



การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยใช้ทองคำขาวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา บนตัวรองรับท่อนาโนคาร์บอน  
ผนังหลายชั้น



โดย  
นางสาวศศิประภา วิชาวัลย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีศึกษา แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2562

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยใช้ทองคำขาวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา บนตัวรองรับท่อนา  
โนคาร์บอนผนังหลายชั้น



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเคมีศึกษา แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโทมหาบัณฑิต  
ภาควิชาเคมี  
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร  
ปีการศึกษา 2562  
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF MICROBIAL FUEL CELLS USING PLATINUM CATALYSTS ON  
MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES



By

MISS Sasiprapa WILAWAN

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for Master of Science (CHEMICAL STUDIES)  
Department of CHEMISTRY  
Graduate School, Silpakorn University  
Academic Year 2019  
Copyright of Graduate School, Silpakorn University



60301202 : เคมีศึกษา แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : ขั้วแคโทด, เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ, ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น, ตัวเร่งปฏิกิริยา ทองคำขาว

นางสาว ศศิประภา วิชาวัลย์: การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยใช้ทองคำขาวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา บนตัวรองรับท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อาจารย์ ดร. ณิชนันท์ เทพสุภังษิกุล

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นเทคโนโลยีที่สามารถบำบัดน้ำเสียและผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในเวลาเดียวกัน โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมนำมาใช้ที่ขั้วแคโทดคือทองคำขาว (Pt) ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซิล (Pt/MWCNTs-COOH) ที่เตรียมขึ้นด้วยวิธีการตกผลึกควบคู่กับการยัดเกาะ (Deposition-precipitation; DP) ในการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของ Pt/MWCNTs-COOH แสดงให้เห็นว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ที่เตรียมขึ้นให้ Pt ที่มีขนาดเล็ก (1-2 nm) และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพของคู่ที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด และใช้น้ำเสียจากโรงอาหารเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้นนั้นประสบความสำเร็จ ในด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยให้ค่า  $P_{max}$  เท่ากับ  $10,144 \text{ mW/m}^2$  และในด้านการบำบัดน้ำเสียให้ค่า %COD removal เท่ากับ  $78.1 \pm 1.8\%$  ค่า %BOD removal เท่ากับ  $90.2 \pm 2.4\%$  และค่า %TSS removal เท่ากับ  $83.0 \pm 0.8\%$  และประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด และใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้นนั้นประสบความสำเร็จในด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าให้ค่า  $P_{max}$  เท่ากับ  $5,235 \text{ mW/m}^2$  และด้านการบำบัดน้ำเสียให้ค่า %COD removal เท่ากับ  $79.5 \pm 1.5\%$  ดังนั้น Pt/MWCNTs-COOH/CC ที่เตรียมขึ้นจากวิธี DP จึงมีศักยภาพในการนำมาใช้แทนที่ผ้าคาร์บอนเชิงพาณิชย์ (Commercial Pt/CC) สำหรับขั้วแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพได้

60301202 : Major (CHEMICAL STUDIES)

Keyword : Cathode, microbial fuel cell, Pt catalyst, Multi-walled carbon nanotube

MISS SASIPRAPA WILAWAN : DEVELOPMENT OF MICROBIAL FUEL CELLS USING PLATINUM CATALYSTS ON MULTI-WALLED CARBON NANOTUBES THESIS ADVISOR : NICHANAN THEPSUPARUNGSIKUL, Ph.D.

Microbial fuel cell (MFC) is an innovative technology for simultaneous wastewater treatment and electricity generation. The commonly used catalyst at cathode is platinum (Pt). In this study, Pt catalysts on multi-walled carbon nanotubes (Pt/MWCNTs) were prepared by deposition-precipitation (DP) method. The prepared Pt/MWCNTs-COOH exhibited small size (1-2 nm) and highly uniform dispersion of Pt. The performance of dual-chamber MFC equipped with Pt/MWCNTs-COOH on Carbon cloth (CC) with canteen wastewater was successful in terms of electricity generation ( $P_{max}$  at 10,144 mW/m<sup>2</sup>). The organic removal efficiency of MFCs equipped with Pt/MWCNTs cathode provided excellent %COD removal (78.1±1.8%), %BOD removal (90.2±2.4%), %TSS removal (83.0±0.8%). With synthetic wastewater, the MFC with Pt/MWCNTs/CC cathode exhibited  $P_{max}$  at 5,235 mW/m<sup>2</sup> and %COD removal at 79.5±1.5%. Therefore, prepared Pt/MWCNTs-COOH/CC using the DP method was identified as a potential candidate to replace commercial Pt-carbon cloth for MFC cathodes.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาจาก อาจารย์ ดร. ณิช นันทน์ เทพศุภรังษิกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย รวมทั้ง ผศ. ดร. ชีวิตา สุวรรณชวลิต ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ ดร. ฐิติมา สงเคราะห์ ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย ส่งผลให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ถูกต้องและสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณในความกรุณาของทุกท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ ผศ. ดร. ดลฤดี นิมพาลี และเจ้าหน้าที่จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ที่กรุณาเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบด้วยเครื่องมือขั้นสูง และคุณศักดิ์ชัย เกาด้วง ที่กรุณาช่วยแก้ไขเครื่องมือ และอุปกรณ์ในการวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาเป็นผู้เชี่ยวชาญตรวจสอบด้วยเครื่องมือขั้นสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ให้ความรู้ให้คำแนะนำ และให้ประสบการณ์อันมีค่ายิ่งแก่ผู้วิจัย ขอขอบพระคุณเจ้าของหนังสือ วารสารเอกสาร และวิทยานิพนธ์ทุกเล่ม ที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆทุกคนที่ให้คำแนะนำ และกำลังใจตลอดมา

คุณค่าหรือประโยชน์อันเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอน้อมบูชาแต่พระคุณบิดา มารดา ครู และอาจารย์ที่อบรมสั่งสอน ให้คำแนะนำ รวมทั้งให้การสนับสนุน และให้กำลังใจอย่างดียิ่งเสมอมา

ศศิประภา วิชาวัลย์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มา และความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	5
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	5
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ.....	7
2.2 ส่วนประกอบสำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ.....	8
2.2.1 ขั้วแอโนด.....	8
2.2.2 ขั้วแคโทด และตัวเร่งปฏิกิริยา.....	8
2.2.3 ท่อนาโนคาร์บอน.....	10
2.2.4 เยื่อเลือกผ่าน.....	11
2.2.5 เชื้อเพลิงตั้งต้น.....	12
2.3 รูปแบบของรีแอกเตอร์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ.....	14
2.3.1 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่.....	14



2.3.2 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดี่ยว .....	15
2.4 ทฤษฎีทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ .....	15
2.4.1 ตัวแปรทางไฟฟ้า .....	15
2.4.2 Polarization curves และ Power density curves .....	16
2.5 การประเมินประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ .....	17
2.5.1 ประสิทธิภาพทางด้านการผลิตกระแสไฟฟ้า .....	17
2.5.1.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage; OCV) .....	17
2.5.1.2 ความต้านทานภายใน (Internal resistance; $R_{int}$ ) .....	17
2.5.1.3 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power density; $P_{max}$ ) .....	17
2.5.2 ประสิทธิภาพทางด้านการบำบัดน้ำเสีย .....	18
2.5.2.1 ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (APHA 5220) .....	18
2.5.2.2 ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (APHA 5210) .....	19
2.5.2.3 ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (ASTM D5907-13) .....	20
2.5.2.4 การยึดเกาะของแบคทีเรีย (Bacterial attachment) .....	21
2.6 เทคนิค และวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย .....	21
2.7 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	22
2.7.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน .....	22
2.7.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน ร่วมกับเครื่องเอ็กซ์เรย์แบบพลังงานกระจาย .....	23
2.7.3 เครื่องวิเคราะห์พื้นผิววัสดุ .....	24
2.7.4 Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer; ICP-OES .....	26
2.7.5 เครื่องวัด และบันทึกข้อมูล (Data logger) .....	27
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	28

บทที่ 3 เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการดำเนินงานวิจัย .....	31
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย .....	31
3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย .....	32
3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย .....	33
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	35
3.4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH ด้วยวิธี DP .....	35
3.4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของ Pt/MWCNTs-COOH .....	35
3.4.2.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านโครงสร้างและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs-COOH ด้วยเครื่อง TEM .....	35
3.4.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการมีอยู่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs-COOH ด้วยเครื่อง FESEM-EDX .....	35
3.4.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิววัสดุ .....	36
3.4.3 การออกแบบและเตรียมเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ .....	36
3.4.4 การเตรียมน้ำเสีย .....	37
3.4.4.1 น้ำเสียจากโรงอาหาร .....	37
3.4.4.2 น้ำเสียสังเคราะห์ .....	38
3.4.5 การเตรียมสารละลายแคโทด .....	39
3.4.6 การเตรียมขั้วแอโนด .....	39
3.4.7 การเตรียมขั้วแคโทด .....	39
3.4.7.1 ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth; CC) .....	39
3.4.7.2 ท่อนานคาร์บอนผนังหลายชั้น พร้อมหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซิล เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอน (MWCNTs-COOH/CC) .....	40
3.4.7.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนท่อนานคาร์บอนผนังหลายชั้น พร้อมหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซิล เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอน (Pt/MWCNTs-COOH/CC) .....	40

3.4.7.4	ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว พร้อมหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซิล เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอน (SWCNTs-COOH/CC).....	40
3.4.7.5	ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว พร้อมหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซิล เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอน (Pt/SWCNTs-COOH/CC).....	40
3.4.7.6	ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอนที่มีจำหน่าย (Commercial Pt/CC).....	41
3.4.8	การประเมินประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้น .....	41
3.4.8.1	การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง Data logger.....	41
3.4.8.2	การหาค่าความต้านทานภายใน และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด .....	42
3.4.9	การประเมินประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้น .....	42
3.4.9.1	การหาค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (APHA 5220) (Association, 2005c).....	42
3.4.9.2	การหาค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (APHA 5210) (Association, 2005a, 2005b).....	43
3.4.9.3	การหาค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (ASTM D5907-13) (Materials, 2013).....	44
3.4.10	การประเมินประสิทธิภาพการยึดเกาะของ Biofilm บนขั้วแอโนดจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ด้วยเครื่อง FESEM .....	46
3.4.11	การประเมินประสิทธิภาพด้านการกำจัดโลหะหนักของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้น .....	46
บทที่ 4	ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง.....	48
4.1	ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH ด้วยวิธี DP .....	48
4.1.1	ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านโครงสร้างของ Pt/MWCNTs-COOH ด้วยเครื่อง TEM..	48

4.1.1.1 ผลของความเข้มข้นของ $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$ ต่อการเตรียม Pt/MWCNTs-COOH	49
4.1.1.2 ผลของ pH ของสารแขวนลอยต่อการเตรียม Pt/MWCNTs-COOH	51
4.1.1.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ต่อการเตรียม Pt/MWCNTs-COOH	53
4.1.1.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ต่อการเตรียม Pt/MWCNTs-COOH	55
4.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการมีอยู่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ด้วยเครื่อง FESEM-EDX	57
4.1.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิววัสดุ	62
4.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้น้ำเสียจากโรงอาหารเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น	64
4.2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้า	64
4.2.2 ค่า OCV, $R_{int}$ และ $P_{max}$	65
4.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้น้ำเสียจากโรงอาหารเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น	68
4.3.1 ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD)	68
4.3.2 ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (BOD)	69
4.3.3 ค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TDS และ TSS)	70
4.4 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น	71
4.4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้า	71
4.4.2 ค่า OCV, $R_{int}$ และ $P_{max}$	72
4.5 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้นที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น	75
ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD)	75

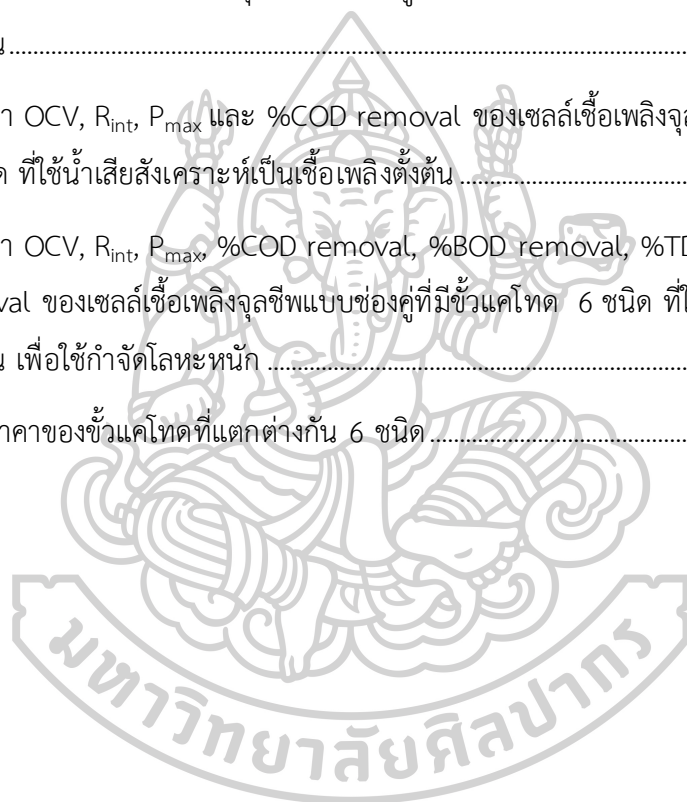
4.6 ผลการประเมินประสิทธิภาพการยึดเกาะของ Biofilm บน Carbon cloth ที่ใช้เป็นขั้วแอโนด จากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพด้วยเครื่อง FESEM .....	76
4.7 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการกำจัดโลหะหนักของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้น .....	78
4.7.1 ค่าศักย์ไฟฟ้า.....	78
4.7.2 ค่า OCV, $R_{int}$ และ $P_{max}$ .....	79
4.8 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียในด้านการกำจัดโลหะหนักของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้น .....	82
4.8.1 ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD).....	82
4.8.2 ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (BOD).....	83
4.8.3 ค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TDS และ TSS).....	84
4.9 ผลการประเมินการกำจัดโลหะหนักของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้น .....	85
4.10 ผลการประเมินประสิทธิภาพการยึดเกาะของ Biofilm บน Carbon cloth ที่ใช้เป็นขั้วแอโนดเพื่อกำจัดโลหะหนักจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพด้วยเครื่อง FESEM .....	92
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ .....	95
รายการอ้างอิง .....	101
ประวัติผู้เขียน .....	144

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ.....	9
ตารางที่ 2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารอาหาร.....	38
ตารางที่ 3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายแร่ธาตุ.....	38
ตารางที่ 4 ค่า OCV, $R_{int}$ และ $P_{max}$ ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด.....	68
ตารางที่ 5 ค่า $COD_{in}$ , $COD_{out}$ และ %COD removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด.....	69
ตารางที่ 6 ค่า $BOD_{in}$ , $BOD_{out}$ และ %BOD removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด.....	70
ตารางที่ 7 ค่า $TSS_{in}$ , $TSS_{out}$ และ %TSS removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด.....	71
ตารางที่ 8 ค่า $TDS_{in}$ , $TDS_{out}$ และ %TDS removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด.....	71
ตารางที่ 9 ค่า OCV, $R_{int}$ และ $P_{max}$ ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด.....	75
ตารางที่ 10 ค่า $COD_{in}$ , $COD_{out}$ และ %COD removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด.....	76
ตารางที่ 11 ค่า OCV, $R_{int}$ และ $P_{max}$ ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด.....	82
ตารางที่ 12 ค่า $COD_{in}$ , $COD_{out}$ และ %COD removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด.....	83
ตารางที่ 13 ค่า $BOD_{in}$ , $BOD_{out}$ และ %COD removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด.....	83

ตารางที่ 14 ค่า $TSS_{in}$ , $TSS_{out}$ และ %TSS removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด.....	84
ตารางที่ 15 ค่า $TDS_{in}$ , $TDS_{out}$ และ %TDS removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด.....	85
ตารางที่ 16 ค่า % Ag removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด .	92
ตารางที่ 17 ค่า OCV, $R_{int}$ , $P_{max}$ , %COD removal, %BOD removal, %TDS removal และ %TSS removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ที่ใช้น้ำเสียโรงอาหารเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น.....	96
ตารางที่ 18 ค่า OCV, $R_{int}$ , $P_{max}$ และ %COD removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น.....	97
ตารางที่ 19 ค่า OCV, $R_{int}$ , $P_{max}$ , %COD removal, %BOD removal, %TDS removal และ %TSS removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ที่ใช้น้ำเสียโรงอาหารเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น เพื่อใช้กำจัดโลหะหนัก.....	98
ตารางที่ 20 ราคาของขั้วแคโทดที่แตกต่างกัน 6 ชนิด.....	99



## สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 1 แผนภาพส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่.....	7
รูปที่ 2 แผนภาพการม้วนของ Graphene sheet เพื่อเกิดเป็นโครงสร้างของ Carbon nanotube.	11
รูปที่ 3 Molecular structures ของ SWCNT และ MWCNT .....	11
รูปที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่รูปตัว H.....	14
รูปที่ 5 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดี่ยวแบบลูกบาศก์ (Liu & Logan, 2004) .....	15
รูปที่ 6 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดี่ยวแบบแบน (Min & Logan, 2004).....	15
รูปที่ 7 Polarization curve พร้อมค่า Open circuit voltage (OCV) และ Power density curve พร้อมค่า Maximum power density ( $P_{max}$ ).....	17
รูปที่ 8 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน .....	23
รูปที่ 9 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	24
รูปที่ 10 ส่วนประกอบของเครื่อง XPS.....	26
รูปที่ 11 ส่วนประกอบของเครื่อง ICP-OES .....	27
รูปที่ 12 midi Logger GL220, Graphtec.....	28
รูปที่ 13 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพรูปตัว H ที่เตรียมขึ้น .....	37
รูปที่ 14 น้ำเสียในบ่อกักน้ำของโรงอาหารสระแก้ว มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม.....	37
รูปที่ 15 ชั่วแอนด์ที่เตรียมขึ้นจากผ้าคาร์บอน.....	39
รูปที่ 16 แผนภาพแสดงเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ต่อกับ data logger .....	41
รูปที่ 17 แผนภาพแสดงเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ต่อกับ data logger และตัวต้านทานภายนอก.....	42
รูปที่ 18 TEM image (กำลังขยาย 100,000 เท่า) ของ MWCNTs-COOH ที่กระจายตัวใน 1% (v/v) Triton X-100.....	48



รูปที่ 19 TEM image (กำลังขยาย 100,000 เท่า) ของ Pt/MWCNTs-COOH โดยใช้ความเข้มข้นของ  $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$  เท่ากับ 1.5 mM, pH เท่ากับ 7, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 70 °C และเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 120 นาที.....49

รูปที่ 20 TEM images (กำลังขยาย 100,000 เท่า) ของ Pt/MWCNTs-COOH โดย pH เท่ากับ 7, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 70 °C, เวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 120 นาที โดยใช้ความเข้มข้นของ  $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$  ต่างกัน: a) 1.0 mM, 1.5 mM และ 2.0 mM.....50

รูปที่ 21 Histograms แสดงการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH โดย pH เท่ากับ 7, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 70 °C, เวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 120 นาที โดยใช้ความเข้มข้นของ  $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$  ต่างกัน: a) 1.0 mM, 1.5 mM และ 2.0 mM .....50

รูปที่ 22 TEM images (กำลังขยาย 100,000 เท่า) ของ Pt/MWCNTs-COOH โดยใช้ความเข้มข้นของ  $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$  เท่ากับ 1.5 mM, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 70 °C เวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 120 นาที และ pH ต่างกัน: a) 6, b) 7, c) 8 และ d) 9.....52

รูปที่ 23 Histograms แสดงการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH โดยใช้ความเข้มข้นของ  $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$  เท่ากับ 1.5 mM, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 70 °C เวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 120 นาที และ pH ต่างกัน: a) 6, b) 7, c) 8 และ d) 9.....53

รูปที่ 24 TEM images (กำลังขยาย 100,000 เท่า) ของ Pt/MWCNTs-COOH โดยความเข้มข้นของ  $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$  เท่ากับ 1.5 mM, pH เท่ากับ 7 เวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 120 นาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ต่างกัน: a) 60 °C, b) 70 °C และ c) 80 °C.....54

รูปที่ 25 Histograms แสดงการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH โดยใช้ความเข้มข้นของ  $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$  เท่ากับ 1.5 mM, pH เท่ากับ 7 เวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 120 นาที และ อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ต่างกัน: a) 60 °C, b) 70 °C และ c) 80 °C.....55

รูปที่ 26 TEM images (กำลังขยาย 100,000 เท่า) ของ Pt/MWCNTs-COOH โดยใช้ความเข้มข้นของ  $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$  เท่ากับ 1.5 mM, pH เท่ากับ 7, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 80 °C และเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ต่างกัน: a) 30 นาที, b) 60 นาที, c) 90 นาที และ d) 120 นาที.....56

รูปที่ 27 Histograms แสดงการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH โดยใช้ความเข้มข้นของ  $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$  เท่ากับ 1.5 mM, pH เท่ากับ 7, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 70 °C และเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์แตกต่างกัน: (a) 30 นาที, (b) 60 นาที, (c) 90 นาที และ (d) 120 นาที.....57

รูปที่ 28 FESEM images ที่กำลังขยาย 500 เท่า: a) Carbon cloth, b) MWCNTs-COOH/CC, c) Pt/MWCNTs-COOH/CC, d) SWCNTs-COOH/CC, e) Pt/SWCNTs-COOH/CC และ f) Commercial Pt/CC .....59

รูปที่ 29 FESEM images ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า: a) Carbon cloth, b) MWCNTs-COOH/CC, c) Pt/MWCNTs-COOH/CC, d) SWCNTs-COOH/CC, e) Pt/SWCNTs-COOH/CC และ f) Commercial Pt/CC .....59

รูปที่ 30 FESEM-EDX spectrum ของ Carbon cloth.....60

รูปที่ 31 FESEM-EDX spectrum ของ MWCNTs-COOH/CC.....60

รูปที่ 32 FESEM-EDX spectrum ของ Pt/MWCNTs-COOH/CC .....60

รูปที่ 33 FESEM-EDX spectrum ของ SWCNTs-COOH/CC .....61

รูปที่ 34 FESEM-EDX spectrum ของ Pt/SWCNTs-COOH/CC .....61

รูปที่ 35 FESEM-EDX spectrum ของ Commercial Pt/CC .....61

รูปที่ 36 EDX element mapping images ของ Pt จาก a) Pt/MWCNTs-COOH/CC b) Pt/SWCNTs-COOH/CC และ c) Commercial Pt/CC .....62

รูปที่ 37 XPS spectra ของ Pt/SWCNTs-COOH: a) Pt/SWCNTs-COOH, b) C 1s ของ Pt/SWCNTs-COOH, c) O 1s ของ Pt/SWCNTs-COOH และ d) Pt 4f ของ Pt/SWCNTs-COOH .....63

รูปที่ 38 XPS spectra ของ Pt/MWCNTs-COOH: a) Pt/MWCNTs-COOH, b) C 1s ของ Pt/MWCNTs-COOH, c) O 1s ของ Pt/MWCNTs-COOH และ d) Pt 4f ของ Pt/MWCNTs-COOH.....64

รูปที่ 39 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า (V) กับ เวลา (วัน) ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง).....65

รูปที่ 40 Polarization curves ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน),

MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง).....67

รูปที่ 41 Power density curves ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง).....68

รูปที่ 42 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า (V) กับ เวลา (วัน) ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง).....72

รูปที่ 43 Polarization curves ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง).....74

รูปที่ 44 Power density curves ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง).....75

รูปที่ 45 FESEM images ที่กำลังขยาย 500 เท่า ของ Carbon cloth ที่นำมาใช้เป็นขั้วแอโนดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดเป็น; a) MWCNTs-COOH/CC, b) Pt/MWCNTs-COOH/CC, c) SWCNTs-COOH/CC, d) Pt/SWCNTs-COOH/CC, e) Carbon cloth และ f) Commercial Pt/CC.....77

รูปที่ 46 FESEM images ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ของ Carbon cloth ที่นำมาใช้เป็นขั้วแอโนดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดเป็น; a) MWCNTs-COOH/CC, b) Pt/MWCNTs-COOH/CC, c) SWCNTs-COOH/CC, d) Pt/SWCNTs-COOH/CC, e) Carbon cloth และ f) Commercial Pt/CC.....78

รูปที่ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า (V) กับ เวลา (วัน) ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง),

Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง).....	79
รูปที่ 48 Polarization curves ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง).....	81
รูปที่ 49 Power density curves ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง).....	81
รูปที่ 50 FESEM images ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของขั้วแคโทดที่มี Ag เกาะอยู่บนขั้ว โดยมีขั้วแคโทดที่แตกต่างกัน: a) Carbon cloth, b) MWCNTs-COOH/CC, c) Pt/MWCNTs-COOH/CC, d) SWCNTs-COOH/CC, e) Pt/SWCNTs-COOH/CC และ f) Commercial Pt/CC.....	87
รูปที่ 51 FESEM images ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า ของขั้วแคโทดที่มี Ag เกาะอยู่บนขั้ว โดยมีขั้วแคโทดที่แตกต่างกัน: a) Carbon cloth, b) MWCNTs-COOH/CC, c) Pt/MWCNTs-COOH/CC, d) SWCNTs-COOH/CC, e) Pt/SWCNTs-COOH/CC และ f) Commercial Pt/CC.....	87
รูปที่ 52 FESEM-EDX spectra ของ MWCNTs-COOH/CC ที่ใช้เป็นขั้วแคโทด: a) ผลึก Ag และ b) ผลึกโลหะ AgCl.....	88
รูปที่ 53 FESEM-EDX spectra ของ Pt/MWCNTs-COOH/CC ที่ใช้เป็นขั้วแคโทด: a) ผลึก Ag และ b) ผลึกโลหะ AgCl.....	88
รูปที่ 54 FESEM-EDX spectra ของ SWCNTs-COOH/CC ที่ใช้เป็นขั้วแคโทด: a) ผลึก Ag และ b) ผลึกโลหะ AgCl.....	89
รูปที่ 55 FESEM-EDX spectra ของ Pt/SWCNTs-COOH/CC ที่ใช้เป็นขั้วแคโทด: a) ผลึก Ag และ b) ผลึกโลหะ AgCl.....	89
รูปที่ 56 FESEM-EDX spectra ของ Carbon cloth ที่ใช้เป็นขั้วแคโทด: a) ผลึก Ag และ b) ผลึกโลหะ AgCl.....	90
รูปที่ 57 FESEM-EDX spectra ของ Commercial Pt/CC ที่ใช้เป็นขั้วแคโทด: a) ผลึก Ag และ b) ผลึกโลหะ AgCl.....	90

รูปที่ 58 ตัวอย่างของตะกอนที่เกิดขึ้นในช่องแคโทดของ MWCNTs-COOH/CC.....91

รูปที่ 59 FESEM images ของตัวอย่างตะกอนในช่องแคโทดของ MWCNTs-COOH/CC: a) ที่กำลังขยาย 150 เท่า b) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และ c) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....91

รูปที่ 60 FESEM-EDX spectra ของตะกอนที่เกิดในช่องแคโทด: a) ผลึก AgCl และ b) ผลึกโลหะ Ag.....91

