

การบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟตสูงโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TREATMENT OF ORGANIC WASTEWATER CONTAINING HIGH-
SULFATE USING MICROBIAL FUEL CELLS

Miss Achiraya Sangcharoen



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 2014
Copyright of Chulalongkorn University

| | |
|---------------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟตสูงโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ |
| โดย | นางสาวอชิรญา แสงเจริญ |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญจพร สุวรรณศิลป์ |

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญจพร สุวรรณศิลป์)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ตะวัน ลิ้มปิยากร)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภู่งามเสริฐ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิลาสินี อยู่ชัชวาล)

อชิรญา แสงเจริญ : การบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟตสูงโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ (TREATMENT OF ORGANIC WASTEWATER CONTAINING HIGH-SULFATE USING MICROBIAL FUEL CELLS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. เบญจพร สุวรรณศิลป์, 126 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแบบห้องเดี่ยวที่ใช้อากาศเพื่อบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟตและผลิตกระแสไฟฟ้า รวมถึงศึกษากลไกที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ ทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่องโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.6 ซึ่งประกอบด้วยกรดแลคติก โซเดียมซัลเฟต และธาตุอาหารที่สำคัญอื่น ๆ สำหรับจุลินทรีย์ ควบคุมระยะเวลาที่เก็บน้ำ 1 วัน และใช้ตัวต้านทานภายนอกขนาด 1000 โอห์ม ผลการทดลองเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพดังกล่าวมีประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอยู่ที่ $51 \pm 9.88\%$ และ $57 \pm 10.09\%$ ส่วนซัลเฟตอยู่ที่ $21 \pm 9\%$ และ $18 \pm 9\%$ ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้สูงสุดอยู่ที่ 0.093 และ 0.179 โวลต์ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ 1 และ 2 ตามลำดับ ค่าความต้านทานภายในของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเดินระบบ เนื่องมาจากการสะสมตัวของซัลเฟอร์บนขั้วแอโนด ส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของขั้วลดลง อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนขั้วแอโนดส่งผลให้การผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว กลไกที่คาดว่าเกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ ได้แก่ กลไกการบำบัดซีโอดีจากตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยและจุลินทรีย์ที่เกาะติดบนขั้วแอโนด กลไกการบำบัดซัลเฟตจากตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยในระบบ กลไกการบำบัดซัลไฟด์โดยจุลินทรีย์บนขั้วแอโนดและกระบวนการ abiotic sulfide oxidation ที่ขั้วแอโนด และกลไกการเกิดกระแสไฟฟ้าโดยจุลินทรีย์บนขั้วแอโนดและกระบวนการ abiotic sulfide oxidation ที่ขั้วแอโนด จากผลการวิเคราะห์กลุ่มจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค 16s metagenomics (MiSeq, Illumina) ในตัวอย่างตะกอนเริ่มต้นกลุ่มจุลินทรีย์ที่พบมากที่สุด 30.02% คือ *Clostridium spp.* เช่นเดียวกันกับตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยช่วงที่มีกระแสไฟฟ้าสูงในสองสัปดาห์แรกของการเดินระบบที่พบ *Clostridium spp.* ปริมาณ 50.65% อย่างไรก็ตามในช่วงท้ายของระบบพบว่าจุลินทรีย์กลุ่มแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ *Desulfococcus spp.* *Desulfosacina spp.* และ *Desulfovibrio spp.* สำหรับตะกอนจุลินทรีย์บนขั้วแอโนดพบจุลินทรีย์กลุ่มแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ คือ *Thiobacillus spp.* มากที่สุดปริมาณ 22.52%

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2557

5470441321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: น้ำเสียซัลเฟตสูง / เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ / กระบวนการซัลเฟตรีดักชัน / แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต / แบคทีเรียออกซิโดซัลเฟอร์

ACHIRAYA SANGCHAROEN: TREATMENT OF ORGANIC WASTEWATER CONTAINING HIGH-SULFATE USING MICROBIAL FUEL CELLS. ADVISOR: ASST. PROF. BENJAPORN SUWANNASILP, 126 pp.

This study investigated the application of single-chamber microbial fuel cells (MFCs) for the treatment of organic wastewater containing sulfate with simultaneous electricity generation. The treatment mechanisms within the MFCs were also studied. The MFCs were operated continuously and fed with synthetic wastewater with the COD: sulfate ratio of 0.6 containing lactic acid, sodium sulfate, and other nutrients. The hydraulic retention time of the MFCs was 1 day. The efficiencies of COD removal in MFC1 and MFC2 were $51 \pm 9.88\%$ and $57 \pm 10.09\%$, respectively. The efficiencies of sulfate removal in MFC1 and MFC2 were $21 \pm 9\%$ and $18 \pm 9\%$, respectively. The maximum of voltage in MFC1 and MFC2 are 0.093 and 0.179 volt, respectively. Internal resistances of the MFCs decreased over time due to the accumulation of sulfur on the anodes, which decreased the conductivity of the anodes. However, replacement of an anode rapidly improved the electricity generation of the MFC. Mechanisms that were likely to occur in the MFC include COD removal by suspended microorganisms and anode attached microorganisms, sulfate removal by suspended microorganisms, sulfide removal and electricity generation by anode attached microorganisms and abiotic sulfide oxidation. From the microbial community analysis using 16S metagenomics (MiSeq, Illumina), *Clostridium spp.* were dominant (30.02% of total microorganisms) in the seed inoculums. The suspended microorganisms in the MFC with high electricity generation during the first two weeks of operation were also dominated with *Clostridium spp.* (50.65%). However, sulfate-reducing bacteria, such as *Desulfococcus spp.*, *Desulfosacina spp.*, and *Desulfovibrio spp.* increased at the end of the MFC operation. On the other hand, sulfur-oxidizing bacteria such as *Thiobacillus spp.* (22.52% of total microorganisms) were dominant in the anode attached microorganisms.

Department: Environmental Engineering Student's Signature

Field of Study: Environmental Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยและเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วง ผู้วิจัยได้รับความอนุเคราะห์จากหน่วยงานหลายหน่วยงานและบุคคลหลายท่าน ทั้งนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์จากภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนสนับสนุนโครงการพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่จากศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บริษัท แซน อี. 68 แล็บ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ตะกอนจุลินทรีย์บำบัดแบบไร้อากาศ เพื่อใช้ในการเริ่มต้นระบบ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์พื้นที่และเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เบญจพร สุวรรณศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษาและช่วยแนะแนวทางในการทำวิจัย รวมถึงช่วยแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำวิจัยและเล่มวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้การทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

รองศาสตราจารย์ ดร. ตะวัน ลิ้มปิยากร ที่ให้คำแนะนำทั้งในขั้นตอนการทำงานวิจัย และการนำเสนอผลงานในที่สาธารณะ รวมถึงการสละเวลาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์ ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยพร ภู่งามเสริฐ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิลาสินี อยู่ชัชวาล ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำจนทำให้เล่มวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

คณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่สั่งสอนและให้ความรู้เกี่ยวกับงานทางด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ตลอดจนเจ้าหน้าที่ประจำศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ผล ห้องปฏิบัติการในการทำวิจัย รวมถึงคำแนะนำทางด้านเอกสาร ที่ทำให้งานวิจัยและเล่มวิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี

ขอบคุณ นางสาวศรยา กิจพ่อคำ นางสาวปรียาภรณ์ พรกุลวัฒน์ และนายวิษุทธิ์ นิยม ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัย ตลอดจนเพื่อนๆ พี่ๆ ทุกคน และครอบครัวที่ให้ความช่วยเหลือ กำลังใจ ให้คำปรึกษา และดูแลในตลอดระยะเวลาการทำวิจัย รวมถึงเล่มวิทยานิพนธ์

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 5 |
| 2.1 น้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟตสูง | 5 |
| 2.2 วัฏจักรซัลเฟอร์ในธรรมชาติ | 6 |
| 2.3 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรซัลเฟอร์ | 8 |
| 2.3.1 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate-reducing bacteria)..... | 8 |
| 2.3.2 แบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลเฟอร์/ซัลไฟด์ (Sulfur/Sulfide-oxidizing bacteria) | 9 |
| 2.4 เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ (Microbial fuel cells) | 10 |
| 2.4.1 ความหมายและส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ | 10 |
| 2.4.2 การเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ | 11 |
| 2.4.3 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ | 13 |
| 2.5 เทคนิค Illumina MiSeq System | 17 |

| | |
|---|----|
| 2.6 เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดมลพิษซัลเฟอร์ | 17 |
| 2.7 กลไกที่อาจเกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟต | 22 |
| บทที่ 3 แผนการทดลองและดำเนินงานวิจัย | 25 |
| 3.1 แผนงานวิจัย | 25 |
| 3.2 การดำเนินการทดลอง..... | 26 |
| 3.2.1 การทดลองช่วงที่ 1 | 26 |
| 3.2.2 การทดลองช่วงที่ 2 | 31 |
| 3.2.3 การทดลองช่วงที่ 3..... | 37 |
| บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง | 39 |
| 4.1 ผลการทดลองช่วงที่ 1 การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดและความสามารถในการผลิต กระแสไฟฟ้าของน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟตในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ | 39 |
| 4.2 ผลการทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาบทบาทและกลไกการทำงานของจุลินทรีย์ที่แขวนลอยใน ระบบและจุลินทรีย์ที่อยู่บนชีวแอมโนด | 54 |
| 4.2.1 ผลของการทดลองย่อยชุดที่ (1)..... | 54 |
| 4.2.2 ผลของการทดลองย่อยชุดที่ (2)..... | 57 |
| 4.2.3 ผลของการทดลองย่อยชุดที่ (3)..... | 60 |
| 4.2.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและชนิดของธาตุที่พบบนพื้นผิวของชีวแอมโนด | 63 |
| 4.2.5 การวิเคราะห์กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในการทดลองช่วงที่ 2..... | 65 |
| 4.3 ผลการทดลองช่วงที่ 3 การศึกษากลุ่มจุลินทรีย์ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพโดยใช้เทคนิค Illumina MiSeq System | 74 |
| 4.4 การวิเคราะห์กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในงานวิจัยนี้..... | 79 |
| บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ | 87 |
| 5.1 สรุปผลการวิจัย..... | 87 |
| 5.2 ประโยชน์ทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... | 88 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 5.3 ข้อเสนอแนะ | 88 |
| รายการอ้างอิง | 89 |
| ภาคผนวก ก | 93 |
| ภาคผนวก ข | 94 |
| ภาคผนวก ค | 95 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 126 |



สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--|------|
| ตารางที่ 2 - 1 ที่มาของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขั้นตอนต่าง ๆ ของโรงงานรวมถึงปริมาณน้ำเสียของแต่ละประเภทโรงงาน..... | 5 |
| ตารางที่ 2 - 2 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในวัฏจักรซัลเฟอร์..... | 7 |
| ตารางที่ 2 - 3 ตัวอย่างปฏิกริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ของ I-SRB และ C-SRB..... | 9 |
| ตารางที่ 2 - 4 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ..... | 11 |
| ตารางที่ 2 - 5 ค่าความต่างศักย์ reduction half reaction ของสารรับ/ให้อิเล็กตรอน และจำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายทอดที่พีเอช 7 | 13 |
| ตารางที่ 2 - 6 สรุปผลการศึกษาของงานวิจัยที่ผ่านมา | 21 |
| ตารางที่ 2 - 7 กลไกที่อาจเกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟต..... | 23 |
| ตารางที่ 3 - 1 ความเข้มข้นของสารในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการบำบัดแบบไร้อากาศ 29 | |
| ตารางที่ 3 - 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเดินระบบ | 29 |
| ตารางที่ 3 - 3 พารามิเตอร์และวิธีหรือเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลอง..... | 30 |
| ตารางที่ 3 - 4 พารามิเตอร์และวิธีหรือเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลองย่อยที่ 1..... | 32 |
| ตารางที่ 3 - 5 ความเข้มข้นของสารในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลองย่อยที่ 2..... | 34 |
| ตารางที่ 3 - 6 พารามิเตอร์และวิธีหรือเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลองย่อยที่ 2..... | 34 |
| ตารางที่ 3 - 7 ความเข้มข้นของสารในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลองย่อยที่ 3..... | 36 |
| ตารางที่ 3 - 8 พารามิเตอร์และวิธีหรือเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลองย่อยที่ 3..... | 36 |
| ตารางที่ 4 - 1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในงานวิจัยที่ผ่านมา 39 | |
| ตารางที่ 4 - 2 สรุปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ในการทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94..... | 48 |

| | |
|---|----|
| ตารางที่ 4 - 3 สรุปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94..... | 50 |
| ตารางที่ 4 - 4 สรุปค่าความหนาแน่นไฟฟ้าสูงสุดและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ที่คำนวณได้จากการทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94..... | 51 |
| ตารางที่ 4 - 5 สรุปค่าความหนาแน่นไฟฟ้าสูงสุดและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ที่คำนวณได้จากการทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94..... | 52 |
| ตารางที่ 4 - 6 สรุปผลการทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาบทบาทและกลไกการทำงานของจุลินทรีย์ที่แขวนลอยในระบบและจุลินทรีย์ที่อยู่บนขั้วแอโนด..... | 65 |
| ตารางที่ 4 - 7 สรุปกลไกที่เกิดขึ้นในการทดลองช่วงที่ 2 | 68 |
| ตารางที่ 4 - 8 Genus ของแบคทีเรียที่พบมากที่สุดของตะกอนเริ่มต้นระบบ | 76 |
| ตารางที่ 4 - 9 Genus ของแบคทีเรียที่พบมากที่สุดในช่วงที่มีกระแสไฟฟ้าสูงในช่วงแรก | 76 |
| ตารางที่ 4 - 10 Genus ของแบคทีเรียที่พบมากที่สุดในช่วงทำการเดินระบบ | 77 |
| ตารางที่ 4 - 11 Genus ของแบคทีเรียที่พบมากที่สุดบนขั้วแอโนด | 78 |

สารบัญภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| ภาพที่ 2 - 1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในวัฏจักรซัลเฟอร์..... | 7 |
| ภาพที่ 3 - 1 แผนการทดลองโดยรวมของงานวิจัย | 26 |
| ภาพที่ 3 - 2 แผนผังการทดลองช่วงที่ 1..... | 27 |
| ภาพที่ 3 - 3 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ..... | 28 |
| ภาพที่ 3 - 4 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์..... | 30 |
| ภาพที่ 3 - 5 แผนผังรวมของการทดลองช่วงที่ 2..... | 31 |
| ภาพที่ 3 - 6 แผนผังการทดลองย่อยชุดที่ 1..... | 32 |
| ภาพที่ 3 - 7 แผนผังการทดลองย่อยที่ 2..... | 33 |
| ภาพที่ 3 - 8 แผนผังการทดลองย่อยชุดที่ 3..... | 35 |
| ภาพที่ 3 - 9 แผนผังลำดับการทดลองช่วงที่ 3..... | 38 |
| ภาพที่ 4 - 1 ปริมาณของซีโอดีในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 | 40 |
| ภาพที่ 4 - 2 ปริมาณของซีโอดีในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2..... | 40 |
| ภาพที่ 4 - 3 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้งสอง..... | 40 |
| ภาพที่ 4 - 4 ปริมาณซัลเฟตในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1..... | 41 |
| ภาพที่ 4 - 5 ปริมาณซัลเฟตในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2..... | 41 |
| ภาพที่ 4 - 6 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้งสอง..... | 42 |
| ภาพที่ 4 - 7 ความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้งสอง..... | 42 |
| ภาพที่ 4 - 8 ค่า ORP ที่วัดได้จากการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2..... | 43 |
| ภาพที่ 4 - 9 ค่าพีเอชที่วัดได้จากการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2..... | 43 |
| ภาพที่ 4 - 10 ลักษณะพื้นผิวและชนิดของธาตุที่พบบนพื้นผิวของขั้วแอโนดเริ่มต้น..... | 44 |
| ภาพที่ 4 - 11 ลักษณะพื้นผิวและชนิดของธาตุที่พบบนพื้นผิวของขั้วแอโนดหลังการทดลอง..... | 44 |
| ภาพที่ 4 - 12 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลอง..... | 45 |

| | |
|---|----|
| ภาพที่ 4 - 13 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลอง..... | 45 |
| ภาพที่ 4 - 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของ เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ในการทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94..... | 47 |
| ภาพที่ 4 - 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของ เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94..... | 49 |
| ภาพที่ 4 - 16 กราฟความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ที่คำนวณได้จาก การทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94..... | 51 |
| ภาพที่ 4 - 17 กราฟความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ที่คำนวณได้จาก การทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94..... | 52 |
| ภาพที่ 4 - 18 ความเข้มข้นของซีโอดีในการทดลองย่อยชุดที่ (1)..... | 54 |
| ภาพที่ 4 - 19 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของการทดลองย่อยชุดที่ (1)..... | 55 |
| ภาพที่ 4 - 20 ความเข้มข้นของซัลเฟตในการทดลองย่อยชุดที่ (1)..... | 55 |
| ภาพที่ 4 - 21 ประสิทธิภาพของการบำบัดซัลเฟตของการทดลองย่อยชุดที่ (1)..... | 55 |
| ภาพที่ 4 - 22 ปริมาณของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในการทดลองย่อยชุดที่ (1)..... | 56 |
| ภาพที่ 4 - 23 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองย่อยชุดที่ (1)..... | 56 |
| ภาพที่ 4 - 24 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้จากการทดลองย่อยชุดที่ (1)..... | 57 |
| ภาพที่ 4 - 25 ความเข้มข้นของซีโอดีในการทดลองย่อยชุดที่ (2)..... | 58 |
| ภาพที่ 4 - 26 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของการทดลองย่อยชุดที่ (2)..... | 58 |
| ภาพที่ 4 - 27 ความเข้มข้นของซัลไฟด์ในการทดลองย่อยชุดที่ (2)..... | 58 |
| ภาพที่ 4 - 28 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ของการทดลองย่อยชุดที่ (2)..... | 59 |
| ภาพที่ 4 - 29 ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของซัลเฟตในการทดลองย่อยชุดที่ (2)..... | 59 |
| ภาพที่ 4 - 30 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในการทดลองย่อยชุดที่ (2)..... | 60 |
| ภาพที่ 4 - 31 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้ในการทดลองย่อยชุดที่ (2)..... | 60 |
| ภาพที่ 4 - 32 ความเข้มข้นของซัลไฟด์ในการทดลองย่อยชุดที่ (3)..... | 61 |
| ภาพที่ 4 - 33 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ของการทดลองย่อยชุดที่ (3)..... | 61 |

| | |
|--|----|
| ภาพที่ 4 - 34 ปริมาณซัลเฟตที่เพิ่มขึ้นในการทดลองย่อยชุดที่ (3)..... | 62 |
| ภาพที่ 4 - 35 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในการทดลองย่อยชุดที่ (3)..... | 62 |
| ภาพที่ 4 - 36 ค่าความหนาแน่นไฟฟ้าที่คำนวณได้ในการทดลองย่อยชุดที่ (3)..... | 62 |
| ภาพที่ 4 - 37 ภาพพื้นผิวและธาตุที่พบบนขั้วแอโนดเริ่มต้น..... | 63 |
| ภาพที่ 4 - 38 ภาพพื้นผิวและธาตุที่พบบนขั้วแอโนดของการทดลองช่วงที่ 2 ชุดที่ (1)..... | 64 |
| ภาพที่ 4 - 39 ภาพพื้นผิวและธาตุที่พบบนขั้วแอโนดของการทดลองช่วงที่ 2 ชุดที่ (2)..... | 64 |
| ภาพที่ 4 - 40 ภาพพื้นผิวและธาตุที่พบบนขั้วแอโนดของการทดลองช่วงที่ 2 ชุดที่ (3)..... | 64 |
| ภาพที่ 4 - 41 กลไกที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแล้วทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้..... | 66 |
| ภาพที่ 4 - 42 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการทดลองย่อยชุดที่ (1)..... | 69 |
| ภาพที่ 4 - 43 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการทดลองย่อยชุดที่ (2)..... | 71 |
| ภาพที่ 4 - 44 กลไกที่เกิดขึ้นในการทดลองย่อยชุดที่ (3)..... | 73 |
| ภาพที่ 4 - 45 ผลการทำ PCR เพื่อเพิ่มจำนวน 16S rRNA ของจุลินทรีย์ในแต่ละตัวอย่าง..... | 74 |
| ภาพที่ 4 - 46 Phylum ที่พบในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองช่วงที่ 1..... | 75 |
| ภาพที่ 4 - 47 สรุปรูปภาพความเข้มข้นซีไอดีในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2..... | 79 |
| ภาพที่ 4 - 48 สรุปรูปภาพความเข้มข้นซัลเฟตในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2..... | 81 |
| ภาพที่ 4 - 49 สรุปรูปภาพความเข้มข้นซัลไฟต์ในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2..... | 83 |
| ภาพที่ 4 - 50 สรุปรูปภาพความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2..... | 85 |

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟตสูงมักถูกปล่อยออกมาจากโรงงานหลายประเภท เช่น โรงงานผลิตกระดาษ โรงงานแปรรูปยางพารา โรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โรงงานผลิตยาปฏิชีวนะ อุตสาหกรรมปิโตรเลียม และอุตสาหกรรมการทำเหมืองแร่ เป็นต้น ซึ่งสารอินทรีย์และซัลเฟตเหล่านี้อาจมาจากตัววัตถุดิบหรือสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต ทำให้เกิดการปนเปื้อนออกมาพร้อมกับน้ำเสียหลังผ่านกระบวนการทั้งหมด หากน้ำเสียเหล่านี้ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่ผ่านกระบวนการบำบัดอาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อทั้งทางด้านกายภาพและชีวภาพต่อสิ่งแวดล้อมรวมถึงระบบนิเวศ (Costanzo และคณะ, 2005, Kümmerer, 2009)

การบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์สูงโดยทั่วไปมักนิยมใช้กระบวนการบำบัดทางชีวภาพทั้งแบบใช้อากาศและแบบไร้อากาศเนื่องจากประสิทธิภาพในการบำบัดสูงเมื่อเทียบกับต้นทุนและค่าใช้จ่ายที่ต่ำ แต่กระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศมักมีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่ากระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ อีกทั้งในยุคปัจจุบันกระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศนับว่ามีข้อเด่นหลายประการ ทั้งในแง่ของการประหยัดพลังงานและการดึงกลับพลังงาน (Energy recovery) จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ ดังนั้นระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศจึงนับเป็นทางเลือกที่น่าสนใจอย่างมาก ในยุคปัจจุบัน อย่างไรก็ตามกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศนั้นอาจไม่เหมาะสมสำหรับการบำบัดน้ำเสียซึ่งปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์และซัลเฟต เนื่องจากปริมาณซัลเฟตที่สูงในน้ำเสียมีแนวโน้มที่จะลดประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ นอกจากนี้ปริมาณซัลเฟตที่สูงในน้ำเสียสามารถก่อให้เกิดกระบวนการซัลเฟตรีดักชันโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเกิดผลิตภัณฑ์คือไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งทำให้คุณภาพของก๊าซชีวภาพลดลงจึงไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน ดังนั้นการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์และซัลเฟตสูงด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศโดยทั่วไปจึงไม่เหมาะสมในการดึงกลับพลังงานจากน้ำเสียประเภทนี้ งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาแนวทางในการดึงกลับพลังงานจากน้ำเสียประเภทนี้ด้วยทางเลือกอื่น เช่น การใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์และซัลเฟตสูง

การใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียซึ่งปนเปื้อนซัลเฟตมีความเป็นไปได้เนื่องจากซัลเฟตในน้ำเสียสามารถถูกใช้เป็นสารรีดิวซ์อิเล็กตรอนโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเพื่อผลิตเป็นซัลไฟด์ จากนั้นซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อที่ขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิง เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปยังขั้วแคโทด และผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าพร้อมกับการบำบัดซัลไฟด์ใน

ขณะเดียวกัน งานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพสามารถบำบัดซัลไฟด์และก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ (Rabaey และคณะ, 2005, Rabaey และคณะ, 2006, Zhao และคณะ, 2008) นอกจากนี้งานวิจัยของ Sun และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกลุ่มจุลินทรีย์ซึ่งพบในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ทำการผลิตกระแสไฟฟ้าจากกระบวนการซัลไฟด์ออกซิเดชัน พบว่าในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพฝั่งแอโนด มีจุลินทรีย์จำพวกสามารถถ่ายทอดกระแสไฟฟ้า (Exoelectrogenic microorganisms) แบบที่เรียกรีดิวซ์ซัลเฟต และ แบบที่เรียยกออกซิไดซ์ซัลเฟต/ซัลไฟด์ อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ผ่านมานิยมใช้ซัลไฟด์เป็นสารตั้งต้นในการถูกออกซิไดซ์ให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ หรือทำการแยกส่วนกระบวนการ ซัลเฟตรีดักชันโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตออกในระบบก่อนหน้า ก่อนการป้อนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นเข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ งานวิจัยซึ่งประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในการบำบัดซัลเฟตและซัลไฟด์ในหน่วยปฏิบัติการเดียวยังมีอยู่ค่อนข้างจำกัด (Rabaey และคณะ, 2005) และควรได้รับการพัฒนาต่อไป

จากปัญหาด้านการบำบัดน้ำเสียและการดึงกลับพลังงานจากน้ำเสียซัลเฟตสูงดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟตสูง โดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อเป็นการบำบัดน้ำเสียและผลิตกระแสไฟฟ้าในขณะเดียวกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟตสูง รวมถึงความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ
- 2) เพื่อศึกษากลไกและบทบาทของจุลินทรีย์ในการบำบัดซัลเฟตและซัลไฟด์ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ
- 3) เพื่อศึกษากลุ่มจุลินทรีย์ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟตสูง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยระดับห้องปฏิบัติการ ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ดำเนินการทดลองโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแบบห้องเดี่ยวชนิดที่ใช้อากาศ (ออกซิเจน) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในฝั่งแคโทด (Air-breathing single-chamber microbial fuel cell) มีขนาดกว้าง 9 เซนติเมตร สูง 12 เซนติเมตร และยาว 16 เซนติเมตร ประกอบด้วยขั้วแคโทดและแอโนด โดยขั้วแคโทดจะทำปฏิกิริยากับอากาศภายนอก วัสดุที่ใช้เป็นขั้วแคโทดคือ carbon cloth 30% โดยน้ำหนัก PTFE wet proofed ขนาด 5x5 เซนติเมตร ซึ่งโหลดด้วยแพลทตินัม 0.5 mg/cm^2 เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ด้านหนึ่ง ส่วนอีกด้านหนึ่งติดกับเยื่อเลือกผ่านโปรตอน (Proton exchange membrane, PEM) ชนิด Nafion N117 ด้วยวิธีการ hot-pressing ซึ่งวัสดุที่ใช้เป็นขั้วแคโทดทั้งหมดสั่งซื้อจากเว็บไซต์ Fuel Cell Store ประเทศสหรัฐอเมริกา และใช้วัสดุสำหรับขั้วแอโนดเป็น activated carbon cloth ยี่ห้อ Zorflex Knit carbon cloth รุ่น FM50K สั่งซื้อจากบริษัท Calgon Carbon Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา ขนาด 3x10 เซนติเมตร ทั้งขั้วแคโทดและแอโนดต่อกับสายไฟไททานเนียมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 มิลลิเมตร และต่อกับความต้านทานภายนอก เติมน้ำแบบต่อเนื่องโดยใช้ Peristaltic pump

3) น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยซีโอติและซัลเฟต ที่อัตราส่วนซีโอติต่อซัลเฟตเท่ากับ (ประมาณ) 0.6 โดยใช้ กรดแลกติก ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$) แทนซีโอติ และโซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) แทนซัลเฟต (SO_4^{2-})

4) ศึกษาบทบาทการทำงานของจุลินทรีย์ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งใช้บำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟตสูง โดยศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์บนขั้วแอโนด (Anode attached microorganisms) และจุลินทรีย์แขวนลอยในระบบ (Suspended microorganisms) รวมถึงกลไกที่คาดว่าเกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพนี้คือ การลดปริมาณซัลเฟตโดยจุลินทรีย์ในระบบ (Microbial sulfate reduction) การลดปริมาณสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในระบบ (Microbial organic reduction) การออกซิไดซ์ซัลไฟด์โดยจุลินทรีย์ในระบบ (Microbial sulfide oxidation) และการออกซิไดซ์ซัลไฟด์โดยขั้วแอโนดในระบบ (Abiotic sulfide oxidation) รวมถึงศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบนขั้วแอโนดในตอนท้ายของการทดลอง

5) ศึกษาชนิดของกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพโดยใช้เทคนิค Illumina MiSeq System

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สร้างองค์ความรู้เกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟตสูง ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อประยุกต์ใช้กับการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งก่อให้เกิดน้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟตสูงจากกระบวนการผลิต

2) พัฒนาเทคโนโลยีในการบำบัดน้ำเสียโดยการกำจัดสารอินทรีย์ ซัลเฟต และซัลไฟด์ในหน่วยปฏิบัติการเดียว

3) พัฒนาแนวทางในการดึงกลับพลังงานด้วยการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียซึ่งปนเปื้อนด้วยสารอินทรีย์และซัลเฟตสูง รวมถึงเป็นแนวทางเลือกใหม่ที่สำคัญสำหรับน้ำเสียซัลเฟตสูงที่ไม่เหมาะสมในการนำมาผลิตก๊าซมีเทนด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบบไร้อากาศโดยทั่วไป



บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟตสูง

การปนเปื้อนของสารอินทรีย์และซัลเฟตในน้ำเสียอาจมีแหล่งกำเนิดจากโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท ได้แก่ โรงงานผลิตกระดาษ โรงงานแปรรูปยางพารา โรงงานผลิตแบริ่งมันสำปะหลัง โรงงานผลิตยาปฏิชีวนะ รวมถึงน้ำเสียที่ปนเปื้อนมาจากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม และอุตสาหกรรม การทำเหมืองแร่อีกด้วย (Knobel Lewis, 2002, Dutta และคณะ, 2008, Saritpongteeraka Chaiprapat, 2008, Zhao และคณะ, 2008) ซึ่งน้ำเสียเหล่านี้สามารถเกิดได้จากขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตของโรงงาน และมีอัตราการทิ้งน้ำเสียของน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทดัง แสดงได้ในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2 - 1 ที่มาของน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขั้นตอนต่าง ๆ ของโรงงาน (Nemerow Agardy, 1998) รวมถึงปริมาณน้ำเสียของแต่ละประเภทโรงงาน (กรมควบคุมมลพิษ, 2554)

| ประเภทโรงงาน | ขั้นตอนที่ทำให้เกิดน้ำเสีย | ปริมาณน้ำเสีย (ลูกบาศก์เมตร/ตันผลผลิต) |
|-----------------------------|---|--|
| โรงงานผลิตกระดาษ | การต้มเยื่อ การทำให้ได้เยื่อกระดาษที่บริสุทธิ์ การล้างทำความสะอาดเยื่อกระดาษ และการรักษาคุณภาพของกระดาษ | 3.3 |
| โรงงานแปรรูปยางพารา | การปรับสภาพยางพาราธรรมชาติ การทำให้น้ำยางจับตัว และการล้างยางในขั้นตอนการรีดยาง | 5.3 |
| โรงงานผลิตแบริ่งมันสำปะหลัง | การสกัดแป้ง การเพิ่มความเข้มข้น และการทำความสะอาดน้ำแป้ง | 5.5 |
| โรงงานผลิตยาปฏิชีวนะ | การสังเคราะห์ยา และการทำความสะอาดยา | 3.1 |
| อุตสาหกรรมปิโตรเลียม | น้ำเสียจากกระบวนการผลิตสารเคมีและการขนส่งสารประกอบน้ำมัน | 2.0 |
| อุตสาหกรรมการทำเหมืองแร่ | การล้างแร่ และการถลุงแร่ให้บริสุทธิ์ | ไม่มีการเก็บข้อมูล |

การปนเปื้อนสารอินทรีย์สูงในน้ำส่งผลกระทบให้ปริมาณออกซิเจนในแหล่งน้ำลดลง และอาจก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสียได้ ส่วนการปนเปื้อนซัลเฟตสูงในน้ำสามารถส่งผลให้ค่าของแข็งละลายในน้ำสูงขึ้น รวมถึงส่งผลในเรื่องของการกัดกร่อนโลหะและคอนกรีตในกรณีที่ต้องส่งผ่านน้ำเสียปนเปื้อนซัลเฟตไปตามเส้นท่ออีกด้วย (Pikaar และคณะ, 2011) อย่างไรก็ตามผลกระทบของการปนเปื้อนซัลเฟตในน้ำมักไม่ได้เกิดจากปริมาณซัลเฟตโดยตรง แต่มักจะเกิดจากปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันที่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกมา เพราะเมื่อน้ำเสียปนเปื้อนซัลเฟตได้รับการบำบัดด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศจะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน ซึ่งก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นรบกวน (Zhang และคณะ, 2009) นอกจากนี้ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ยังส่งผลต่อการยับยั้งจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methanogens) ในระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ ทำให้ปริมาณและคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นลดต่ำลงอีกด้วย

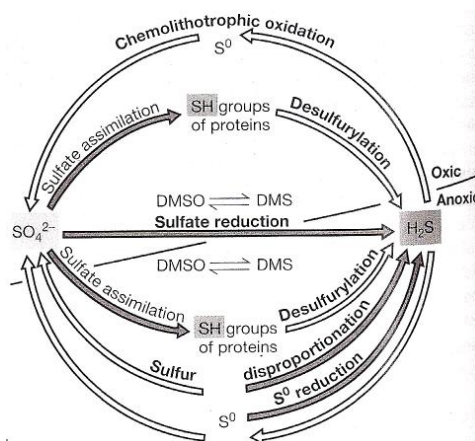
โดยทั่วไปการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนทั้งสารอินทรีย์และซัลเฟตนิยมใช้ระบบบำบัดชีวภาพแบบไร้อากาศตามด้วยระบบบำบัดแบบเติมอากาศ เนื่องจากระบบบำบัดทางชีวภาพแบบไร้อากาศจะช่วยลดค่าซีโอดีให้ต่ำลง และระบบบำบัดแบบเติมอากาศจะช่วยทำให้น้ำหลังการบำบัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้ง แม้ว่าการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบบำบัดแบบไร้อากาศจะสามารถลดค่าซีโอดีที่มีปริมาณสูง และมีแนวโน้มในการผลิตก๊าซชีวภาพออกมาได้ อย่างไรก็ตามก๊าซชีวภาพที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนซัลเฟตด้วยยังมีคุณภาพต่ำ เนื่องจากการปนเปื้อนของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นภายในระบบเมื่อใช้การบำบัดด้วยระบบไร้อากาศทั่วไป ดังนั้นจึงมีนักวิจัยหลายกลุ่มพยายามหาแนวทางในการบำบัดซัลเฟตและซัลไฟด์ควบคู่ไปกับการดึงกลับพลังงานให้สามารถเกิดประโยชน์ได้ เช่น การใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ (Silva และคณะ, 2002, Khanal Huang, 2003, Lin Chen, 2006, Zhao และคณะ, 2009, Sun และคณะ, 2010, Zhang และคณะ, 2010)

2.2 วัฏจักรซัลเฟอร์ในธรรมชาติ

ในธรรมชาติธาตุกำมะถันหรือซัลเฟอร์สามารถพบได้ทั่วไปหลายรูปแบบ เนื่องจากมีเลขออกซิเดชันหลายค่า ได้แก่ เลขออกซิเดชันเท่ากับ +6 (รูปของซัลเฟต, SO_4^{2-}) เลขออกซิเดชันเท่ากับ 0 (รูปของซัลเฟอร์, S^0) และเลขออกซิเดชันเท่ากับ -2 (รูปของซัลไฟด์, S^{2-}) แหล่งของซัลเฟอร์ที่พบมากที่สุดในโลกที่อยู่ในสถานะของแข็งได้แก่ ตะกอนดิน หิน และแร่ เช่น แร่ยิปซัมหรือแคลเซียมซัลเฟต (Calcium sulfate, CaSO_4) รวมถึงแร่ไพไรต์ (Pyrite, FeS_2) ซึ่งการเปลี่ยนรูปในแต่ละสถานะจะทำให้เกิดการหมุนเวียนของซัลเฟอร์ในธรรมชาติ

การหมุนเวียนของซัลเฟอร์ในธรรมชาติต้องอาศัยกระบวนการทั้งทางเคมีและทางชีวภาพเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้อง ไม่ว่าจะเป็นกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน (Sulfate reduction) ที่มีแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเข้ามาเกี่ยวข้อง หรือกระบวนการซัลเฟอร์ออกซิเดชัน (Sulfur oxidation) ที่มีแบคทีเรีย

ออกซิไดซ์ซัลเฟอร์เข้ามาเกี่ยวข้อง รวมถึงกระบวนการซัลไฟด์ออกซิเดชัน (Sulfide oxidation) ที่มีแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลไฟด์เข้ามาเกี่ยวข้อง ดังแสดงในภาพที่ 2-1 และตารางที่ 2-2



ภาพที่ 2 - 1 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในวัฏจักรซัลเฟอร์ (Medigan และคณะ, 2003)

ตารางที่ 2 - 2 ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในวัฏจักรซัลเฟอร์ (Medigan และคณะ, 2003)

| กระบวนการ | ตัวอย่างชนิดจุลินทรีย์ |
|--|--|
| ซัลไฟด์/ซัลเฟอร์ ออกซิเดชัน ($H_2S \rightarrow S^0 \rightarrow SO_4^{2-}$) แบบใช้ออกาศ (Aerobic) แบบไม่ใช้ออกาศ (Anaerobic) | Sulfur chemolithotrophs (<i>Thiobacillus</i> , <i>Beggiatoa</i> และอื่นๆ) Purple and green phototrophic bacteria และ chemolithotroph บางชนิด |
| ซัลเฟตรีดักชัน (แบบไม่ใช้ออกาศ) ($SO_4^{2-} \rightarrow H_2S$) | <i>Desulfovibrio</i> , <i>Desulfobacter</i> |
| ซัลเฟอร์รีดักชัน (แบบไม่ใช้ออกาศ) ($S^0 \rightarrow H_2S$) | <i>Desulfuromonas</i> และ hyperthermophilic <i>Archaea</i> ส่วนใหญ่ |
| Sulfur disproportionation ($S_2O_3^{2-} \rightarrow H_2S + SO_4^{2-}$) | <i>Desulfovibrio</i> และอื่นๆ |
| Organic sulfur compound oxidation or reduction ($CH_3SH \rightarrow CO_2 + H_2S$) ($DMSO \rightarrow DMS$) | จุลินทรีย์หลายชนิดสามารถทำได้ |
| Desulfurylation ($organic-S \rightarrow H_2S$) | จุลินทรีย์หลายชนิดสามารถทำได้ |

2.3 จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับวัฏจักรซัลเฟอร์

จากที่กล่าวมาข้างต้นเกี่ยวกับวัฏจักรซัลเฟอร์ แสดงให้เห็นได้ว่าในแต่ละขั้นตอนของการเปลี่ยนรูปตามปฏิกิริยาต่างๆมีจุลินทรีย์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เช่น ปฏิกิริยาการหายใจแบบไร้อากาศที่มีจุลินทรีย์กลุ่มแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเข้ามาเกี่ยวข้อง หรือปฏิกิริยาการเปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เป็น Elemental sulfur ที่มีจุลินทรีย์กลุ่มแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลไฟด์เข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงในวัฏจักรซัลเฟอร์เป็นหลักคือ แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต และแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลเฟอร์/ซัลไฟด์

2.3.1 แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Sulfate-reducing bacteria)

แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต เป็นแบคทีเรียที่มีหลายรูปร่าง ทั้งรูปท่อนตรง ท่อนโค้ง หรือท่อนเกลียว มีกระบวนการเมตาบอลิซึมแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบได้ในตะกอนของแหล่งน้ำและบ่อบำบัดน้ำเสียซึ่งมักพบสารประกอบซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ (มันสิน ตันกุลเวศน์, 2546)

สามารถแบ่งกลุ่มของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตตามความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อการดำรงชีพและเจริญเติบโตได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

- 1) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ไม่สมบูรณ์ (Incompletely oxidizing sulfate reducing bacteria, I-SRB)
- 2) แบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตชนิดย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์ (Completely oxidizing sulfate reducing bacteria; C-SRB)

สารอินทรีย์ที่เหลือจากการย่อยสลายของแบคทีเรียกลุ่ม I-SRB คือ อะซิเตท แต่ I-SRB ไม่สามารถนำอะซิเตทไปใช้ได้ แม้จะเป็นสารอาหารที่มีอยู่เพียงประเภทเดียวก็ตาม สาเหตุเนื่องมาจาก I-SRB ขาดกลไกที่เกี่ยวข้องกับการจัดการเอนไซม์บางชนิดที่มีบทบาทต่อการย่อยอะซิเตท อย่างไรก็ตาม I-SRB อาจใช้อะซิเตทเป็นแหล่งคาร์บอนได้เมื่อสารให้อิเล็กตรอนคือ ไฮโดรเจนหรือฟอร์มเมท และข้อแตกต่างอีกประการหนึ่งของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตทั้งสองกลุ่มนี้คือ แบคทีเรียกลุ่ม I-SRB มีอัตราการเจริญเติบโตที่เร็วกว่ากลุ่ม C-SRB เมื่ออยู่ในภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียทั้งสองกลุ่ม ตัวอย่างปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตแสดงดังในตารางที่ 2-3

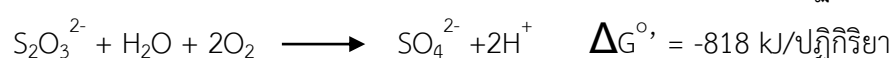
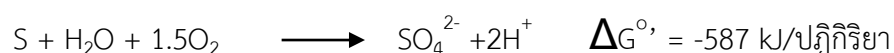
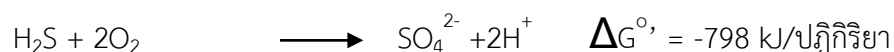
ตารางที่ 2 - 3 ตัวอย่างปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ของ I-SRB และ C-SRB

| ลำดับที่ | สารให้อิเล็กตรอน | ประเภทแบคทีเรีย | ปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน |
|----------|------------------|-----------------|---|
| 1 | ไฮโดรเจน-ฟอर्म | I-SRB และ C-SRB | $4\text{H}_2 + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \longrightarrow 4\text{H}_2\text{O} + \text{HS}^-$ |
| 2 | อะซิเตท | C-SRB | $\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{HS}^-$ |
| 3 | พรอพิอเนท | C-SRB I-SRB | $4\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 7\text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 12\text{HCO}_3^- + 7\text{HS}^- + \text{H}^+$ $4\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 3\text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 4\text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{HCO}_3^- + 3\text{HS}^- + \text{H}^+$ |
| 4 | บิวทิเรต | C-SRB I-SRB | $2\text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{COO}^- + 5\text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 8\text{HCO}_3^- + 5\text{HS}^- + \text{H}^+$ $2\text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{COO}^- + \text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 4\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HS}^- + \text{H}^+$ |
| 5 | แลกเตท | C-SRB I-SRB | $2\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^- + 3\text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 6\text{HCO}_3^- + 3\text{HS}^- + \text{H}^+$ $2\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^- + \text{SO}_4^{2-} \longrightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{HCO}_3^- + \text{HS}^- + \text{H}^+$ |
| 6 | เบนโซเอต | C-SRB I-SRB | $4\text{C}_6\text{H}_5\text{COO}^- + 15\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 28\text{HCO}_3^- + 15\text{HS}^- + 9\text{H}^+$ $4\text{C}_6\text{H}_5\text{COO}^- + 3\text{SO}_4^{2-} + 16\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 12\text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{HCO}_3^- + 3\text{HS}^- + 9\text{H}^+$ |

หมายเหตุ: C-SRB คือ SRB ชนิดย่อยได้อย่างสมบูรณ์ และ I-SRB คือ SRB ชนิดย่อยได้ไม่สมบูรณ์

2.3.2 แบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลเฟอร์/ซัลไฟด์ (Sulfur/Sulfide-oxidizing bacteria)

แบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลเฟอร์/ซัลไฟด์ เช่น *Thiobacillus* *Thiomicrospira* และ *Thiosphaera* เป็นต้น เป็นแบคทีเรียที่สามารถออกซิไดซ์สารประกอบซัลเฟอร์ในสภาวะที่มีอากาศให้กลายเป็นกรดซัลฟิวริกได้ ดังสมการ (Madigan et al., 2003)



แบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลเฟอร์เหล่านี้ใช้พลังงานที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์จากคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตได้ (Hassan และคณะ, 2010)

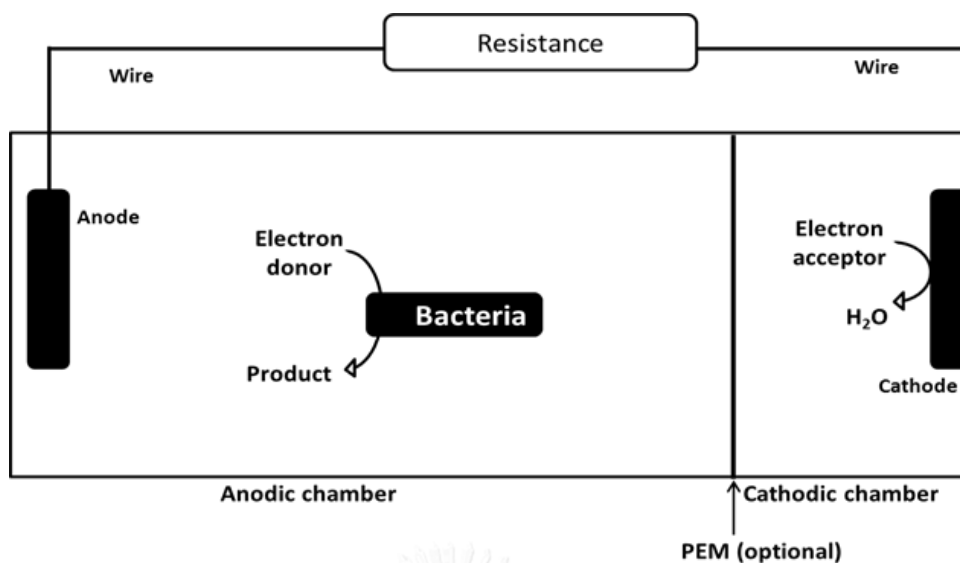
2.4 เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ (Microbial fuel cells)

2.4.1 ความหมายและส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพคือ ระบบที่เปลี่ยนพลังงานทางเคมีให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้าได้โดยใช้จุลินทรีย์เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะไร้อากาศในห้องแอโนด ซึ่งจุลินทรีย์จะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ แล้วถ่ายทอดอิเล็กตรอนเหล่านั้นไปยังขั้วไฟฟ้าในห้องแอโนด จากนั้นถ่ายทอดอิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าในห้องแอโนดไปยังขั้วไฟฟ้าในห้องแคโทดโดยผ่านทางสายไฟที่เชื่อมระหว่างขั้วไฟฟ้า ส่วนโปรตอนที่เกิดขึ้นในห้องแอโนดจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านโปรตอนไปยังห้องแคโทด และรับอิเล็กตรอนเกิดเป็นโมเลกุลของน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาเหล่านี้จะสามารถก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้ (เบญจพร บุญชยาอนันต์, 2555)

