

รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

พลังงานทดแทนจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ
(Renewable Energy from Microbial Fuel Cell)

โดย

รศ. กัญรัตน์ โหละสุต

ได้รับการสนับสนุนทุนวิจัย ประเภททุนอุดหนุนทั่วไป
ประจำปีงบประมาณ 2554
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีการพัฒนาปรับปรุงเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน โดยปัญหาหลัก ๆ ที่พบในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพคือ การให้ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าที่ต่ำ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเพิ่มความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าโดยออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงเป็นท่อทรงกระบอกขนาดเล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร โดยเจาะรูบริเวณผิวข้างทรงกระบอกเพื่อช่วยให้น้ำเสียไหลเข้ามาภายในเซลล์ โดยการกระเพื่อมของน้ำเสียตามธรรมชาติเข้ามาในเซลล์ ทดแทนการป้อนน้ำเสียโดยใช้ปั๊ม ภายในเซลล์มีการออกแบบไว้คือมี ขั้วไฟฟ้า แคโทด และแอโนดที่ทำจากแกรไฟท์ พบว่าเมื่อใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ประสิทธิภาพสูงขึ้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ทั้ง 10 เซลล์ เจาะลงไปใต้อ่างกอนดินระดับต่าง ๆ กัน 5 7 และ 9 เซนติเมตร ในถังปฏิกรณ์ ขนาด กว้าง*ยาว*ลึก 30*40*20 เซนติเมตร บรรจุด้วยน้ำเสียและตะกอนดินที่นำมาจากบ่อบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยระดับน้ำเสียที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง 16 เซนติเมตร พบว่าเมื่อดำเนินการไป 2 วัน เซลล์เชื้อเพลิงที่มีระดับตะกอนดิน 5 7 และ 10 เซนติเมตรให้กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ 647.47 1,534.91 และ 858.74 มิลลิวัตต์/ตารางเมตร ตามลำดับ และพบว่าความต้านทานภายในที่คำนวณได้จากกำลังสองสูงสุด 18.78 32.71 และ 35.50 โอห์ม ตามลำดับ นั้นแสดงให้เห็นว่า ระดับตะกอนดินที่ 7 เซนติเมตร เซลล์เชื้อเพลิงจะให้กำลังไฟฟ้าที่สูงที่สุดในขณะเดียวกัน ความต้านทานภายในก็สูงขึ้นจากระดับตะกอนดิน 5 เซนติเมตรด้วย และหลังจากผ่านไป 17 วันจะพบว่าประสิทธิภาพในการลดค่า COD โดยเฉลี่ยประมาณ 8.8 มิลลิกรัม/ลิตร/วัน นอกจากนี้การต่อเซลล์แบบอนุกรม จะช่วยทำให้เซลล์มีความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแต่การต่อเซลล์จะไม่เป็นไปเป็นเชิงเส้นตามจำนวนเซลล์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากความต้านทานภายในที่ตัวเซลล์เชื้อเพลิงและการต่อวงจร

ABSTRACT

Microbial fuel cells have developed continuously since the change in the past to the present. The main problem encountered in microbial fuel cells to power density is low. Therefore, this research is to increase the power density of the fuel cell design is a small cylindrical tube 7 Cm diameter. The surface of the cylindrical hole to allow water to flow into the cell by the natural fluctuation of water into the cell, instead to using the pump. The cell is designed with the cathode and anode electrodes were made from graphite felt. It was found that the microbial fuel cell was invented with 7 cm in diameter and 10-cell penetration into the sediment levels in reactor (wide * length * Deep= 30 * 40 * 20 cm) 5, 7 and 9 cm. Filled with the wastewater and sediment taken from KKU wastewater treatment plant. It was found after 2 days of operating with 5, 7 and 10 cm in the sediment that the maximum power at 1,534.91 858.74 and 647.47 mW/m² respectively. And found that the calculated internal resistance was 18.78, 32.71 and 35.50 respectively. The sediment at 7 cm give the fuel cell to highest power density as well as the internal resistance was increase from the sediment level in 5 cm. And after 17 days will be found to be effective in reducing the COD by approximately 8.8 mg/kg/day. In addition, the cell power density increased when the cells stack is connected in series, but the cells are not as linear as the number of cells increased. Since the internal resistance of the fuel cell and the circuit.

สารบัญ

	หน้า
ปก	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	จ
สารบัญตาราง	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบข่ายของงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ประวัติและการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ	3
2.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ	4
2.2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบห้องคู่	4
2.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบห้องเดี่ยว	4
2.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ	4
2.3.1 ส่วนแอโนด	4
2.3.2 ส่วนแคโทด	5
2.4 ระบบนิเวศน์กับสิ่งมีชีวิต	6
2.4.1 ความหมายของระบบนิเวศน์	6
2.4.2 องค์ประกอบของระบบนิเวศน์	6
2.5 ทฤษฎีไฟฟ้าเบื้องต้น	6
2.5.1 กระแสไฟฟ้าของโอห์ม	6
2.5.2 กฎแรงไฟฟ้าของโอห์ม	7
2.5.3 กฎความต้านทานของโอห์ม	7
2.5.4 กำลังไฟฟ้าจากกฎของโอห์ม	7

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง	9
3.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง	9
3.2 การออกแบบเซลล์เชื้อเพลิง	10
3.3 วิธีการวิจัย	11
บทที่ 4 ผลการทดลอง	14
4.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	14
4.1.1 ระดับของตะกอนดิน	16
4.1.2 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง	17
4.2 การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า	18
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	18
5.1 ระดับของตะกอนดิน	17
5.2 การต่อเซลล์แบบอนุกรม	17
5.2 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง	17
บรรณานุกรมและเอกสารอ้างอิง	20
ภาคผนวก	23
ภาคผนวก ก ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	24
ภาคผนวก ข วิธีการวิเคราะห์ค่าซีไอดี โดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด	28

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าความต่างศักย์ที่ได้ ก่อนต่ออนุกรม ขณะต่ออนุกรม และหลังจากต่ออนุกรม ของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีระดับตะกอนดินต่างกันคือ 5, 7 และ 10 เซนติเมตร	16

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.1 การติดแกรไฟท์เฟลท์พื้นที่ประมาณ $122 \pm 2 \text{ cm}^2$ ที่ขอบด้านล่างของเซลล์	9
รูปที่ 3.2 การต่อขั้วแอโนดให้ยาวขึ้นด้านบน พร้อมขั้วแคโทดที่มีโพลีเมอร์อยู่ด้านล่าง	9
รูปที่ 3.3 การนำเซลล์เชื้อเพลิง 10 เซลล์ไปฝังเจาะในตะกอนดินที่เตรียมไว้ในถังพลาสติก	10
รูปที่ 3.4 การนำเซลล์มาปักลงในตะกอนดินที่มีระดับความลึก 5 7 และ 9 เซนติเมตร	11
รูปที่ 3.5 วิธีการต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อจะวัดค่าความต่างศักย์ และ กระแสไฟฟ้า	11
รูปที่ 3.6 การนำเซลล์เชื้อเพลิงต่ออนุกรมเพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า	12
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า (mA/m^2) กับ ศักย์ไฟฟ้า (mV) ของระดับตะกอนดินต่างๆกันคือ 5 cm, 7 cm และ 10 cm	13
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า (mA/m^2) กับ กำลังไฟฟ้า (mW/m^2) ของระดับตะกอนดินต่างๆกันคือ 5 cm, 7 cm และ 10 cm	14
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทาน (Ω) กับ กำลังไฟฟ้า (mW/m^2) ของระดับตะกอนดินต่างๆกันคือ 5 cm, 7 cm และ 10 cm	14

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบัน มีการใช้พลังงานเชื้อเพลิงต่างๆเป็นจำนวนมาก ประกอบกับการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจอย่างต่อเนื่องของประเทศจีนและอินเดีย ซึ่งกลายเป็นผู้บริโภคน้ำมันรายใหญ่ เนื่องจากประชากรทั้งสองประเทศรวมกันคิดเป็นหนึ่งในสามของโลก แต่ในขณะเดียวกันแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิล ได้แก่ น้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ กลับมีแนวโน้มที่จะลดลงอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ปัญหาโลกร้อน (Global warming) เป็นอีกปัญหาหนึ่งที่ทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี โดยเป็นที่ทราบแน่ชัดว่าสาเหตุหลักเกิดจากการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ซึ่งมีความต้องการเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่ในทางกลับกันแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงจากฟอสซิลกลับมีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็ว (ทวิทย์, 2551) มีผลโดยตรงทำให้ปัญหาโลกร้อน (Global warming) ซึ่งเป็นปัญหาที่ทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นทุก ๆ ปี จากสถานการณ์ดังกล่าวจึงมีความต้องการพลังงานใหม่มาทดแทน และพลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ เป็นพลังงานทางเลือกใหม่อีกด้านหนึ่งที่น่าสนใจ ซึ่งจุลินทรีย์สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ที่สภาวะอุณหภูมิใกล้เคียงกับอุณหภูมิร่างกายของมนุษย์ และเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้มีหลากหลายชนิด ซึ่งเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดจะอาศัยอยู่ในน้ำเสียชนิดต่างๆ โดยกระบวนการเมตาบอลิซึมอาหารของเชื้อจุลินทรีย์ ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอน และโปรตอน(H^+) และอิเล็กตรอนนี้จะเคลื่อนที่จากภายในเซลล์เชื้อจุลินทรีย์ โดยผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ ไปยังขั้วแอโนด (ทวิทย์, 2551)

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้า และช่วยบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพดีขึ้น แต่เนื่องจากพลังงานที่ได้มีปริมาณน้อย แต่ได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดสำหรับน้ำเสียในโรงงานจนถึง 170 มิลลิวัตต์ต่อตารางเมตร (Holasut et al., 2009) ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สูง แต่เนื่องจากข้อจำกัดของการออกแบบการหมุนเวียนของน้ำภายในเซลล์เชื้อเพลิงจึงทำให้กำลังงานที่ได้ไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ แม้ว่าจะมีการทำการวิจัยอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ การวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่ แบบห้องเดี่ยว รวมถึง เซลล์ไฟฟ้าจุลชีพที่ได้จากระบบนิเวศน์ เช่น การปลูกพืชตระกูลถั่วเพื่อช่วยเพิ่มความสมดุลในการให้กำลังไฟฟ้า แต่ก็ยังพบว่าในทางปฏิบัติยังให้กระแสไฟฟ้าไม่มากเพียงพอกับความต้องการ อาจเนื่องมาจากในสภาวะที่สร้างขึ้นยังเป็นสภาวะจำลอง (ณัฐวุฒิและธัญนันท์, 2010) ซึ่งยังไม่สามารถจัดว่าเป็นสภาวะธรรมชาติของแหล่งจุลินทรีย์เป็นประเด็นที่สำคัญในการที่จะเพิ่มกำลังไฟฟ้าโดยหาแหล่งน้ำเสียจริง และการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงที่มีลักษณะเหมาะสมทางระบบนิเวศมากขึ้น เพื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้นต่อไปโดยการต่อเซลล์แบบอนุกรม แบบขนาน และแบบผสม (ระหว่างขนานกับอนุกรม) จำนวน 6 เซลล์ต่อชุด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา MFC ในการผลิตกระแสไฟฟ้าให้สามารถใช้งานได้จริงกับเครื่องใช้ไฟฟ้าในชีวิตประจำวันได้ จะเป็นการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนแหล่งใหม่ ที่จะนำมาทดแทนแหล่งพลังงานฟอสซิลที่ลดลง ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีความเข้าใจหลักการทำงานของส่วนประกอบต่าง ๆ ของ MFC อย่างแท้จริง