รูปที่ 61 FESEM images ที่กำลังขยาย 500 เท่า ของ Carbon cloth ที่นำมาใช้เป็นขั้วแอโนดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ของขั้วแคโทดที่เป็น; a) MWCNTs-COOH/CC, b) Pt/MWCNTs-COOH/CC, c) SWCNTs-COOH/CC, d) Pt/SWCNTs-COOH/CC, e) Carbon cloth และ f) Commercial Pt/CC.....93

รูปที่ 62 FESEM images ที่กำลังขยาย 500 เท่า ของ Carbon cloth ที่นำมาใช้เป็นขั้วแอโนดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ของขั้วแคโทดที่เป็น; a) MWCNTs-COOH/CC, b) Pt/MWCNTs-COOH/CC, c) SWCNTs-COOH/CC, d) Pt/SWCNTs-COOH/CC, e) Carbon cloth และ f) Commercial Pt/CC.....94



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มา และความสำคัญ

การใช้พลังงานเป็นตัวแปรสำคัญในการเปรียบเทียบระดับการพัฒนาประเทศ ในประเทศกำลังพัฒนาการใช้พลังงานจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามการเพิ่มขึ้นของการเติบโตทางเศรษฐกิจ (Berktaf et al., 2004) ในปัจจุบันพลังงานหลักที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์มาจากแหล่งต่างๆ ตัวอย่างเช่น น้ำมันดิบ ถ่านหิน และแก๊สธรรมชาติ เป็นต้น ซึ่งพลังงานที่ได้กล่าวมาข้างต้นถือเป็นพลังงานที่ใช้แล้วหมดไป มีปริมาณจำกัด เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในแหล่งต่างๆ ต้องใช้เวลาในการเกิดเป็นระยะเวลาอันยาวนาน และแหล่งพลังงานเหล่านี้ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เรียกว่า พลังงานสิ้นเปลือง (Non-renewable energy) โดยแหล่งพลังงานสิ้นเปลืองอาจหมดลงในอนาคตอันใกล้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของมนุษย์ และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยแก๊สเรือนกระจก (Greenhouse gas) (Nadimi & Tokimatsu, 2017) เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) มีเทน ( $\text{CH}_4$ ) และไนตรัสออกไซด์ ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ซึ่งแก๊สเรือนกระจกนี้จะทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ระดับน้ำทะเลสูงขึ้น และส่งผลกระทบต่ออื่นๆ ต่อมนุษย์ (Latake et al., 2015) จึงมีการค้นหาแหล่งพลังงานอื่นๆ เพื่อมาทดแทนแหล่งพลังงานเดิม อาทิเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy) พลังงานลม (Wind energy) พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal heat) และพลังงานน้ำ (Hydropower) เป็นต้น ซึ่งพลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างไม่จำกัด และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Renewable energy) พลังงานอีกรูปแบบหนึ่งที่มีความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีปริมาณมาก และมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามอัตราการขยายตัวของประชากร ทำให้พลังงานชนิดนี้สามารถตอบสนองความต้องการของมนุษย์ได้อย่างไม่จำกัด นั่นก็คือ ของเสีย (Waste) ซึ่งของเสียที่พบมากไม่ว่าจะมาจากอุตสาหกรรมต่างๆ หรือแม้แต่ครัวเรือน ก็คือ น้ำเสีย (Wastewater) ซึ่งเป็นของเสียที่ต้องมีการบำบัดให้ได้คุณภาพตรงตามมาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดก่อนปล่อยออกสู่แหล่งน้ำ ถ้าไม่มีการบำบัดน้ำเสียแล้วปล่อยออกสู่แหล่งน้ำอาจทำให้เกิดภาวะมลพิษ ส่งผลกระทบต่อดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ไม่เหมาะต่อการบริโภค และอุปโภคของมนุษย์ เช่น น้ำมีสีผิดปกติ มีกลิ่นเหม็น มีสารเคมีหรือเชื้อโรค รวมทั้งมีอุณหภูมิสูงผิดปกติ เป็นต้น โดยในการบำบัดน้ำจะต้องคำนึงถึง คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำ เช่น ความใส ความขุ่น กลิ่น และสี เป็นต้น และคุณสมบัติทางเคมีของน้ำ เช่น ค่า pH ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biological Oxygen Demand; BOD) ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Chemical Oxygen Demand; COD) และความกระด้าง (Hardness) เป็นต้น

ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคโนโลยีที่อาศัยแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำเสียเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสีย และสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ในเวลาเดียวกัน เรียกว่า เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ (Microbial Fuel Cell; MFC) โดยเทคโนโลยีนี้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ใช้ได้กับน้ำเสียหลายประเภท ไม่เกิดตะกอน และไม่มีค่าใช้จ่ายในการกำจัด โดยหลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเริ่มจากแบคทีเรียในน้ำเสียรวมตัวกันเป็นกลุ่มแบคทีเรีย (Biofilm) เกาะอยู่บนขั้วแอโนด (Anode) ซึ่งแบคทีเรียจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่างๆ เช่น กลูโคส ซูโครส อะซิเตท ให้กลายเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) โปรตอน (H<sup>+</sup>) และอิเล็กตรอน (e<sup>-</sup>) ซึ่งโปรตอน และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด (Cathode) โดยโปรตอนเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านโปรตอน (Proton Exchange Membrane; PEM) ส่วนอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอกไปยังขั้วแคโทด จากนั้นมีตัวมารับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) ซึ่งโดยทั่วไปนิยมใช้ออกซิเจน (O<sub>2</sub>) โดยออกซิเจนจะรวมตัวกับอิเล็กตรอน และโปรตอน เกิดปฏิกิริยารีดักชัน และได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ (H<sub>2</sub>O) (Bruce E. Logan, 2008) โดยความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนด และขั้วแคโทด เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ส่งผลให้เกิดการผลิตกระแสไฟฟ้าขึ้น (B. E. Logan et al., 2007; Rinaldi et al., 2008)

ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น เชื้อเพลิงตั้งต้น (Substrate) [เช่น กลูโคส (Zou et al., 2008) อะซิเตท (Tsai et al., 2009) และน้ำเสียสังเคราะห์ (Aldrovandi et al., 2009)] ขั้วแอโนด (Anode) และขั้วแคโทด (Cathode) [เช่น Carbon felt (H. J. Kim et al., 2002) Carbon cloth (Ishii et al., 2008) และ Carbon paper (Kakarla & Min, 2014)] ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) [เช่น Platinum (J. D. Choi et al., 2011) และ Platinum-Palladium alloy (Quan et al., 2015)] เยื่อเลือกผ่าน (Membrane) [เช่น Nafion (Fangzhou et al., 2011) และ Polytetrafluoroethylene (Pusomjit et al., 2018)] รูปแบบของรีแอกเตอร์ (Reactor design) [เช่น Dual-chamber MFC (Thepsuparungsikul et al., 2012) และ Single-chamber MFC (Cheng et al., 2006)] ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (Electrode spacing) [เช่น 2 cm (Cheng et al., 2006) และ 20 cm (Ghangrekar & Shinde, 2007)] และ สารสื่อกลาง (Mediator) [เช่น Cu<sup>2+</sup> (M. Li & Zhou, 2019), Hexacyanoferrate (Sharma et al., 2008) และ Ferricyanide (Zou et al., 2008)]

ปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (Oxygen Reduction Reaction; ORR) ซึ่งนิยมใช้ออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้าย (Final electron acceptor) อย่างไรก็ตามออกซิเจนสามารถรับอิเล็กตรอนได้ช้า เนื่องจากอัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยา ORR ต่ำ ทำให้ต้องใช้พลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ในการทำลายพันธะของออกซิเจนมาก (Z. Wang et al., 2014) ส่งผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ดังนั้นจึงมีการพัฒนา

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพโดยนำตัวเร่งปฏิกิริยามาช่วยในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือ แพลทินัม (Pt) เนื่องจาก Pt มีค่า Catalytic activity สูง แต่มีข้อจำกัดคือ Pt มีราคาสูง ซึ่งคิดเป็น 50% ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ (Quan et al., 2015)

ในปัจจุบันท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube; CNT) นิยมนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าและวัสดุรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา (Supporting material) เนื่องจากมีคุณสมบัติที่เด่นคือ มีพื้นที่ผิวมาก (High surface area) นำไฟฟ้าได้ดี (Excellent electrical conductivity) ความเป็นรูพรุนสูง (High porosity) และสามารถสร้างหมู่ฟังก์ชันเพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยายึดเกาะได้ (Samad et al., 2018) ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาบนท่อนาโนคาร์บอนสามารถเตรียมได้หลายวิธี เช่น Chemical reduction (Ma et al., 2014) Chemical deposition (Xue et al., 2007) Hydrothermal method (Tan et al., 2016) และ Deposition-precipitation (DP) (Pusomjit et al., 2016) เป็นต้น โดยเทคนิค Deposition-precipitation นั้นมีข้อดีคือ ทำได้ง่าย ราคาถูก ใช้เวลาน้อย และให้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก (Sandoval et al., 2011) ในปัจจุบันมีเพียงกลุ่มวิจัยเดียว (ซึ่งเป็นกลุ่มของผู้วิจัย) ที่รายงานการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว (Single-walled carbon nanotubes; SWCNTs) ด้วยวิธี Deposition-precipitation (Pusomjit et al., 2016) แต่อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น (Multi-walled carbon nanotubes; MWCNTs) ด้วยวิธีนี้

การปนเปื้อนโลหะหนักในแหล่งทรัพยากรธรรมชาติเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และสิ่งแวดล้อม เนื่องจากโลหะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ ซึ่งแตกต่างจากสารอินทรีย์ นอกจากนี้โลหะหนักหลายชนิดสามารถสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ การปล่อยโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อมมาจากหลายแหล่ง ตัวอย่างเช่น การทำเหมือง (Mining) การปฏิบัติการทางโลหวิทยา (Metallurgical operations) การเผาเชื้อเพลิงฟอสซิล (Burning fossil fuels) การผลิตปูนซีเมนต์ (Cement production) ปุ๋ย (Fertilizers) ยาฆ่าแมลง (Pesticides) สีย้อม (Dyes) (Fu & Wang, 2011) เป็นต้น โดยปกติความเข้มข้นของโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียนั้นอยู่ในช่วง  $\mu\text{g/L}$  ถึง  $\text{mg/L}$  (H. Wang & Ren, 2014) ในการกำจัดไอออนของโลหะหนักในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ทำได้โดยนำไอออนโลหะใส่ในช่องแคโทดเพื่อเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนการใช้ออกซิเจน ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของโลหะที่ขั้วแคโทด (Cathodic metal reduction) (Heijne et al., 2010; G. Wang et al., 2008) ไอออนโลหะหนักที่นิยมนำมาใช้เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เช่น  $\text{Ag}^+$  (C. Choi & Cui, 2012; Lim et al., 2015; Y.-H. Wang et al., 2013)  $\text{Cu}^{2+}$  (de Radiguès et al., 2010; Tao et al., 2014),  $\text{V}^{5+}$  (B. Zhang et al., 2012; B. Zhang et al., 2009),  $\text{Cr}^{6+}$  (G. Wang et al., 2008; B. Zhang et al., 2012) และ  $\text{Cd}^{2+}$  (Abourached et al., 2014) เป็นต้น



ในงานวิจัยนี้สนใจที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่รูปตัว H (H-shape dual-chamber MFC) โดยที่ขั้วแคโทดจะมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทองคำขาว (Pt catalyst) บนตัวรองรับ (Supporting material) ที่เป็นท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้นที่มีหมู่คาร์บอกซิลเป็นหมู่ฟังก์ชัน (Multi-walled carbon nanotubes with carboxyl group; MWCNTs-COOH) ในการเตรียม Pt/MWCNTs-COOH จะใช้วิธี Deposition-precipitation โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเทคนิคนี้ได้แก่ ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , ค่า pH ของสารแขวนลอย, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ (Refluxing temperature) และเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ (Refluxing time) พร้อมทั้งศึกษาคุณสมบัติด้านโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) ศึกษาคุณสมบัติด้านลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิล์มอีมิสชันร่วมกับเครื่องเอกซเรย์แบบพลังงานกระจาย (Field Emission Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy; FESEM-EDX) และวิเคราะห์สถานะออกซิเดชันของอะตอมด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิววัสดุ (X-ray Photoelectron Spectroscopy; XPS) โดยเปรียบเทียบเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ขั้วแคโทดแตกต่างกัน 6 ชนิดได้แก่ ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth; CC) ผ้าคาร์บอนที่เคลือบด้วย MWCNTs-COOH (MWCNTs-COOH/CC) ผ้าคาร์บอนที่เคลือบด้วย Pt/MWCNTs-COOH (Pt/MWCNTs-COOH/CC) ผ้าคาร์บอนที่เคลือบด้วย SWCNTs-COOH (SWCNTs-COOH/CC) ผ้าคาร์บอนที่เคลือบด้วย Pt/SWCNTs-COOH (Pt/SWCNTs-COOH/CC) และผ้าคาร์บอนที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา Pt เคลือบอยู่ที่มีจำหน่าย (Commercial Pt/CC) โดยใช้ผ้าคาร์บอนเป็นวัสดุขั้วแอโนด ใช้ Polytetrafluoroethylene (PTFE) membrane เป็นเยื่อเลือกผ่าน และใช้น้ำเสียจากบ่อพักน้ำของโรงอาหารสระแก้ว มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม และน้ำเสียสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น จากนั้นประเมินประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพในด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าจากค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Voltage; OCV) ค่าความต้านทานภายใน (Internal resistance;  $R_{int}$ ) และค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power density;  $P_{max}$ ) ประเมินประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียด้วยการวิเคราะห์ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Chemical Oxygen Demand; COD) ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biochemical Oxygen Demand; BOD) ค่าของแข็งแขวนลอย (Total Suspended Solids; TSS) และค่าของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids; TDS) นอกจากนี้มีการนำเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่เตรียมขึ้นมาประยุกต์ใช้เพื่อกำจัดโลหะเงิน โดยอาศัยปฏิกิริยารีดักชันที่ขั้วแคโทด

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH ที่มีขนาดเล็ก และกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอด้วยเทคนิค Deposition-precipitation (DP) โดยจะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเทคนิค ได้แก่ ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , ค่า pH ของสารแขวนลอย, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ (Refluxing temperature) และเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ (Refluxing time)

2. เพื่อประเมินการกระจายตัว และขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH ด้วย TEM ประเมินลักษณะทางสัณฐานวิทยา (Morphology) และการมีอยู่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ด้วย FESEM-EDX และวิเคราะห์สถานะออกซิเดชันของอะตอม Pt ด้วย XPS

3. เพื่อประเมินประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ เมื่อใช้ขั้วแคโทดที่แตกต่างกัน 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth, SWCNTs-COOH/CC, Pt/SWCNTs-COOH/CC, MWCNTs-COOH/CC, Pt/MWCNTs-COOH/CC และ Commercial Pt/CC จากค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิด (Open Circuit Voltage; OCV) ค่าความต้านทานภายใน (Internal resistance;  $R_{int}$ ) และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power density;  $P_{max}$ ) โดยใช้น้ำเสียจากบ่อพักน้ำของโรงอาหารสระแก้ว มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม และน้ำเสียสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น

4. เพื่อประเมินประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ขั้วแคโทดต่างชนิดกัน จากค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Chemical Oxygen Demand; COD) ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biochemical Oxygen Demand; BOD) ค่าของแข็งแขวนลอย (Total Suspended Solids; TSS) และค่าของแข็งละลายน้ำ (Total Dissolved Solids; TDS)

5. เพื่อประเมินประสิทธิภาพด้านการกำจัดโลหะเงินของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ขั้วแคโทดต่างชนิดกัน

## 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1. ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH ที่เตรียมด้วยวิธี DP ให้อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ที่มีขนาดเล็กและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

2. Pt/MWCNTs-COOH ที่เตรียมขึ้นสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพในการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนบนขั้วแคโทดได้

3. ขั้วแคโทด Pt/MWCNTs-COOH/CC ที่เตรียมขึ้นเพื่อใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ สามารถผลิตกระแสไฟฟ้า บำบัดน้ำเสีย และกำจัดโลหะหนักได้อย่างมีประสิทธิภาพ

#### 1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH ด้วยเทคนิค DP โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเทคนิคได้แก่ ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , ค่า pH ของสารแขวนลอย, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ (Refluxing temperature) และเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ (Refluxing time)

2. ประเมินการกระจายตัว และขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH ด้วย TEM ประเมินลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการมีอยู่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ด้วย FESEM-EDX และวิเคราะห์สถานะออกซิเดชันของอะตอม Pt ด้วย XPS

3. ประเมินประสิทธิภาพทางด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดที่แตกต่างกัน 6 ขั้ว ได้แก่ CC, SWCNTs-COOH/CC, Pt/SWCNTs-COOH/CC, MWCNTs-COOH/CC, Pt/MWCNTs-COOH/CC และ Commercial Pt /CC โดยพิจารณาจากค่า OCV,  $R_{int}$  และ  $P_{max}$  โดยใช้น้ำเสียจากบ่อกักน้ำของโรงอาหารสระแก้ว มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม และน้ำเสียสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น

4. ประเมินประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดที่แตกต่างกัน 6 ขั้ว โดยพิจารณาจากค่า COD, BOD, TSS และ TDS โดยใช้น้ำเสียจากบ่อกักน้ำของโรงอาหารสระแก้ว มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม และน้ำเสียสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น

5. ประเมินประสิทธิภาพด้านการกำจัดโลหะเงินของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ขั้วแคโทดต่างชนิดกัน

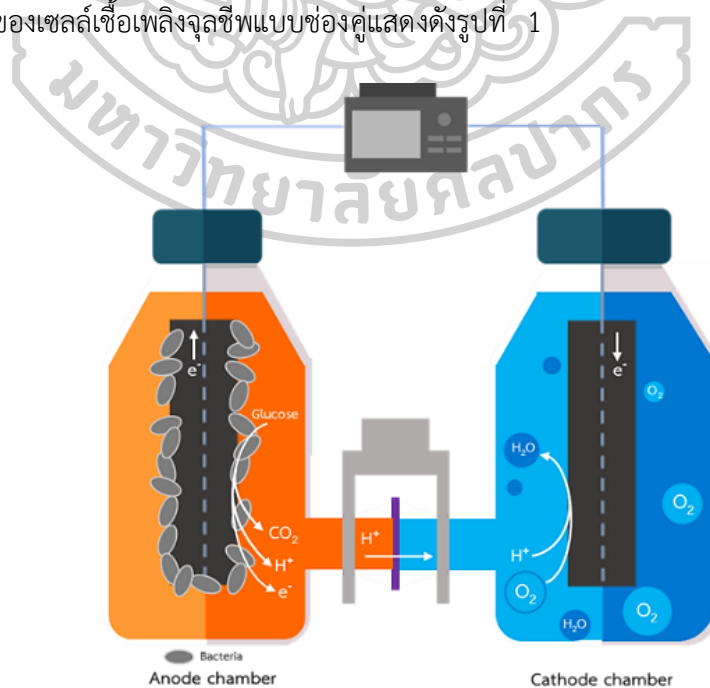


## บทที่ 2

### ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หลักการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

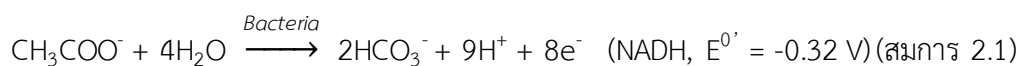
เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ (Microbial Fuel Cell; MFC) เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดน้ำเสียได้ในเวลาเดียวกันโดยเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงาน โดยแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำเสียจะไปเกาะขั้วแอโนด (Anode) ในลักษณะเป็นไบโอฟิล์ม (Biofilm) แบคทีเรียจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการออกซิไดส์สารต่างๆ ทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอิเล็กตรอน ( $e^-$ ) โปรตอน ( $H^+$ ) และคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) โดยโปรตอนจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อเลือกผ่านโปรตอน (Proton Exchange Membrane; PEM) และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากขั้วแอโนดที่เป็นขั้วลบผ่านวงจรไฟฟ้าภายนอก (External electric circuit) ไปยังขั้วแคโทดที่เป็นขั้วบวก และมีตัวรับอิเล็กตรอน (Electron acceptor) มารับอิเล็กตรอนและโปรตอนเกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ ดังรูปที่ 1 โดยทั่วไปจะใช้ตัวรับอิเล็กตรอนเป็นออกซิเจน ( $O_2$ ) นอกจากนี้ยังมีตัวรับอิเล็กตรอนอื่นๆ เช่น Copper (II) (Choudhury et al., 2017), Hexacyanoferrate (Sharma et al., 2008), Nitrate, Sulfate (He & Angenent, 2006) และ Ferricyanide (Zou et al., 2008) เป็นต้น โดยความต่างศักย์ระหว่างขั้วแอโนด และขั้วแคโทด เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ส่งผลให้เกิดการผลิตกระแสไฟฟ้า (Bruce E. Logan, 2008; Bruce E. Logan et al., 2006; Rinaldi et al., 2008) ซึ่งส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพส่วนประกอบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่

ปฏิกิริยาโดยทั่วไปที่ขั้วแอโนด และขั้วแคโทด โดยมี Acetate เป็น Substrate แสดงดังสมการที่ 2.1-2.3

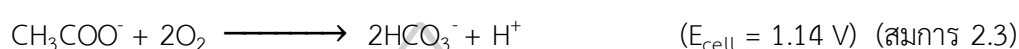
Anodic reaction:



Cathodic reaction:



Overall:



## 2.2 ส่วนประกอบสำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

### 2.2.1 ขั้วแอโนด

ขั้วแอโนด (Anode) เป็นส่วนประกอบสำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยเป็นส่วนที่แบคทีเรียในเชื้อเพลิงตั้งต้น (Substrate) ทั้งที่มีสารสื่อกลาง (Mediator) และไม่มีสารสื่อกลาง (No mediator) มาเกาะจนกลายเป็น Biofilm คุณสมบัติที่สำคัญของขั้วแอโนดคือจะต้องสามารถถ่ายโอนอิเล็กตรอนได้ดี โดยขั้วแอโนดที่ดีควรมีคุณสมบัติคือ มีพื้นที่ผิวมาก (High surface area) เพื่อให้แบคทีเรียในน้ำเสียมายึดเกาะ (Bacterial attachment) เป็น Biofilm มีความต้านทานต่ำ (Low resistance) มีค่าการนำไฟฟ้าสูง (High conductivity) เพื่อถ่ายโอนอิเล็กตรอน ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารเชื้อเพลิงตั้งต้น (Substrate oxidation) ได้ดีขึ้น นอกจากนี้วัสดุที่ใช้ทำขั้วแอโนดควรมีคุณสมบัติที่ไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ (Non-toxic to microorganisms) มีความทนทาน (Toughness) และราคาไม่แพง (Cost effective) ซึ่งวัสดุที่ได้รับความนิยมนำมาใช้เตรียมขั้วแอโนดทำมาจากวัสดุ 2 ชนิด ได้แก่ วัสดุที่ไม่ใช่คาร์บอน (Non-carbon material) เช่น Stainless steel ทอง และไทเทเนียม เป็นต้น และวัสดุที่ทำจากคาร์บอน (Carbon material) เช่น Carbon felt, Carbon cloth, Carbon paper และ Carbon fiber เป็นต้น ซึ่งในปัจจุบันนิยมใช้ Carbon cloth และ Carbon paper เนื่องจากให้ค่าการนำไฟฟ้าสูง ใช้งานได้ง่าย และไม่เป็นพิษต่อแบคทีเรีย (Do et al., 2018; B. E. Logan et al., 2007)

### 2.2.2 ขั้วแคโทด และตัวเร่งปฏิกิริยา

ขั้วแคโทด (Cathode) ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นบริเวณที่เกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (Oxygen reduction reaction; ORR) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในแง่ของอัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยออกซิเจนจะเคลื่อนที่ไปรีดิวที่ขั้วแคโทด และรวมตัวกับโปรตอนเกิดผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ ดังนั้นขั้วแคโทดจึงมีความสำคัญในการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (Choudhury et al.,

2017) โดยวัสดุที่ใช้เป็นขั้วแคโทดควรมีศักย์ไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์สูง (High redox potential) และสามารถจับโปรตอนได้ง่าย (Easily capture protons) (Do et al., 2018) ในปัจจุบันนิยมใช้ Graphite carbon paper และ Carbon fiber (Zhou et al., 2011) การปรับปรุงประสิทธิภาพของขั้วแคโทดจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ ดังนั้นจึงมีการนำตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) มาใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ เช่น Platinum (Pt), Nickel (Ni) และ Palladium (Pd) เป็นต้น คุณสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดีควรมีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดี (High catalytic activity) สามารถลดพลังงานก่อกัมมันต์ที่ขั้วแคโทด (Reduce the cathodic reaction activation energy) สามารถเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา (Increase the reaction rate) มีขนาดเล็ก และขนาดสม่ำเสมอ (Small and uniform particles) และมีความเสถียรทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical stability) (Do et al., 2018) โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือ แพลตตินัม (Pt) เนื่องจาก Pt สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ดีมาก มีความเฉาะเจาะจง และมีความเสถียร (He & Angenent, 2006; Tan et al., 2016; J.-N. Zhang et al., 2011) แต่ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt มีข้อจำกัดคือ Pt มีราคาแพง คิดเป็นประมาณ 50 % ของค่าใช้จ่ายทั้งหมดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ (Quan et al., 2015) อีกทั้งยังเป็นพิษต่อร่างกาย (Y. Zhang et al., 2011)

**ตารางที่ 1** ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาวิธีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

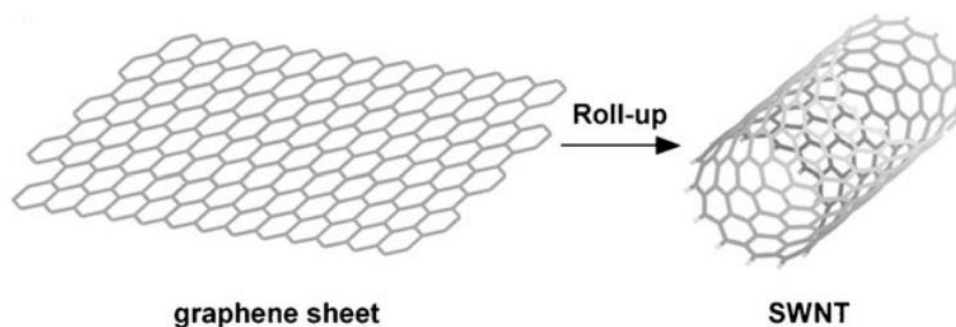
Catalyst	Supporting material	Method	Cathode material	$P_{max}$ (mW/m <sup>2</sup> )	Reference
Pt	SWCNTs-COOH	Deposition precipitation	Carbon cloth	2,022	(Pusomjit et al., 2018)
PtSnP	Carbon support	Chemical reduction	Carbon cloth	361	(B. Li et al., 2017)
Pt-Au	MWCNTs	Reverse microemulsion	Membrane electrode assemblies	625	(Beltrán-Gastélum et al., 2016)
Pt	CNTs	Chemical reduction	Carbon paper	147	(Halakoo et al., 2015)

