	1.31	26.96	30.81
	121	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	122	1152	1.15	1.33	27.17	31.30
	123	1152	1.15	1.33	27.17	31.30
	124	1150	1.15	1.32	27.12	31.19
	125	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	126	1140	1.14	1.30	26.89	30.65
	127	1140	1.14	1.30	26.89	30.65
11/1/2554	128	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	129	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	130	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	131	1145	1.15	1.31	27.00	30.92
	132	1147	1.15	1.32	27.05	31.03
	133	1155	1.16	1.33	27.24	31.46
	134	1155	1.16	1.33	27.24	31.46
	135	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	136	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	137	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	138	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	139	1150	1.15	1.32	27.12	31.19
	140	1149	1.15	1.32	27.10	31.14
	141	1150	1.15	1.32	27.12	31.19

ตารางที่ ก-17 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์

2.22 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
19/1/2554	0	178	0.18	0.03	4.20	0.75
	1	169	0.17	0.03	3.99	0.67
	2	172	0.17	0.03	4.06	0.70
	3	172	0.17	0.03	4.06	0.70
	4	172	0.17	0.03	4.06	0.70
	5	228	0.23	0.05	5.38	1.23
	6	228	0.23	0.05	5.38	1.23
	7	267	0.27	0.07	6.30	1.68

ตารางที่ ก-17 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์

2.22 กก.ชีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Curent density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
20/1/2554	8	298	0.30	0.09	7.03	2.09
	9	298	0.30	0.09	7.03	2.09
	10	305	0.31	0.09	7.19	2.19
	11	341	0.34	0.12	8.04	2.74
	12	356	0.36	0.13	8.40	2.99
	13	356	0.36	0.13	8.40	2.99
	14	356	0.36	0.13	8.40	2.99
	15	298	0.30	0.09	7.03	2.09
	16	296	0.30	0.09	6.98	2.07
	17	334	0.33	0.11	7.88	2.63
	18	334	0.33	0.11	7.88	2.63
	19	334	0.33	0.11	7.88	2.63
	20	395	0.40	0.16	9.32	3.68
	21	389	0.39	0.15	9.17	3.57
	22	389	0.39	0.15	9.17	3.57
	23	423	0.42	0.18	9.98	4.22
	24	437	0.44	0.19	10.31	4.50
	25	437	0.44	0.19	10.31	4.50
	26	463	0.46	0.21	10.92	5.06
	27	463	0.46	0.21	10.92	5.06
	28	463	0.46	0.21	10.92	5.06
	29	543	0.54	0.29	12.81	6.95
	30	545	0.55	0.30	12.85	7.01
	31	545	0.55	0.30	12.85	7.01
21/1/2554	32	545	0.55	0.30	12.85	7.01
	33	599	0.60	0.36	14.13	8.46
	34	667	0.67	0.44	15.73	10.49
	35	663	0.66	0.44	15.64	10.37
	36	667	0.67	0.44	15.73	10.49
	37	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	38	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	39	698	0.70	0.49	16.46	11.49
	40	706	0.71	0.50	16.65	11.76
	41	706	0.71	0.50	16.65	11.76
	42	748	0.75	0.56	17.64	13.20
	43	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	44	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	45	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	46	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	47	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	48	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	49	883	0.88	0.78	20.83	18.39

ตารางที่ ก-17 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

2.22 กก.ซีไอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Curent density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	50	883	0.88	0.78	20.83	18.39
	51	863	0.86	0.74	20.35	17.57
	52	883	0.88	0.78	20.83	18.39
	53	904	0.90	0.82	21.32	19.27
	54	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	55	962	0.96	0.93	22.69	21.83
22/1/2554	56	962	0.96	0.93	22.69	21.83
	57	998	1.00	1.00	23.54	23.49
	58	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	59	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	60	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	61	1021	1.02	1.04	24.08	24.59
	62	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	63	1042	1.04	1.09	24.58	25.61
	64	1042	1.04	1.09	24.58	25.61
	65	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	66	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	67	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	68	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	69	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	70	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	71	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	72	1016	1.02	1.03	23.96	24.35
	73	988	0.99	0.98	23.30	23.02
	74	988	0.99	0.98	23.30	23.02
	75	1067	1.07	1.14	25.17	26.85
	76	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	77	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	78	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	79	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
23/1/2554	80	1118	1.12	1.25	26.37	29.48
	81	1173	1.17	1.38	27.67	32.45
	82	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	83	1168	1.17	1.36	27.55	32.18
	84	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	85	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	86	1095	1.10	1.20	25.83	28.28
	87	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	88	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	89	1158	1.16	1.34	27.31	31.63
	90	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	91	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	92	1138	1.14	1.30	26.84	30.54

ตารางที่ ก-17 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Curent density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	93	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	94	1042	1.04	1.09	24.58	25.61
	95	1042	1.04	1.09	24.58	25.61
	96	1042	1.04	1.09	24.58	25.61
	97	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	98	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	99	1068	1.07	1.14	25.19	26.90
	100	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	101	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	102	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	103	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
24/1/2554	104	1122	1.12	1.26	26.46	29.69
	105	1122	1.12	1.26	26.46	29.69
	106	1122	1.12	1.26	26.46	29.69
	107	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	108	1162	1.16	1.35	27.41	31.85
	109	1162	1.16	1.35	27.41	31.85
	110	1162	1.16	1.35	27.41	31.85
	111	1162	1.16	1.35	27.41	31.85
	112	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	113	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	114	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	115	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	116	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	117	1157	1.16	1.34	27.29	31.57
	118	1142	1.14	1.30	26.93	30.76
	119	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	120	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	121	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	122	1156	1.16	1.34	27.26	31.52
	123	1102	1.10	1.21	25.99	28.64
	124	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	125	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	126	1145	1.15	1.31	27.00	30.92
	127	1155	1.16	1.33	27.24	31.46
25/1/2554	128	1155	1.16	1.33	27.24	31.46
	129	1167	1.17	1.36	27.52	32.12
	130	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	131	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	132	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	133	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	134	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	135	1178	1.18	1.39	27.78	32.73