1.2 วัตถุประสงค์

- เพื่อศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบไม่ใช้เมมเบรนและเมดิเอเตอร์ แบบต่อเนื่อง
- เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ของการใช้พลังงานจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลินทรีย์ซึ่งเป็นพลังงานทางเลือกใหม่ที่ยั่งยืนถาวร
- เพื่อบำบัดน้ำเสียโดยสิ่งมีชีวิตเซลล์เดียวไปพร้อมๆ กับการได้พลังงานไฟฟ้ามา ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการรักษาสิ่งแวดล้อมอีกทางหนึ่งด้วย
- เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพในห้องปฏิบัติการและการเพิ่มขนาดโดยอาศัยทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมาอธิบาย

1.3 ขอบเขตของงาน

- 1.3.1 สามารถเพิ่มกระแสไฟฟ้าที่ผลิตได้ จากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพทางระบบนิเวศน์
- 1.3.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพทางระบบนิเวศน์ ในปัจจัยที่สามารถควบคุมได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เป็นแนวทางในพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ เพื่อการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในอนาคต
- 1.4.2 เพิ่มกำลังไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ พร้อมจดอนุสิทธิบัตร

บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

รายละเอียดที่เกี่ยวข้องจะขอกว่าถึง 4 หัวข้อ เริ่มจากประวัติและการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ก่อนนำไปสู่การแยกประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ แล้วนำมาซึ่งหลักการการทำงานในสภาพแวดล้อมของสิ่งมีชีวิตที่อยู่ร่วมกัน และเรื่องสุดท้ายที่กล่าวถึงคือ ระบบนิเวศน์วิทยาในสภาพแวดล้อมที่สมดุลตามลำดับ

2.1 ประวัติและการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

อิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดจากการย่อยสลายสารอาหารของเชื้อจุลินทรีย์เกิดขึ้นมานานหลายศตวรรษ ซึ่งในสมัยก่อนยังเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ยาก แต่ในปัจจุบันพบว่านักวิทยาศาสตร์สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในนาฬิกาและกล้องถ่ายรูป หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1790 ลูกิ แกวานี เป็นบุคคลแรกที่ค้นพบการผลิตกระแสไฟฟ้าจากสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก ซึ่งเรียกว่า เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ (Microbial Fuel Cell; MFC) และได้เรียกเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา ในปี ค.ศ. 1910 Michael Gress Potter เป็นศาสตราจารย์ที่ได้ทำงานด้านพฤกษศาสตร์แห่งมหาวิทยาลัย Durham ในประเทศอังกฤษ สาธิตให้ดูว่าเชื้อจุลินทรีย์สามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าและส่งกระแสไฟฟ้าจากเชื้อ *Escherichia coli* และยีสต์สายพันธุ์ *Saccharomyces cerevisia* แต่การผลิตไฟฟ้าจาก MFC ของ Potter ยังไม่ประสบความสำเร็จมากนัก เนื่องจากปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้มีปริมาณน้อย หลังจากนั้น Cohen ปี ค.ศ. 1931 ได้สานต่อแนวความคิดของพอดเตอร์ ได้อธิบายว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถสร้างกระแสไฟฟ้าจากการย่อยสลายสารอาหารของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งในงานวิจัยของ Cohen สามารถผลิตความต่างศักย์จาก MFC ที่สถานะไม่มีความต้านทาน (Open Circuit Voltage; OCV) ได้มากกว่า 35 โวลต์ อย่างไรก็ตาม MFC พึ่งได้รับความนิยมนในปี ค.ศ. 1960 ในช่วงที่องค์การนาซา (NASA) ได้ให้ความสนใจในการเปลี่ยนของเสียจากอินทรีย์สารให้เป็นกระแสไฟฟ้าสำหรับใช้ในยานอวกาศ โดยเลือกใช้สาหร่ายและแบคทีเรียเป็นสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กกลุ่มแรกๆ ที่ถูกนำมาใช้ใน MFC ในช่วงกลางศตวรรษที่ 19 Rohrbach และคณะ ได้ออกแบบ MFC โดยนำเชื้อจุลินทรีย์สายพันธุ์ *Clostridium bityricum* มาใช้เพื่อผลิตอิเล็กทรอนิกส์จากกระบวนการหมักกลูโคส จากนั้นในปี ค.ศ. 1963 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพถูกนำออกมาจำหน่ายในท้องตลาดเพื่อเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้ในวิทยุ ในการส่งสัญญาณและอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ในเรือเดินทะเล แต่ในช่วงเวลานั้น MFC เหล่านั้นก็ยังไม่ประสบความสำเร็จในเชิงพาณิชย์เท่าที่ควร จึงทำให้เกิดการลดหายไปจากตลาด ซึ่งไม่เหมือนกับการพัฒนาเทคโนโลยีทางเลือกอื่นๆ (ทวิทย์, 2008)

โดยการศึกษาของทีมงานนักวิจัย และทีมนักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่นได้ทำการวิจัยเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่สามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมทางธรรมชาติ (Holasut et al., 2009) ซึ่งการศึกษานี้เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพนี้เป็นไปอย่างต่อเนื่อง เริ่มจาก เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่ จากนั้นพัฒนาเป็นเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวโดยมีการใช้วัสดุและวิธีการที่หลากหลายแตกต่างกันออกไป เช่น การใช้เมมเบรนเมดิเอเตอร์ วัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน รวมถึง ประเภทของน้ำเสียและอาหารของจุลินทรีย์ก็มี

ความหลากหลายไปด้วย ล่าสุดได้ออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยวร่วมกับการเพาะเลี้ยงพืชล้มลุก คือ ต้นกกและ ต้นแวนแก้ว เพื่อหาปัจจัยที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งพบว่า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 20.5 ต้นกรราชินี และ น้ำเสียจากบ่อบำบัดคณณะเกษตร ให้กระแสไฟฟ้ามากกว่าปัจจัยอื่น (Rittmann, B. E. 2006; David et al., 2008; กรกนก และ อังศุมาลิน, 2010) ซึ่งในปีเดียวกันมีงานวิจัยสนับสนุนด้วยว่า ส่วนรากของต้นกกให้กระแสไฟฟ้าได้มากกว่าส่วนอื่น แต่ยังไม่มากพอต่อความต้องการ (ณัฐภูมิ และ ธนยพันธ์, 2010) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงยังใช้หลักการพื้นฐานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ยังไม่นำเอาพืชเข้ามาเกี่ยวข้อง

2.2 ประเภทของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.2.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบห้องคู่ (Leropoulos et al., 2007; ทวิทย์, 2551;)

จะประกอบไปด้วย แอโนดและแคโทดโดยจะถูกแบ่งโดยเยื่อเลือกผ่านโปรตอน เป็นตัวนำโปรตอนแต่จะไม่ยอมให้ออกซิเจนเคลื่อนที่ผ่านมาด้วย

2.2.2 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว (สุทธิพร, 2549; กันยรัตน์ และ คณะ, 2550)

จะออกแบบง่ายและมีต้นทุนต่ำกว่าแบบห้องคู่โดยจะมีแคสส่วนแอโนดโดยจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

- 1) เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบใช้เมมเบรน (Cheol, 2003, Lovely, 2006) จะประกอบด้วยส่วนแอโนดอยู่ใน reactor ส่วนแคโทดอยู่ด้านนอก โดยมีเยื่อเลือกผ่านโปรตอนเป็นตัวเชื่อม
- 2) เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบไม่ใช้เมมเบรน (Jang et al., 2004; Holasut et al., 2009) ใน reactor ประกอบด้วยแอโนดติดตั้งไว้ในส่วนล่างที่มีจุลินทรีย์ แคโทดอยู่ส่วนบนที่ไม่มีจุลินทรีย์

2.3 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

อิเล็กตรอนที่สร้างขึ้นจะถูกส่งไปยังแอโนด และจะมีการไหลเวียนของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้นแล้วอิเล็กตรอนจะถูกออกซิไดซ์แล้วขนถ่ายไปที่ขั้วแอโนด โดยส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมี 2 ส่วนคือ แคโทดและแอโนด โดยจะมีตัวแยกคือเยื่อเลือกผ่านโปรตอน

2.3.1 ส่วนแอโนด

จะเป็นส่วนที่เกิดกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์จะประกอบไปด้วยเชื้อจุลินทรีย์ โดยจะใช้เชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในกลุ่มย่อยสลายประกอบมีเทนและผลิต ไฮโดรเจน โดยจะทำการย่อย

สลายสารอินทรีย์ที่มีมีเทนและไฮโดรเจนเพื่อสร้างพลังงานจากกระบวนการหมักและยังผลิตไฟฟ้าไปด้วย

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในส่วนแอโนด (Anode reacton)

บทบาทสำคัญของซับสเตรท (Substrate) ในการผลิตกระแสไฟฟ้าของ MFC ซึ่งซับสเตรทจะต้องมีความสามารถในการผลิตกระแสไฟฟ้า ได้สูงกว่าน้ำตาลทั่วไปกระแสไฟฟ้าที่วัดได้ในหน่วยของคูลอมบิก (Coulombic) เกิดจากการผลิตอิเล็กตรอนจากซับสเตรทและการขนส่งอิเล็กตรอนไปยังขั้วอิเล็กโทรด การเกิดปฏิกิริยาการย่อยสลายกลูโคสของเชื้อจุลินทรีย์และจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งใน 1 วินาทีกระบวนการออกซิเดชันของเชื้อจุลินทรีย์จะสามารถผลิตประจุไฟฟ้าได้ดังสมการ

$$C = n \times F \quad (1)$$

เมื่อ C คือ ประจุไฟฟ้า (Coulombic), n คือ จำนวนอิเล็กตรอน, และ F คือค่าคงที่ของฟาราเดย์ (Faraday constant = 96,485 C/mole)

กระบวนการออกซิเดชันแหล่งพลังงานในส่วนแอโนดจะเกิดจาก 2 ปัจจัย คือ อัตราการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนของกระบวนการเมตาบอลิซึมที่เกิดภายในเซลล์ของเชื้อจุลินทรีย์ และเกิดจากปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ขนาดของ MFC สภาวะที่ทำการศึกษทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพลังงานทางชีวเคมีของกระบวนการเมตาบอลิซึมของเชื้อจุลินทรีย์

1) อาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์

ใช้ในการเลี้ยงจุลินทรีย์และใช้ในการสลายสารอินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์แต่ละชนิดจะใช้อาหารต่างกันออกไป ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมักใช้กลูโคสเป็นแหล่งพลังงานในกระบวนการย่อยเพราะกลูโคสจะมีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ให้ประสิทธิภาพและความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงหาง่ายและมีต้นทุนต่ำ

2) เมดิเอเตอร์

3) ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการขนถ่ายอิเล็กตรอนจากเซลล์ของเชื้อเพลิงจุลชีพไปยังขั้วแอโนด โดยส่วนใหญ่จะเป็นสารเคมีซึ่งอาจเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่น เมททิลีนบลู (Holasut et al., 2009) แต่ในปัจจุบันมีการค้นพบชนิดของจุลินทรีย์ที่นำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่มีอยู่ตามธรรมชาติบางชนิดมี nanowire สามารถส่งผ่านอิเล็กตรอนได้โดยตรงโดยไม่จำเป็นต้องใช้เมดิเอเตอร์ (Holasut et al., 2009)

2.3.2 ส่วนแคโทด

ประกอบด้วยขั้วแคโทด สารละลายแคโทดไลต์ เยื่อเลือกผ่านโปรตอน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ในส่วนแอโนดเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งเป็นการเพิ่ม H^+ ให้กับสารละลาย ใน

ส่วนแคโทดจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเป็นการให้ H^+ กับสารละลาย เช่นการสลาย กลูโคส 1 โมล จะให้ คาร์บอนไดออกไซด์และอิเล็กตรอน 24 ตัว (กิตติมา, 2552)

ปฏิกิริยาส่วนแคโทด (Cathode reaction)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ในส่วนของแคโทดของ MFC ซึ่งเป็นส่วนใหญ่ที่ไม่มีเชื้อจุลินทรีย์ แต่จะประกอบด้วยปฏิกิริยารีดักชันของสารละลายแคโทโรไลต์ ซึ่งเป็นที่นิยมเลือกใช้ คือ ออกซิเจน หรือ Ferricyanide แต่สำหรับการเลือกใช้ Ferricyanide ในการศึกษา จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเร็วหรือหมดสภาพเร็ว (การเสื่อมสภาพทางเคมี) อย่างไรก็ตามออกซิเจน ก็มีข้อเสียเช่นกัน คือ ออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับขั้วอิเล็กโทรดได้ช้า

ปฏิกิริยารีดักชันมีส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของ MFC ซึ่งประสิทธิภาพในการรีดิวส์อิเล็กตรอนจะขึ้นกับหลายปัจจัยได้แก่ อัตราการป้อนออกซิเจนในส่วนแคโทดชนิดสารละลายแคโทโรไลต์ ขนาดตัวกำเนิดไฟฟ้า ขนาดขั้วแคโทดและสถานะอื่นๆที่เกี่ยวข้องการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ เป็นต้น

กระบวนการเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ เป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยเชื้อจุลินทรีย์โดยจะใช้สารตั้งต้นเป็นออกแกนิค เพื่อให้ในการสร้างไฟฟ้า

2.4 ระบบนิเวศกับสิ่งมีชีวิต

2.4.1 ความหมายของระบบนิเวศ (Ecosystem)

ระบบนิเวศเป็นหน่วยที่สำคัญที่สุดในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งมีชีวิต (David et al., 2008) และสิ่งแวดล้อม (Rittmann, B. E. 2006) เพราะประกอบไปด้วยสิ่งมีชีวิตหลากหลายชนิด มีการแลกเปลี่ยนสสาร แร่ธาตุ และพลังงานกับสิ่งแวดล้อม โดยผ่านห่วงโซ่อาหาร (Food chain) มีลำดับของการกินเป็นทอด ๆ ทำให้สสารและแร่ธาตุมีการหมุนเวียนไปใช้ในระบบจนเกิดเป็นวัฏจักร ทำให้มีการถ่ายทอดพลังงานไปตามลำดับขั้นเป็นช่วง ๆ ในห่วงโซ่อาหารได้ การจำแนกองค์ประกอบของระบบนิเวศ ส่วนใหญ่จะจำแนกได้เป็นสององค์ประกอบใหญ่ ๆ คือ องค์ประกอบที่มีชีวิตและองค์ประกอบที่ไม่มีชีวิต

2.4.2 องค์ประกอบของระบบนิเวศ

การจำแนกองค์ประกอบของระบบนิเวศแยกตามหน้าที่ในระบบ ได้แก่พวกที่สร้างอาหารได้เอง (Autotroph) และสิ่งมีชีวิตได้รับอาหารจากสิ่งมีชีวิตอื่น (Heterotroph) อย่างไรก็ตามการจำแนกองค์ประกอบของระบบนิเวศโดยทั่วไปมักประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่มีชีวิต (biotic) และองค์ประกอบที่ไม่มีชีวิต (Abiotic)

2.1) องค์ประกอบที่มีชีวิต (Biotic component) ได้แก่

2.1.1) ผู้ผลิต (Producer or autotrophic) ได้แก่ สิ่งมีชีวิตที่สร้างอาหารเองได้จากสารอนินทรีย์ส่วนมากจะเป็นพืชที่มีคลอโรฟิลล์

2.1.2) ผู้บริโภค (Consumer) ได้แก่ สิ่งมีชีวิตที่ไม่สามารถสร้างอาหารเองได้ (Heterotroph) ส่วนใหญ่เป็นสัตว์ที่กินสิ่งมีชีวิตอื่นเป็นอาหาร เนื่องจากสัตว์เหล่านี้มีขนาดใหญ่จึงเรียกว่า แมโครคอนซูเมอร์ (Macroconsumer)

2.1.3) ผู้ย่อยสลายซาก (Decomposer, Saprotroph, Osmotroph หรือ

Microconsumer) ได้แก่ สิ่งมีชีวิตขนาดเล็กที่สร้างอาหารเองไม่ได้ เช่น แบคทีเรีย เห็ด รา (fungi) และแอกทีโนมัยซีท (Actinomycete) ทำหน้าที่ย่อยสลายซากสิ่งมีชีวิตที่ตายแล้วในรูปของสารประกอบโมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นสารประกอบโมเลกุลเล็กในรูปของสารอาหาร (Nutrients) เพื่อให้ผู้ผลิตนำไปใช้ได้ใหม่อีก (ศูนย์วิทยาศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี, 2554)

ทฤษฎีที่ได้เสนอไปในข้างต้นนั้น มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับงานวิจัยนี้ โดยประวัติความเป็นมาของเซลล์เชื้อเพลิงทำให้เกิดแรงบันดาลใจในการพัฒนาให้เซลล์เชื้อเพลิงนี้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น รวมถึงความรู้เกี่ยวกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพและระบบบิวโรคัลเจอร์เป็นพื้นฐานสำคัญในการวิจัย ที่แสดงความเป็นไปได้ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้หลักการพื้นฐานและการพัฒนาการจากผลงานวิจัยของนักวิจัยต่าง ๆ กันมา ประยุกต์เข้ากับสภาพแวดล้อมที่มีอยู่ตามธรรมชาติ เพื่อให้กำลังไฟฟ้าที่ได้สูงขึ้นและประยุกต์โดยไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

2.5 ทฤษฎีไฟฟ้าเบื้องต้น

กฎของโอห์มเป็นกฎของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า แรงเคลื่อนไฟฟ้า และความต้านทาน โดยวงจรไฟฟ้าใดๆ ค่ากระแสผันตรงกับแรงดันไฟฟ้า และจะแปรผกผันกับความต้านทาน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.5.1 กระแสไฟฟ้าของโอห์ม

กระแสไฟฟ้าที่นำพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าไปยังส่วนที่ต้องการใช้ไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมแปร์(Ampere) โดยกระแสไฟฟ้าจะผันตรงกับค่าแรงดันไฟฟ้าและจะแปรผกผันกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ดังสมการที่ (2)

$$I = V / R \quad (2)$$

2.5.2 กฎแรงดันไฟฟ้าของโอห์ม

พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียไประหว่างจุด 2 จุด มีหน่วยเป็นโวลต์ (Voltage) ถ้าความต้านทานภายในเซลล์ไฟฟ้า ค่าของแรงเคลื่อนไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับความต่างศักย์ภายนอกของเซลล์ แรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นและตกคร่อมอุปกรณ์ไฟฟ้าใดๆ ซึ่งแรงดันไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับผลคูณของกระแสไฟฟ้ากับความต้านทานของอุปกรณ์นั้น แรงดันไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับค่ากระแสไฟฟ้าและแปรผันตรงกับค่าความต้านทานไฟฟ้า ดังสมการที่ (3)

$$V = IR \quad (3)$$

2.5.3 กฎความต้านทานของโอห์ม

สมบัติของตัวนำไฟฟ้าที่ยอมให้กระแสไหลผ่านได้มากหรือน้อยต่างกัน มีหน่วยเป็นโอห์ม (Ω) ความต้านทาน 1 โอห์ม คือ ความต้านทานของตัวนำเมื่อต่อปลายทั้งสองขั้วเข้ากับความต่างศักย์ 1 โวลต์และมี

กระแสไหลผ่านตัวนำนั้น 1 แอมแปร์ ดังนั้นค่าความต้านทานไฟฟ้าเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวต้านทานกับค่าของกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ (3)

$$R = V/I \quad (4)$$

2.5.4 กำลังไฟฟ้าจากกฎของโอห์ม

กำลังไฟฟ้า หมายถึง อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานหรืออัตราการทำงานจากลักษณะหนึ่งไปสู่อีกลักษณะหนึ่ง หรือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปในเวลา 1 วินาที เขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ P และมีหน่วยเป็น วัตต์ (W) หรือจูลต่อวินาที กำลังไฟฟ้าจากกฎของโอห์ม เป็นผลคูณของแรงดันกระแสไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้างดังสมการที่ (4)

$$P = VI \quad (5)$$

บทที่ 3 วิธีดำเนินการทดลอง

3.1 วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

1. หม้อนิ่งความดัน (Auto clave)
2. ปีกเกอร์
3. กระจกบอกลง
4. ขวดแก้ว
5. แท่งแก้วคนสาร
6. ถังพลาสติกขนาด 30 ลิตร
7. เตาชนิด Hot plate
8. ช้อนตักสารเคมี
9. เครื่องชั่งสารเคมี
10. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
11. กระจกชั่งสารเคมี
12. แท่งแม่เหล็ก (Magnetic bar)
13. มัลติมิเตอร์
14. ขวดน้ำพลาสติก และภาชนะพลาสติก
15. ตะกอนดินจากบ่อบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยขอนแก่น
16. น้ำเสียจากบ่อบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยขอนแก่น
17. ชั่วไฟฟ้า
18. ตัวต้านทาน ที่ปรับเปลี่ยนได้

3.2 วัสดุอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ค่าซีไอที (ใช้วิธีฟลักซ์แบบปิด) (วสท., 2545)

- สารละลาย

1. สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์เตรียมเช่นเดียวกับการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์
2. สารละลายมาตรฐานโปรแตสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย
3. สารละลายกรดซัลฟิวริกกับซิลเวอร์ซัลเฟต
4. สารละลายเฟอร์โรอินดิเคเตอร์
5. สารละลายมาตรฐานโปตัสเซียมพธาลेट
6. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต

- อุปกรณ์

1. หลอดย่อยสลาย
2. ขวดรูปชมพู่
3. เครื่องผสมสารเคมี (Magnetic stirrer)
4. ปิเปต ขนาด 10 มิลลิลิตร
5. เตาอบอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส

6. แท่งแก้วคนสาร
7. เครื่องผสมสารเคมี
8. ขวดเตรียมสารเคมี
9. บิวเรต ขนาด 25 มิลลิลิตร
10. ขาดังบิวเรต
11. กระจกบอกตวง
12. เตาชนิด Hot plate

3.2 การออกแบบเซลล์เชื้อเพลิง

โดยประยุกต์การใช้ขวดพลาสติก ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร ตัดให้เป็นปากฉลามที่ด้านล่างของขวด แล้วนำเอาแกรไฟท์เฟลท์พื้นที่ประมาณ 122 ± 2 ตารางเซนติเมตร ใส่เข้าไปติดบริเวณขอบ (รูปที่ 3.1) แล้วต่อขั้วให้มีความยาวพอที่จะเปิดออกไปสู่ด้านบนดังรูปที่ 3.2 ในขณะที่ด้านบนทำขั้วแคโทดขนาดพื้นที่ $16 + 1$ ตารางเซนติเมตร พร้อมหนุนด้านล่างด้วยโฟมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร เพื่อที่จะทำให้เกิดการลอยขึ้นเมื่อนำเซลล์นี้ไปตั้ง (ปัก) อยู่ในตะกอนดินที่มีระดับน้ำลึก 16 เซนติเมตร ดังรูป 3.3



รูปที่ 3.1 การติดแกรไฟท์เฟลท์พื้นที่ประมาณ 122 ± 2 ตารางเซนติเมตรที่ขอบด้านล่างของเซลล์



รูปที่ 3.2 การต่อขั้วแอโนดให้ยาวขึ้นด้านบน พร้อมขั้วแคโทดที่มีโฟมหนุนอยู่ด้านล่าง



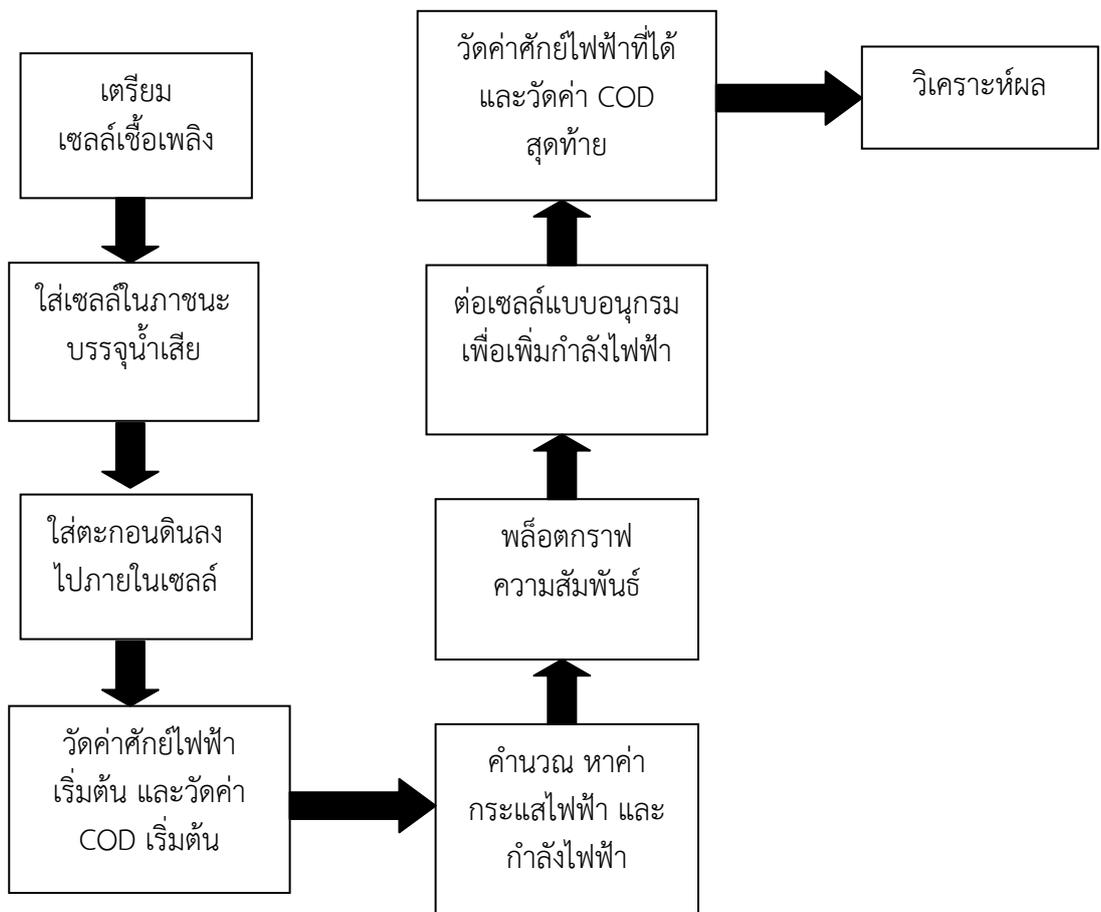
ภาพถ่ายด้านบน

ภาพถ่ายด้านข้าง

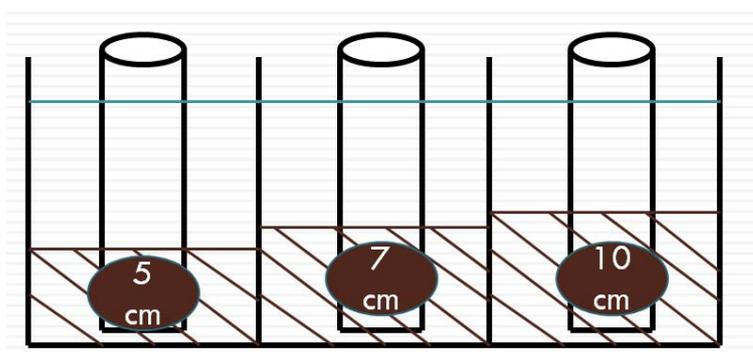
รูปที่ 3.3 การนำเซลล์เชื้อเพลิง 10 เซลล์ไปฝังเจาะในตะกอนดินที่เตรียมไว้ในถังปฏิกรณ์พลาสติก

3.3 วิธีการวิจัย

ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยเปลี่ยนแปลงระดับของตะกอนดิน ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

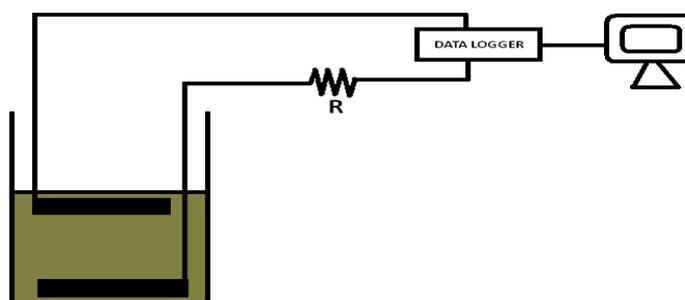


1. เตรียม เซลล์เชื้อเพลิง โดยมีพื้นที่ ขั้วแอโนด (ด้านล่าง) 122.6 cm^2 และ แคโทด (ด้านบน) 16 cm^2
2. นำเซลล์เชื้อเพลิงมาใส่ในภาชนะ ที่บรรจุน้ำเสียอยู่ภายใน โดยใช้มัลติมิเตอร์วัดค่าความต่างศักย์ และใช้ Data Logger ในการเก็บข้อมูล
3. ใส่ตะกอนดินในสิ่งประดิษฐ์ที่ได้ทำขึ้น ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนระดับตะกอนดินคือ 5 7 และ 10 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.4 และทำการวัดค่าโดยตั้งทิ้งไว้ให้ความต่างศักย์ที่วัดได้มีค่าคงที่ พร้อมทั้ง บันทึกข้อมูล ต่อเนื่อง 3 เดือน



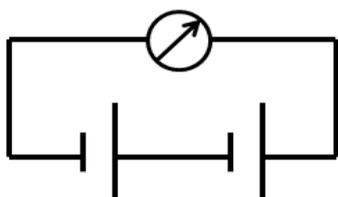
รูปที่ 3.4 การนำเซลล์มาปักลงในตะกอนดินที่มีระดับความลึก 5 7 และ 9 เซนติเมตร

4. วัดค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์ รวมถึงวัดค่า COD เริ่มต้นด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด พร้อมทั้ง บันทึกข้อมูล
5. วัดค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้นด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์ รวมถึงวัดค่า COD เริ่มต้นด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด พร้อมทั้ง บันทึกข้อมูล
6. นำค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ คำนวณหาค่ากระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า โดยต่อวงจร ดังรูปที่ 3.5

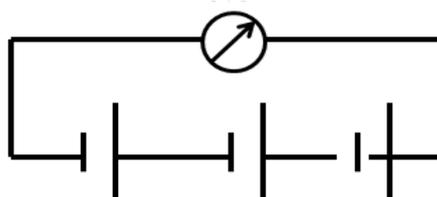


รูปที่ 3.5 วิธีการต่อวงจรไฟฟ้าเพื่อจะวัดค่าความต่างศักย์ และ กระแสไฟฟ้า

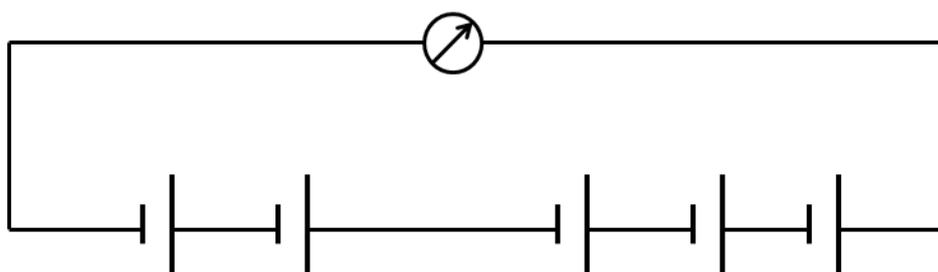
7. นำค่าต่างๆที่ได้ มาพล็อตกราฟโพลาริแซชัน VI เพื่อหาความต้านทานภายใน ซึ่งได้จากความชันของสมการเส้นตรง รวมถึง พล็อตกราฟความสัมพันธ์อื่นๆ เช่น กราฟ PI, VR, PR เพื่อหาความสัมพันธ์ ระหว่างศักย์ไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า กำลังไฟฟ้า และความต้านทานภายนอก
8. เพิ่มกำลังไฟฟ้า โดยการต่ออนุกรมระหว่างเซลล์สิ่งประดิษฐ์ โดยการนำเซลล์ที่มีศักย์ไฟฟ้าเท่า ๆ กันมาต่ออนุกรม ดังรูปที่ 3.6