รูปแบบโดยทั่วไปของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพมี 2 ประเภทคือ แบบห้องเดี่ยว และแบบห้องคู่ โดยแบบห้องเดี่ยวจะนิยมใช้อากาศ (ออกซิเจน) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในฝั่งแคโทด (Liu Logan, 2004, Zhao และคณะ, 2008, Sun และคณะ, 2009, Zhao และคณะ, 2009, Sun และคณะ, 2010) ส่วนแบบห้องคู่จะนิยมใช้สารละลายกลุ่ม เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต หรือเฟอร์ริกไซยาไนด์ เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในฝั่งแคโทด (Rabaey และคณะ, 2005, Rabaey และคณะ, 2006, Dutta และคณะ, 2008)

เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพประกอบด้วยส่วนประกอบหลักคือ ส่วนแอโนดและส่วนแคโทด โดยในแต่ละส่วนประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (Electrode) และสารละลายนำไฟฟ้า (Electrolyte) เพื่อให้เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้น และมีเยื่อเลือกผ่านโปรตอน (Proton exchange membrane, PEM) เป็นตัวแบ่งระหว่างส่วนแอโนดและแคโทด หรือในบางระบบอาจไม่มีเยื่อเลือกผ่านโปรตอนก็ได้ (Liu Logan, 2004) ดังแสดงในภาพที่ 2-2



ภาพที่ 2 - 2 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ (เบญจพร บุญชยาอนันต์, 2555) ซึ่งวัสดุที่มีการนำมาใช้ในส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2-4

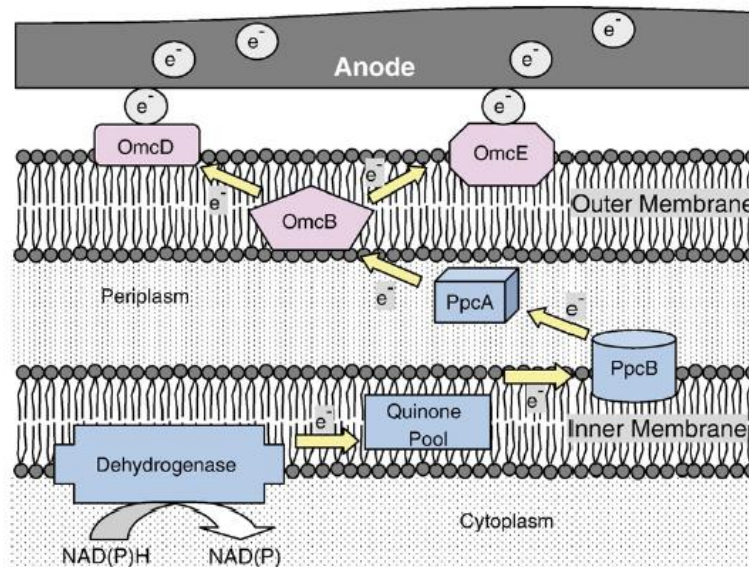
ตารางที่ 2 - 4 วัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ (Du และคณะ, 2007)

| ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ | วัสดุที่ใช้ |
|------------------------------------|--|
| ขั้วแอโนด | Graphite, graphite felt, granular graphite, graphite foil, carbon paper, toray carbon paper, carbon fiber veil, carbon cloth, activated carbon cloth |
| ขั้วแคโทด | Graphite, graphite felt, carbon paper, carbon cloth |
| เยื่อเลือกผ่านโปรตอน | Nafion, Ultrex, polyethylene |
| ตัวเร่งปฏิกิริยา | Pt, Pt black, MnO ₂ , Fe ³⁺ , polyaniline, electron mediator immobilized on anode |

2.4.2 การเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

กระบวนการที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเริ่มจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ในฝั่งแอโนด ซึ่งในกระบวนการสร้างพลังงานของจุลินทรีย์จะปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเก็บอยู่ในรูปสารตัวกลาง ได้แก่ NADH ควิโนน หรือ ไฮโดรโคโรม เป็นต้น เมื่อสารตัวกลางเหล่านี้ถูกออกไซด์ อิเล็กตรอนจะถูกส่งต่อเป็นลำดับในกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอน ระหว่างที่อิเล็กตรอนถูกส่งต่อเป็นลำดับจะให้พลังงานแก่จุลินทรีย์ โดยในขั้นตอน

สุดท้ายอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจะถูกส่งต่อให้แก่ตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายต่อไป (ศุภร์นิมิตร สุจิรา, 2555) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยพบว่าจุลินทรีย์ที่พบในระบบบางชนิดสามารถถ่ายทอดอิเล็กตรอนออกนอกเซลล์ไปยังตัวรับอิเล็กตรอนภายนอกได้ (Exoelectrogenic bacteria) ดังนั้นการที่จุลินทรีย์เหล่านี้เกิดปฏิกิริยาในห้องแอโนด ถ่ายทอดอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นไปยังขั้วแอโนด และเคลื่อนที่อิเล็กตรอนเหล่านั้นไปยังขั้วแคโทดผ่านวงจรภายนอก จึงทำให้เกิดการสร้างกระแสไฟฟ้าได้ (Logan, 2009) ขั้นตอนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนสามารถแสดงได้ดังในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2 - 3 ขั้นตอนการถ่ายทอดอิเล็กตรอนของจุลินทรีย์จากภายในเซลล์ไปยังขั้วแอโนด (Du และคณะ, 2007)

การเกิดกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเกิดขึ้นเนื่องจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าซึ่งมาจากปฏิกิริยาของสารให้และรับอิเล็กตรอนภายในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ โดยทั่วไปค่าความต่างศักย์สูงสุดในระบบอยู่ในช่วง 0.3 - 0.7 V (Logan, 2008) ซึ่งค่าความต่างศักย์นี้เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างตัวต้านทานภายนอกระบบกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังแสดงความสัมพันธ์ได้จากสมการ

$$E = I R_{ex}$$

โดย E คือ ค่าศักย์ไฟฟ้า (V)

I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

R_{ex} คือ ความต้านทานไฟฟ้าจากภายนอก (Ω)

ซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้จากเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพคือ open circuit voltage (OCV) วัดได้ในขณะที่ไม่มีการต่อครบวงจรไฟฟ้า (ความต้านทานไฟฟ้าสูงและกระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์) เมื่อความต้านทานไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้าลดลง สามารถคำนวณกำลังไฟฟ้า (P) ที่เกิดขึ้นได้จากสมการ

$$P = I E \quad \text{หรือ} \quad P = I^2 R$$

โดย P คือ กำลังไฟฟ้า (W)
 I คือ กระแสไฟฟ้า (A)
 E คือ ค่าศักย์ไฟฟ้า (V)
 R คือ ความต้านทานไฟฟ้า (Ω)

ค่าศักย์ไฟฟ้าในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพสัมพันธ์กับสารให้และรับอิเล็กตรอนในระบบ รวมถึงจำนวนอิเล็กตรอนที่มีการถ่ายทอดในแต่ละปฏิกิริยาอีกด้วย สามารถแสดงค่าความต่างศักย์ reduction half reaction ของสารรับ/ให้อิเล็กตรอน ที่ pH 7 ดังแสดงในตารางที่ 2-5

ตารางที่ 2 - 5 ค่าความต่างศักย์ reduction half reaction ของสารรับ/ให้อิเล็กตรอน และจำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายทอดที่พีเอช 7 (Medigan และคณะ, 2003)

| สารรับ/ให้อิเล็กตรอน และจำนวนอิเล็กตรอนที่ถ่ายทอด | ค่าความต่างศักย์ (V) |
|--|----------------------|
| CO ₂ /glucose, 24 e ⁻ | -0.43 |
| 2H ⁺ /H ₂ , 2e ⁻ | -0.42 |
| CO ₂ /acetate, 8e ⁻ | -0.28 |
| S ₀ /H ₂ S, 8e ⁻ | -0.28 |
| SO ₄ ²⁻ /H ₂ S, 8e ⁻ | -0.22 |
| Pyruvate/lactate, 2e ⁻ | -0.19 |
| 0.5O ₂ /H ₂ O, 2e ⁻ | +0.82 |

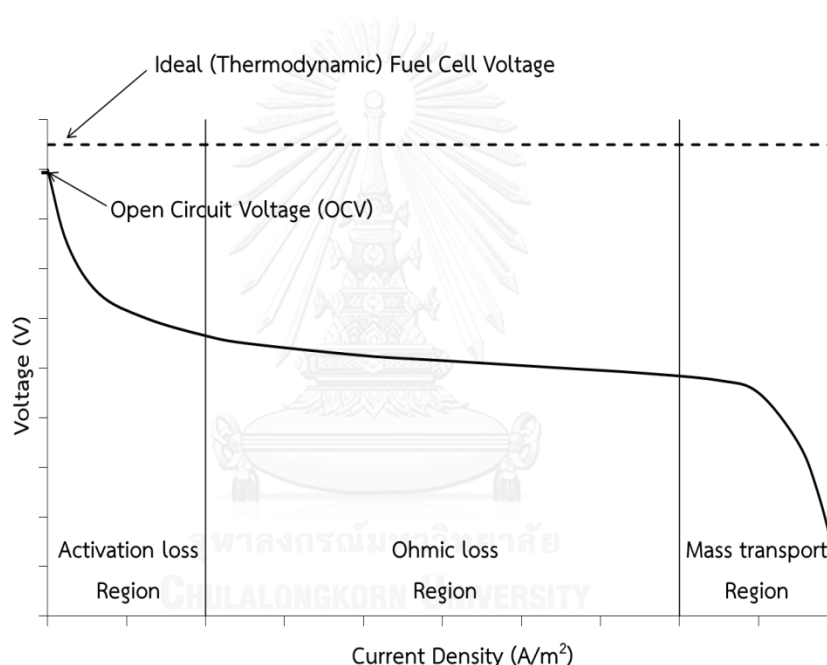
การเดินระบบของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้โดยการเปลี่ยนพลังงานที่สะสมอยู่ในสารตั้งต้นในระบบให้เป็นกลุ่มของอิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนที่ให้ครบวงจรในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งการเปลี่ยนรูปลักษณะนี้เกี่ยวกับการถ่ายทอดพลังงานให้อิเล็กตรอนเหล่านั้นสามารถทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าได้ และการถ่ายเทนี้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่จำกัด โดยจะเกิดเฉพาะบริเวณพื้นผิวที่เกิดปฏิกิริยาเท่านั้น ดังนั้นปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับพื้นที่ของบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาโดยตรง กล่าวคือ ถ้ามีพื้นที่ในการเกิดปฏิกิริยามากก็มีโอกาสเกิดกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น

2.4.3 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพสามารถพิจารณาได้จากการจัดทำ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้า (Polarization curve หรือ I-V

curve) และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Power density curve)

- **กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า**
แสดงให้เห็นถึงปริมาณอิเล็กตรอนที่ถ่ายทอดและเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าภายในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพนั้นๆ แต่มีข้อควรระวังคือ กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับขนาดของพื้นที่ของบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาโดยตรง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงต้องนำมาคิดต่อพื้นที่ของบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็กที่สุดในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพนั้นๆ เพื่อให้เกิดการเปรียบเทียบข้อมูลกับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพอื่นๆ ได้ ซึ่งลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้านี้แสดงในภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2 - 4 ลักษณะของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสและความต่างศักย์ไฟฟ้า (Polarization Curve หรือ I-V Curve) (Ryan et al., 2013)

เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในอุดมคติคือ เซลล์เชื้อเพลิงที่สามารถเกิดกระแสไฟฟ้าในขณะที่สามารถรักษาความต่างศักย์ในระบบให้คงที่ได้ตามหลักอุณหพลศาสตร์ (thermodynamics) แต่ในความเป็นจริงความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั่วไปมีค่าต่ำกว่าเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในอุดมคติเสมอ ดังจะเห็นได้จากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อวงจรเปิด (OCV) ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้ในขณะที่ระบบไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นนั้นมีค่าต่ำกว่าค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่อุดมคติ ดังแสดงในภาพที่ 2-3 อีกทั้งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ต่ำของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพยังเป็นสิ่งที่จำกัดความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (power density) ทั้งหมดที่สามารถถูกปล่อยได้อีกด้วย

นอกจากนี้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั่วไปไม่สามารถที่จะรักษาความต่างศักย์ไฟฟ้าให้คงที่และสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้อย่างสม่ำเสมออย่างเช่นเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในอุดมคติเนื่องจากมีการสูญเสียพลังงานขึ้นในระบบ ซึ่งการสูญเสียพลังงานในรูปแบบเหล่านี้สามารถอธิบายจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ส่วนปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานในระบบของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเกิดจาก 3 สาเหตุหลักคือ

1) การสูญเสียพลังงานจากปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี (activation losses)

เกิดจากปฏิกิริยาการรับและให้อิเล็กตรอนในระบบ ทั้งระหว่างเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน หรือ การที่สารประกอบภายในระบบเกิดปฏิกิริยาที่ช้า การสูญเสียนี้มักจะเกิดขึ้นในช่วงต้นของกราฟที่มีค่าความหนาแน่นไฟฟ้าต่ำๆ ทั้งนี้อาจลดการสูญเสียนี้ได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิในการเดินระบบ และการเพิ่ม biofilm ที่อยู่บริเวณขั้วไฟฟ้า โดยสามารถอธิบายได้ด้วย Tafel equation (Ryan et al., 2013) คือ

$$\eta_{act} = a + b \log j \quad \text{--- (1)}$$

โดย η_{act} = activation losses
 a = x-intercept of Tafel equation of anode and cathode
 b = Tafel slope

2) การสูญเสียพลังงานจากการนำอิเล็กตรอนและไฟฟ้าภายในระบบ (ohmic losses)

เกิดจากการที่มีความต้านทานในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านขั้วไฟฟ้าหรือบริเวณที่มีการเชื่อมต่อ และความต้านทานของการไหลของไอออนผ่านเยื่อเลือกผ่านในห้องฝั่งแอโนดหรือสารละลายใน ห้องแคโทด ซึ่งการสูญเสียนี้บอกได้จากช่วงกลางของกราฟที่อยู่ในช่วงการเดินระบบ ซึ่งสามารถลดการสูญเสียนี้ได้โดยลดระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า หรือเพิ่มการนำไฟฟ้าของสารละลายให้มากที่สุดเท่าที่จุลินทรีย์จะสามารถทนได้ การสูญเสียพลังงานดังกล่าวสามารถอธิบายได้ตาม Ohm's law (Ryan และคณะ, 2013) คือ

$$\eta_{ohmic} = j R_{ohmic} \quad \text{--- (2)}$$

โดย η_{ohmic} = ohmic losses
 j = current density
 R_{ohmic} = resistance

3) การสูญเสียพลังงานจากการถ่ายเทมวลในระบบ (concentration losses or mass transport)

เกิดในช่วงสุดท้ายของกราฟที่มีค่าความหนาแน่นไฟฟ้าสูงๆ ที่ทำให้เกิดการยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชันในระบบ ทำให้ไม่เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนทั้งภายในระบบและที่ขั้วไฟฟ้า สามารถอธิบายด้วยสมการได้ดังนี้ (Ryan และคณะ, 2013)

$$\eta_{\text{conc.}} = c \ln\left(\frac{j_L}{j_L - j}\right) \quad \text{--- (3)}$$

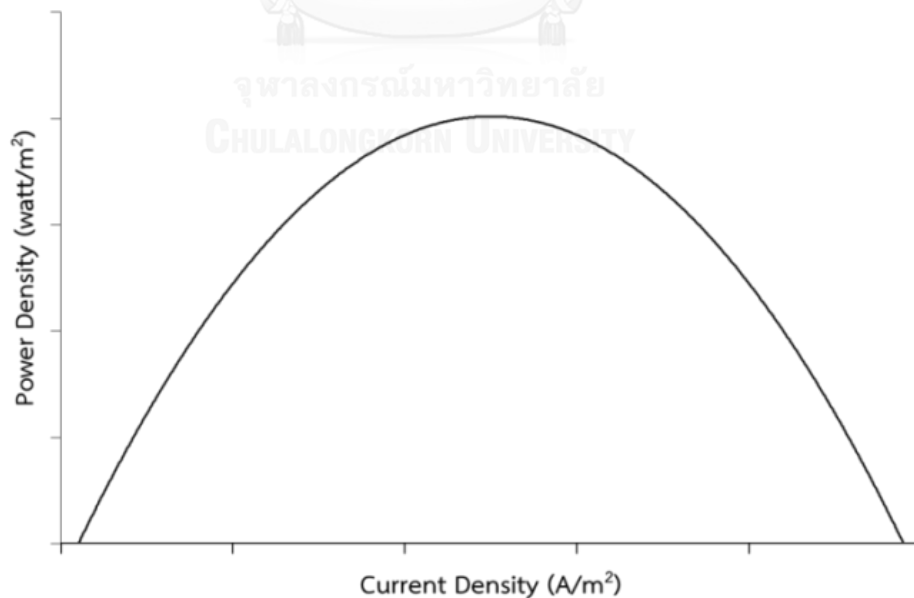
โดย $\eta_{\text{conc.}}$ = concentration losses
 c = an empirical constant
 j = current density
 j_L = the limiting current density

ซึ่งเมื่อนำการสูญเสียพลังงานเหล่านี้มารวมกันทั้งระบบ สามารถอธิบายได้โดยสมการรวมดังนี้

$$V = E_{\text{Thermodynamic}} - \eta_{\text{activation losses}} - \eta_{\text{ohmic losses}} - \eta_{\text{concentration losses}}$$

$$V = V_{\text{OCV}} - (a + b \log j) - (j R_{\text{ohmic}}) - \left(c \ln\left(\frac{j_L}{j_L - j}\right)\right) \quad \text{--- (4)}$$

- กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า แสดงให้เห็นถึงค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ โดยคำนวณจากการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า แล้วนำไปคำนวณโดยใช้สูตร $P = I^2 R$ ซึ่งค่าที่คำนวณได้จะต้องนำไปหารด้วยพื้นที่ขั้วไฟฟ้าที่เล็กที่สุด ซึ่งแนวโน้มของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2 - 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

2.5 เทคนิค Illumina MiSeq System

Illumina MiSeq System เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่ใช้ในการศึกษาลำดับเบสของสิ่งมีชีวิต โดยสามารถวิเคราะห์จีโนมทั้งหมดของสิ่งมีชีวิต หรือวิเคราะห์ 16S ribosomal RNA gene (16S rRNA gene) ของจุลินทรีย์ทั้งหมดในตัวอย่างได้หรือที่เรียกว่า 16S metagenomics การใช้เครื่อง Illumina ในการวิเคราะห์ 16S rRNA นี้มักนำมาประยุกต์ใช้ในการทำ Phylogenetic Classification เช่น การระบุประเภทของจุลินทรีย์ในระดับ Genus หรือ Species ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในงานจุลชีววิทยาทางสิ่งแวดล้อม (จากคู่มือ Illumina Demonstrated Protocol)

หลักการของการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Illumina คือ การหาลำดับเบสด้วยการติดฉลากให้สายนิวคลีโอไทด์ที่สิ้นสุดด้วยสารเรืองแสง (fluorescent reversible terminators) และเพิ่มปริมาณของสายดีเอ็นเอเชื่อมต่อเป็นสะพานบนสถานะของแข็ง (solid-phase bridge amplification) ซึ่งจะได้กลุ่มของสายดีเอ็นเอที่แตกต่างกัน หลังจากมีการกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์แล้ว จะมีการบันทึกภาพการปลดปล่อยสารเรืองแสงของนิวคลีโอไทด์ เพื่อวิเคราะห์ลำดับเบสบนสายดีเอ็นเอที่อ่านได้ต่อไป (อลิชา วิลันโท และคณะ, 2012)

ขั้นตอนในการวิเคราะห์ 16S metagenomics ด้วยเทคนิค Illumina MiSeq System สามารถสรุปได้ดังนี้

- 1) เลือก amplicon primers ที่ใช้ในการเพิ่มจำนวน 16S rRNA gene ที่ต้องการวิเคราะห์หาชนิดของตัวอย่างจุลินทรีย์ที่สนใจ
- 2) เตรียม library โดยการทำให้ Polymerase Chain Reaction (PCR) เพื่อเพิ่มจำนวน 16S rRNA gene ของตัวอย่างจุลินทรีย์
- 3) ทำการติด Index แต่ละตัวอย่าง เพื่อช่วยให้สามารถแยกลำดับเบสจากแต่ละตัวอย่างได้เมื่อนำตัวอย่างมารวมกัน (pooling)
- 4) อ่านลำดับเบส 16S rRNA โดยใช้โปรแกรม MiSeq สำหรับเครื่อง Illumina ในตัวอย่างที่ผ่านการทำให้ PCR และติด Index แล้ว เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์ต่อไป
- 5) ประมวลผลด้วยโปรแกรม BaseSpace เพื่อวิเคราะห์ลำดับเบสที่อ่านได้ ซึ่งสามารถให้ผลการวิเคราะห์ละเอียดที่สุดได้ถึงระดับ Species ของจุลินทรีย์

2.6 เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดมลพิษซัลเฟอร์

ในปัจจุบันเริ่มมีการศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของมลพิษซัลเฟอร์ เช่น ซัลเฟตและซัลไฟด์ควบคู่กับการผลิตกระแสไฟฟ้า ซึ่งการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนซัลเฟตนับเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการดึงกลับพลังงานในรูปแบบ

ของการผลิตกระแสไฟฟ้า เนื่องจากน้ำเสียซึ่งมีการปนเปื้อนของซัลเฟตสูงโดยทั่วไปแล้วนั้นไม่เหมาะสมในการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพเพราะจะมีปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ปนเปื้อนในก๊าซชีวภาพสูงซึ่งไม่เหมาะในการนำไปใช้ประโยชน์เป็นเชื้อเพลิงต่อไป

การศึกษาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในการบำบัดมลพิษซัลเฟตได้มีการรายงานโดย Rabaey และคณะ (2006) ซึ่งทำการศึกษาลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแบบห้องคู่ ในการบำบัดซัลไฟด์ในน้ำเสีย โดยวัสดุที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพนี้คือ granular graphite และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเพียงซัลไฟด์เท่านั้นเป็นสารให้อิเล็กตรอน (Electron donor) ในฝั่งห้องแอโนด และใช้ Hexacyanoferrate เป็นสารรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ในฝั่งห้องแคโทด ผลการทดลองพบว่า หลังจากเดินระบบผ่านไป 1 วัน ปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมดในระบบที่ความเข้มข้นซัลไฟด์เริ่มต้น 0.1 gS/L (as Na₂S · xH₂O 60-62%) ถูกบำบัด และผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดเท่ากับ 11 mA ซึ่งคิดเป็นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 37 mW/L ของปริมาตรสุทธิของห้องแอโนด โดยคาดว่าซัลไฟด์ที่หายไปได้เปลี่ยนรูปเป็น elemental sulfur จากนั้นเมื่อกำหนดปริมาณซัลไฟด์ให้เท่ากับ 100 mgS/L และ 330 mgS/L พบว่า ที่ความเข้มข้นซัลไฟด์ 100 mgS/L สามารถถูกบำบัดได้เหลือ 1.3 ± 1.7 mg/L โดยได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power generation) เท่ากับ 3.5 mW/L NAC และ ค่า Coulombic efficiency เท่ากับ 29.5 ± 7.9 % ส่วนที่ความเข้มข้นซัลไฟด์ 330 mgS/L สามารถบำบัดให้ลดลงเหลือ 6.1 ± 7.9 mg/L ได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 27.8 mW/L ของปริมาตรสุทธิของห้องแอโนด และ ค่า Coulombic efficiency เท่ากับ 14.6 ± 4.4 % ทั้งนี้จุลินทรีย์ที่ตรวจพบในระบบโดยวิธี 16S rRNA gene clone library และวิธี PCR-DGGE คือ *Alcaligenes* sp. และ *Paracoccus* sp.

ต่อมา Dutta และคณะ (2008) ได้ศึกษาการใช้เซลล์เชื้อเพลิงบำบัดสารละลายซัลไฟด์พร้อมทั้งผลิตพลังงานออกมาในรูปกระแสไฟฟ้าโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงแบบห้องคู่ และมี Cation exchange membrane เป็นตัวกั้นระหว่างฝั่งห้องแอโนดและแคโทด ภายในห้องทั้งสองฝั่งถูกบรรจุด้วย granular graphite และมี rod graphite เพื่อใช้เป็นตัวเชื่อมกับขั้วไฟฟ้าในวงจรไฟฟ้าภายนอก สารละลายฝั่งแอโนดใช้ โซเดียมซัลไฟด์เป็นสารให้อิเล็กตรอน และใช้ Phosphate buffer คู่มิเอชในระบบ ส่วนในฝั่งห้องแคโทด ใช้ ferricyanide เป็นสารรับอิเล็กตรอน ทำการเดินระบบต่อเนื่อง 2 เดือน ผลการทดลองพบว่า สามารถกำจัดซัลไฟด์ออกจากน้ำได้ที่อัตรา 0.62 ± 0.1 kg-S/m³/d ของปริมาตรสุทธิของห้องแอโนด ค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ยเท่ากับ 12 ± 2 W/m³ ของปริมาตรสุทธิของห้องแอโนด และ ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 166 W/m³ ของปริมาตรสุทธิของห้องแอโนด

เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพนอกจากวัสดุที่นำมาใช้จะเป็นองค์ประกอบสำคัญแล้ว เซลล์เชื้อเพลิงยังจำเป็นที่จะต้องมีการมีจุลินทรีย์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเพื่อเป็นตัวช่วยให้เกิดปฏิกิริยาต่างๆภายใน ซึ่งได้มีการวิจัยสนใจศึกษาถึงผลของกลุ่มจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ เช่น Zhao และคณะ (2009) ที่ได้ทำการศึกษาโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพห้องเดี่ยวซึ่งใช้อากาศแบบขั้วแคโทดสองฝั่ง วัสดุที่ใช้เป็นขั้วแอโนดคือ activated carbon cloth และ carbon fibre veil น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้มีลักษณะแบบน้ำเสียเกษตรกรรม และมีการ

ใช้จุลินทรีย์สายพันธุ์เดี่ยวคือ *Desulfovibrio desulfuricans* เพื่อเปลี่ยนซัลเฟตเป็นซัลไฟด์ด้วยกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน จากนั้นจึงทำการป้อนน้ำเสียซึ่งประกอบด้วยซัลไฟด์เข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ โดยจะทำการเลี้ยงจุลินทรีย์สายพันธุ์เดี่ยวนี้ในน้ำเสียสังเคราะห์ก่อนเป็นเวลา 3 วัน ผลการทดลองพบว่า มีจุลินทรีย์เกาะติดที่บริเวณขั้วแอโนดเป็นลักษณะ biofilm ซึ่งมีผลกับการเกิดปฏิกิริยาซัลไฟด์ออกซิเดชัน ซึ่งปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบริเวณสารละลายเพียง 2 ชนิดคือ ซัลไฟท์ และไทโอซัลเฟต โดยไม่พบซัลเฟตปนเปื้อนด้วยนอกจากนี้ยังมี (Sun และคณะ, 2009) ที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับจุลินทรีย์ที่ช่วยในปฏิกิริยาซัลไฟด์ออกซิเดชันในฝั่งแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแบบห้องเดี่ยวใช้อากาศ (Single chamber with air cathode) ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจชนิดของซัลเฟอร์ที่พบในระบบจากปฏิกิริยาซัลเฟอร์ออกซิเดชัน ที่ความเข้มข้น $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ เท่ากับ 1000 mg/L เป็นสารตั้งต้นพบว่า ค่าความหนาแน่นไฟฟ้าสูงสุด (Maximum current density) ของระบบที่ไม่มีจุลินทรีย์ (Abiotic reactor) เท่ากับ 112 mA/m^2 สำหรับระบบที่มีจุลินทรีย์ร่วมด้วย (Biotic reactor) พบว่ามีค่าความหนาแน่นไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 115 mA/m^2 และพบซัลเฟอร์ที่มีเลขออกซิเดชันต่างกัน 3 สถานะได้แก่ $\text{S}_0/\text{S}_x^{2-}$, $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ และ SO_4^{2-} จากนั้น Sun และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับกลุ่มประชากรจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาซัลไฟด์ออกซิเดชันในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแบบห้องเดี่ยวใช้อากาศที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของซัลไฟด์เท่ากับ 2 mM โดยศึกษาชนิดของจุลินทรีย์ที่พบในระบบโดยวิธี 16S rRNA gene clone library จากการทดลองพบว่าค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 13 mW/m^2 ซึ่งวัดได้ขณะที่มีความหนาแน่นไฟฟ้า (Current density) เท่ากับ 96 mA/m^2 ผลการศึกษาชนิดจุลินทรีย์พบว่า จุลินทรีย์ที่พบบริเวณพื้นผิวขั้วแอโนดเป็นชนิดแบคทีเรียออกซิโดซัลเฟอร์ (*Pseudomonas* sp.) เป็นส่วนใหญ่ และจุลินทรีย์ที่พบจากบริเวณสารละลายเป็นชนิดแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (*Comamonas* sp. และ *Acinetobacter* sp.)

น้ำเสียจริงที่มีการปนเปื้อนของสารมลพิษชนิดซัลเฟอร์โดยส่วนมากแล้วอาจไม่ได้อยู่ในรูปของซัลไฟด์ แต่อาจอยู่ในรูปของน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยซัลเฟต ดังนั้นนอกจากการใช้ซัลไฟด์เป็นสารตั้งต้นในงานวิจัยที่เกี่ยวกับการบำบัดสารมลพิษชนิดซัลเฟอร์ในน้ำเสียแล้ว การใช้ซัลเฟตเป็นสารตั้งต้นก็เป็นประเด็นที่น่าสนใจที่ควรศึกษาถึงประสิทธิภาพในการบำบัดด้วยเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเช่นกัน จากงานวิจัยที่ผ่านมา Rabaey และคณะ (2005) ได้ศึกษาเกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่บำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ เช่น น้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยอะซิเตทหรือกลูโคส และซัลเฟต รวมถึงน้ำเสียจริง ได้แก่ น้ำเสียที่มาจากรองพยาบาล และน้ำเสียชุมชน ผลการทดลองพบว่า น้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยอะซิเตท ปริมาณซัลเฟตที่ปนเปื้อนในระบบไม่ลดลง เนื่องจากแบคทีเรียที่ย่อยอะซิเตทใช้ขั้วแอโนดเป็นตัวรับอิเล็กตรอนมากกว่าใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ส่วนน้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยกลูโคส ปริมาณซัลเฟตที่ปนเปื้อนในระบบลดลงจาก $37.3 \pm 0.4 \text{ mg/L}$ เหลือ $6.4 \pm 1.1 \text{ mg/L}$ SO_4^{2-} -S อัตราการบำบัดซีโอดีสูงสุดเท่ากับ $0.243 \pm 0.009 \text{ kg COD/m}^3$ ของปริมาตรสุทธิของห้องแอโนด/day ส่วนการบำบัดน้ำเสียจริง อัตราการบำบัดซีโอดีโดยผ่านปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันคิดเป็น $0.086 \pm 0.024 \text{ kg COD/m}^3$ ของปริมาตร

ฤทธิ์ของห้องแอนด/day นอกจากนี้งานวิจัยของ Rabaey และคณะ (2006) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการบำบัดสารอินทรีย์และซัลเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งเดินระบบโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วยกลูโคสความเข้มข้น 1 g/L และ $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ความเข้มข้น 4.1 g/L ผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของซัลเฟตลดลงจาก 533 $mgSO_4-S/L$ เหลือ $35 \pm 29 mgSO_4-S/L$ ในวงจรแบบ closed circuit ส่วนในวงจร open circuit ลดลงเหลือ $61 \pm 33 mgSO_4-S/L$ ค่าซีโอดีลดลงจาก 1,060 $mgCOD/L$ เหลือประมาณ 650 $mgCOD/L$ และค่าความเข้มข้นของซัลไฟด์เพิ่มขึ้นเป็น $32 \pm 17 mgS^{2-}/L$ และเกิดเป็น elemental sulfur เท่ากับ 336 $mgS^2-/L-d$ ของปริมาตรฤทธิ์ของห้องแอนด และงานวิจัยของ Zhao และคณะ (2008) ที่ใช้ขั้วไฟฟ้าชนิด activated carbon cloth เพื่อศึกษาประสิทธิภาพและกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนซัลเฟต ผลการทดลองพบว่า สามารถวัดค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เท่ากับ 0.51 mW/cm^2 ขณะที่ความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 1.3 mA/cm^2 คิดประสิทธิภาพการบำบัดได้เท่ากับ 99% เมื่อเทียบจากความเข้มข้นซัลเฟตเริ่มต้นที่เท่ากับ 3.03 g/m^3

อย่างไรก็ตามน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของซัลเฟต/ซัลไฟด์ยังอาจมีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์ร่วมด้วย ซึ่งการแข่งขันระหว่างสารอินทรีย์และซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในการทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนในฝั่งแอนดนับเป็นประเด็นที่น่าสนใจเช่นกัน เนื่องจากอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟต/ซัลไฟด์ปนเปื้อนได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมา Zhang และคณะ (2009) ทำการศึกษาการใช้สารอินทรีย์และซัลไฟด์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแบบห้องคู่ โดยใช้เยื่อเลือกผ่านโปรตอนเป็นตัวแยกฝั่งระหว่างแอนดกับแคโทด และใช้ Vanadium (V(V)) เป็นตัวรับอิเล็กตรอน วัสดุที่ใช้ทำขั้วแอนดและแคโทดคือ carbon fiber felt ขนาด 16 cm^2 เดินระบบแบบ fed-batch เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ใช้ความต้านทานภายนอกเท่ากับ 1,000 Ω ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการศึกษาพบว่า maximum open circuit voltage เท่ากับ 1,093 mV ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดได้เท่ากับ $90.3 \pm 8.5 mW/m^2$ ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์และสารอินทรีย์พบว่า ความเข้มข้นของซัลไฟด์และสารอินทรีย์ลดลงตามเวลาโดยคิดเป็นประสิทธิภาพในการบำบัดซัลไฟด์ได้เท่ากับ $84.7 \pm 2.8\%$ และประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีเท่ากับ $54.0 \pm 1.9\%$ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total organic carbon, TOC) ลดลงจาก 339.9 ± 10.2 เหลือ $269.6 \pm 12.0 mg/L$ คิดเป็นอัตราการบำบัดที่โอซีเท่ากับ $20.7 \pm 2.1\%$ อย่างไรก็ตามความเข้มข้นของซัลเฟตเพิ่มขึ้นเป็น $90.0 \pm 5.0 mg/L$ และบริเวณผิวของขั้วแอนดพบ elemental sulfur ประมาณ $2 \pm 0.6\%$ ส่วนชนิดของแบคทีเรียที่พบได้แก่ cocci และ short bacilli ติดบริเวณผิวของแอนดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ จากนั้น Zhang และคณะ (2010) ได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่กล่าวมาข้างต้น โดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพและตะกอนจุลินทรีย์ในลักษณะเดิม โดยปัจจัยที่วิเคราะห์คือ ความเข้มข้นของซัลไฟด์และ V(V) เริ่มต้นต่างกัน ทำการเดินระบบแบบ fed-batch เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นซัลไฟด์ขึ้น ช่วง lag time ของจุลินทรีย์เพิ่มขึ้นและอัตราการบำบัดซัลไฟด์ (Sulfide removing rate) ลดลงเพราะเมื่อ

เพิ่มความเข้มข้นขึ้นจะส่งผลต่อแบคทีเรียในระบบทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดต่ำลง ส่วนค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้เท่ากับ 500–700 mW/m^2 ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเท่ากับ 40.0–50.0% และประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเท่ากับ 20.0–30.0% นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Zhang และ Ni (2010) ที่ศึกษาเกี่ยวกับการผลิตกระแสไฟฟ้าและการบำบัดซัลไฟด์ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแบบห้องคู่ที่มีเยื่อเลือกผ่านโปรตอนเป็นตัวกั้นแยกฝั่งและใช้ lead dioxide เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด โดยใช้ขั้วแอโนดเป็น carbon fiber และขั้วแคโทดเป็น PbO_2 กับ Pt/C เพื่อเปรียบเทียบ ทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของซัลไฟด์เท่ากับ 80 mg/L และสารละลายนำไฟฟ้าในฝั่งแคโทดคือ phosphate buffer (NaH_2PO_4 0.5 M) ควบคุมพีเอชให้เท่ากับ 3.3 โดยใช้ตัวต้านทานจากภายนอกเท่ากับ 1000 Ω เติมน้ำในระบบเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า maximum open circuit voltage เท่ากับ $1,254 \pm 60$ mV และค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 997.26 ± 20.20 mW/m^2 หลังจากการเติมซัลไฟด์เข้าสู่ระบบ มีการผลิตซัลเฟตขึ้นจากปฏิกิริยาซัลไฟด์ออกซิเดชัน นอกจากนี้ความเข้มข้นของซัลไฟด์และความเข้มข้นของกลูโคสยังลดลงตามเวลาเช่นเดียวกัน ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์และสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดเท่ากับ $88.73 \pm 4.37\%$ และ $23.88 \pm 7.45\%$ ตามลำดับ ส่วนที่บริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนดพบ elemental sulfur ประมาณ $2.69 \pm 0.17\%$

จากงานวิจัยที่ได้ผ่านมาสามารถสรุปผลการศึกษายเป็นตารางได้ดังแสดงในตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2 - 6 สรุปผลการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา

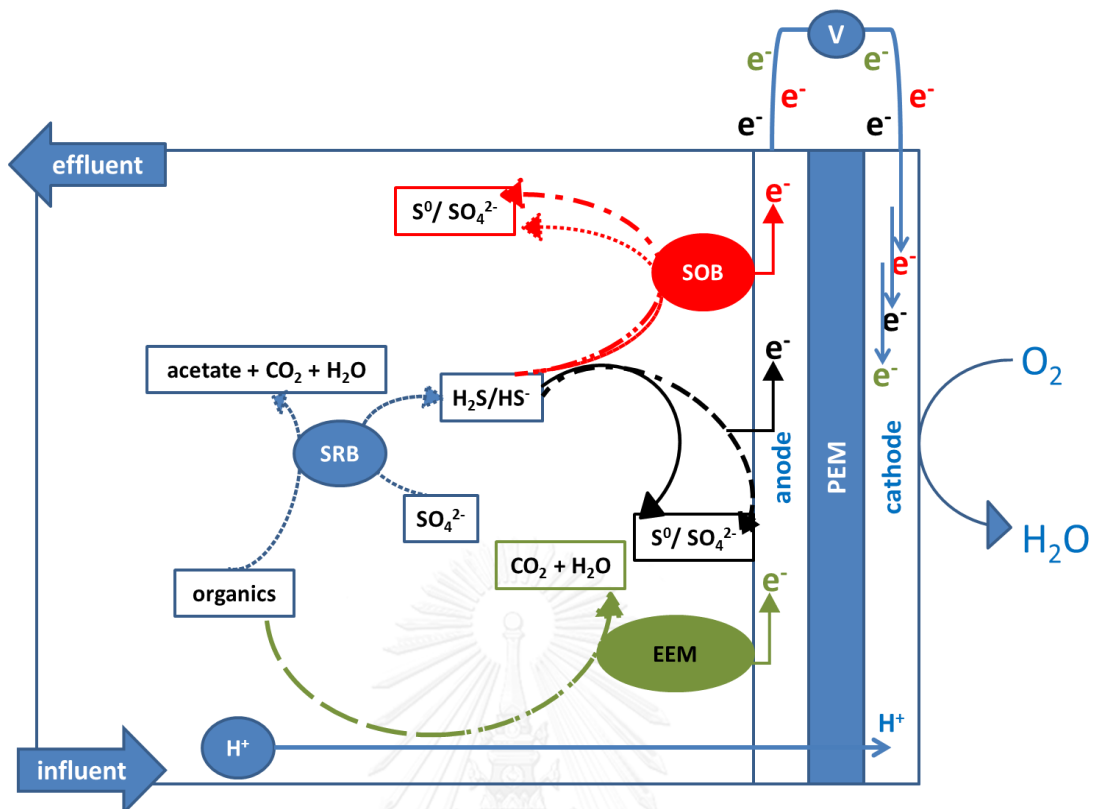
| การศึกษา | ผลการศึกษา |
|--|--------------------------------|
| ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์ | 20 – 50% |
| ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียที่มีซัลไฟด์ | 80 – 99% |
| ช่วงของกำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ผลิตได้ | 0.013 – 5.1 W/m^2 |
| ชนิดของจุลินทรีย์ที่พบบริเวณตะกอนแขวนลอย | กลุ่มแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต |
| ชนิดของจุลินทรีย์ที่พบบริเวณขั้วแอโนด | กลุ่มแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลไฟด์ |
| ผลิตภัณฑ์ที่พบบริเวณขั้วแอโนด | Elemental sulfur |

ทั้งนี้เป็นที่สังเกตได้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เกี่ยวกับการบำบัดมลพิษซัลเฟอร์ด้วยเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพมักจะมุ่งประเด็นไปที่การศึกษาการบำบัดซัลไฟด์ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นหลัก (Rabaey และคณะ, 2006, Dutta และคณะ, 2008, Sun และคณะ, 2009, Zhang และคณะ, 2009, Zhao และคณะ, 2009, Sun และคณะ, 2010, Zhang และคณะ, 2010) ในขณะที่งานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียซึ่งปนเปื้อนด้วยซัลเฟตและสารอินทรีย์ยังมีอยู่ค่อนข้างจำกัดมาก (Rabaey และคณะ, 2005, Rabaey และคณะ, 2006, Zhao และคณะ, 2008) ซึ่ง

กระบวนการบำบัดน้ำเสียซึ่งปนเปื้อนด้วยซัลเฟตและสารอินทรีย์ถือเป็นประเด็นที่น่าสนใจมาก การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียดังกล่าวอาจสามารถช่วยในการดึงกลับพลังงานจากน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยซัลเฟต อีกทั้งยังอาจเป็นแนวทางเลือกใหม่ในการผนึกรวมการบำบัดสารอินทรีย์ ซัลเฟตและซัลไฟต์ในหน่วยบำบัดเดียว ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยซัลเฟตและสารอินทรีย์ พร้อมทั้งศึกษาศักยภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพดังกล่าว ซึ่งถือเป็นการเพิ่มแนวทางในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนด้วยซัลเฟตและสารอินทรีย์รวมถึงการดึงกลับพลังงานจากน้ำเสียต่อไป

2.7 กลไกที่อาจเกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ใช้บำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟต

จากงานวิจัยที่ผ่านมาดังสรุปข้างต้น จะเห็นได้ว่าการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟตสูงด้วยเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นแนวทางที่เป็นไปได้และมีความน่าสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากการพัฒนาแนวทางในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟตสูงควบคู่ไปกับการดึงกลับพลังงานในรูปของกระแสไฟฟ้า ทั้งนี้กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพอาจเกิดได้จากหลายกระบวนการผสมผสานกันซึ่งสามารถแบ่งกระบวนการได้ออกเป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ 1) กระบวนการทางชีวภาพ และ 2) กระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้บริเวณฝั่งแอโนดและแคโทด กระบวนการทางชีวภาพที่เกิดขึ้นได้ในระบบ ได้แก่ กระบวนการซัลเฟตรีดักชันโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ซึ่งเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่เจริญเติบโตโดยใช้สารอินทรีย์และซัลเฟตที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย จึงช่วยในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟตสูงได้ โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตสามารถใช้สารอินทรีย์เป็นสารให้อิเล็กตรอน และซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอนแล้วก่อให้เกิดซัลไฟต์เป็นผลิตภัณฑ์จากกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน ทั้งนี้ Rabaey และคณะ (2005) ได้ค้นพบว่ากระบวนการซัลเฟตรีดักชันสามารถเกิดขึ้นได้ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ นอกจากนี้แบคทีเรียออกซิโดซัลไฟต์ซึ่งสามารถเปลี่ยนซัลไฟต์ในระบบให้เป็น elemental sulfur ยังถูกค้นพบและนำมาใช้งานได้ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเพื่อบำบัดซัลไฟต์ Rabaey และคณะ (2006) อีกทั้งยังมีความเป็นไปได้ที่จะพบแบคทีเรียที่ใช้สารอินทรีย์ในระบบโดยตรงควบคู่ไปกับการให้อิเล็กตรอนผ่านทางขั้วแอโนด-แคโทดมายังออกซิเจนอีกด้วย Zhang และคณะ (2009) ส่วนปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้านั้นอาจเกิดจากซัลไฟต์ที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดโดยตรงและเกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปยังขั้วแคโทดและออกซิเจน ทั้งนี้การถ่ายเทอิเล็กตรอนและโปรตอนในระบบสามารถช่วยให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นภายในระบบของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ กระบวนการและกลไกต่าง ๆ ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพสามารถสรุปได้ดังแสดงในภาพที่ 2-6 และตารางที่ 2-7



ภาพที่ 2 - 6 กลไกที่อาจเกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟต

SRB คือ Sulfate reducing bacteria

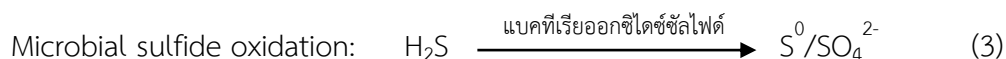
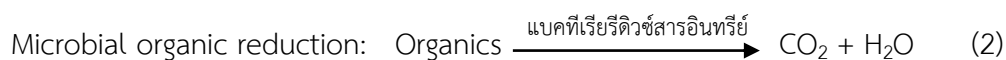
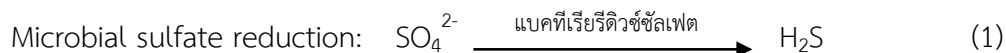
SOB คือ Sulfur/Sulfide oxidizing bacteria

EEM คือ Exoelectrogenic microorganisms

ตารางที่ 2 - 7 กลไกที่อาจเกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพซึ่งบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟต

| กระบวนการ | ตัวให้อิเล็กตรอน | ตัวรับอิเล็กตรอน |
|---|------------------|----------------------|
| ซัลเฟตรีดักชันโดยจุลินทรีย์ (Microbial sulfate reduction) | สารอินทรีย์ | ซัลเฟต |
| ซัลไฟด์ออกซิเดชันโดยจุลินทรีย์ (Microbial sulfide oxidation) | ไฮโดรเจนซัลไฟด์ | ออกซิเจนที่ขั้วแคโทด |
| ซัลไฟด์ออกซิเดชันทางเคมีไฟฟ้า (Abiotic sulfide oxidation) | ไฮโดรเจนซัลไฟด์ | ออกซิเจนที่ขั้วแคโทด |
| ออกซิเดชันของสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ที่ขั้วแอโนด (Microbial organic oxidation at anode) | สารอินทรีย์ | ออกซิเจนที่ขั้วแคโทด |

ซึ่งปฏิกิริยาและกลไกที่เกิดขึ้นสามารถสรุปได้ดังสมการต่อไปนี้



ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ ได้แก่ 1) Oxidation-Reduction potential (ORP) และ 2) ค่าพีเอช