ตารางที่ ก-17 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์

2.22 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Curent density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	136	1167	1.17	1.36	27.52	32.12
	137	1167	1.17	1.36	27.52	32.12
	138	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	139	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	140	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	141	1080	1.08	1.17	25.47	27.51
	142	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	143	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	144	1161	1.16	1.35	27.38	31.79
	145	1161	1.16	1.35	27.38	31.79
	146	1178	1.18	1.39	27.78	32.73

ตารางที่ ก-18 ผลการทดลองการหาประสิทธิภาพเชิงกลอุมปีที่อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์

แตกต่างกัน 4 ค่า

อัตรากระบรทุกสารอินทรีย์ (กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน)	ประสิทธิภาพเชิงกลอุมปี (%)	กระแสไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด (มิลลิแอมแปร์)
8.86	11.86	1.102
6.64	14.51	1.127
4.43	17.42	1.145
2.22	20.51	1.160

ตารางที่ ก-19 ผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
จุลชีพแบบห้องเดี่ยวระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	COD _{in} (mg/L)	COD _{out} (mg/L)	COD Removal Efficiency (%)
30/8/2553	0	-	-	-
31/8/2553	5	5057	2193	56.63
2/9/2553	52	5375	2623	51.20
4/9/2553	100	5117	2907	43.19
6/9/2553	150	5071	2926	42.30
16/9/2553	396	5262	2886	45.15
18/9/2553	435	5500	3238	41.13
20/9/2553	473	5412	2302	57.46
22/9/2553	513	4998	2919	41.60
9/10/2553	912	5166	2729	47.17
11/10/2553	950	4843	2012	58.46
13/10/2553	989	5331	2412	54.76
20/10/2553	1148	5300	1953	63.15
22/10/2553	1188	5060	2815	44.37
24/10/2553	1227	5167	1609	68.86
2/11/2553	1433	5048	1637	67.57
4/11/2553	1472	5256	1514	71.19
6/11/2553	1512	5072	1752	65.46
16/11/2553	1743	4701	1217	74.11
18/11/2553	1781	4776	1720	63.99
20/11/2553	1820	4873	1205	75.27
27/11/2553	1979	5152	1089	78.86
29/11/2553	2018	5045	1165	76.91
1/12/2553	2057	4968	864	82.61
9/12/2553	2240	5573	1016	81.77
11/12/2553	2279	5445	979	82.02
13/12/2553	2318	5339	885	83.42
17/12/2553	2405	4965	854	82.80

ตารางที่ ก-19 (ต่อ) ผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	COD _{in} (mg/L)	COD _{out} (mg/L)	COD Removal Efficiency (%)
19/12/2553	2444	5080	864	82.99
21/12/2553	2483	5040	906	82.02
25/12/2553	2570	5098	847	83.39
27/12/2553	2608	5123	898	82.47
29/12/2553	2646	5388	908	83.15
6/1/2554	2829	5305	891	83.20
8/1/2554	2868	4968	901	81.86
10/1/2554	2907	5521	939	82.99
19/1/2554	2946	5141	837	83.72
21/1/2554	2985	5283	912	82.74
23/1/2554	3024	5016	839	83.27

การทดลองส่วนที่ 3 การศึกษาศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าควบคู่กับการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียจริงจากฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์

ตารางที่ ก-20 ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
19/3/2554	0	146	0.15	0.02	3.44	0.50
	1	166	0.17	0.03	3.92	0.65
	2	110	0.11	0.01	2.59	0.29
	3	113	0.11	0.01	2.67	0.30
	4	181	0.18	0.03	4.27	0.77
	5	108	0.11	0.01	2.55	0.28
	6	139	0.14	0.02	3.28	0.46
	7	188	0.19	0.04	4.43	0.83
	8	188	0.19	0.04	4.43	0.83

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	9	188	0.19	0.04	4.43	0.83
	10	189	0.19	0.04	4.46	0.84
	11	188	0.19	0.04	4.43	0.83
	12	188	0.19	0.04	4.43	0.83
	13	198	0.20	0.04	4.67	0.92
	14	198	0.20	0.04	4.67	0.92
	15	198	0.20	0.04	4.67	0.92
	16	198	0.20	0.04	4.67	0.92
	17	166	0.17	0.03	3.92	0.65
	18	220	0.22	0.05	5.19	1.14
	19	166	0.17	0.03	3.92	0.65
20/3/2554	20	220	0.22	0.05	5.19	1.14
	21	220	0.22	0.05	5.19	1.14
	22	220	0.22	0.05	5.19	1.14
	23	220	0.22	0.05	5.19	1.14
	24	245	0.25	0.06	5.78	1.42
	25	245	0.25	0.06	5.78	1.42
	26	245	0.25	0.06	5.78	1.42
	27	245	0.25	0.06	5.78	1.42
	28	254	0.25	0.06	5.99	1.52
	29	266	0.27	0.07	6.27	1.67
	30	254	0.25	0.06	5.99	1.52
	31	266	0.27	0.07	6.27	1.67
	32	276	0.28	0.08	6.51	1.80
	33	276	0.28	0.08	6.51	1.80
	34	294	0.29	0.09	6.93	2.04
	35	276	0.28	0.08	6.51	1.80
	36	266	0.27	0.07	6.27	1.67
	37	279	0.28	0.08	6.58	1.84
	38	276	0.28	0.08	6.51	1.80
	39	294	0.29	0.09	6.93	2.04
	40	299	0.30	0.09	7.05	2.11
	41	299	0.30	0.09	7.05	2.11
	42	299	0.30	0.09	7.05	2.11
	43	303	0.30	0.09	7.15	2.17
21/3/2554	44	303	0.30	0.09	7.15	2.17
	45	324	0.32	0.10	7.64	2.48
	46	345	0.35	0.12	8.14	2.81
	47	345	0.35	0.12	8.14	2.81
	48	362	0.36	0.13	8.54	3.09
	49	362	0.36	0.13	8.54	3.09
	50	362	0.36	0.13	8.54	3.09