ก. ต่ออนุกรม 2 เซลล์



ข. ต่ออนุกรม 3 เซลล์



ค. ต่ออนุกรม 5 เซลล์

รูปที่ 3.6 การนำเซลล์เชื่อมเพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า

9. วัดค่าศักย์ไฟฟ้า และบันทึกข้อมูล
10. วัดค่า COD หลังจากเสร็จสิ้นการทดลอง วิธีการวิเคราะห์ค่าซีโอดี โดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด สามารถศึกษาได้ใน ภาคผนวก ข
11. วิเคราะห์ผลจากกราฟ และการคำนวณ

บทที่ 4

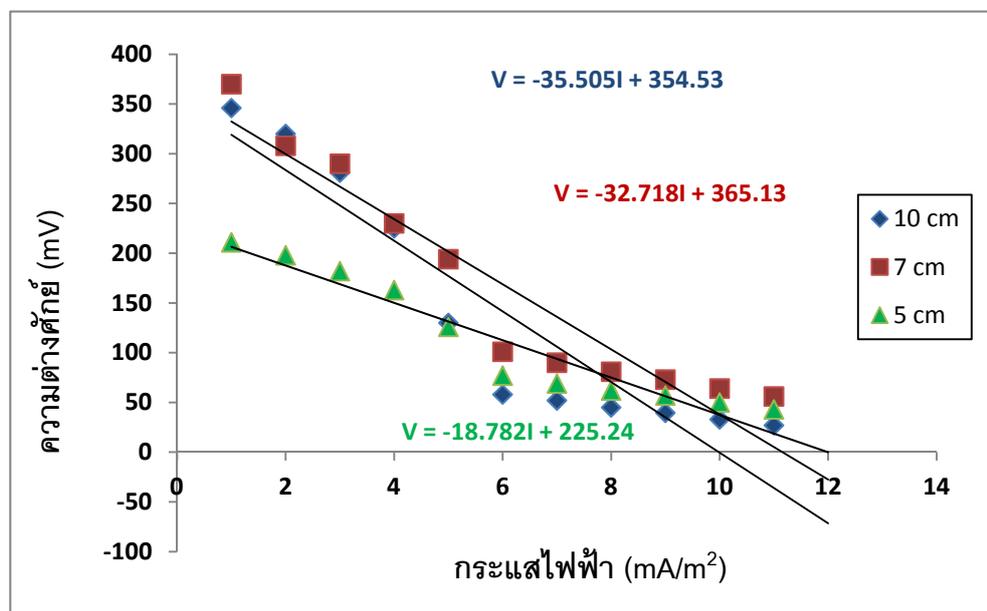
ผลการทดลอง

จากการทดลองเรื่อง เซลล์เชื้อเพลิงทางระบบนิเวศน์ ดังได้ทำการทดลองในบทที่ 3 เพื่อศึกษาหาปัจจัยต่างๆที่มีความเกี่ยวข้องกับศักย์ไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ได้ดังต่อไปนี้

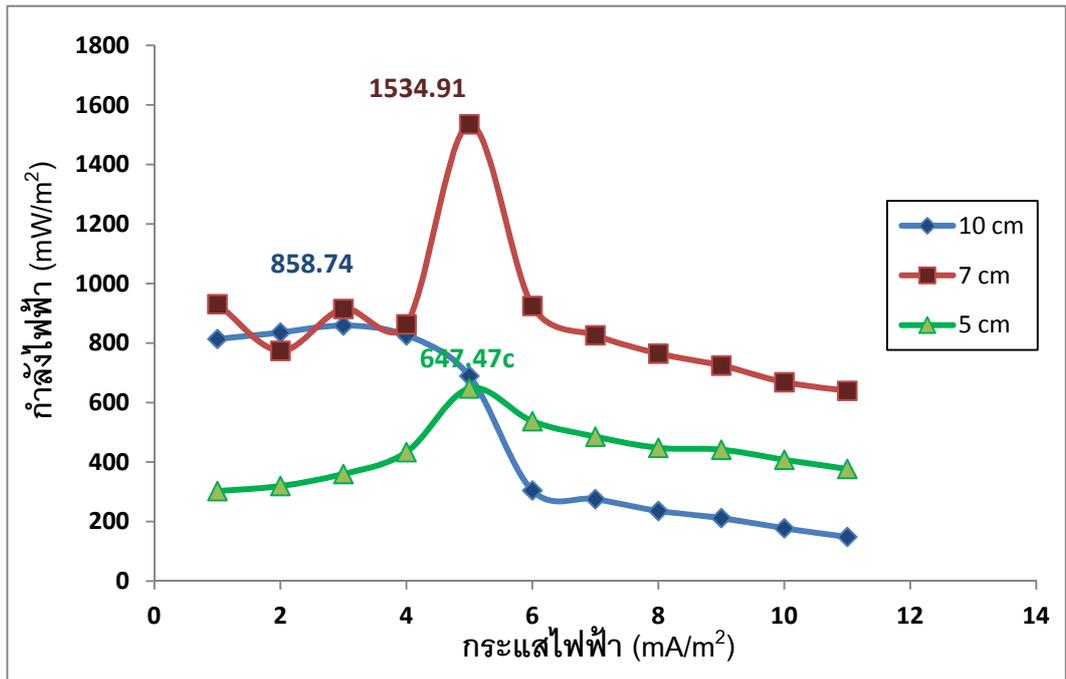
4.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

4.1.1 ระดับของตะกอนดิน

จากรูปที่ 4.1 ระดับของตะกอนดินภายในเซลล์เปรียบเสมือนความต้านทานภายในเซลล์ไฟฟ้า นั้นหมายถึง หากตะกอนดินภายในเซลล์มีระดับที่เหมาะสม ไม่มากหรือน้อยเกินไป จะทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนจากจุลชีพไหลเวียนได้ดี ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าที่ได้มีค่าสูง ในทางกลับกันหาก ระดับตะกอนดินสูงหรือต่ำเกินไป อนุภาคอิเล็กตรอนก็จะไหลเวียนได้ไม่สะดวก ส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง ซึ่งในการทดลองได้เปลี่ยนระดับตะกอนดิน 3 ค่า คือ 5 cm 7 cm และ 10 cm ซึ่งมีค่าความต้านทานภายในเป็น 18.178, 32.718 และ 35.505 โอห์ม ตามลำดับ ดังนั้นระดับตะกอนดิน 5 cm มีความต้านทานภายในน้อยที่สุด คือ 18.178 Ω

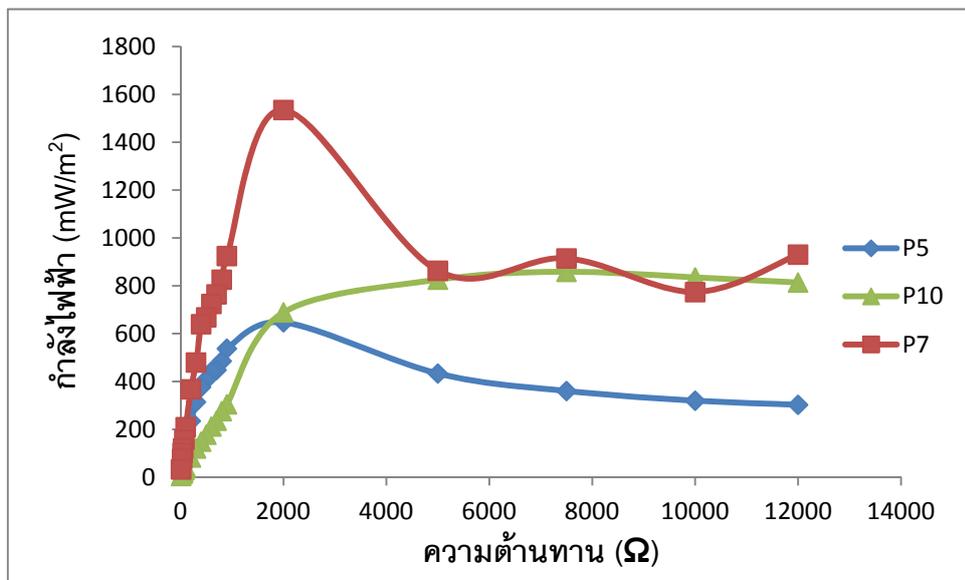


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า (mA/m^2) กับ ศักย์ไฟฟ้า (mV) ของระดับตะกอนดินต่างๆกันคือ 5 cm, 7 cm และ 10 cm



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสไฟฟ้า (mA/m²) กับ กำลังไฟฟ้า (mW/m²) ของระดับตะกอนดินต่างๆกันคือ 5 cm, 7 cm และ 10 cm

ระดับของตะกอนดินภายในเซลล์เชื้อเพลิงความต้านทานภายในของเซลล์ ที่มีผลต่อความต่างศักย์และ กระแสไฟฟ้าเนื่องจาก ความต้านทานภายใน ยิ่งความต้านทานภายในมีค่าน้อยยิ่งทำให้ได้กำลังไฟฟ้ามาก จากรูปที่ 4.2 พบว่าที่ระดับตะกอนดิน 7 cm ให้กำลังไฟฟ้ามากที่สุดคือ 1,534.91 mW/m²



รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ความต้านทาน (Ω) กับ กำลังไฟฟ้า (mW/m²) ของระดับตะกอนดินต่างๆกันคือ 5 cm, 7 cm และ 10 cm

ค่ากำลังไฟฟ้ามักมีความสัมพันธ์กับความต้านทานภายนอก รูปที่ 4.3 กล่าวคือ ความต้านทานภายนอกที่เหมาะสมที่สุด จะทำให้ค่ากำลังไฟฟ้ามักค่ามากที่สุด จากภาพที่ พบว่า ระดับตะกอนดิน 5 cm, 7 cm และ 10 cm จะมีกำลังไฟฟ้าสูงที่สุดคือ 647.47 mW/m^2 , $1,534.91 \text{ mW/m}^2$ และ 858.74 mW/m^2 ตามลำดับ โดยมีความต้านทานภายนอกที่เหมาะสมที่สุดคือ $2,000\Omega$, $2,000\Omega$ และ $7,500\Omega$ ตามลำดับ

นั่นแสดงให้เห็นว่าระดับของตะกอนดินมีความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ซึ่งถูกจำกัดให้เป็นที่ยู้อาศัยของสิ่งมีชีวิตที่ไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งระดับของตะกอนดินมากขึ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตมากขึ้น แต่เมื่อตะกอนดินมากเกินไปอาจไปจำกัดกระบวนการส่งผ่านอิเล็กตรอน และโปรตอนที่อยู่ในเซลล์ รวมทั้งอาจจะมีผลต่อกระบวนการเผาผลาญอาหารที่เกิดขึ้นในเซลล์มาก ปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้เกิดผลลัพธ์จากการวัดที่ได้ แสดงออกมาเป็นค่าความต้านทานภายในที่มากขึ้น ดังที่ได้อธิบายในรูป 4.1