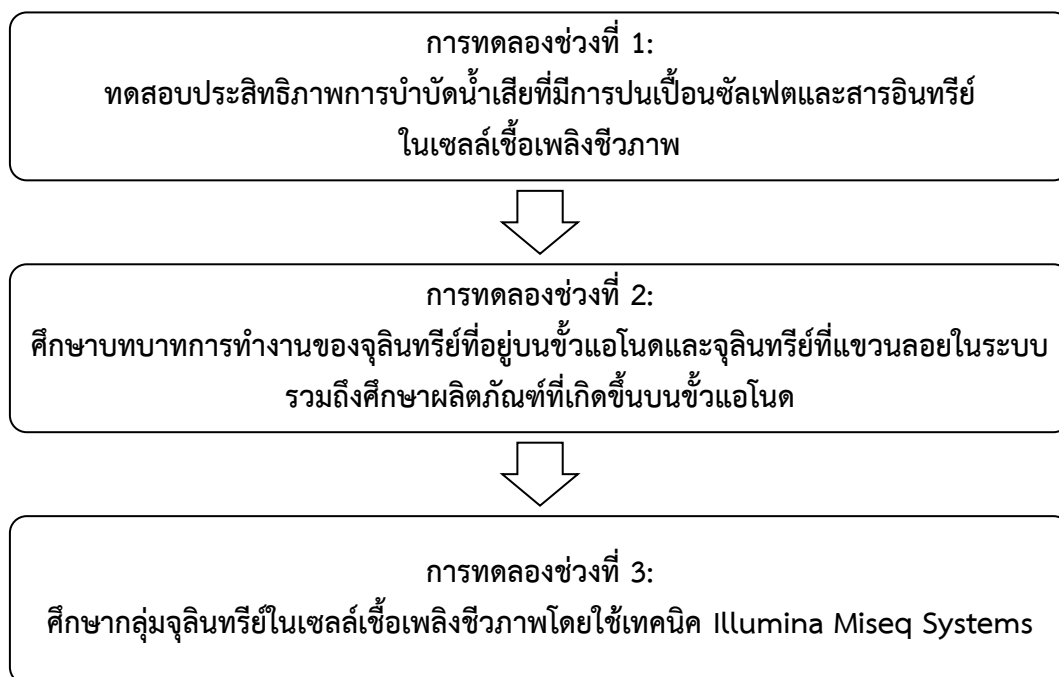
1) Oxidation-Reduction potential (ORP) เป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถในการรับและให้อิเล็กตรอนในระบบ ยิ่งมีค่าติดลบมากแสดงว่าในระบบมีแนวโน้มที่จะให้อิเล็กตรอนมาก ซึ่งส่งผลกับการเกิดกระแสไฟฟ้าในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพอีกด้วย

2) ค่าพีเอช เป็นค่าที่มีผลกับรูปแบบซัลไฟด์ที่พบในระบบ หากพีเอชอยู่ในสภาวะเป็นกรด รูปแบบของซัลไฟด์ที่พบในระบบจะเป็น H_2S แต่ถ้าพีเอชของระบบอยู่ในช่วงที่เป็นกลางหรือเป็นเบส รูปแบบของซัลไฟด์ที่พบในระบบจะเป็น $\text{HS}^-/\text{S}^{2-}$ ซึ่งเหมาะสมกับการใช้ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ เนื่องจากซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจะสามารถนำไปใช้ในกลไก Microbial and abiotic sulfide oxidation ได้

บทที่ 3 แผนการทดลองและดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนงานวิจัย

งานวิจัยเรื่องการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟตสูงโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพสามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ 1) การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย 2) การศึกษาบทบาทการทำงานของจุลินทรีย์ที่อยู่บนขั้วแอโนดและจุลินทรีย์ที่แขวนลอยในระบบ รวมถึงศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบนขั้วแอโนด และ 3) การศึกษากลุ่มจุลินทรีย์ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ โดยการทดลองช่วงที่ 1 จะทำการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และซัลเฟต รวมถึงความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟตในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วยแลกเตทและซัลเฟต ในอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.6 (วิธีคิดดังแสดงในภาคผนวก ก) ซึ่งเป็นอัตราส่วนซึ่งซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอนที่มากเกินพอเทียบกับค่าซีโอดีที่ระยะเวลาเก็บน้ำ (Hydraulic retention time, HRT) เท่ากับ 24 ชั่วโมง เพื่อให้มีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพเพียงพอ และในการทดลองช่วงที่ 2 ทำการศึกษายบทบาทการทำงานของจุลินทรีย์ที่อยู่บนขั้วแอโนด (Anode-attached microorganisms) และจุลินทรีย์ที่แขวนลอย (Suspended microorganisms) ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากการเดินระบบในการทดลองช่วงที่ 1 รวมถึงการนำขั้วแอโนดที่ผ่านการทดลองในช่วงที่ 2 แล้วไปทำการตรวจวัดผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น และในการทดลองช่วงสุดท้าย ทำการศึกษากลุ่มจุลินทรีย์ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพจากการทดลองช่วงที่ 1 ทั้งกลุ่มที่อยู่บนขั้วแอโนดและแขวนลอยในระบบ โดยใช้เทคนิค Illumina MiSeq System แผนการทดลองสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3-1

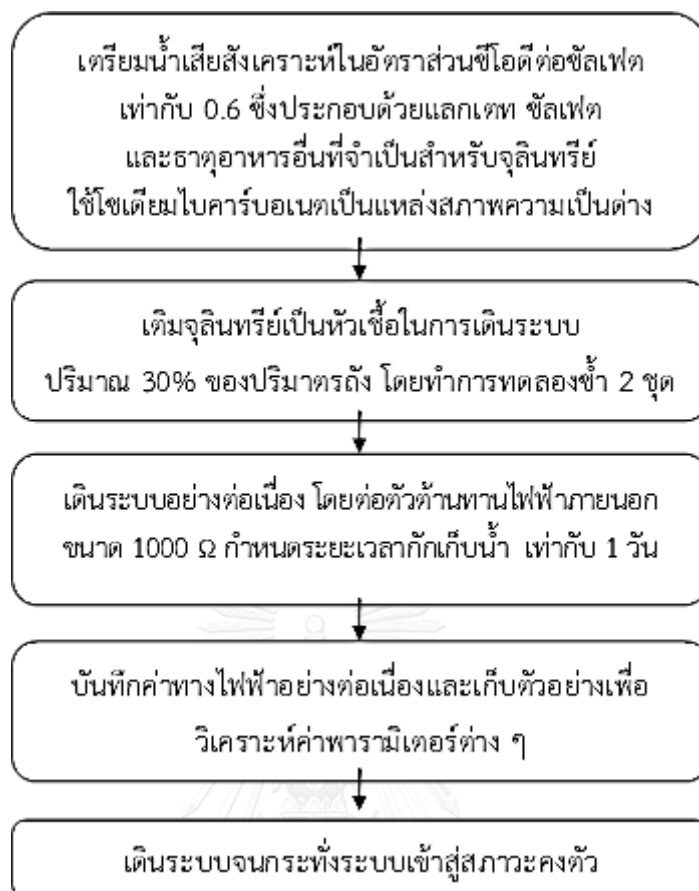


ภาพที่ 3 - 1 แผนการทดลองโดยรวมของงานวิจัย

3.2 การดำเนินการทดลอง

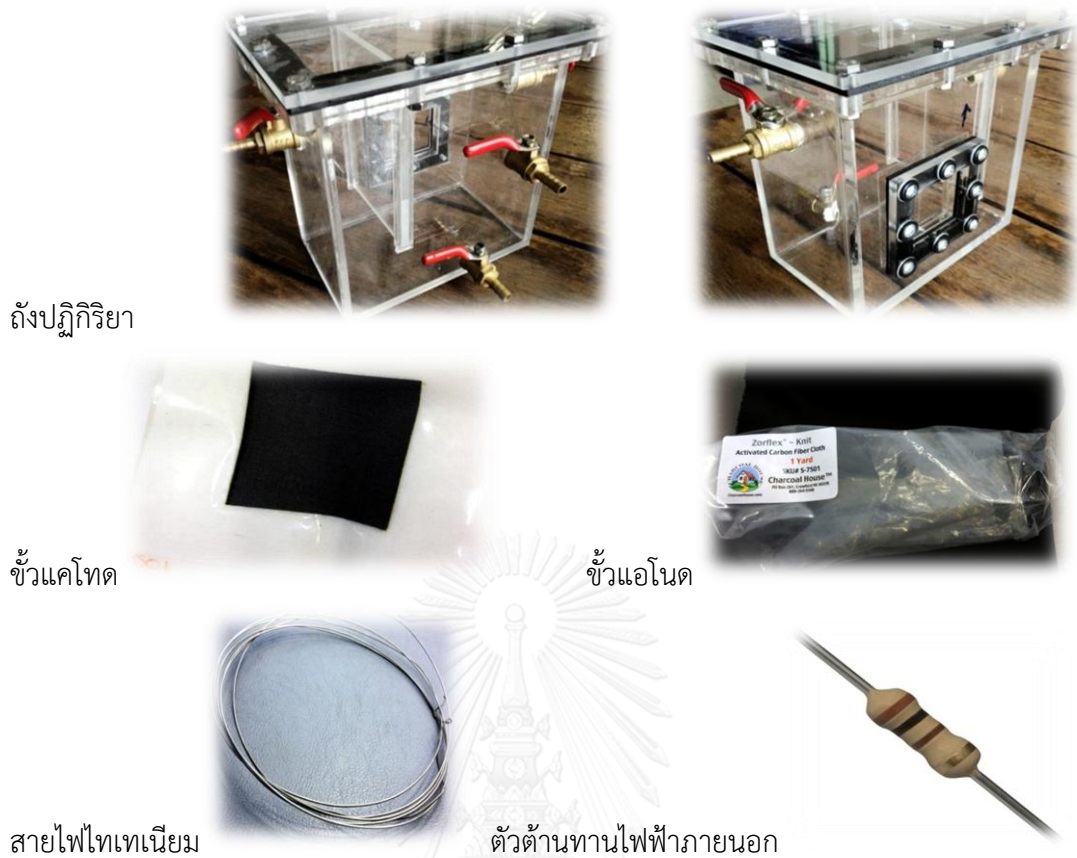
3.2.1 การทดลองช่วงที่ 1

การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์และคลอโรฟิลล์ รวมถึงความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และคลอโรฟิลล์ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพโดยมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้ เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ในอัตราส่วนซีโอดีต่อคลอโรฟิลล์เท่ากับ 0.6 ซึ่งประกอบด้วย แลกเตท คลอโรฟิลล์ และธาตุอาหารอื่นที่จำเป็นสำหรับจุลินทรีย์ ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) และเติมตะกอนจุลินทรีย์สายพันธุ์ผสมเป็นหัวเชื้อในการเดินระบบปริมาตร 30% ของปริมาตรถัง เพื่อให้มีจำนวนจุลินทรีย์ในการเกิดปฏิกิริยาเพียงพอในระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ดำเนินการทดลองทั้งหมดซ้ำ 2 ชุด จากนั้นเริ่มเดินระบบอย่างต่อเนื่อง กำหนดระยะเวลา กักเก็บน้ำเท่ากับ 24 ชั่วโมง และใช้ตัวต้านทานภายนอกขนาด 1000 Ω (Liu et al., 2004) ระหว่างการทดลองบันทึกค่าทางไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ เดินระบบจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว แล้วจึงนำไปทำการทดลองช่วงที่ 2 ต่อไป ขั้นตอนการทดลองสามารถแสดงได้ดังภาพที่ 3-2



ภาพที่ 3 - 2 แผนผังการทดลองช่วงที่ 1

ลักษณะของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแบบห้องเดี่ยวชนิดที่ใช้อากาศ (ออกซิเจน) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในฝั่งแคโทด (Air-breathing single-chamber microbial fuel cell) มีขนาดกว้าง 9 เซนติเมตร สูง 12 เซนติเมตร และยาว 16 เซนติเมตร ประกอบด้วยขั้วแคโทดและแอโนด โดยขั้วแคโทดจะทำปฏิกิริยากับอากาศภายนอก วัสดุที่ใช้เป็นขั้วแคโทดคือ carbon cloth 30% โดยน้ำหนัก PTFE wet proofed ขนาด 5x5 เซนติเมตร ซึ่งโหลดด้วยแพลทตินัม 0.5 mg/cm^2 เพื่อเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ด้านหนึ่ง ส่วนอีกด้านหนึ่งติดกับเยื่อเลือกผ่านโปรตอน (Proton exchange membrane, PEM) ชนิด Nafion N117 ด้วยวิธีการ hot-pressing ซึ่งวัสดุที่ใช้เป็นขั้วแคโทดทั้งหมดสั่งซื้อจากเวปไซด์ Fuel Cell Store ประเทศสหรัฐอเมริกา และใช้วัสดุสำหรับขั้วแอโนดเป็น activated carbon cloth ยี่ห้อ Zorflex Knit carbon cloth รุ่น FM50K สั่งซื้อจากบริษัท Calgon Carbon Corporation ประเทศสหรัฐอเมริกา ขนาด 3x10 เซนติเมตร ทั้งขั้วแคโทดและแอโนดต่อครบวงจรกับสายไฟไททานเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 1 มิลลิเมตร และต่อกับตัวต้านทานไฟฟ้าภายนอกขนาด 1,000 Ω ดังแสดงในภาพที่ 3-3



ภาพที่ 3 - 3 ส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ น้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยกรดแลคติก เพื่อให้ได้ค่าซีโอดีเท่ากับ 800 mg/L โซเดียมซัลเฟตเพื่อให้ซัลเฟตมีความเข้มข้นเท่ากับ 1,333 mg/L และธาตุอาหารที่สำคัญอื่นๆ สำหรับจุลินทรีย์ โดยอัตราส่วนของค่าซีโอดีต่อความเข้มข้นของซัลเฟตที่ใช้คิดเป็น 0.6 ซึ่งเป็นอัตราส่วนซึ่งซัลเฟตเป็นสารรีดิวซ์ที่มากเกินไปเมื่อเทียบกับค่าซีโอดี ทั้งนี้แลกเตทเป็นสารอินทรีย์ซึ่งสามารถใช้ในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นอย่างดี (Medigan et al., 2003) และเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตเพื่อเป็นแหล่งสภาพความเป็นด่าง 1,500 mg/L as CaCO₃ โดยทำการปรับพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 ดังแสดงในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3 - 1 ความเข้มข้นของสารในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการบำบัดแบบไร้อากาศ โดยปรับปรุงจาก Rittmann และ McCarty (2001) (การคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ข)

| Element | มวลโมเลกุล ของธาตุ (g) | ความเข้มข้น ของธาตุ (mg/L) | รูปแบบสารใน การเติม | มวลโมเลกุล ของสาร (g) | ความเข้มข้น ของสาร (mg/L) |
|--------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Electron donor | | | | | |
| Lactic acid | - | - | $C_3H_6O_3$ | 90 | 750 |
| Electron accepter | | | | | |
| Sulfate | - | - | Na_2SO_4 | 142 | 1,970 |
| Macronutrients | | | | | |
| Nitrogen | 14 | 58 | NH_4Cl | 53.5 | 221.6 |
| Phosphorus | 30 | 11.32 | $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$ | 156 | 58.9 |
| Sulfur | 32 | 6.6 | $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ | 246.5 | 50.8 |
| Common cations | | | | | |
| Sodium | 23 | 150 | $NaCl$ | 58.5 | 381.5 |
| Potassium | 39 | 300 | KCl | 74.6 | 573.8 |
| Calcium | 40 | 150 | $CaCl_2$ | 111 | 416.3 |
| Magnesium | 24 | 160 | $MgCl_2$ | 95 | 633.3 |
| pH Buffer | | | | | |
| Sodium Bicarbonate | - | - | $NaHCO_3$ | 84 | 2,520 |

การควบคุมระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ คุมระบบและป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้เข้าสู่ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพโดยใช้ Peristaltic pump ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเดินระบบดังแสดงในตารางที่ 3-2

ตารางที่ 3 - 2 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเดินระบบ

| พารามิเตอร์ที่ใช้ในการเดินระบบ | ค่าที่กำหนด |
|---|-------------------------------------|
| อัตราการไหล | 2 ลิตร/วัน |
| ระยะเวลาพักเก็บน้ำ | 1 วัน |
| ค่าพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่เข้าระบบ | 6.5 – 7.5 |
| ค่า OPR ของระบบ | -300 ถึง -400 มิลลิโวลต์ |
| อุณหภูมิ | อุณหภูมิห้อง (28 – 35 องศาเซลเซียส) |

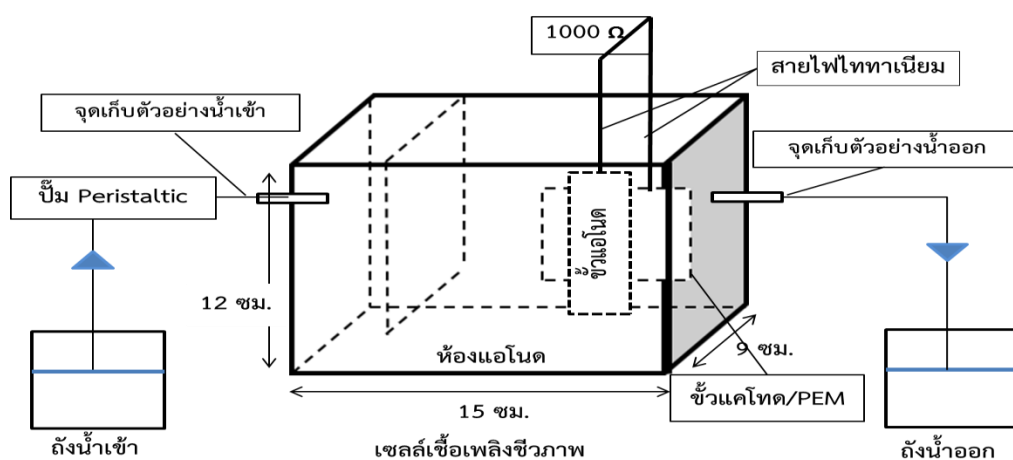
การวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้า ทำการเดินระบบแบบครบวงจร โดยใช้ตัวต้านทานไฟฟ้าขนาด 1000 Ω วัดค่าความต่างศักย์ (Voltage) ที่คร่อมขั้วแคโทดและแอโนดอย่างต่อเนื่อง เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady state) ทำการวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ความต้านทานภายนอกแตกต่างกัน รวมทั้งค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อวงจรเปิด (Open circuit voltage, OCV) เพื่อจัดทำกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า (I-V curve) ซึ่งสามารถนำมาคำนวณพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงไฟฟ้าและจัดทำกราฟความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (Power density curve) เพื่อหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้สูงสุด (Maximum power density) ของเซลล์เชื้อเพลิงไฟฟ้า การวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าต่าง ๆ ทำโดยใช้เครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ (Multimeter) ยี่ห้อ Fluke รุ่น 115

การเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์พารามิเตอร์ ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่เข้าและออกจากระบบในห้องฝั่งแอโนด เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 3-3

ตารางที่ 3 - 3 พารามิเตอร์และวิธีหรือเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลอง (มันสิน, 2551)

| พารามิเตอร์ | วิธี/เครื่องมือตรวจวัด | ความถี่ |
|-------------|---------------------------------|-------------------|
| ซีลเฟต | Turbidimetric method | สัปดาห์ละ 3 ครั้ง |
| ซีโอดี | Close reflux method | สัปดาห์ละ 3 ครั้ง |
| ซีลไฟด์ | Sulfide ion selective electrode | สัปดาห์ละ 3 ครั้ง |
| พีเอช | pH meter | สัปดาห์ละ 3 ครั้ง |
| ORP | ORP meter | สัปดาห์ละ 3 ครั้ง |

จุดที่เก็บตัวอย่างน้ำเข้าและน้ำออกดังแสดงในภาพที่ 3-4

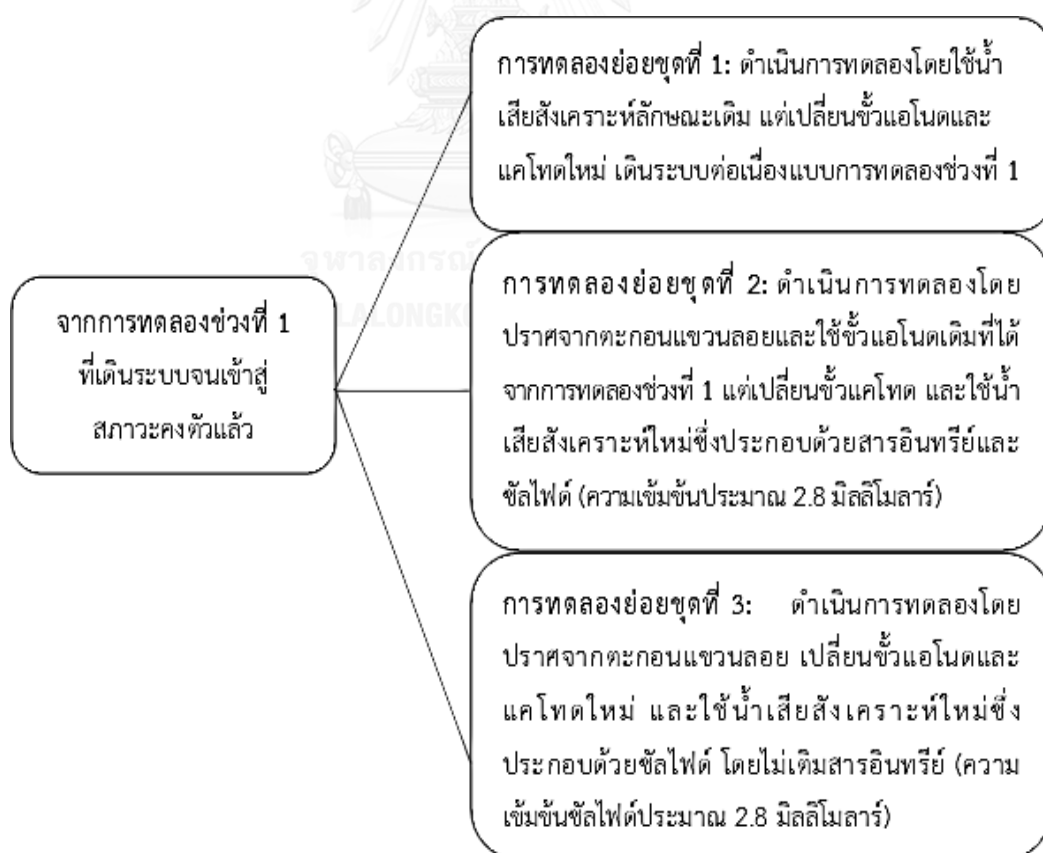


ภาพที่ 3 - 4 จุดเก็บตัวอย่างน้ำเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์

3.2.2 การทดลองช่วงที่ 2

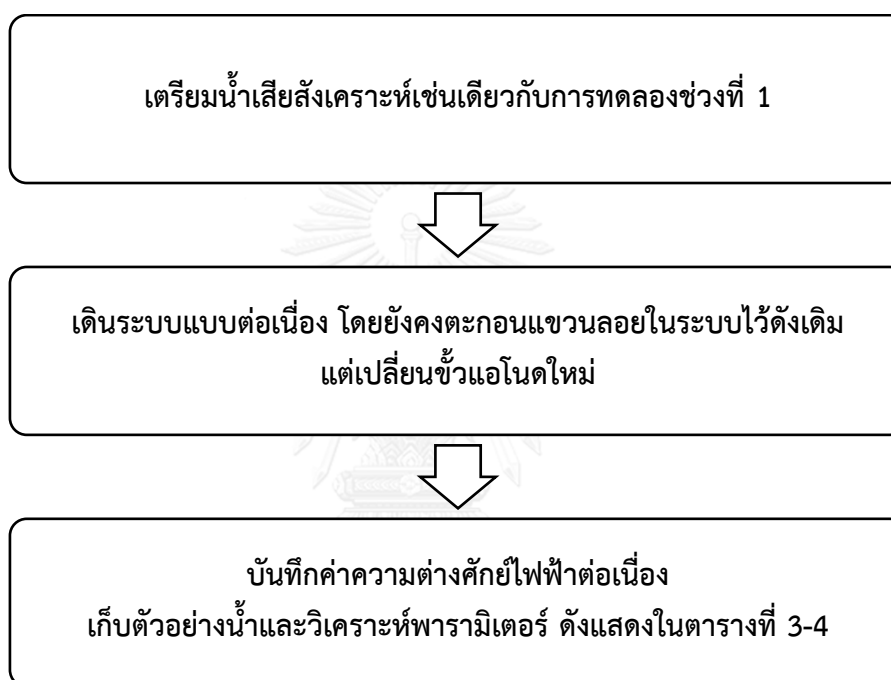
ศึกษาบทบาทและกลไกการทำงานของจุลินทรีย์ที่แขวนลอยในระบบและจุลินทรีย์ที่อยู่บนชีวแอโนด จากนั้นนำชีวแอโนดที่ผ่านการทดลองในช่วงนี้มาตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบนชีวแอโนด โดยแบ่งการทดลองย่อยออกเป็น 3 ชุดการทดลองคือ

- 1) การทดลองย่อยชุดที่ 1 ดำเนินการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ลักษณะเดิม แต่เปลี่ยนชีวแอโนดและแคโทดใหม่ และเดินระบบต่อเนื่องแบบเดียวกับการทดลองช่วงที่ 1
- 2) การทดลองย่อยชุดที่ 2 ดำเนินการทดลองโดยปราศจากตะกอนแขวนลอยและใช้ชีวแอโนดเดิมที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 1 แต่เปลี่ยนชีวแคโทด และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ใหม่ซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์และซัลไฟด์ โดยให้ความเข้มข้นของสารละลายดังกล่าวใกล้เคียงกับความเข้มข้นของซัลไฟด์ในห้องแอโนดจากผลการทดลองช่วงที่ 1 (ประมาณ 2.8 มิลลิโมลาร์)
- 3) การทดลองย่อยชุดที่ 3 ดำเนินการทดลองโดยปราศจากตะกอนแขวนลอย เปลี่ยนชีวแอโนดและแคโทดใหม่ และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ใหม่ซึ่งประกอบด้วยซัลไฟด์โดยไม่เติมสารอินทรีย์ และให้ความเข้มข้นของซัลไฟด์ใกล้เคียงกับความเข้มข้นของสารในห้องแอโนดจากผลการทดลองช่วงที่ 1 (ประมาณ 2.8 มิลลิโมลาร์) ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามภาพที่ 3-5



ภาพที่ 3 - 5 แผนผังรวมของการทดลองช่วงที่ 2

- การทดลองย่อยชุดที่ 1 ศึกษาบทบาทการทำงานของตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยในระบบ เพื่อความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อน และความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยยังคง ตะกอนแขวนลอยในระบบไว้ดังเดิม แต่เปลี่ยนขั้วแอโนดและแคโทดใหม่ (ซึ่งไม่มีจุลินทรีย์อยู่บน ขั้วแอโนด) ทำการเดินระบบด้วยการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เช่นเดียวกับการทดลองช่วงที่ 1 จากนั้น บันทึกค่าทางไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง เก็บตัวอย่างน้ำ และวิเคราะห์พารามิเตอร์ ซึ่งมีขั้นตอนการ ดำเนินงานดังภาพที่ 3-6

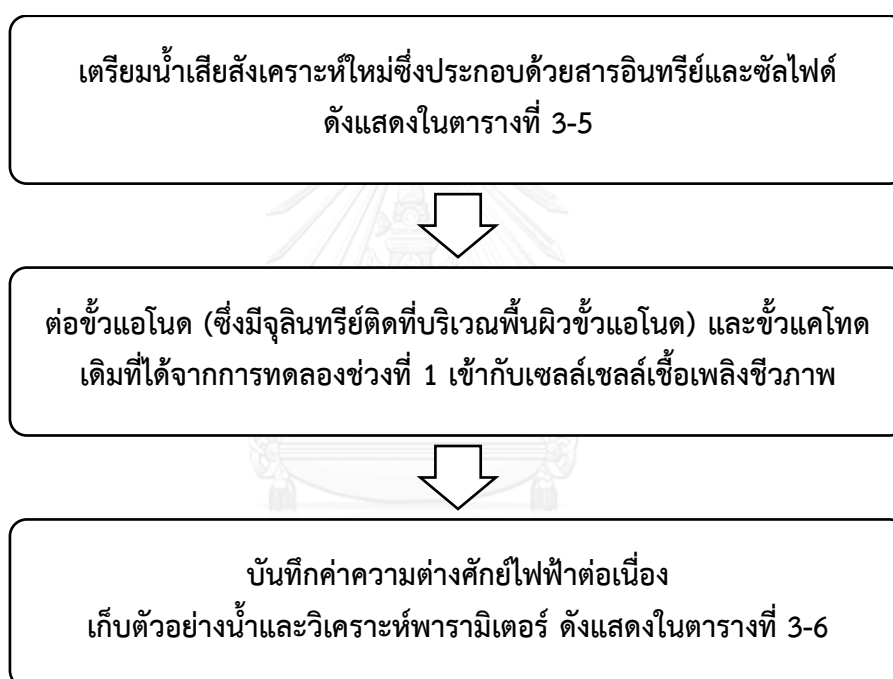


ภาพที่ 3 - 6 แผนผังการทดลองย่อยชุดที่ 1

ตารางที่ 3 - 4 พารามิเตอร์และวิธีหรือเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลองย่อยที่ 1

| พารามิเตอร์ | วิธี/เครื่องมือตรวจวัด | ความถี่ |
|-------------|---------------------------------|-------------------|
| ซัลเฟต | Turbidimetric method | สัปดาห์ละ 3 ครั้ง |
| ซีโอดี | Close reflux method | สัปดาห์ละ 3 ครั้ง |
| ซัลไฟด์ | Sulfide ion selective electrode | สัปดาห์ละ 3 ครั้ง |
| พีเอช | pH meter | สัปดาห์ละ 3 ครั้ง |

- การทดลองย่อยชุดที่ 2 ศึกษาบทบาทของจุลินทรีย์ที่อยู่บริเวณข้าวแอนด์ เพื่อดูบทบาทของข้าวแอนด์ที่มีจุลินทรีย์เกาะติดบนพื้นผิวถึงความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์และซัลไฟด์ รวมถึงความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของข้าวแอนด์ที่มีจุลินทรีย์เกาะติดบนพื้นผิว ดำเนินการทดลองโดยปราศจากตะกอนแขวนลอย ใช้ข้าวแอนด์และข้าวแคโทดเดิมที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 1 และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ใหม่ซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์และซัลไฟด์ โดยให้ความเข้มข้นของสารละลายดังกล่าวใกล้เคียงกับความเข้มข้นของซัลไฟด์ในห้องแอนด์จากการทดลองช่วงที่ 1 (ประมาณ 95.2 มิลลิกรัม/ลิตร) ทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง จากนั้นบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า รวมถึงเก็บตัวอย่างน้ำ และวิเคราะห์พารามิเตอร์ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังภาพที่ 3-7



ภาพที่ 3 - 7 แผนผังการทดลองย่อยที่ 2

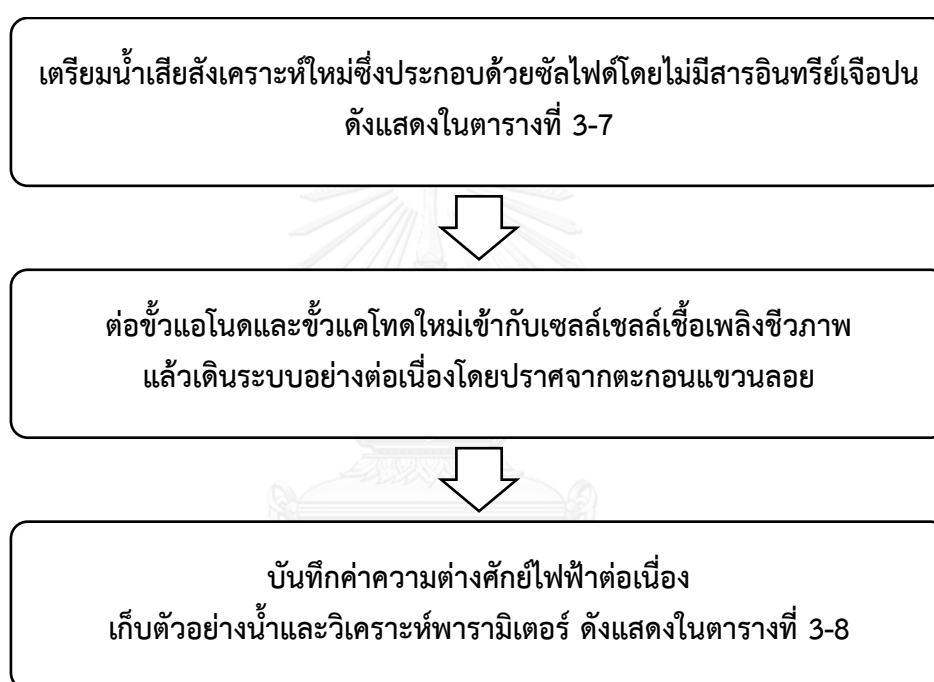
ตารางที่ 3 - 5 ความเข้มข้นของสารในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลองย่อยที่ 2

| Element | มวลโมเลกุล ของธาตุ (g) | ความเข้มข้น ของธาตุ (mg/L) | รูปแบบสารใน การเติม | มวลโมเลกุล ของสาร (g) | ความเข้มข้น ของสาร (mg/L) |
|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Electron donor | | | | | |
| Lactic acid | - | - | $C_3H_6O_3$ | 90 | 800 |
| Sulfide | - | - | $Na_2S \cdot 9H_2O$ | 240 | 672 (2.8 mM) |
| Macronutrients | | | | | |
| Nitrogen | 14 | 58 | NH_4Cl | 53.5 | 221.6 |
| Phosphorus | 30 | 11.32 | $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$ | 156 | 58.9 |
| Sulfur | 32 | 6.6 | $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ | 246.5 | 50.8 |
| Common cations | | | | | |
| Sodium | 23 | 150 | $NaCl$ | 58.5 | 381.5 |
| Potassium | 39 | 300 | KCl | 74.6 | 573.8 |
| Calcium | 40 | 150 | $CaCl_2$ | 111 | 416.3 |
| Magnesium | 24 | 160 | $MgCl_2$ | 95 | 633.3 |
| pH Buffer | | | | | |
| Sodium Bicarbonate | - | - | $NaHCO_3$ | 84 | 2,520 |

ตารางที่ 3 - 6 พารามิเตอร์และวิธีหรือเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลองย่อยที่ 2

| พารามิเตอร์ | วิธี/เครื่องมือตรวจวัด | ความถี่ |
|-------------|---------------------------------|-------------------|
| ซัลเฟต | Turbidimetric method | สัปดาห์ละ 3 ครั้ง |
| ซีโอดี | Close reflux method | สัปดาห์ละ 3 ครั้ง |
| ซัลไฟด์ | Sulfide ion selective electrode | สัปดาห์ละ 3 ครั้ง |

- การทดลองย่อยชุดที่ 3 ศึกษาความสามารถในการบำบัดซัลไฟด์และการผลิตกระแสไฟฟ้า ดำเนินการทดลองโดยปราศจากตะกอนแขวนลอย เปลี่ยนขั้วแอโนดและแคโทดใหม่ และใช้น้ำเสียสังเคราะห์ใหม่ซึ่งประกอบด้วยซัลไฟด์โดยไม่มีสารอินทรีย์เจือปน และให้ความเข้มข้นของซัลไฟด์ใกล้เคียงกับความเข้มข้นของสารในห้องแอโนดจากผลการทดลองช่วงที่ 1 (ประมาณ 95.2 มิลลิกรัม/ลิตร) ดังแสดงในตารางที่ 3-7 ทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่อง จากนั้นบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าไฟฟ้า รวมถึงเก็บตัวอย่างน้ำและวิเคราะห์พารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 3-8 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังแผนภาพรูปที่ 3-8



ภาพที่ 3 - 8 แผนผังการทดลองย่อยชุดที่ 3

ตารางที่ 3 - 7 ความเข้มข้นของสารในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์สำหรับการทดลองย่อยที่ 3

| Element | มวลโมเลกุล ของธาตุ (g) | ความเข้มข้น ของธาตุ (mg/L) | รูปแบบสารใน การเติม | มวลโมเลกุล ของสาร (g) | ความเข้มข้น ของสาร (mg/L) |
|-----------------------|---------------------------|----------------------------------|---|--------------------------|---------------------------------|
| Electron donor | | | | | |
| Sulfide | - | - | Na ₂ S.9H ₂ O | 240 | 672 (2.8 mM) |
| Macronutrients | | | | | |
| Nitrogen | 14 | 58 | NH ₄ Cl | 53.5 | 221.6 |
| Phosphorus | 30 | 11.32 | NaH ₂ PO ₄ .2H ₂ O | 156 | 58.9 |
| Sulfur | 32 | 6.6 | MgSO ₄ .7H ₂ O | 246.5 | 50.8 |
| Common cations | | | | | |
| Sodium | 23 | 150 | NaCl | 58.5 | 381.5 |
| Potassium | 39 | 300 | KCl | 74.6 | 573.8 |
| Calcium | 40 | 150 | CaCl ₂ | 111 | 416.3 |
| Magnesium | 24 | 160 | MgCl ₂ | 95 | 633.3 |
| pH Buffer | | | | | |
| Sodium Bicarbonate | - | - | NaHCO ₃ | 84 | 2,520 |

ตารางที่ 3 - 8 พารามิเตอร์และวิธีหรือเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ในการทดลองย่อยที่ 3

| พารามิเตอร์ | วิธี/เครื่องมือตรวจวัด | ความถี่ |
|-------------|---------------------------------|-------------------|
| ซัลเฟต | Turbidimetric method | สัปดาห์ละ 3 ครั้ง |
| ซัลไฟด์ | Sulfide ion selective electrode | สัปดาห์ละ 3 ครั้ง |

- การศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบนขั้วแอโนด นำขั้วแอโนดที่ผ่านการทดลองในช่วงที่ 2 มาตรวจสอบผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นบนขั้วแอโนด โดยใช้เครื่องมือในการตรวจวัดซัลเฟอร์และดูลักษณะพื้นผิวแอโนดคือ SEM/EDX

3.2.3 การทดลองช่วงที่ 3

ศึกษากลุ่มจุลินทรีย์ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้งจุลินทรีย์ที่อยู่บนขั้วแอโนดและจุลินทรีย์ที่แขวนลอยในระบบจากการทดลองช่วงที่ 1 โดยแบ่งความถี่ในการตรวจสอบเป็น 3 ช่วงคือ ก่อนการเดินระบบ ระหว่างการเดินระบบ และสิ้นสุดการเดินระบบโดยใช้เทคนิค Illumina MiSeq System ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการทดลองคือ

1) เก็บตัวอย่างจุลินทรีย์จากทั้งกลุ่มที่อยู่บนขั้วแอโนดและแขวนลอยในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ จากการทดลองช่วงที่ 1 ได้แก่ ตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น ตะกอนจุลินทรีย์ช่วงกระแสไฟฟ้าสูง (วันที่ 14 ของการทดลอง) ตะกอนจุลินทรีย์ช่วงปิดระบบ (วันที่ 96 ของการทดลอง) ตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่บนขั้วแอโนด วิธีเก็บตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่บนขั้วแอโนดทำโดยใช้น้ำกลั่นฉีดล้างขั้วแอโนดให้ biofilm ที่เกาะอยู่หลุดออกมา จากนั้นนำตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์จากขั้วแอโนด ตะกอนจากตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น ตะกอนจุลินทรีย์ช่วงกระแสไฟฟ้าสูง และตะกอนจุลินทรีย์ช่วงปิดระบบ มาเข้าเครื่องเหวี่ยง (centrifuge) เพื่อให้ตกตะกอนแล้วจึงเก็บสลัดจ์ที่ได้มาทำการสกัดดีเอ็นเอต่อไป

2) สกัดดีเอ็นเอจากตัวอย่างจุลินทรีย์ โดยใช้ชุดสกัดดีเอ็นเอ (The Fast DNA® SPIN Kit, MP) โดยทำตามขั้นตอนที่ระบุไว้ในคู่มือ

3) เพิ่มจำนวน 16S rRNA โดยใช้เทคนิค PCR เพื่อเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Illumina โดยใช้ไพรเมอร์ที่มีลำดับเบสดังนี้

Forward Primer: F515 (5'-CACGGTGCCKGCGGCCATT-3') Caporaso และคณะ (2011)

Reverse Primer: R806 (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') (Caporaso และคณะ, 2011)

ซึ่งเป็นไพรเมอร์สำหรับแบคทีเรียและอาร์เคีย (universal primers) และใช้สภาวะในการทำ PCR ดังนี้

| | | | |
|--------------------|-----------------|-----------|----------|
| Initial denaturing | 95 องศาเซลเซียส | 3 นาที | } 35 รอบ |
| Denaturing | 95 องศาเซลเซียส | 30 วินาที | |
| Annealing | 53 องศาเซลเซียส | 30 วินาที | |
| Extension | 72 องศาเซลเซียส | 30 วินาที | |
| Final extension | 72 องศาเซลเซียส | 5 นาที | |
| End | 4 องศาเซลเซียส | | |

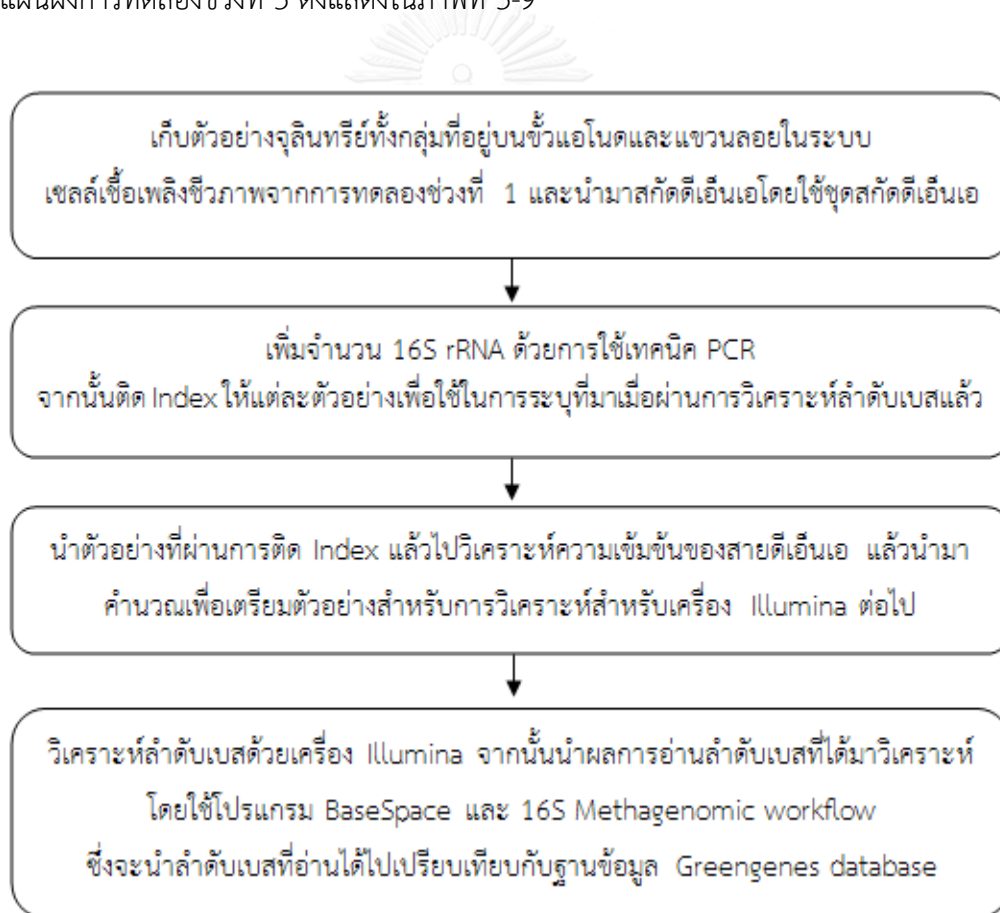
4) ติด Index เพื่อระบุตัวอย่างจุลินทรีย์ในขั้นตอนของการอ่านลำดับเบส โดยใช้ชุด Nextera XT Index Kit

5) นำตัวอย่างที่ผ่านการติด Index แล้วไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสายดีเอ็นเอ ด้วยเครื่อง Qubit® 2.0 Fluorometer (Life Technologies) นำมาคำนวณเพื่อเตรียมตัวอย่าง สำหรับการวิเคราะห์ โดยให้ความเข้มข้นสุดท้ายของดีเอ็นเอเท่ากับ 4 ng/μl

6) วิเคราะห์ลำดับเบสด้วยเครื่อง Illumina โดยภายในเครื่องมีการติดตั้ง MiSeq System

7) นำผลการอ่านลำดับเบสที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม BaseSpace และ 16S Methagenomic workflow (<https://basespace.illumina.com>) เพื่อวิเคราะห์หาชนิดของ จุลินทรีย์ที่พบในแต่ละตัวอย่าง โดยนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล Greengenes database (greengenes.secondgenome.com/downloads/database/13_5)

โดยแผนผังการทดลองช่วงที่ 3 ดังแสดงในภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3 - 9 แผนผังลำดับการทดลองช่วงที่ 3

บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองครั้งที่ 1 การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดและความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟตในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

การศึกษานี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดของสารอินทรีย์และซัลเฟต รวมถึงความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟตในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่มีการเติมตะกอนจุลินทรีย์สายพันธุ์ผสมเป็นหัวเชื้อในการเดินระบบปริมาณ 30% ของปริมาตรถัง ดำเนินการทดลองซ้ำจำนวน 2 ชุดการทดลอง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วยแลกเตทและซัลเฟต ในอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.6 ที่ระยะเวลาพักเก็บน้ำเท่ากับ 24 ชั่วโมง และมีอัตราการไหลเท่ากับ 2 ลิตร/วัน