Catalyst	Supporting material	Method	Cathode material	$P_{max}$ (mW/m <sup>2</sup> )	Reference
Pt-Pd	MWCNTs	Electrodeposition	Carbon paper	762	(Quan et al., 2015)
Pt	CNTs	Chemical reduction	Carbon paper	169	(Ghasemi et al., 2013)
Pt	MWCNTs	Electrodeposition	Carbon cloth	59	(Yen et al., 2013)
Pt	MWCNTs-COOH	Deposition precipitation	Carbon cloth	In this work	

### 2.2.3 ท่อนาโนคาร์บอน

ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube; CNT) แสดงศักยภาพที่ยอดเยี่ยมในการเป็นวัสดุตัวนำไฟฟ้าในการใช้งานเซลล์เชื้อเพลิง เนื่องจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก (High specific surface area) มีความเสถียรทางเคมี (Good chemical stability) มีค่าการนำไฟฟ้าสูง (High conductivity) มีคุณสมบัติเชิงกลที่เป็นเอกลักษณ์ (Unique mechanical properties) และมีความเหมาะสมในการให้ Catalyst ยึดเกาะบนพื้นผิว (Suitable for catalyst deposition) (Quan et al., 2015; Timur et al., 2007; Heming Wang et al., 2011; Y. Zhang et al., 2017) ดังนั้นชนิดของวัสดุรองรับรวมทั้งวิธีในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการนำมาใช้ประโยชน์

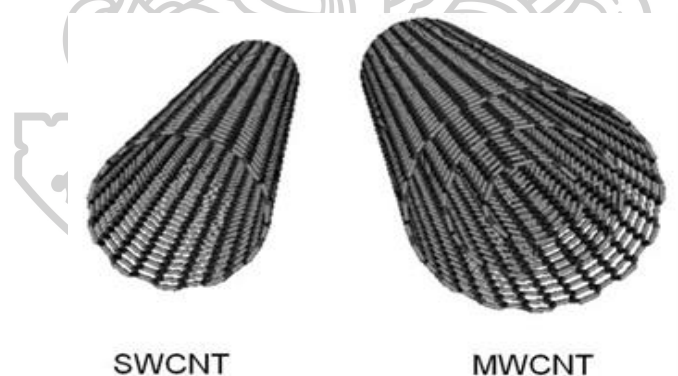
ท่อนาโนคาร์บอน ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนจัดเรียงตัวกันเป็นวง 6 เหลี่ยม โดยมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ซึ่งเกิดจากการม้วนตัวของแผ่นแกรฟีน (Graphene) โดยแกรฟีนจะมีหนึ่งชั้นหรือมากกว่าหนึ่งชั้นกลายเป็น Single-walled CNT (SWCNT) และ Multi-walled CNT (MWCNT) ที่มีปลายปิดหรือปลายเปิด มีเส้นผ่านศูนย์กลางระดับนาโนเมตร (nm) และมีความยาวในระดับไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) (รูปที่ 2) (Dai, 2002; Slate et al., 2019; Y. Zhang et al., 2017)



รูปที่ 2 แผนภาพการม้วนของ Graphene sheet เพื่อเกิดเป็นโครงสร้างของ Carbon nanotube (ดัดแปลงจาก (Roth & Park, 2010))

โดยทั่วไป CNT แบ่งออกเป็น 2 ชนิด (Dai, 2002; Slate et al., 2019)

1. Single-walled CNT ประกอบด้วยชั้นทรงกระบอกของ Graphene เพียง 1 ชั้น เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 0.8-2.0 nm และมีความยาวมากกว่า 1.5 cm (รูปที่ 3)
2. Multi-walled CNT ประกอบด้วยชั้นทรงกระบอกของ Graphene หลายๆ ชั้นซ้อนกัน มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 5-20 nm โดยมีระยะห่างของแต่ละชั้นประมาณ 0.34 nm เส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 5-100 nm และมีความยาวมากถึง 100  $\mu\text{m}$  (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 Molecular structures ของ SWCNT และ MWCNT (Institute for Molecular of Cellular Biology, 2011)

#### 2.2.4 เยื่อเลือกผ่าน

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีวมักการใช้เยื่อเลือกผ่านโปรตอน (Proton exchange membrane; PEM) เพื่อทำหน้าที่ขนส่งโปรตอน โดยในการขนส่งโปรตอนจะอาศัยโครงสร้างทางเคมีของสายพอลิเมอร์



ชนิดของพอลิเมอร์ และความแข็งแรงของหมู่ฟังก์ชันที่เกาะอยู่บนพอลิเมอร์ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเยื่อเลือกผ่านโปรตอน และมักใช้เป็นตัวแยกระหว่างสารละลายแอโนไลต์ และสารละลายแคโทไลต์ออกจากกัน นอกจากนี้ยังช่วยลดการไหลของเชื้อเพลิงตั้งต้นจากช่องแอโนดไปยังช่องแคโทดและป้องกันไม่ให้ออกซิเจนจากช่องแคโทดแพร่เข้ามายังช่องแอโนด โดยเยื่อเลือกผ่านโปรตอนนี้ควรมีความสามารถในการส่งผ่านโปรตอนสูง (High proton transfer) และความต้านทานภายในต่ำ (Low internal resistance) (Do et al., 2018; Liu et al., 2005; Pant et al., 2010)

### 2.2.5 เชื้อเพลิงตั้งต้น

เชื้อเพลิงตั้งต้น (Substrate) เป็นปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการผลิตพลังงานของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยเชื้อเพลิงตั้งต้นที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อชนิดของจุลชีพด้วย เชื้อเพลิงมีทั้งที่สังเคราะห์ขึ้น และนำมาจากแหล่งธรรมชาติ ยกตัวอย่างเช่น น้ำเสียจากโรงอาหาร น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียจากครัวเรือน เป็นต้น โดยตัวอย่างเชื้อเพลิงตั้งต้นที่นำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างเชื้อเพลิงตั้งต้นชนิดต่างๆ ที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

Type of substrate	Concentration of substrate	Type of MFC	$P_{max}$ (mW/cm <sup>2</sup> )	Reference
Acetate	1 g/L	Cube shaped one-chamber MFC with graphite fiber brush anode (7,170 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> brush volume)	0.800	(B. E. Logan et al., 2007)
Azo dye with glucose	300 mg/L	One-chamber air-cathode MFC with carbon paper anode (36 cm <sup>2</sup> )	0.090	(Sun et al., 2009)
Domestic wastewater	600 mg/L	Two-chamber mediator-less MFC with plain graphite electrode (50 cm <sup>2</sup> )	0.060	(X. Wang et al., 2009)
Ethanol	10 mM	Two-chamber aqueous cathode MFC with carbon paper electrodes (22.5 cm <sup>2</sup> )	0.025	(J. R. Kim et al., 2007)

Type of substrate	Concentration of substrate	Type of MFC	$P_{max}$ (mW/cm <sup>2</sup> )	Reference
Glucose	6.7 mM	One-chamber air-cathode MFC (12 mL) with non-wet proofed carbon cloth as anode (2 cm <sup>2</sup> ) and wet proofed carbon cloth as cathode (7 cm <sup>2</sup> )	0.700	(Catal et al., 2008)
Lactate	18 mM	Two-chamber MFC with graphite felt electrode (20 cm <sup>2</sup> )	0.005	(Manohar & Mansfeld, 2009)
Synthetic wastewater	12.1 g/L COD	Dual-chamber MFC with graphite plate electrode (83.56 cm <sup>2</sup> )	0.086	(Venkata Mohan et al., 2008)
Synthetic wastewater	16 g COD/day	Membrane-less, mediator-less MFC with glassy carbon electrodes (160 cm <sup>2</sup> )	0.017	(Aldrovandi et al., 2009)
Synthetic wastewater	510 mg/L	Dual chamber MFC with stainless steel as anode (170 cm <sup>2</sup> ) and graphite rods as cathode (150 cm <sup>2</sup> )	0.008	(Jadhav & Ghangrekar, 2009)
Artificial wastewater with glucose and glutamate	300 mg/L	Membrane-less MFC with anode (465 cm <sup>2</sup> ) at bottom and cathode (89 cm <sup>2</sup> ) at top of cylinder; graphite felt as both electrode	0.020	(Jang et al., 2004)
Canteen wastewater		Dual-chamber MFC with carbon cloth as anode and Pt/MWCNTs-COOH/CC as cathode		In this work
Synthetic wastewater		Dual-chamber MFC with carbon cloth as anode and Pt/MWCNTs-COOH/CC as cathode		In this work

## 2.3 รูปแบบของรีแอคเตอร์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีรูปแบบที่หลากหลาย โดยถูกประเมินจากค่ากำลังไฟฟ้า (Power output) เสถียรภาพ (Stability) และอายุการใช้งาน (Longevity) (Parkash, 2016) โดยรูปแบบของรีแอคเตอร์สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมี 2 แบบ คือ เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ (Dual-chamber MFC) และเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดี่ยว (Single-chamber MFC)

### 2.3.1 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่

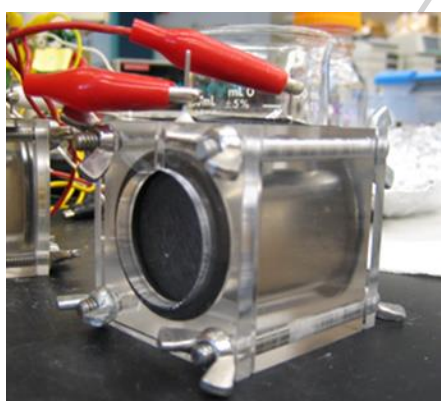
เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ (Dual-chamber MFC) ถูกใช้อย่างกว้างเนื่องจากมีราคาถูก โดยรูปแบบช่องที่ใส่สารละลายมีหลายรูปแบบ เช่น ทรงกระบอก (Cylindrical) มุมฉาก (Rectangular) และขนาดเล็ก (Miniature) โดยรูปแบบของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่นิยมใช้เป็นรูปตัว H (รูปที่ 4) ประกอบไปด้วยช่องแอโนด (Anode chamber) และช่องแคโทด (Cathode chamber) เชื่อมต่อกันด้วยท่อ และเยื่อเลือกผ่านโปรตอนคั่นกลาง เพื่อแยกสารละลายแอนโலைต์ และแคโทไลต์ออกจากกัน (Parkash, 2016) เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่นิยมสร้างในรูปแบบแบทช์ (Batch mode) และเฟดแบทช์ (Fed-batch mode) แต่รูปแบบของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ยังมีข้อจำกัดคือ การที่โปรตอนแพร่จากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดนั้น ระยะห่างระหว่างขั้วจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของโปรตอน นั่นก็คือทำให้มีความต้านทานภายในเซลล์ (Internal resistance) สูง ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้า (Du et al., 2007)



รูปที่ 4 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่รูปตัว H

### 2.3.2 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดี่ยว

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดี่ยว (Single-chamber MFC) จะมีขั้วแคโทดและขั้วแอโนด อยู่ในช่องเดียวกัน โดยขั้วแคโทดจะติดกับด้านที่สัมผัสกับอากาศภายนอก เพื่อให้ออกซิเจนผ่านเข้ามา (Das & Mangwani, 2010) ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพชนิดนี้ไม่จำเป็นต้องใช้เยื่อเลือกผ่านโปรตอน ทำให้สามารถนำไปใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ได้ เนื่องจากมีราคาถูก แต่อาจจะเกิดการปนเปื้อนของออกซิเจนที่ขั้วแอโนดได้ เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดี่ยวมีหลายแบบยกตัวอย่างเช่น แบบลูกบาศก์ (Cube reactor) (รูปที่ 5) และแบบแบน (Flat plate reactor) (รูปที่ 6) เป็นต้น



รูปที่ 5 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดี่ยวแบบลูกบาศก์ (Liu & Logan, 2004)



รูปที่ 6 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดี่ยวแบบแบน (Min & Logan, 2004)

## 2.4 ทฤษฎีทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

### 2.4.1 ตัวแปรทางไฟฟ้า

จากกฎของโอห์ม (Ohm's law) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้า (Current;  $I$ ) ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Voltage;  $\Delta E$ ) และกระแสไฟฟ้ากับความต้านทานภายนอก (External resistance;  $R_{ext}$ ) กล่าวคือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวนำใดๆ จะแปรผันโดยตรงกับความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าจะแปรผกผันกับความต้านทานภายนอกที่ต่อเข้ากับระบบ ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้ มาจากการคำนวณดังสมการที่ 2.4

$$\Delta E = IR_{ext} \quad (\text{สมการ 2.4})$$

ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงที่สุดที่ได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ คือค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage; OCV) ซึ่งสามารถวัดได้จากวงจรของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ไม่ได้ต่อกับความต้านทานภายนอก (กระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์)

ในการใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเพื่อที่จะผลิตพลังงาน ซึ่งจำเป็นต้องหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตกำลังไฟฟ้า โดยกำลังไฟฟ้า (Power; P) หาได้จากผลคูณระหว่างค่าความต่างศักย์ซึ่งวัดได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ต่อคร่อมตัวต้านทานภายนอก และกระแสไฟฟ้า ดังสมการที่ 2.5

$$P = I\Delta E \quad (\text{สมการ 2.5})$$

#### 2.4.2 Polarization curves และ Power density curves

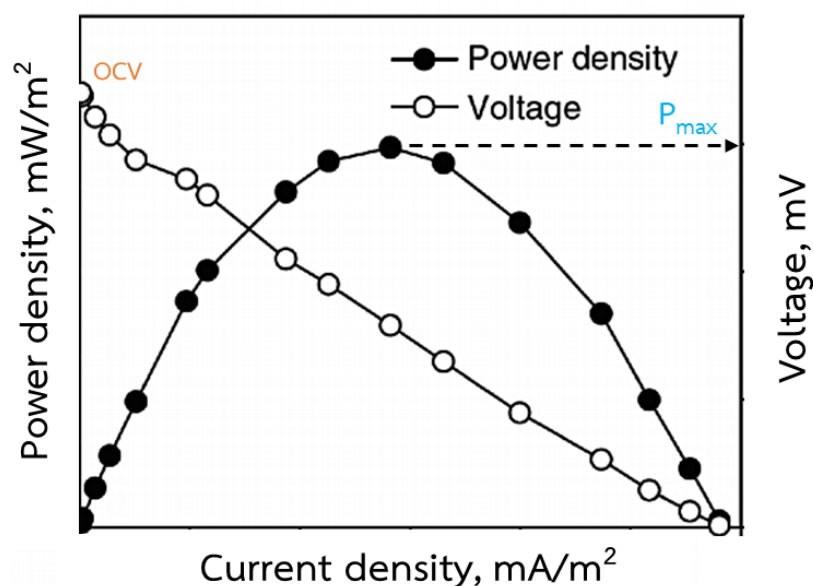
Polarization curve เป็นการพล็อตระหว่างค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่วัดได้เมื่อลดความต้านทานภายนอก (แกน y) กับค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แกน x) ซึ่งจาก Polarization curve สามารถบอกค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage; OCV) ได้จากค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อกระแสเป็นศูนย์ (ไม่ได้ต่อกับความต้านทานภายนอก) และค่าความต้านทานภายใน (Internal resistance;  $R_{int}$ ) ได้จากค่าความชันในช่วงที่เป็นเส้นตรงของ Polarization curve ดังรูปที่ 7

Power density curve ได้จากการพล็อตกราฟระหว่างค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า (แกน y) กับค่าความหนาแน่นกระแส (แกน x) ดังรูปที่ 7 และสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$$P = \frac{\Delta E^2}{R_{ext}} \quad (\text{สมการ 2.6})$$

$\Delta E$  = ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

$R_{ext}$  = ค่าความต้านทานภายนอก



รูปที่ 7 Polarization curve พร้อมค่า Open circuit voltage (OCV) และ Power density curve พร้อมค่า Maximum power density ( $P_{max}$ )  
(ดัดแปลงจาก (Ichihashi et al., 2019))

## 2.5 การประเมินประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

### 2.5.1 ประสิทธิภาพทางด้านการผลิตกระแสไฟฟ้า

#### 2.5.1.1 แรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage; OCV)

เป็นค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ได้จากการวัดเมื่อไม่ได้เชื่อมต่อกับตัวต้านทานภายนอก ซึ่งมีกระแสไฟฟ้าเป็นศูนย์ ซึ่งหากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีค่า OCV มากจะถือว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพนั้นมีประสิทธิภาพสูง

#### 2.5.1.2 ความต้านทานภายใน (Internal resistance; $R_{int}$ )

เป็นค่าความต้านทานของเซลล์ไฟฟ้าต่อกระแสไฟฟ้าที่ผ่าน เนื่องมาจากข้อต่อภายใน และผลของสารเคมี โดยสามารถหาได้จากความชันของ Polarization curve ซึ่งหากค่า  $R_{int}$  ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีค่าน้อยจะถือว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีประสิทธิภาพสูง

#### 2.5.1.3 ความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด (Maximum power density; $P_{max}$ )

เป็นค่าสูงสุดของกำลังไฟฟ้าต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้า สามารถหาได้จากค่าสูงสุดของ Power density curve ซึ่งหากค่า  $P_{max}$  มีค่าสูงจะถือว่าประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสูง

## 2.5.2 ประสิทธิภาพทางการบำบัดน้ำเสีย

### 2.5.2.1 ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (APHA 5220)

ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Chemical Oxygen Demand; COD) เป็นค่าที่บ่งบอกปริมาณออกซิแดนต์ (Oxidant) ที่ทำปฏิกิริยากับตัวอย่างภายใต้การควบคุมสภาวะ นิยมใช้ในการตรวจสอบสิ่งสกปรกในน้ำเสียและน้ำตามธรรมชาติ โดยตัวออกซิแดนต์จะเป็นสารประกอบที่มีฤทธิ์ในการออกซิไดซ์ จะออกซิไดซ์ทั้งสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่อยู่ในตัวอย่าง ส่วนใหญ่จะเป็นการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ในการหาค่า COD นิยมใช้ตัวออกซิไดซ์ที่รุนแรง เช่น Potassium dichromate ( $K_2Cr_2O_7$ ) ในปริมาณที่มากเกินไปในสภาวะที่เป็นกรด เพื่อออกซิไดซ์สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้กลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ โดยจะนิยมใช้กรดซัลฟิวริก ( $H_2SO_4$ ) หลังจากการย่อยสลายจะไตเตรตหาปริมาณ  $K_2Cr_2O_7$  ที่เหลือด้วย Ferrous ammonium sulfate (FAS) และใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์ ดังสมการที่ 2.8



จากปริมาณของ  $K_2Cr_2O_7$  ที่เหลือจากการย่อยสลายที่หามาได้ สามารถนำมาหาปริมาณออกซิเจนเทียบเท่าได้ เนื่องจากเมื่อ  $K_2Cr_2O_7$  อยู่ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่เพียงพอจะทำให้  $K_2Cr_2O_7$  สลายตัวให้ออกซิเจนดังสมการที่ 2.9 (Association, 2005c)



สามารถคำนวณหาค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงไปได้จากสมการที่ 2.10

$$\%COD \text{ removal} = \frac{COD_{in} - COD_{out}}{COD_{in}} \times 100\% \quad (\text{สมการ 2.10})$$

$COD_{in}$  = ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ก่อนผ่าน MFC ( $mg O_2/L$ )

$COD_{out}$  = ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์หลังผ่าน MFC ( $mg O_2/L$ )

### 2.5.2.2 ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (APHA 5210)

ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Biochemical Oxygen Demand; BOD) ทำได้โดยการหาความแตกต่างของปริมาณออกซิเจนละลายหรือค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ (Dissolved Oxygen; DO) ก่อน และหลังการบ่มในภาชนะปิด ซึ่งการหาค่า BOD โดยปกติแล้วจะใช้เวลาบ่ม 5 วัน ภายในตู้ควบคุมอุณหภูมิที่ 20 °C การหาค่า BOD แสดงดังสมการที่ 2.11

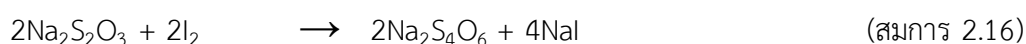
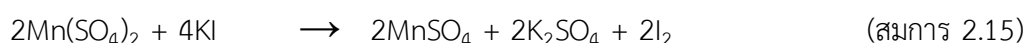
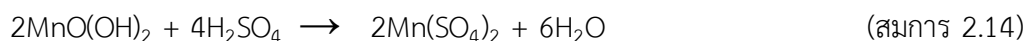
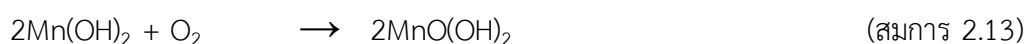
$$\text{BOD} = \text{DO}_0 - \text{DO}_5 \quad (\text{สมการ 2.11})$$

เมื่อ BOD = ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (mg O<sub>2</sub>/L)

DO<sub>0</sub> = ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำในวันแรก (mg O<sub>2</sub>/L)

DO<sub>5</sub> = ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำในวันที่ 5 (mg O<sub>2</sub>/L)

ในการหาค่า BOD สามารถหาได้หลายวิธี โดยในงานวิจัยนี้ใช้วิธี Azide modification โดยจะเป็นการตรวจวัดปริมาณออกซิเจนทางอ้อม ซึ่งออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำสามารถออกซิไดซ์ Mn<sup>2+</sup> ให้กลายเป็น Mn<sup>4+</sup> ภายใต้สภาวะที่เป็นด่าง และ Mn<sup>4+</sup> จะออกซิไดซ์ไอโอดด์ (I<sup>-</sup>) กลายเป็นไอโอดีน (I<sub>2</sub>) ในสภาวะที่เป็นกรด ดังสมการ 2.12-2.15 ซึ่งปริมาณไอโอดีนที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ จากนั้นไตเตรตหาปริมาณไอโอดีนกับสารละลายมาตรฐาน Sodium thiosulfate (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) โดยมีน้ำแปป่งเป็นอินดิเคเตอร์ ดังสมการที่ 2.16 (Association, 2005a, 2005b)



โดยหาค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เปลี่ยนแปลงไปได้จากสมการที่ 2.17



$$\% \text{BOD removal} = \frac{\text{BOD}_{\text{in}} - \text{BOD}_{\text{out}}}{\text{BOD}_{\text{in}}} \times 100\% \quad (\text{สมการ 2.17})$$

$\text{BOD}_{\text{in}}$  = ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ก่อนผ่าน MFC ( $\text{mg O}_2/\text{L}$ )

$\text{BOD}_{\text{out}}$  = ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์หลังผ่าน MFC ( $\text{mg O}_2/\text{L}$ )

### 2.5.2.3 ค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (ASTM D5907-13)

ของแข็งทั้งหมด (Total solid) หมายถึงสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออกจากตัวอย่างและนำไปอบแห้ง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (Total Suspended Solids; TSS) ซึ่งเป็นของแข็งที่ไม่สามารถกรองผ่านแผ่นกรองใยแก้ว (Glass fiber filter) ได้ และทำให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิ  $103-105^\circ\text{C}$  และของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (Total Dissolved Solids; TDS) เป็นของแข็งที่ละลายอยู่ในน้ำที่สามารถกรองผ่านแผ่นกรองใยแก้วได้ และทำให้แห้งจนน้ำหนักคงที่ที่อุณหภูมิเท่ากับ  $178-182^\circ\text{C}$  ในการคำนวณค่า TSS และ TDS สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.18 และ 2.19 (Materials, 2013)

$$\text{TSS (mg/L)} = \frac{(\text{mg of residue+filter}) - (\text{mg of filter})}{(\text{mL of filtered sample})} \times 1000 \quad (\text{สมการ 2.18})$$

$$\text{TDS (mg/L)} = \frac{(\text{mg of residue+dish}) - (\text{mg of dish})}{(\text{mL of filtered sample})} \times 1000 \quad (\text{สมการ 2.19})$$

ในการหาค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และค่าของแข็งแขวนลอยทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงไปสามารถหาได้จากสมการที่ 2.20 และ 2.21

$$\% \text{TSS removal} = \frac{\text{TSS}_{\text{in}} - \text{TSS}_{\text{out}}}{\text{TSS}_{\text{in}}} \times 100 \quad (\text{สมการ 2.20})$$

$\text{TSS}_{\text{in}}$  = ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำตัวอย่างก่อนผ่าน MFC ( $\text{mg/L}$ )

$\text{TSS}_{\text{out}}$  = ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำตัวอย่างหลังผ่าน MFC ( $\text{mg/L}$ )

$$\%TDS \text{ removal} = \frac{TDS_{in} - TDS_{out}}{TDS_{in}} \times 100 \quad (\text{สมการ 2.21})$$

$TDS_{in}$  = ค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในน้ำตัวอย่างก่อนผ่าน MFC (mg/L)

$TDS_{out}$  = ค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในน้ำตัวอย่างหลังผ่าน MFC (mg/L)

#### 2.5.2.4 การยึดเกาะของแบคทีเรีย (Bacterial attachment)

แบคทีเรียที่มีลักษณะเป็นกลุ่มแบคทีเรียหรือ Biofilm จะสังเกตโดยการนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิชชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope; FESEM) โดยคาดหวังว่าจะสังเกตเห็นกลุ่มแบคทีเรียซึ่งทำหน้าที่ออกซิไดซ์สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียเป็นจำนวนมาก โดยเกาะบนพื้นผิวของ Carbon cloth ที่ใช้เป็นขั้วแอโนด

### 2.6 เทคนิค และวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

#### Deposition-precipitation (DP)

มีรายงานการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนวัสดุรองรับด้วยวิธีต่างๆ กัน เช่น Co-precipitation (Reddy et al., 2009), Chemical vapor deposition (Sharma et al., 2008; Tsai et al., 2009), Direct redox reaction (Y. Chen et al., 2012; Xie et al., 2011), Electrodeposition (Quan et al., 2015), Impregnation (W. Li et al., 2006; Rabbani et al., 2009) และ In situ chemical oxidation (Qiao et al., 2007) แต่อย่างไรก็ตามวิธีการเตรียมบางวิธีนั้นต้องอาศัยเครื่องมือที่เฉพาะเจาะจง และมีราคาแพง อีกทั้งมีขั้นตอนในการเตรียมที่ซับซ้อน และใช้เวลานาน มีอีกวิธีหนึ่งคือ Deposition-precipitation (DP) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะ โดยการตกตะกอนของสารตั้งต้นที่เป็นโลหะบนวัสดุ ทำให้ได้โลหะที่มีขนาดเล็ก ซึ่งใช้หลักการ Deposition โลหะบนผิวของตัวรองรับในสารแขวนลอย ซึ่งจะต้องนำสารละลายโลหะไปละลายในสารแขวนลอยที่ใช้เป็นตัวรองรับ เมื่อเวลาผ่านไปสารละลายจะเริ่มเกิด Nucleation เป็นนิวเคลียสขึ้นมา จากนั้นจะตกตะกอน และมีการ Grow บนตัวรองรับ ที่อยู่ในสารแขวนลอย โดยเทคนิคนี้มีข้อดีคือเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก ประหยัดเวลา และมีประสิทธิภาพสูง ใช้ความเข้มข้นของสารตั้งต้นน้อย เพื่อทำให้เกิด Nucleation รวมถึงได้ขนาดอนุภาคโลหะที่มีขนาดเล็กถึงระดับนาโนเมตร และมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน (Feng et al., 2018; Haruta, 1997; Ju et al., 2017; Sandoval et al., 2011) มีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนวัสดุรองรับ SWCNTs-COOH โดยใช้วิธี DP (Pusomjit et