4.1.2 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

1) คุณภาพน้ำเสีย

คุณภาพน้ำเสียก่อนเข้าสู่เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ มีค่า COD ประมาณ 228.8 mg/L และเมื่อเวลาผ่านไป 17 วัน น้ำเสียมีค่า COD ลดลงเหลือ 70.4 mg/L คิดเป็น ค่า COD loading ประมาณ 8.8 mg/L/day โดยวัดน้ำเสียที่ปล่อยไว้ในภาชนะไม่ผ่านการบำบัดใด ๆ จะได้ 115 mg/L การที่ COD ของน้ำเสียที่ผ่านเซลล์เชื้อเพลิง อาจเนื่องมาจาก การย่อยสลายของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อใช้ส่วนหนึ่งในการปล่อยอิเล็กตรอนผ่านขั้วไฟฟ้าที่ทำจากแกรไฟท์ ซึ่งเกิดจากพลังงานการย่อยสลายของสารอาหารในน้ำเสียมากกว่าการที่ปล่อยให้อยู่โดยไม่ผ่านเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

2) ประสิทธิภาพของประจุไฟฟ้า

เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือน้ำเสีย ซึ่งมีองค์ประกอบมากมายที่ซับซ้อนต่อการแยกว่าเป็นสารประกอบธาตุชนิดใดบ้าง จึงทำให้ไม่สามารถคำนวณประสิทธิภาพของประจุไฟฟ้าออกมาได้โดยตรง แต่หากนำงานวิจัยที่ได้ศึกษาประสิทธิภาพของประจุไฟฟ้าก่อนหน้านี้ (ทวิทย์, 2008) ซึ่งใช้กลูโคสเป็นธาตุอาหารในน้ำเสียสังเคราะห์ มาเปรียบเทียบกับความเป็นไปได้ กล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพของประจุไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงที่มีสารอาหารซึ่งเป็นสารตั้งต้นหรือซับสเตรทในน้ำเสียจากระบบนิเวศน์อาจจะมีค่ามากกว่าหนึ่งชนิด (ซับสเตรทที่เป็นกลูโคส) เพราะจุลินทรีย์ให้กระแสไฟฟ้าได้นานกว่า ทำให้ได้พื้นที่ได้กราฟมากกว่า ค่าประจุไฟฟ้าจากการทดลองจึงมีค่ามากกว่า และจากสมการการคำนวณประสิทธิภาพการผลิตประจุไฟฟ้า คือ ค่าประจุจากการทดลอง/ค่าประจุไฟฟ้าจากการคำนวณ จึงทำให้ค่าประสิทธิภาพของประจุไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพทางระบบนิเวศน์น่าจะมีค่ามากกว่า เซลล์เชื้อเพลิงจากน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าประสิทธิภาพประจุไฟฟ้า 36 เปอร์เซ็นต์ (ทวิทย์, 2008)

4.2 การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าโดยการต่อเซลล์แบบอนุกรม

เมื่อนำเซลล์สี่ประติษฐ์แต่ละเซลล์มาต่ออนุกรมกัน จะแสดงผลดังตารางที่ 1

ระดับ ตะกอนดิน (cm)	ความต่างศักย์ ก่อน ต่ออนุกรม (mV)	ความต่างศักย์ หลังจาก ต่ออนุกรม (mV)	
5	812	1132	327
5	765		215
7	531	643	231
7	543		322
10	562		497

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าความต่างศักย์ที่ได้ ก่อนต่ออนุกรม ขณะต่ออนุกรม และหลังจากต่ออนุกรมของเซลล์เชื้อเพลิงที่มีระดับตะกอนดินต่างๆกันคือ 5, 7 และ 10 เซนติเมตร

จากตาราง 4.1 พบว่าเมื่อต่ออนุกรมระหว่าง เซลล์ที่มีค่าความต่างศักย์เริ่มต้นใกล้เคียงกัน จะทำให้ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นได้ แต่หากต่ออนุกรมระหว่างเซลล์ที่มีค่าความต่างศักย์แตกต่างกันมากๆ จะไม่สามารถเพิ่มความต่างศักย์ได้ สามเหตุอาจเนื่องมาจากการไหลย้อนกลับของกระแสไฟฟ้าที่อยู่ภายในเซลล์เชื้อเพลิง หรือ เกิด Voltage reversal ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ยังไม่สามารถหาข้อมูลใด ๆ มาอธิบายได้ นอกจากจะมี การทดสอบการรับและคายพลังงานของเซลล์

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาลักษณะการทำงานและพฤติกรรมของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ที่มีผลต่อการพลังงานไฟฟ้าที่ได้ โดยผลการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 ระดับของตะกอนดิน

ระดับของตะกอนดินมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ จากการทดลองที่ความต้านทานภายนอกประมาณ 2,000 โอห์ม พบว่า เมื่อปรับระดับตะกอนดินจาก 5 เซนติเมตร เป็น 7 เซนติเมตร ทำให้ได้กำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 647.47 mW/m² เป็น 1,534.91 mW/m² อย่างไรก็ตามพบว่า ความต้านทานภายในเพิ่มขึ้นจาก 18.178 โอห์ม เป็น 32.718 โอห์ม ทั้งนี้แสดงให้เห็นว่าระดับของตะกอนดินมีความสัมพันธ์กับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ซึ่งถูกจำกัดให้เป็นที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตที่ไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งระดับของตะกอนดินมากขึ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการเป็นแหล่งที่อยู่อาศัยของสิ่งมีชีวิตมากขึ้น แต่เมื่อตะกอนดินมากขึ้นส่งผลให้ความต้านทานภายในของระบบมากขึ้น โดยผลการทดลองพบว่าที่ระดับตะกอนดินเพิ่มขึ้นเป็น 10 เซนติเมตร อาจส่งผลในการจำกัดกระบวนการส่งผ่านอิเล็กตรอน และโปรตอนที่อยู่ในเซลล์ รวมทั้งผลต่อกระบวนการเผาผลาญอาหารที่เกิดขึ้นในเซลล์ หรือระบบ ซึ่งปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้เกิดผลลัพธ์จากการแสดงออกมาเป็นค่าความต้านทานภายในที่มากขึ้น เป็น 35.51 โอห์ม และ กำลังไฟฟ้าที่ลดลงเป็น 858.74 mW/m² ตามลำดับ

5.2 การต่อเซลล์แบบอนุกรม

การต่อเซลล์แบบอนุกรมเพื่อเพิ่มกำลังไฟฟ้า ผลลัพธ์ที่ได้พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพยังไม่สามารถควบคุมความต่างศักย์ได้คงที่ (เท่ากัน) ในแต่ละเซลล์ เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์แบตเตอรี่โดยทั่วไป ในทางทฤษฎีการต่อเซลล์มากกว่า 1 เซลล์แบบอนุกรม ความต่างศักย์ต้องเพิ่มขึ้น 2 เท่า แต่เมื่อนำเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมากกว่าหนึ่งเซลล์มาต่อกันแบบอนุกรม พบว่าไม่ได้ตามทฤษฎี แต่กลับลดลงไป ดังตารางที่ 4.1 เนื่องจากการวัดในระดับตะกอนดินต่าง ๆ ด้วย ทำให้สามารถบอกได้ว่า ระดับของตะกอนดินเป็นส่วนหนึ่งในการให้ความต่างศักย์ที่ต่างกัน เมื่อเราให้เซลล์ที่มีระดับตะกอนดินเท่ากัน 5 เซนติเมตร ต่อกันแบบอนุกรม พบว่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นจากเดิม 812 โวลต์ และ 765 โวลต์ เพิ่มเป็น 1132 โวลต์ แต่ถ้าเอาเซลล์ที่มีระดับตะกอนดินต่างกัน เช่น เซลล์ที่มีระดับตะกอนดิน 7 เซนติเมตร 2 เซลล์ และ ระดับตะกอนดิน 10 เซนติเมตร 1 เซลล์ มาต่ออนุกรม ระดับตะกอนดิน 10 เซนติเมตร จะเห็นว่าความต่างศักย์ที่วัดได้ 643 โวลต์ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าในทางทฤษฎี ความต่างศักย์ที่ควรจะได้คือ 531+543+562 แต่พบว่าได้เพียง 642 โวลต์เท่านั้น เพื่อเป็นการยืนยันทำการวัดค่าของ การต่อเซลล์ 5 เซลล์ ที่ระดับตะกอนดินต่าง ๆ อีกครั้ง วัด 5 ครั้งจะได้ค่าเฉลี่ย 318±22 โวลต์ ซึ่งต่ำกว่าค่าในทางทฤษฎี ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับ Oh and Logan (2007) ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเกิดจากการผันกลับของการไหลของอิเล็กตรอน (Voltage reversal) โดยยังไม่มีวิธีในการแก้ไขปัญหานี้ในส่วนนี้อย่างชัดเจน

5.3 ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิง

ค่า COD ประมาณ 228.8 mg/L และเมื่อเวลาผ่านไป 17 วัน น้ำเสียมีค่า COD ลดลงเหลือ 70.4 mg/L คิดเป็น ค่า COD loading ประมาณ 8.8 mg/L/day และเมื่อทดลองทำการต่ออนุกรม สามารถเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าได้ถึง 1,1132 mV สำหรับเซลล์เชื้อเพลิง 2 เซลล์

แต่ทั้งนี้การเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้า อาจยังไม่สามารถพัฒนาได้มากนัก เนื่องจากปัญหาในเรื่องการไหลย้อนกลับของกระแสไฟฟ้า ทำให้เมื่อต่ออนุกรมแล้ว ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าต่ำลงอย่างเห็นได้ชัด

จากงานวิจัยนี้ เป็นการผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบไม่ใช้เมมเบรนในระบบนิเวศน์ พบว่า การใช้ระบบนิเวศน์ในการควบคุมการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถเป็นไปได้ในการได้มาของ กระแสไฟฟ้าในแต่ละเซลล์ แต่ศักย์ไฟฟ้าอาจจะมีความแตกต่างกัน อันเนื่องมาจากปัจจัยของระดับตะกอนดิน จำนวนจุลินทรีย์ และ สภาพสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ เช่น การต่อของขั้วไฟฟ้าที่อาจจะมีความสั้นยาวต่างกันอัน เนื่องมาจากการประกอบโดยฝีมือของมนุษย์ อย่างไรก็ตามพบว่าความแตกต่างกันจะส่งผลให้การต่อเซลล์พบ ปัญหาเรื่องการผันกลับของกระแสไฟฟ้า ดังนั้นเซลล์ที่ควรจะพัฒนาปรับปรุงต่อไปจำเป็นต้องมีความถูกต้อง แม่นยำในเรื่องตัวแปรควบคุม เช่นขนาดของขั้ว การต่อเซลล์ และ ขนาดของเซลล์ สัมพันธ์กับตะกอนดินที่มี อยู่ในน้ำเสียอีกด้วย