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	51	375	0.38	0.14	8.84	3.32
	52	324	0.32	0.10	7.64	2.48
	53	324	0.32	0.10	7.64	2.48
	54	324	0.32	0.10	7.64	2.48
	55	324	0.32	0.10	7.64	2.48
	56	324	0.32	0.10	7.64	2.48
	57	324	0.32	0.10	7.64	2.48
	58	375	0.38	0.14	8.84	3.32
	59	375	0.38	0.14	8.84	3.32
	60	387	0.39	0.15	9.13	3.53
	61	389	0.39	0.15	9.17	3.57
	62	387	0.39	0.15	9.13	3.53
	63	345	0.35	0.12	8.14	2.81
	64	388	0.39	0.15	9.15	3.55
	65	389	0.39	0.15	9.17	3.57
	66	316	0.32	0.10	7.45	2.36
	67	362	0.36	0.13	8.54	3.09
22/3/2554	68	389	0.39	0.15	9.17	3.57
	69	415	0.42	0.17	9.79	4.06
	70	415	0.42	0.17	9.79	4.06
	71	415	0.42	0.17	9.79	4.06
	72	415	0.42	0.17	9.79	4.06
	73	415	0.42	0.17	9.79	4.06
	74	415	0.42	0.17	9.79	4.06
	75	415	0.42	0.17	9.79	4.06
	76	415	0.42	0.17	9.79	4.06
	77	403	0.40	0.16	9.50	3.83
	78	403	0.40	0.16	9.50	3.83
	79	403	0.40	0.16	9.50	3.83
	80	403	0.40	0.16	9.50	3.83
	81	403	0.40	0.16	9.50	3.83
	82	403	0.40	0.16	9.50	3.83
	83	403	0.40	0.16	9.50	3.83
	84	403	0.40	0.16	9.50	3.83
	85	403	0.40	0.16	9.50	3.83
	86	417	0.42	0.17	9.83	4.10
	87	417	0.42	0.17	9.83	4.10
	88	417	0.42	0.17	9.83	4.10
	89	417	0.42	0.17	9.83	4.10
	90	417	0.42	0.17	9.83	4.10
	91	417	0.42	0.17	9.83	4.10
23/3/2554	92	417	0.42	0.17	9.83	4.10

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	93	419	0.42	0.18	9.88	4.14
	94	419	0.42	0.18	9.88	4.14
	95	419	0.42	0.18	9.88	4.14
	96	419	0.42	0.18	9.88	4.14
	97	419	0.42	0.18	9.88	4.14
	98	419	0.42	0.18	9.88	4.14
	99	423	0.42	0.18	9.98	4.22
	100	423	0.42	0.18	9.98	4.22
	101	423	0.42	0.18	9.98	4.22
	102	433	0.43	0.19	10.21	4.42
	103	433	0.43	0.19	10.21	4.42
	104	435	0.44	0.19	10.26	4.46
	105	423	0.42	0.18	9.98	4.22
	106	423	0.42	0.18	9.98	4.22
	107	435	0.44	0.19	10.26	4.46
	108	435	0.44	0.19	10.26	4.46
	109	435	0.44	0.19	10.26	4.46
	110	435	0.44	0.19	10.26	4.46
	111	448	0.45	0.20	10.57	4.73
	112	448	0.45	0.20	10.57	4.73
	113	442	0.44	0.20	10.42	4.61
	114	412	0.41	0.17	9.72	4.00
	115	456	0.46	0.21	10.75	4.90
24/3/2554	116	463	0.46	0.21	10.92	5.06
	117	490	0.49	0.24	11.56	5.66
	118	490	0.49	0.24	11.56	5.66
	119	490	0.49	0.24	11.56	5.66
	120	490	0.49	0.24	11.56	5.66
	121	490	0.49	0.24	11.56	5.66
	122	490	0.49	0.24	11.56	5.66
	123	490	0.49	0.24	11.56	5.66
	124	490	0.49	0.24	11.56	5.66
	125	490	0.49	0.24	11.56	5.66
	126	490	0.49	0.24	11.56	5.66
	127	490	0.49	0.24	11.56	5.66
	128	490	0.49	0.24	11.56	5.66
	129	495	0.50	0.25	11.67	5.78
	130	495	0.50	0.25	11.67	5.78
	131	495	0.50	0.25	11.67	5.78
	132	495	0.50	0.25	11.67	5.78
	133	495	0.50	0.25	11.67	5.78
	134	501	0.50	0.25	11.82	5.92
	135	501	0.50	0.25	11.82	5.92

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	136	501	0.50	0.25	11.82	5.92
	137	501	0.50	0.25	11.82	5.92
	138	501	0.50	0.25	11.82	5.92
	139	501	0.50	0.25	11.82	5.92
25/3/2554	140	505	0.51	0.26	11.91	6.01
	141	505	0.51	0.26	11.91	6.01
	142	505	0.51	0.26	11.91	6.01
	143	503	0.50	0.25	11.86	5.97
	144	515	0.52	0.27	12.15	6.26
	145	515	0.52	0.27	12.15	6.26
	146	515	0.52	0.27	12.15	6.26
	147	515	0.52	0.27	12.15	6.26
	148	515	0.52	0.27	12.15	6.26
	149	531	0.53	0.28	12.52	6.65
	150	531	0.53	0.28	12.52	6.65
	151	540	0.54	0.29	12.74	6.88
	152	531	0.53	0.28	12.52	6.65
	153	531	0.53	0.28	12.52	6.65
	154	505	0.51	0.26	11.91	6.01
	155	569	0.57	0.32	13.42	7.64
	156	569	0.57	0.32	13.42	7.64
	157	569	0.57	0.32	13.42	7.64
	158	569	0.57	0.32	13.42	7.64
	159	569	0.57	0.32	13.42	7.64
	160	569	0.57	0.32	13.42	7.64
	161	569	0.57	0.32	13.42	7.64
	162	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	163	609	0.61	0.37	14.36	8.75
26/3/2554	164	619	0.62	0.38	14.60	9.04
	165	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	166	619	0.62	0.38	14.60	9.04
	167	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	168	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	169	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	170	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	171	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	172	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	173	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	174	619	0.62	0.38	14.60	9.04
	175	619	0.62	0.38	14.60	9.04
	176	628	0.63	0.39	14.81	9.30
	177	619	0.62	0.38	14.60	9.04
	178	628	0.63	0.39	14.81	9.30