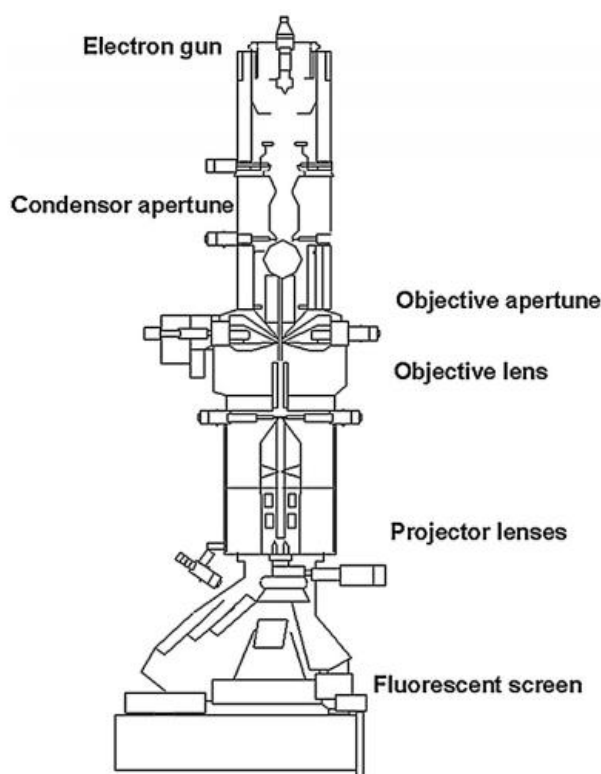
al., 2018) แต่ยังไม่มียางานการนำวิธีนี้มาใช้ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt วัสดุรองรับ SWCNTs-COOH ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนวัสดุรองรับ MWCNTs-COOH ด้วยวิธี DP เพื่อให้ได้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ที่มีขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอบน MWCNTs-COOH ทั้งนี้เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของขั้วแคโทดที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

## 2.7 เครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้ในงานวิจัย

### 2.7.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญมากสำหรับวัสดุศาสตร์ โดยลำแสงที่มีพลังงานสูงของอิเล็กตรอนถูกส่องผ่านตัวอย่างที่บางมาก และมีการปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอม โดยเครื่อง TEM เหมาะสำหรับการศึกษารายละเอียดขององค์ประกอบภายในของตัวอย่าง สามารถใช้ในการสังเกตคุณสมบัติต่างๆ เช่น โครงสร้างผลึก ลักษณะของเยื่อหุ้มเซลล์ เป็นต้น ในการวิเคราะห์ทางเคมีเทคนิค TEM สามารถใช้ในการศึกษาการเจริญเติบโตของชั้น องค์ประกอบ และความบกพร่องในสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ซึ่งเทคนิค TEM มีความละเอียดสูงสามารถใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ รูปร่าง ขนาด และความหนาแน่นของควอนตัมจุด (Quantum dots) ได้

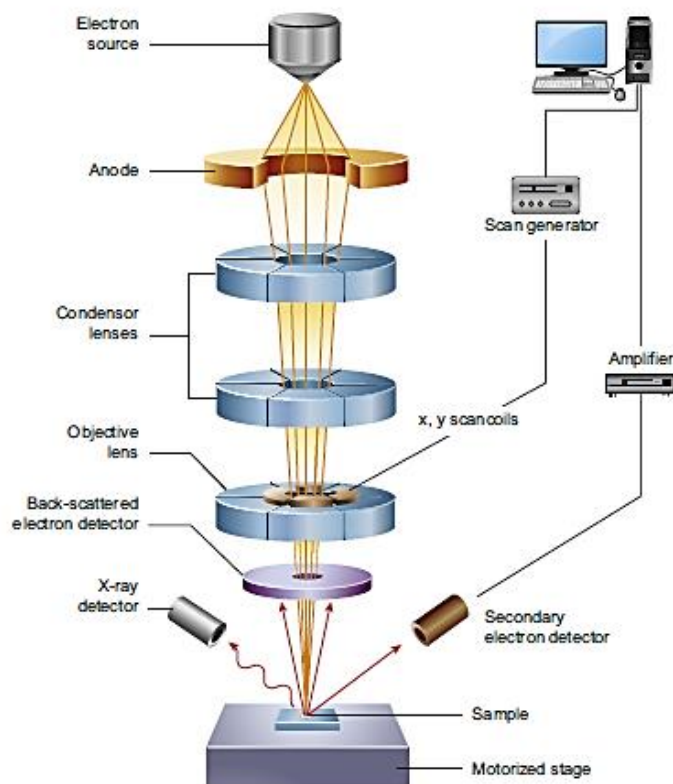
หลักการทำงานของ TEM จะทำงานบนหลักการพื้นฐานเดียวกับกล้องจุลทรรศน์แสง แต่ใช้อิเล็กตรอนแทนแสง เนื่องจากความยาวคลื่นของอิเล็กตรอนมีขนาดเล็กกว่าแสงความละเอียดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับภาพ TEM จึงมีขนาดที่ดีกว่าจากกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสง ดังนั้น TEM จึงสามารถเปิดเผยรายละเอียดที่ดีที่สุดของโครงสร้างภายใน ในบางกรณีมีขนาดเล็กเท่าอะตอมเดี่ยว หลักการทำงานของ TEM เริ่มจากลำอิเล็กตรอนที่มาจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) โดยอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างที่วางอยู่บนแท่นวาง (Sample holder) ซึ่งจะต้องมีลักษณะที่แบน และบางมาก โดยจะเกิดการกระเจิงอนุภาคขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนทะลุผ่านไป ข้อมูลโครงสร้างผลึกของชิ้นงานสามารถได้มาโดยลำอิเล็กตรอนที่ผ่านตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่ถูกส่งจะถูกโฟกัสใหม่แล้วขยายด้วยระบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens system) อิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่างนี้ก็จะถูกปรับโฟกัสของภาพโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ขยายภาพให้ได้รายละเอียดมากที่สุด จากนั้นจะได้รับการขยายด้วยเลนส์ทอดภาพ (Projector lens) ไปสู่จอรับ (Screen) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากร่องแสง สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้น (C. Y. Tang & Yang, 2017; Williams & Carter, 1996)



รูปที่ 8 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน  
(C. Y. Tang & Yang, 2017)

### 2.7.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน ร่วมกับเครื่องเอ็กซ์เรย์แบบพลังงานกระจาย

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope) เป็นเทคนิคทางเลือกสำหรับการวิเคราะห์พื้นผิวชิ้นงาน และศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค ใช้ดูขนาดของอนุภาค ลักษณะสัณฐานวิทยา ข้อบกพร่องของโครงสร้าง และองค์ประกอบทางเคมี โดยภาพจากเทคนิค FESEM ได้จากการที่ลำอิเล็กตรอน (Electron beam) เกิดอันตรกริยากับพื้นผิวของ specimen นอกจากนี้เทคนิค FESEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับเครื่องเอ็กซ์เรย์แบบพลังงานกระจาย (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy; EDX) ซึ่งช่วยในการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบ สามารถใช้ในการสังเกตจากพื้นที่ขนาดเล็กมากไปจนถึงพื้นที่กว้างบนพื้นผิวโดยไม่ทำลายชิ้นงาน การวิเคราะห์โดย FESEM-EDX แสดงถึงความแตกต่างขององค์ประกอบภาพซึ่งเป็นผลมาจากหมายเลขอะตอมที่แตกต่างกัน และการกระจายตัวขององค์ประกอบ (Mapping) ซึ่งช่วยให้สามารถระบุถึงองค์ประกอบที่เฉพาะและสัดส่วนสัมพัทธ์ เช่น เปอร์เซนต์อะตอมมิก (Inkson, 2016; Singh et al., 2012; Sutton et al., 2007)



รูปที่ 9 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด  
(Inkson, 2016)

### 2.7.3 เครื่องวิเคราะห์พื้นผิววัสดุ

เทคนิควิเคราะห์พื้นผิววัสดุ (X-ray Photoelectron Spectrometry; XPS) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยเทคนิคนี้จะใช้รังสีเอกซ์เพื่อกระตุ้นให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอน และใช้ในการวิเคราะห์ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นในสุด (Core electron) เนื่องจากค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนเป็นค่าเฉพาะของอะตอมในแต่ละธาตุ และขึ้นอยู่กับสถานะทางเคมีของอะตอม ในการวิเคราะห์จึงสามารถระบุชนิด และสถานะทางเคมีของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้ โดยที่สามารถให้ข้อมูลคุณสมบัติทางเคมีที่ระดับผิวของวัสดุในหลายแง่มุม เช่น ชนิดและจำนวนธาตุองค์ประกอบ โครงสร้างทางเคมี ชนิดของพันธะทางเคมี และสถานะออกซิเดชันของอะตอม เป็นต้น นอกจากนี้ยังรวมถึงความสม่ำเสมอของธาตุองค์ประกอบ สภาพทางเคมีของผิวที่เปลี่ยนแปลงไป หลังถูกกระทบด้วยความร้อน สารเคมี ลำโอดอนพลาสมา หรือ รังสี UV เป็นต้น โดยหลักการการทำงานเริ่มจากการยิงรังสีเอกซ์พลังงานเดี่ยวใส่วัสดุที่ต้องการวิเคราะห์ รังสีเอกซ์นี้จะทราบพลังงานที่แน่นอน เนื่องจากหลอดที่เป่าแอดทำด้วยโลหะเบา

เช่น อลูมิเนียม แมกนีเซียม เป็นต้น รังสีเอกซ์ปลดปล่อยให้อิเล็กตรอนในอะตอมเป็นอิสระ เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยวเป็นไปตามสมการที่ 2.22

$$E_{\text{binding}} = E_{\text{photon}} + E_{\text{kinetic}} + \Phi \quad (\text{สมการ 2.22})$$

โดยที่  $E_{\text{binding}}$  คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม

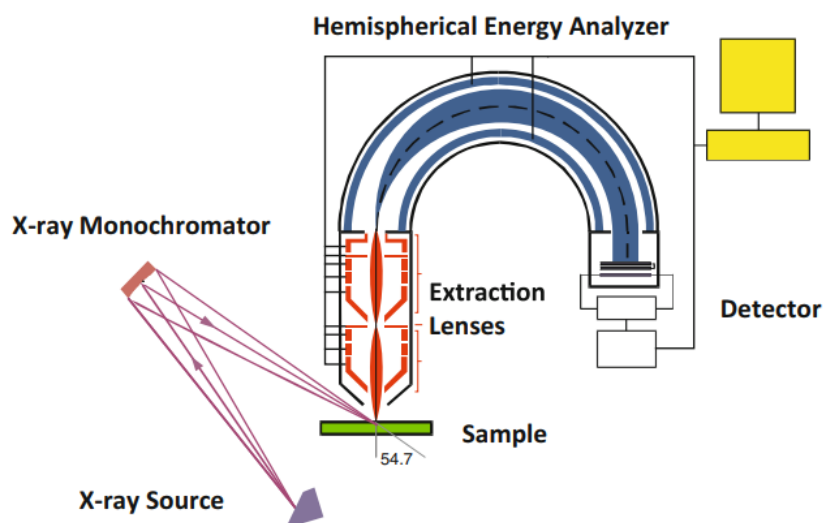
$E_{\text{photon}}$  คือ พลังงานของรังสีเอกซ์

$E_{\text{binding}}$  คือ พลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอน

$\Phi$  คือ work function ของ specimen

โฟโตอิเล็กตรอนจากผิววัสดุจะถูกรวบรวมและโฟกัสไปที่รูเปิดเล็กๆ ตรงปากทางเข้าของระบบวิเคราะห์พลังงานของอนุภาคอิเล็กตรอนด้วยระบบเลนส์ไฟฟ้า โดยระบบวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอนประกอบด้วยแผ่นโลหะคู่ขนานรูปครึ่งวงกลมต่อกับศักย์ไฟฟ้าคงที่ ทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนวิ่งโค้งด้วยรัศมีจนถึงแผงหัววัด วิธีการวัดพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอมหาได้จากค่าพลังงานจลน์ของโฟโตอิเล็กตรอนที่วัดได้ และค่าพลังงานรังสีเอกซ์ที่ทราบค่าแน่นอน เมื่อนำค่าที่ได้ไปแทนในสมการ 2.22 จะทราบค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม ซึ่งค่าที่ได้จะนำไปสู่การทราบชนิดอะตอมของธาตุ รวมถึงข้อมูลอื่นๆ (Haasch, 2014; Knop-Gericke et al., 2009; Seyama et al., 2006)

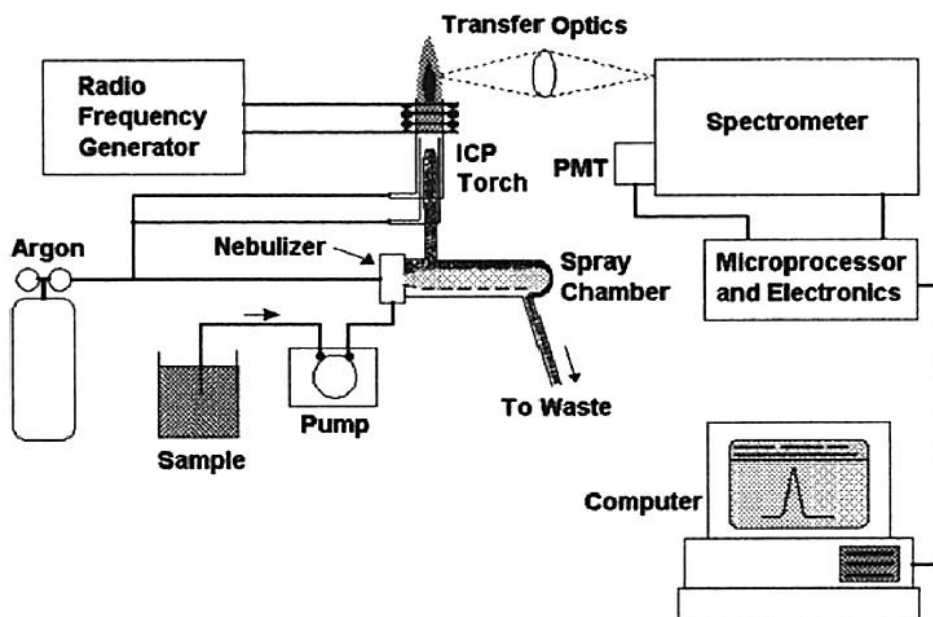




รูปที่ 10 ส่วนประกอบของเครื่อง XPS  
(Haasch, 2014)

#### 2.7.4 Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer; ICP-OES

ICP-OES เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่นิยมมากที่สุดสำหรับการหาปริมาณของธาตุที่มีปริมาณน้อยๆ ในกลุ่มตัวอย่างต่างๆ เช่น การเกษตร อาหาร สิ่งแวดล้อม เป็นต้น ใน ICP-OES จะมีการผลิตพลาสมา (Plasma) ที่มีอุณหภูมิสูงถึง 8,000-10,000 K ซึ่งเป็นส่วนผสมของอะตอมและไอออนในสถานะแก๊ส โดยอาศัยเครื่องส่งความถี่วิทยุ (RF generator) โดยจะมีแก๊สอาร์กอน (Ar) เพื่อหล่อเย็นเนื่องจากพลาสมามีอุณหภูมิที่สูง ซึ่งตัวอย่างที่เป็นสารละลายจะถูกทำให้เป็นละอองฝอย (Aerosol) โดยใช้ Nebulizer จากนั้นละอองฝอยจะถูกนำเข้าสู่ท่อขนาด 5-20 mm เหนือขดลวด เมื่อละอองฝอยผ่านไปยัง Torch จะทำให้ตัวอย่างที่เป็นละอองฝอยเกิดการระเหย และกลายเป็นอะตอมอิสระในสถานะแก๊ส การกระตุ้นของพลาสมาจะช่วยเพิ่มพลังงานให้แก่อะตอม ทำให้อะตอมถูกกระตุ้นไปยังสถานะกระตุ้น (Excited state) เมื่อกลับสู่สถานะพื้น (Ground state) จะคายแสงของโฟตอน (Photon) ออกมา ซึ่งความยาวคลื่นที่ได้สามารถใช้ในการระบุองค์ประกอบของธาตุได้ (Hou et al., 2016; Sneddon & Vincent, 2008)



รูปที่ 11 ส่วนประกอบของเครื่อง ICP-OES  
(Sneddon & Vincent, 2008)

### 2.7.5 เครื่องวัด และบันทึกข้อมูล (Data logger)

Data logger เป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่บันทึกการวัดตามเวลาที่กำหนด เช่น อุณหภูมิของอากาศ อุณหภูมิของน้ำ ศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงและกระแสสลับ ความเข้มแสง และความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น โดยตัวบันทึกข้อมูลมีขนาดกะทัดรัดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ซึ่งมีไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) ภายในที่เก็บข้อมูล และมีเซ็นเซอร์หนึ่งตัวหรือมากกว่า สามารถนำไปใช้ในอาคารกลางแจ้งและใต้น้ำและสามารถบันทึกข้อมูลได้ โดย Data logger เป็นอุปกรณ์ที่มีเซ็นเซอร์ภายใน ซึ่งเหมาะกับการเก็บรวบรวมข้อมูลแบบหลายช่องทาง พกพาง่าย กะทัดรัด (Castaner & Silvestre, 2002; Villalva et al., 2010)





รูปที่ 12 midi Logger GL220, Graphtec

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

(Pusomjit et al., 2018) ได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ SWCNTs-COOH (Pt/SWCNTs-COOH) ด้วยวิธี Deposition precipitation โดยใช้ Carbon cloth เป็นวัสดุขั้วแอโนด และใช้ Pt/SWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด จากผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/SWCNTs-COOH ให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $2,022 \text{ mW/m}^2$  ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ  $0.6954 \text{ mV}$  มีค่า %COD removal และค่า %BOD removal เท่ากับ 84.5% และ 74.0% ตามลำดับ นอกจากนี้ยังได้นำ Pt/SWCNTs-COOH มากำจัดโลหะหนัก Ag จากผลการทดลองพบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ Pt/SWCNTs-COOH เป็นขั้วแคโทดสามารถกำจัดโลหะหนัก Ag ได้ 99%

(B. Li et al., 2017) ได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Pt}_x\text{Sn}_y\text{P/C}$  ด้วยวิธี  $\text{NaBH}_4$  reduction เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายของตัวเร่งปฏิกิริยาและปรับปรุงปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนของขั้วแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดี่ยว จากผลการทดลองพบว่าตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Pt}_7\text{Sn}_3\text{P/C}$  มีค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $361 \pm 7.5 \text{ mW/m}^2$  ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ  $660 \text{ mV}$  ค่า Coulombic efficiency เท่ากับ 18.7 ซึ่งจะมีค่าที่สัมพันธ์กับค่า %COD removal เท่ากับ 89% ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Pt}_7\text{Sn}_3\text{P/C}$  มีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับ  $\text{Pt}_7\text{Sn}_3/\text{C}$ ,  $\text{Pt/C}$ ,  $\text{Pt}_5\text{Sn}_5\text{P/C}$ ,  $\text{Pt}_3\text{Sn}_7/\text{C}$  และ  $\text{Sn/C}$  ดังนั้นตัวเร่งปฏิกิริยา  $\text{Pt}_7\text{Sn}_3\text{P/C}$  จึงสามารถลดค่าใช้จ่ายของตัวเร่งปฏิกิริยาและปรับปรุงประสิทธิภาพของปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดี่ยวได้

(Tan et al., 2016) ได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพให้มีราคาถูกลง และเพิ่มประสิทธิภาพของปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน โดยเตรียม Copper selenide nanoparticles (CuSe NPs) ด้วยกระบวนการ One-step hydrothermal บนตัวรองรับท่อนาโนคาร์บอน ( $\text{CuSe@CNTs}$ ) ในอัตราส่วนโดยมวลที่ต่างกันของ CuSe: CNTs พบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยมวลเท่ากับ 1:1 ให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $425.9 \pm 5 \text{ mW/m}^2$  ซึ่งมากกว่าขั้วที่มีเฉพาะ CNTs ( $244.0 \pm 4$

mW/m<sup>2</sup>) ถึง 1.90 เทวา และมากกว่าช่วงที่มีเฉพาะ CuSe (258.8±6 mW/m<sup>2</sup>) 1.65 เทวา ดังนั้น CuSe@CNTs จึงเหมาะที่จะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

(Halakoo et al., 2015) ได้พัฒนาขั้วแคโทดโดยเตรียม Pt เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มีตัวรองรับเป็นท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธี Chemical reduction เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่ขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ พบว่าเมื่อตัวเร่งปฏิกิริยา Pt มีปริมาณ 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5 mg/cm<sup>2</sup> จะได้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 73.48, 124.99, 143.11, 146.01 และ 147.10 mW/m<sup>2</sup> ตามลำดับ

(Quan et al., 2015) ได้พัฒนาขั้วแคโทดโดยเตรียมโลหะผสมระหว่าง Pt-Pd เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาบนวัสดุรองรับ MWCNTs-COOH บนกระดาษคาร์บอน (Carbon paper) โดยวิธี Electro-deposition เพื่อเพิ่ม Oxygen reduction reaction ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ พบว่าเมื่อมีการทำ Electro-deposition จำนวน 15 รอบจะได้อนุภาคนาโนของ Pt-Pd ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 90 nm ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 762 mW/m<sup>2</sup> ซึ่งเพิ่มขึ้น 16% เมื่อเทียบกับขั้วแคโทดที่มีเพียง Pt-Pd แต่ไม่มี MWCNTs-COOH เป็นวัสดุรองรับ (659.3 mW/m<sup>2</sup>) และมีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 0.85 V ซึ่งเพิ่มขึ้น 11% เมื่อเทียบกับขั้วแคโทดที่มีเพียง Pt-Pd แต่ไม่มีวัสดุรองรับ (0.76 V)

(Koo et al., 2014) ได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ด้วยวิธี DP เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันของ CO โดยทำการศึกษา pH ที่เหมาะสมในการเตรียม โดยทำการศึกษา pH ในช่วง pH 6.5-9.5 ผลการทดลองพบว่าที่ pH 7.5 และอุณหภูมิต่ำกว่า 150 °C เป็นสภาวะที่ดีที่สุด โดยตัวเร่งปฏิกิริยา Pt มีการกระจายตัวที่ดี ส่งผลถึงความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาได้ดีที่สุด

(Ghasemi et al., 2013) ได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt และใช้ท่อนาโนคาร์บอนเป็นตัวรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา (CNT/Pt) โดยใช้เทคนิค Chemical reduction เพื่อลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Pt โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพของขั้วไฟฟ้าลดลง ขั้ว CNT/Pt ที่เตรียมขึ้นช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ซึ่งพิจารณาจากค่ากำลังไฟฟ้าเท่ากับ 8.7-32.2% นอกจากนี้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ที่ใช้ในขั้ว CNT/Pt ลดลงจากปริมาณที่ใช้ปกติถึง 25%

(Yen et al., 2013) ได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt และใช้วัสดุรองรับเป็นผ้าคาร์บอน โดยใช้เทคนิค deposition ที่แตกต่างกันคือวิธี electrodeposition, วิธี e-gun และวิธี sputtering เพื่อนำมาใช้เตรียมขั้วแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องเดี่ยว โดยเตรียม Pt ทั้งหมด 3 ชนิดคือ Pt(0), Pt(II) และ Pt (IV) ผลการทดลองพบว่า Pt (0) ที่เตรียมด้วยวิธี electrodeposition มีขนาดใหญ่กว่า Pt ที่เตรียมด้วยวิธี e-gun และวิธี sputtering นอกจากนี้วิธี Electrodeposition จะให้ Pt (0) มากที่สุด (67.98%) ซึ่งเป็นชนิดที่มีประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนมาก

ที่สุด และเมื่อนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพจะให้ค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $59 \pm 18$   $\text{mW/m}^2$  ซึ่งมากกว่าค่าจากขั้วแคโทดที่เตรียมจากวิธี e-gun และ sputtering อยู่ 45.4% และ 53.9% ตามลำดับ

(C. Choi & Cui, 2012) ได้พัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยการกำจัดโลหะหนักเงิน (Silver) ในน้ำเสียสังเคราะห์ผิวงแคโทด โดยศึกษาสารละลายโลหะเงิน ( $\text{Ag}^+$ ) ในช่วงความเข้มข้น 50-200 ppm ผลการทดลองพบว่าหลังจากปฏิกิริยาผ่านไป 8 ชั่วโมง เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถกำจัดโลหะหนักเงินได้  $99.91 \pm 0.00 - 98.26 \pm 0.01\%$  โดยมีค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $425 \text{ mW/m}^2$  และค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 749 mV จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสารละลายโลหะเงินในผิวงแคโทดสามารถที่จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันและมีร้อยละการกลับคืนของวิธี (%Recovery) ที่สูง

(Hosseini & Ahadzadeh, 2012) ได้เตรียม Ti/nano-TiO<sub>2</sub>/Pd โดยใช้วิธี Electroless deposition เพื่อนำมาใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ ที่มีขั้วแอโนดเป็นแกรไฟิน และมีเยื่อเลือกผ่านเป็น Flemion cation exchange membrane ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าขั้ว Ti/nano-TiO<sub>2</sub>/Pd มีประสิทธิภาพที่ดี โดยมีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $200 \text{ mW/m}^2$  และมีค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าวงจรเปิดเท่ากับ 480 mV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับขั้วแคโทดที่มี Pt catalysts ที่เคลือบอยู่บน Carbon paper

(Heming Wang et al., 2011) ได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับท่อนาโนคาร์บอน ด้วยวิธี Microwave (250 W, 140 °C) เป็นเวลา 90 วินาที เพื่อใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับ Air-cathode MFC นอกจากนี้ยังทำการเปรียบเทียบกับขั้วแคโทด Carbon cloth แบบดั้งเดิม พบว่าประสิทธิภาพในด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น โดยมีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $329 \text{ mW/m}^2$  ซึ่งมากกว่าความหนาแน่นกำลังไฟสูงสุดที่ได้จากขั้วแคโทดแบบดั้งเดิม ( $151 \text{ mW/m}^2$ ) 2 เท่า นอกจากนี้ Pt catalysts ยังช่วยเพิ่มความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าของขั้วแคโทด โดยมีค่าเท่ากับ  $1,118 \text{ mA/m}^2$  ซึ่งมากกว่าขั้วแคโทดที่ใช้ท่อนาโนคาร์บอนถึง 9.5 เท่า

(Tsai et al., 2009) ได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับท่อนาโนคาร์บอน และเคลือบอยู่บน Carbon cloth โดยใช้วิธีนำ Carbon cloth จุ่มลงในสารแขวนลอยท่อนาโนคาร์บอน เพื่อนำมาใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพชนิดช่องเดี่ยว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่เตรียมขึ้นมีค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ  $65 \text{ mW/m}^2$  และค่า % COD removal เท่ากับ 95% ค่า Coulombic efficiency เท่ากับ 67%