บรรณานุกรมและเอกสารอ้างอิง

- Holasut K., Teekaprasertkul A., Weingsrima J., Bouapim C. 2009. Electricity generation from dairy factory wastewater by using single chamber microbial fuel cell, **The 1st National conference on Industrial and Research Project for undergraduate Students (IRPUSCON-01)**. March 27-29, 2009, 5th floor Siam Paragon Hall, Thailand.(in thai)
- Jansod T., Ngamsai K., Kumwachara K. and Holasut K. 2008. Prospect of scaling up of the electricity generation by continuous flow microbial fuel cell, **The 8th Thailand Chemical Engineering and Applied Chemistry Conference**, October 20-21, 2008, Pattaya Thailand (in Thai)
- Oh S.-E., Logan B.E. 2007. Voltage reversal during microbial fuel cell stacks operation, *Journal of Power Sources* 167, pp 11–17.
- กรกนก โทราช และ อังศุมาลิน คนองมาก. 2010. การศึกษาพีซัลล์ลุ่มที่สามารถเจริญเติบโตได้เร็วในการผลิตกระแสไฟฟ้า. โครงการนักศึกษา: วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- กิตติมา งามสาย. 2009. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ. วิทยานิพนธ์: วิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- ณัฐภูมิ เชื้อนแก้ว และ ธันยรัตน์ ชัยอินปัน. 2010. การผลิตไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยกระบวนการเจริญเติบโตของพีซในส่วนราก. โครงการนักศึกษา: วิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ทวิทย์ จันท์สด. 2008. การเพิ่มกำลังไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบต่อเนื่อง วิทยานิพนธ์: วิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ศูนย์วิทยาศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี. (n.d.). <http://psc.pbru.ac.th/lesson/index-ecosystem.html>. Retrieved กรกฎาคม 5, 2554, from <http://psc.pbru.ac.th/>.
- กันยรัตน์ โหละสุต และคณะ. 2550. การผลิตกระแสไฟฟ้า จากน้ำเสียโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องเดี่ยว. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 17, โรงแรมดิเอ็มเพรส เชียงใหม่, เชียงใหม่*. จัดโดยมหาวิทยาลัย เชียงใหม่ 29-30 ตุลาคม 2550.
- คณะกรรมการวิชาการสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ประจำปี 2545-2546 วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. 2545. *คู่มือวิเคราะห์น้ำ และน้ำเสีย*. กรุงเทพฯ: บริษัท จุดทอง จำกัด
- จรัสพงษ์ คูวิรัตน์. 2543. เซลล์เชื้อเพลิงพลังงานแห่งอนาคต. *อัปเดต*. 5: 47-50.
- จำนง วิสุทธิแพทย์ และคณะ. 2545. คู่มือปฏิบัติการชีววิทยา. *สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 172 หน้า.
- นิพนธ์ เกตุจ้อย, วัฒนพงษ์ รักวิเชียร และ สุขฤดี นาถกรณกุล. 2006. *เซลล์เชื้อเพลิง*. เทคโนโลยีพลังงาน สำหรับอนาคต. *Narasuan University Journal*, 2: 34-45.
- ทวิทย์ จันท์สด และกันยรัตน์ โหละสุต. 2551. การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบห้องคู่. *การประชุมวิชาการเทคโนโลยีและนวัตกรรมสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน ครั้งที่ 2 (TISD 2008)*. โรงโฆพิเทลขอนแก่น, ขอนแก่น. จัดโดยมหาวิทยาลัยขอนแก่น 28-29 มกราคม 2551.

- สุทธิพร วารีสุงเนินและกันยรัตน์ โหละสุด. 2549. พลังงานรูปแบบใหม่จากเซลล์เชื้อเพลิงชีวภาพ. *เอกสารประกอบการสัมมนา วิจัยพลังงาน สร้างฐานเศรษฐกิจพอเพียง โดยกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน วันที่ 13-14 ธันวาคม 2549.*
- สาวิตรี ระวังพิช. 2549. เซลล์เชื้อเพลิงพลังงานแห่งโลกอนาคต. *เอ็นจีเนียริง ทูเดย์*, 4: 52-56.
- อภิรัตน์ เลาบุตรและสุบุญญ จิราญชัย. 2550. เซลล์เชื้อเพลิงและพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์เมมเบรน. *เอ็นจีเนียริง ทูเดย์*, 8: 45-47.
- Allen R.M., H.P. Bennetto. 1993. Microbial Fuel Cells. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 39: 27-40.
- Bennetto H.P., Mason J.R., Stirling J.L. and Thurston C.F.. 1987. Research and development in non-mechanical electrical power sources. In *Power Source*, 373: 455-468.
- Bennetto H.P. 1990. Electricity generation by micro-organisms. *Biotechnology Education*, 4: 163-168.
- Booki Min and Irini Angelidaki. 2008. Innovative microbial fuel cell for electricity production from anaerobic reactors. *Journal of Power Sources*, 180: 641-647.
- Cheng Shaoan, Hong Liu and Bruce E. Logan. 2006. Increased performance of single-chamber microbial fuel cells using an improved cathode structure. *Electrochemistry Communications*, 8: 489-494.
- Cheol Geun Gil, In-Seop Chang, Byung Hong Kim, Mia Kim, Jae-Kyung Jang, Hyung Soo Park and Hyung Joo Kim. 2003. Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell. *Biosensors and Bioelectronics*, 18:327-334.
- Derek R. Lovely. 2006. Bug juice: harvesting electricity with microorganisms. *Nature Reviews/ Microbiology*, 4: 497-508.
- David P. B. T. B. Strik, H. V. M. Hamelers (Bert), Jan F. H. Snel and Cees J. N. Buisman. 2008. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *Int. J. Energy Res.* Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com) DOI: 10.1002/er.1397.
- Du Zhuwei, Li Haoran and Gu Tingyue. 2007. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*, 25: 464-482.
- Holasut K., Ngamsai K., Wareesongnoen S. and Kumwachara K.. 2008. Electricity Generation from Wastewater by Using Membrane-less Single Chamber Microbial Fuel Cell. *Paper present at Technology and Innovation for Sustainable Development Conference (TISD2008)*. Khonkaen. Sofitel hotel.
- Ieropoulos Ioannis, John Greenman, Chris Melhuish and John Hart. 2005. Energy accumulation and improved performance in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 145: 253-256.

- Jang Jae Kyung, The Hai Phama, Chang In Seop, Kang Kui Hyun, Hyunsoo Moon, Kyung Suk Cho and Byung Hong Kim. 2004. Construction and Operation of a novel mediator-and membrane-less microbial fuel cell. *Process Biochemistry*, 89: 1007–1012.
- Justin Gusphyl A.. 2004. Biofuel cells as a possible power source for implantable electronic devices. *University of Pittsburgh*, p. 44.
- Liu Hong, Shaoan Cheng, Liping Huang and Bruce E. Logan. 2008. Scale-up of membrane-free single-chamber microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 179: 274-279.
- Logan B.E. et al.. 2006. Microbial fuel cell: methodology and technology. *Environmental science & technology*, 40: 5181-5192.
- Lovley Derek R.. 2006. Bug juice: harvesting electricity with microorganisms. *Nature reviews*, 4: 497-508.
- Min Booki and Bruce Logan. 2004. Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flate plate microbial fuel cell. *Environmental Science Technology*, 38: 5809-5814.
- Min Booki, JungRae Kim, Sang Eun, Oh John, M. Regan and Bruce E. Logan. 2005. Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cell. *Water Research*, 39: 4961-4968.
- Moon Hyunsoo, Chang In Seop, Kim Byung Hong. 2006. Continuous electricity production from artificial wastewater using a mediator-less microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 97: 621-627.
- Oh S.-E. and Logan B.E.. 2007. Voltage reversal during microbial fuel cell stacks operation *Journal of Power Sources*, 167: 11-17.
- Park D.H. and Zeikus J.G.. 2003. Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation. *Biotechnol. Bio. eng*, 81:348–355.
- Park D., S. Kim, I. Shin and Y. Jeong. 2000. Electricity Production in Biofuel Cell using modified graphite electrode with Neutral Red. *Biotechnology Letters*, 22:1301-1304.
- Rittmann, B. E. 2006. Microbial ecology to manage processes in environmental biotechnology, *TRENDS in Biotechnology*, Vol. 24, No. 6, pp 261-266.
- Swades K., Chaudhuri and Derek R. Lovley.. 2003. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nature biotechnology*, 21: 1229-1232.
- Zhuwei Du, Haoran Li and Tingyue Gu. 2007. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnology Advances*. 25: 464–482.
- Zielke A.E.. 2006. Thermodynamic analysis of single chamber microbial fuel cell. Pennsylvania State University webpage. http://www.engr.psu.edu/ce/enve/mfc-Logan_files/mfc-makeone.htm.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 1 ข้อมูลการให้ไฟฟ้าของตะกอนดินของน้ำเสียใน 1 เซลล์

เวลา (min)	ความต้านทาน (ohm)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)
1	12000	370.0	0.0308	11.4083
2	10000	356.0	0.0356	12.6736
3	7500	332.0	0.0443	14.6965
4	5500	298.0	0.0542	16.1462
5	2000	231.0	0.1155	26.6805
6	1000	147.0	0.1470	21.6090
7	900	135.0	0.1500	20.2500
8	800	122.0	0.1525	18.6050
9	700	111.0	0.1586	17.6014
10	600	99.0	0.1650	16.3350
11	500	85.0	0.1700	14.4500
12	400	71.0	0.1775	12.6025
13	300	55.0	0.1833	10.0833
14	200	38.0	0.1900	7.2200
15	100	20.0	0.2000	4.0000
16	75	15.0	0.2000	3.0000
17	50	10.0	0.2000	2.0000
18	40	8.1	0.2025	1.6403
19	30	6.0	0.2000	1.2000
20	30	2.1	0.0700	0.1470

ตารางที่ 2 ข้อมูลการให้ไฟฟ้าของตะกอนดินความสูง 5 เซนติเมตร

เวลา (min)	ความต้านทาน (ohm)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)	กระแสไฟฟ้า (mA/m ²)	กำลังไฟฟ้า (mW/m ²)
5	12000	211	0.0176	3.7101	1.4342	0.0652
10	10000	198	0.0198	3.9204	1.6150	0.0776
15	7500	182	0.0243	4.4165	1.9793	0.1072
20	5000	163	0.0326	5.3138	2.6591	0.1732
25	2000	126	0.0630	7.9380	5.1387	0.5001
30	900	77	0.0856	6.5878	6.9784	0.5636
35	800	69	0.0863	5.9513	7.0351	0.5133
40	700	62	0.0886	5.4914	7.2244	0.4864
45	600	57	0.0950	5.4150	7.7488	0.5144
50	500	50	0.1000	5.0000	8.1566	0.5000
55	400	43	0.1075	4.6225	8.7684	0.4969
60	300	34	0.1133	3.8533	9.2442	0.4367
65	200	24	0.1200	2.8800	9.7879	0.3456
70	100	13	0.1300	1.6900	10.6036	0.2197
75	75	9.8	0.1307	1.2805	10.6580	0.1673
80	50	6.7	0.1340	0.8978	10.9299	0.1203
85	40	5.3	0.1325	0.7023	10.8075	0.0930
90	30	4	0.1333	0.5333	10.8755	0.0711
95	10	1.4	0.1400	0.1960	11.4192	0.0274