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	179	591	0.59	0.35	13.94	8.24
	180	591	0.59	0.35	13.94	8.24
	181	591	0.59	0.35	13.94	8.24
	182	591	0.59	0.35	13.94	8.24
	183	562	0.56	0.32	13.25	7.45
	184	562	0.56	0.32	13.25	7.45
	185	562	0.56	0.32	13.25	7.45
	186	562	0.56	0.32	13.25	7.45
	187	672	0.67	0.45	15.85	10.65
27/3/2554	188	609	0.61	0.37	14.36	8.75
	189	656	0.66	0.43	15.47	10.15
	190	656	0.66	0.43	15.47	10.15
	191	656	0.66	0.43	15.47	10.15
	192	656	0.66	0.43	15.47	10.15
	193	691	0.69	0.48	16.30	11.26
	194	691	0.69	0.48	16.30	11.26
	195	691	0.69	0.48	16.30	11.26
	196	691	0.69	0.48	16.30	11.26
	197	691	0.69	0.48	16.30	11.26
	198	691	0.69	0.48	16.30	11.26
	199	691	0.69	0.48	16.30	11.26
	200	691	0.69	0.48	16.30	11.26
	201	691	0.69	0.48	16.30	11.26
	202	691	0.69	0.48	16.30	11.26
	203	705	0.71	0.50	16.63	11.72
	204	705	0.71	0.50	16.63	11.72
	205	672	0.67	0.45	15.85	10.65
	206	591	0.59	0.35	13.94	8.24
	207	672	0.67	0.45	15.85	10.65
	208	591	0.59	0.35	13.94	8.24
	209	705	0.71	0.50	16.63	11.72
	210	705	0.71	0.50	16.63	11.72
	211	705	0.71	0.50	16.63	11.72
28/3/2554	212	705	0.71	0.50	16.63	11.72
	213	705	0.71	0.50	16.63	11.72
	214	705	0.71	0.50	16.63	11.72
	215	705	0.71	0.50	16.63	11.72
	216	711	0.71	0.51	16.77	11.92
	217	747	0.75	0.56	17.62	13.16
	218	747	0.75	0.56	17.62	13.16
	219	747	0.75	0.56	17.62	13.16
	220	747	0.75	0.56	17.62	13.16

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	221	716	0.72	0.51	16.89	12.09
	222	716	0.72	0.51	16.89	12.09
	223	716	0.72	0.51	16.89	12.09
	224	716	0.72	0.51	16.89	12.09
	225	747	0.75	0.56	17.62	13.16
	226	747	0.75	0.56	17.62	13.16
	227	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	228	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	229	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	230	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	231	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	232	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	233	785	0.79	0.62	18.51	14.53
	234	699	0.70	0.49	16.49	11.52
	235	699	0.70	0.49	16.49	11.52
29/3/2554	236	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	237	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	238	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	239	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	240	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	241	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	242	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	243	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	244	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	245	787	0.79	0.62	18.56	14.61
	246	805	0.81	0.65	18.99	15.28
	247	805	0.81	0.65	18.99	15.28
	248	805	0.81	0.65	18.99	15.28
	249	805	0.81	0.65	18.99	15.28
	250	805	0.81	0.65	18.99	15.28
	251	834	0.83	0.70	19.67	16.40
	252	834	0.83	0.70	19.67	16.40
	253	805	0.81	0.65	18.99	15.28
	254	805	0.81	0.65	18.99	15.28
	255	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	256	789	0.79	0.62	18.61	14.68
	257	789	0.79	0.62	18.61	14.68
	258	805	0.81	0.65	18.99	15.28
	259	845	0.85	0.71	19.93	16.84
30/3/2554	260	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	261	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	262	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	263	845	0.85	0.71	19.93	16.84

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	264	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	265	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	266	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	267	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	268	845	0.85	0.71	19.93	16.84
	269	868	0.87	0.75	20.47	17.77
	270	824	0.82	0.68	19.43	16.01
	271	824	0.82	0.68	19.43	16.01
	272	868	0.87	0.75	20.47	17.77
	273	868	0.87	0.75	20.47	17.77
	274	868	0.87	0.75	20.47	17.77
	275	868	0.87	0.75	20.47	17.77
	276	868	0.87	0.75	20.47	17.77
	277	887	0.89	0.79	20.92	18.56
	278	887	0.89	0.79	20.92	18.56
	279	887	0.89	0.79	20.92	18.56
	280	889	0.89	0.79	20.97	18.64
	281	912	0.91	0.83	21.51	19.62
	282	912	0.91	0.83	21.51	19.62
	283	912	0.91	0.83	21.51	19.62
31/3/2554	284	912	0.91	0.83	21.51	19.62
	285	912	0.91	0.83	21.51	19.62
	286	912	0.91	0.83	21.51	19.62
	287	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	288	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	289	905	0.91	0.82	21.34	19.32
	290	906	0.91	0.82	21.37	19.36
	291	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	292	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	293	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	294	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	295	924	0.92	0.85	21.79	20.14
	296	947	0.95	0.90	22.33	21.15
	297	947	0.95	0.90	22.33	21.15
	298	947	0.95	0.90	22.33	21.15
	299	947	0.95	0.90	22.33	21.15
	300	947	0.95	0.90	22.33	21.15
	301	947	0.95	0.90	22.33	21.15
	302	947	0.95	0.90	22.33	21.15
	303	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	304	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	305	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	306	943	0.94	0.89	22.24	20.97