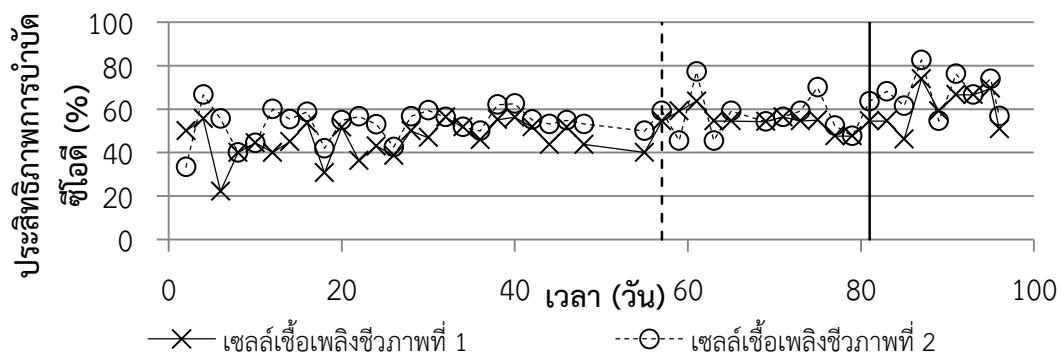
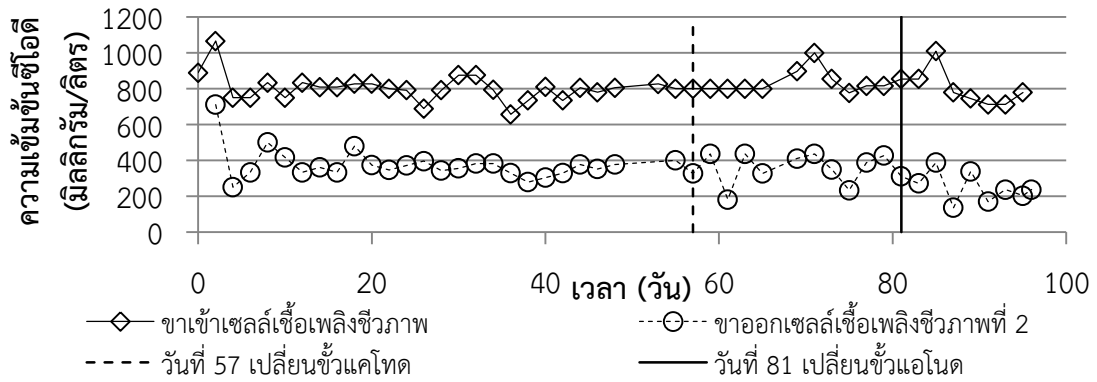
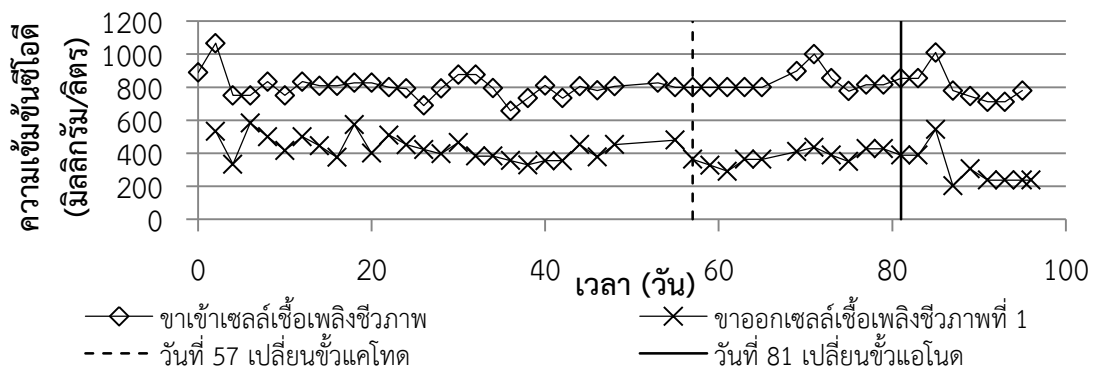
- ประสิทธิภาพการบำบัดของซีโอดี

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพพบว่า ซีโอดีสามารถถูกบำบัดได้ตั้งแต่ช่วงที่เริ่มเดินระบบ และมีแนวโน้มการบำบัดค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ยรวมตลอดทั้งการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 อยู่ที่ $51 \pm 9.88\%$ และ $57 \pm 10.09\%$ ตามลำดับ ซึ่งปริมาณซีโอดีที่ลดลงในระบบนี้มีค่าอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ผ่านมาที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดีอยู่ในช่วง 20-55% ดังแสดงในตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4 - 1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในงานวิจัยที่ผ่านมา

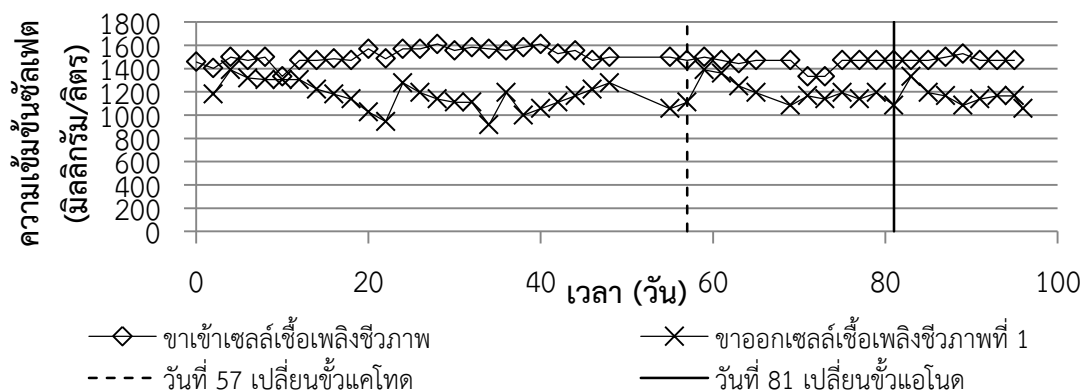
| ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีเฉลี่ย | เอกสารอ้างอิง |
|--------------------------------------|----------------------|
| 46% | Rabaey และคณะ (2006) |
| 54% | Zhang และคณะ (2009) |
| 40-50% | Zhang และคณะ (2010) |
| 24% | Zhang และ Ni (2010) |
| $51 \pm 9.88\%$ และ $57 \pm 10.09\%$ | งานวิจัยนี้ |

การลดลงของซีโอดีในระบบคาดว่าน่าจะเกิดจากกระบวนการซัลเฟตรีดักชันโดยจุลินทรีย์ โดยมีสารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนและซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน อย่างไรก็ตาม มีความเป็นไปได้เช่นกันที่สารอินทรีย์จะถูกออกซิไดซ์ที่ขั้วแอโนดโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่สามารถถ่ายเทอิเล็กตรอนให้แก่ขั้วได้ (exoelectrogenic microorganisms) ซึ่งกลไกการทำงานต่าง ๆ ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพจะนำเสนอและอภิปรายเพิ่มเติมในผลการทดลองช่วงที่ 2 ทั้งนี้ปริมาณที่ลดลงในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้งสองแสดงดังภาพที่ 4-1 และ 4-2 รวมถึงประสิทธิภาพการบำบัดของสารอินทรีย์ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้งสองแสดงดังภาพที่ 4-3

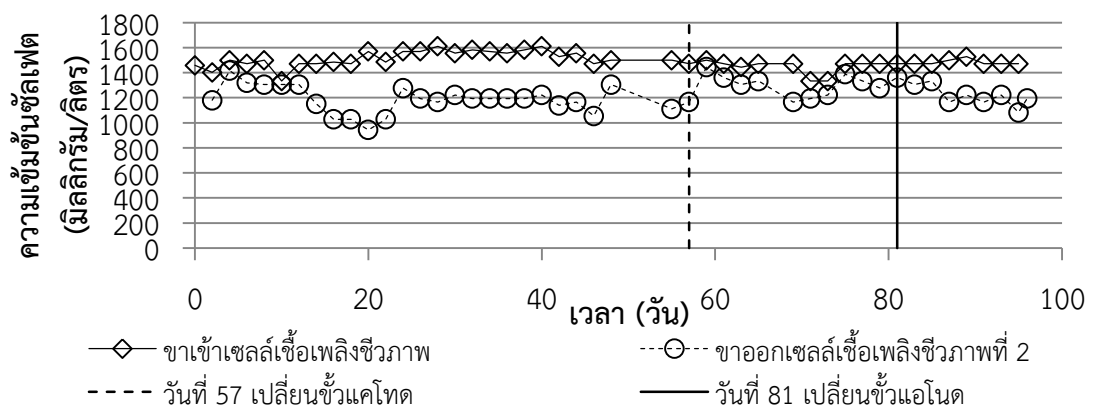


- ประสิทธิภาพการบำบัดของซัลเฟต

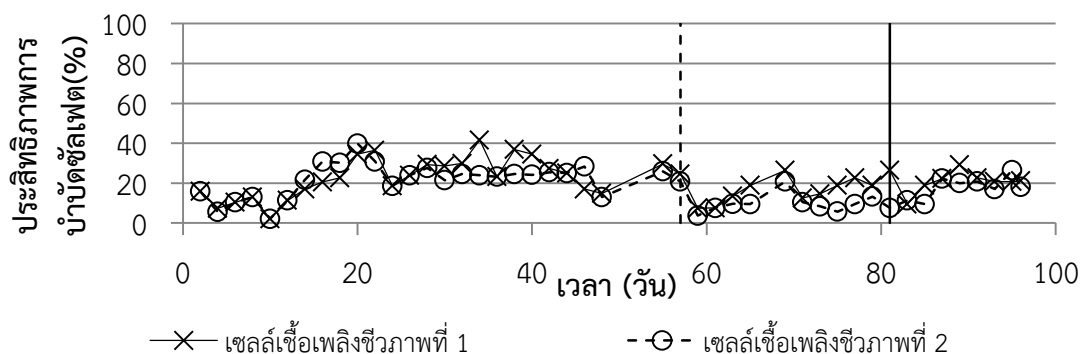
การลดลงของซัลเฟตในระบบเป็นผลมาจากกระบวนการซัลเฟตรีดักชันโดยกลุ่มแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ซึ่งสามารถใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน และเปลี่ยนซัลเฟตไปเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบ จากผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพพบว่า ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 มีประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ $21 \pm 9\%$ และ $18 \pm 9\%$ ตามลำดับ โดยในช่วงเริ่มต้นการเดินระบบสามารถบำบัดซัลเฟตได้น้อยมาก จากนั้นเมื่อเดินระบบอย่างต่อเนื่องไประยะหนึ่งพบว่า การบำบัดซัลเฟตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามยังถือได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้งสองมีประสิทธิภาพในการบำบัดซัลเฟตได้ต่ำเมื่อเทียบกับปริมาณซัลเฟตที่ใส่เข้าไป ปริมาณที่ลดลงของซัลเฟตในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 แสดงดังภาพที่ 4-4 และ 4-5 และประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้งสอง แสดงดังภาพที่ 4-6 ทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตในระบบมีค่าต่ำจะกล่าวถึงในหัวข้อ 4.2 4.3 และ 4.4 ต่อไป



ภาพที่ 4 - 4 ปริมาณซัลเฟตในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1



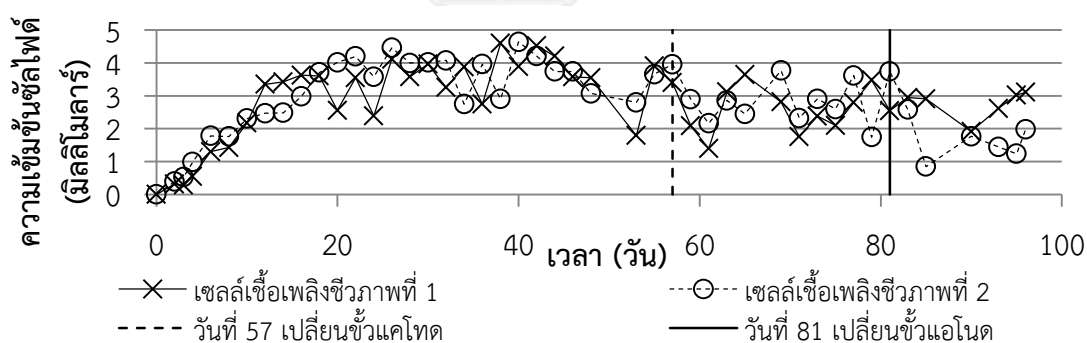
ภาพที่ 4 - 5 ปริมาณซัลเฟตในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2



ภาพที่ 4 - 6 ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้งสอง

- ความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

ในช่วงเริ่มต้นการเดินระบบนั้น ยังไม่ตรวจพบซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นทั้งในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 จากนั้นเมื่อเดินระบบอย่างต่อเนื่องพบว่าปริมาณซัลไฟด์มีแนวโน้มค่อยๆเพิ่มขึ้นในช่วง 20 วันแรกของการเดินระบบในทั้งสองเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ และเมื่อเดินระบบจนเข้าสู่สภาวะคงตัวแล้วพบว่า มีความเข้มข้นของซัลไฟด์เฉลี่ยใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.8 ± 1.13 และ 2.8 ± 1.17 มิลลิโมลาร์ (ประมาณ 95.2 มิลลิกรัม/ลิตร) ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นนี้สัมพันธ์กับปริมาณซัลเฟตที่ลดลง ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้งสอง แสดงดังภาพที่ 4-7

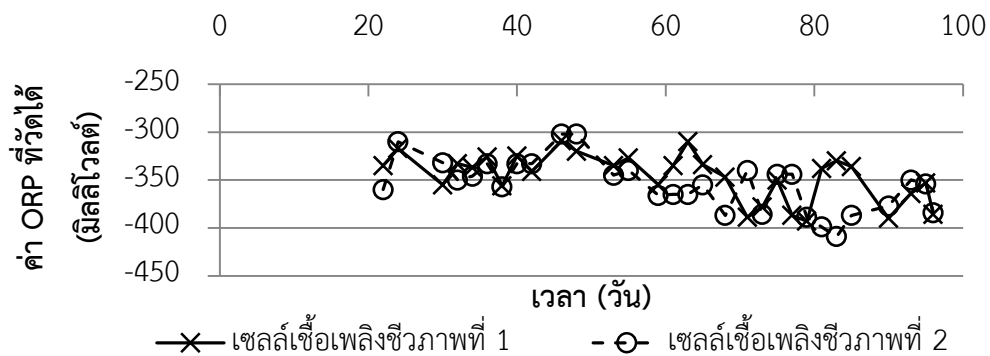


ภาพที่ 4 - 7 ความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้งสอง

อย่างไรก็ตาม ปริมาณซัลไฟด์ที่ตรวจวัดได้นั้นอาจมีค่าน้อยกว่าปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด เนื่องจากมีซัลไฟด์ส่วนหนึ่งนั้นอาจถูกออกซิไดซ์บนขั้วแอโนดโดยตรงและเปลี่ยนเป็นธาตุซัลเฟอร์เกาะติดบนบริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนด ดังจะสังเกตเห็นได้จากคราบขาวที่เกิดขึ้นบนขั้วแอโนด หรือซัลไฟด์บางส่วนอาจถูกออกซิไดซ์โดยจุลินทรีย์ที่เกาะติดเป็น biofilm บริเวณขั้วแอโนดได้ผลิตภัณฑ์กลับมาเป็นซัลเฟตในระบบ ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพดังได้รายงานในงานวิจัยที่ผ่านมา (Rabaey, et al. 2006; Zhao, et al. 2008) นอกจากนี้ที่ค่าพีเอชช่วง 6.9 - 7.5 ไฮโดรเจนซัลไฟด์ส่วนหนึ่งจะอยู่รูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งอาจหลุดออกนอกระบบได้บ้างส่วนหนึ่งด้วย

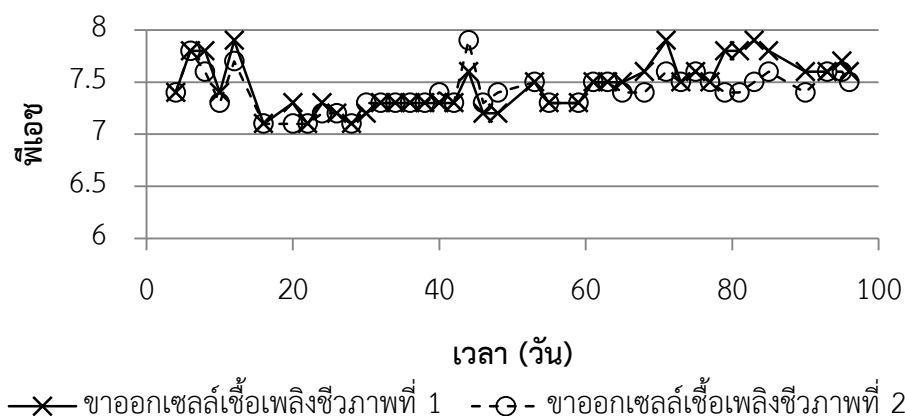
- ค่า ORP และพีเอชในการเดินระบบในการทดลองช่วงที่ 1

ค่า ORP ของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้งสองมีค่าติดลบตลอดการเดินระบบ ทั้งนี้ค่า ORP ที่ติดลบแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการให้อิเล็กตรอนในระบบ ยิ่งมีค่าติดลบมากแสดงว่าในระบบมีแนวโน้มที่จะให้อิเล็กตรอนมาก ดังนั้นในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 ที่มีค่า ORP ติดลบในตลอดการทดลองนั้นอาจเป็นไปได้จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายใน เช่น จากกลไกการบำบัดชีโอดีโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ซึ่งผลของค่า ORP ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 ดังแสดงในภาพที่ 4-8



ภาพที่ 4 - 8 ค่า ORP ที่วัดได้จากการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2

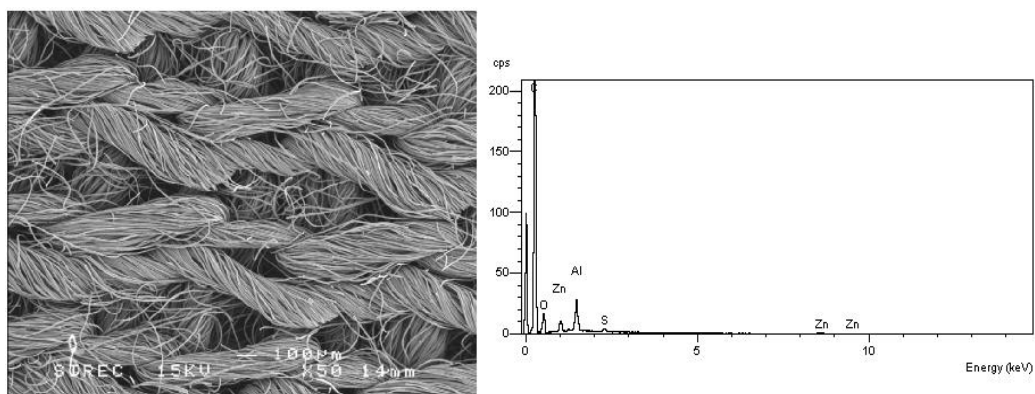
ค่าพีเอชของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้งสองอยู่ในช่วง 7 - 8 ซึ่งมีสภาวะค่อนข้างเป็นกลาง ส่งผลให้รูปแบบของซัลไฟด์ที่พบในระบบน่าจะอยู่ในรูป HS^- เป็นหลัก ซึ่งผลของค่าพีเอชที่วัดได้จากเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 ดังแสดงในภาพที่ 4-9



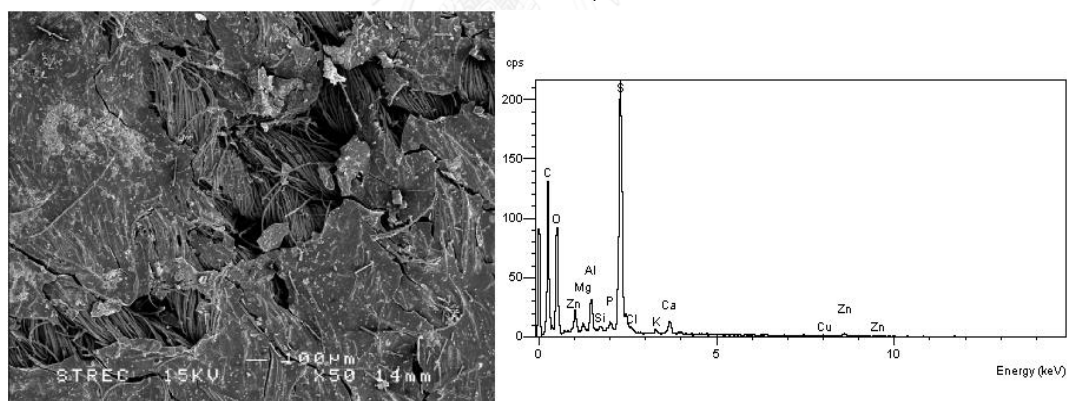
ภาพที่ 4 - 9 ค่าพีเอชที่วัดได้จากการเดินระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2

- ลักษณะพื้นผิวและชนิดของธาตุที่พบบนพื้นผิวของข้าวแอนด

วิเคราะห์ผลโดยใช้เครื่องมือ SEM-EDX ซึ่งสามารถถ่ายภาพขยายของพื้นผิวข้าวแอนด รวมถึงทราบชนิดของธาตุที่พบบนพื้นผิวของข้าวแอนด ผลการวิเคราะห์พบว่า ข้าวแอนดของการทดลองในช่วงที่ 1 มีคราบที่มีลักษณะเป็นของแข็งเกาะอุดตันที่ผิวหน้าของข้าวแอนด และเมื่อวิเคราะห์ธาตุที่พบแล้วพบว่า มีปริมาณซัลเฟอร์สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวแอนดเริ่มต้นทั้งหมด โดยสังเกตได้จากกราฟแสดงชนิดของธาตุที่ตรวจพบบนพื้นผิวของข้าวแอนด ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4-10 และ 4-11



ภาพที่ 4 - 10 ลักษณะพื้นผิวและชนิดของธาตุที่พบบนพื้นผิวของข้าวแอนดเริ่มต้น

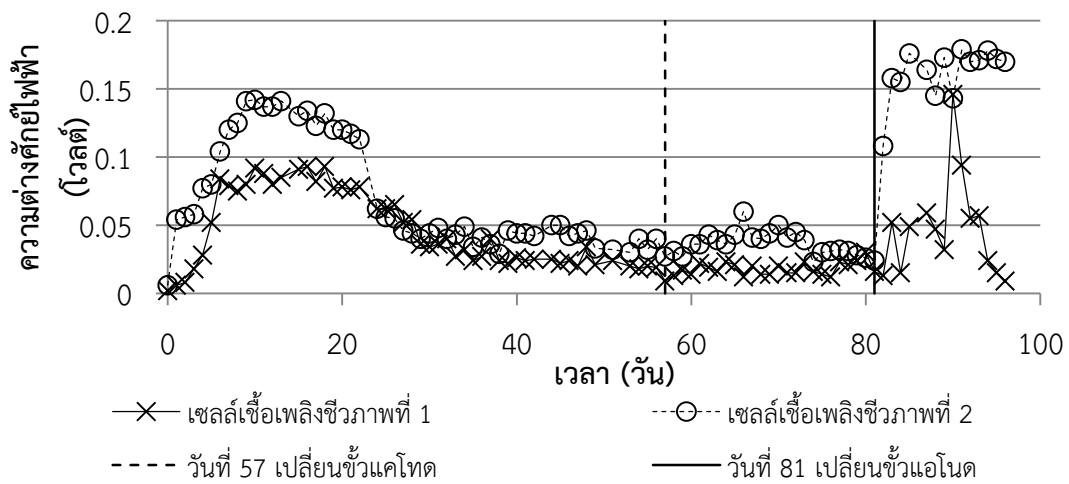


ภาพที่ 4 - 11 ลักษณะพื้นผิวและชนิดของธาตุที่พบบนพื้นผิวของข้าวแอนดหลังการทดลอง

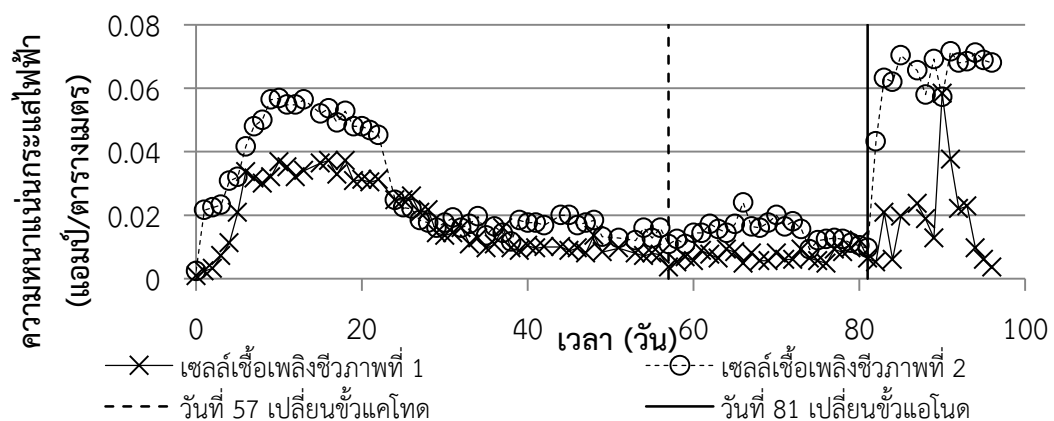
จากลักษณะพื้นผิวของข้าวแอนด เมื่อเปรียบเทียบระหว่างข้าวแอนดเริ่มต้นและข้าวแอนดหลังการทดลองแล้ว คาดว่าจะส่งผลโดยตรงกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ เนื่องจากคราบที่เกาะบริเวณพื้นผิวของข้าวแอนดทำให้ปฏิกิริยาที่บริเวณพื้นผิวเกิดได้ไม่เต็มที่เพราะถูกบดบังพื้นที่ผิว และธาตุซัลเฟอร์ไม่มีสมบัติการนำไฟฟ้า (จากภาพที่ 4-10 ที่พบว่าปริมาณธาตุซัลเฟอร์ที่ตรวจวัดได้เพิ่มขึ้น) ดังนั้นการที่มีการสะสมตัวของซัลเฟอร์จึงส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของข้าวแอนด ดังจะแสดงให้เห็นจากค่าความต่างศักย์และความหนาแน่นไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพต่อไป

- ค่าความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ทำการวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยใช้เครื่องมัลติมิเตอร์ และมีการต่อตัวต้านทานไฟฟ้าภายนอกขนาด 1000 Ω ตลอดการเดินระบบ ส่วนการวัดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าทำโดยนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มาคำนวณต่อพื้นที่ขั้วแคโทดซึ่งมีขนาดพื้นที่ขั้วน้อยกว่าขั้วแอโนด ซึ่งในการทดลองนี้ขั้วแคโทดมีขนาดพื้นที่ 25 ตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ได้มีการเปลี่ยนขั้วแคโทดและแอโนดในวันที่ 57 และ วันที่ 81 ของการทดลอง ตามลำดับ เนื่องจากต้องการตรวจสอบผลกระทบจากการเสื่อมสภาพของขั้วแคโทดและขั้วแอโนดต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพนี้ในแง่ของประสิทธิภาพการนำอิเล็กตรอนที่ลดลง ค่าของความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ แสดงดังภาพที่ 4-12 และ 4-13 ตามลำดับ



ภาพที่ 4 - 12 ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลอง



ภาพที่ 4 - 13 ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลอง

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความต่างศักย์ของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 โดยรวมนั้นสูงกว่าในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ตลอดการทดลอง เมื่อเริ่มเดินระบบความต่างศักย์ไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในสัปดาห์แรกและค่อนข้างคงที่ต่ออีกประมาณสองสัปดาห์ โดยค่าความต่างศักย์สูงสุดอยู่ที่ 0.093 โวลต์ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 0.142 โวลต์ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 จากนั้นก็ลดลงจนเข้าสู่สภาวะคงที่เป็นระยะเวลาประมาณ 8 สัปดาห์ แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนขั้วแคโทดในวันที่ 57 ของการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนขั้วแคโทดใหม่ไม่ได้ช่วยเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าขึ้นในระบบแต่อย่างใด ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในช่วงคงที่นี้ (วันที่ 25 – 80 ของการทดลอง) อยู่ที่ 0.025 ± 0.012 โวลต์ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 0.040 ± 0.008 โวลต์ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2

อย่างไรก็ตามค่าความต่างศักย์ไฟฟ้ากลับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากเปลี่ยนขั้วแอโนดในวันที่ 81 ของการทดลอง โดยพบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมากในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 แต่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 อย่างไรก็ตามในภายหลังพบว่าได้เกิดปัญหาไฟฟ้าลัดวงจรในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ดังจะแสดงในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่อไป และเมื่อได้แก้ไขปัญหาดังกล่าวแล้วพบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 นั้นดีดกลับสูงขึ้นเกือบใกล้เคียงกับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 แต่ภายหลังจากนั้นไม่นานค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ก็กลับลดลงอีกครั้ง ค่าความต่างศักย์สูงสุดที่วัดได้ภายหลังจากเปลี่ยนขั้วแอโนดคือ 0.146 และ 0.179 โวลต์ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

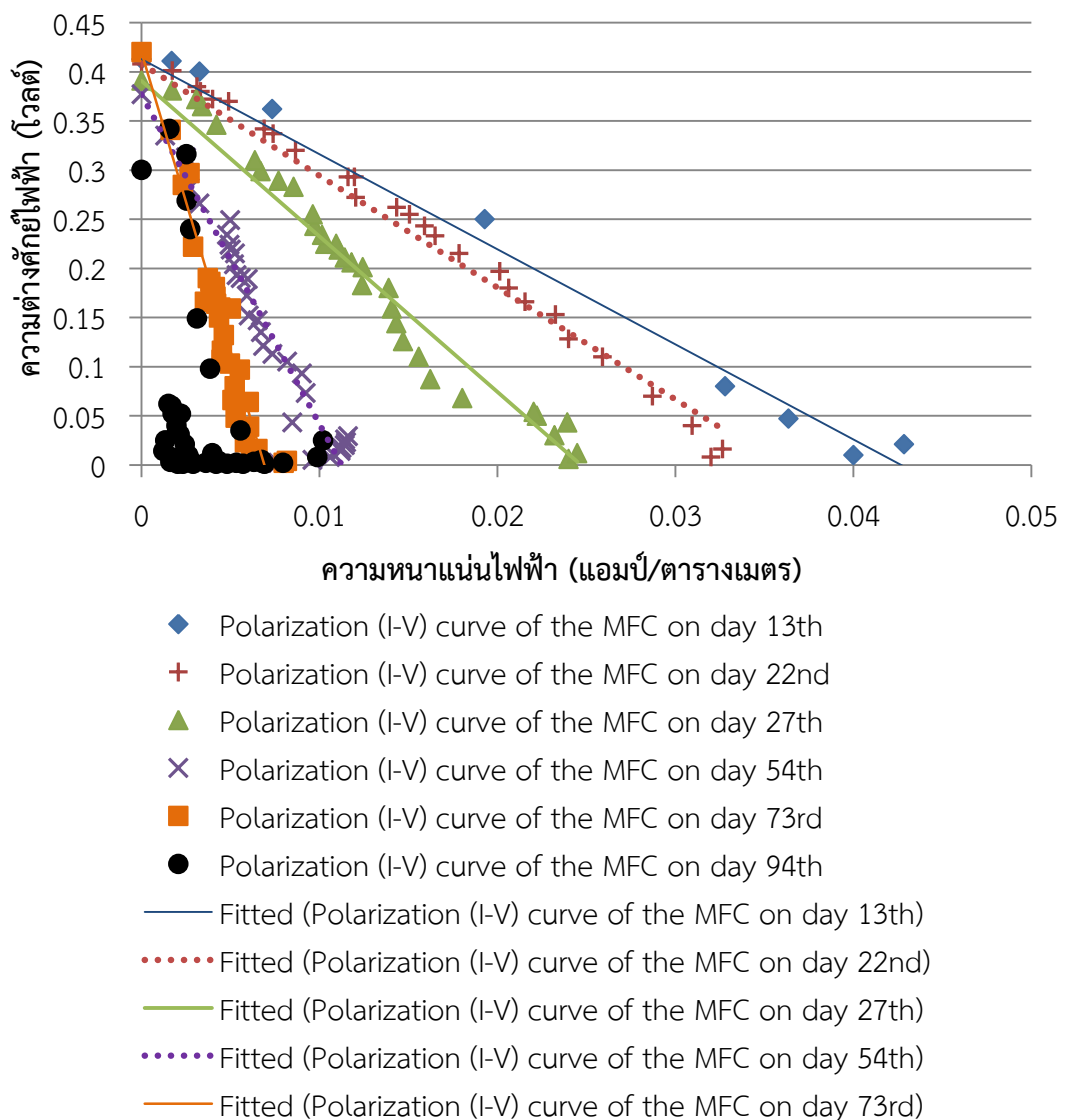
เนื่องจากเกิดปัญหาไฟฟ้าลัดวงจรในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ดังที่กล่าวมา การทดลองในช่วงที่ 2 เพื่อศึกษาหลักการการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพจึงเลือกศึกษาเฉพาะในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 เท่านั้น

ส่วนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้นั้นมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยในช่วงแรกของการเดินระบบมีค่าความหนาแน่นไฟฟ้าสูงสุดคือ 0.0372 แอมป์/ตารางเมตร และ 0.0568 แอมป์/ตารางเมตร ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ จากนั้นในช่วงที่ค่าทางไฟฟ้าอยู่ในสภาวะคงที่พบว่า ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.010 ± 0.0048 แอมป์/ตารางเมตร ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 0.0158 ± 0.0033 แอมป์/ตารางเมตร ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 หลังจากที่ได้เปลี่ยนขั้วแอโนดแล้วพบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้านี้มีค่าสูงสุดคือ 0.0584 แอมป์/ตารางเมตร และ 0.0716 แอมป์/ตารางเมตร ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

- ประสิทธิภาพการเกิดกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

1) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

จากข้อมูลการวิเคราะห์ค่าทางไฟฟ้าของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพสามารถนำมาจัดทำกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าได้ดังภาพที่ 4-14 และตารางที่ 4-2 สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และภาพที่ 4-15 และตารางที่ 4-3 สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 การจัดทำกราฟดังกล่าวสามารถช่วยวิเคราะห์ลักษณะของการสูญเสียของความต่างศักย์ไฟฟ้า (voltage loss) ในระบบ ซึ่งจะช่วยอธิบายถึงสาเหตุของการเสื่อมสภาพระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

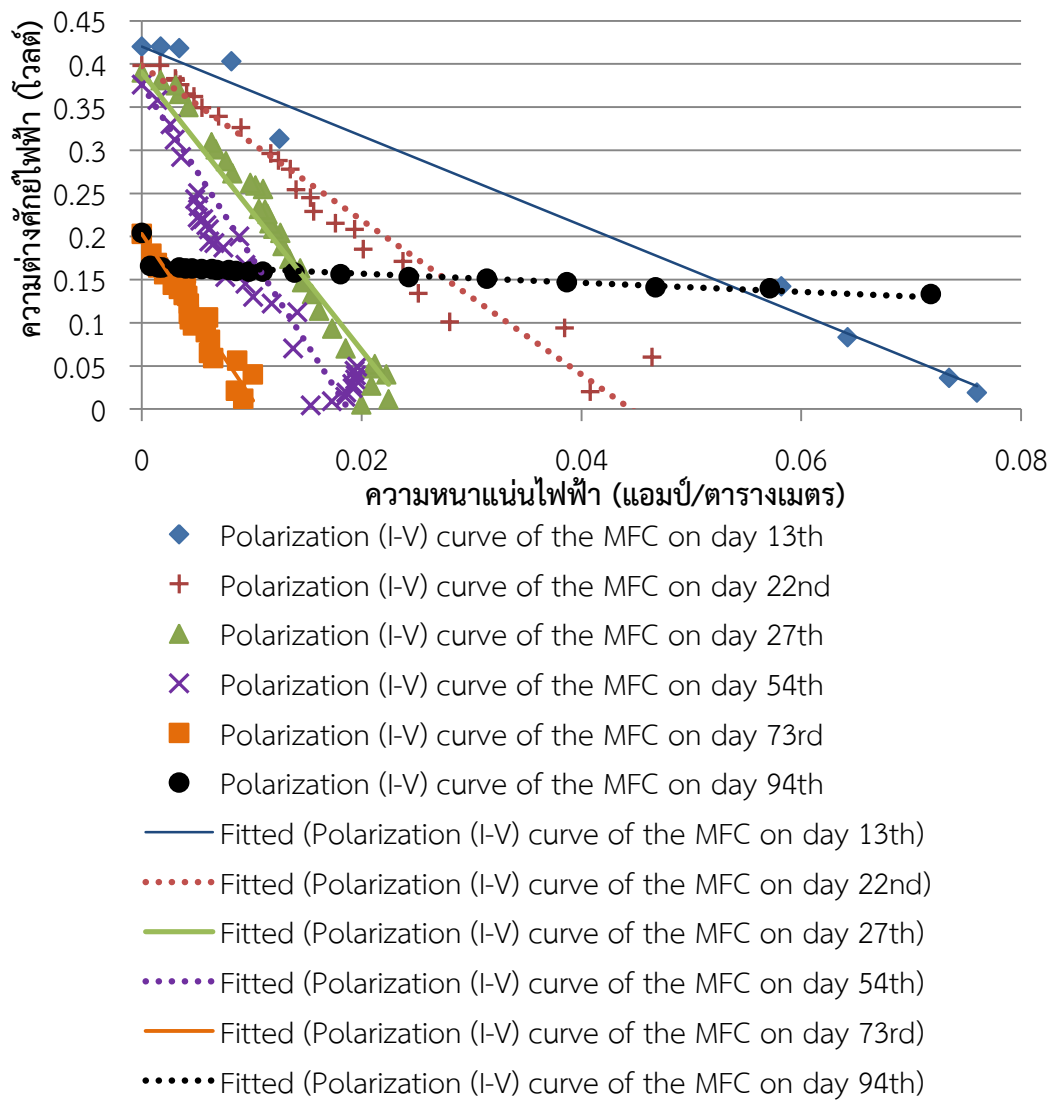


ภาพที่ 4 - 14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ในการทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94

ตารางที่ 4 - 2 สรุปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของ เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ในการทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94

| วันที่ทำการทดลอง | 13 | 22 | 27 | 54 | 73 | 94 |
|---|-------|-------|-------|--------|--------|------|
| Fitted equation | | | | | | |
| (1) $V = V_{OCV} - (a + b \log j + jR)$ | (2) | (2) | (2) | (2) | (2) | - |
| (2) $V = V_{OCV} - jR$ | | | | | | |
| Open circuit voltage, V_{OCV} (โวลต์) | 0.413 | 0.408 | 0.391 | 0.377 | 0.42 | 0.30 |
| ความต้านทานภายใน (โอห์ม*ตารางเมตร) | 9.68 | 11.4 | 15.8 | 33.5 | 60.8 | - |
| ความต้านทานภายในรวม (โอห์ม) | 3,944 | 4,560 | 6,320 | 13,400 | 24,320 | - |
| a และ b | - | - | - | - | - | - |
| R^2 หรือ r^2 | 0.989 | 0.985 | 0.969 | 0.925 | 0.905 | - |

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าพบว่า สาเหตุหลักของการเสื่อมสภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 เกิดจาก ohmic losses เพียงอย่างเดียว ดังนั้นจึงเลือกใช้ fitted equation คือ สมการที่ (2) $V = V_{OCV} - jR$ โดยทำการวัดค่า V_{OCV} เมื่อวงจรเปิด ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ทั้งนี้ค่าความต้านทานภายในของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาในการเดินระบบ ซึ่งคาดว่าเกิดจากการสะสมตัวของ ซัลเฟอไรบน ขั้วแอโนด ส่งผลให้การนำไฟฟ้าของขั้วลดลงและความต้านทานรวมของระบบเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ในวันที่ 94 ของการทดลอง หลังจากเปลี่ยนขั้วแอโนดคาดว่าเกิดการลัดวงจรในระบบ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจึงมีค่าต่ำกว่าปกติ ดังนั้น I-V Curve ที่ได้ จึงไม่สามารถนำมาแปลผลข้อมูลได้



ภาพที่ 4 - 15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94

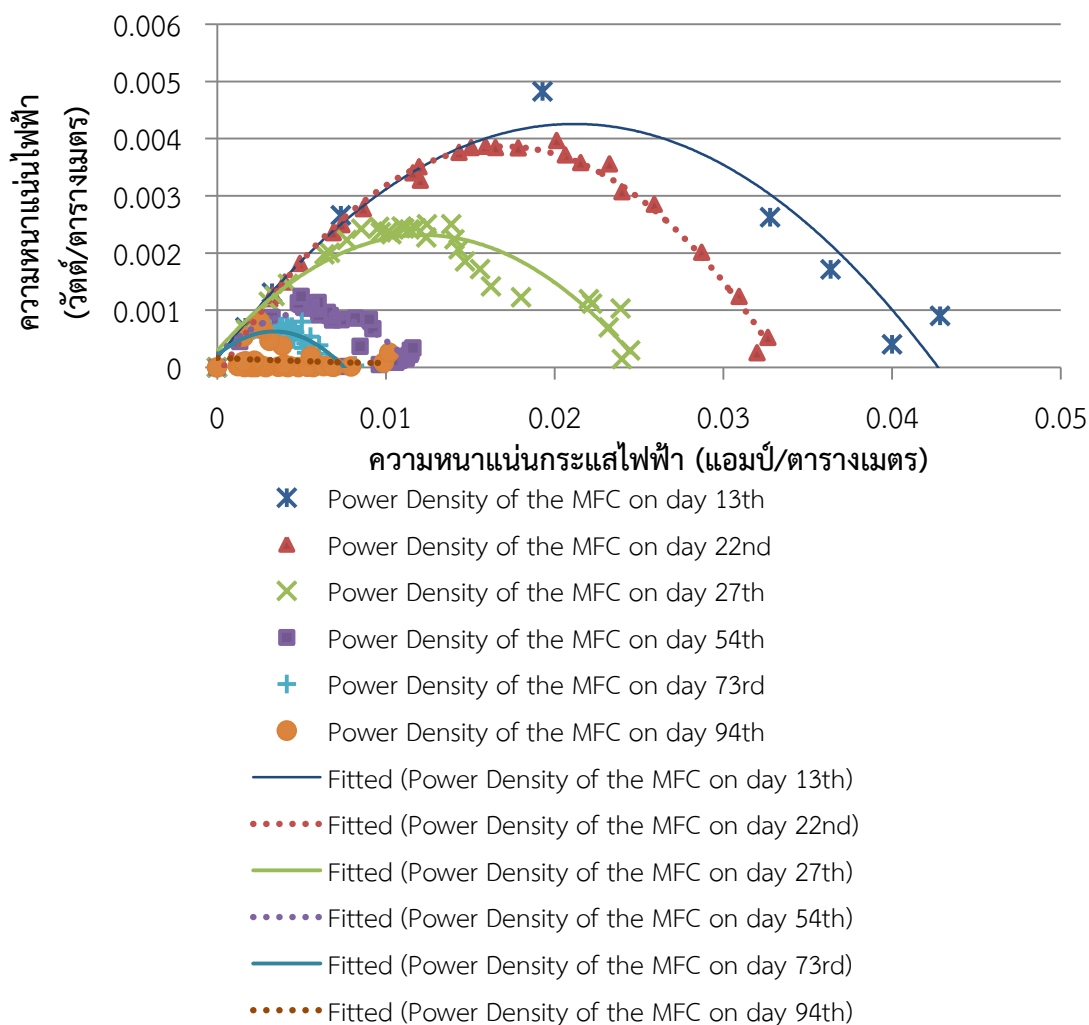
ตารางที่ 4 - 3 สรุปกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94

| วันที่ทำการทดลอง | 13 | 22 | 27 | 54 | 73 | 94 |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------------------------|
| Fitted equation (1) $V = V_{OCV} - (a + b \log j + jR)$ (2) $V = V_{OCV} - jR$ | (2) | (2) | (2) | (2) | (2) | (1) |
| Open circuit voltage, V_{OCV} (โวลต์) | 0.420 | 0.398 | 0.390 | 0.376 | 0.203 | 0.204 |
| ความต้านทานภายใน (โอห์ม*ตารางเมตร) | 5.18 | 8.95 | 16.1 | 20.0 | 19.1 | 0.529 |
| ความต้านทานภายในรวม (โอห์ม) | 2,072 | 3,580 | 6,440 | 8,000 | 7,640 | 211.6 |
| a และ b | - | - | - | - | - | 0.0364 และ 0.0002 |
| R^2 หรือ r^2 | 0.987 | 0.949 | 0.959 | 0.864 | 0.915 | 0.625 |

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 พบว่า สาเหตุของการเสื่อมสภาพของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 เกิดจากทั้ง activation losses และ ohmic losses ดังนั้นสมการที่นำมาใช้ fitted equation จึงมี 2 สมการคือ (1) $V = V_{OCV} - (a + b \log |j| + jR)$ และ (2) $V = V_{OCV} - jR$ ซึ่งค่า V_{OCV} ที่วัดได้จากการทดลองนั้นมีค่าลดลงหลังจากเปลี่ยนขั้วแคโทดในวันที่ 57 ของการทดลอง ซึ่งอาจเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของขั้วแคโทดที่นำมาเปลี่ยน ในขณะที่ค่าความต้านทานภายในเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเดินระบบ แต่เมื่อมีการเปลี่ยนขั้วแอโนดพบว่า ค่าความต้านทานภายในในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ลดลงอย่างชัดเจน ทั้งนี้สอดคล้องกับสมมติฐานคือ ซัลเฟอร์ที่สะสมบนขั้วแอโนดส่งผลให้ความต้านทานภายในระบบสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนขั้วแอโนดจึงทำให้ค่าความต้านทานภายในระบบลดลง

2) ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า

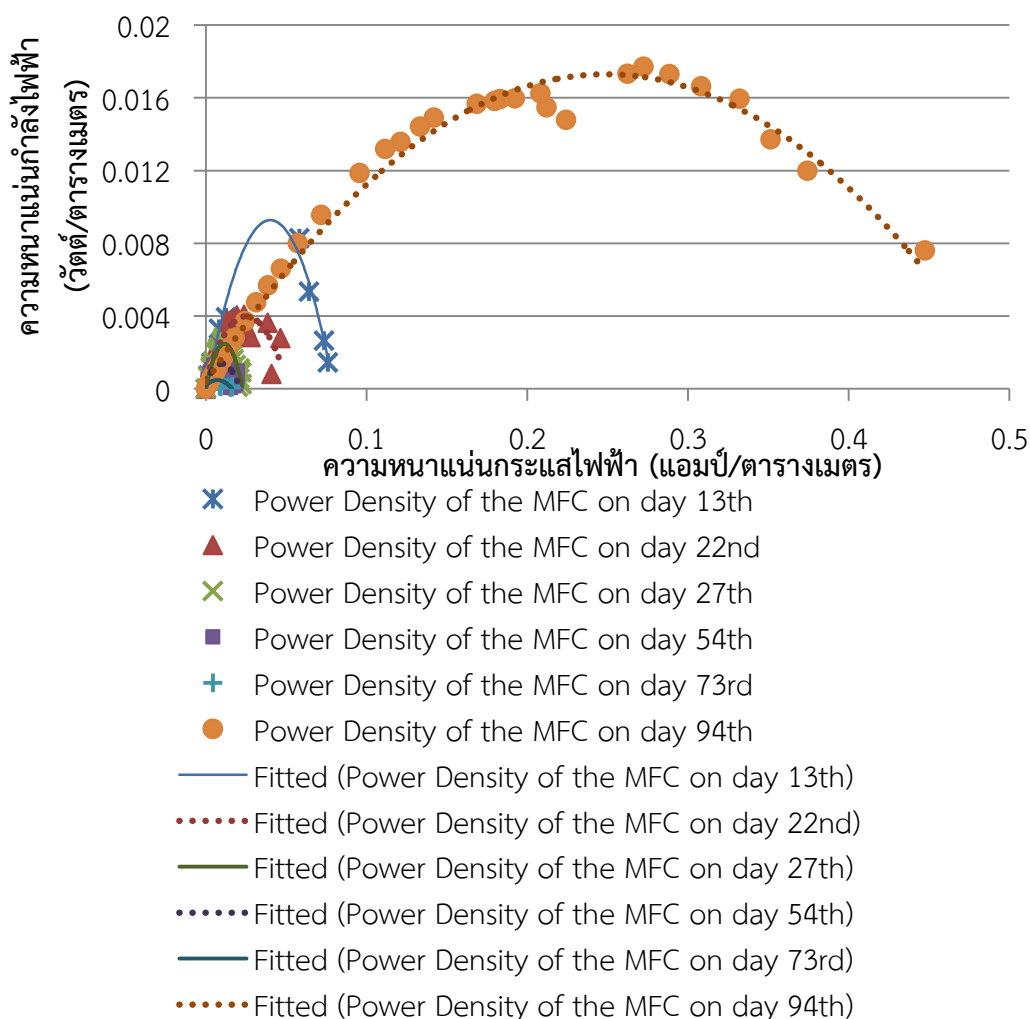
กราฟความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าจัดทำโดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เพื่อนำมาหาค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพดังแสดงในภาพที่ 4-16 และ 4-17 และสรุปค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดในตารางที่ 4-4 และ 4-5