ตารางที่ 3 ข้อมูลการให้ไฟฟ้าของตะกอนดินความสูง 7 เซนติเมตร

เวลา (min)	ความต้านทาน (ohm)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)	กระแสไฟฟ้า (mA/m ²)	กำลังไฟฟ้า (mW/m ²)
5	12000	370.0	0.0308	11.4083	2.515	930.53
10	10000	308.0	0.0308	9.4864	2.512	773.77
15	7500	290.0	0.0387	11.2133	3.154	914.63
20	5000	230.0	0.0460	10.5800	3.752	862.97
25	2000	194.0	0.0970	18.8180	7.912	1534.91
30	900	101.0	0.1122	11.3344	9.154	924.51
35	800	90.0	0.1125	10.1250	9.176	825.86
40	700	81.0	0.1157	9.3729	9.438	764.51
45	600	73.0	0.1217	8.8817	9.924	724.44
50	500	64.0	0.1280	8.1920	10.440	668.19
55	400	56.0	0.1400	7.8400	11.419	639.48
60	300	42.0	0.1400	5.8800	11.419	479.61
65	200	30.0	0.1500	4.5000	12.235	367.05
70	100	16.0	0.1600	2.5600	13.051	208.81
75	75	12.0	0.1600	1.9200	13.051	156.61
80	50	8.6	0.1720	1.4792	14.029	120.65
85	40	7.1	0.1773	1.2567	14.458	102.50
90	30	5.3	0.1767	0.9363	14.410	76.37
95	10	2.0	0.2000	0.4000	16.313	32.63

ตารางที่ 4 ข้อมูลการให้ไฟฟ้าของตะกอนดินความสูง 10 เซนติเมตร

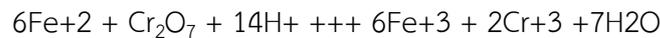
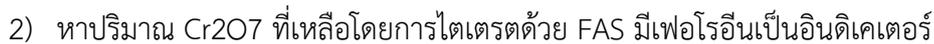
เวลา (min)	ความต้านทาน (ohm)	ความต่างศักย์ (mV)	กระแสไฟฟ้า (mA)	กำลังไฟฟ้า (mW)	กระแสไฟฟ้า (mA/m ²)	กำลังไฟฟ้า (mW/m ²)
5	12000	346.0	0.0288	9.9763	2.3518	813.7303
10	10000	320.0	0.0320	10.2400	2.6101	835.2365
15	7500	281.0	0.0375	10.5281	3.0560	858.7384
20	5000	225.0	0.0450	10.1250	3.6705	825.8564
25	2000	130.0	0.0650	8.4500	5.3018	689.2333
30	900	58.0	0.0644	3.7378	5.2565	304.8758
35	800	52.0	0.0650	3.3800	5.3018	275.6933
40	700	45.0	0.0643	2.8929	5.2435	235.9590
45	600	39.5	0.0658	2.6004	5.3698	212.1058
50	500	33.0	0.0660	2.1780	5.3834	177.6509
55	400	27.0	0.0675	1.8225	5.5057	148.6542
60	300	21.0	0.0700	1.4700	5.7096	119.9021
65	200	14.2	0.0710	1.0082	5.7912	82.2349
70	100	7.0	0.0700	0.4900	5.7096	39.9674
75	75	5.3	0.0707	0.3745	5.7640	30.5492
80	50	3.6	0.0720	0.2592	5.8728	21.1419
85	40	2.9	0.0725	0.2103	5.9135	17.1493
90	30	2.2	0.0733	0.1613	5.9815	13.1593
95	10	0.8	0.0800	0.0640	6.5253	5.2202

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์ค่าซีไอดี โดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด

1. หลักการ

ภายใต้สภาวะการรีฟลักซ์ในสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นที่มีอุณหภูมิสูง สารอินทรีย์ในน้ำจะถูกออกซิไดซ์โดยสารละลายโปแตสเซียมไดโครเมตที่ทราบความเข้มข้นและมีปริมาณเกินพอที่ทราบจำนวน หลักจากรีฟลักซ์ วัดปริมาณโปแตสเซียมไดโครเมตที่เหลือโดยนำไปไตเตรตกับเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (ferrous Ammonium Suifate) และใช้เฟอร์โรอิน (Ferroin)เป็นอินดิเคเตอร์ ทำให้ปริมาณของโปแตสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ได้ ปฏิกริยาต่างๆ ที่เกิดขึ้นเป็นดังนี้



Cr_2O_7 ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับ Fe^{+2} (FAS) ได้โครมิก (Cr^{+3}) จนหมด แล้ว Fe^{+2} จึงทำปฏิกิริยากับเฟอร์โรอินได้สารประกอบสีน้ำตาลแดงซึ่งแสดงจุดยุติของการไตเตรต แต่จะรีฟลักซ์ในหลอดแก้วที่มีฝาเกลียวปิดใส่อยู่ในเตาที่มีอุณหภูมิ $150 \pm 2^\circ C$ โดยไม่ต้องใช้คอนเดนเซอร์

2. สิ่งที่รบกวนการวิเคราะห์

ผลกระทบที่มีต่อการวัดค่าซีไอดี 2 ทาง คือ ทำให้วัดค่าซีไอดีได้ค่าสูงและวัดค่าซีไอดีได้ต่ำ ในที่นี้ต้องเข้าใจตรงกันว่าค่าซีไอดีที่ต้องการคือซีไอดีของสารอินทรีย์ (เพื่อนำข้อมูลไปเปรียบเทียบกับค่าซีไอดี)



โดยปรกติแล้ว การวิเคราะห์ซีไอดีใช้สารไดโครเมตซึ่งมีอำนาจในการออกซิไดส์สูงมาก และเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่เป็นกรดและอุณหภูมิสูง ดังนั้นแทบจะไม่มีสารอินทรีย์ที่ไม่ถูกออกซิไดส์ด้วยไดโครเมต อย่างไรก็ตามสารอินทรีย์คาร์บอนบางตัว เช่น กรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ จะไม่ถูกออกซิไดส์ด้วยไดโครเมต การแก้ไขกระทำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น เงินซัลเฟต (Ag_2SO_4)



การวัดซีไอดีของน้ำเสียเป็นการวัดปริมาณความเข้มข้นของสารรีดิวซิงเอเจนต์ที่เป็นสารรับอิเล็กตรอน (Electron Acceptor) โดยมีไดโครเมตเป็นสารให้อิเล็กตรอน พารามิเตอร์ต่างๆที่เป็นรีดิวซิง

เอเจนต์จะถูกวัดค่าซีไอต์ทั้งหมด ปัญหาเกิดขึ้นเพราะสารรีดิวซิงเอเจนต์เป็นทั้งสารอินทรีย์ (ที่ต้องการวัดเป็นซีไอต์) และสารอนินทรีย์บางตัว (ที่ไม่ต้องการวัดเป็นซีไอต์) เช่น คลอไรด์ ไนโตรต์ (NO₂), เหล็กเฟรัส (Fe⁺), ซัลไฟด์ (S²⁻) ดังนั้นในน้ำเสียที่มีรีดิวซิงเอเจนต์ที่เป็นสารอินทรีย์รวมอยู่ด้วย ค่าซีไอต์ที่ได้จึงเป็นค่าซีไอต์เนื่องจากสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ด้วยตามทฤษฎี ค่าซีไอต์ที่ได้จากคลอไรด์, ซัลไฟด์, ไนโตรต์ และเหล็ก

3. การเก็บและรักษาตัวอย่าง

ควรเก็บตัวอย่างน้ำใส่ในขวดแก้วและนำมาวิเคราะห์ทันที แต่ถ้าไม่สามารถจะทำได้ ควรแช่เย็นไว้ก่อนหากไม่สามารถวิเคราะห์ภายใน 1 วัน ให้เติมกรดซัลฟูริกนตัวอย่างมีพีเอชน้อยกว่า 2

4. เครื่องมือและอุปกรณ์

- ก. หลอดย่อย (Digestion Vessels) เป็นหลอดแก้วบอโรซิลิเคท (Borosilicate) ซึ่งเลี้ยงเชื้อขนาด 16×100 หรือ 20×150 มม. มีฝาสลักเกลียวซึ่งทำด้วย TFE
- ข. เตาหลอด (Heater Block) เตาหลอดหรือเตาซีไอต์ (COD Reactor) เป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนสำหรับหลอดแก้วโดนเฉพาะ สามารถควบคุมให้อยู่ที่ $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$ หรืออาจใช้บล็อกวางบนเตาแผ่นก็ได้ บล็อก (Block) ใช้สำหรับใส่หลอดแก้ว ทำด้วยอลูมิเนียม ความลึกของช่องใส่หลอดประมาณ 45-50 มม. การให้ความร้อนเพื่อต้มย่อยสลายกระทำโดยวางบล็อกบนเตาแผ่นหรืออาจใช้เตาอบก็ได้
- ค. เตาอบ (Oven) สามารถควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ประมาณ $150 \pm 2^{\circ}\text{C}$
- ง. บิวเรต
- จ. ขวดรูปกรวยขนาด 125 มล.

5. สารเคมี

- ก. สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.1 นอร์มัล
- ข. กรดซัลฟูริกและซิลเวอร์ซัลเฟต
- ค. สารละลายมาตรฐานเฟรัสแอมโมเนียม ซัลเฟต 0.05 นอร์มัล
- ง. สารละลายเฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์
- จ. กรดซัลฟามิก (Sulfamic Acid)
- ฉ. สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (potassium Hydrogen Phthalate หรือ KHP)
- ช. สารละลายกลูโคส

6. วิธีวิเคราะห์

ต้องล้างหลอดแก้วและฝาปิดด้วยสารละลายกรดกำมะถัน 20% เสมอทุกครั้งก่อนใช้งาน

- ก. การเลือกขนาดของหลอดแก้วสำหรับต้มซีโอดีให้เหมาะสม
- ข. การเลือกปริมาตรน้ำตัวอย่าง
- ค. ใส่น้ำตัวอย่าง
- ง. ทำการไตรเตรชัน

7. การคำนวณ

ซีโอดี, มิลลิกรัม O₂/ลิตร = (A - B) × N × 8000/มล. ของน้ำตัวอย่าง

เมื่อ A = มล.ของ FAS ที่ใช้ในการไตรเตรตแบลงค์

B = มล.ของ FAS ที่ใช้ในการไตรเตรตแบลงค์

C = ความเข้มข้นของ FAS , นอร์มัล

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี

$$\text{ประสิทธิภาพในการลดค่าซีโอดี} = \frac{(\text{ค่าซีโอดีก่อนเข้า} - \text{ค่าซีโอดีหลังเข้า}) \times 100}{\text{ค่าซีโอดีก่อนเข้า}}$$

ประสิทธิภาพของประจุไฟฟ้า (Coulombic efficiency)

ค่าประจุไฟฟ้าจากการทดลอง (Coulombic Experimental; C_{EX})หาได้จาก

$$C_{EX} = \int I(t) dt = \sum_{f=1}^T I t$$

ประจุไฟฟ้าจากการคำนวณ (Coulombic Theory; C_{TH})

$$C_{TH} = (bCVF)/M$$

ดังนั้นประสิทธิภาพการผลิตประจุไฟฟ้า

$$C_E = (C_{EX}/C_{TH}) * 100$$