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	307	943	0.94	0.89	22.24	20.97
1/4/2554	308	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	309	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	310	943	0.94	0.89	22.24	20.97
	311	988	0.99	0.98	23.30	23.02
	312	988	0.99	0.98	23.30	23.02
	313	988	0.99	0.98	23.30	23.02
	314	988	0.99	0.98	23.30	23.02
	315	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	316	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	317	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	318	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	319	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	320	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	321	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	322	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	323	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	324	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	325	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	326	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	327	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	328	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	329	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	330	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	331	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
2/4/2554	332	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	333	1040	1.04	1.08	24.53	25.51
	334	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	335	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	336	1020	1.02	1.04	24.06	24.54
	337	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	338	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	339	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	340	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	341	1060	1.06	1.12	25.00	26.50
	342	1081	1.08	1.17	25.50	27.56
	343	1081	1.08	1.17	25.50	27.56
	344	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	345	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	346	1003	1.00	1.01	23.66	23.73
	347	1011	1.01	1.02	23.84	24.11
	348	1082	1.08	1.17	25.52	27.61
	349	1098	1.10	1.21	25.90	28.43

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	350	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	351	1100	1.10	1.21	25.94	28.54
	352	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	353	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	354	1108	1.11	1.23	26.13	28.95
	355	1108	1.11	1.23	26.13	28.95
3/4/2554	356	1108	1.11	1.23	26.13	28.95
	357	1108	1.11	1.23	26.13	28.95
	358	1108	1.11	1.23	26.13	28.95
	359	1108	1.11	1.23	26.13	28.95
	360	1108	1.11	1.23	26.13	28.95
	361	998	1.00	1.00	23.54	23.49
	362	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	363	988	0.99	0.98	23.30	23.02
	364	988	0.99	0.98	23.30	23.02
	365	988	0.99	0.98	23.30	23.02
	366	988	0.99	0.98	23.30	23.02
	367	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	368	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	369	987	0.99	0.97	23.28	22.98
	370	987	0.99	0.97	23.28	22.98
	371	987	0.99	0.97	23.28	22.98
	372	987	0.99	0.97	23.28	22.98
	373	1108	1.11	1.23	26.13	28.95
	374	1108	1.11	1.23	26.13	28.95
	375	1108	1.11	1.23	26.13	28.95
	376	1002	1.00	1.00	23.63	23.68
	377	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	378	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	379	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
4/4/2554	380	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	381	1101	1.10	1.21	25.97	28.59
	382	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	383	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	384	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	385	1121	1.12	1.26	26.44	29.64
	386	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	387	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	388	1173	1.17	1.38	27.67	32.45
	389	1158	1.16	1.34	27.31	31.63
	390	1173	1.17	1.38	27.67	32.45
	391	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	392	1173	1.17	1.38	27.67	32.45

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	393	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	394	1168	1.17	1.36	27.55	32.18
	395	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	396	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	397	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	398	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	399	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	400	1182	1.18	1.40	27.88	32.95
	401	1182	1.18	1.40	27.88	32.95
	402	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	403	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
5/4/2554	404	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	405	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	406	1182	1.18	1.40	27.88	32.95
	407	1182	1.18	1.40	27.88	32.95
	408	1098	1.10	1.21	25.90	28.43
	409	1159	1.16	1.34	27.33	31.68
	410	1178	1.18	1.39	27.78	32.73
	411	1182	1.18	1.40	27.88	32.95
	412	1182	1.18	1.40	27.88	32.95
	413	1187	1.19	1.41	28.00	33.23
	414	1237	1.24	1.53	29.17	36.09
	415	1187	1.19	1.41	28.00	33.23
	416	1237	1.24	1.53	29.17	36.09
	417	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	418	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	419	1256	1.26	1.58	29.62	37.21
	420	1256	1.26	1.58	29.62	37.21
	421	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	422	1138	1.14	1.30	26.84	30.54
	423	1256	1.26	1.58	29.62	37.21
	424	1182	1.18	1.40	27.88	32.95
	425	1173	1.17	1.38	27.67	32.45
	426	1218	1.22	1.48	28.73	34.99
	427	1254	1.25	1.57	29.58	37.09
6/4/2554	428	1247	1.25	1.56	29.41	36.67
	429	1254	1.25	1.57	29.58	37.09
	430	1254	1.25	1.57	29.58	37.09
	431	1254	1.25	1.57	29.58	37.09
	432	1118	1.12	1.25	26.37	29.48
	433	1180	1.18	1.39	27.83	32.84
	434	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	435	1295	1.30	1.68	30.54	39.55

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	436	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	437	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	438	1118	1.12	1.25	26.37	29.48
	439	1134	1.13	1.29	26.75	30.33
	440	1256	1.26	1.58	29.62	37.21
	441	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	442	1134	1.13	1.29	26.75	30.33
	443	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	444	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	445	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	446	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	447	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	448	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	449	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	450	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	451	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
7/4/2554	452	1252	1.25	1.57	29.53	36.97
	453	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	454	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	455	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	456	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	457	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	458	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	459	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	460	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	461	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	462	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	463	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	464	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	465	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	466	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	467	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	468	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	469	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	470	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	471	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	472	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	473	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	474	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	475	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
8/4/2554	476	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	477	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	478	1334	1.33	1.78	31.46	41.97

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จูลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	479	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	480	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	481	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	482	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	483	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	484	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	485	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	486	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	487	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	488	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	489	1275	1.28	1.63	30.07	38.34
	490	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	491	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	492	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	493	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	494	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	495	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	496	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	497	1324	1.32	1.75	31.23	41.34
	498	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	499	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
9/4/2554	500	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	501	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	502	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	503	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	504	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	505	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	506	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	507	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	508	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	509	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	510	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	511	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	512	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	513	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	514	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	515	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	516	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	517	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	518	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	519	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	520	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	521	1375	1.38	1.89	32.43	44.59