ภาพที่ 4 - 16 กราฟความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ที่คำนวณได้จากการทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94

ตารางที่ 4 - 4 สรุปค่าความหนาแน่นไฟฟ้าสูงสุดและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ที่คำนวณได้จากการทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94

| วันที่ทำการทดลอง | ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด (วัตต์/ตารางเมตร) | ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด (แอมป์/ตารางเมตร) |
|------------------|--|--|
| 13 | 0.0043 | 0.021 |
| 22 | 0.0038 | 0.017 |
| 27 | 0.0023 | 0.012 |
| 54 | 0.00095 | 0.0055 |
| 73 | 0.00062 | 0.0034 |
| 94 | 0.00091 | 0.016 |



ภาพที่ 4 - 17 กราฟความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ที่คำนวณได้จากการทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94

ตารางที่ 4 - 5 สรุปค่าความหนาแน่นไฟฟ้าสูงสุดและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ที่คำนวณได้จากการทดลองวันที่ 13 22 27 54 73 และ 94

| วันที่ทำการทดลอง | ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด (วัตต์/ตารางเมตร) | ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุด (แอมป์/ตารางเมตร) |
|------------------|--|--|
| 13 | 0.0093 | 0.040 |
| 22 | 0.0040 | 0.025 |
| 27 | 0.0025 | 0.011 |
| 54 | 0.0014 | 0.0099 |
| 73 | 0.00047 | 0.0071 |
| 94 | 0.017 | 0.25 |

ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดและความหนาแน่นไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 มีค่าสูงสุด 0.0043 วัตต์/ตารางเมตร และ 0.021 แอมป์/ตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้จากการทดลองวันที่ 13 ส่วนความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดและความหนาแน่นไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 มีค่าสูงสุด 0.017 วัตต์/ตารางเมตร และ 0.25 แอมป์/ตารางเมตร ตามลำดับ ซึ่งคำนวณได้จากการทดลองวันที่ 94

จากค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดและความหนาแน่นไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 นั้นมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ ทั้งนี้เนื่องจากการเสื่อมสภาพของขั้วแคโทดและแอโนดในระหว่างการเดินระบบ แม้จะมีการเปลี่ยนขั้วแคโทดในวันที่ 57 ของการทดลอง แต่ปริมาณซัลเฟอร์ที่เกาะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการทดลองบริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนดก็ยังส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการนำกระแสไฟฟ้าอยู่ ดังนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนขั้วแอโนดในวันที่ 81 ของการทดลอง พบว่าการนำกระแสไฟฟ้าเกิดได้ดีขึ้น แต่เมื่อคำนวณค่าความหนาแน่นไฟฟ้าออกมาแล้วพบว่าค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าไม่เพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลจากความไม่สมบูรณ์ของขั้วไฟฟ้าที่นำมาเปลี่ยนหรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีภายในระบบที่ส่งผลกับการเกิดกระแสไฟฟ้า

ส่วนในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 นั้นพบว่า ในการทดลองก่อนที่จะมีการเปลี่ยนขั้วแอโนด ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ามีค่าลดลงตามระยะเวลาของการเดินระบบ คาดว่าเกิดจากสาเหตุเดียวกันกับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 คือ การอุดตันของพื้นที่ผิวของขั้วแอโนดโดยซัลเฟอร์ ทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของขั้ว การนำไฟฟ้าเกิดได้น้อยลง แต่เมื่อเปลี่ยนขั้วแอโนดในวันที่ 81 ของการทดลองแล้วพบว่า ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นอย่างชัดเจน และมีค่าสูงที่สุดในการทดลองของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ขั้วแอโนดมีผลโดยตรงกับการเกิดกระแสไฟฟ้าของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าโดยทั่วไปเป็นการบอกถึงกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ในระบบต่อพื้นที่ผิวที่เกิดปฏิกิริยา โดยในที่นี้จะคิดต่อพื้นที่ของขั้วแคโทดเนื่องจากมีขนาดเล็กกว่าขั้วแอโนด ซึ่งค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าที่คำนวณนี้จะสามารถนำไปเปรียบเทียบกับระบบอื่นที่แตกต่างกันได้ ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพนั้นจะถูกจำกัดด้วยค่าความต้านทานภายในระบบและการสูญเสียพลังงานไปกับขั้วไฟฟ้า ซึ่งในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพทั้งสองนี้พบว่ามีค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากค่าความต้านทานภายในรวมของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพนี้มีค่าค่อนข้างสูง ทำให้ยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนา ปรับปรุง และขยายขนาด (scale-up) ต่อไป

4.2 ผลการทดลองช่วงที่ 2 การศึกษาบทบาทและกลไกการทำงานของจุลินทรีย์ที่แขวนลอยในระบบและจุลินทรีย์ที่อยู่บนขั้วแอโนด

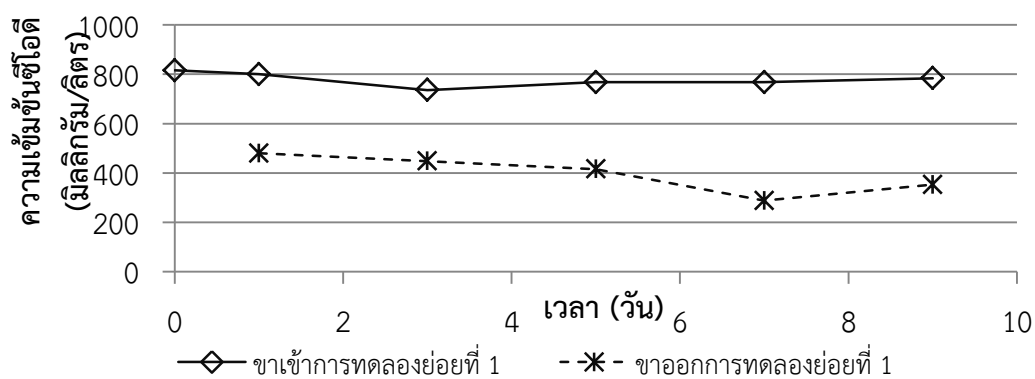
การทดลองในช่วงนี้ได้เลือกเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 เพื่อมาใช้ในการศึกษาบทบาทและกลไกการทำงานของจุลินทรีย์ที่แขวนลอยในระบบและที่อยู่บนขั้วแอโนด ดำเนินการทดลองในระยะสั้นประมาณ 10 วัน เพื่อให้ทราบถึงกลไกที่เกิดขึ้นในระบบในช่วงการทดลองที่ 1 ก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ โดยแบ่งการทดลองย่อยออกเป็น 3 ชุดการทดลอง เติมน้ำอย่างต่อเนืองที่ระยะเวลาที่เก็บน้ำเท่ากับ 24 ชั่วโมง และมีอัตราการไหลเท่ากับ 2 ลิตร/วัน ต่อตัวต้านทานไฟฟ้าภายนอกขนาด 1000 Ω รวมถึงเก็บตัวอย่างน้ำและวัดค่าทางไฟฟ้าตลอดการเดินระบบ จากนั้นจึงนำขั้วแอโนดที่ผ่านการทดลองแล้วมาตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและธาตุที่พบบนพื้นผิวของขั้วแอโนดโดยใช้เครื่องมือ SEM-EDX

4.2.1 ผลของการทดลองย่อยชุดที่ (1)

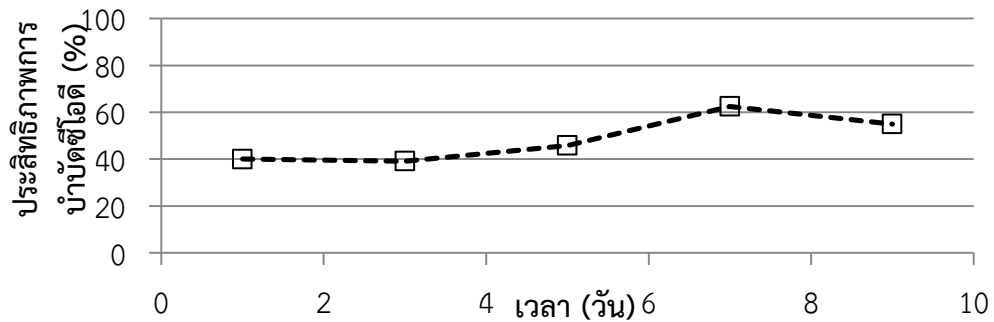
ดำเนินการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ลักษณะเดิม ที่มีค่าซีโอดีขาเข้าประมาณ 800 มิลลิกรัม/ลิตร และมีตะกอนจุลินทรีย์จากการทดลองช่วงที่ 1 แต่เปลี่ยนขั้วแอโนดและแคโทดใหม่เพื่อศึกษาบทบาทการทำงานของตะกอนจุลินทรีย์ในการบำบัดสารปนเปื้อนและความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้า ผลการทดลองเป็นดังนี้

- ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดซีโอดีของการทดลองย่อยชุดที่ 1 พบว่า มีความเข้มข้นเฉลี่ยของซีโอดีขาออกอยู่ที่ประมาณ 397 ± 77 มิลลิกรัม/ลิตร โดยสามารถคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีได้อยู่ที่ประมาณ $48 \pm 10\%$ ความเข้มข้นและประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในการทดลองย่อยชุดที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 4-18 และ 4-19 ตามลำดับ



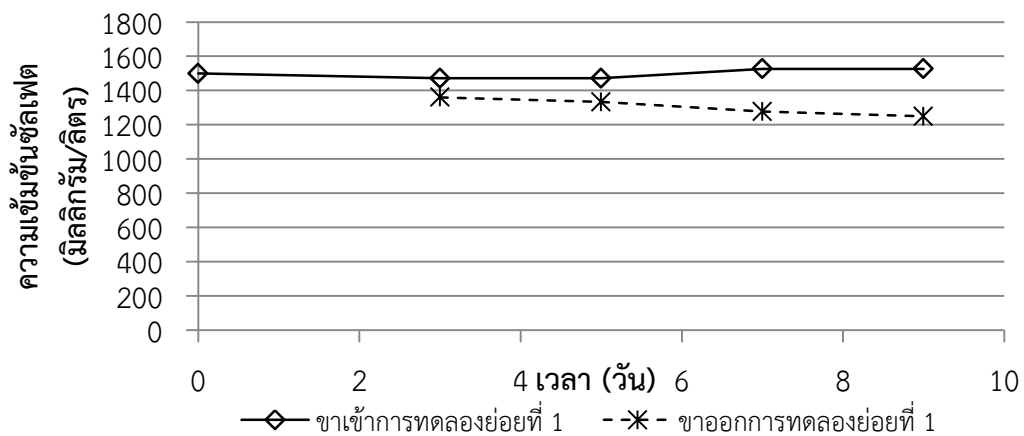
ภาพที่ 4 - 18 ความเข้มข้นของซีโอดีในการทดลองย่อยชุดที่ (1)



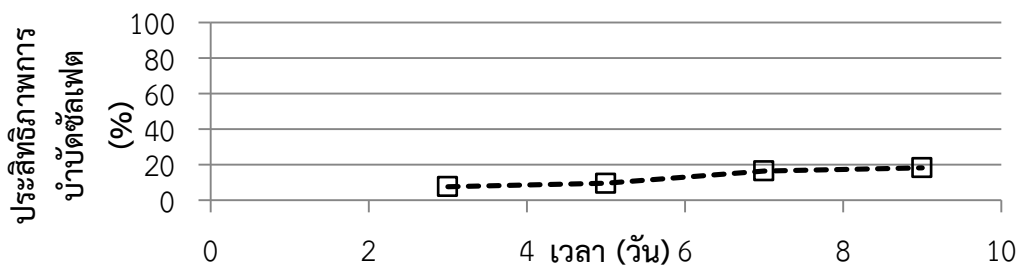
ภาพที่ 4 - 19 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของการทดลองย่อยชุดที่ (1)

- ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดซัลเฟตของการทดลองย่อยชุดที่ 1 พบว่า มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของซัลเฟตขาออกอยู่ที่ประมาณ $1,305 \pm 51$ มิลลิกรัม/ลิตร โดยสามารถคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตได้อยู่ที่ประมาณ $13 \pm 5\%$ ความเข้มข้นและประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตในการทดลองย่อยชุดที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 4-20 และ 4-21 ตามลำดับ



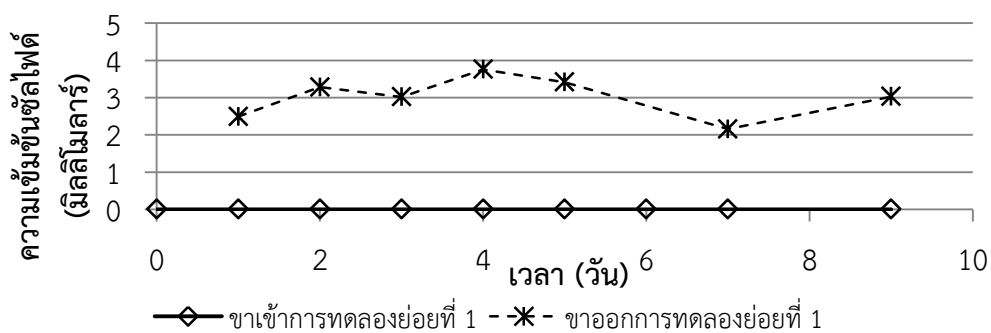
ภาพที่ 4 - 20 ความเข้มข้นของซัลเฟตในการทดลองย่อยชุดที่ (1)



ภาพที่ 4 - 21 ประสิทธิภาพของการบำบัดซัลเฟตของการทดลองย่อยชุดที่ (1)

- ปริมาณที่เกิดขึ้นของซัลไฟด์

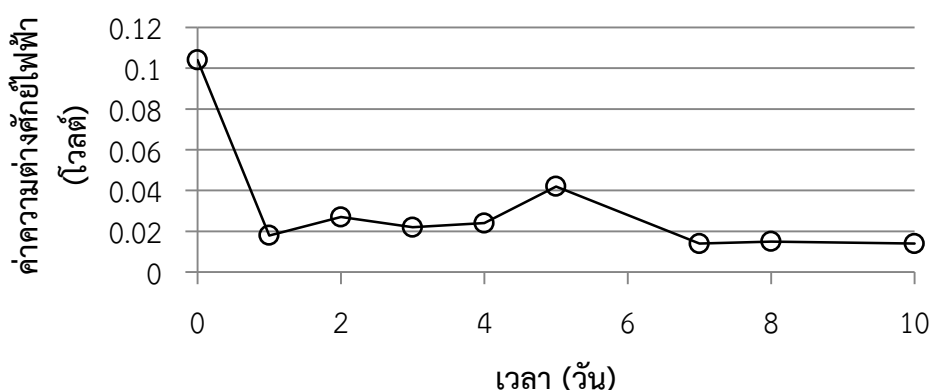
ผลการวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในการทดลองย่อยชุดที่ 1 พบว่า มีความเข้มข้นของซัลไฟด์เฉลี่ยอยู่ที่ 3.02 ± 0.55 มิลลิโมลาร์ (ประมาณ 102 มิลลิกรัม/ลิตร) ดังแสดงในภาพที่ 4-22



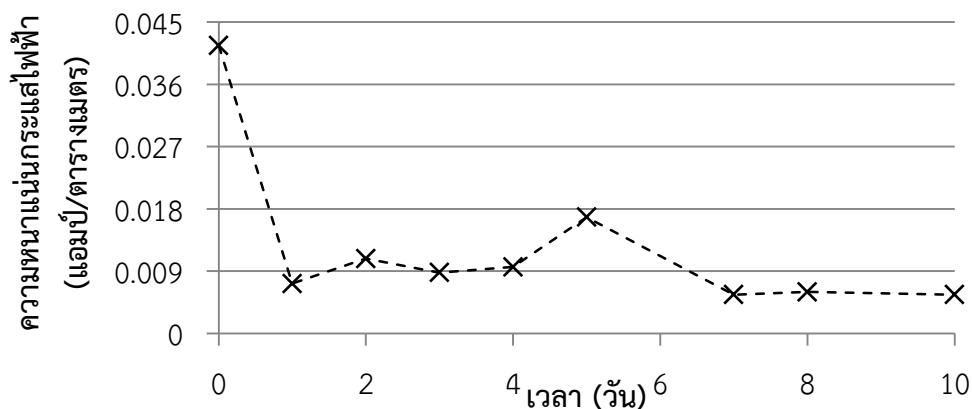
ภาพที่ 4 - 22 ปริมาณของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในการทดลองย่อยชุดที่ (1)

- ค่าความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเมื่อเริ่มเดินระบบมีค่าอยู่ที่ 0.104 โวลต์ หลังจากนั้นค่าความต่างศักย์ไฟฟาลดลงอย่างรวดเร็ว มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.022 ± 0.009 โวลต์ ส่วนค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเริ่มต้นการเดินระบบมีค่าอยู่ที่ 0.0416 แอมป์/ตารางเมตร แต่เมื่อเดินระบบต่อเนื่องแล้ว ค่าความหนาแน่นไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.009 ± 0.004 แอมป์/ตารางเมตร ซึ่งค่าความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้แสดงในภาพที่ 4-23 และ 4-24 ตามลำดับ



ภาพที่ 4 - 23 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองย่อยชุดที่ (1)



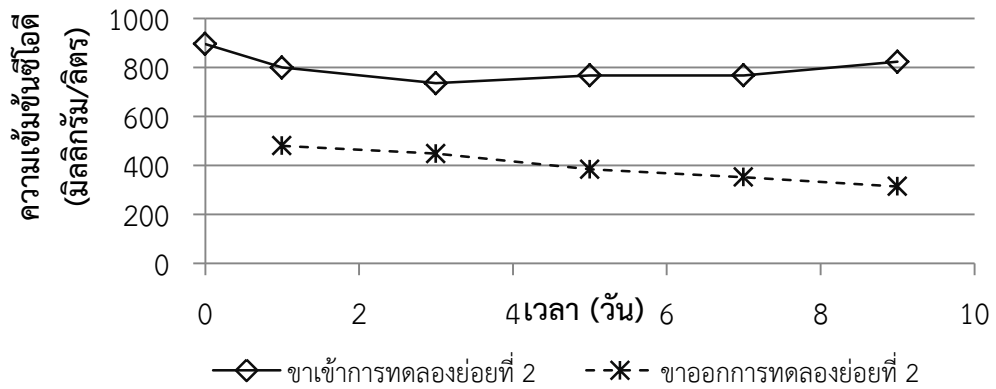
ภาพที่ 4 - 24 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้จากการทดลองย่อยชุดที่ (1)

4.2.2 ผลของการทดลองย่อยชุดที่ (2)

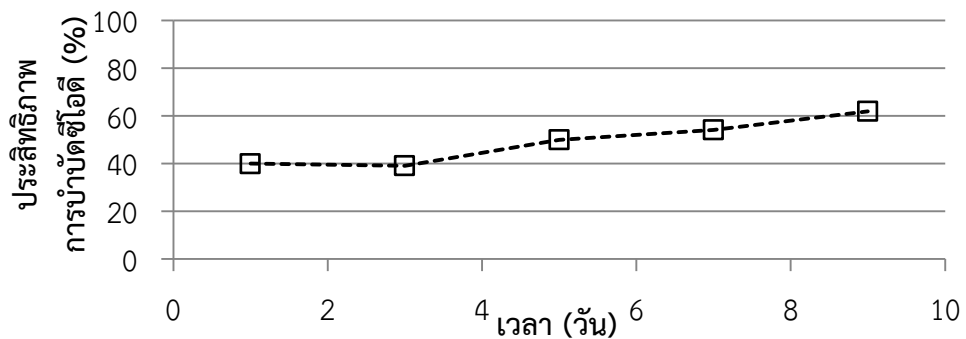
ดำเนินการทดลองโดยปราศจากตะกอนแขวนลอย ใช้ขั้วแอโนดและแคโทดเดิมที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 1 และเปลี่ยนน้ำเสียสังเคราะห์ใหม่เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์และซัลไฟด์ โดยความเข้มข้นของซีโอดีขาเข้าประมาณ 800 มิลลิกรัม/ลิตร และความเข้มข้นซัลไฟด์ประมาณ 136 มิลลิกรัม/ลิตร หรือ 4 มิลลิโมลาร์ ซึ่งมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากผลการทดลองช่วงที่ 1 เล็กน้อย เพื่อศึกษาบทบาทของจุลินทรีย์ที่อยู่บริเวณขั้วแอโนดในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์และซัลไฟด์ รวมถึงความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้า ผลการทดลองเป็นดังนี้

- ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดซีโอดีของการทดลองย่อยชุดที่ 2 พบว่า มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของซีโอดีขาออกอยู่ที่ประมาณ 396 ± 68 มิลลิกรัม/ลิตร โดยสามารถคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีได้อยู่ที่ประมาณ $49 \pm 10\%$ ความเข้มข้นและประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในการทดลองย่อยชุดที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 4-25 และ 4-26 ตามลำดับ



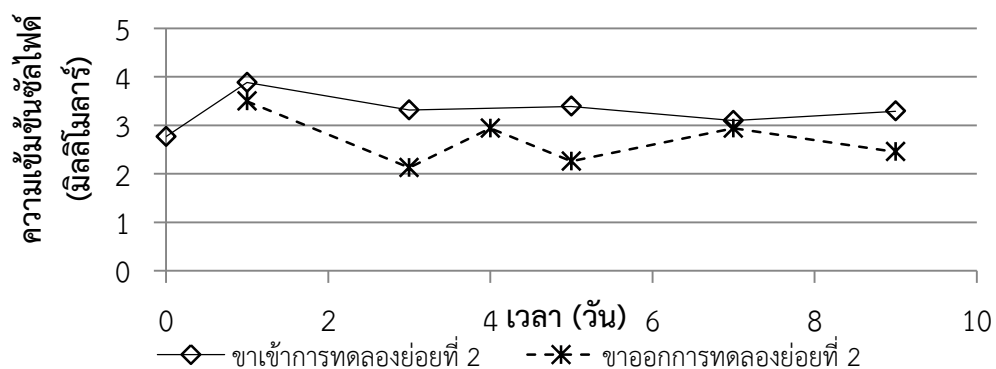
ภาพที่ 4 - 25 ความเข้มข้นของซีโอดีในการทดลองย่อยชุดที่ (2)



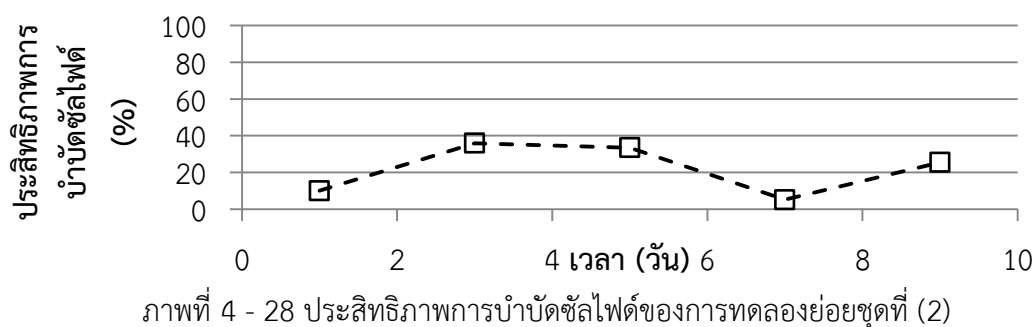
ภาพที่ 4 - 26 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของการทดลองย่อยชุดที่ (2)

- ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดซัลไฟด์ของการทดลองย่อยชุดที่ 2 พบว่า มีค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของซัลไฟด์ขาออกอยู่ที่ประมาณ 2.7 ± 0.52 มิลลิโมลาร์ (ประมาณ 92 มิลลิกรัม/ลิตร) โดยสามารถคิดเป็นประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ได้อยู่ที่ประมาณ $22 \pm 14\%$ ความเข้มข้นและประสิทธิภาพของการบำบัดซัลไฟด์ในการทดลองย่อยชุดที่ 2 ดังแสดงในภาพที่ 4-27 และ 4-28 ตามลำดับ

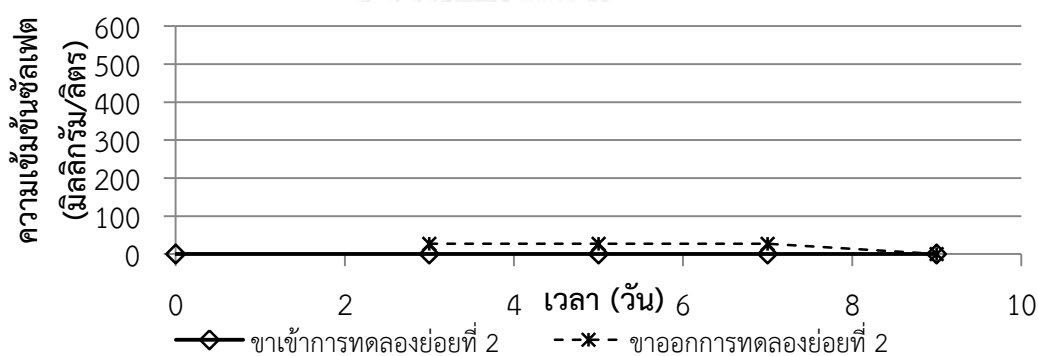


ภาพที่ 4 - 27 ความเข้มข้นของซัลไฟด์ในการทดลองย่อยชุดที่ (2)



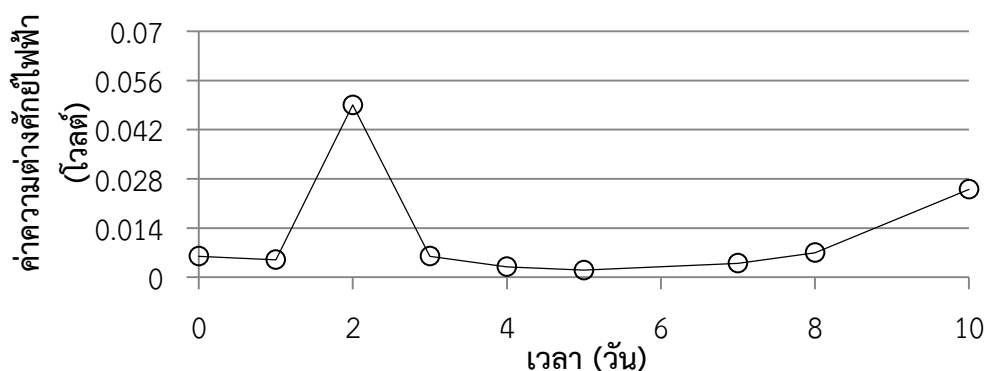
- ปริมาณที่เพิ่มขึ้นของซีลเฟต

ผลการวิเคราะห์ปริมาณของซีลเฟตที่เพิ่มขึ้นในการทดลองย่อยชุดที่ 2 นี้พบว่า มีปริมาณซีลเฟตเกิดขึ้นในระบบเฉลี่ยประมาณ 20 ± 14 มิลลิกรัม/ลิตร ในการทดลองช่วงหนึ่งสัปดาห์แรกของการเดินระบบ จากนั้นไม่พบปริมาณซีลเฟตที่เพิ่มขึ้นในระบบจนสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งปริมาณซีลเฟตที่เพิ่มขึ้นนี้แสดงดังภาพที่ 4-29

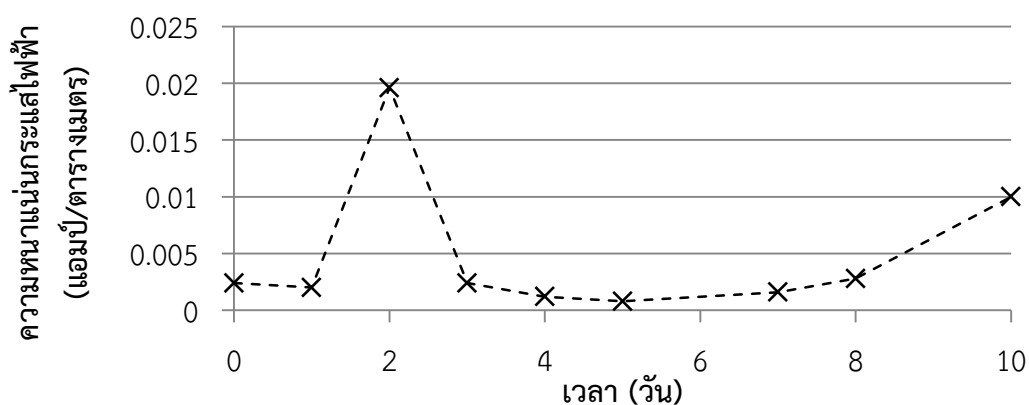


- ค่าความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทดลองย่อยชุดที่ 2 นี้ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0199 ± 0.0155 โวลต์ สามารถคิดเป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีค่าความหนาแน่นไฟฟ้าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0048 ± 0.0062 แอมป์/ตารางเมตร ซึ่งค่าความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้แสดงในภาพที่ 4-30 และ 4-31 ตามลำดับ



ภาพที่ 4 - 30 ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในการทดลองย่อยชุดที่ (2)



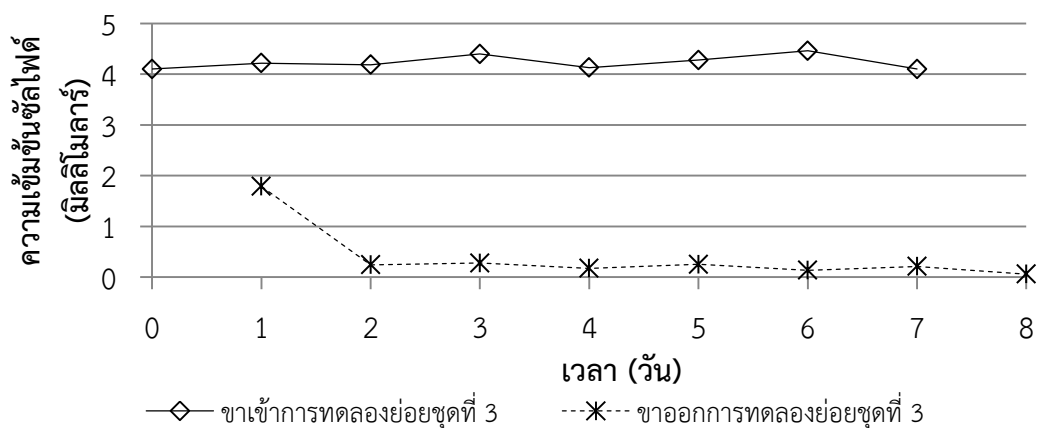
ภาพที่ 4 - 31 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่คำนวณได้ในการทดลองย่อยชุดที่ (2)

4.2.3 ผลของการทดลองย่อยชุดที่ (3)

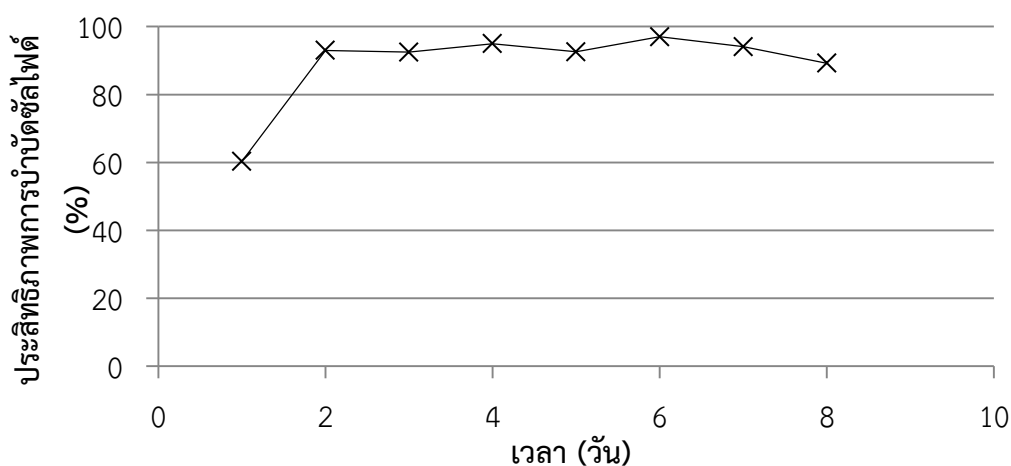
ดำเนินการทดลองโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ซึ่งประกอบด้วยซัลไฟด์เพียงอย่างเดียว (ความเข้มข้นซัลไฟด์ประมาณ 4 มิลลิโมลาร์ ซึ่งมากกว่าค่าเฉลี่ยที่ได้จากผลการทดลองช่วงที่ 1 เล็กน้อย) ปราศจากสารอินทรีย์ รวมถึงเปลี่ยนขั้วแอโนดและแคโทดใหม่ เพื่อศึกษาผลของขั้วแอโนดในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์และซัลไฟด์ รวมถึงความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้า เปรียบเทียบกับการทดลองย่อยชุดที่ (1) และ (2) ผลการทดลองเป็นดังนี้

- ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์

ผลการศึกษาประสิทธิภาพของการบำบัดซัลไฟด์ของการทดลองย่อยชุดที่ 3 พบว่า ความเข้มข้นของซัลไฟด์ขาออกมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.39 ± 0.57 มิลลิโมลาร์ (ประมาณ 14 มิลลิกรัม/ลิตร) สามารถคิดประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ได้ค่าอยู่ที่ประมาณ $90 \pm 14\%$ และค่อนข้างคงที่ตลอดการทดลอง ความเข้มข้นและประสิทธิภาพของการบำบัดซัลไฟด์ในการทดลองย่อยชุดที่ 3 ดังแสดงในภาพที่ 4-32 และ 4-33 ตามลำดับ



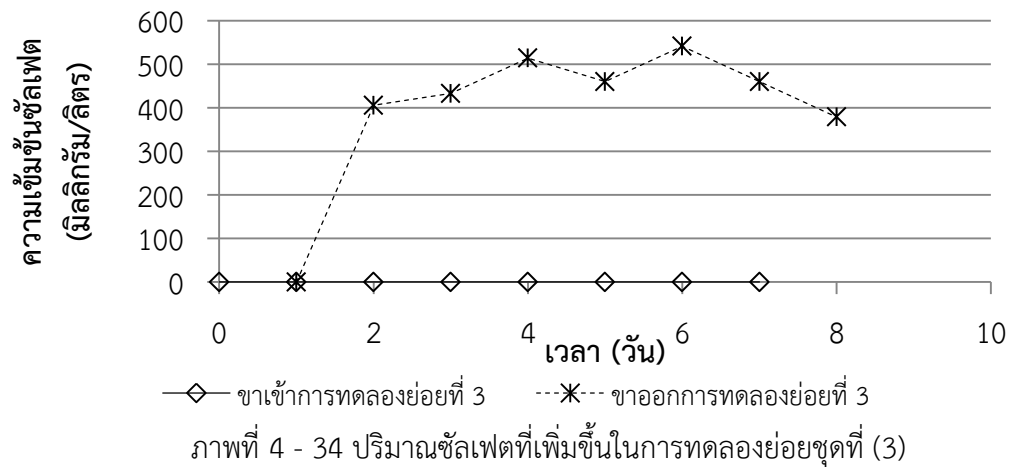
ภาพที่ 4 - 32 ความเข้มข้นของคลอรีนในการทดลองย่อยชุดที่ (3)



ภาพที่ 4 - 33 ประสิทธิภาพการบำบัดคลอรีนของการทดลองย่อยชุดที่ (3)

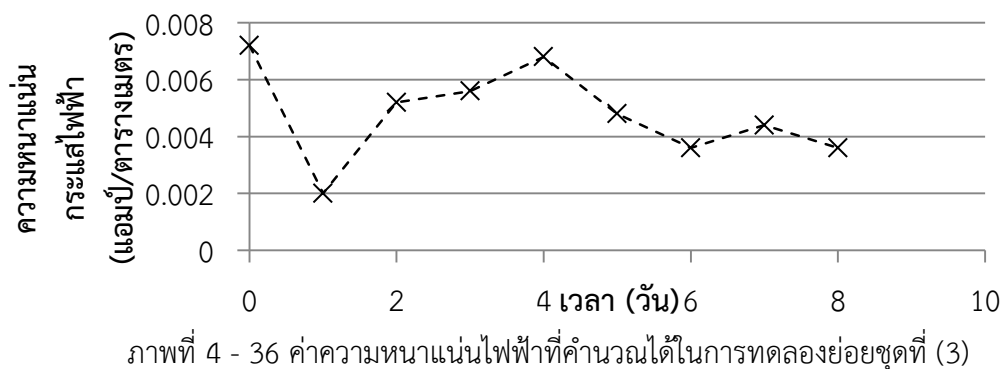
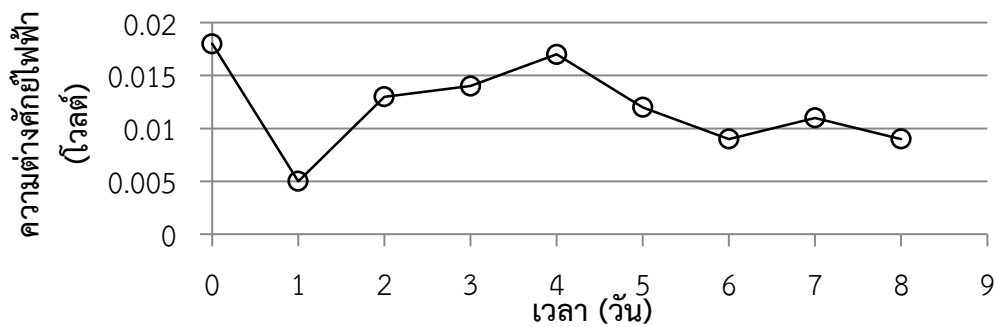
- ปริมาณคลอรีนที่เกิดขึ้น

ผลการวิเคราะห์ปริมาณคลอรีนที่เกิดขึ้นของการทดลองย่อยชุดที่ 3 พบว่า ความเข้มข้นของคลอรีนเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่ 2 ของการทดลองและค่อนข้างคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดลอง ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของคลอรีนเฉลี่ย 399 ± 57.18 มิลลิกรัม/ลิตร ปริมาณคลอรีนที่เกิดขึ้นนี้แสดงในภาพที่ 4-34 ทั้งนี้การเกิดคลอรีนจากการออกซิไดซ์คลอรีนที่ขั้วแอโนดคาดว่าเป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดคลอรีนในการทดลองช่วงที่ 1 มีค่าต่ำ เนื่องจากคลอรีนที่ถูกรีดิวซ์โดยแบคทีเรียรีดิวซ์คลอรีนเป็นไฮโดรเจนคลอรีนแล้วนั้น สามารถถูกออกซิไดซ์กลับมาเป็นคลอรีนอีกครั้ง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดคลอรีนที่ตรวจวัดได้มีค่าต่ำ



- ค่าความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

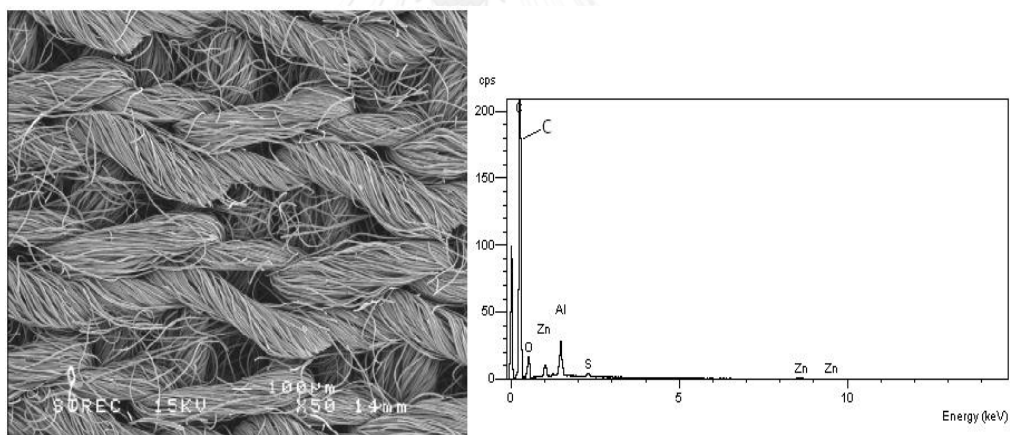
จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเดินระบบต่อเนื่องค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทดลองย่อยชุดที่ 3 นี้ มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 0.012 ± 0.004 โวลต์ เช่นเดียวกับค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.0048 ± 0.002 แอมป์/ตารางเมตร ซึ่งค่าความต่างศักย์และความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่วัดได้แสดงในภาพที่ 4-35 และ 4-36 ตามลำดับ



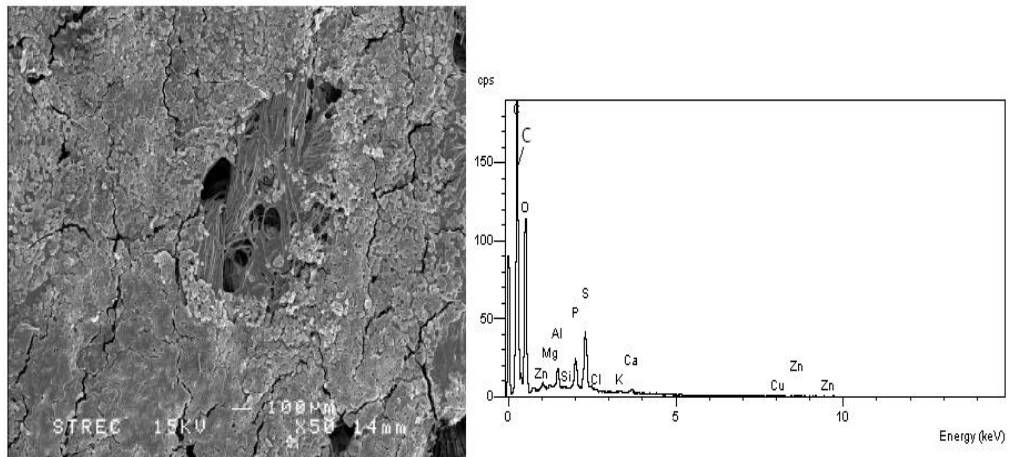
4.2.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวและชนิดของธาตุที่พบบนพื้นผิวของขั้วแอโนด

วิเคราะห์ผลโดยใช้เครื่องมือ SEM-EDX ซึ่งสามารถถ่ายภาพขยายของพื้นผิวขั้วแอโนด รวมถึงทราบชนิดของธาตุที่พบบนพื้นผิวของขั้วแอโนด ผลการวิเคราะห์พบว่า ขั้วแอโนดของการทดลองย่อยทั้ง 3 ชุดการทดลองมีคราบที่มีลักษณะเป็นของแข็งเกาะอุดตันที่ผิวหน้าของขั้วแอโนด และเมื่อวิเคราะห์ธาตุที่พบแล้วพบว่า ในการทดลองย่อยชุดที่ (1) (2) และ (3) นั้น มีปริมาณซัลเฟอร์สูงกว่าในขั้วแอโนดเริ่มต้นทั้งหมด โดยสังเกตได้จากกราฟแสดงชนิดของธาตุที่ตรวจพบบนพื้นผิวของขั้วแอโนด ผลการวิเคราะห์สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 4-37 ถึง 4-40

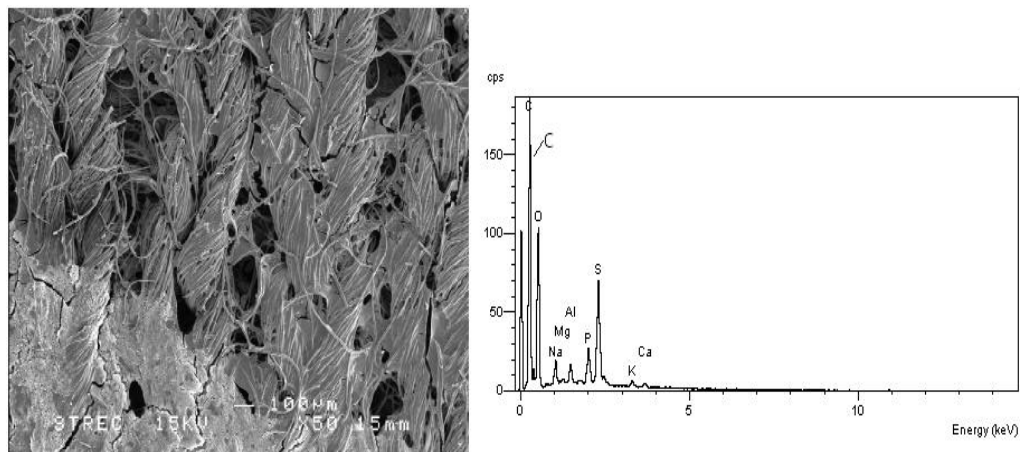
ทั้งนี้การสะสมตัวของซัลเฟอร์บนขั้วแอโนดน่าจะเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพลดลงเมื่อระยะเวลาผ่านไป ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในช่วงที่ 1 ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนขั้วแอโนดใหม่สามารถช่วยให้ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้ากลับเพิ่มสูงขึ้นได้ ทั้งนี้ซัลเฟอร์ที่เกาะบนขั้วแอโนดย้อมบดบังพื้นผิวของขั้วแอโนดให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ และเนื่องจากธาตุซัลเฟอร์ไม่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า การสะสมตัวของซัลเฟอร์บนขั้วแอโนดจึงส่งผลให้การนำไฟฟ้าของขั้วแอโนดลดลงอีกด้วย



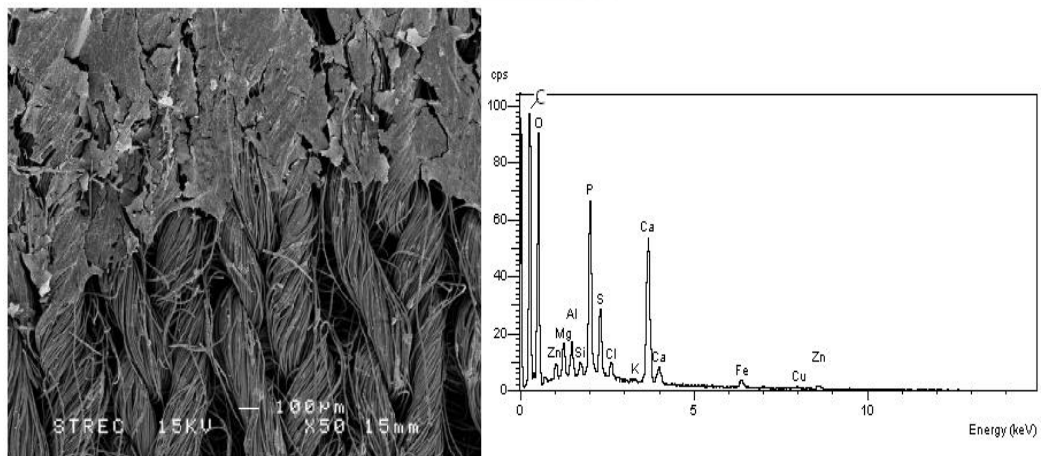
ภาพที่ 4 - 37 ภาพพื้นผิวและธาตุที่พบบนขั้วแอโนดเริ่มต้น