### บทที่ 3

#### เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน ร่วมกับเครื่องเอ็กซ์เรย์แบบพลังงานกระจาย (Field Emission Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy; FESEM-EDX) (ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 7610F, ญี่ปุ่น)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน ร่วมกับเครื่องเอ็กซ์เรย์แบบพลังงานกระจาย (Field Emission Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy; FESEM-EDX) (ยี่ห้อ TESCAN รุ่น MIRA3, สาธารณรัฐเช็ก)
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM) (ยี่ห้อ JEOL รุ่น JEM-2100, ญี่ปุ่น)
- เครื่องกวนแม่เหล็ก (ยี่ห้อ Diligent รุ่น ST-EC, ไทย)
- เครื่องกวนแม่เหล็กพร้อมควบคุมอุณหภูมิ (ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS7, เยอรมัน)
- เครื่องเคลือบตัวอย่าง (Sputter coater) (ยี่ห้อ Balzers รุ่น SCD 040, ลิกเตนสไตน์)
- เครื่องเคลือบตัวอย่าง (Sputter coater) (ยี่ห้อ Cressington รุ่น sputter coater 108, อังกฤษ)
- เครื่องชั่งน้ำหนักแบบ Analytical สี่ตำแหน่ง (ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น ML104/01, สวิตเซอร์แลนด์)
- เครื่องชั่งน้ำหนักแบบ Top loading สองตำแหน่ง (ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น ME1002E, สวิตเซอร์แลนด์)
- เครื่องวัด และบันทึกข้อมูล (Data logger) (ยี่ห้อ Graphtec รุ่น GL220, ญี่ปุ่น)
- เครื่องวัด pH (ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น FiveEasy F20, สวิตเซอร์แลนด์)
- เครื่องวิเคราะห์พื้นผิววัสดุ (X-ray Photoelectron Spectroscopy; XPS) (ยี่ห้อ Khatos analytical รุ่น AXIS Ultra DLD, อังกฤษ)
- เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dryer) (ยี่ห้อ Labconco รุ่น 78060 series, สหรัฐอเมริกา)
- ตู้บ่ม (Incubator) (ยี่ห้อ SRIAMORN refrigeration รุ่น ITALY TC201, ไทย)
- ตู้อบ (Oven) (ยี่ห้อ Memmert รุ่น UM-500, เยอรมัน)
- ตัวต้านทานปรับค่าได้ (ยี่ห้อ WPA รุ่น N73, อังกฤษ)
- ปั๊มลม (Airpump) (ยี่ห้อ Twin รุ่น MEGA 6000, สาธารณรัฐประชาชนจีน)

- แปรงพ่นสีต่อปั๊มลม (Airbrush connected with air compressor) (ยี่ห้อ Royalmaxair brush รุ่น AB-133, สาธารณรัฐประชาชนจีน)
- อ่างส่งคลื่นความถี่สูง (Sonicator bath) (ยี่ห้อ GT SONIC รุ่น GT-1730QTS, สาธารณรัฐประชาชนจีน)
- Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer; ICP-OES (ยี่ห้อ Agilent รุ่น 710 ICP-OES, สหรัฐอเมริกา)

### 3.2 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- กระจกฉีदनํ้ากลั่น (Wash bottle)
- กระจกตวง (Measuring cylinder)
- กระจกเป่าวัดอุณหภูมิ (Thermometer)
- กรวยกรอง (Glass funnel)
- กรวยบุชเนอร์ (Buchner funnel)
- ขาตั้ง (Stand) และที่จับ (Clamp holder)
- ขวดก้นกลมแบบมี 2 ช่องเสียบ (Two-necked round-bottom flask)
- ขวดแก้วเล็ก (Vial)
- ขวดปริมาตร (Volumetric flask)
- ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask)
- ขวด BOD พร้อมจุกแก้วปิด (BOD bottle and glass stopper)
- คีมคีบ (Forceps)
- คีมหนีบปลายแหลม (Tweezers)
- คอนเดนเซอร์ (Condenser)
- โถดูดความชื้น (Desiccator)
- ถ้วยครุชชีเบล (Gooch crucible)
- ถ้วยระเหย (Evaporating dish)
- แท่งแก้วคนสาร (Stirring rod)
- แท่งคนแม่เหล็ก (Magnetic bar)
- บิวเรต (Burette)
- บีกเกอร์ (Beaker)
- ปิเปตแบบกระเปาะ (Volumetric pipette) และปิเปตแบบตวง (Measuring pipette)

- ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) (Type B, non-wet proofed, BASF Fuel Cell Inc., สหรัฐอเมริกา)
- ผ้าคาร์บอนที่เคลือบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาทองคำขาว (Commercial Pt/Carbon cloth) ( $0.2 \text{ mg/cm}^2$ , FuelCellsEtc, สหรัฐอเมริกา)
- ผ้าขาวบาง (Cheesecloth)
- แผ่นรองรับตัวอย่างทองแดง (Copper grid) (ยี่ห้อ EMS รุ่น FCF 300-Cu, สหรัฐอเมริกา)
- รีแอกเตอร์รูปตัว H แบบช่องคู่ (Dual-chamber H-shape reactor) (บริษัท วี-แลป-เซอร์วิส, ไทย)
- ลูกยางดูดปิเปต (Pipette bulb)
- ลวดนิโครม (Nichrome wire)
- สายไฟ พร้อมหัวหนีบปากจระเข้ (Wire with crocodile clip)
- หลอดตกตะกอน (Centrifuge tube)
- หลอดย่อยสลาย (Digestion tube) ขนาด  $25 \times 150$  มิลลิเมตร
- หลอดหยด (Pasteur pipette)
- อะแดปเตอร์สำหรับกระเปาะวัดอุณหภูมิ (Thermometer adapter)
- อุปกรณ์ดักน้ำเสีย (Wastewater collector)
- เยื่อเลือกผ่านชนิดพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene (PTFE) membrane filter)  $0.45 \mu\text{m}$  เส้นผ่านศูนย์กลาง  $90 \text{ mm}$  (Sartoriusstedium biotech, เยอรมัน)

### 3.3 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- Absolute ethanol (Merck)
- Aluminium potassium sulfate dodecahydrate (Carlo Erba Reagents)
- *p*-Aminobenzoic acid (Asia Pacific Specialty (APS) Chemical Limited)
- Ammonium chloride (Ajex Finechem Pty Ltd.)
- Boric acid powder (MAY & BAKER Ltd)
- Calcium chloride dehydrate (Riedel-de Haën)
- Chloroplatinic acid hexahydrate (SIGMA-ALDRICH)
- Copper (II) sulfate pentahydrate (DAEJUNG)
- Ferrous ammonium sulfate (FAS) hexahydrate (Riedel-de Haën)
- Formic acid (BDH)
- Glutaric dialdehyde 25 wt.% solution in water (ACROS ORGANICS)
- Iron (II) sulfate heptahydrate (Carlo Erba Reagent)

- Magnesium sulfate heptahydrate (Fluka)
- Manganese (II) sulphate monohydrate (Fluka Chemika)
- Mercury (II) sulphate (QRëC)
- Multi-walled carbon nanotubes with carboxyl group (MWCNTs-COOH) (Chengdu organic chemical Co. Ltd.)
- Nafion-117 5% (v/v) solution in a mixture of lower aliphatic alcohols and water (SIGMA-ALDRICH)
- Nitrioltriacetic acid (Fluka)
- 1,10-Phenanthroline (monohydrate) (SDFCL)
- Potassium dichromate (CARLO ERBA reagents)
- Potassium chloride (Fluka)
- Potassium hydroxide (Ajex Finechem)
- Potassium iodide (UNIVAR)
- Single-walled carbon nanotubes with carboxyl group (SWCNTs-COOH) (Carbon solutions, Inc.)
- Sodium acetate trihydrate (Fluka)
- Sodium azide (SIGMA-ALDRICH)
- Sodium bicarbonate (Daejung)
- Sodium chloride (SIGMA-ALDRICH)
- Sodium dihydrogen phosphate dihydrate (BDH Chemical Ltd.)
- Sodium dihydrogen phosphate monohydrate (Merck)
- Sodium hydrogen carbonate (BDH Chemical Ltd.)
- Sodium hydroxide (CARLO ERBA reagents)
- Sodium hydrogen phosphate dehydrate (BDH Chemical Ltd.)
- Sodium molybdate dehydrate (Ajax Chemicals Ltd.)
- Sodium thiosulfate (CARLO ERBA)
- Starch (AnalaR)
- Sulfuric acid (CARLO ERBA reagents)
- Triton X-100 (LOBA Chemie)

### 3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH ด้วยวิธี DP

นำ MWCNTs-COOH 120 mg มากระจายในสารละลาย 1% Triton X-100 ปริมาตร 40.00 mL ด้วยอ่างส่งคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonicator bath) เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นนำสารแขวนลอยมาเติม Chloroplatinic acid hexahydrate ( $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) โดยศึกษาความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ที่ 1.0 mM, 1.5 mM และ 2.0 mM ปริมาตร 25.00 mL ปรับ pH ด้วยสารละลาย 0.10 M Sodium hydroxide (NaOH) โดยศึกษาที่ pH 6, 7, 8, 9 และ 10 นำไปรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม โดยศึกษาอุณหภูมิที่ 60 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C และ 100 °C และศึกษาเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ที่ 30 นาที, 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที โดยกวนตลอดเวลา จะได้สารแขวนลอย Pt/MWCNTs-COOH

#### 3.4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติของ Pt/MWCNTs-COOH

##### 3.4.2.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านโครงสร้างและการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs-COOH ด้วยเครื่อง TEM

การศึกษาคุณสมบัติด้านโครงสร้างของ Pt/MWCNTs-COOH ที่เตรียมขึ้น รวมทั้งศึกษาการกระจายตัว และขนาดอนุภาคของ Pt บน MWCNTs-COOH โดยนำสารแขวนลอย Pt/MWCNTs-COOH ที่เตรียมขึ้น มาทำให้กระจายตัวด้วยเครื่อง Sonicator bath เป็นเวลา 60 นาที นำคิมหนีบปลายแหลมหนีบขอบ Copper grid แล้วจุ่มลงในสารแขวนลอยที่เตรียมไว้ จากนั้นปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง เก็บใน Desiccator ก่อนนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TEM (ยี่ห้อ JEOL รุ่น JEM-2100, ญี่ปุ่น)

##### 3.4.2.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติด้านลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการมีอยู่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs-COOH ด้วยเครื่อง FESEM-EDX

นำสารแขวนลอย Pt/MWCNTs-COOH ที่เตรียมขึ้นมาเติม 1% (v/v) Nafion 117 (ในเอทานอล) 1.00 mL และปรับปริมาตรให้เป็น 100 mL ด้วยเอทานอล จากนั้นทำให้กระจายตัวอีกครั้งด้วย Sonicator bath เป็นเวลา 60 นาที นำสารแขวนลอยที่ได้มาพ่นเคลือบบนผ้าคาร์บอน ขนาด 2.50 cm x 10.00 cm ด้วยแปรงพ่นสีต่อปัมลม และทำให้แห้งด้วยแท่นความร้อน จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FESEM-EDX (ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 7610F, ญี่ปุ่น) ร่วมกับการใช้โหมดถ่ายภาพ EDX และ Mapping เพื่อยืนยันการมีอยู่ของ Pt และสังเกตการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนพื้นผิวของ MWCNTs-COOH

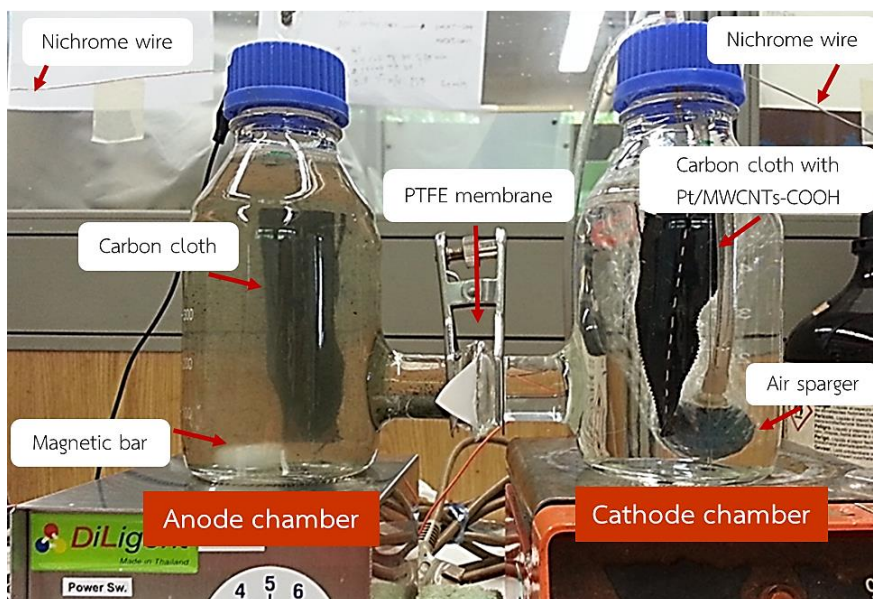


### 3.4.2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิววัสดุ

นำสารแขวนลอยที่เตรียมได้ มาทำการ Freeze drying ด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (ยี่ห้อ Labconco รุ่น 78060 series, สหรัฐอเมริกา) จากนั้นนำไปวิเคราะห์สมบัติทางเคมีที่ระดับผิวด้วยเครื่อง XPS

### 3.4.3 การออกแบบและเตรียมเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่รูปตัว H (H-shape dual-chamber MFC) ประกอบไปด้วย ขวด 2 ขวด ที่มีปริมาตร 500 mL เชื่อมต่อกันด้วยท่อยาว 9.0 เซนติเมตร มี Polytetrafluoroethylene (PTFE) เป็นเยื่อเลือกผ่าน สำหรับขั้วแอโนดจะใช้ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth; CC) ที่มีขนาด 2.50 x 10.00 cm และร้อยด้วยลวดนิโครมยาว 30.00 cm บริเวณกึ่งกลางของผ้าคาร์บอน และในแต่ละช่องจะใส่สารละลายในปริมาตร 600 mL ซึ่งในช่องแอโนดจะบรรจุน้ำเสียที่เก็บจากบ่อพักน้ำของโรงอาหารสระแก้วมหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม ที่ผ่านการกรองด้วยผ้าขาวบางแล้ว โดยน้ำเสียในช่องแอโนดมีการกวนตลอดเวลา ขั้วแคโทดมีขนาด 2.50 x 10.00 cm โดยใช้ขั้วแคโทดที่แตกต่างกันทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ (1) ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น พร้อมหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซิล เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอน (Pt/MWCNTs-COOH/CC) (2) ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น พร้อมหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซิล เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอน (MWCNTs-COOH/CC) (3) ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว พร้อมหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซิล เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอน (Pt/SWCNTs-COOH/CC) (4) ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว พร้อมหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซิล เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอน (SWCNTs-COOH/CC) (5) ผ้าคาร์บอน (CC) และ (6) ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอนที่มีจำหน่าย (Commercial Pt/CC) จากนั้นนำขั้วแคโทดแต่ละชนิดร้อยด้วยลวดนิโครมยาว 30.00 cm และในช่องแคโทดบรรจุสารละลายแคโทไลต์ ซึ่งเป็นสารละลายผสมระหว่าง 0.10 M NaCl และ 0.02 M NaHCO<sub>3</sub> โดยมีการพ่นอากาศในช่องแคโทด จากนั้นทำการ Operate เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่อุณหภูมิห้อง การต่อเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแสดงดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพรูปตัว H ที่เตรียมขึ้น

### 3.4.4 การเตรียมน้ำเสีย

#### 3.4.4.1 น้ำเสียจากโรงอาหาร

นำน้ำเสียจากบ่อบำบัดน้ำของโรงอาหารสระแก้ว มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม มากรองด้วยผ้าขาวบางเพื่อแยกเศษอาหารและเศษตะกอนที่มีขนาดใหญ่ออก หลังจากนั้นนำน้ำที่กรองแล้วปริมาตร 600 mL บรรจุลงในช่องแอโนด



รูปที่ 14 น้ำเสียในบ่อบำบัดน้ำของโรงอาหารสระแก้ว มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม

### 3.4.4.2 น้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่ สารอาหาร (Nutrient) แร่ธาตุ (Mineral) และวิตามิน (Vitamin)

ในการเตรียมสารละลายวิตามินนั้นทำโดยนำ Vitamin B2 1.25 mg และ *p*-aminobenzoic acid 1.25 mg ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นในขวดปริมาตร 250.00 mL ส่วนการเตรียมสารอาหาร รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารอาหาร

สารเคมี	ปริมาณ (g/L)
KCl	0.13
NH <sub>4</sub> Cl	0.31
CH <sub>3</sub> COOH	2.00
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> •7H <sub>2</sub> O	2.75
NaHCO <sub>3</sub>	3.13
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> •2H <sub>2</sub> O	4.22

ในการเตรียมสารละลายแร่ธาตุ (Mineral) รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สารเคมีที่ใช้ในการเตรียมสารละลายแร่ธาตุ

สารเคมี	ปริมาณ (mg/L)
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> •2H <sub>2</sub> O	5
AlK(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> •12H <sub>2</sub> O	10
CuSO <sub>4</sub> •5H <sub>2</sub> O	10
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	10
FeSO <sub>4</sub> •7H <sub>2</sub> O	100
CaCl <sub>2</sub> •2H <sub>2</sub> O	100
MgSO <sub>4</sub> •5H <sub>2</sub> O	300
NaCl	1,000
N(CH <sub>2</sub> COOH) <sub>3</sub>	1,500

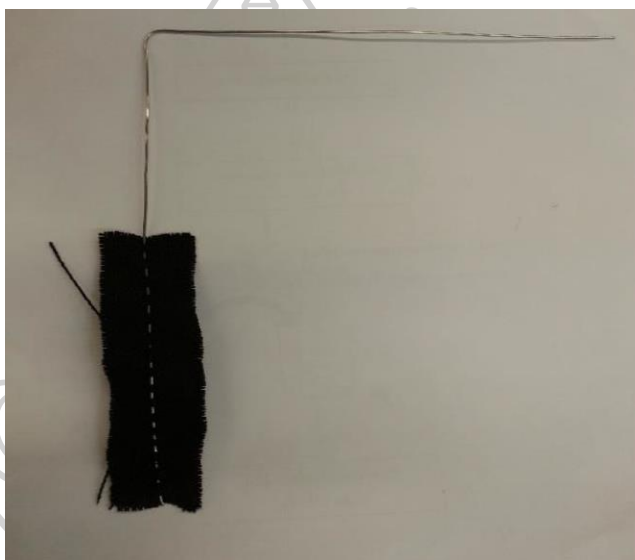
จากนั้นนำส่วนประกอบทั้ง 3 ส่วน (สารอาหาร แร่ธาตุ และวิตามิน) ผสมเข้าด้วยกัน และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1,000 mL

### 3.4.5 การเตรียมสารละลายแคโทไลต์

นำ NaCl 5.84 g และ NaHCO<sub>3</sub> 1.68 g ละลายในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1,000 mL จากนั้นนำสารละลายที่ได้ปริมาตร 600 mL บรรจุในช่องแคโทด

### 3.4.6 การเตรียมขั้วแอโนด

ตัดผ้าคาร์บอนให้มีขนาด 2.50 x 10.00 cm จากนั้นนำลวดนิโครมที่มีความยาว 30.00 cm มาร้อยบริเวณกึ่งกลางผ้าคาร์บอน ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 ขั้วแอโนดที่เตรียมขึ้นจากผ้าคาร์บอน

### 3.4.7 การเตรียมขั้วแคโทด

ในงานวิจัยนี้ใช้ขั้วแคโทดที่แตกต่างกันทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่

หมายเหตุ ในการเตรียมสารละลาย 1% (v/v) Nafion 117 เตรียมได้โดยเปิด Nafion 117 ปริมาตร 50  $\mu$ L ใส่ในขวดปริมาตรขนาด 5.00 mL จากนั้นปรับปริมาตรด้วยเอทานอล

#### 3.4.7.1 ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth; CC)

นำผ้าคาร์บอนมาตัดให้มีขนาด 2.50 cm x 10.00 cm จากนั้นนำลวดนิโครมที่มีความยาว 30.00 cm มาร้อยบริเวณกึ่งกลางของผ้าคาร์บอน

### 3.4.7.2 ท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น พร้อมหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซิล เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอน (MWCNTs-COOH/CC)

นำ MWCNTs-COOH 120 mg มากระจายตัวใน 1% (v/v) Triton X-100 ปริมาตร 40.00 mL ด้วยเครื่อง Sonicator bath เป็นเวลา 90 นาที จากนั้นเติมสารละลาย 1% (v/v) Nafion 117 (ในเอทานอล) ปริมาตร 1.00 mL และปรับปริมาตรด้วยเอทานอลให้เป็น 100 mL จากนั้นนำมาผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง Sonicator bath เป็นเวลา 60 นาที นำสารแขวนลอยที่ได้ไปพ่นเคลือบบนผ้าคาร์บอน ที่มีขนาด 2.50 cm x 10.00 cm ด้วยแปรงพ่นสีต่อปี่ลม ทำให้แห้งบนแท่นให้ความร้อน จากนั้นนำลวดนิโครมที่มีความยาว 30.00 cm มาร้อยบริเวณกึ่งกลางของผ้าคาร์บอน

### 3.4.7.3 ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนท่อนาโนคาร์บอนผนังหลายชั้น พร้อมหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซิล เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอน (Pt/MWCNTs-COOH/CC)

นำ Pt/MWCNTs-COOH ที่เตรียมขึ้นมาเติมสารละลาย 1% (v/v) Nafion 117 (ในเอทานอล) ปริมาตร 1.00 mL และปรับปริมาตรด้วยเอทานอลให้เป็น 100 mL นำมาผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง Sonicator bath เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำสารแขวนลอยที่ได้ไปพ่นเคลือบบนผ้าคาร์บอน ที่มีขนาด 2.50 cm x 10.00 cm ด้วยแปรงพ่นสีต่อปี่ลม ทำให้แห้งบนแท่นให้ความร้อน จากนั้นนำลวดนิโครมที่มีความยาว 30.00 cm มาร้อยบริเวณกึ่งกลางของผ้าคาร์บอน

### 3.4.7.4 ท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว พร้อมหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซิล เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอน (SWCNTs-COOH/CC)

นำ SWCNTs-COOH 60 mg มากระจายตัวในน้ำ DI ปริมาตร 40.00 mL และนำมากระจายตัวด้วยเครื่อง Sonicator bath เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นเติมสารละลาย 1% (v/v) Nafion 117 (ในเอทานอล) ปริมาตร 1.00 mL และปรับปริมาตรให้เป็น 100 mL ด้วยเอทานอล และนำมาผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง Sonicator bath เป็นเวลา 60 นาที นำสารแขวนลอยที่ได้ไปพ่นเคลือบบนผ้าคาร์บอน ที่มีขนาด 2.50 cm x 10.00 cm ด้วยแปรงพ่นสีต่อปี่ลม ทำให้แห้งบนแท่นให้ความร้อน จากนั้นนำลวดนิโครมที่มีความยาว 30.00 cm มาร้อยบริเวณกึ่งกลางของผ้าคาร์บอน

### 3.4.7.5 ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว พร้อมหมู่ฟังก์ชันเป็นคาร์บอกซิล เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอน (Pt/SWCNTs-COOH/CC)

นำ Pt/SWCNTs-COOH ที่เตรียมขึ้นมาเติมสารละลาย 1% (v/v) Nafion 117 (ในเอทานอล) ปริมาตร 1.00 mL และปรับปริมาตรให้เป็น 100 mL ด้วยเอทานอล และนำมาผสมเป็นเนื้อเดียวกันด้วยเครื่อง Sonicator bath เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นนำสารแขวนลอยที่ได้ไปพ่นเคลือบบนผ้าคาร์บอน ที่มีขนาดกว้าง 2.50 cm ยาว 10.00 cm ด้วยแปรงพ่นสีต่อปี่ลม ทำให้แห้ง

บนแท่นให้ความร้อน จากนั้นนำลวดนิโครมที่มีความยาว 30.00 cm มาร้อยบริเวณกึ่งกลางของผ้าคาร์บอน

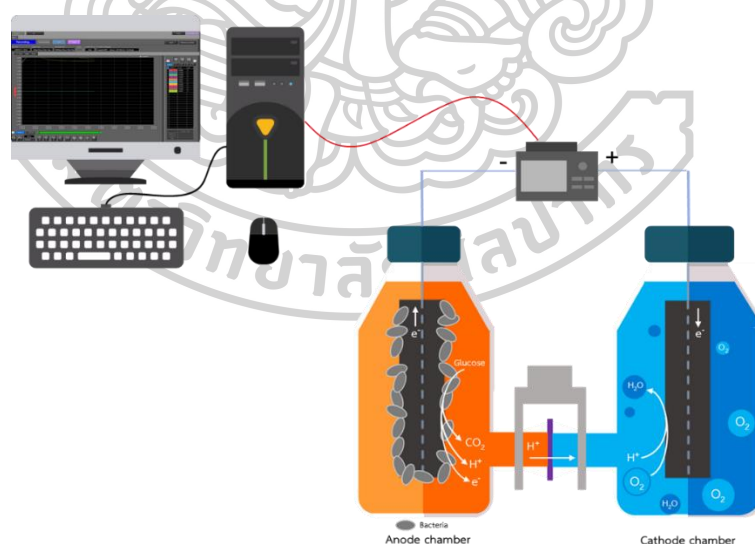
### 3.4.7.6 ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอนที่มีจำหน่าย (Commercial Pt/CC)

นำ Commercial Pt/CC มาตัดให้มีขนาด 2.50 cm x 10.00 cm จากนั้นนำลวดนิโครมที่มีความยาว 30.00 cm มาร้อยบริเวณกึ่งกลางของผ้าคาร์บอน

### 3.4.8 การประเมินประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้น

#### 3.4.8.1 การวัดค่าศักย์ไฟฟ้าโดยใช้เครื่อง Data logger

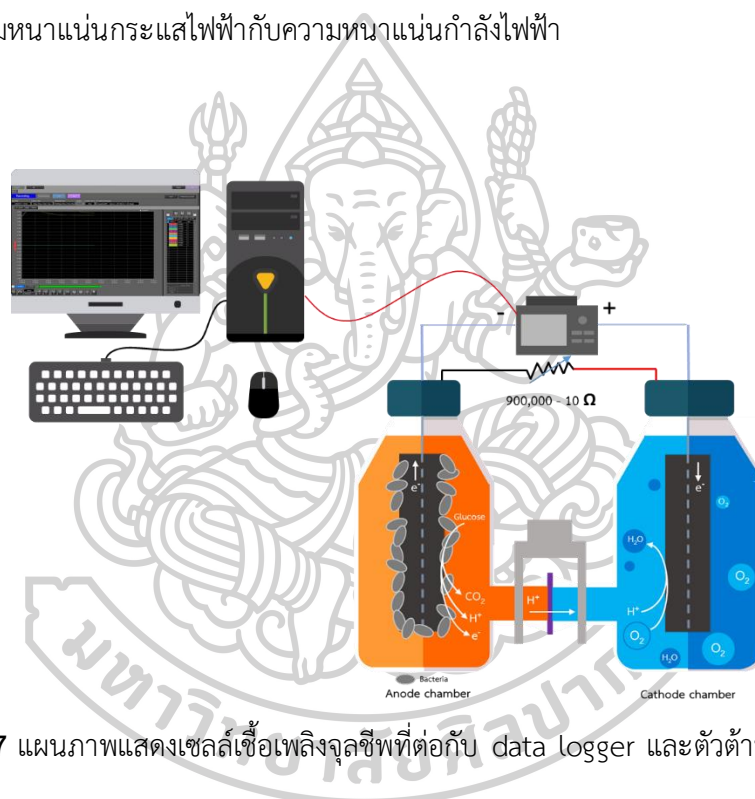
ในการวัดค่าศักย์ไฟฟ้านำสายไฟจากขั้วลบของ Data logger ต่อเข้ากับขั้วแอโนดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ส่วนสายไฟจากขั้วบวกของ Data logger ต่อเข้ากับขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ดังรูปที่ 16 โดยทำการบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าทุกๆ 30 นาที ข้อมูลจะถูกบันทึกใน Computer จากนั้นนำค่าศักย์ไฟฟ้าที่ได้ไปพล็อตกราฟ โดยให้แกน x เป็นเวลา (วัน) และแกน y เป็นศักย์ไฟฟ้า (v) ที่วัดได้ในแต่ละวัน