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	522	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	523	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
10/4/2554	524	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	525	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	526	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	527	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	528	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	529	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	530	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	531	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	532	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	533	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	534	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	535	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	536	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	537	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	538	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	539	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	540	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	541	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	542	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	543	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	544	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	545	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	546	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	547	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
11/4/2554	548	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	549	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	550	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	551	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	552	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	553	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	554	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	555	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	556	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	557	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	558	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	559	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	560	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	561	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	562	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	563	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	564	1316	1.32	1.73	31.04	40.85

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	565	1324	1.32	1.75	31.23	41.34
	566	1324	1.32	1.75	31.23	41.34
	567	1324	1.32	1.75	31.23	41.34
	568	1324	1.32	1.75	31.23	41.34
	569	1324	1.32	1.75	31.23	41.34
	570	1324	1.32	1.75	31.23	41.34
	571	1324	1.32	1.75	31.23	41.34
12/4/2554	572	1324	1.32	1.75	31.23	41.34
	573	1324	1.32	1.75	31.23	41.34
	574	1324	1.32	1.75	31.23	41.34
	575	1324	1.32	1.75	31.23	41.34
	576	1324	1.32	1.75	31.23	41.34
	577	1324	1.32	1.75	31.23	41.34
	578	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	579	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	580	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	581	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	582	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	583	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	584	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	585	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	586	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	587	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	588	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	589	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	590	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	591	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	592	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	593	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	594	1295	1.30	1.68	30.54	39.55
	595	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
13/4/2554	596	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	597	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	598	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	599	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	600	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	601	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	602	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	603	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	604	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	605	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	606	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	607	1316	1.32	1.73	31.04	40.85

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	608	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	609	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	610	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	611	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	612	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	613	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	614	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	615	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	616	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	617	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	618	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	619	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
14/4/2554	620	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	621	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	622	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	623	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	624	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	625	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	626	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	627	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	628	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	629	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	630	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	631	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	632	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	633	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	634	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	635	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	636	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	637	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	638	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	639	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	640	1288	1.29	1.66	30.38	39.13
	641	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	642	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	643	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
15/4/2554	644	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	645	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	646	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	647	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	648	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	649	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	650	1316	1.32	1.73	31.04	40.85

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	651	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	652	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	653	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	654	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	655	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	656	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	657	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	658	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	659	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	660	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	661	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	662	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	663	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	664	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	665	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	666	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	667	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
16/4/2554	668	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	669	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	670	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	671	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	672	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	673	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	674	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	675	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	676	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	677	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	678	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	679	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	680	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	681	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	682	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	683	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	684	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	685	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	686	1339	1.34	1.79	31.58	42.29
	687	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	688	1339	1.34	1.79	31.58	42.29
	689	1339	1.34	1.79	31.58	42.29
	690	1339	1.34	1.79	31.58	42.29
	691	1339	1.34	1.79	31.58	42.29
17/4/2554	692	1339	1.34	1.79	31.58	42.29
	693	1339	1.34	1.79	31.58	42.29

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	694	1339	1.34	1.79	31.58	42.29
	695	1339	1.34	1.79	31.58	42.29
	696	1339	1.34	1.79	31.58	42.29
	697	1339	1.34	1.79	31.58	42.29
	698	1339	1.34	1.79	31.58	42.29
	699	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	700	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	701	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	702	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	703	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	704	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	705	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	706	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	707	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	708	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	709	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	710	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	711	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	712	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	713	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	714	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	715	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
18/4/2554	716	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	717	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	718	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	719	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	720	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	721	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	722	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	723	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	724	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	725	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	726	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	727	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	728	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	729	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	730	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	731	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	732	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	733	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	734	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	735	1375	1.38	1.89	32.43	44.59

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	736	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	737	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	738	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	739	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
19/4/2554	740	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	741	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	742	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	743	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	744	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	745	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	746	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	747	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	748	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	749	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	750	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	751	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	752	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	753	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	754	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	755	1356	1.36	1.84	31.98	43.37
	756	1356	1.36	1.84	31.98	43.37
	757	1356	1.36	1.84	31.98	43.37
	758	1356	1.36	1.84	31.98	43.37
	759	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	760	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	761	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	762	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	763	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
20/4/2554	764	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	765	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	766	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	767	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	768	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	769	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	770	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	771	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	772	1356	1.36	1.84	31.98	43.37
	773	1356	1.36	1.84	31.98	43.37
	774	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	775	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	776	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	777	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	778	1344	1.34	1.81	31.70	42.60

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	779	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	780	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	781	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	782	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	783	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	784	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	785	1388	1.39	1.93	32.74	45.44
	786	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	787	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
21/4/2554	788	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	789	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	790	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	791	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	792	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	793	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	794	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	795	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	796	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	797	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	798	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	799	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	800	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	801	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	802	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	803	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	804	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	805	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	806	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	807	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	808	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	809	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	810	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	811	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
22/4/2554	812	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	813	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	814	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	815	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	816	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	817	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	818	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	819	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	820	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	821	1394	1.39	1.94	32.88	45.83

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	822	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	823	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	824	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	825	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	826	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	827	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	828	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	829	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	830	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	831	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	832	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	833	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	834	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
23/4/2554	835	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	836	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	837	1356	1.36	1.84	31.98	43.37
	838	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	839	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	840	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	841	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	842	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	843	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	844	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	845	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	846	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
	847	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	848	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	849	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	850	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	851	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	852	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	853	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	854	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	855	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	856	1316	1.32	1.73	31.04	40.85
	857	1326	1.33	1.76	31.27	41.47
	858	1334	1.33	1.78	31.46	41.97
24/4/2554	859	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	860	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	861	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	862	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	863	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	864	1344	1.34	1.81	31.70	42.60

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	865	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	866	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	867	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	868	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	869	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	870	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	871	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	872	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	873	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	874	1388	1.39	1.93	32.74	45.44
	875	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	876	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	877	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	878	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	879	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	880	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	881	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	882	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
25/4/2554	883	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	884	1356	1.36	1.84	31.98	43.37
	885	1356	1.36	1.84	31.98	43.37
	886	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	887	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	888	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	889	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	890	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	891	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	892	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	893	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	894	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	895	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	896	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	897	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	898	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	899	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	900	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	901	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	902	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	903	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	904	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	905	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	906	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
26/4/2554	907	1394	1.39	1.94	32.88	45.83