ภาพที่ 4 - 38 ภาพพื้นผิวและธาตุที่พบบนชิ้นแอมโนตของการทดลองช่วงที่ 2 ชุดที่ (1)



ภาพที่ 4 - 39 ภาพพื้นผิวและธาตุที่พบบนชิ้นแอมโนตของการทดลองช่วงที่ 2 ชุดที่ (2)



ภาพที่ 4 - 40 ภาพพื้นผิวและธาตุที่พบบนชิ้นแอมโนตของการทดลองช่วงที่ 2 ชุดที่ (3)

4.2.5 การวิเคราะห์กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในการทดลองครั้งที่ 2

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4-6

ตารางที่ 4 - 6 สรุปผลการทดลองครั้งที่ 2 การศึกษาบทบาทและกลไกการทำงานของจุลินทรีย์ที่แขวนลอยในระบบและจุลินทรีย์ที่อยู่บนขั้วแอโนด

| ผลการทดลอง | การทดลองย่อยชุดที่ | | |
|--|--------------------|---------------|---------------|
| | (1) | (2) | (3) |
| ความเข้มข้นซีโอดีขาเข้าเฉลี่ย (มิลลิกรัม/ลิตร) | 779±28 | 799±56 | - |
| ความเข้มข้นซีโอดีขาออกเฉลี่ย (มิลลิกรัม/ลิตร) | 397±77 | 396±68 | - |
| ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี (%) | 48±10 | 49±10 | - |
| ความเข้มข้นซัลเฟตขาเข้าเฉลี่ย (มิลลิกรัม/ลิตร) | 1,499±28 | - | - |
| ความเข้มข้นซัลเฟตขาออกเฉลี่ย (มิลลิกรัม/ลิตร) | 1,305±51 | 20±14 | 399±57 |
| ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต (%) | 13±5 | - | - |
| ความเข้มข้นซัลไฟด์ขาเข้าเฉลี่ย (มิลลิโมลาร์) | - | 3±0.37 | 4.23±0.14 |
| ความเข้มข้นซัลไฟด์ขาออกเฉลี่ย (มิลลิโมลาร์) | 3.02±0.55 | 2.7±0.52 | 0.39±0.57 |
| ประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ (%) | - | 22±14 | 90±14 |
| ค่า open circuit voltage (โวลต์) | 0.580 | 0.205 | 0.545 |
| ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย (โวลต์) | 0.022±0.009 | 0.0199±0.0155 | 0.012±0.004 |
| ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย (แอมป์/ตารางเมตร) | 0.009±0.004 | 0.0048±0.0062 | 0.0048±0.0062 |

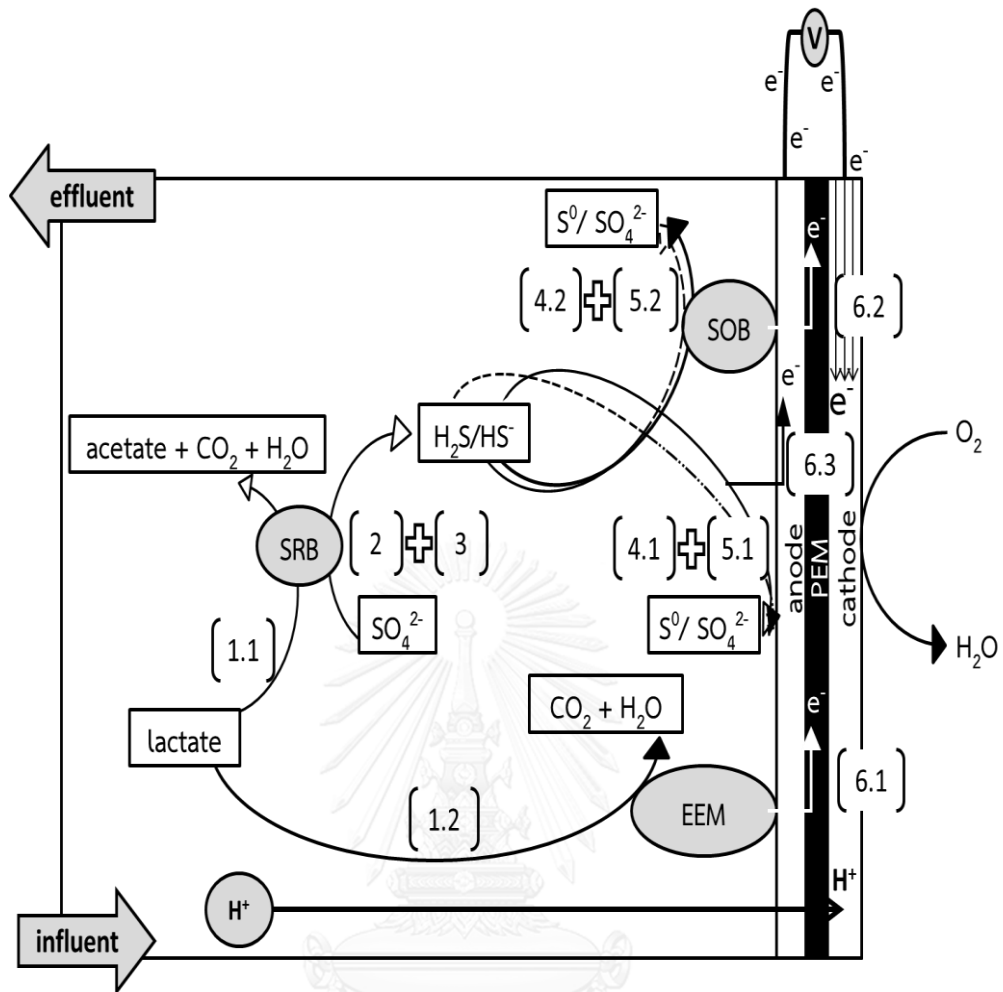
หมายเหตุ

การทดลองย่อยชุดที่ (1) มีตะกอนจุลินทรีย์ เปลี่ยนขั้วแอโนด และ แคโทด/PEM ใหม่
น้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วย แลกเตท และ ซัลเฟต

การทดลองย่อยชุดที่ (2) ไม่มีตะกอนจุลินทรีย์ ใช้ขั้วแอโนดเดิมจากการทดลองครั้งที่ 1
(มีจุลินทรีย์เกาะติดผิว) เปลี่ยนขั้วแคโทด/PEM ใหม่
น้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วย แลกเตท และ ซัลไฟด์

การทดลองย่อยชุดที่ (3) ไม่มีตะกอนจุลินทรีย์ เปลี่ยนขั้วแอโนด และ แคโทด/PEM ใหม่
น้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วย ซัลไฟด์

จากผลการทดลองครั้งที่ 2 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในแต่ละบริเวณสามารถอธิบายได้ดังแสดงในรูปที่ 4-41



ภาพที่ 4 - 41 กลไกที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแล้วทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าได้

หมายเหตุ

- SRB คือ Sulfate-reducing bacteria
- SOB คือ Sulfur/Sulfide-oxidizing bacteria
- EEM คือ Exoelectrogenic microorganisms

กลไกที่ [1] การบำบัดซีโอดี (COD removal) เกิดจากจุลินทรีย์ใช้สารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ โดย

[1.1] ตะกอนจุลินทรีย์ที่แขวนลอย

[1.2] กลุ่มจุลินทรีย์ EEM ที่เกาะบริเวณผิวของขั้วแอโนดเป็น biofilm

กลไกที่ [2] การบำบัดซัลเฟต (Sulfate removal) โดย SRB ซึ่งใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ

กลไกที่ [3] การผลิตซัลไฟด์ (Sulfide production) โดยกลไกการบำบัดซัลเฟต

กลไกที่ [4] การบำบัดซัลไฟด์ (Sulfide removal) เกิดจากซัลไฟด์ในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพถูกออกซิไดซ์ให้เป็นซัลเฟตหรือซัลเฟต อาจเกิดได้จากกระบวนการ

[4.1] abiotic H_2S oxidation

[4.2] ออกซิเดชันโดย SOB ที่เกาะติดเป็น biofilm บริเวณผิวของขั้วแอโนด

กลไกที่ [5] การผลิตซัลเฟต/ซัลเฟอไรด์ (Sulfate/Sulfur production) เกิดจากกลไกการบำบัดซัลไฟด์ อาจเกิดได้จากกระบวนการ

[5.1] abiotic H_2S oxidation

[5.2] ออกซิเดชันโดย SOB ที่เกาะติดเป็น biofilm บริเวณผิวของขั้วแอโนด

กลไกที่ [6] การเกิดไฟฟ้า (Electricity generation) เกิดจากการถ่ายเทอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด อาจเกิดได้จากกระบวนการ

[6.1] การเกิดไฟฟ้าโดย EEM

[6.2] การเกิดไฟฟ้าโดย SOB

[6.3] การเกิดไฟฟ้าโดย abiotic H_2S oxidation

ในการทดลองย่อยแต่ละชุดสามารถแสดงกลไกที่เกิดขึ้นภายในสรุปเป็นตารางได้ดังแสดงในตารางที่ 4-7

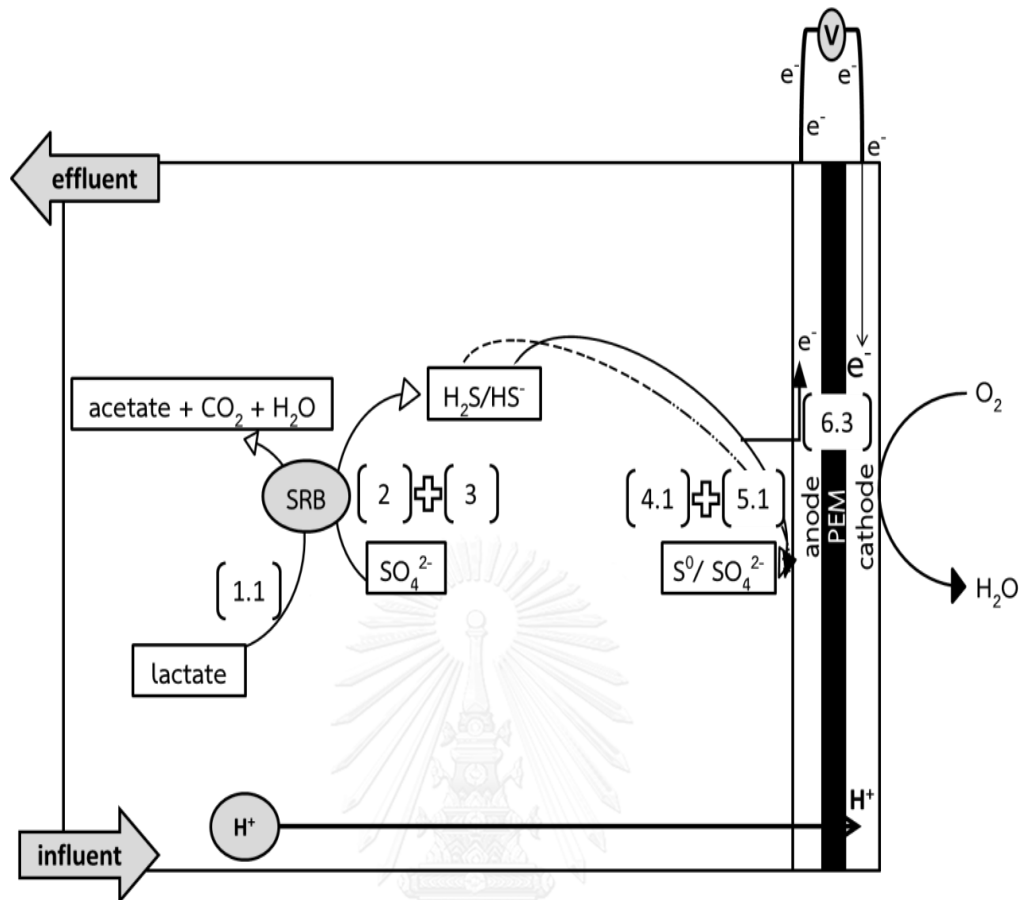
ตารางที่ 4 - 7 สรุปกลไกที่เกิดขึ้นในการทดลองช่วงที่ 2

| กลไกที่เกิดขึ้น | การทดลองช่วงที่ 2 ชุดที่ | | |
|--|--------------------------|--|--|
| | (1) | (2) | (3) |
| [1] การบำบัดซีโอดี | | | x |
| [1.1] โดยตะกอนจุลินทรีย์ที่แขวนลอย | ✓ | | |
| [1.2] โดยจุลินทรีย์ที่เกาะติดบริเวณผิวของขั้วแอโนด | | ✓ | |
| [2] การบำบัดซัลเฟต โดย SRB | ✓ | x | x |
| [3] การผลิตซัลไฟด์ | ✓ | x | x |
| [4] การบำบัดซัลไฟด์ | x | | |
| [4.1] โดย abiotic H ₂ S oxidation | | ✓ | ✓ |
| [4.2] โดย SOB ที่เกาะติดเป็น biofilm บริเวณผิวของขั้วแอโนด | | ✓ | |
| [5] การผลิตซัลเฟอร์/ซัลเฟต | x | | |
| [5.1] โดย abiotic H ₂ S oxidation | | ✓ | ✓ |
| [5.2] โดย SOB ที่เกาะติดเป็น biofilm บริเวณผิวของขั้วแอโนด | | ✓ | |
| ผลิตภัณฑ์จากกลไกการผลิตซัลเฟอร์/ซัลเฟต | | S ⁰ ↑ / SO ₄ ²⁻ ↑ | SO ₄ ²⁻ ↑ / S ⁰ ↑ |
| [6] การเกิดไฟฟ้า | | | |
| [6.1] โดย EEM | | ✓ | |
| [6.2] โดย SOB | | ✓ | |
| [6.3] โดย abiotic H ₂ S oxidation | ✓ | ✓ | ✓ |

หมายเหตุ ✓ คือ พบได้ในการทดลองย่อยชุดนั้นๆ

 x คือ ไม่พบในการทดลองย่อยนั้นๆ

จากตารางสรุปกลไกที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้ดังนี้



ภาพที่ 4 - 42 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการทดลองย่อยชุดที่ (1)

จากภาพที่ 4-42 การทดลองย่อยชุดที่ (1) ซึ่งมีตะกอนจุลินทรีย์เดิม เปลี่ยนขั้วแอโนดและแคโทด/PEM ใหม่ น้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วยแลกเตทและซัลเฟต กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นภายใน ได้แก่

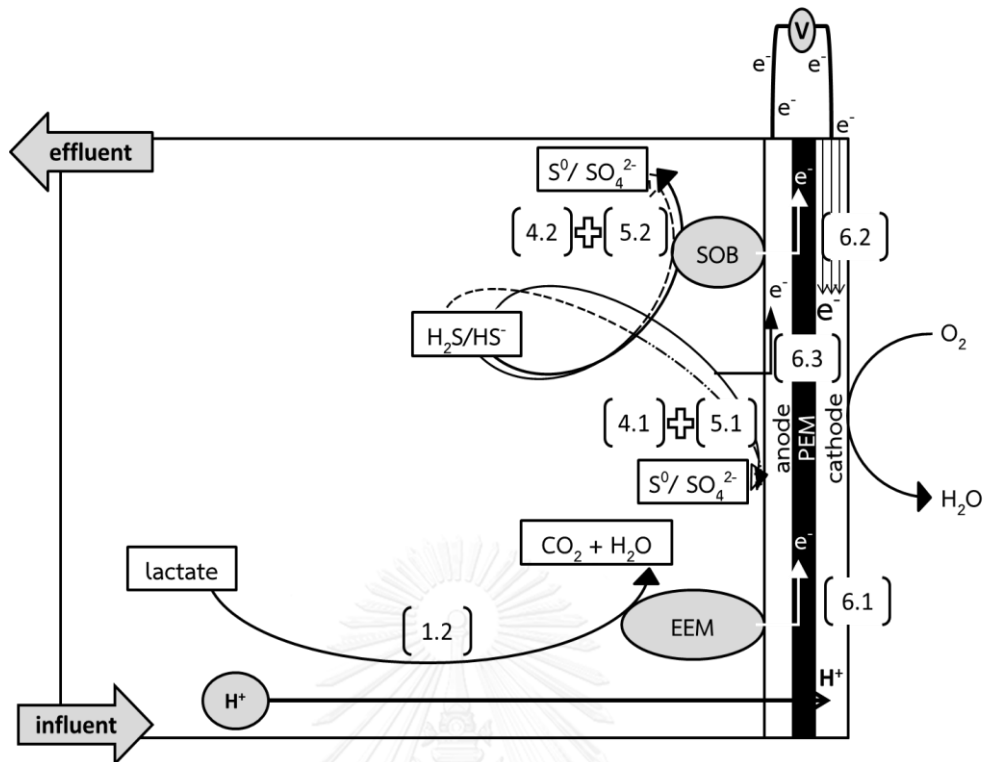
- [1.1] การบำบัดซีโอดีโดยตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอย
- [2] การบำบัดซัลเฟตโดย SRB
- [3] การผลิตซัลไฟด์
- [4.1] การบำบัดซัลไฟด์โดย abiotic H₂S oxidation
- [5.1] การผลิตซัลเฟอร์/ซัลเฟตโดย abiotic H₂S oxidation
- [6.3] การเกิดไฟฟ้าโดย abiotic H₂S oxidation

การทดลองย่อยชุดนี้ต้องการศึกษาบทบาทการทำงานของตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยในระบบ เพื่อดูความสามารถในการบำบัดสารปนเปื้อน และความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยสามารถอธิบายกลไกที่เกิดขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองได้ดังนี้

เริ่มจากแลกเตทและซัลเฟตในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถถูกบำบัดด้วยตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยในระบบโดยกระบวนการซัลเฟตรีดักชัน ซึ่งแลกเตทและซัลเฟตที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ถูกใช้เป็นตัวให้อิเล็กตรอนและตัวรับอิเล็กตรอนตามลำดับ (กลไกที่ [1.1] และ [2]) และผลิตซัลไฟด์ขึ้นในระบบ (กลไก [3])

เนื่องจากการทดลองย่อยชุดนี้ได้ทำการเปลี่ยนขั้วแอโนดใหม่ จึงคาดว่าไม่มีจุลินทรีย์เกาะติดเป็น biofilm ที่บริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนด ดังนั้นกลไกที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วแอโนดจึงคาดว่าน่าจะเป็นแบบ abiotic ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนดได้โดยตรงเป็นหลัก ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการซัลเฟตรีดักชันจะถูกออกซิไดซ์โดยกระบวนการออกซิไดซ์ซัลไฟด์แบบ abiotic ที่สามารถเกิดขึ้นได้เองที่บริเวณขั้วแอโนด (กลไก [4.1]) โดยไม่ต้องอาศัย biofilm บนขั้วแอโนด ส่งผลให้เกิดเป็นซัลเฟอร์เกาะที่บริเวณผิวของขั้วแอโนด นอกจากนี้ซัลไฟด์บางส่วนอาจถูกออกซิไดซ์เป็นซัลเฟตย้อนกลับมา (กลไก [5.1]) ซึ่งลักษณะดังกล่าวสามารถพบได้ในการทดลองย่อยชุดที่ 3 ซึ่งใช้ขั้วแอโนดใหม่ซึ่งปราศจาก biofilm เช่นเดียวกันและพบซัลเฟตเกิดขึ้นในระบบจากกระบวนการออกซิไดซ์ซัลไฟด์ที่ขั้วแอโนด ซึ่งกระบวนการดังกล่าวอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซัลเฟตที่พบในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในการศึกษานี้มีค่าต่ำ ทั้งในการทดลองช่วงที่ 2 การทดลองย่อยชุดที่ 1 (ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต 22%) และในการทดลองช่วงที่ 1 (ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟต $21 \pm 9\%$ และ $18 \pm 9\%$ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ) ทั้งนี้เนื่องจากซัลไฟด์นั้นสามารถถูกออกซิไดซ์ที่ขั้วแอโนดกลับมาเป็นซัลเฟตได้อีกครั้ง ซึ่งไม่สามารถแยกแยะได้ว่าซัลเฟตในระบบนั้นไม่ได้รับการบำบัดหรือถูกบำบัดเป็นซัลไฟด์แล้วแต่ถูกออกซิไดซ์กลับมาเป็นซัลเฟตอีก

ในแง่ของการกลไกการเกิดกระแสไฟฟ้า ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบสามารถถูกออกซิไดซ์ที่บริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนดโดยตรงด้วยกลไกการเกิดไฟฟ้าแบบ abiotic (กลไก [6.3]) เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด ส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าขึ้นในระบบ โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดผ่านลวดไทเทเนียมและตัวต้านทานภายนอกไปยังขั้วแคโทด จากนั้นอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่มายังขั้วแคโทดจะมีออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนและเกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ



ภาพที่ 4 - 43 กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการทดลองย่อยชุดที่ (2)

จากภาพที่ 4-41 การทดลองย่อยชุดที่ (2) ไม่มีตะกอนจุลินทรีย์ ใช้ขั้วแอโนดเดิมจากการทดลองช่วงที่ 1 (มีจุลินทรีย์เกาะติดผิวเป็น biofilm) เปลี่ยนขั้วแคโทด/PEM ใหม่ น้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วยแลกเตทและซัลไฟด์ กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นภายใน ได้แก่

- [1.2] การบำบัดซีโอดีโดยจุลินทรีย์ EEM ที่เกาะติดบริเวณผิวของขั้วแอโนดเป็น biofilm
- [4.1] การบำบัดซัลไฟด์แบบ abiotic H_2S oxidation
- [4.2] การบำบัดซัลไฟด์โดย SOB ที่เกาะเป็น biofilm บริเวณผิวของขั้วแอโนด
- [5.1] การผลิตซัลเฟอร์/ซัลเฟตแบบ abiotic H_2S oxidation
- [5.2] การผลิตซัลเฟอร์/ซัลเฟตโดย SOB ที่เกาะเป็น biofilm บริเวณผิวของขั้วแอโนด
- [6.1] การเกิดไฟฟ้าโดย EEM
- [6.2] การเกิดไฟฟ้าโดย SOB
- [6.3] การเกิดไฟฟ้าโดย abiotic H_2S oxidation

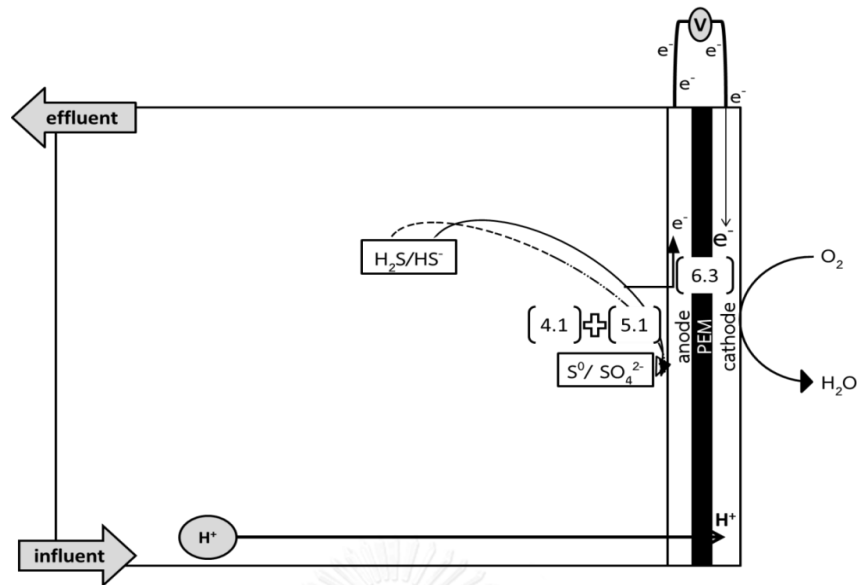
การทดลองย่อยชุดนี้ต้องการศึกษาบทบาทของจุลินทรีย์ที่อยู่บริเวณขั้วแอโนด เพื่อดูบทบาทของขั้วแอโนดที่มีจุลินทรีย์เกาะติดบนพื้นผิวในแง่ความสามารถในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์และซัลไฟด์ รวมถึงความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้าของขั้วแอโนดที่มีจุลินทรีย์เกาะติดบนพื้นผิว ซึ่งในการทดลองย่อยนี้ใช้ขั้วแอโนดเดิมที่ได้จากการทดลองช่วงที่ 1 ซึ่งมีการเดินระบบต่อเนื่องเป็นระยะเวลาหนึ่ง จึงมี biofilm เกาะที่พื้นผิว จากผลการทดลองสามารถอธิบายกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการทดลองย่อยชุดที่ (2) ได้ดังนี้

เริ่มจากแลกเตทในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถถูกจุลินทรีย์กลุ่ม EEM ที่เกาะติดเป็น biofilm บริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนดออกซิไดซ์โดยใช้เป็นตัวให้อิเล็กตรอน (กลไก [1.2]) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในการทดลองย่อยชุดที่ 1 ซึ่งมีเพียงตะกอนจุลินทรีย์แต่ไม่มี biofilm (ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี $48 \pm 10\%$) และการทดลองย่อยชุดที่ 2 ซึ่งมีแต่ biofilm แต่ไม่มีตะกอนจุลินทรีย์ (ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี $49 \pm 10\%$) กลับพบว่ามีความใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่กลไกการกำจัดสารอินทรีย์ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ศึกษาในงานวิจัยนี้จะเกิดขึ้นได้จากทั้ง 2 กลไก คือการออกซิไดซ์สารอินทรีย์โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในตะกอนจุลินทรีย์ (การทดลองย่อยชุดที่ 1) และจุลินทรีย์กลุ่ม EEM (การทดลองย่อยชุดที่ 2) อย่างไรก็ตาม อาจเกิดการแข่งขันกันระหว่างกลไกทั้งสองภายในระบบ ผลจากกลไกดังกล่าวจึงไม่สามารถนำมารวมกันได้โดยตรงในเชิงปริมาณ ดังจะเห็นได้จากประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในการทดลองช่วงที่ 1 ($51 \pm 9.88\%$ และ $57 \pm 10.09\%$ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ) ซึ่งประกอบไปด้วยทั้งตะกอนจุลินทรีย์และจุลินทรีย์บนขั้วแอโนดนั้น มีค่าสูงกว่าในการทดลองช่วงที่ 2 ในการทดลองย่อยชุดที่ 1 และ ชุดที่ 2 เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ส่วนซัลไฟด์ที่เติมลงไปในน้ำเสียสังเคราะห์นั้นก็ยังสามารถเข้าสู่กระบวนการบำบัดซัลไฟด์ด้วยกลไกที่เกิดขึ้นทั้งแบบ abiotic ที่สามารถเกิดขึ้นได้เองที่บริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนด (กลไก [4.1]) และโดยจุลินทรีย์กลุ่ม SOB (sulfur-oxidizing bacteria) ที่เกาะติดเป็น biofilm บริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนด (กลไก [4.2]) ในการทดลองย่อยชุดที่ 2 นี้ เกิดผลิตภัณฑ์จากกลไกการบำบัดซัลไฟด์ซึ่งอาจเกิดได้ทั้งแบบ abiotic ที่บริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนดโดยตรง (กลไก [5.1]) หรือโดยจุลินทรีย์ที่เกาะติดเป็น biofilm บริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนด (กลไก [5.2]) เป็นซัลเฟอร์เกาะที่บริเวณผิวของขั้วแอโนด และมีซัลเฟตเกิดขึ้นในระบบเล็กน้อยประมาณ 20 ± 14 มิลลิกรัม/ลิตร

ทั้งนี้ในการทดลองย่อยชุดที่ 2 นี้ ได้ป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์และซัลไฟด์เข้าสู่ระบบ ซึ่งก่อให้เกิดการแข่งขันกันระหว่างการออกซิไดซ์สารอินทรีย์และซัลไฟด์ที่ขั้วแอโนดโดยจุลินทรีย์กลุ่ม EEM และ SOB ตามลำดับ อีกทั้งยังอาจมีกระบวนการออกซิไดซ์ซัลไฟด์แบบ abiotic ร่วมอีกด้วย

ในแง่ของกลไกการเกิดกระแสไฟฟ้าในการทดลองย่อยชุดที่ 2 นี้ คาดว่าจุลินทรีย์กลุ่มที่เกาะติดเป็น biofilm อยู่ที่บริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนดนั้นมีบทบาทสำคัญในการเกิดกระแสไฟฟ้าผ่านทาง 3 กลไก ได้แก่ คือ 1) กลไกการเกิดกระแสไฟฟ้าโดยจุลินทรีย์กลุ่ม EEM ที่บริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนด (กลไก [6.1]) 2) กลไกการเกิดกระแสไฟฟ้าโดยจุลินทรีย์กลุ่ม SOB ที่บริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนด (กลไก [6.2]) และกลไกที่ 3) การเกิดกระแสไฟฟ้าจากการออกซิไดซ์ซัลไฟด์บริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนดโดยตรงแบบ abiotic (กลไก [6.3]) ซึ่งกลไกทั้ง 3 นั้นสามารถก่อให้เกิดการถ่ายทอดอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนดและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดทำให้อิเล็กตรอนมีการถ่ายทอดในระบบ อย่างไรก็ตามจากการทดลองนี้ ไม่สามารถระบุความสำคัญและปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแต่ละกลไกได้



ภาพที่ 4 - 44 กลไกที่เกิดขึ้นในการทดลองย่อยชุดที่ (3)

จากภาพที่ 4-44 การทดลองย่อยชุดที่ (3) ไม่มีตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอย เปลี่ยนขั้วแอโนดและแคโทด/PEM ใหม่ น้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วยซัลไฟด์โดยปราศจากแลกเตท ซึ่งกลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นในการทดลองย่อยชุดนี้ ได้แก่

[4.1] การบำบัดซัลไฟด์แบบ abiotic ที่บริเวณขั้วแอโนด

[5.1] การผลิตซัลเฟอร์/ซัลเฟตแบบ abiotic

[6.3] การเกิดไฟฟ้าโดย abiotic H_2S oxidation

การทดลองย่อยชุดนี้ต้องการศึกษาความสามารถในการบำบัดซัลไฟด์และการผลิตกระแสไฟฟ้าผ่านกลไกทาง abiotic ซึ่งได้ทำการทดลองโดยใช้ขั้วแอโนดใหม่ซึ่งไม่มีจุลินทรีย์เกาะติดเป็น biofilm และไม่มีตะกอนจุลินทรีย์ในระบบ ดังนั้นกลไกที่เกิดขึ้นทั้งหมดในการทดลองนี้จึงเป็นกลไกแบบ abiotic ที่สามารถเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนดได้โดยตรงโดยไม่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ กลไกที่คาดว่าจะเกิดขึ้นภายในสามารถอธิบายได้ดังนี้

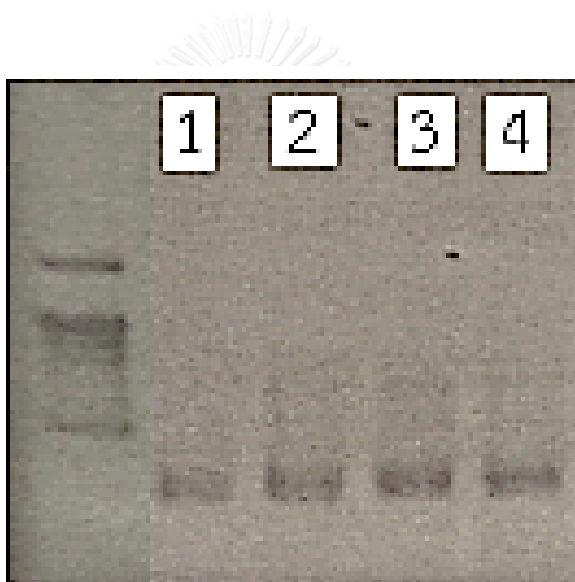
เริ่มจากซัลไฟด์ที่มีในน้ำเสียสังเคราะห์สามารถถูกออกซิไดซ์ด้วยกลไกการบำบัดซัลไฟด์แบบ abiotic ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้เองที่บริเวณขั้วแอโนด (กลไก [4.1]) และเกิดการผลิตซัลเฟตและซัลเฟอร์ขึ้นในระบบเป็นผลิตภัณฑ์ (กลไก [5.1]) ซึ่งในการทดลองย่อยชุดที่ 3 นี้ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกลไกการบำบัดซัลไฟด์เกือบทั้งหมดคือซัลเฟต ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองที่มีซัลเฟตเกิดขึ้นในระบบถึง 399 ± 57 มิลลิกรัม/ลิตร หรือ 4.15 ± 0.59 มิลลิโมล/ลิตร เทียบกับความเข้มข้นของซัลไฟด์ที่ป้อนเข้าในระบบที่ 4.23 ± 0.14 มิลลิโมล/ลิตร ส่วนซัลเฟอร์ที่พบบริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนดนั้นมีปริมาณไม่มาก และจากกลไกการบำบัดซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นซัลไฟด์จะถูกออกซิไดซ์ที่บริเวณพื้นผิวของขั้วแอโนดโดยตรงเกิดเป็นกลไกการเกิดไฟฟ้าแบบ abiotic (กลไก [6.3]) เกิดการถ่ายเทอิเล็กตรอนไปยังขั้วแอโนด ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เกิดทำให้อิเล็กตรอนมีการถ่ายเทในระบบ โดยจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดไปยังลวดไทเทเนียมผ่านตัวต้านทานไปยังขั้วแคโทด

4.3 ผลการทดลองช่วงที่ 3 การศึกษากลุ่มจุลินทรีย์ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพโดยการใช้เทคนิค Illumina MiSeq System

จากการตรวจสอบผลการทำ PCR เพื่อเพิ่มจำนวน 16S rRNA ของจุลินทรีย์ในแต่ละตัวอย่างพบว่า มีกลุ่มจุลินทรีย์ในช่วงลำดับเบสที่ต้องการ (300 bp) ในทุกตัวอย่าง ได้แก่

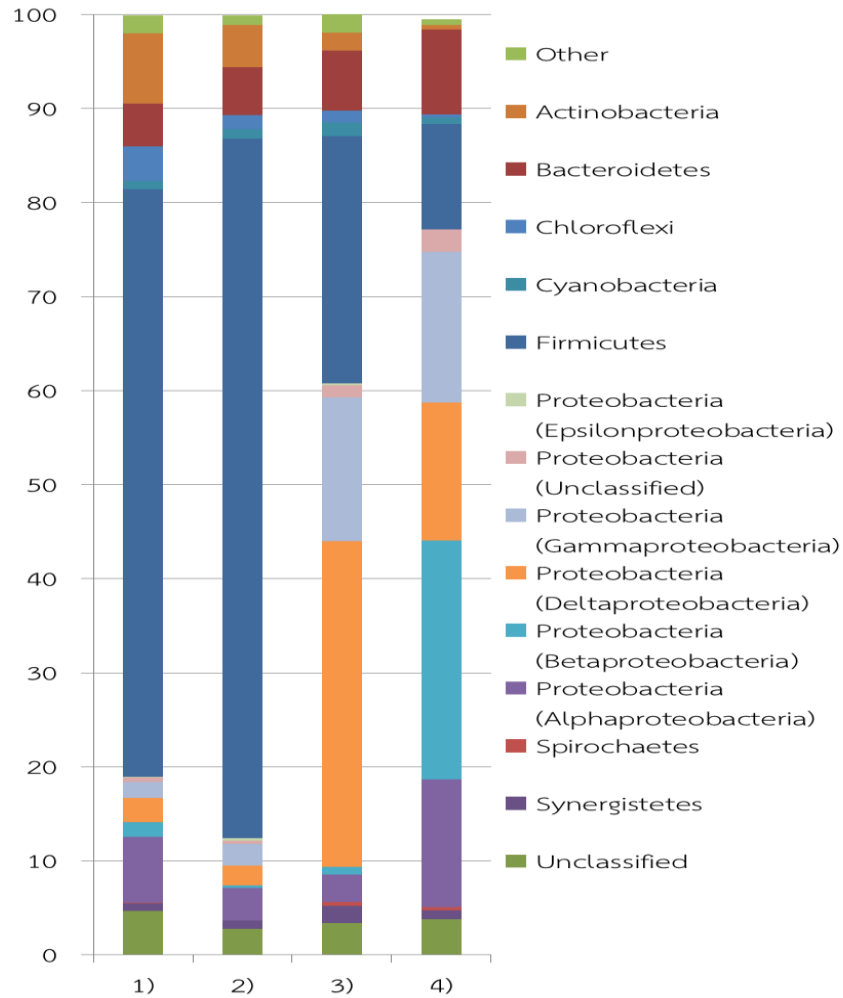
- 1) ตะกอนเริ่มต้นระบบ
- 2) ตะกอนในช่วงที่มีกระแสไฟฟ้าสูงในช่วงแรก (วันที่ 14 ของการทดลองช่วงที่ 1)
- 3) ตะกอนในช่วงทำการเดินระบบ (วันที่ 96 ของการทดลองช่วงที่ 1)
- 4) ตะกอนที่อยู่บนขั้วแอโนด

แสดงผลดังภาพที่ 4-45



ภาพที่ 4 - 45 ผลการทำ PCR เพื่อเพิ่มจำนวน 16S rRNA ของจุลินทรีย์ในแต่ละตัวอย่าง

จากนั้นเมื่อนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์ที่พบในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองครั้งที่ 1 พบว่าสามารถแสดงแบ่งตาม Phylum ที่สำคัญได้ดังภาพที่ 4-46



ภาพที่ 4 - 46 Phylum ที่พบในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองครั้งที่ 1

- หมายเหตุ
- 1) ตะกอนเริ่มต้นระบบ
 - 2) ตะกอนในช่วงที่มีกระแสไฟฟ้าสูงในช่วงแรก (วันที่ 14 ของการทดลองครั้งที่ 1)
 - 3) ตะกอนในช่วงทำการเดินระบบ (วันที่ 96 ของการทดลองครั้งที่ 1)
 - 4) ตะกอนที่อยู่บนขั้วแอโนด

จากภาพที่ 4-46 พบว่า จุลินทรีย์กลุ่ม Firmicutes มีปริมาณมากจากตัวอย่างตะกอนเริ่มต้นระบบและตะกอนช่วงที่มีกระแสไฟฟ้าสูงในช่วงต้น (วันที่ 14 ของการทดลองช่วงที่ 1) ส่วนตะกอนในช่วงของการปิดระบบการทดลองช่วงที่ 1 (วันที่ 96 ของการทดลอง) มีจุลินทรีย์กลุ่ม Firmicutes น้อยลง แต่มีจุลินทรีย์กลุ่ม Proteobacteria เพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับกับตะกอนจากข้าวแอนโดที่พบ จุลินทรีย์กลุ่ม Proteobacteria มากที่สุด

เมื่อวิเคราะห์ผลในระดับ Genus ของแบคทีเรียที่พบมากที่สุดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองช่วงที่ 1 สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4-8 ถึง 4-11

ตารางที่ 4 - 8 Genus ของแบคทีเรียที่พบมากที่สุดของตะกอนเริ่มต้นระบบ

| Phylum | Genus | % ที่พบ |
|---------------|--------------|---------|
| Firmicutes | Clostridium | 30.011 |
| Firmicutes | Soehngenia | 3.829 |
| Firmicutes | Turicibacter | 2.981 |
| Bacteroidetes | Olivibacter | 2.356 |
| Firmicutes | Alkaliphilus | 1.818 |
| Firmicutes | Trichococcus | 1.807 |

จากตารางที่ 4-8 พบว่า Genus ที่พบมากที่สุดในตะกอนเริ่มต้นคือ Clostridium ซึ่งสามารถพบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม ทั้งในตะกอนดินหรือตะกอนระบบบำบัด ส่วน Genus ที่พบรองลงมาคือ Soehngenia Turicibacter Olivibacter Alkaliphilus และ Trichococcus ตามลำดับ ซึ่งแบคทีเรียเหล่านี้สามารถพบได้ทั่วไปในตะกอนดิน

ตารางที่ 4 - 9 Genus ของแบคทีเรียที่พบมากที่สุดในช่วงที่มีกระแสไฟฟ้าสูงในช่วงแรก (วันที่ 14 ของการทดลอง)

| phylum | Genus | % ที่พบ |
|---------------|--------------|---------|
| Firmicutes | Clostridium | 50.654 |
| Firmicutes | Soehngenia | 2.474 |
| Firmicutes | Tepidibacter | 2.02 |
| Firmicutes | Turicibacter | 1.795 |
| Firmicutes | Trichococcus | 1.322 |
| Bacteroidetes | Olivibacter | 1.267 |

จากตาราง 4-9 พบว่า Genus ที่มีมากที่สุดใตตะกอนช่วงที่มีกระแสไฟฟ้าสูงในช่วงแรก (วันที่ 14 ของการทดลอง) คือ Clostridium เช่นเดียวกับกับตะกอนเริ่มต้น เนื่องจากช่วงเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่างได้ทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาเพียง 2 สัปดาห์เท่านั้น กลุ่มประชากรจุลินทรีย์จึงอาจยังคงเป็นกลุ่มใกล้เคียงกับในช่วงเริ่มต้น ส่วน Genus ที่พบเป็นลำดับรองลงมาคือ Soehngenia Tepidibacter Turicibacter Trichococcus และ Olivibacter ตามลำดับ

ตารางที่ 4 - 10 Genus ของแบคทีเรียที่พบมากที่สุดในช่วงทำการเดินระบบ (วันที่ 96 ของการทดลอง)

| Phylum | Genus | % ที่พบ |
|----------------|--------------------|---------|
| Firmicutes | Clostridium | 13.786 |
| Proteobacteria | Ectothiorhodospira | 9.559 |
| Proteobacteria | Desulfococcus | 7.715 |
| Proteobacteria | Desulfosarcina | 6.895 |
| Proteobacteria | Desulfovibrio | 5.712 |
| Bacteroidetes | Olivibacter | 4.021 |

จากตาราง 4-10 พบว่า Genus ที่มีมากที่สุดของช่วงที่ปิดการเดินระบบยังคงเป็น Clostridium ใน Firmicutes Phylum แต่เมื่อพิจารณาในระดับ Phylum แล้วจะเห็นได้ว่า Phylum ที่มีปริมาณมากกว่าคือ Proteobacteria ซึ่งมี Genus ที่พบ ได้แก่ Ectothiorhodospira Desulfococcus Desulfosarcina และ Desulfovibrio ซึ่ง *Desulfococcus spp.*, *Desulfosarcina spp.* และ *Desulfovibrio spp.* จัดเป็นแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (Medigan et al., 2003) และ Ectothiorhodospira เป็นจุลินทรีย์กลุ่ม photosynthetic purple sulfur bacteria ซึ่งสามารถออกซิไดซ์ซัลไฟด์เป็นซัลเฟอร์ได้ (Medigan et al., 2003)

ตารางที่ 4 - 11 Genus ของแบคทีเรียที่พบมากที่สุดบนข้าวแอนโด

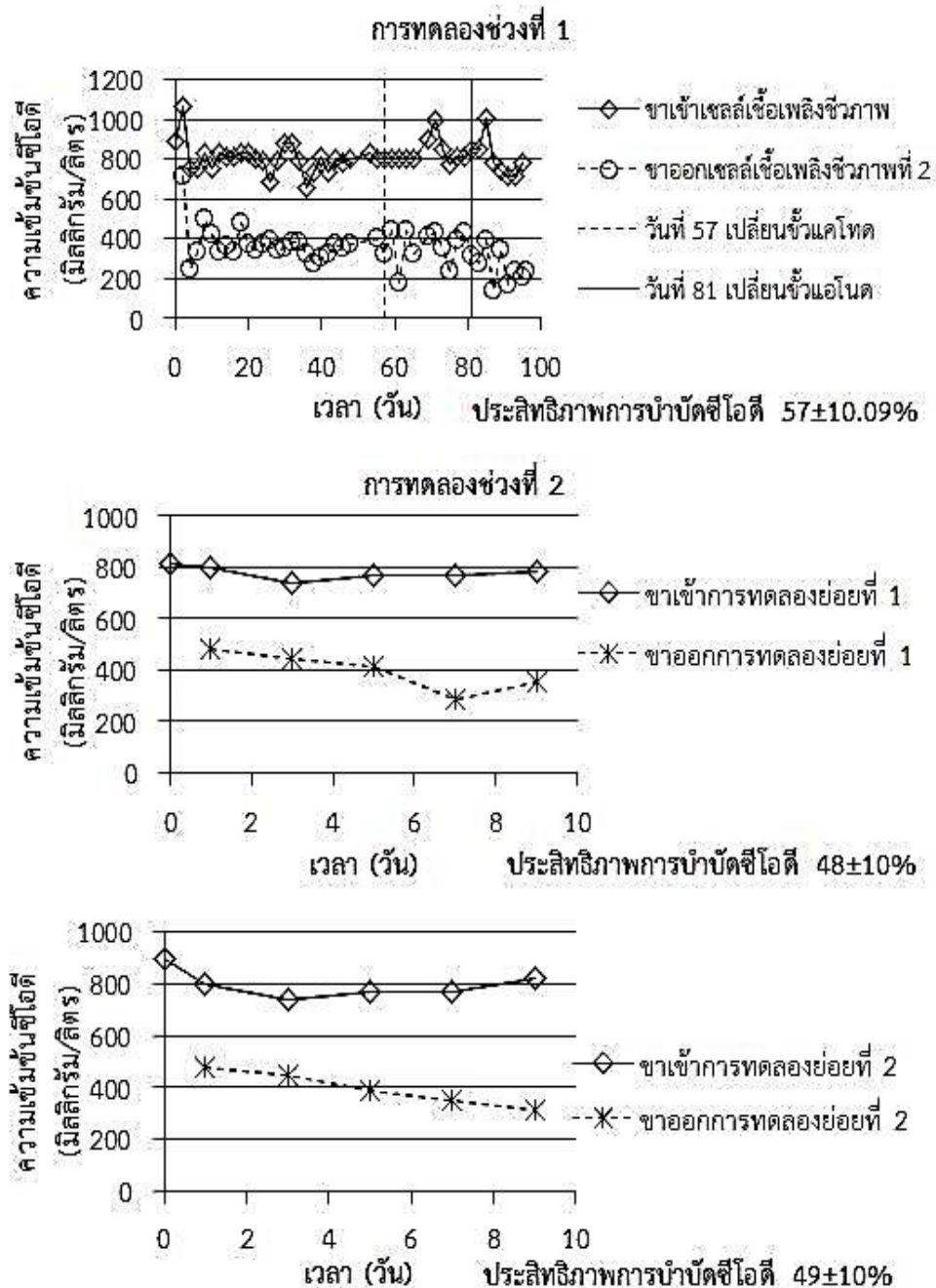
| Phylum | Genus | % ที่พบ |
|----------------|------------------|---------|
| Proteobacteria | Thiobacillus | 22.516 |
| Proteobacteria | Rhodanobacter | 7.003 |
| Proteobacteria | Desulfomicrobium | 6.975 |
| Firmicutes | Clostridium | 6.616 |
| Proteobacteria | Paracoccus | 4.163 |
| Proteobacteria | Desulfovibrio | 3.525 |