รูปที่ 16 แผนภาพแสดงเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ต่อกับ data logger

### 3.4.8.2 การหาค่าความต้านทานภายใน และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุด

ในการหาค่าความต้านทานภายใน และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูงสุดจะทำการต่อตัวต้านทานภายนอกที่ทราบค่าความต้านทานที่แน่นอนเข้ากับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ โดยทำการปรับลดค่าความต้านทานลงทุกๆ 1 นาที่ จากความต้านทานสูงสุดไปยังความต้านทานต่ำสุดตั้งแต่ 900,000 ถึง 10  $\Omega$  พร้อมทำการบันทึกค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ (ดังรูปที่ 17) จากนั้นนำค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้มาสร้างกราฟ Polarization และกราฟ Power density โดยกราฟ Polarization จะพล็อตระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้กับความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ส่วนกราฟ Power density จะพล็อตระหว่างความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากับความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า



รูปที่ 17 แผนภาพแสดงเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ต่อกับ data logger และตัวต้านทานภายนอก

### 3.4.9 การประเมินประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้น

#### 3.4.9.1 การหาค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (APHA 5220) (Association, 2005c)

ปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 10.00 mL ใส่ในขวดปริมาตรขนาด 50.00 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นปิเปตน้ำที่เจือจางแล้วมา 10.00 mL และปิเปต 0.01670 M  $K_2Cr_2O_7$  มา 6.00 mL ใส่ในหลอดย่อย (Digestion tube) ขนาด 25 x 150 mm และเติม Sulphuric acid reagent 14.00 mL ลงไปช้าๆ ผสมสารละลายให้เข้ากันด้วย Magnetic stirrer ปิดฝา Digestion

tube แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $150 \pm 2$  °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นนำสารละลายมาไตเตรตด้วย 0.050 M FAS โดยใช้ Ferroin เป็น indicator ที่จุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง นอกจากนี้ในการหาค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD) ต้องมีการทำ Blank โดยเปลี่ยนจากน้ำตัวอย่างเป็นน้ำกลั่น แล้วทำการทดลองเหมือนกับน้ำตัวอย่าง และสามารถคำนวณหาค่า COD ได้ดังสมการที่ 3.1

$$\text{COD} = \frac{(A-B)(8000M)}{C} \quad (\text{สมการ 3.1})$$

A = ปริมาตรของสารละลาย FAS ที่ใช้ในการไตเตรต Blank (mL)

B = ปริมาตรของสารละลาย FAS ที่ใช้ในการไตเตรตน้ำตัวอย่าง (mL)

M = ความเข้มข้นของสารละลาย FAS (M)

C = ปริมาตรของน้ำตัวอย่างที่ใช้ (mL)

ในงานวิจัยนี้จะหาค่า COD ของน้ำเสียก่อนและหลังเข้าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ และรายงานเป็นค่า %COD removal เพื่อหาร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย โดยการคำนวณ %COD removal แสดงดังสมการที่ 3.2

$$\% \text{COD removal} = \frac{\text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}}}{\text{COD}_{\text{in}}} \times 100 \quad (\text{สมการ 3.2})$$

$\text{COD}_{\text{in}}$  = ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีก่อนผ่าน MFC ( $\text{mg O}_2/\text{L}$ )

$\text{COD}_{\text{out}}$  = ค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมีหลังผ่าน MFC ( $\text{mg O}_2/\text{L}$ )

#### 3.4.9.2 การหาค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์

(APHA 5210) (Association, 2005a, 2005b)

ในการหาค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะหาค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำที่แตกต่างกัน 5 วัน (ศึกษาวันแรก ( $\text{DO}_0$ ) และวันที่ 5 ( $\text{DO}_5$ )) ทำได้โดย ปิเปตน้ำตัวอย่างปริมาตร 3.00 mL ใส่ลงในขวด BOD ที่มีขนาด 300 mL ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น จากนั้นเติม 2.15 M  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  1.0 mL และ Alkalide azide reagent 1.0 mL ลงไป ปิดฝาขวด BOD โดยระวังไม่ให้มีฟองอากาศอยู่ภายใน จากนั้นเขย่าให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จะมีตะกอนสีน้ำตาลเกิดขึ้น รอจนเกิดตะกอนประมาณครึ่งหนึ่งของขวด BOD จากนั้นเติม Conc.



H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1.0 mL เขย่าจนตะกอนละลายจนหมด นำสารละลายที่มีปริมาตร 201 mL ถ่ายใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 mL แล้วนำมาไทเตรตด้วย 0.025 M Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> จนสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน (เหมือนสีฟางข้าว) เติม 2% (w/v) สารละลายน้ำแป้ง 2.0 mL จากนั้นไทเตรตต่อจนสีน้ำเงินหายไป

ส่วนการเตรียมตัวอย่างเพื่อจะ ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ 5 วัน (DO<sub>5</sub>) ให้เตรียมเหมือนวิธีที่เขียนมาข้างต้น โดยนำตัวอย่างที่เตรียมขึ้นไปบ่มในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 20±1 °C เป็นเวลา 5 วัน จากนั้นนำตัวอย่างมาหาปริมาณออกซิเจนที่อยู่ในน้ำ ด้วยการไทเตรตกับ 0.025 M Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> เช่นเดียวกับวิธีการที่เขียนมาข้างต้น ค่า BOD หาได้จากผลต่างค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ 5 วัน แสดงดังสมการที่ 3.3

$$BOD = DO_0 - DO_5 \quad (\text{สมการ 3.3})$$

DO<sub>0</sub> = ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำในวันแรก (mg O<sub>2</sub>/L)

DO<sub>5</sub> = ค่าปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำหลังจากเก็บไว้ในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 20±1 °C เป็นเวลา 5 วัน (mg O<sub>2</sub>/L)

ในงานวิจัยนี้จะหาค่า BOD ของน้ำเสียก่อนและหลังเข้าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ และรายงานเป็นค่า %BOD removal เพื่อหาร้อยละการกำจัดสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย โดยการคำนวณ %BOD removal แสดงดังสมการ 3.4

$$\%BOD \text{ removal} = \frac{BOD_{in} - BOD_{out}}{BOD_{in}} \times 100 \quad (\text{สมการ 3.4})$$

BOD<sub>in</sub> = ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ก่อนผ่าน MFC (mg O<sub>2</sub>/L)

BOD<sub>out</sub> = ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์หลังผ่าน MFC (mg O<sub>2</sub>/L)

### 3.4.9.3 การหาค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (ASTM D5907-13) (Materials, 2013)

- การเตรียมแผ่นกรองใยแก้ว (Glass fiber filter)

วาง Glass fiber filter ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 mm ลงในกรวยบุชเนอร์ จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น ปริมาตร 20.0 mL จำนวน 3 ครั้ง ด้วยการกรองแบบลดความดัน จากนั้นนำ Glass fiber filter วางใน Gooch crucible แล้วอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103 °C-105 °C เป็นเวลา 1

ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นใน Desiccator ทำการชั่งน้ำหนัก อบจนน้ำหนักคงที่ โดยน้ำหนักที่ชั่งต่างกันไม่เกิน 0.1 mg และบันทึกค่าน้ำหนัก

- การเตรียมจานระเหย (Evaporating dish)

นำ Evaporating dish ที่ล้างทำความสะอาดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 178 °C-182 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นใน Desiccator ทำการชั่งน้ำหนัก อบจนน้ำหนักคงที่ โดยน้ำหนักที่ชั่งต่างกันไม่เกิน 0.1 mg และบันทึกค่าน้ำหนัก

- การหาค่าของแข็งละลายน้ำทั้งหมด (TDS) และของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TSS)

ในการหาค่า TSS ทำได้โดยนำ Glass fiber filter ที่ทราบน้ำหนักใส่ลงในกรวยบุชเนอร์ จากนั้นกรองน้ำตัวอย่างปริมาตร 100.0 mL (น้ำหนักของของแข็งที่ได้ควรอยู่ในช่วง 25-200 mg) ล้างของแข็งที่ได้ด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง ครั้งละ 20 mL จากนั้นนำ Glass fiber filter ที่มีของแข็งวางลงใน Gooch crucible นำไปอบที่อุณหภูมิ 103 °C-105 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นใน Desiccator ชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักของแข็งที่อยู่บน Glass fiber filter จากนั้นนำไปอบต่อจนน้ำหนักคงที่ โดยน้ำหนักที่ชั่งต่างกันไม่เกิน 0.1 mg และบันทึกค่าน้ำหนัก

ในการหาค่า TDS จะนำน้ำตัวอย่างที่ผ่านการกรองด้วย Glass fiber filter แล้วมา 60.0 mL เทใส่ใน Evaporating dish จากนั้นนำไประเหยที่อุณหภูมิ 103 °C-105 °C หลังจากทีน้ำตัวอย่างระเหยจนหมด นำ Evaporating dish ไปอบต่อที่อุณหภูมิ 178 °C-182 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นใน Desiccator ชั่งน้ำหนักเพื่อหาน้ำหนักของแข็ง จากนั้นนำ Evaporating dish ไปอบซ้ำจนน้ำหนักคงที่ โดยน้ำหนักต่างกันไม่เกิน 0.1 mg จะได้ค่า TDS

ในงานวิจัยนี้จะหาค่า TDS และ TSS ของน้ำเสียก่อนและหลังเข้าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ และรายงานเป็นค่า %TDS removal และ %TSS removal เพื่อหาร้อยละการกำจัดของแข็งทั้งหมดที่เปลี่ยนแปลงไปที่อยู่ในน้ำเสีย โดยการคำนวณ %TDS removal และ %TSS removal แสดงดังสมการที่ 3.5 และ 3.6

$$\%TSS \text{ removal} = \frac{TSS_{in} - TSS_{out}}{TSS_{in}} \times 100 \quad (\text{สมการ 3.5})$$

$TSS_{in}$  = ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำตัวอย่างก่อนผ่าน MFC (mg/L)

$TSS_{out}$  = ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมดในน้ำตัวอย่างหลังผ่าน MFC (mg/L)

$$\%TDS \text{ removal} = \frac{TDS_{in} - TDS_{out}}{TDS_{in}} \times 100 \quad (\text{สมการ 3.6})$$

$TDS_{in}$  = ค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในน้ำตัวอย่างก่อนผ่าน MFC (mg/L)

$TDS_{out}$  = ค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมดในน้ำตัวอย่างหลังผ่าน MFC (mg/L)

### 3.4.10 การประเมินประสิทธิภาพการยึดเกาะของ Biofilm บนขั้วแอโนดจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ด้วยเครื่อง FESEM

ตัดขั้วแอโนดที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นเวลา 570 วัน ให้มีขนาดประมาณ  $0.50 \times 0.50$  cm นำไปล้างด้วย 0.1 M Phosphate buffer pH 7.4 จากนั้นนำไปแช่ในสารละลาย 2.5% (v/v) Glutaric dialdehyde เป็นเวลา 30 นาที และล้างด้วยน้ำกลั่น กำจัดน้ำออกโดยนำไปแช่ในสารละลาย Ethanol ที่ความเข้มข้น 25% (v/v), 50% (v/v), 75% (v/v) และ 100% (v/v) ตามลำดับ ความเข้มข้นละ 10 นาที ตามลำดับ (โดยที่ความเข้มข้นของ Ethanol 100% จะแช่ 2 ครั้ง) จากนั้นปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง (L. Zhang et al., 2008) จากนั้นนำตัวอย่างไปเคลือบทองและนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FESEM (ยี่ห้อ TESCAN รุ่น MIRA3, สาธารณรัฐเช็ก)

### 3.4.11 การประเมินประสิทธิภาพด้านการกำจัดโลหะหนักของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้น

การเตรียมเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ เตรียมเช่นเดียวกับข้อ 3.4.3 โดยในขั้นแรกจะใช้น้ำเสียจากบ่อกักน้ำของโรงอาหารสระแก้ว มหาวิทยาลัยศิลปากร ใส่ในช่องแอโนด และใส่สารละลายผสมระหว่าง 0.10 M NaCl และ 0.02 M NaHCO<sub>3</sub> โดยมีการพ่นอากาศด้านช่องแคโทด แต่ไม่มีการกวนสารละลาย ทั้งไว้เป็นเวลา 35 วัน โดยมีการเปลี่ยนน้ำทุกๆ 3-4 วัน เพื่อให้แบคทีเรียเจริญเติบโตเป็น biofilm เกาะบนขั้วแอโนดจนให้ศักย์ไฟฟ้าคงที่ จากนั้นเปลี่ยนสารละลายช่องแคโทดเป็นสารละลาย AgNO<sub>3</sub> เข้มข้น 100 ppm พร้อมกับการกวนสารละลาย โดยไม่มีการพ่นอากาศเข้าไปยังด้านแคโทด จากนั้นก่อนที่จะทำการเชื่อมต่อเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพกับ data logger จะมีการพ่นแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 10 นาที ทำการประเมินประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ เช่นเดียวกับข้อ 3.4.8 ประเมินประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ เช่นเดียวกับ ข้อ 3.4.9 และหาค่าความเข้มข้นของสารละลาย Ag เพื่อประเมินประสิทธิภาพด้านการกำจัดโลหะเงินในสารละลายแคโทลิต์ ซึ่งจะทำการวิเคราะห์โดยหาปริมาณ Ag ในสารละลายแคโทลิต์ก่อนผ่าน MFC และหลังผ่าน MFC ด้วยเครื่อง ICP-OES ที่ความยาวคลื่น 328.068 nm และคำนวณค่าความเข้มข้นของ Ag ที่เปลี่ยนแปลงไปตั้งจากสมการที่ 3.7

$$\%Ag \text{ removal} = \frac{(\text{Concentration of Ag})_{in} - (\text{Concentration of Ag})_{out}}{(\text{Concentration of Ag})_{in}} \times 100 \quad (\text{สมการ 3.7})$$

Concentration of  $Ag_{in}$  = ความเข้มข้นของ Ag ในสารละลายแคโทไลต์ก่อนผ่าน MFC (mg/L)

Concentration of  $Ag_{out}$  = ความเข้มข้นของ Ag ใน สารละลายแคโทไลต์หลังผ่าน MFC (mg/L)



## บทที่ 4

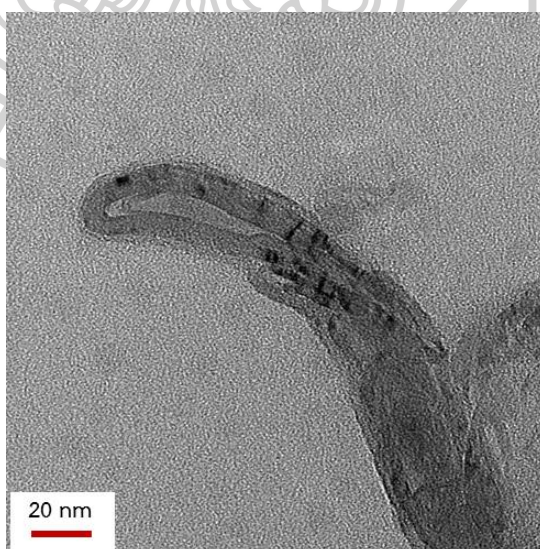
### ผลการทดลอง และอภิปรายผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้อ้างอิงผลการทดลองทั้งหมดของ SWCNTs-COOH และ Pt/SWCNTs-COOH จากงานวิจัยของ นางสาวปณิตพร พุสมจิตต์ ในหัวข้อเรื่อง การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาทองคำขาวบนตัวรองรับท่อนาโนคาร์บอนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ

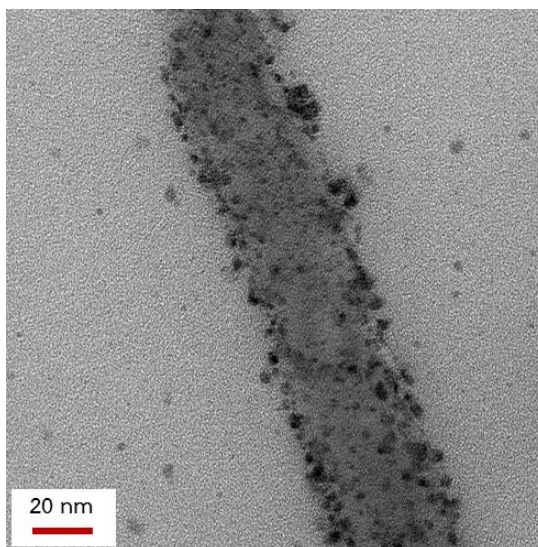
#### 4.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH ด้วยวิธี DP

##### 4.1.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านโครงสร้างของ Pt/MWCNTs-COOH ด้วยเครื่อง TEM

จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM พบว่า MWCNTs-COOH มีลักษณะเป็นท่อที่มีผนังหลายชั้นซ้อนกัน โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกอยู่ในช่วง 20-30 nm (รูปที่ 18) ทั้งนี้เพื่อเป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพในการเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ที่เตรียมขึ้นจากวิธี DP ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อวิธี DP ได้แก่ ความเข้มข้นของ  $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$ , ค่า pH ของสารแขวนลอย, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ และเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ที่เตรียมขึ้น จากวิธี DP มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของ MWCNTs-COOH โดยสีเทาที่มีลักษณะเป็นเส้นคือ MWCNTs-COOH ขณะที่จุดสีดำที่กระจายตัวอยู่คือตัวเร่งปฏิกิริยา Pt (รูปที่ 19)



รูปที่ 18 TEM image (กำลังขยาย 100,000 เท่า) ของ MWCNTs-COOH ที่กระจายตัวใน 1% (v/v) Triton X-100

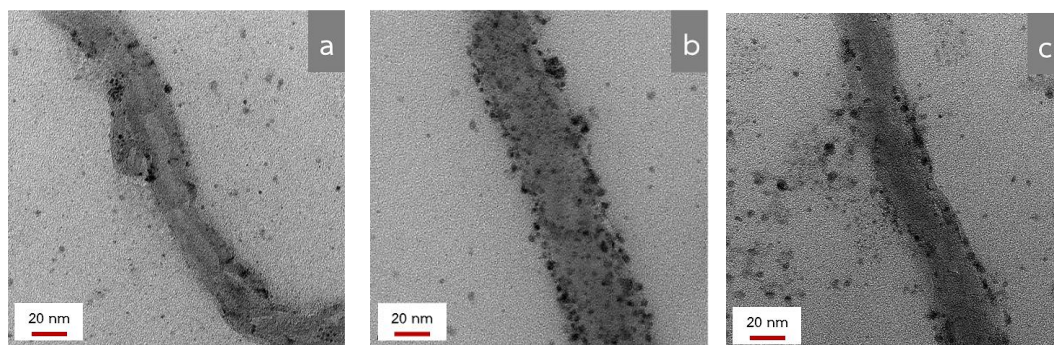


**รูปที่ 19** TEM image (กำลังขยาย 100,000 เท่า) ของ Pt/MWCNTs-COOH โดยใช้ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ 1.5 mM, pH เท่ากับ 7, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์  $70^\circ\text{C}$  และเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 120 นาที

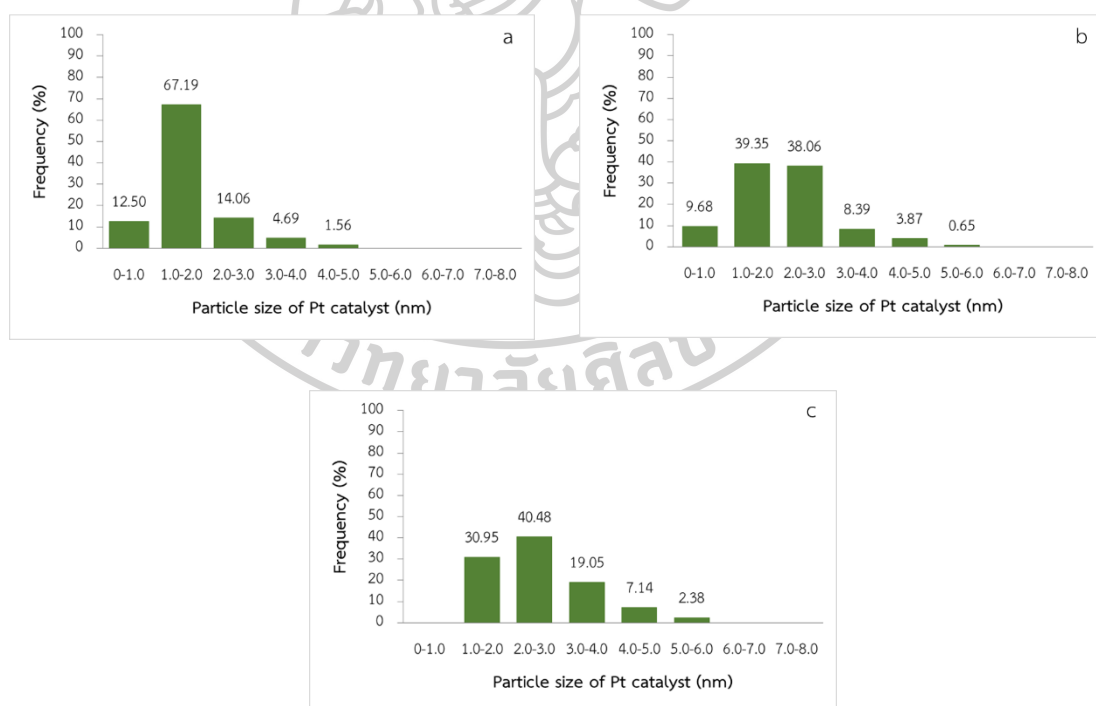
#### 4.1.1.1 ผลของความเข้มข้นของ $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ต่อการเตรียม Pt/MWCNTs-COOH

จากรูป TEM (รูปที่ 20) ของ Pt/MWCNTs-COOH ที่เตรียมขึ้นโดยใช้ความเข้มข้น  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  แตกต่างกัน (1.0 mM, 1.5 mM และ 2.0 mM) พบว่าที่ความเข้มข้น 1.0 mM (รูปที่ 20a และ 21a) อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs-COOH มีขนาดแตกต่างกัน และมีปริมาณน้อย โดยขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.65-4.13 nm ที่ความเข้มข้น 1.5 mM (รูปที่ 20b และ 21b) อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs-COOH มีจำนวนมาก และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 0.54-5.14 nm และที่ความเข้มข้น 2.0 mM (รูปที่ 20c และ 21c) อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt มีขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวบน MWCNTs-COOH ที่ไม่สม่ำเสมอ อนุภาคส่วนใหญ่เกาะอยู่บริเวณขอบและบริเวณภายนอกของท่อ MWCNTs-COOH ขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 1.50-5.25 nm จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ที่ 1.5 mM เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs-COOH โดยมีการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา Pt มากที่สุดในช่วง 1.0-2.0 nm เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของคุณ Chen และคณะ (C.-M. Chen et al., 2008) ซึ่งมีการเตรียมอนุภาค

Pt บน MWCNTs โดยใช้วิธี Temperature-controlled microwave polyol โดยใช้ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ที่ 3.5 mM ได้ขนาดเฉลี่ยอนุภาค Pt เท่ากับ 4-5 nm



รูปที่ 20 TEM images (กำลังขยาย 100,000 เท่า) ของ Pt/MWCNTs-COOH โดย pH เท่ากับ 7, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์  $70^\circ\text{C}$ , เวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 120 นาที โดยใช้ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ต่างกัน: a) 1.0 mM, 1.5 mM และ 2.0 mM

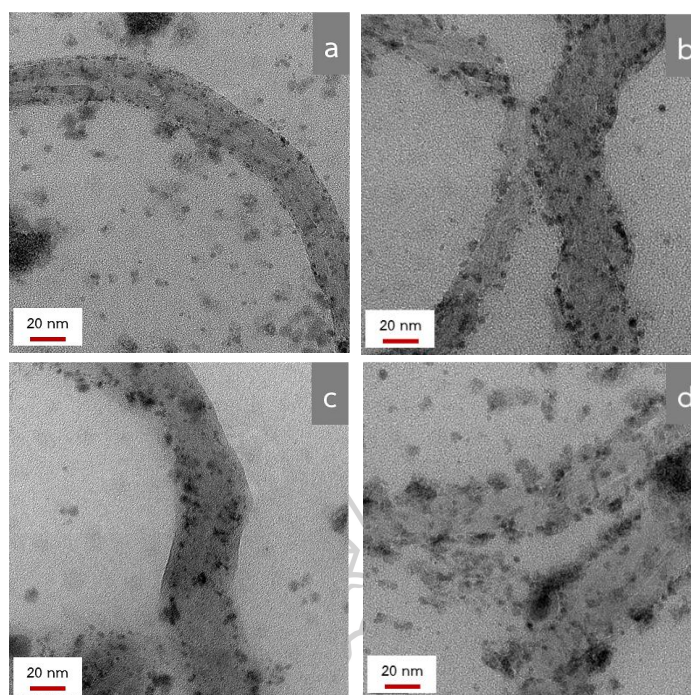


รูปที่ 21 Histograms แสดงการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH โดย pH เท่ากับ 7, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์  $70^\circ\text{C}$ , เวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 120 นาที โดยใช้ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ต่างกัน: a) 1.0 mM, 1.5 mM และ 2.0 mM