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุดชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	908	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	909	1356	1.36	1.84	31.98	43.37
	910	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	911	1358	1.36	1.84	32.03	43.49
	912	1378	1.38	1.90	32.50	44.79
	913	1378	1.38	1.90	32.50	44.79
	914	1378	1.38	1.90	32.50	44.79
	915	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	916	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	917	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	918	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	919	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	920	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	921	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	922	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	923	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	924	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	925	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	926	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	927	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	928	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	929	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	930	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
27/4/2554	931	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	932	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	933	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	934	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	935	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	936	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	937	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	938	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	939	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	940	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	941	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	942	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	943	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	944	1344	1.34	1.81	31.70	42.60
	945	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	946	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	947	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	948	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	949	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	950	1376	1.38	1.89	32.45	44.66

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	951	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	952	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	953	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	954	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
28/4/2554	955	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	956	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	957	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	958	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	959	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	960	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	961	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	962	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	963	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	964	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	965	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	966	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	967	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	968	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	969	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	970	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	971	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	972	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	973	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	974	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	975	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	976	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	977	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	978	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
29/4/2554	979	1356	1.36	1.84	31.98	43.37
	980	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	981	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	982	1388	1.39	1.93	32.74	45.44
	983	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	984	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	985	1388	1.39	1.93	32.74	45.44
	986	1388	1.39	1.93	32.74	45.44
	987	1388	1.39	1.93	32.74	45.44
	988	1388	1.39	1.93	32.74	45.44
	989	1388	1.39	1.93	32.74	45.44
	990	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	991	1375	1.38	1.89	32.43	44.59
	992	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	993	1394	1.39	1.94	32.88	45.83

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จูลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	994	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	995	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	996	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	997	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	998	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	999	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1000	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1001	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1002	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
30/4/2554	1003	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1004	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1005	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1006	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1007	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1008	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1009	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1010	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1011	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1012	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1013	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1014	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1015	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1016	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1017	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1018	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1019	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1020	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1021	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1022	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1023	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1024	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1025	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1026	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
1/5/2554	1027	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1028	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1029	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1030	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1031	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1032	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1033	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1034	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1035	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1036	1394	1.39	1.94	32.88	45.83

ตารางที่ ก-20 (ต่อ) ผลการทดลองการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
 จุลชีพแบบห้องเดี่ยวด้วยการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	Voltage (mV)	Current (mA)	Power (mW)	Current density (mA/m ²)	Power density (mW/m ²)
	1037	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1038	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1039	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1040	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1041	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1042	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1043	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1044	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1045	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1046	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	1047	1376	1.38	1.89	32.45	44.66
	1048	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1049	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1050	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
2/5/2554	1051	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1052	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1053	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1054	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1055	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1056	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1057	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1058	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1059	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1060	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1061	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1062	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1063	1388	1.39	1.93	32.74	45.44
	1064	1388	1.39	1.93	32.74	45.44
	1065	1388	1.39	1.93	32.74	45.44
	1066	1388	1.39	1.93	32.74	45.44
	1067	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1068	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1069	1394	1.39	1.94	32.88	45.83
	1070	1394	1.39	1.94	32.88	45.83

ตารางที่ ก-21 ผลการทดลองประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีจากน้ำเสียฟาร์มสุกรด้วยเซลล์เชื้อเพลิง
จุลชีพแบบห้องเดี่ยวระหว่างการเดินระบบแบบต่อเนื่อง

Date	Time (hr)	COD _{in} (mg/L)	COD _{out} (mg/L)	COD Removal Efficiency (%)
18/3/2554	0	-	-	-
19/3/2554	10	3857	1179	69.43
21/3/2554	59	4113	1300	68.39
23/3/2554	105	4082	1527	62.59
25/3/2554	155	3952	988	75.00
27/3/2554	203	3840	653	82.99
29/3/2554	250	3961	593	85.03
31/3/2554	298	3791	784	79.32
2/4/2554	345	3901	1423	63.52
4/4/2554	394	3786	623	83.54
6/4/2554	442	3890	574	85.24
8/4/2554	490	3992	485	87.85
10/4/2554	538	4143	411	90.08
12/4/2554	586	4210	323	92.33
14/4/2554	634	4048	312	92.29
16/4/2554	680	3995	341	91.46
18/4/2554	730	3873	289	92.54
20/4/2554	780	4288	370	91.37
22/4/2554	827	3888	294	92.44
24/4/2554	873	4333	422	90.26
26/4/2554	921	3800	340	91.05
28/4/2554	970	4180	332	92.06
30/4/2554	1017	3709	366	90.13
2/5/2554	1065	4398	358	91.86

ภาคผนวก ข

รายการคำนวณ

1. การวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้า

1.1 กระแสไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า

หลังจากทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าแล้วจะนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้แปลงเป็นค่ากระแสไฟฟ้าโดยมีค่าความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

โดยที่ I คือ กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

V คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้า (โอห์ม)

และสามารถคำนวณค่ากำลังไฟฟ้าได้จากสมการที่ (2)

$$P = IV \quad (2)$$

เมื่อ P คือ กำลังไฟฟ้า (วัตต์)

หลังจากคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้าแล้วนั้นจะสามารถหาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าและค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าได้เมื่อทราบพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนดดังสมการที่ (3) และ (4)

$$\text{Current density} = \frac{I}{A_{\text{anode}}} \quad (3)$$

$$\text{Power density} = \frac{P}{A_{\text{anode}}} \quad (4)$$

เมื่อ Current density คือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์/ตร.ม.)

Power density คือ ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (มิลลิวัตต์/ตร.ม.)

A_{anode} คือ พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าแอโนด (ตร.ม.)