จากตาราง 4-11 Genus ที่พบมากที่สุดบนข้าวแอนโด คือ Thiobacillus ซึ่งจัดเป็นแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ซึ่งสามารถออกซิไดซ์ซัลไฟด์ให้เป็นซัลเฟอร์/ซัลเฟตได้ ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang และคณะ (2013) ซึ่งพบซัลเฟอร์ออกซิไดซิงแบคทีเรียกลุ่ม Thiobacillus บนข้าวแอนโดของระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ใช้บำบัดซัลไฟด์ และงานวิจัยของ Sun และคณะ (2010) ซึ่งพบ *Pseudomonas sp.* และ *Rhodobacter sp.* บนข้าวแอนโดในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ใช้บำบัดซัลไฟด์ซึ่งเคยมีรายงานการพบแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ใน Genus ดังกล่าวนอกจากนี้ Genus ที่พบรองลงมาบนข้าวแอนโดคือ Rhodanobacter Desulfomicrobium Clostridium Paracoccus และ Desulfovibrio ตามลำดับ โดย *Desulfomicrobium spp.* และ *Desulfovibrio spp.* จัดเป็นแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตซึ่งสามารถใช้ซัลเฟตเป็นสารรับอิเล็กตรอนได้ ส่วน *Rhodanobacter spp.* และ *Paracoccus spp.* เป็นจุลินทรีย์กลุ่มดีไนตริไฟอิงแบคทีเรีย (denitrifying bacteria) อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยพบว่าบาง species ของ Rhodanobacter สามารถใช้ซัลไฟด์เป็นสารให้อิเล็กตรอนในกระบวนการ autotrophic denitrification ได้ (Medigan et al., 2003)

4.4 การวิเคราะห์กลไกการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในงานวิจัยนี้

จากการศึกษาบทบาทและกลไกที่เกิดขึ้นในการทดลองช่วงที่ 2 สามารถนำไปอธิบายกลไกที่คาดว่าน่าจะเกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองช่วงที่ 1 ได้ดังนี้

- การบำบัดซีโอติ



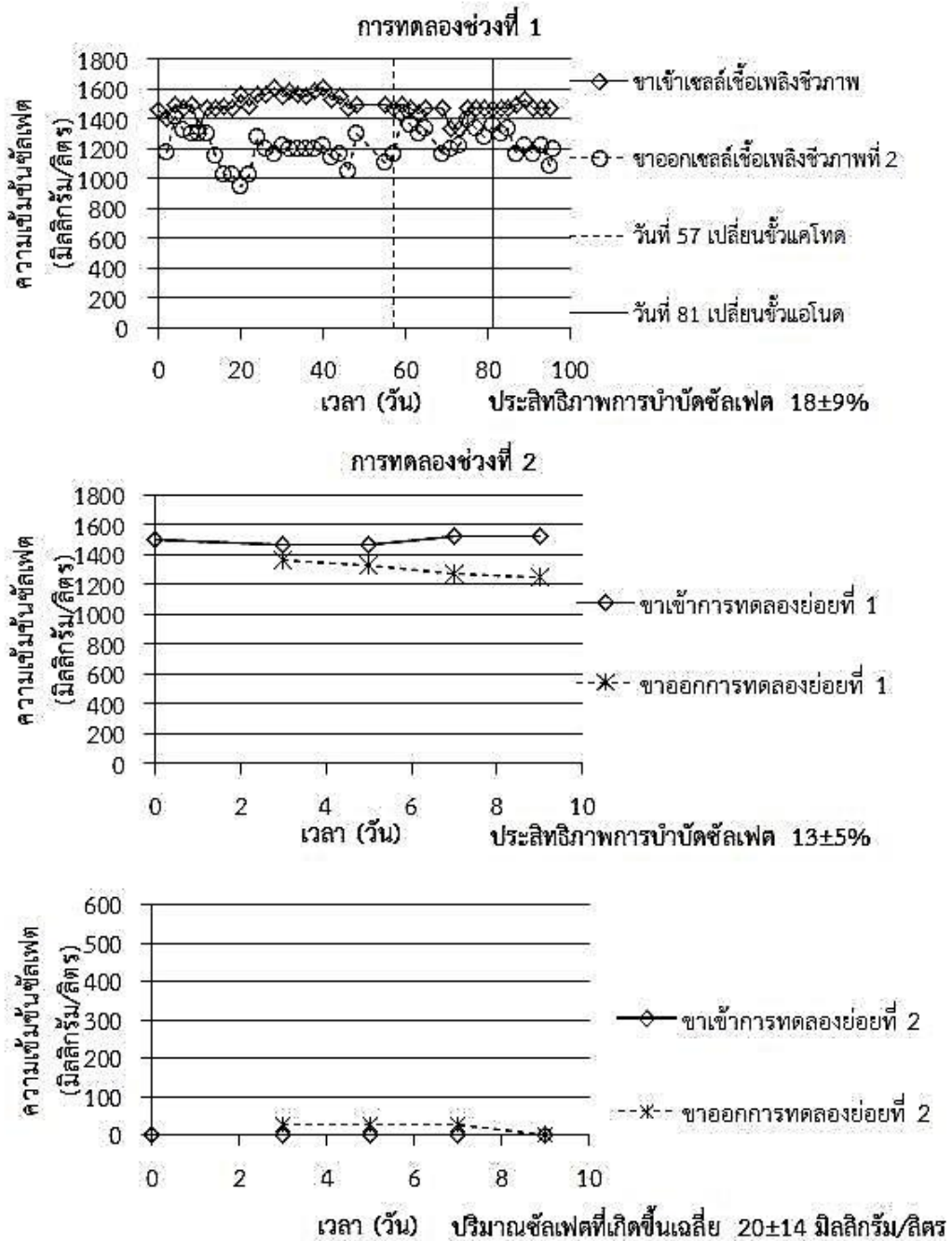
ภาพที่ 4 - 47 สรุปกราฟความเข้มข้นซีโอติในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2

จากภาพที่ 4-47 ในช่วงเริ่มต้นการเดินระบบของการทดลองช่วงที่ 1 การบำบัดซีโอดี โดยตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยน่าจะเป็นกลไกหลักที่เกิดขึ้น โดยสังเกตจากค่าซีโอดีที่ลดลงทันที ภายใน HRT ที่กำหนดไว้ (1 วัน) เนื่องจากได้มีการเติมตะกอนจุลินทรีย์เพื่อเป็นหัวเชื้อเริ่มต้นในการเดินระบบ และใช้ชีวแอโนดใหม่จึงไม่น่าจะมีจุลินทรีย์เกาะเป็น biofilm แต่เมื่อทำการเดินระบบอย่างต่อเนื่องตามเวลาแล้ว คาดว่าน่าจะมีจุลินทรีย์บางส่วนไปเกาะที่บริเวณผิวของชีวแอโนดเกิดเป็น biofilm ขึ้น ดังนั้นกลไกการบำบัดซีโอดีที่คาดว่าน่าจะเกิดขึ้นในช่วงที่ระบบเข้าสู่สภาวะคงตัวจึงอาจเกิดจากทั้งจุลินทรีย์แขวนลอยและจุลินทรีย์ที่เกาะติดบริเวณชีวแอโนดเป็น biofilm ควบคู่ไปด้วยกัน

จุลินทรีย์ที่พบในช่วงช่วงเริ่มต้นการเดินระบบส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียที่อยู่ในไฟลัม Firmicutes สายพันธุ์ *Clostridium spp.* ซึ่งแบคทีเรียจำพวกนี้มักพบได้ทั่วไปในตะกอนจากระบบบำบัดแบบไร้อากาศ ทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง แต่เมื่อเดินระบบไปจนถึงสิ้นสุดการทดลองช่วงที่ 1 แล้วพบว่าแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแบคทีเรียเหล่านี้ใช้สารอินทรีย์เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับ กระบวนการเหล่านี้จึงสามารถทำให้ค่าซีโอดีในระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพนี้ลดลงได้

จากผลการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่า กลไกการบำบัดซีโอดีในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองช่วงที่ 1 น่าจะเกิดจากการบำบัดซีโอดีทั้งในตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยและจุลินทรีย์ที่เกาะติดบนชีวแอโนด (biofilm) ทั้งนี้กลไกการบำบัดซีโอดีในตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ช่วง ได้แก่ 1) ช่วงแรกของการเดินระบบซึ่งยังไม่ค่อยมีปริมาณแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต ดังนั้นจึงน่าจะเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายจากแลกเตทให้เปลี่ยนเป็นอะซิเตทในระบบ และ 2) ช่วงท้ายการเดินระบบซึ่งมีปริมาณแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเพิ่มขึ้นแล้ว จึงน่าจะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันที่ใช้แลกเตทและอะซิเตทในระบบเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และใช้ซัลเฟตในระบบเป็นตัวรับอิเล็กตรอน เนื่องจากในการทดลองช่วงที่ 2 ได้มีการแยกชุดการทดลองย่อยชุดที่ (1) ซึ่งมีเฉพาะตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอย และการทดลองย่อยชุดที่ (2) ซึ่งมีเฉพาะกลุ่มจุลินทรีย์ที่เกาะบริเวณชีวแอโนดเป็น biofilm เพียงอย่างใดอย่างหนึ่งเท่านั้น พบว่าทั้งสองชุดการทดลองย่อยยังสามารถบำบัดซีโอดีได้ทั้งคู่ อย่างไรก็ตามการบำบัดซีโอดีจากทั้งสองกลไกไม่สามารถนำมารวมกันในเชิงปริมาณได้ ดังจะสังเกตจากประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีในการทดลองย่อยชุดที่ (1) ที่บำบัดได้ $48 \pm 10\%$ และการทดลองย่อยชุดที่ (2) ที่บำบัดได้ $49 \pm 10\%$ ซึ่งน้อยกว่าประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองช่วงที่ 1 ที่บำบัดได้ $57 \pm 10\%$ เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ทั้งนี้อาจเกิดขึ้นจากการแข่งขันในการบำบัดซีโอดีเมื่อมีการอยู่ร่วมกันของตะกอนจุลินทรีย์และ biofilm บนแอโนดในระบบ

- การบำบัดซัลเฟต



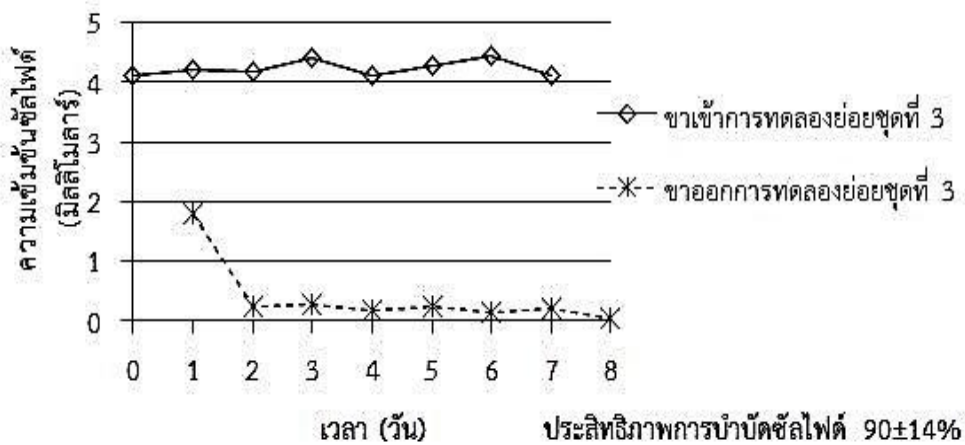
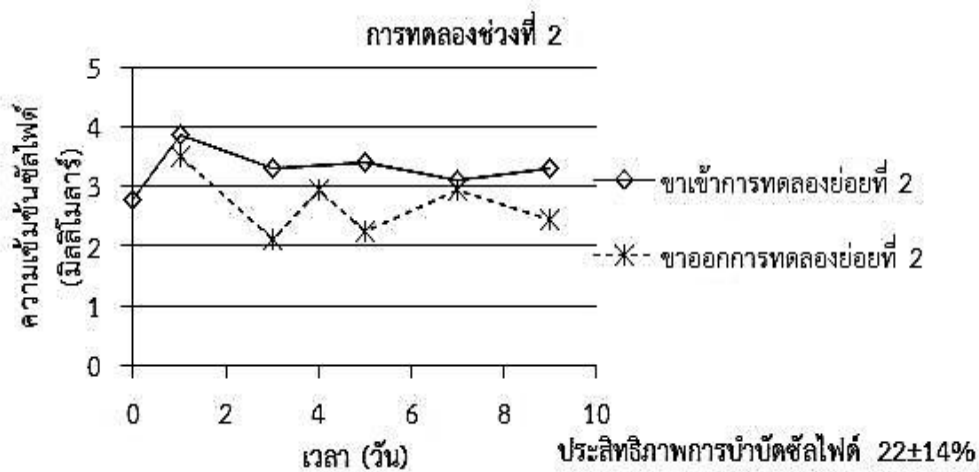
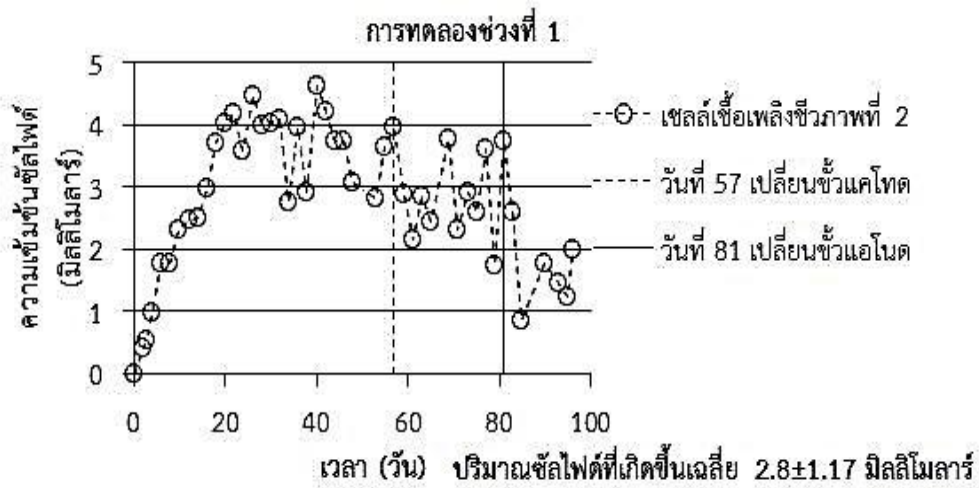
ภาพที่ 4 - 48 สรุปกราฟความเข้มข้นซัลเฟตในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2

จากภาพที่ 4-48 ในช่วงเริ่มต้นของการเดินระบบของการทดลองช่วงที่ 1 นั้น ประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตยังต่ำอาจเนื่องมาจากในระบบยังมีแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตในปริมาณน้อยเพราะตะกอนเริ่มต้นนำมาจากตะกอนที่ใช้บำบัดในระบบแบบไร้อากาศทั่วไป แต่เมื่อมีการเดินระบบอย่างต่อเนื่องตามเวลาที่อัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.6 แล้วพบว่าประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องมาจากการเพิ่มจำนวนภายในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพของแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตที่สามารถใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน ดังจะเห็นได้จากผลการวิเคราะห์ชนิดของจุลินทรีย์ที่พบแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเพิ่มขึ้นในการทดลองช่วงที่ 3 ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่อยู่ในคลาส Deltaproteobacteria สายพันธุ์ *Desulfococcus spp.*, *Desulfosarcina spp.* และ *Desulfovibrio spp.* ที่มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นในระบบ ซึ่งแบคทีเรียในกลุ่มนี้จะใช้สารอินทรีย์ เช่น แล็กเตท อะซิเตท เป็นตัวให้อิเล็กตรอน ใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอน และผลิตซัลไฟด์ขึ้นในระบบ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะทำให้ปริมาณซัลเฟตที่มีในระบบลดลง

อย่างไรก็ตามปริมาณซัลเฟตที่ไม่ได้ลดลงมากนักอาจเป็นผลจากการออกซิไดซ์ซัลไฟด์/ซัลเฟอร์ที่เกิดขึ้นในระบบบริเวณขั้วแอโนด ทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับมาเป็นซัลเฟตอีกครั้ง ดังที่พบในการทดลองย่อยชุดที่ (3) ในการทดลองช่วงที่ 2 ดังนั้นปริมาณซัลเฟตที่ตรวจวัดได้จึงน่าจะมาจากทั้งที่คงเหลือหลังจากการเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชันและเกิดขึ้นใหม่จากการออกซิไดซ์ซัลเฟอร์/ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบ

จากผลการทดลองอาจสรุปได้ว่า กลไกการบำบัดซัลเฟตในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองช่วงที่ 1 นั้นจะเกิดจากการบำบัดซัลเฟตโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต (ซึ่งมีปริมาณเพิ่มมากขึ้นหลังการเดินระบบในอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.6) โดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตนั้นปะปนอยู่ในตะกอนจุลินทรีย์เป็นหลัก เนื่องจากแม้ว่ามีการเปลี่ยนขั้วแอโนดในระหว่างการทดลองก็ไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตแต่อย่างใด

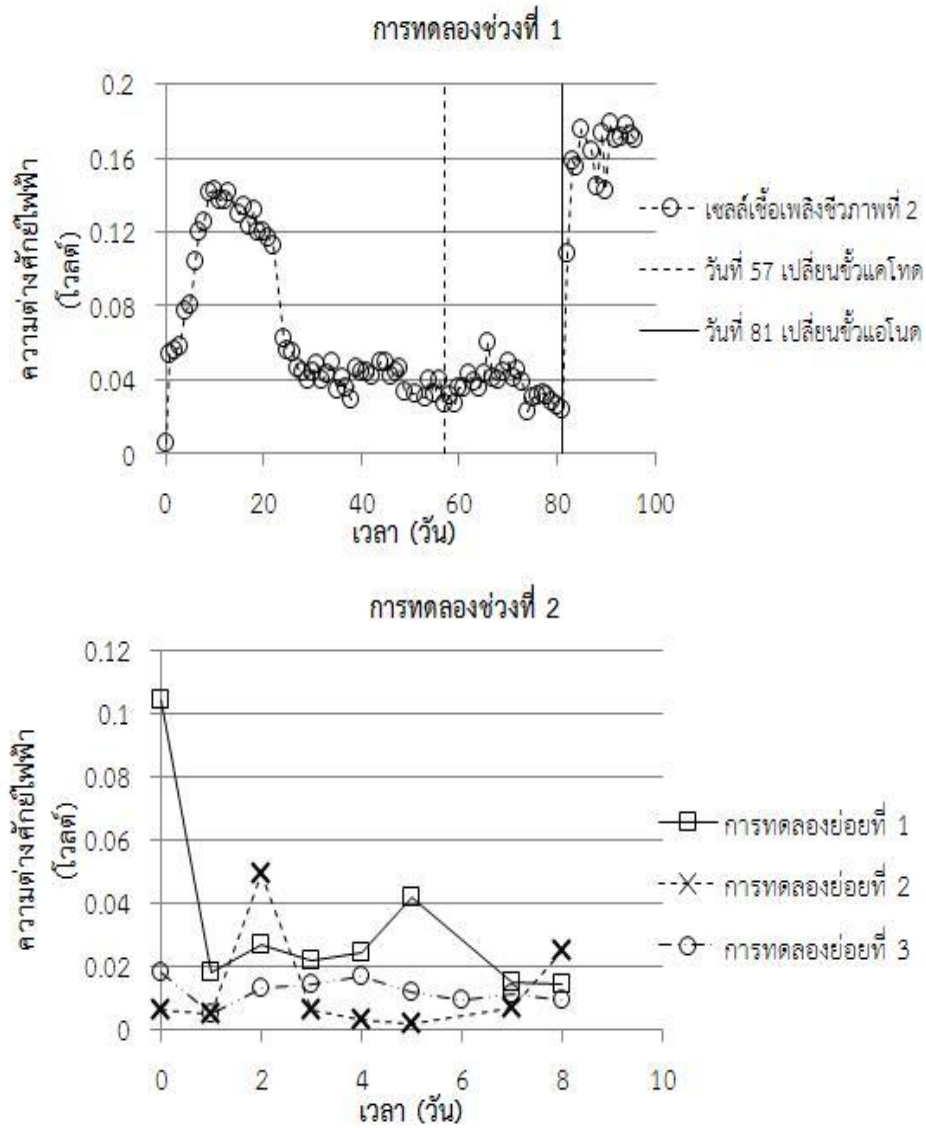
- การผลิตซัลไฟด์



ภาพที่ 4 - 49 สรุปกราฟความเข้มข้นซัลไฟด์ในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2

จากภาพที่ 4-49 กลไกการผลิตซัลไฟด์ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองช่วงที่ 1 คาดว่าน่าจะเกิดจากการบำบัดซัลเฟตโดยแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตซึ่งใช้ซัลเฟตเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจากสารอินทรีย์และเกิดเป็นซัลไฟด์ขึ้นในระบบ ดังจะเห็นได้จากการทดลองช่วงที่ 3 ที่พบปริมาณแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเพิ่มมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดสามารถเกิดปฏิกิริยาซัลไฟด์ออกซิเดชันที่ขั้วแอโนด ซึ่งอาจประกอบด้วย 2 กลไกย่อยคือ 1) การออกซิไดซ์ซัลไฟด์ที่ขั้วแอโนดแบบ abiotic และ 2) การออกซิไดซ์ซัลไฟด์ที่ขั้วแอโนดโดยแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลไฟด์ เกิดผลิตภัณฑ์เป็น ซัลเฟอร์/ซัลเฟต ซึ่งเห็นได้จากการวิเคราะห์ชนิดจุลินทรีย์ที่พบบนขั้วแอโนดหลังการทดลอง ที่พบจุลินทรีย์กลุ่มแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลเฟอร์มีปริมาณมากที่สุด ซึ่งอยู่ในคลาส Betaproteobacteria สายพันธุ์ *Thiobacillus spp.* โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะใช้ซัลไฟด์ในระบบเป็นตัวให้อิเล็กตรอน และใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอน (ในที่นี้อาจเป็นออกซิเจนที่บริเวณขั้วแคโทด) แล้วผลิตซัลเฟอร์หรือซัลเฟตย้อนกลับมาในระบบได้อีกด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อมีการเปลี่ยนขั้วแอโนดใหม่ในระหว่างการทดลอง (ไม่มี biofilm เกาะที่ผิวของขั้วแอโนด) พบว่าปริมาณซัลไฟด์คงเหลือในระบบลดต่ำลง ทั้งนี้ น่าจะมีสาเหตุมาจากซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบนั้นสามารถถูกออกซิไดซ์โดยตรงบริเวณขั้วแอโนดด้วยกลไก abiotic H_2S oxidation ซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์สูง ดังจะเห็นได้จากในการทดลองช่วงที่ 2 การทดลองย่อยชุดที่ (3) ที่ใช้ขั้วแอโนดใหม่ ไม่มี biofilm เกาะที่ผิวของขั้วแอโนดสามารถบำบัดซัลไฟด์ได้มีประสิทธิภาพสูง ($90 \pm 14\%$) กว่า การทดลองย่อยชุดที่ (2) ที่มี biofilm เกาะที่ผิวของขั้วแอโนดซึ่งมีประสิทธิภาพการบำบัดซัลไฟด์ต่ำ ($22 \pm 14\%$)

- การเกิดไฟฟ้า



ภาพที่ 4 - 50 สรุปกราฟความต่างศักย์ไฟฟ้าในการทดลองช่วงที่ 1 และ 2

จากภาพที่ 4-50 ในการทดลองช่วงที่ 1 พบว่า สามารถผลิตไฟฟ้าได้หลังจากการเดินเริ่มเดินระบบไม่นาน แต่หลังจากเดินระบบเป็นระยะเวลาหนึ่ง ความสามารถในการผลิตไฟฟ้าก็ลดลง จากนั้นภายหลังจากมีการเปลี่ยนขั้วแอโนดพบว่า การผลิตไฟฟ้าดีขึ้น จากผลการทดลองอาจสรุปได้ว่า กลไกการเกิดไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองช่วงที่ 1 คาดว่าน่าจะสัมพันธ์กับหลายกลไก ได้แก่ กลไกการเกิดไฟฟ้าโดย exoelectrogenic microorganisms กลไกการเกิดไฟฟ้าโดยแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลเฟอ์/ซัลไฟด์ และกลไกการเกิดไฟฟ้าโดย abiotic H₂S oxidation ที่บริเวณขั้วแอโนด

อย่างไรก็ตาม จากการทดลองช่วงที่ 2 พบว่า การผลิตไฟฟ้าเกิดขึ้นสูงสุดเมื่อมีตะกอนจุลินทรีย์ในระบบร่วมกับขั้วแอโนดที่ไม่มี biofilm ดังจะเห็นได้จากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยในการทดลองย่อยชุดที่ (1) ที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ยสูงสุด (0.022±0.009 โวลต์) เมื่อเทียบกับการทดลองย่อยชุดที่ (2) และ (3) ที่มีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเฉลี่ย 0.0199±0.0155 โวลต์ และ 0.012±0.004 โวลต์ ตามลำดับ

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เดินระบบโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแบบห้องเดี่ยวชนิดที่ใช้อากาศ (ออกซิเจน) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในฝั่งแคโทด เดินระบบแบบต่อเนื่องโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในอัตราส่วนซีโอดีต่อซัลเฟตเท่ากับ 0.6 ซึ่งประกอบด้วยแลกเตท ซัลเฟต และธาตุอาหารอื่นที่จำเป็นสำหรับจุลินทรีย์ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นแหล่งสภาพความเป็นด่าง และเติมตะกอนจุลินทรีย์สายพันธุ์ผสมเป็นหัวเชื้อในการเดินระบบปริมาณ 30% ของปริมาตรถัง ดำเนินการทดลองซ้ำ 2 ชุด จากนั้นเริ่มเดินระบบอย่างต่อเนื่อง กำหนดระยะเวลาเก็บน้ำเท่ากับ 24 ชั่วโมง และใช้ตัวต้านทานภายนอกขนาด 1000 Ω ระหว่างการทดลองบันทึกค่าทางไฟฟ้าอย่างต่อเนื่อง พร้อมทั้งเก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์เมื่อเดินระบบจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

ผลการวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีอยู่ที่ $51 \pm 9.88\%$ และ $57 \pm 10.09\%$ ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดซัลเฟตอยู่ที่ $21 \pm 9\%$ และ $18 \pm 9\%$ ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 2.8 ± 1.13 และ 2.8 ± 1.17 มิลลิโมลาร์ ในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากการทดลองมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.093 โวลต์ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 0.179 โวลต์ สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 และ 2 คือ 0.0043 และ 0.017 วัตต์/ตารางเมตร โดยที่ลักษณะของการสูญเสียความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage loss) เป็นลักษณะของ ohmic loss เป็นหลัก โดยค่าความต้านทานภายในของระบบมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเดินระบบ ซึ่งสาเหตุเกิดจากการสะสมตัวของซัลเฟอร์บนขั้วแอโนด ส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของขั้วลดลง

กลไกการบำบัดซีโอดีคาดว่าเกิดขึ้นจากทั้งตะกอนจุลินทรีย์แขวนลอยและจุลินทรีย์ที่เกาะติดเป็น biofilm บริเวณขั้วแอโนด ส่วนกลไกการบำบัดซัลเฟตเกิดจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟต การเกิดซัลเฟตและบำบัดซัลไฟด์เกิดจากแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลเฟตและกระบวนการ abiotic H_2S oxidation ที่บริเวณขั้วแอโนด สำหรับกลไกการเกิดกระแสไฟฟ้าในระบบคาดว่าเกิดจากจุลินทรีย์กลุ่ม exoelectrogenic microorganisms และแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลเฟต/ซัลไฟด์ รวมถึงกระบวนการ abiotic H_2S oxidation ที่บริเวณขั้วแอโนด

กลุ่มจุลินทรีย์ที่พบส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรีย โดยในตัวอย่างตะกอนเริ่มต้นกลุ่มจุลินทรีย์ที่พบมากที่สุดปริมาณ 30.011% คือ *Clostridium spp.* ส่วนตัวอย่างตะกอนช่วงที่มีกระแสไฟฟ้าสูงในช่วงสองสัปดาห์แรกกลุ่มจุลินทรีย์ที่พบมากที่สุดปริมาณ 50.65 % คือ *Clostridium spp.* เช่นกัน

อย่างไรก็ตามในช่วงท้ายของระบบมีปริมาณจุลินทรีย์กลุ่มแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตเพิ่มมากขึ้น ได้แก่ *Desulfococcus spp.*, *Desulfosacina spp.* และ *Desulfovibrio spp.* และในตัวอย่างตะกอนบนข้าวแอนโดจุลินทรีย์กลุ่มที่พบมากที่สุด 22.516% คือ *Thiobacillus spp.* ซึ่งจัดเป็นแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลเฟอร์/ซัลไฟด์

5.2 ประโยชน์ทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และซัลเฟตรวมถึงการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแบบห้องเดี่ยว อีกทั้งยังเพิ่มความเข้าใจเกี่ยวกับกลไกการบำบัดและการผลิตกระแสไฟฟ้าจากน้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟตด้วยระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์กลุ่มจุลินทรีย์ในระบบยังสามารถช่วยให้เข้าใจกลไกการทำงานในระบบได้มากยิ่งขึ้น ทั้งนี้ระบบเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแบบห้องเดี่ยวเป็นทางเลือกใหม่ในการช่วยดึงกลับพลังงานจากน้ำเสียปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟต ซึ่งมักก่อให้เกิดปัญหาในระบบบำบัดแบบไร้อากาศโดยทั่วไป เนื่องจากซัลเฟตที่ปนเปื้อนในน้ำเสียเมื่อเข้าสู่ระบบการบำบัดแบบไร้อากาศแล้วจะเกิดปฏิกิริยาที่มีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของก๊าซชีวภาพลดลง การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพกับการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟต นอกจากจะช่วยลดปริมาณสารอินทรีย์แล้ว ยังสามารถดึงกลับพลังงานในรูปแบบของกระแสไฟฟ้าได้ด้วย

5.3 ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานวิจัยในอนาคต ควรมีการแยกส่วนการบำบัดสารอินทรีย์และซัลเฟตออกจากการบำบัดซัลไฟด์ที่เกิดขึ้น เนื่องจากเมื่อทั้งสองส่วนอยู่ร่วมกัน ส่งผลให้การบำบัดซัลเฟตจากแบคทีเรียรีดิวซ์ซัลเฟตมีประสิทธิภาพน้อยลง เนื่องจากกระบวนการออกซิไดซ์ซัลไฟด์โดยแบคทีเรียออกซิไดซ์ซัลเฟอร์ส่งผลให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นซัลเฟตอีกครั้ง ทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดซัลเฟตมีค่าต่ำ นอกจากนี้ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพและกลไกการทำงานในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพในการบำบัดสารอินทรีย์และซัลเฟตที่สัดส่วนซีไอดีและซัลเฟตต่างๆ เพิ่มเติมต่อไป

รายการอ้างอิง

- Caporaso, J. G., Lauber, C. L., Walters, W. A., Berg-Lyons, D., Lozupone, C. A., Turnbaugh, P. J., Fierer, N. and Knight, R. 2011. Global patterns of 16S rRNA diversity at a depth of millions of sequences per sample. PNAS. 108:4516-22.
- Costanzo, S. D., Murby, J. and Bates, J. 2005. Ecosystem response to antibiotics entering the aquatic environment. Mar Pollut Bull. 51:218-23.
- Du, Z., Li, H. and Gu, T. 2007. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. Biotechnology Advances. 25:464-82.
- Dutta, P. K., Rabaey, K., Yuan, Z. and Keller, J. 2008. Spontaneous electrochemical removal of aqueous sulfide. Water research. 42:4965 – 75.
- Hassan, S. H. A., Ginkel, S. W. V., Kim, S. M., Yoon, S. H., Joo, J. H., Shin, B. S., Jeon, B. H., Bae, W. and Oh, S. E. 2010. Isolation and characterization of *Acidithiobacillus caldus* from a sulfur-oxidizing bacterial biosensor and its role in detection of toxic chemicals. Journal of Microbiological Methods. 82:151-5.
- Khanal, S. M. and Huang, J. C. 2003. Anaerobic treatment of high sulfate wastewater with oxygenation to control sulfide toxicity. Journal of Environmental Engineering. 12:1104-11.
- Knobel, A. N. and Lewis, A. E. 2002. A mathematical model of a high sulphate wastewater anaerobic treatment system. Water Research. 36:257-65.
- Kümmerer, K. 2009. Antibiotics in the aquatic environment-A review-Part II. Chemosphere. 75:411-35.
- Lin, C. Y. and Chen, H. P. 2006. Sulfate effect on fermentative hydrogen production using anaerobic mixed microflora. International Journal of Hydrogen Energy. 31: 953 – 60.
- Liu, H. and Logan, B. E. 2004. Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in presence and absence of a proton exchange membrane. Environ Sci Technol. 38:4040-6.
- Logan, B. E. 2008 Microbial fuel cells. Hoboken, NJ: A John Wiley & Sons Inc.

- Logan, B. E. 2009. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. Nature reviews Microbiology. 7:375 – 81.
- Medigan, M. T., Martinko, J. M. and Parker, J. 2003 Brock biology of microorganisms 10th edition. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education Inc.
- Nemerow, N. L. and Agardy, F. J. 1998 Strategies of industrial and hazardous waste management. Van Nostrand Reinhold, USA: An international Thomson Publishing Company
- Pikaar, I., Rozendal, R. A., Yuan, Z., Keller, J. and Rabaey, K. 2011. Electrochemical sulfide removal from synthetic and real domestic wastewater at high current densities. Water Research. 45:2281-9.
- Rabaey, K., Clauwaert, P., Alterman, P. and Verstraete, W. 2005. Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation. Environ Sci Technol. 39:8077-82.
- Rabaey, K., Sompel, K. V. D., Maignien, L., Boon, N., Aeltermann, P., Clauwaert, P., Schamphelaire, L. D., Pham, H. T., Vermeulen, J., Verhaege, M., Lens, P. and Verstraete, W. 2006. Microbial fuel cells for sulfide removal. Environ Sci Technol. 40:5218-24.
- Rittmann, B. E. and McCarty, P. L. 2001 Environmental and biotechnology: Principles and applications. New York, U.S.A: Mc Graw Hill.
- Ryan, O., S.W., C., Colela, W. and Prinz, F. B. 2013 Fuel cell fundamental 2nd edition
- Saritpongteeraka, K. and Chairapat, S. 2008. Effects of pH adjustment by parawood ash and effluent recycle ratio on the performance of anaerobic baffled reactors treating high sulfate wastewater. Bioresource Technology. 99:8987–94.
- Silva, A. J., Varesche, M. B., Foresti, E. and Zaiat, M. 2002. Sulphate removal from industrial wastewater using a packed-bed anaerobic reactor. Process Biochemistry. 37:927–35.
- Sun, M., Mu, Z. X., Chen, Y. P., Sheng, G. P., Liu, X. W., Chen, Y. Z., Zhao, Y., Wang, H. L., Yu, H. Q., Wei, L. and Ma, F. 2009. Microbe-assisted sulfide oxidation in the anode of a microbial fuel cell. Environ Sci Technol. 43:3372-7.
- Sun, M., Tong, Z. H., Sheng, G. P., Chen, Y. Z., Zhang, F., Mu, Z. X., Wang, H. L., Zeng, R. J., Liu, Z. W., Yu, H. Q., Wei, L. and Ma, F. 2010. Microbial communities

- involved in electricity generation from sulfide oxidation in a microbial fuel cell. Biosensors and Bioelectronics. 26:470-6.
- Zhang, B. and Ni, J. 2010. Enhancement of electricity generation and sulfide removal in microbial fuel cells with lead dioxide catalyzed cathode. IEEE.
- Zhang, B., Zhao, H., Shi, C., Zhou, S. and Ni, J. 2009. Simultaneous removal of sulfide and organics with vanadium(V) reduction in microbial fuel cells. J Chem Technol Biotechnol. 84:1780-6.
- Zhang, B. G., Zhou, S. G., Zhao, H. Z., Shi, C. H., Kong, L. C., Sun, J. J., Yang, Y. and Ni, J. R. 2010. Factors affecting the performance of microbial fuel cells for sulfide and vanadium (V) treatment. Bioprocess Biosyst Eng. 33:187-94.
- Zhao, F., Rahunen, N., Varcoe, J. R., Chandra, A., Rossa, C. A., Thumser, A. E. and Slade, R. C. T. 2008. Activated carbon cloth as anode for sulfate removal in a microbial fuel cell. Environ Sci Technol. 42:4971-6.
- Zhao, F., Rahunen, N., Varcoe, J. R., Roberts, A. J., Rossa, C. A., Thumser, A. E. and Slade, R. C. T. 2009. Factors affecting the performance of microbial fuel cells for sulfur pollutants removal. Biosensors and Bioelectronics. 24:1931-6.
- กรมควบคุมมลพิษ. 2554 โครงการค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆ ของน้ำทิ้งและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมและอุตสาหกรรมชุมชน
- เบญจพร บุญชยาอนันต์. 2555. การประยุกต์ใช้แบบคที่เรียรีตีวซ์ซัลเฟตในงานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 17.
- มันสิน ตันทุลเวศน์. 2546 คู่มือวิชาการระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ เล่มที่ 1. กรุงเทพมหานคร: กรมควบคุมมลพิษ.
- ศุภร์นิมิตร สุจิรา. 2555. เซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์กับการบำบัดน้ำเสีย. วารสารสิ่งแวดล้อม 16 (2).
- อลิษา วิลันโท และคณะ. 2012. เทคโนโลยีเอ็นจีเอสและการประยุกต์ในงานวิจัยโอมิกส์. Thai J genet. 5:104-29.

ภาคผนวก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

วิธีคำนวณสัดส่วนซีโอดีต่อซัลเฟต เท่ากับ 0.6 ที่ใช้ในงานวิจัย

| | |
|-------------|--|
| จากสมการ | $O_2 + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O$ |
| | O_2 32 กรัม รับ e^- เท่ากับ $4 e^-$ -eq |
| เพราะฉะนั้น | O_2 8 กรัม รับ e^- เท่ากับ $1 e^-$ -eq |
| ดังนั้น | COD 8 กรัม ให้ e^- เท่ากับ $1 e^-$ -eq |
| | COD 64 กรัม ให้ e^- เท่ากับ $8 e^-$ -eq |

| | |
|------------------|---|
| จากสมการ | $SO_4^{2-} + 10H^+ + 8e^- = H_2S + 4H_2O$ |
| | SO_4^{2-} 96 กรัม รับ e^- เท่ากับ $8 e^-$ -eq |
| เพราะฉะนั้น | ต้องใช้ COD 64 กรัม เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอดีกับ SO_4^{2-} 96 กรัม |
| คิดเป็นอัตราส่วน | COD: $SO_4^{2-} = 64/96 = 0.67$ |

เลือกใช้ อัตราส่วน COD: SO_4^{2-} ในงานวิจัยนี้ = 0.6
 ดังนั้น สัดส่วน SO_4^{2-} จึงสูงกว่า COD เล็กน้อย

ภาคผนวก ข

วิธีคำนวณปริมาณ กรดแลกติก โซเดียมซัลเฟต และโซเดียมไบคาร์บอเนต

คำนวณหาปริมาณ Na_2SO_4 ที่ต้องเติม

อัตราส่วนค่า COD: SO_4^{2-} = 0.6

ต้องการค่าความเข้มข้น COD เท่ากับ 800 mg/L

ดังนั้นความเข้มข้นของ SO_4^{2-} ที่ต้องการจึงเท่ากับ $800/0.6 = 1333$ mg/L

สำหรับปริมาตรน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 1 L

SO_4^{2-} 96 g มาจาก Na_2SO_4 142 g

ต้องการ SO_4^{2-} 1.333 g มาจาก $\text{Na}_2\text{SO}_4 (142/96)*1.333 = 1.97$ g = 1,970 mg

ดังนั้นต้องเติม Na_2SO_4 ในปริมาณ 1,970 mg ในน้ำเสียสังเคราะห์ 1 L

คำนวณหาปริมาณกรดแลกติก ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$) ที่ต้องเติม

จากสมการ $1\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3 + 3\text{O}_2 = 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$

เพราะฉะนั้น 1 mol $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ มีค่า COD เท่ากับ $3*32 = 96$ gCOD = 96,000 mgCOD

คิดปริมาณที่ต้องการของ $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ เพื่อให้มีความเข้มข้น COD เท่ากับ 800 mg/L

96,000 mgCOD มาจาก $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ หนึ่ง 90 g

ต้องการ 800 mgCOD มาจาก $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ หนึ่ง $(90/96000)*800 = 0.75$ g = 750 mg

ดังนั้นต้องเติม $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ ในปริมาณ 750 mg ในน้ำเสียสังเคราะห์ 1 L

คำนวณหาปริมาณ NaHCO_3 ที่ต้องเติม

ต้องการสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity, HCO_3^-) เท่ากับ 1,500 mg/L as CaCO_3

คิด mmol/L alkalinity ได้จาก $1,500/50 = 30$ mmol/L alkalinity

1 mol NaHCO_3 ให้ 1 mol HCO_3^-

เพราะฉะนั้น 30 mmol NaHCO_3 ให้ 30 mmol HCO_3^- คิดเป็นน้ำหนัก $0.03*61=1.83$ g HCO_3^-

คิดหาปริมาณน้ำหนักรวมที่ต้องชั่ง NaHCO_3

HCO_3^- 61 g มาจาก NaHCO_3 84 g

ต้องการ HCO_3^- 1.83 g มาจาก $\text{NaHCO}_3 (84/61)*1.83 = 2.52$ g = 2,520 mg

ดังนั้นต้องเติม NaHCO_3 ในปริมาณ 2,520 mg ในน้ำเสียสังเคราะห์ 1 L

ภาคผนวก ค

ผลการทดลองและผลการวิเคราะห์ของงานวิจัย

- ผลการวิเคราะห์ค่าซีไอดีของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ในการทดลองช่วงที่ 1

| วันที่ | ความเข้มข้นซีไอดีขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซีไอดีขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|--------|---|--|----------------------------|
| 0 | 889 | | |
| 2 | 1067 | 533 | 50 |
| 4 | 750 | 333 | 56 |
| 6 | 750 | 584 | 22 |
| 8 | 834 | 500 | 40 |
| 10 | 750 | 417 | 44 |
| 12 | 834 | 500 | 40 |
| 14 | 809 | 444 | 45 |
| 16 | 809 | 375 | 54 |
| 18 | 827 | 574 | 31 |
| 20 | 827 | 400 | 52 |
| 22 | 800 | 510 | 36 |
| 24 | 792 | 451 | 43 |
| 26 | 689 | 422 | 39 |
| 28 | 792 | 396 | 50 |
| 30 | 876 | 465 | 47 |
| 32 | 876 | 383 | 56 |
| 34 | 794 | 383 | 52 |
| 36 | 657 | 356 | 46 |
| 38 | 734 | 329 | 55 |
| 40 | 810 | 354 | 56 |
| 42 | 734 | 354 | 52 |
| 44 | 805 | 453 | 44 |
| 46 | 780 | 377 | 52 |
| 48 | 805 | 453 | 44 |
| 55 | 800 | 480 | 40 |
| 57 | 800 | 364 | 55 |
| 59 | 800 | 327 | 59 |

| วันที่ | ความเข้มข้นซีโอดีขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซีโอดีขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|-----------|---|--|----------------------------|
| 61 | 800 | 291 | 64 |
| 63 | 800 | 364 | 55 |
| 65 | 800 | 364 | 55 |
| 69 | 897 | 410 | 54 |
| 71 | 1000 | 436 | 56 |
| 73 | 854 | 388 | 55 |
| 75 | 777 | 350 | 55 |
| 77 | 816 | 427 | 48 |
| 79 | 816 | 427 | 48 |
| 81 | 854 | 388 | 55 |
| 83 | 854 | 388 | 55 |
| 85 | 1010 | 544 | 46 |
| 87 | 780 | 203 | 74 |
| 89 | 746 | 305 | 59 |
| 91 | 712 | 237 | 67 |
| 93 | 712 | 237 | 67 |
| 95 | 780 | 237 | 70 |
| 96 | | 237 | |
| ค่าเฉลี่ย | | | 50.8475815 |
| SD | | | 9.87636884 |

- ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองช่วงที่ 1

| วันที่ | ความเข้มข้นซีโอดีขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซีโอดีขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|--------|---|--|----------------------------|
| 0 | 889 | | |
| 2 | 1067 | 711 | 33 |
| 4 | 750 | 250 | 67 |
| 6 | 750 | 333 | 56 |
| 8 | 834 | 500 | 40 |
| 10 | 750 | 417 | 44 |
| 12 | 834 | 333 | 60 |
| 14 | 809 | 361 | 55 |

| วันที่ | ความเข้มข้นซีโอดีขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซีโอดีขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|--------|---|--|----------------------------|
| 16 | 809 | 333 | 59 |
| 18 | 827 | 480 | 42 |
| 20 | 827 | 373 | 55 |
| 22 | 800 | 347 | 57 |
| 24 | 792 | 372 | 53 |
| 26 | 689 | 396 | 43 |
| 28 | 792 | 343 | 57 |
| 30 | 876 | 356 | 59 |
| 32 | 876 | 383 | 56 |
| 34 | 794 | 383 | 52 |
| 36 | 657 | 329 | 50 |
| 38 | 734 | 278 | 62 |
| 40 | 810 | 304 | 63 |
| 42 | 734 | 329 | 55 |
| 44 | 805 | 377 | 53 |
| 46 | 780 | 352 | 55 |
| 48 | 805 | 377 | 53 |
| 55 | 800 | 400 | 50 |
| 57 | 800 | 327 | 59 |
| 59 | 800 | 436 | 45 |
| 61 | 800 | 182 | 77 |
| 63 | 800 | 436 | 45 |
| 65 | 800 | 327 | 59 |
| 69 | 897 | 410 | 54 |
| 71 | 1000 | 436 | 56 |
| 73 | 854 | 350 | 59 |
| 75 | 777 | 233 | 70 |
| 77 | 816 | 388 | 52 |
| 79 | 816 | 427 | 48 |
| 81 | 854 | 311 | 64 |
| 83 | 854 | 272 | 68 |
| 85 | 1010 | 388 | 62 |

| วันที่ | ความเข้มข้นซีโอดีขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซีโอดีขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|-----------|---|--|----------------------------|
| 87 | 780 | 136 | 83 |
| 89 | 746 | 339 | 55 |
| 91 | 712 | 169 | 76 |
| 93 | 712 | 237 | 67 |
| 95 | 780 | 203 | 74 |
| 96 | | 237 | |
| ค่าเฉลี่ย | | | 57 |
| SD | | | 10.0854124 |

- ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีของการทดลองย่อยชุดที่ 1 ในการทดลองช่วงที่ 2

| วันที่ | ความเข้มข้นซีโอดีขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซีโอดีขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|-----------|---|--|----------------------------|
| 0 | 816 | | |
| 1 | 800 | 480 | 40 |
| 3 | 736 | 448 | 39 |
| 5 | 768 | 416 | 46 |
| 7 | 768 | 288 | 63 |
| 9 | 784 | 353 | 55 |
| ค่าเฉลี่ย | | | 48 |
| SD | | | 10 |

- ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีของการทดลองย่อยชุดที่ 2 ในการทดลองช่วงที่ 2

| วันที่ | ความเข้มข้นซีโอดีขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซีโอดีขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|-----------|---|--|----------------------------|
| 0 | 896 | | |
| 1 | 800 | 480 | 40 |
| 3 | 736 | 448 | 39 |
| 5 | 768 | 384 | 50 |
| 7 | 768 | 352 | 54 |
| 9 | 824 | 314 | 62 |
| ค่าเฉลี่ย | | | 49 |
| SD | | | 10 |

- ผลการวิเคราะห์ซัลเฟตของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ในการทดลองช่วงที่ 1

| วันที่ | ความเข้มข้นซัลเฟตขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซัลเฟตขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|--------|---|--|----------------------------|
| 0 | 1458 | | |
| 2 | 1402 | 1180 | 16 |
| 4 | 1499 | 1388 | 7 |
| 6 | 1472 | 1319 | 10 |
| 8 | 1499 | 1305 | 13 |
| 10 | 1333 | 1305 | 2 |
| 12 | 1472 | 1305 | 11 |
| 14 | 1472 | 1222 | 17 |
| 16 | 1485 | 1180 | 21 |
| 18 | 1472 | 1138 | 23 |
| 20 | 1569 | 1027 | 35 |
| 22 | 1485 | 944 | 36 |
| 24 | 1569 | 1277 | 19 |
| 26 | 1569 | 1194 | 24 |
| 28 | 1610 | 1138 | 29 |
| 30 | 1555 | 1110 | 29 |
| 32 | 1583 | 1110 | 30 |
| 34 | 1569 | 916 | 42 |
| 36 | 1555 | 1194 | 23 |
| 38 | 1583 | 999 | 37 |
| 40 | 1610 | 1055 | 34 |
| 42 | 1527 | 1110 | 27 |
| 44 | 1555 | 1166 | 25 |
| 46 | 1472 | 1222 | 17 |
| 48 | 1499 | 1277 | 15 |
| 55 | 1499 | 1055 | 30 |
| 57 | 1472 | 1110 | 25 |
| 59 | 1499 | 1388 | 7 |
| 61 | 1472 | 1360 | 8 |
| 63 | 1444 | 1249 | 13 |
| 65 | 1472 | 1194 | 19 |

| วันที่ | ความเข้มข้นซัลเฟตขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซัลเฟตขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|-----------|---|--|----------------------------|
| 69 | 1472 | 1083 | 26 |
| 71 | 1333 | 1166 | 13 |
| 73 | 1333 | 1138 | 15 |
| 75 | 1472 | 1194 | 19 |
| 77 | 1472 | 1138 | 23 |
| 79 | 1472 | 1194 | 19 |
| 81 | 1472 | 1083 | 26 |
| 83 | 1472 | 1333 | 9 |
| 85 | 1472 | 1194 | 19 |
| 87 | 1499 | 1166 | 22 |
| 89 | 1527 | 1083 | 29 |
| 91 | 1472 | 1138 | 23 |
| 93 | 1472 | 1166 | 21 |
| 95 | 1472 | 1166 | 21 |
| 96 | | 1055 | |
| ค่าเฉลี่ย | | | 21 |
| SD | | | 9 |

- ผลการวิเคราะห์ซัลเฟตของเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองครั้งที่ 1

| วันที่ | ความเข้มข้นซัลเฟตขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซัลเฟตขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|--------|---|--|----------------------------|
| 0 | 1458 | | |
| 2 | 1402 | 1180 | 16 |
| 4 | 1499 | 1416 | 6 |
| 6 | 1472 | 1319 | 10 |
| 8 | 1499 | 1305 | 13 |
| 10 | 1333 | 1305 | 2 |
| 12 | 1472 | 1305 | 11 |
| 14 | 1472 | 1152 | 22 |
| 16 | 1485 | 1027 | 31 |
| 18 | 1472 | 1027 | 30 |
| 20 | 1569 | 944 | 40 |

| วันที่ | ความเข้มข้นซัลเฟตขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซัลเฟตขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|--------|---|--|----------------------------|
| 22 | 1485 | 1027 | 31 |
| 24 | 1569 | 1277 | 19 |
| 26 | 1569 | 1194 | 24 |
| 28 | 1610 | 1166 | 28 |
| 30 | 1555 | 1222 | 21 |
| 32 | 1583 | 1194 | 25 |
| 34 | 1569 | 1194 | 24 |
| 36 | 1555 | 1194 | 23 |
| 38 | 1583 | 1194 | 25 |
| 40 | 1610 | 1222 | 24 |
| 42 | 1527 | 1138 | 25 |
| 44 | 1555 | 1166 | 25 |
| 46 | 1472 | 1055 | 28 |
| 48 | 1499 | 1305 | 13 |
| 55 | 1499 | 1110 | 26 |
| 57 | 1472 | 1166 | 21 |
| 59 | 1499 | 1444 | 4 |
| 61 | 1472 | 1360 | 8 |
| 63 | 1444 | 1305 | 10 |
| 65 | 1472 | 1333 | 9 |
| 69 | 1472 | 1166 | 21 |
| 71 | 1333 | 1194 | 10 |
| 73 | 1333 | 1222 | 8 |
| 75 | 1472 | 1388 | 6 |
| 77 | 1472 | 1333 | 9 |
| 79 | 1472 | 1277 | 13 |
| 81 | 1472 | 1360 | 8 |
| 83 | 1472 | 1305 | 11 |
| 85 | 1472 | 1333 | 9 |
| 87 | 1499 | 1166 | 22 |
| 89 | 1527 | 1222 | 20 |
| 91 | 1472 | 1166 | 21 |

| วันที่ | ความเข้มข้นซัลเฟตขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซัลเฟตขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|-----------|---|--|----------------------------|
| 93 | 1472 | 1222 | 17 |
| 95 | 1472 | 1083 | 26 |
| 96 | | 1194 | |
| ค่าเฉลี่ย | | | 18 |
| SD | | | 9 |

- ผลการวิเคราะห์ค่าซัลเฟตของการทดลองย่อยชุดที่ 1 ในการทดลองช่วงที่ 2

| วันที่ | ความเข้มข้นซัลเฟตขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซัลเฟตขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|-----------|---|--|----------------------------|
| 0 | 1499 | | |
| 3 | 1472 | 1360 | 8 |
| 5 | 1472 | 1333 | 9 |
| 7 | 1527 | 1277 | 16 |
| 9 | 1527 | 1249 | 18 |
| ค่าเฉลี่ย | | | 13 |
| SD | | | 5 |

- ผลการวิเคราะห์ค่าซัลเฟตของการทดลองย่อยชุดที่ 2 ในการทดลองช่วงที่ 2

| วันที่ | ความเข้มข้นซัลเฟตขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซัลเฟตขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) |
|-----------|---|--|
| 0 | 0 | |
| 3 | 0 | 27 |
| 5 | 0 | 27 |
| 7 | 0 | 27 |
| 9 | 0 | 0 |
| ค่าเฉลี่ย | | 20 |
| SD | | 14 |

- ผลการวิเคราะห์ค่าซัลเฟตของการทดลองย่อยชุดที่ 3 ในการทดลองช่วงที่ 2

| วันที่ | ความเข้มข้นซัลเฟตขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซัลเฟตขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) |
|-----------|---|--|
| 0 | 0 | |
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 406 |
| 3 | 0 | 433 |
| 4 | 0 | 514 |
| 5 | 0 | 460 |
| 6 | 0 | 541 |
| 7 | 0 | 460 |
| 8 | | 379 |
| ค่าเฉลี่ย | | 399 |
| SD | | 57.33606889 |

- ผลการวิเคราะห์ค่าซัลไฟต์ ในการทดลองช่วงที่ 1

| วันที่ | ความเข้มข้นซัลไฟต์ของเซลล์ เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซัลไฟต์ของเซลล์ เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 (มิลลิกรัม/ลิตร) |
|--------|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0.32 | 0.39 |
| 4 | 0.55 | 0.99 |
| 6 | 1.30 | 1.78 |
| 8 | 1.43 | 1.76 |
| 10 | 2.18 | 2.31 |
| 12 | 3.35 | 2.47 |
| 14 | 3.42 | 2.49 |
| 16 | 3.63 | 2.98 |
| 18 | 3.60 | 3.71 |
| 20 | 2.56 | 4.02 |
| 22 | 3.55 | 4.20 |
| 24 | 2.39 | 3.58 |
| 26 | 4.12 | 4.46 |
| 28 | 3.58 | 4.00 |

| วันที่ | ความเข้มข้นซัลไฟด์ของเซลล์ เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซัลไฟด์ของเซลล์ เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 (มิลลิกรัม/ ลิตร) |
|-----------|---|--|
| 30 | 3.96 | 4.02 |
| 32 | 3.25 | 4.08 |
| 34 | 3.88 | 2.75 |
| 36 | 2.75 | 3.96 |
| 38 | 4.60 | 2.90 |
| 40 | 3.89 | 4.64 |
| 42 | 4.52 | 4.21 |
| 44 | 4.21 | 3.74 |
| 46 | 3.57 | 3.74 |
| 48 | 3.55 | 3.08 |
| 53 | 1.80 | 2.80 |
| 57 | 3.40 | 3.96 |
| 59 | 2.09 | 2.90 |
| 61 | 1.39 | 2.16 |
| 63 | 3.12 | 2.86 |
| 65 | 3.64 | 2.45 |
| 69 | 2.81 | 3.77 |
| 71 | 1.76 | 2.32 |
| 73 | 2.38 | 2.91 |
| 75 | 2.10 | 2.60 |
| 77 | 2.80 | 3.62 |
| 79 | 3.48 | 1.75 |
| 81 | 2.55 | 3.74 |
| 83 | 2.95 | 2.58 |
| 85 | 2.91 | 0.85 |
| 90 | 1.92 | 1.77 |
| 93 | 2.62 | 1.45 |
| 95 | 3.03 | 1.24 |
| 96 | 3.11 | 1.98 |
| ค่าเฉลี่ย | 2.787119998 | 2.785635661 |
| SD | 1.129763593 | 1.172073002 |

- ผลการวิเคราะห์ค่าซัลไฟด์ของการทดลองย่อยชุดที่ 1 ในการทดลองช่วงที่ 2

| วันที่ | ความเข้มข้นซัลไฟด์ขาเข้า (มิลลิกรัม/ลิตร) | ความเข้มข้นซัลไฟด์ขาออก (มิลลิกรัม/ลิตร) |
|-----------|--|---|
| 0 | 0 | |
| 1 | 0 | 2.49 |
| 2 | 0 | 3.28 |
| 3 | 0 | 3.02 |
| 4 | 0 | 3.76 |
| 5 | 0 | 3.42 |
| 7 | 0 | 2.16 |
| 9 | 0 | 3.03 |
| ค่าเฉลี่ย | | 3.02 |
| SD | | 0.55 |

- ผลการวิเคราะห์ค่าซัลไฟด์ของการทดลองย่อยชุดที่ 2 ในการทดลองช่วงที่ 2

| วันที่ | ความเข้มข้นซัลไฟด์ขาเข้า (มิลลิโมลาร์) | ความเข้มข้นซัลไฟด์ขาออก (มิลลิโมลาร์) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|-----------|---|--|----------------------------|
| 0 | 3 | | |
| 1 | 4 | 3 | 10 |
| 3 | 3 | 2 | 36 |
| 5 | 3 | 2 | 33 |
| 7 | 3 | 3 | 5 |
| 9 | 3 | 2 | 25 |
| ค่าเฉลี่ย | 3 | 2.7 | 22 |
| SD | 0.37 | 0.52 | 14 |

- ผลการวิเคราะห์ค่าซัลไฟด์ของการทดลองย่อยชุดที่ 3 ในการทดลองช่วงที่ 2

| วันที่ | ความเข้มข้นซัลไฟด์ขาเข้า (มิลลิโมลาร์) | ความเข้มข้นซัลไฟด์ขาออก (มิลลิโมลาร์) | ประสิทธิภาพการบำบัด (%) |
|-----------|---|--|----------------------------|
| 0 | 4.10 | | |
| 1 | 4.22 | 1.79 | 58 |
| 2 | 4.19 | 0.24 | 94 |
| 3 | 4.40 | 0.28 | 94 |
| 4 | 4.13 | 0.17 | 96 |
| 5 | 4.28 | 0.25 | 94 |
| 6 | 4.46 | 0.13 | 97 |
| 7 | 4.10 | 0.21 | 95 |
| 8 | | 0.06 | |
| ค่าเฉลี่ย | 4.23 | 0.39 | 90 |
| SD | 0.14 | 0.57 | 14 |

- ผลการวิเคราะห์ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์
เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 1 ในการทดลองช่วงที่ 1

| วันที่ | ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) | ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมป์/ตารางเมตร) |
|--------|----------------------------|--|
| 0 | 0.002 | 0.0008 |
| 1 | 0.006 | 0.0024 |
| 2 | 0.008 | 0.0032 |
| 3 | 0.018 | 0.0072 |
| 4 | 0.028 | 0.0112 |
| 5 | 0.052 | 0.0208 |
| 6 | 0.084 | 0.0336 |
| 7 | 0.079 | 0.0316 |
| 8 | 0.075 | 0.03 |
| 9 | 0.08 | 0.032 |
| 10 | 0.092 | 0.0368 |
| 11 | 0.088 | 0.0352 |
| 12 | 0.08 | 0.032 |
| 13 | 0.085 | 0.034 |
| 15 | 0.091 | 0.0364 |

| วันที่ | ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) | ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมป์/ตารางเมตร) |
|--------|----------------------------|--|
| 16 | 0.093 | 0.0372 |
| 17 | 0.082 | 0.0328 |
| 18 | 0.093 | 0.0372 |
| 19 | 0.077 | 0.0308 |
| 20 | 0.078 | 0.0312 |
| 21 | 0.076 | 0.0304 |
| 22 | 0.078 | 0.0312 |
| 24 | 0.062 | 0.0248 |
| 25 | 0.062 | 0.0248 |
| 26 | 0.065 | 0.026 |
| 27 | 0.052 | 0.0208 |
| 28 | 0.054 | 0.0216 |
| 29 | 0.036 | 0.0144 |
| 30 | 0.034 | 0.0136 |
| 31 | 0.036 | 0.0144 |
| 32 | 0.04 | 0.016 |
| 33 | 0.027 | 0.0108 |
| 34 | 0.032 | 0.0128 |
| 35 | 0.024 | 0.0096 |
| 36 | 0.027 | 0.0108 |
| 37 | 0.04 | 0.016 |
| 38 | 0.024 | 0.0096 |
| 39 | 0.022 | 0.0088 |
| 40 | 0.026 | 0.0104 |
| 41 | 0.024 | 0.0096 |
| 42 | 0.025 | 0.01 |
| 44 | 0.025 | 0.01 |
| 45 | 0.022 | 0.0088 |
| 46 | 0.024 | 0.0096 |
| 47 | 0.02 | 0.008 |
| 48 | 0.034 | 0.0136 |
| 49 | 0.021 | 0.0084 |

| วันที่ | ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) | ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมป์/ตารางเมตร) |
|--------|----------------------------|--|
| 51 | 0.024 | 0.0096 |
| 53 | 0.02 | 0.008 |
| 54 | 0.018 | 0.0072 |
| 55 | 0.02 | 0.008 |
| 56 | 0.019 | 0.0076 |
| 57 | 0.009 | 0.0036 |
| 58 | 0.013 | 0.0052 |
| 59 | 0.017 | 0.0068 |
| 60 | 0.014 | 0.0056 |
| 61 | 0.022 | 0.0088 |
| 62 | 0.019 | 0.0076 |
| 63 | 0.016 | 0.0064 |
| 64 | 0.023 | 0.0092 |
| 65 | 0.021 | 0.0084 |
| 66 | 0.012 | 0.0048 |
| 67 | 0.02 | 0.008 |
| 68 | 0.014 | 0.0056 |
| 69 | 0.014 | 0.0056 |
| 70 | 0.02 | 0.008 |
| 71 | 0.015 | 0.006 |
| 72 | 0.015 | 0.006 |
| 73 | 0.023 | 0.0092 |
| 74 | 0.016 | 0.0064 |
| 75 | 0.014 | 0.0056 |
| 76 | 0.012 | 0.0048 |
| 77 | 0.023 | 0.0092 |
| 78 | 0.021 | 0.0084 |
| 79 | 0.024 | 0.0096 |
| 80 | 0.03 | 0.012 |
| 81 | 0.016 | 0.0064 |
| 82 | 0.013 | 0.0052 |
| 83 | 0.052 | 0.0208 |

| วันที่ | ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) | ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมป์/ตารางเมตร) |
|--------|----------------------------|---|
| 85 | 0.049 | 0.0196 |
| 87 | 0.059 | 0.0236 |
| 88 | 0.047 | 0.0188 |
| 89 | 0.032 | 0.0128 |
| 90 | 0.146 | 0.0584 |
| 91 | 0.094 | 0.0376 |
| 92 | 0.055 | 0.022 |
| 93 | 0.057 | 0.0228 |
| 94 | 0.024 | 0.0096 |
| 95 | 0.015 | 0.006 |
| 96 | 0.009 | 0.0036 |

- ผลการวิเคราะห์ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของเซลล์
เชื้อเพลิงชีวภาพที่ 2 ในการทดลองครั้งที่ 1

| วันที่ | ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) | ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมป์/ตารางเมตร) |
|--------|----------------------------|---|
| 0 | 0.006 | 0.0024 |
| 1 | 0.054 | 0.0216 |
| 2 | 0.056 | 0.0224 |
| 3 | 0.058 | 0.0232 |
| 4 | 0.077 | 0.0308 |
| 5 | 0.08 | 0.032 |
| 6 | 0.104 | 0.0416 |
| 7 | 0.12 | 0.048 |
| 8 | 0.125 | 0.05 |
| 9 | 0.141 | 0.0564 |
| 10 | 0.142 | 0.0568 |
| 11 | 0.137 | 0.0548 |
| 12 | 0.137 | 0.0548 |
| 13 | 0.141 | 0.0564 |
| 15 | 0.13 | 0.052 |
| 16 | 0.134 | 0.0536 |

| วันที่ | ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) | ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมป์/ตารางเมตร) |
|--------|----------------------------|--|
| 17 | 0.123 | 0.0492 |
| 18 | 0.132 | 0.0528 |
| 19 | 0.12 | 0.048 |
| 20 | 0.12 | 0.048 |
| 21 | 0.117 | 0.0468 |
| 22 | 0.113 | 0.0452 |
| 24 | 0.062 | 0.0248 |
| 25 | 0.056 | 0.0224 |
| 26 | 0.055 | 0.022 |
| 27 | 0.046 | 0.0184 |
| 28 | 0.044 | 0.0176 |
| 29 | 0.04 | 0.016 |
| 30 | 0.044 | 0.0176 |
| 31 | 0.048 | 0.0192 |
| 32 | 0.04 | 0.016 |
| 33 | 0.043 | 0.0172 |
| 34 | 0.049 | 0.0196 |
| 35 | 0.034 | 0.0136 |
| 36 | 0.041 | 0.0164 |
| 37 | 0.036 | 0.0144 |
| 38 | 0.029 | 0.0116 |
| 39 | 0.046 | 0.0184 |
| 40 | 0.044 | 0.0176 |
| 41 | 0.044 | 0.0176 |
| 42 | 0.042 | 0.0168 |
| 44 | 0.05 | 0.02 |
| 45 | 0.05 | 0.02 |
| 46 | 0.042 | 0.0168 |
| 47 | 0.044 | 0.0176 |
| 48 | 0.046 | 0.0184 |
| 49 | 0.033 | 0.0132 |
| 51 | 0.032 | 0.0128 |

| วันที่ | ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) | ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมป์/ตารางเมตร) |
|--------|----------------------------|---|
| 53 | 0.03 | 0.012 |
| 54 | 0.04 | 0.016 |
| 55 | 0.032 | 0.0128 |
| 56 | 0.04 | 0.016 |
| 57 | 0.027 | 0.0108 |
| 58 | 0.031 | 0.0124 |
| 59 | 0.027 | 0.0108 |
| 60 | 0.036 | 0.0144 |
| 61 | 0.036 | 0.0144 |
| 62 | 0.043 | 0.0172 |
| 63 | 0.039 | 0.0156 |
| 64 | 0.036 | 0.0144 |
| 65 | 0.043 | 0.0172 |
| 66 | 0.06 | 0.024 |
| 67 | 0.041 | 0.0164 |
| 68 | 0.04 | 0.016 |
| 69 | 0.044 | 0.0176 |
| 70 | 0.05 | 0.02 |
| 71 | 0.041 | 0.0164 |
| 72 | 0.045 | 0.018 |
| 73 | 0.039 | 0.0156 |
| 74 | 0.023 | 0.0092 |
| 75 | 0.03 | 0.012 |
| 76 | 0.031 | 0.0124 |
| 77 | 0.032 | 0.0128 |
| 78 | 0.031 | 0.0124 |
| 79 | 0.028 | 0.0112 |
| 80 | 0.026 | 0.0104 |
| 81 | 0.024 | 0.0096 |
| 82 | 0.108 | 0.0432 |
| 83 | 0.158 | 0.0632 |
| 84 | 0.155 | 0.062 |

| วันที่ | ความต่างศักย์ไฟฟ้า (โวลต์) | ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (แอมป์/ตารางเมตร) |
|--------|----------------------------|---|
| 85 | 0.176 | 0.0704 |
| 87 | 0.164 | 0.0656 |
| 88 | 0.145 | 0.058 |
| 89 | 0.173 | 0.0692 |
| 90 | 0.143 | 0.0572 |
| 91 | 0.179 | 0.0716 |
| 92 | 0.17 | 0.068 |
| 93 | 0.171 | 0.0684 |
| 94 | 0.178 | 0.0712 |
| 95 | 0.172 | 0.0688 |
| 96 | 0.17 | 0.068 |

- ผลการวิเคราะห์ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพของการทดลองครั้งที่ 2

| วันที่ | การทดลองย่อยชุดที่ (1) | การทดลองย่อยชุดที่ (2) | การทดลองย่อยชุดที่ (3) |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0 | 0.104 | 0.006 | 0.018 |
| 1 | 0.018 | 0.005 | 0.005 |
| 2 | 0.027 | 0.049 | 0.013 |
| 3 | 0.022 | 0.006 | 0.014 |
| 4 | 0.024 | 0.003 | 0.017 |
| 5 | 0.042 | 0.002 | 0.012 |
| 7 | 0.015 | 0.007 | 0.011 |
| 8 | 0.014 | 0.025 | 0.009 |
| ค่าเฉลี่ย | 0.022 | 0.0119 | 0.012 |
| SD | 0.009 | 0.0155 | 0.004093 |

- ผลการวิเคราะห์ชนิดจุลินทรีย์ในตัวอย่างตะกอนเริ่มต้น

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|--------------|------------|-------------|----------|--------|
| Unclassified | | | 7396 | 1.625 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 79004 | 17.36 |
| Firmicutes | Clostridia | Soehngenia | 17391 | 3.821 |
| Firmicutes | Clostridia | | 11088 | 2.436 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 10920 | 2.4 |

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|----------------|---------------------|--------------------|----------|--------|
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | Olivibacter | 10684 | 2.348 |
| Firmicutes | Bacilli | Turicibacter | 9490 | 2.085 |
| Firmicutes | Bacilli | Trichococcus | 8191 | 1.8 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 7583 | 1.666 |
| Firmicutes | Clostridia | Tepidibacter | 7031 | 1.545 |
| Chloroflexi | Anaerolineae | Longilinea | 6024 | 1.324 |
| Chloroflexi | Anaerolineae | Bellilinea | 5460 | 1.2 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 5429 | 1.193 |
| Firmicutes | Clostridia | Alkaliphilus | 5352 | 1.176 |
| Firmicutes | Clostridia | Peptostreptococcus | 5248 | 1.153 |
| Firmicutes | Clostridia | | 5073 | 1.115 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Actinobaculum | 4684 | 1.029 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 4663 | 1.025 |
| Bacteroidetes | Bacteroidia | Dysgonomonas | 4205 | 0.924 |
| Firmicutes | Bacilli | Turicibacter | 4077 | 0.896 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 3929 | 0.863 |
| Firmicutes | Clostridia | Carboxydocella | 3610 | 0.793 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Georgenia | 3332 | 0.732 |
| Firmicutes | Clostridia | Heliorestis | 3322 | 0.73 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 3147 | 0.692 |
| Firmicutes | Clostridia | Blautia | 3056 | 0.672 |
| Firmicutes | Clostridia | Sarcina | 3006 | 0.661 |
| Proteobacteria | Betaproteobacteria | Comamonas | 2855 | 0.627 |
| Firmicutes | Clostridia | | 2782 | 0.611 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Rhodoplanes | 2730 | 0.6 |
| Firmicutes | Clostridia | Slackia | 2614 | 0.574 |
| Firmicutes | Clostridia | Atopobium | 2491 | 0.547 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Pedomicrobium | 2434 | 0.535 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 2378 | 0.523 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 2312 | 0.508 |
| Firmicutes | Bacilli | Bacillus | 2287 | 0.503 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Corynebacterium | 2272 | 0.499 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 2248 | 0.494 |

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|----------------|---------------------|----------------------|----------|--------|
| Firmicutes | Bacilli | | 2106 | 0.463 |
| Chloroflexi | Anaerolineae | | 1958 | 0.43 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Inquilinus | 1889 | 0.415 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Actinomyces | 1857 | 0.408 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 1830 | 0.402 |
| Firmicutes | Clostridia | Alkaliphilus | 1806 | 0.397 |
| Firmicutes | Bacilli | Thermobacillus | 1769 | 0.389 |
| Euryarchaeota | Methanobacteria | Methanobacterium | 1720 | 0.378 |
| Firmicutes | Clostridia | Syntrophomonas | 1586 | 0.349 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | | 1576 | 0.346 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Defluvibacter | 1496 | 0.329 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Hyphomicrobium | 1471 | 0.323 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Mycobacterium | 1410 | 0.31 |
| Firmicutes | Bacilli | Vagococcus | 1347 | 0.296 |
| Proteobacteria | Betaproteobacteria | | 1339 | 0.294 |
| Firmicutes | Clostridia | Sedimentibacter | 1260 | 0.277 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfobacca | 1259 | 0.277 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Amaricoccus | 1162 | 0.255 |
| Firmicutes | Clostridia | Carboxydocella | 1145 | 0.252 |
| Firmicutes | Clostridia | Tindallia | 1130 | 0.248 |
| Firmicutes | Clostridia | Acetohalobium | 1118 | 0.246 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | | 1117 | 0.245 |
| Firmicutes | Clostridia | Natronincola | 1114 | 0.245 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | | 1107 | 0.243 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Hyphomicrobium | 1097 | 0.241 |
| Chloroflexi | Dehalococcoidetes | Dehalogenimonas | 1084 | 0.238 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 1078 | 0.237 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 1077 | 0.237 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Streptomyces | 1048 | 0.23 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 1022 | 0.225 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Leucobacter | 1016 | 0.223 |
| Firmicutes | Clostridia | Caloramator | 1015 | 0.223 |
| Firmicutes | Clostridia | Caldicellulosiruptor | 981 | 0.216 |

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|----------------|------------------|-------------------|----------|--------|
| Actinobacteria | Thermoleophilia | Conexibacter | 978 | 0.215 |
| Actinobacteria | Acidimicrobiia | Acidimicrobium | 957 | 0.21 |
| Firmicutes | Clostridia | Alkaliphilus | 953 | 0.209 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 946 | 0.208 |
| Firmicutes | Clostridia | Anaerobranca | 939 | 0.206 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Corynebacterium | 930 | 0.204 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | | 926 | 0.203 |
| Synergistetes | Synergistia | Dethiosulfovibrio | 912 | 0.2 |

- ผลการวิเคราะห์ชนิดจุลินทรีย์ในตัวอย่างตะกอนช่วงที่มีกระแสไฟฟ้าสูง

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|---------------|------------------|--------------------|----------|--------|
| Unclassified | | | 1522 | 0.621 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 71155 | 29.018 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 11539 | 4.706 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 8703 | 3.549 |
| Firmicutes | Clostridia | Soehngenia | 6041 | 2.464 |
| Firmicutes | Clostridia | | 5110 | 2.084 |
| Firmicutes | Clostridia | Tepidibacter | 4954 | 2.02 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 3659 | 1.492 |
| Bacteroidetes | Flavobacteriia | | 3539 | 1.443 |
| Firmicutes | Bacilli | Trichococcus | 3235 | 1.319 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 3212 | 1.31 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | Olivibacter | 3093 | 1.261 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 3079 | 1.256 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 2996 | 1.222 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 2905 | 1.185 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 2740 | 1.117 |
| Firmicutes | Bacilli | Turicibacter | 2678 | 1.092 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 2195 | 0.895 |
| Firmicutes | Clostridia | Alkaliphilus | 2132 | 0.869 |
| Firmicutes | Clostridia | | 2100 | 0.856 |
| Firmicutes | Clostridia | Peptostreptococcus | 2084 | 0.85 |
| Firmicutes | Clostridia | Sarcina | 1815 | 0.74 |

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|----------------|-----------------------|-----------------|----------|--------|
| Firmicutes | Bacilli | Turcibacter | 1724 | 0.703 |
| Firmicutes | Clostridia | | 1631 | 0.665 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 1429 | 0.583 |
| Firmicutes | Clostridia | Carboxydocella | 1363 | 0.556 |
| Bacteroidetes | Bacteroidia | Dysgonomonas | 1338 | 0.546 |
| Chloroflexi | Anaerolineae | Bellilinea | 1268 | 0.517 |
| Cyanobacteria | Synechococcophycideae | Leptolyngbya | 1089 | 0.444 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Georgenia | 1062 | 0.433 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 1009 | 0.411 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 979 | 0.399 |
| Firmicutes | Clostridia | Blautia | 944 | 0.385 |
| Chloroflexi | Anaerolineae | Longilinea | 923 | 0.376 |
| Bacteroidetes | Bacteroidia | Parabacteroides | 847 | 0.345 |
| Firmicutes | Clostridia | Anaerovibrio | 809 | 0.33 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Acinetobacter | 798 | 0.325 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Actinobaculum | 792 | 0.323 |
| Firmicutes | Clostridia | Slackia | 787 | 0.321 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | | 766 | 0.312 |
| Firmicutes | Bacilli | Thermobacillus | 744 | 0.303 |
| Firmicutes | Bacilli | Vagococcus | 722 | 0.294 |
| Firmicutes | Clostridia | Syntrophomonas | 715 | 0.292 |
| Firmicutes | Bacilli | | 711 | 0.29 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 692 | 0.282 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Rhodoplanes | 688 | 0.281 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Corynebacterium | 683 | 0.279 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 679 | 0.277 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 667 | 0.272 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Pedomicrobium | 662 | 0.27 |
| Firmicutes | Clostridia | Atopobium | 659 | 0.269 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 622 | 0.254 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 615 | 0.251 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Acinetobacter | 586 | 0.239 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | | 579 | 0.236 |

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|----------------|-----------------------|----------------------|----------|--------|
| Firmicutes | Clostridia | Caldicellulosiruptor | 576 | 0.235 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Mycobacterium | 562 | 0.229 |
| Synergistetes | Synergistia | Dethiosulfovibrio | 551 | 0.225 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Corynebacterium | 544 | 0.222 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Inquilinus | 540 | 0.22 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 537 | 0.219 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 534 | 0.218 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Actinomyces | 533 | 0.217 |
| Firmicutes | Clostridia | Caloramator | 522 | 0.213 |
| Firmicutes | Clostridia | Sedimentibacter | 491 | 0.2 |
| Firmicutes | Clostridia | Carboxydocella | 484 | 0.197 |
| Firmicutes | Clostridia | Propionispora | 458 | 0.187 |
| Firmicutes | Bacilli | Bacillus | 457 | 0.186 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | Pedobacter | 449 | 0.183 |
| Bacteroidetes | Bacteroidia | Porphyromonas | 449 | 0.183 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfovibrio | 439 | 0.179 |
| Proteobacteria | Epsilonproteobacteria | Sulfurospirillum | 438 | 0.179 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfococcus | 430 | 0.175 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Hyphomicrobium | 420 | 0.171 |
| Firmicutes | Clostridia | Anaerobranca | 409 | 0.167 |
| Chloroflexi | Anaerolineae | | 407 | 0.166 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Ectothiorhodospira | 404 | 0.165 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 401 | 0.164 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | | 395 | 0.161 |
| Firmicutes | Clostridia | Natronincola | 364 | 0.148 |
| Firmicutes | Clostridia | Acidaminobacter | 350 | 0.143 |
| Euryarchaeota | Methanobacteria | Methanobacterium | 348 | 0.142 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Hyphomicrobium | 343 | 0.14 |
| Firmicutes | Clostridia | Sedimentibacter | 342 | 0.139 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Haliangium | 339 | 0.138 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 332 | 0.135 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 328 | 0.134 |
| Chloroflexi | Dehalococcoidetes | Dehalogenimonas | 320 | 0.13 |

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|----------------|---------------------|------------------|----------|--------|
| Actinobacteria | Actinobacteria | Corynebacterium | 309 | 0.126 |
| Firmicutes | Clostridia | Faecalibacterium | 305 | 0.124 |
| Firmicutes | Clostridia | Tindallia | 296 | 0.121 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfobulbus | 292 | 0.119 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | | 285 | 0.116 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfosarcina | 282 | 0.115 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Leucobacter | 280 | 0.114 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 259 | 0.106 |
| Firmicutes | Erysipelotrichi | Holdemania | 258 | 0.105 |
| Firmicutes | Clostridia | Peptoniphilus | 257 | 0.105 |
| Actinobacteria | Thermoleophilia | Conexibacter | 255 | 0.104 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Cystobacter | 252 | 0.103 |
| Synergistetes | Synergistia | Aminiphilus | 252 | 0.103 |
| Actinobacteria | Acidimicrobiia | Acidimicrobium | 252 | 0.103 |
| Fibrobacteres | Fibrobacteria | Fibrobacter | 250 | 0.102 |
| Chloroflexi | Anaerolineae | Anaerolinea | 247 | 0.101 |
| Firmicutes | Clostridia | Pectinatus | 245 | 0.1 |

- ผลการวิเคราะห์ชนิดจุลินทรีย์ในตัวอย่างตะกอนช่วงปิดระบบ

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|----------------|---------------------|--------------------|----------|--------|
| Unclassified | | | 861 | 0.216 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Ectothiorhodospira | 37709 | 9.44 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 32533 | 8.144 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfococcus | 30819 | 7.715 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfosarcina | 21764 | 5.448 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | Olivibacter | 16031 | 4.013 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfobulbus | 9262 | 2.319 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfovibrio | 7594 | 1.901 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfomicrobium | 7203 | 1.803 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Halorhodospira | 6640 | 1.662 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfuromonas | 6283 | 1.573 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfovibrio | 6129 | 1.534 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 6000 | 1.502 |

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|----------------|---------------------|----------------------|----------|--------|
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfosarcina | 5518 | 1.381 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Halomonas | 5433 | 1.36 |
| Firmicutes | Clostridia | | 5378 | 1.346 |
| Firmicutes | Clostridia | Caldicellulosiruptor | 3851 | 0.964 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfovibrio | 3751 | 0.939 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 3684 | 0.922 |
| Firmicutes | Clostridia | Carboxydocella | 3374 | 0.845 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfobacter | 3372 | 0.844 |
| Synergistetes | Synergistia | Aminobacterium | 2893 | 0.724 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfomicrobium | 2831 | 0.709 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfobulbus | 2597 | 0.65 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 2486 | 0.622 |
| Firmicutes | Clostridia | Oscillospira | 2476 | 0.62 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | | 2397 | 0.6 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfovibrio | 2233 | 0.559 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | | 2230 | 0.558 |
| Bacteroidetes | Bacteroidia | Dysgonomonas | 2187 | 0.547 |
| Fibrobacteres | Fibrobacteria | Fibrobacter | 2045 | 0.512 |
| | | Candidatus | | |
| Synergistetes | Synergistia | Tammella | 2028 | 0.508 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 1909 | 0.478 |
| Chloroflexi | Anaerolineae | Longilinea | 1822 | 0.456 |
| Firmicutes | Clostridia | Pseudoramibacter | 1780 | 0.446 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfobulbus | 1776 | 0.445 |
| Firmicutes | Clostridia | Sulfobacillus | 1761 | 0.441 |
| Firmicutes | Bacilli | Trichococcus | 1758 | 0.44 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfonatronum | 1733 | 0.434 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | | 1661 | 0.416 |
| Chloroflexi | Anaerolineae | Bellilinea | 1557 | 0.39 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfonatronum | 1553 | 0.389 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Syntrophus | 1512 | 0.378 |
| Spirochaetes | Spirochaetes | Treponema | 1490 | 0.373 |
| Firmicutes | Bacilli | Turcibacter | 1483 | 0.371 |

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|----------------|-----------------------|--------------------|----------|--------|
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfomicrobium | 1415 | 0.354 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | | 1390 | 0.348 |
| Firmicutes | Clostridia | | 1278 | 0.32 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfomonile | 1250 | 0.313 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | | 1173 | 0.294 |
| Cyanobacteria | Synechococcophycideae | Leptolyngbya | 1127 | 0.282 |
| Firmicutes | Clostridia | Carboxydocella | 1127 | 0.282 |
| Firmicutes | Bacilli | Turicibacter | 1115 | 0.279 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | | 1081 | 0.271 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 1069 | 0.268 |
| Firmicutes | Clostridia | | 1026 | 0.257 |
| Synergistetes | Synergistia | Dethiosulfovibrio | 1012 | 0.253 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | Pedobacter | 991 | 0.248 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfonatronum | 968 | 0.242 |
| Synergistetes | Synergistia | Aminiphilus | 944 | 0.236 |
| Firmicutes | Clostridia | Sarcina | 932 | 0.233 |
| Firmicutes | Clostridia | Syntrophomonas | 894 | 0.224 |
| Bacteroidetes | Flavobacteriia | | 878 | 0.22 |
| Firmicutes | Clostridia | Thermovenabulum | 871 | 0.218 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | | 858 | 0.215 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfomicrobium | 857 | 0.215 |
| Firmicutes | Clostridia | Slackia | 853 | 0.214 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | Pedobacter | 852 | 0.213 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | | 835 | 0.209 |
| Firmicutes | Clostridia | Peptostreptococcus | 829 | 0.208 |
| Firmicutes | Clostridia | Alkaliphilus | 818 | 0.205 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 806 | 0.202 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfovibrio | 744 | 0.186 |
| Caldithrix | Caldithrixa | Caldithrix | 723 | 0.181 |
| Firmicutes | Clostridia | Soehngenia | 717 | 0.17 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfovibrio | 702 | 0.176 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfobacterium | 691 | 0.173 |
| Firmicutes | Clostridia | Blautia | 682 | 0.171 |

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|----------------|---------------------|--------------------|----------|--------|
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Pedomicrobium | 680 | 0.17 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Syntrophobacter | 679 | 0.17 |
| Chlorobi | Ignavibacteria | Ignavibacterium | 663 | 0.166 |
| Firmicutes | Clostridia | Ammonifex | 640 | 0.16 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Actinobaculum | 625 | 0.156 |
| Firmicutes | Clostridia | Faecalibacterium | 612 | 0.153 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Georgenia | 598 | 0.15 |
| Proteobacteria | Betaproteobacteria | Deefgea | 597 | 0.149 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 595 | 0.149 |
| Firmicutes | Clostridia | Atopobium | 584 | 0.146 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfobacca | 578 | 0.145 |
| Caldithrix | Caldithrixae | Caldithrix | 567 | 0.142 |
| Tenericutes | Mollicutes | Acholeplasma | 563 | 0.141 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 545 | 0.136 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Haliangium | 541 | 0.135 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Cohaesibacter | 529 | 0.132 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Rhodoplanes | 520 | 0.13 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfacinum | 502 | 0.126 |
| Firmicutes | Bacilli | Vagococcus | 498 | 0.125 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Cystobacter | 497 | 0.124 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfofrigus | 489 | 0.122 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 483 | 0.121 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Ectothiorhodospira | 477 | 0.119 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 472 | 0.118 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | | 468 | 0.117 |
| Chloroflexi | Anaerolineae | | 464 | 0.116 |
| Euryarchaeota | Methanobacteria | Methanobacterium | 451 | 0.113 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Acinetobacter | 446 | 0.112 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Inquilinus | 446 | 0.112 |
| Firmicutes | Bacilli | Thermobacillus | 432 | 0.108 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | Actinomyces | 423 | 0.106 |
| Actinobacteria | Actinobacteria | | 420 | 0.105 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriaia | Rhodothermus | 418 | 0.105 |

- ผลการวิเคราะห์ชนิดจุลินทรีย์ในตัวอย่างตะกอนบริเวณเขื่อนเชี่ยวโนด

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|----------------|---------------------|------------------------|----------|--------|
| Unclassified | | | 8151 | 2.224 |
| Proteobacteria | Betaproteobacteria | Thiobacillus | 67949 | 18.539 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Rhodanobacter | 22436 | 6.121 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfomicrobium | 19413 | 5.297 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Alishewanella | 10501 | 2.865 |
| Proteobacteria | Betaproteobacteria | Thiobacillus | 9661 | 2.636 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 9412 | 2.568 |
| Bacteroidetes | Flavobacteriia | Flavobacterium | 9184 | 2.506 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 8794 | 2.399 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Paracoccus | 7783 | 2.123 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | Olivibacter | 7149 | 1.951 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfovibrio | 7030 | 1.918 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Sphingomonas | 5598 | 1.527 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfomicrobium | 5365 | 1.464 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | Pedobacter | 4925 | 1.344 |
| Firmicutes | Clostridia | Pseudoramibacter | 4497 | 1.227 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Paracoccus | 4327 | 1.181 |
| Proteobacteria | Betaproteobacteria | Thiomonas | 4047 | 1.104 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | | 3613 | 0.986 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Shinella | 3253 | 0.888 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfococcus | 3191 | 0.871 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Ectothiorhodospira | 3174 | 0.866 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Rhodanobacter | 2718 | 0.742 |
| Proteobacteria | Betaproteobacteria | Thiobacillus | 2416 | 0.659 |
| Proteobacteria | Betaproteobacteria | Thiobacillus | 2379 | 0.649 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Methylocaldum | 2285 | 0.623 |
| Synergistetes | Synergistia | Candidatus Tammella | 1919 | 0.524 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | Sphingobacterium | 1852 | 0.505 |
| Bacteroidetes | Bacteroidia | Dysgonomonas | 1814 | 0.495 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfobulbus | 1811 | 0.494 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfovibrio | 1707 | 0.466 |

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|----------------|-----------------------|-------------------|----------|--------|
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Hyphomonas | 1508 | 0.411 |
| Proteobacteria | Epsilonproteobacteria | Arcobacter | 1490 | 0.407 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 1488 | 0.406 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfovibrio | 1372 | 0.374 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Rheinheimera | 1260 | 0.344 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 1235 | 0.337 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Ruegeria | 1187 | 0.324 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | Pedobacter | 1172 | 0.32 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Methylocaldum | 1149 | 0.313 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Paracoccus | 1142 | 0.312 |
| Firmicutes | Clostridia | Oscillospira | 1097 | 0.299 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | | 1078 | 0.294 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Halorhodospira | 1062 | 0.29 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Phaeobacter | 1020 | 0.278 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfocapsa | 1013 | 0.276 |
| Synergistetes | Synergistia | Dethiosulfovibrio | 993 | 0.271 |
| Proteobacteria | Betaproteobacteria | Achromobacter | 954 | 0.26 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | | 874 | 0.238 |
| Spirochaetes | Spirochaetes | Treponema | 874 | 0.238 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Pseudoxanthomonas | 858 | 0.234 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Rhodobacter | 835 | 0.228 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Rheinheimera | 828 | 0.226 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Paracoccus | 821 | 0.224 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | | 814 | 0.222 |
| Bacteroidetes | Flavobacteriia | Arenibacter | 807 | 0.22 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Hyphomicrobium | 804 | 0.219 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Brevundimonas | 803 | 0.219 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Mycoplana | 792 | 0.216 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | Pedobacter | 774 | 0.211 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Devosia | 771 | 0.21 |
| Proteobacteria | Betaproteobacteria | | 750 | 0.205 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Thioalkalivibrio | 749 | 0.204 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Pseudomonas | 738 | 0.201 |

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|----------------|-----------------------|-------------------|----------|--------|
| Bacteroidetes | Flavobacteriia | | 735 | 0.201 |
| Firmicutes | Clostridia | Alkaliphilus | 729 | 0.199 |
| Proteobacteria | Betaproteobacteria | Achromobacter | 721 | 0.197 |
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 701 | 0.191 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Anaerospira | 700 | 0.191 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfotalea | 694 | 0.189 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfosarcina | 691 | 0.189 |
| Proteobacteria | Betaproteobacteria | Thiomonas | 688 | 0.188 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Hyphomonas | 664 | 0.181 |
| Chloroflexi | Anaerolineae | Bellilinea | 659 | 0.18 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Pseudomonas | 650 | 0.177 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfuromonas | 650 | 0.177 |
| Firmicutes | Clostridia | | 646 | 0.176 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfomonile | 634 | 0.173 |
| Bacteroidetes | Sphingobacteriia | Sphingobacterium | 631 | 0.172 |
| Firmicutes | Clostridia | Peptococcus | 619 | 0.169 |
| Proteobacteria | Betaproteobacteria | Thauera | 607 | 0.166 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Glaciecola | 606 | 0.165 |
| Cyanobacteria | Synechococcophycideae | Leptolyngbya | 606 | 0.165 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | | 598 | 0.163 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfovibrio | 580 | 0.158 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Phaeobacter | 571 | 0.156 |
| Firmicutes | Bacilli | Macrococcus | 556 | 0.152 |
| Firmicutes | Clostridia | Ammonifex | 548 | 0.15 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfomicrobium | 538 | 0.147 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfosarcina | 534 | 0.146 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | | 518 | 0.141 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfonatrum | 511 | 0.139 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | | 509 | 0.139 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Rhodanobacter | 508 | 0.139 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Pseudoxanthomonas | 497 | 0.136 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | | 495 | 0.135 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfomonile | 485 | 0.132 |

| Phylum | Class | Genus | num_hits | %_hits |
|----------------|---------------------|------------------|----------|--------|
| Firmicutes | Clostridia | Clostridium | 476 | 0.13 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Kaistobacter | 475 | 0.13 |
| Proteobacteria | Gammaproteobacteria | Halomonas | 471 | 0.129 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Paracoccus | 450 | 0.123 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfovibrio | 443 | 0.121 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Roseivivax | 441 | 0.12 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Agrobacterium | 441 | 0.12 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfobacterium | 434 | 0.118 |
| Firmicutes | Clostridia | | 433 | 0.118 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | | 409 | 0.112 |
| Firmicutes | Clostridia | Sulfobacillus | 409 | 0.112 |
| Proteobacteria | Alphaproteobacteria | Hyphomonas | 392 | 0.107 |
| Firmicutes | Clostridia | | 389 | 0.106 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfovibrio | 386 | 0.105 |
| Proteobacteria | Deltaproteobacteria | Desulfovibrio | 385 | 0.105 |

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ นางสาวอชิรญา แสงเจริญ เกิดวันที่ 19 มกราคม พ.ศ. 2532 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2554

ส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ได้เผยแพร่ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13 (13th National Environmental Conference) ในหัวข้อบทความเรื่อง การประยุกต์ใช้เซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพแบบห้องเดียวในการบำบัดน้ำเสียที่มีสารอินทรีย์และซัลเฟตสูง (Treatment of organic wastewater containing high-sulfate using microbial fuel cells) ที่จัดขึ้นวันที่ 26-28 มีนาคม 2557 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รongเมือง กรุงเทพฯ