#### 4.1.1.2 ผลของ pH ของสารแขวนลอยต่อการเตรียม Pt/MWCNTs-COOH

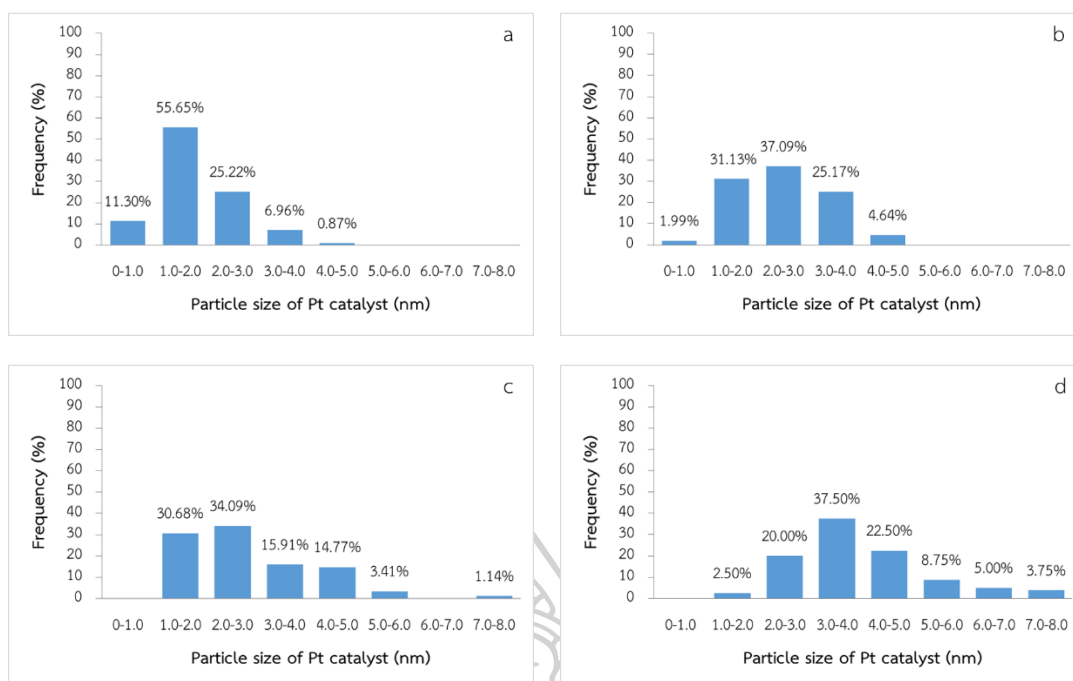
ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH โดยศึกษา สภาวะ pH ของสารแขวนลอยที่ 6, 7, 8, 9 และ 10 ผลการทดลองพบว่าที่ pH เท่ากับ 10 สารแขวนลอยเกิดการตกตะกอนจึงไม่ได้นำมาศึกษาด้วย TEM โดยรูป TEM (รูปที่ 22) ของ Pt/MWCNTs-COOH ที่สภาวะ pH ของสารแขวนลอยที่แตกต่างกัน (pH 6, 7, 8 และ 9) พบว่าที่ pH 6 (รูปที่ 22a และ 23a) อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ที่เกาะอยู่บน MWCNTs-COOH มีจำนวนมาก และมีขนาดเล็ก แต่อนุภาคบางส่วนมีการรวมตัวเกาะกันเป็นก้อนขนาดใหญ่อยู่บริเวณด้านนอกของท่อ MWCNTs-COOH โดยขนาดของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 0.51-4.23 nm ที่ pH 7 (รูปที่ 22b และ 23b) อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกาะอยู่บน MWCNTs-COOH มีจำนวนมากโดยมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 0.90-4.95 nm ที่ pH 8 (รูปที่ 22c และ 23c) ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt มีขนาดที่ต่างกั น มีปริมาณน้อย และมีการเกาะกันเป็นก้อน โดยขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 1.10-7.03 nm และที่ pH 9 (รูปที่ 22d และ 23d) อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ที่เกาะอยู่บน MWCNTs-COOH มีจำนวนมาก มีขนาดที่ต่างกั น และมีการรวมกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ โดยขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 1.32-7.66 nm จากผลการทดลองพบว่า pH ของสารแขวนลอยเท่ากับ 7 เป็นสภาวะที่เหมาะสมของวิธี DP ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs-COOH โดยมีการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา Pt มากที่สุดในช่วง 2.0-3.0 nm เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของคุณ Li และคณะ (X. Li & Hsing, 2006) ซึ่งได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน CNTs ด้วยวิธีการตกตะกอน (Precipitation method) ที่ pH 8.5 พบว่าได้อนุภาค Pt ขนาดค่อนข้างใหญ่ โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ  $4.8 \pm 1.9$  nm อีกทั้งมีจำนวนอนุภาค Pt เกาะอยู่บน CNTs น้อย





รูปที่ 22 TEM images (กำลังขยาย 100,000 เท่า) ของ Pt/MWCNTs-COOH โดยใช้ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ 1.5 mM, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 70 °C เวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 120 นาที และ pH ต่างกัน: a) 6, b) 7, c) 8 และ d) 9



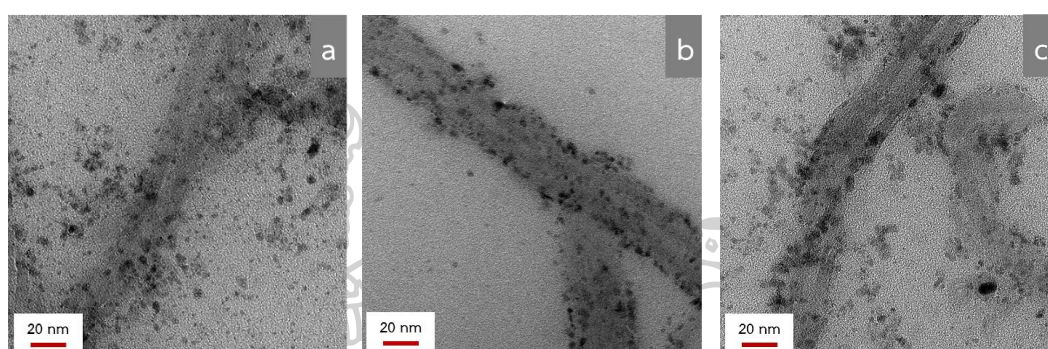


รูปที่ 23 Histograms แสดงการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH โดยใช้ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ 1.5 mM, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์  $70^\circ\text{C}$  เวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 120 นาที และ pH ต่างกัน: a) 6, b) 7, c) 8 และ d) 9

#### 4.1.1.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ต่อการเตรียม Pt/MWCNTs-COOH

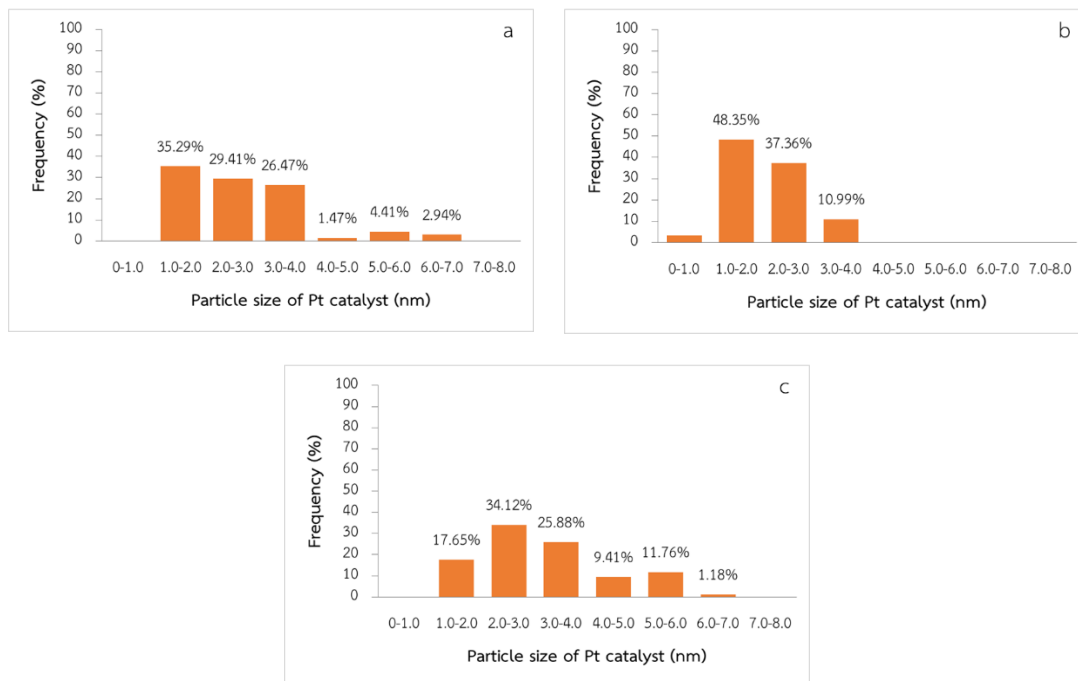
จากรูป TEM (รูปที่ 24) ของ Pt/MWCNTs-COOH ที่เตรียมขึ้นโดยใช้อุณหภูมิในการรีฟลักซ์ของวิธี DP ที่แตกต่างกัน ( $60^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$ ,  $80^\circ\text{C}$ ,  $90^\circ\text{C}$  และ  $100^\circ\text{C}$ ) พบว่าที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  (รูปที่ 24a และ 25a) อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ที่กระจายตัวบน MWCNTs-COOH มีปริมาณน้อย และอนุภาคบางส่วนเกาะกันเป็นก้อน ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt อยู่ในช่วง 1.09-6.56 nm ที่อุณหภูมิ  $70^\circ\text{C}$  (รูปที่ 24b และ 25b) อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt มีการกระจายตัวบน MWCNTs-COOH อย่างสม่ำเสมอ และมีจำนวนมาก ขนาดของตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 0.73-3.87 nm และที่อุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  (รูปที่ 24c และ 25c) อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt มีขนาดใหญ่ และมีการกระจายตัวบน MWCNTs-COOH ที่ไม่สม่ำเสมอ ขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 1.10-6.56 nm ส่วนที่อุณหภูมิในการรีฟลักซ์เท่ากับ  $90^\circ\text{C}$  และ  $100^\circ\text{C}$  นั้นในระหว่างการเตรียม Pt/MWCNTs-COOH ด้วยวิธี DP เกิดการตกตะกอนในขั้นตอนการเติมสารละลาย NaOH เพื่อใช้ในการปรับ pH จึงไม่ได้นำสารแขวนลอยที่ได้ไปทดสอบด้วย TEM จากผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิในการรีฟลักซ์ที่  $70^\circ\text{C}$  เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs-COOH โดยมีการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา Pt มากที่สุดในช่วง 1.0-2.0 nm โดยมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของคุณปัทมพร และคณะ (Pusomjit et al., 2016 ซึ่งได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน

ตัวรองรับ SWCNTs-COOH ด้วยวิธี DP โดยใช้อุณหภูมิในการรีฟลักซ์เท่ากับ 80 °C ซึ่งได้ขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 1.0-3.2 nm (Pusomjit et al., 2016) และในงานวิจัยของคุณ Sheng และคณะ (Sheng et al., 2011) ได้มีการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs โดยวิธี Immobilization โดยมีการให้ความร้อนจากเตาเผา โดยศึกษาที่อุณหภูมิ 300 °C, 400 °C, 500 °C และ 600 °C การเพิ่มอุณหภูมิ 600 °C ไม่ได้ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญในขนาดอนุภาคหรือการกระจายตัว ซึ่งพบว่าที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด โดยให้ขนาดอนุภาค Pt บน MWCNTs ที่ประมาณ 2 nm แต่อย่างไรก็ตามวิธีใช้ความร้อนจากเตาเผาที่ค่อนข้างสูง



**รูปที่ 24** TEM images (กำลังขยาย 100,000 เท่า) ของ Pt/MWCNTs-COOH โดยความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ 1.5 mM, pH เท่ากับ 7 เวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 120 นาที และอุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ต่างกัน: a) 60 °C, b) 70 °C และ c) 80 °C



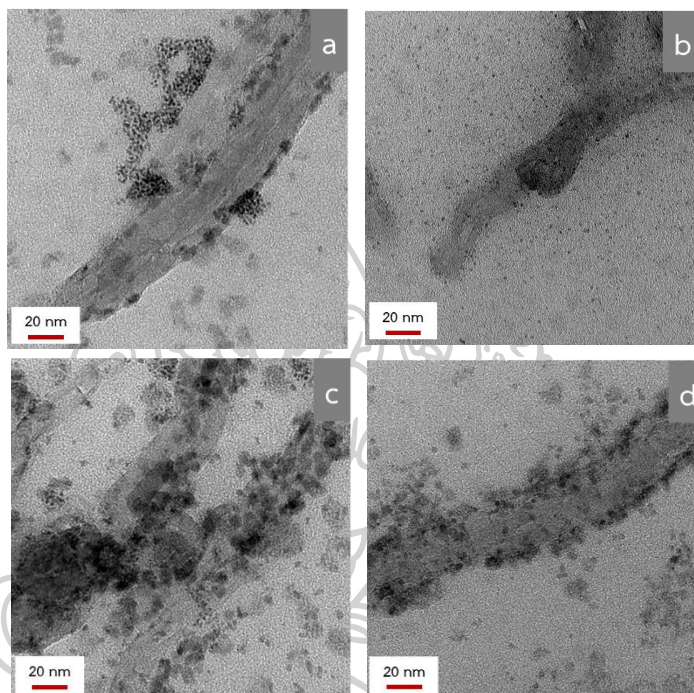


**รูปที่ 25** Histograms แสดงการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH โดยใช้ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ 1.5 mM, pH เท่ากับ 7 เวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 120 นาที และ อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ต่างกัน: a) 60 °C, b) 70 °C และ c) 80 °C

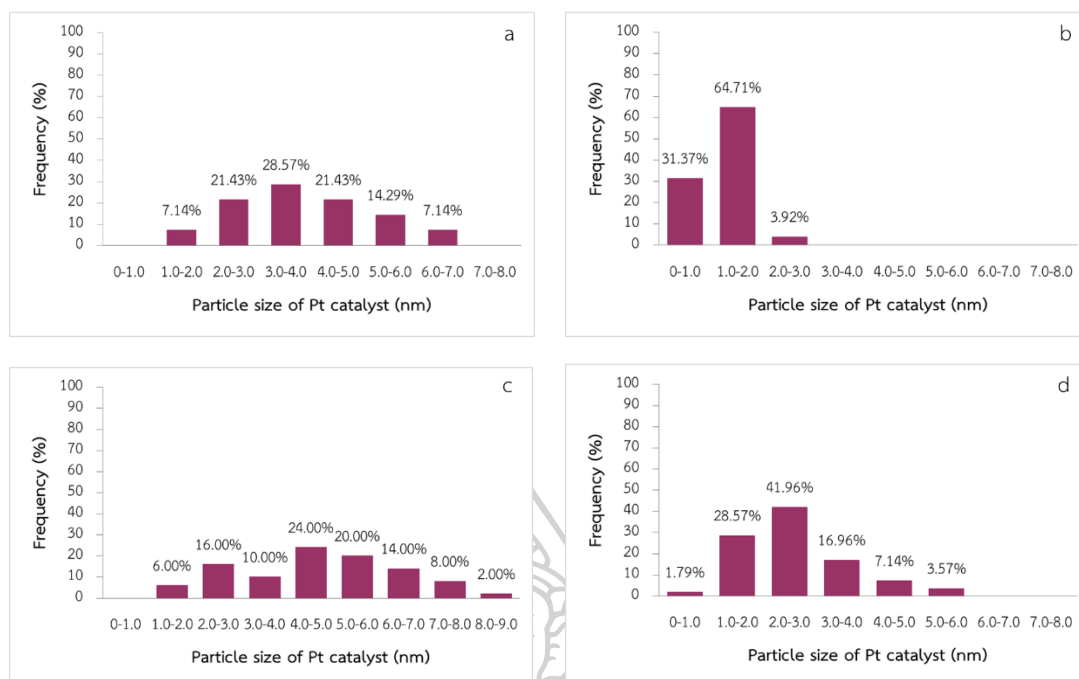
#### 4.1.1.4 ผลของเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ต่อการเตรียม Pt/MWCNTs-COOH

จากรูป TEM (รูปที่ 26) ของ Pt/MWCNTs-COOH ที่เตรียมขึ้นโดยใช้เวลาในการรีฟลักซ์ที่แตกต่างกัน (30 นาที, 60 นาที, 90 นาที และ 120 นาที) พบว่าที่เวลา 30 นาที (รูปที่ 26a และ 27a) อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs-COOH เกะกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ และส่วนใหญ่เกาะอยู่บริเวณขอบด้านนอกของท่อ MWCNTs-COOH โดยขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 1.54-6.54 nm ที่เวลา 60 นาที (รูปที่ 26b และ 27b) อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs-COOH มีขนาดเล็ก มีปริมาณน้อย และอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt อยู่บริเวณด้านนอกท่อ MWCNTs-COOH โดยขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.75-2.92 nm ที่เวลา 90 นาที (รูปที่ 26c และ 27c) ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt จำนวนมากเกาะอยู่บน MWCNTs-COOH โดยเกาะเป็นกลุ่มขนาดใหญ่ และมีการกระจายตัวที่ไม่สม่ำเสมอ โดยขนาดอนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 1.34-8.21 nm และที่เวลา 120 นาที (รูปที่ 26d และ 27d) อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs-COOH มีจำนวนมาก และอนุภาคส่วนใหญ่มีการกระจายตัวบน MWCNTs-COOH อนุภาคของตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในช่วง 0.73-5.70 nm จากผลการทดลองพบว่าเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ที่ 120 นาที เป็นสภาวะที่เหมาะสม

ของวิธี DP ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs-COOH โดยมีการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ที่มากที่สุดในช่วง 2.0-3.0 nm ซึ่งอนุภาค Pt มีขนาดเล็กกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของคุณ Xing (Xing, 2004) ซึ่งได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs ด้วยวิธีการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 140 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยได้อนุภาค Pt ขนาดใหญ่โดยมีขนาดเฉลี่ยเท่ากับ 5.74 nm



**รูปที่ 26** TEM images (กำลังขยาย 100,000 เท่า) ของ Pt/MWCNTs-COOH โดยใช้ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ 1.5 mM, pH เท่ากับ 7, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์ 80 °C และเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์ต่างกัน: a) 30 นาที, b) 60 นาที, c) 90 นาที และ d) 120 นาที



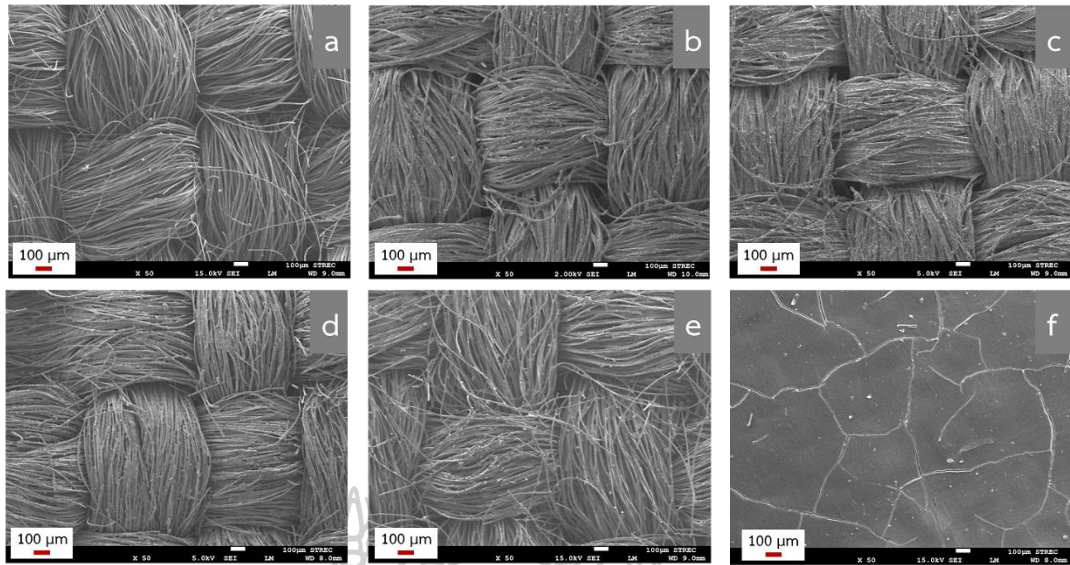
รูปที่ 27 Histograms แสดงการกระจายตัวของอนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH โดยใช้ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ 1.5 mM, pH เท่ากับ 7, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์  $70^\circ\text{C}$  และเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์แตกต่างกัน: (a) 30 นาที, (b) 60 นาที, (c) 90 นาที และ (d) 120 นาที

#### 4.1.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติด้านลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการมีอยู่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ด้วยเครื่อง FESEM-EDX

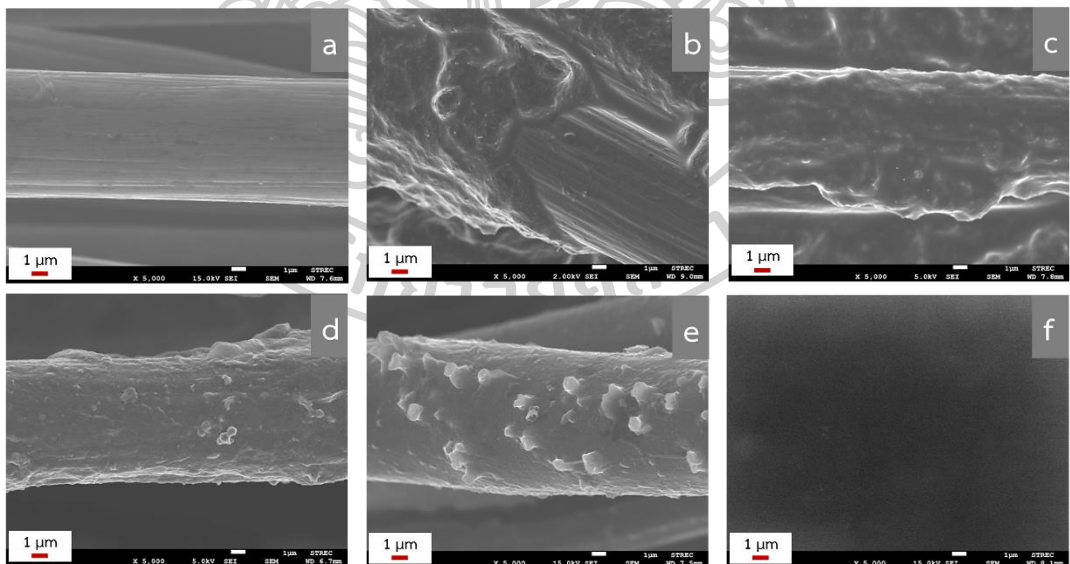
การทดสอบคุณสมบัติด้านลักษณะทางสัณฐานวิทยา และการมีอยู่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ของ Pt/MWCNTs-COOH ที่เตรียมจากสภาวะที่เหมาะสมของวิธี DP โดยใช้เครื่อง FESEM-EDX พบว่าภาพถ่าย FESEM (กำลังขยาย 500 เท่า) ของ Carbon cloth, MWCNTs-COOH/CC, Pt/MWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC และ Pt/SWCNTs-COOH/CC (รูปที่ 28a-28e) พบว่ามีลักษณะเป็นเส้นใยหลายเส้นสานกัน ส่วน Commercial Pt/CC (รูปที่ 28f) พบว่าพื้นผิวมีลักษณะที่เรียบและเห็นรอยแตกที่กำลังขยาย 5,000 เท่า Carbon cloth (รูปที่ 29a) จะเห็นพื้นผิวเรียบของเส้นใย MWCNTs-COOH/CC (รูปที่ 29b) และ Pt/MWCNTs-COOH/CC (รูปที่ 29c) แสดงลักษณะก้อนที่หนาของ MWCNTs-COOH และ Pt/MWCNTs-COOH เคลือบบนเส้นใยของผ้าคาร์บอน SWCNTs-COOH/CC (รูปที่ 29d) และ Pt/SWCNTs-COOH/CC (รูปที่ 29e) จะเห็นว่าเส้นใยผ้าคาร์บอนมีผิวขรุขระมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับ Carbon cloth โดยคาดว่า MWCNTs-COOH,

Pt/MWCNTs-COOH, SWCNTs-COOH และ Pt/SWCNTs-COOH ที่เคลือบอยู่บนผ้าคาร์บอน จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนที่มากขึ้น และจะทำให้การผลิตกระแสไฟฟ้าโดยเทคนิค MFC เพิ่มมากขึ้น (Slate et al., 2019) และจาก EDX spectrum ของ Carbon cloth (รูปที่ 30) ปรากฏพีคของธาตุ O และ C โดยพีคของธาตุ C มาจากผ้าคาร์บอน ส่วน MWCNTs-COOH/CC (รูปที่ 31) ปรากฏพีคของธาตุ O และ C โดยพีคของธาตุ C มาจากผ้าคาร์บอน และ MWCNTs-COOH ที่เคลือบอยู่บนผ้า ส่วนธาตุ O มาจาก O ในหมู่ฟังก์ชัน -COOH บน MWCNTs จาก EDX spectrum ของ Pt/MWCNTs-COOH/CC (รูปที่ 32) จะปรากฏพีคของธาตุ C, O และ Pt ซึ่งยืนยันความสำเร็จในการ Deposit อนุภาคตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บน MWCNTs-COOH ด้วยวิธี DP ส่วน EDX spectrum ของ SWCNTs-COOH/CC (รูปที่ 33) ปรากฏพีคของธาตุ O และ C โดยพีคของธาตุ C มาจากผ้าคาร์บอน และ SWCNTs-COOH ที่เคลือบอยู่บนผ้า ส่วนธาตุ O มาจาก O ในหมู่ฟังก์ชัน -COOH บน SWCNTs จาก EDX spectrum ของ Pt/SWCNTs-COOH/CC (รูปที่ 34) ปรากฏพีคของธาตุ C, O และ Pt และผลของ Commercial Pt/CC (รูปที่ 35) จะปรากฏพีคของธาตุ C, O และ Pt นอกจากนี้ผลจาก EDX element mappings ของ Pt/MWCNTs-COOH, Pt/SWCNTs-COOH และ Commercial Pt/CC (รูปที่ 36) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของ Pt บน MWCNTs-COOH เช่นเดียวกับผล EDX element mapping จากงานวิจัยของคุณ Jiang และคณะ (Jiang et al., 2018) ที่มีการเตรียม Pt/Ni-P บน CNT โดยวิธี Galvanic displacement reaction



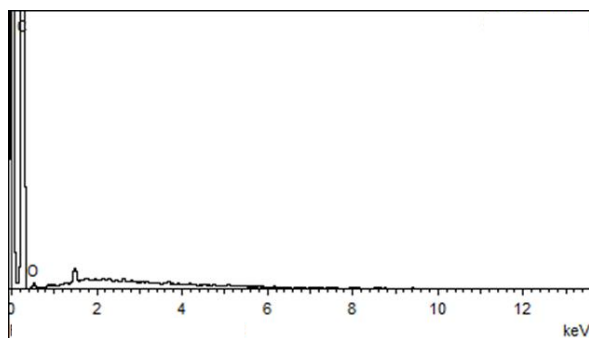


รูปที่ 28 FESEM images ที่กำลังขยาย 500 เท่า: a) Carbon cloth, b) MWCNTs-COOH/CC, c) Pt/MWCNTs-COOH/CC, d) SWCNTs-COOH/CC, e) Pt/SWCNTs-COOH/CC และ f) Commercial Pt/CC



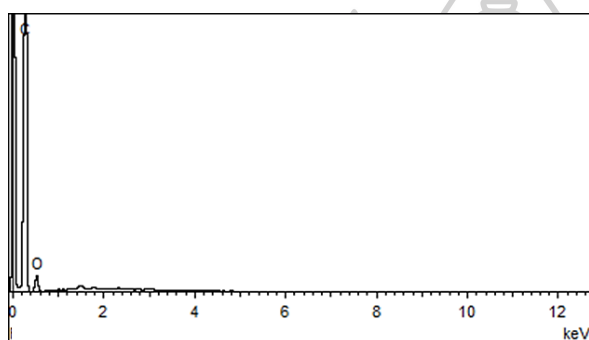
รูปที่ 29 FESEM images ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า: a) Carbon cloth, b) MWCNTs-COOH/CC, c) Pt/MWCNTs-COOH/CC, d) SWCNTs-COOH/CC, e) Pt/SWCNTs-COOH/CC และ f) Commercial Pt/CC