ตัวอย่างการคำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และ ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า จากการทดลองที่แปรค่าขนาดพื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้าแอโนดเท่ากับ 424 ตร.ซม. เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 1,003 มิลลิโวลต์ ที่ความต้านทานภายนอกเท่ากับ 1 กิโลโอห์ม

$$I = \frac{V}{R}$$

$$I = 1,003 / 1000 = 1.003 \text{ มิลลิแอมแปร์}$$

$$P = IV$$

$$P = (1.003 \times 0.001) \times 1,003 = 1.006 \text{ มิลลิวัตต์}$$

$$\text{Current density} = 1.003 / 0.0424 = 23.66 \text{ มิลลิแอมแปร์/ตร.ม.}$$

$$\text{Power density} = 1.006 / 0.0424 = 23.73 \text{ มิลลิวัตต์/ตร.ม.}$$

1.2 ประสิทธิภาพเชิงกลอมป์

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพเชิงกลอมป์จากค่ากระแสไฟฟ้าเฉลี่ย ที่อัตราการไหลของ น้ำเสียเข้าระบบเท่ากับ 8.33×10^{-8} ลบ.ม./วินาที โดยค่าซีโอดีที่เปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ 0.09 กรัม/ลิตร

$$C_E = \frac{8I}{Fq \Delta\text{COD}}$$

$$C_E = ((8 \times 8.67 \times 10^{-6})) / (96,500 \times (8.33 \times 10^{-8}) \times 0.09) = 0.096$$

$$C_E \% = 0.096 \times 100 = 9.6 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

2. การคำนวณซีไอดี

$$\text{ซีไอดี, มก./ล.} = \frac{(A-B) \times N \times 8,000}{\text{ปริมาตรน้ำตัวอย่าง, มล.}}$$

เมื่อ A คือ ปริมาตรของสารละลายเอเฟเอสที่ใช้ไตเตรทแบลงค์, มล.

B คือ ปริมาตรของสารละลายเอเฟเอสที่ใช้ไตเตรทน้ำตัวอย่าง, มล.

N คือ นอร์มัลลิตีของเอเฟเอส

ตัวอย่างการคำนวณค่าซีไอดีจากตัวอย่างน้ำเสียฟาร์มสุกรตัวอย่างหนึ่ง

$$\text{ซีไอดี} = \frac{(11.5 - 5.8) \times 0.025 \times 8,000}{0.3}$$

$$\text{ซีไอดี} = 3,800 \text{ มก./ล.}$$

3. การคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี

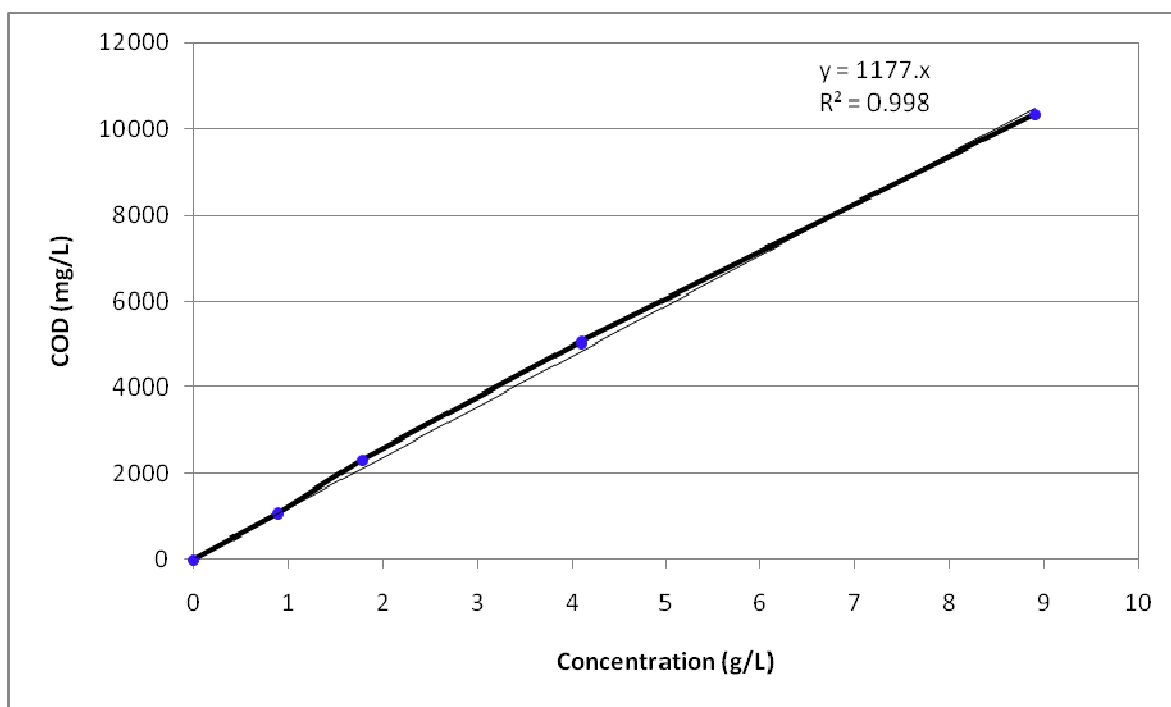
$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี (\%)} = \frac{(\text{ซีไอดีเข้า} - \text{ซีไอดีออก})}{\text{ซีไอดีเข้า}} \times 100$$

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดีจากน้ำเสียฟาร์มสุกร โดยมีค่าซีไอดีก่อนเข้าระบบเท่ากับ 3,873 มก./ล. และค่าซีไอดีออกจากระบบเท่ากับ 289 มก./ล.

$$\text{ประสิทธิภาพการบำบัดซีไอดี} = \frac{(3,873 - 289)}{3,873} \times 100 = 92.54 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

ภาคผนวก ค

กราฟมาตรฐาน



รูปที่ ค-1 กราฟมาตรฐานซูโครส

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภาณุภูมิ อัดตสิริลักษณ์ เกิดเมื่อวันที่ 21 เดือนตุลาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดนครปฐม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายเมื่อ พ.ศ. 2545 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2550 และต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2551