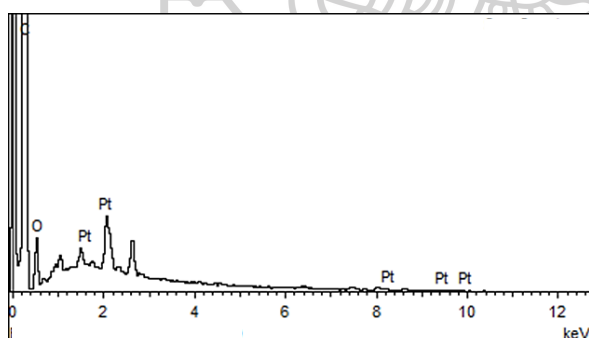
Element	Weight %	Atomic %
C K	96.92	97.67
O K	3.08	2.33
Totals	100.00	

รูปที่ 30 FESEM-EDX spectrum ของ Carbon cloth



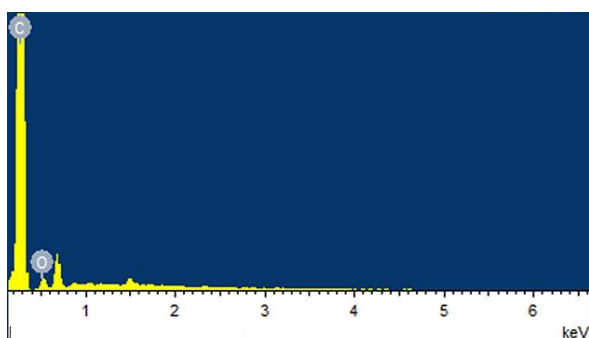
Element	Weight %	Atomic %
C K	88.55	91.15
O K	11.45	8.85
Totals	100.00	

รูปที่ 31 FESEM-EDX spectrum ของ MWCNTs-COOH/CC



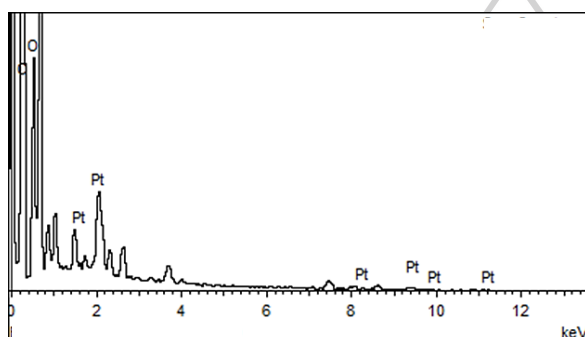
Element	Weight %	Atomic %
C K	91.28	95.22
O K	5.87	4.60
Pt M	2.85	0.18
Totals	100.00	

รูปที่ 32 FESEM-EDX spectrum ของ Pt/MWCNTs-COOH/CC



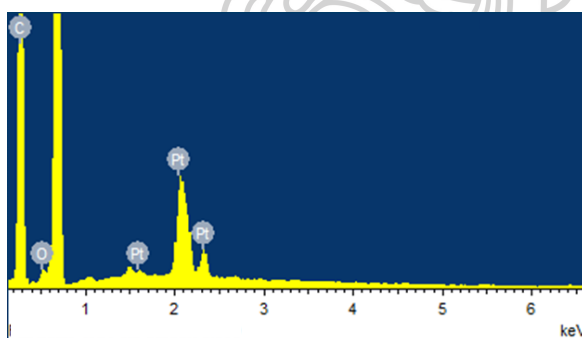
Element	Weight %	Atomic %
C K	95.64	96.69
O K	4.36	3.31
Totals	100.00	

รูปที่ 33 FESEM-EDX spectrum ของ SWCNTs-COOH/CC



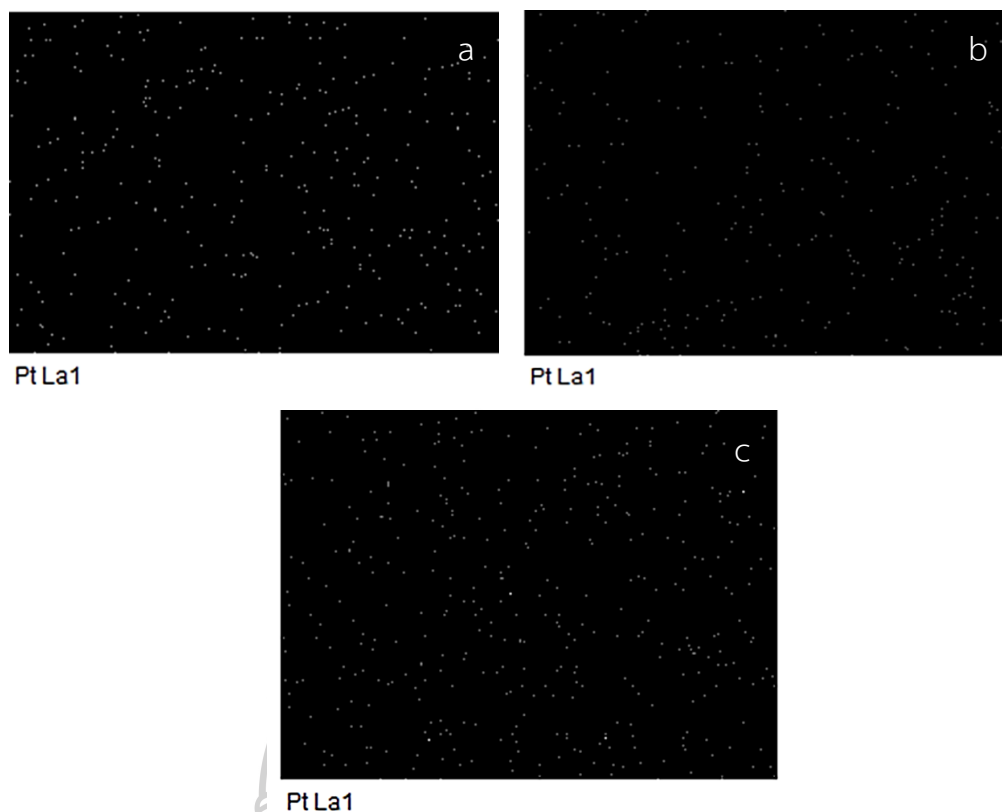
Element	Weight %	Atomic %
C K	71.20	79.47
O K	24.12	20.21
Pt M	4.68	0.32
Totals	100.00	

รูปที่ 34 FESEM-EDX spectrum ของ Pt/SWCNTs-COOH/CC



Element	Weight %	Atomic %
C K	72.65	91.63
O K	7.19	6.81
Pt M	20.16	1.57
Totals	100.00	

รูปที่ 35 FESEM-EDX spectrum ของ Commercial Pt/CC

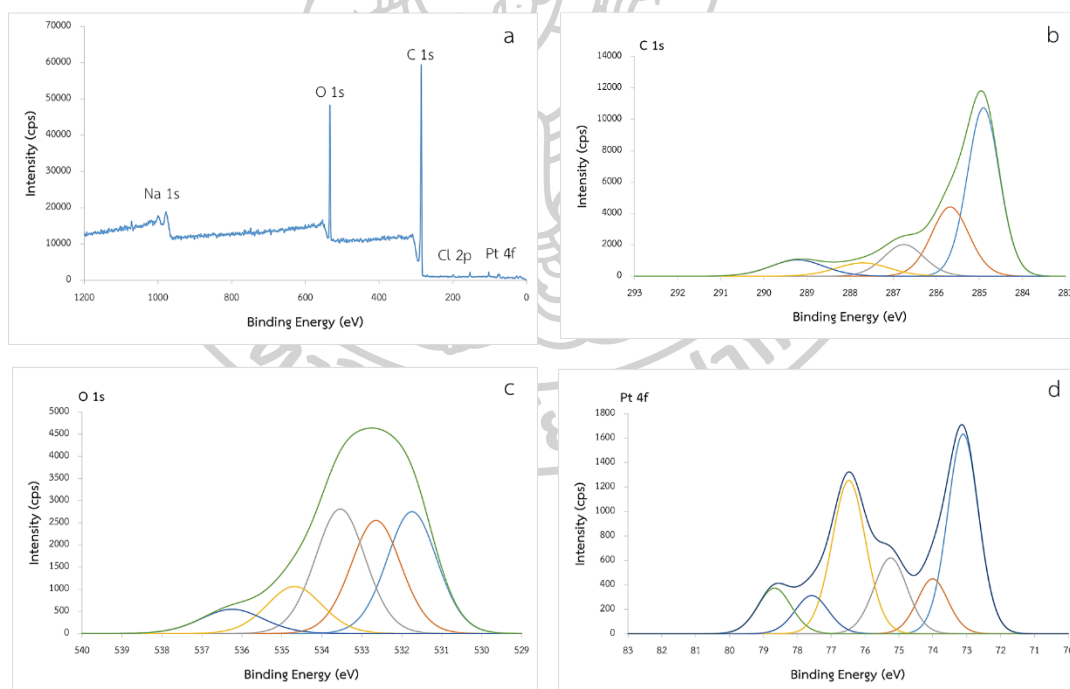


รูปที่ 36 EDX element mapping images ของ Pt จาก a) Pt/MWCNTs-COOH/CC b) Pt/SWCNTs-COOH/CC และ c) Commercial Pt/CC

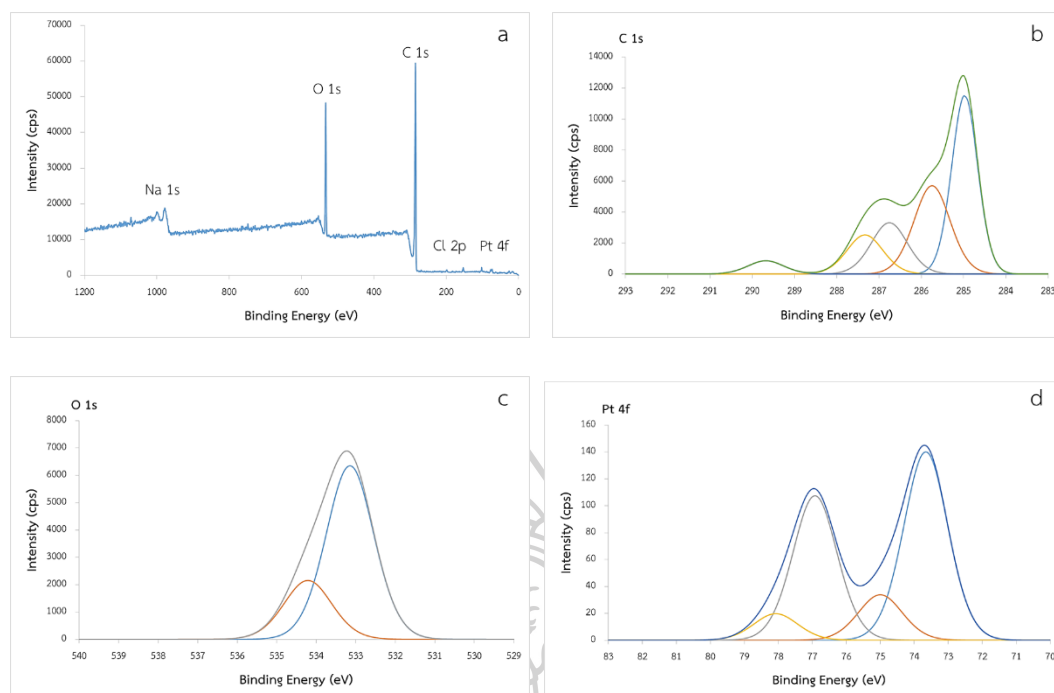
#### 4.1.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีด้วยเครื่องวิเคราะห์พื้นผิววัสดุ

จาก XPS spectra ของ Pt/SWCNTs-COOH และ Pt/MWCNTs-COOH (รูปที่ 37a และ 38a) พบธาตุดังนี้ C, O, Cl, Na และ Pt ส่วน XPS spectrum ของ C 1s ของ Pt/SWCNTs-COOH (รูปที่ 37b) และ Pt/SWCNTs-COOH (รูปที่ 38b) พบพีคทั้งหมด 5 พีคที่ Binding energy ประมาณ 284.9, 285.7, 286.8, 287.7 และ 289.2 eV ตรงกับ C=C/C-C, C-OR, C-OH, C=O และ HO-C=O ตามลำดับ ส่วน XPS spectrum ของ O 1s ของ Pt/SWCNTs-COOH (รูปที่ 37c) พบ 5 พีคที่ Binding energy เท่ากับ 531.7, 532.6, 533.5, 534.7 และ 536.3 eV ตรงกับ C=O, C-OH, C-O, HO-C=O และ O=O ตามลำดับ และ XPS spectrum ของ O 1s ของ Pt/MWCNTs-COOH (รูปที่ 38c) พบ 2 พีคที่ Binding energy เท่ากับ 533.1 และ 534.2 eV ตรงกับ C-O และ HO-C=O ตามลำดับ (Moraes et al., 2018; Sadri et al., 2017; Tian et al., 2015) ส่วน XPS spectrum ของ Pt 4f ของ Pt/SWCNTs-COOH (รูปที่ 37d) พบพีค 3 คู่ โดยประกอบด้วย Lower binding energy doublet ที่ Pt 4f<sub>7/2</sub> และ Higher binding energy doublet ที่ Pt 4f<sub>5/2</sub> โดยที่ Binding

energy 73.1 และ 76.5 eV แสดง Pt(OH)<sub>4</sub> ส่วนที่ Binding energy 74.0 และ 77.6 eV แสดง PtO<sub>2</sub> และที่ Binding energy 75.2 และ 78.7 eV แสดง Pt-Cl ที่มาจากสารตั้งต้น H<sub>2</sub>[PtCl<sub>4</sub>] และจาก XPS spectrum ของ Pt 4f ของ Pt/MWCNTs-COOH (รูปที่ 38d) พบพีค 2 คู่ โดยประกอบด้วย Lower binding energy doublet ที่ Pt 4f<sub>7/2</sub> และ Higher binding energy doublet ที่ Pt 4f<sub>5/2</sub> โดยที่ Binding energy 73.7 และ 76.9 eV แสดง Pt(OH)<sub>4</sub> และที่ Binding energy 75.0 และ 78.1 eV แสดง PtCl<sub>4</sub> ที่มาจากสารตั้งต้น H<sub>2</sub>[PtCl<sub>4</sub>] (Karhu et al., 2003; Peuckert et al., 1984; Romanchenko et al., 2018; Yen et al., 2013) เมื่อเปรียบเทียบ Intensity ของ Spectrum จะเห็นว่า Intensity ของ Pt(OH)<sub>4</sub> มีค่ามากที่สุด บ่งบอกถึง OH<sup>-</sup> จาก NaOH ที่เดิมเป็น Precipitation agent สามารถเข้าไปแทนที่ลิแกนด์ Cl<sup>-</sup> ที่อยู่ในสารตั้งต้น ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถเป็นไปดังสมการที่ 4.1-4.2 (Koo et al., 2014; Song et al., 2012)



รูปที่ 37 XPS spectra ของ Pt/SWCNTs-COOH: a) Pt/SWCNTs-COOH, b) C 1s ของ Pt/SWCNTs-COOH, c) O 1s ของ Pt/SWCNTs-COOH และ d) Pt 4f ของ Pt/SWCNTs-COOH



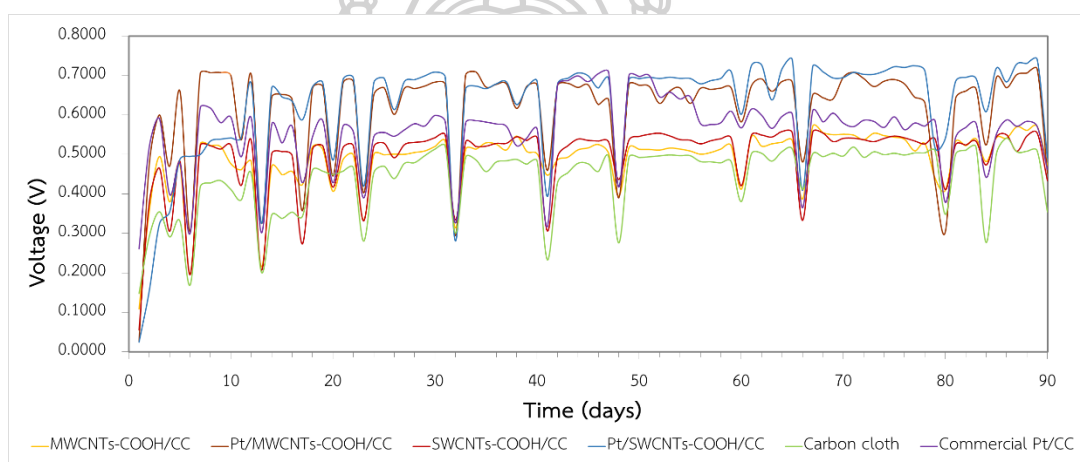
รูปที่ 38 XPS spectra ของ Pt/MWCNTs-COOH: a) Pt/MWCNTs-COOH, b) C 1s ของ Pt/MWCNTs-COOH, c) O 1s ของ Pt/MWCNTs-COOH และ d) Pt 4f ของ Pt/MWCNTs-COOH

## 4.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคูที่ใช้น้ำเสียจากโรงอาหารเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น

### 4.2.1 ค่าศักย์ไฟฟ้า

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละวัน ทั้งหมด 90 วัน (ค่าศักย์ไฟฟ้าทั้ง 90 วันอยู่ที่ภาคผนวก) โดยใช้เครื่อง Data logger ต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่มีขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth, SWCNTs-COOH/CC, Pt/SWCNTs-COOH/CC, MWCNTs-COOH/CC, Pt/MWCNTs-COOH/CC และ Commercial Pt/CC แสดงดังรูปที่ 39 จากผลการทดลองพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงแรกมีค่าน้อย และไม่คงที่ อาจเนื่องมาจากแบคทีเรียยังคงอยู่ในช่วงการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ (Lag phase) อีกทั้งปริมาณแบคทีเรียที่ยึดเกาะบนขั้วแอโนดยังคงมีปริมาณน้อย หลังจากนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าเริ่มคงที่เมื่อผ่านไปเป็นระยะเวลา 21 วัน ค่าศักย์ไฟฟ้าของ Pt/MWCNTs-COOH/CC, MWCNTs-COOH/CC, Commercial Pt/CC, SWCNTs-COOH/CC, Pt/SWCNTs-COOH/CC และ Carbon cloth มีค่าเท่ากับ 0.6908 V, 0.6819 V, 0.5726 V, 0.5183 V, 0.4878 V และ 0.4850 V ตามลำดับ จากกราฟจะเห็นได้ว่าการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียรอบใหม่ ทำให้แบคทีเรียมีการปรับตัวตามสารอาหารที่ได้รับ (Lag phase) โดยมีการกว

สารละลายตลอดเวลา เพื่อให้สารอาหารที่อยู่ในน้ำเสียเป็นเนื้อเดียวกันส่งผลให้แบคทีเรียปรับตัวเข้ากับสภาวะใหม่ได้ดีขึ้น และในช่วงที่ศักย์ไฟฟ้าคงที่ค่าศักย์ไฟฟ้าของ Pt/SWCNTs-COOH/CC, Pt/MWCNTs-COOH/CC, Commercial Pt/CC, SWCNTs-COOH/CC, MWCNTs-COOH/CC และ Carbon cloth มีค่าเท่ากับ 0.6859 V, 0.6759 V, 0.6580 V, 0.5424 V, 0.5018 V และ 0.4836 V ตามลำดับ โดยพบว่า ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่มี Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด มีค่าใกล้เคียงกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่มี Pt/SWCNTs-COOH/CC และ Commercial Pt/CC เป็นขั้วแคโทด และมีค่ามากกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่มี SWCNTs-COOH/CC, MWCNTs-COOH/CC และ Carbon cloth เป็นขั้วแคโทด โดยคิดเป็น 20.92%, 26.84% และ 29.49% ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากการที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา จะช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ปฏิกิริยาจึงเกิดได้เร็วขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพให้เกิดปฏิกิริยา ORR เพิ่มมากขึ้น



**รูปที่ 39** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า (V) กับ เวลา (วัน) ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง)

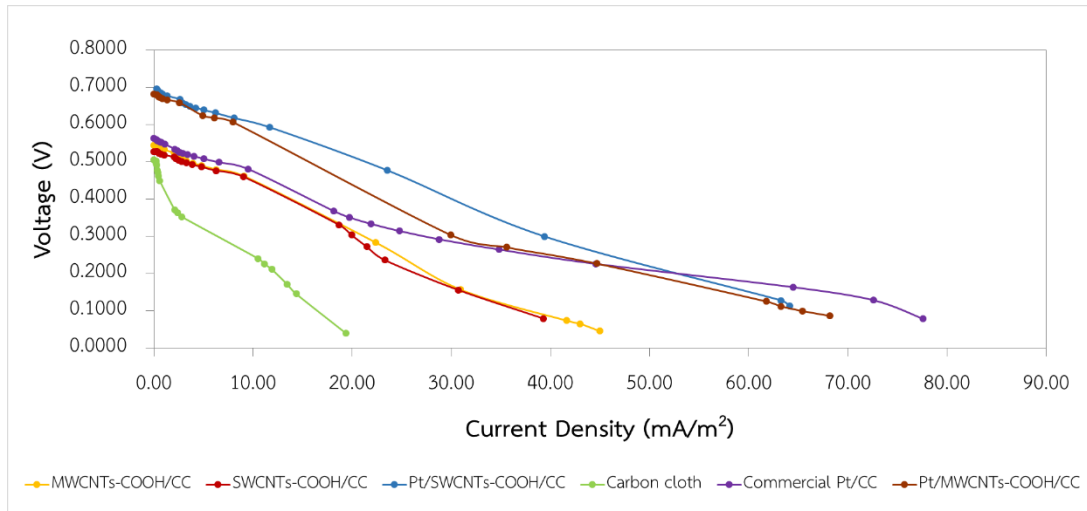
#### 4.2.2 ค่า OCV, $R_{int}$ และ $P_{max}$

เมื่อทำการสร้าง Polarization curve ที่พล็อตระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า (V) กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $\text{mA}/\text{m}^2$ ) (รูปที่ 40) และสร้าง Power density curve ที่พล็อตระหว่างความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ) กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $\text{mA}/\text{m}^2$ ) (รูปที่ 41) โดยต่อเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพกับความต้านทานภายนอก ซึ่งปรับค่าตั้งแต่ 900,000 ถึง 10  $\Omega$  เพื่อให้ได้ค่า OCV ซึ่งมาจากค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ เมื่อไม่ต่อกับความต้านทานภายนอก ค่า  $R_{int}$  ซึ่งได้จาก Slope ของ Polarization curve และค่า  $P_{max}$  ซึ่งได้จากจุดสูงสุดของ Power density curve ผลแสดงดังตารางที่ 4

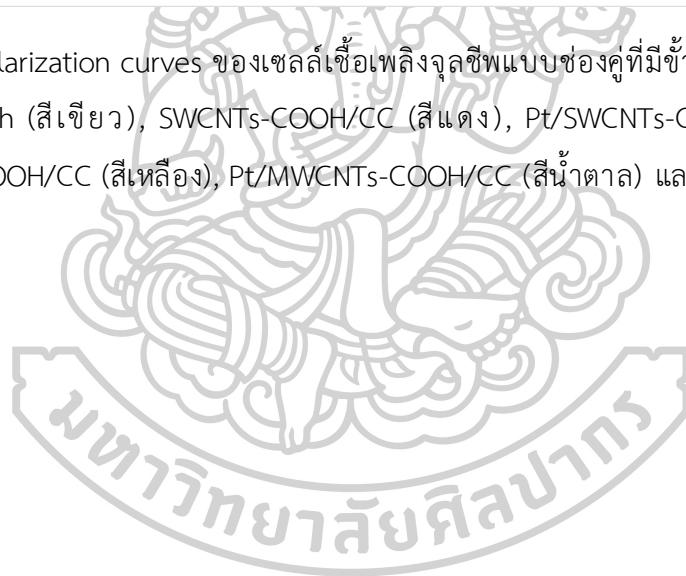
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด โดยมีน้ำเสียจากโรงอาหารเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้นมีค่า OCV สูงที่สุดคือ 0.6832 V และมีค่าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ขั้วแคโทดเป็น Commercial Pt/CC, MWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC และ Carbon cloth 19.33%, 21.89%, 24.46% และ 27.55% ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามค่า OCV จากขั้วแคโทด Pt/MWCNTs-COOH/CC นั้นน้อยกว่าขั้วแคโทด Pt/SWCNTs-COOH/CC 2.18% เมื่อพิจารณาค่า  $R_{int}$  ของ Commercial Pt/CC มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ  $6.4 \Omega \cdot m^2$  ค่า  $R_{int}$  ของ Pt/SWCNTs-COOH/CC, Pt/MWCNTs-COOH/CC, MWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC และ Carbon cloth มีค่าเท่ากับ 9.1, 9.2, 11.4, 11.8, และ 22.6  $\Omega \cdot m^2$  ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการเตรียมขั้วแคโทด มีการใช้สารละลาย Nafion ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (Binder) เพื่อให้ Pt/MWCNTs-COOH สามารถติดอยู่บน Carbon cloth ได้ เมื่อมีการใช้ตัวประสานจะทำให้มีสิ่งปนเปื้อน (Impurity) เข้าไปผสมอยู่ในขั้วไฟฟ้า ทำให้ส่งผลไปยังประสิทธิภาพของเคมีไฟฟ้า จึงส่งผลให้ความต้านทานภายในสูงขึ้น (H. Tang et al., 2004) สำหรับค่า  $P_{max}$  พบว่า เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด มีค่า 10,143.50 mW/m<sup>2</sup> ซึ่งสูงกว่า MWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC และ Carbon cloth คิดเป็น 46.29%, 47.66% และ 78.60% ตามลำดับ แต่มีค่าต่ำกว่า Commercial Pt/CC และ Pt/SWCNTs-COOH/CC คิดเป็น 10.66% และ 14.21% ตามลำดับ เนื่องมาจากการมีตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ปฏิกิริยาจึงเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลต่อค่า  $P_{max}$  ทำให้  $P_{max}$  มีค่ามาก

การประเมินประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด แสดงประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ดี โดยมีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อใช้ MWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC และ Carbon cloth เป็นขั้วแคโทด อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพที่ใกล้เคียงกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ Commercial Pt/CC และ Pt/SWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด นอกจากนี้ ค่า  $P_{max}$  ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทดที่เตรียมขึ้น มีค่าสูงกว่าค่าในงานวิจัยของคุณ Nimje และคณะ (Nimje et al., 2012) ที่ใช้ Carbon cloth ที่เคลือบด้วย PTFE เป็นขั้วแคโทดอยู่ 99.64% (36 mW/m<sup>2</sup>) งานวิจัยของ Liu และคณะ (Liu et al., 2004) ที่ใช้ Pt/C เป็นขั้วแคโทดอยู่ 97.74% (26 mW/m<sup>2</sup>) งานวิจัยของคุณ Ahn และ Logan (Ahn & Logan, 2010) ใช้ Pt บน Carbon cloth เป็นขั้วแคโทดอยู่ 95.84% (422 mW/m<sup>2</sup>) และงานวิจัยของคุณ Zhang และคณะ (J.-N. Zhang et al., 2011) ใช้ Pt-Fe บน Carbon powder ด้วยวิธี Aqueous reduction method เป็นขั้วแคโทดอยู่ 89.18% (1097.6±51.2 mW/m<sup>2</sup>) โดยงานวิจัยที่กล่าวมาใช้น้ำเสียจากชุมชน (Domestic wastewater) เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้นทั้งหมด ดังนั้น Pt/MWCNTs-COOH/CC ที่เตรียมขึ้น

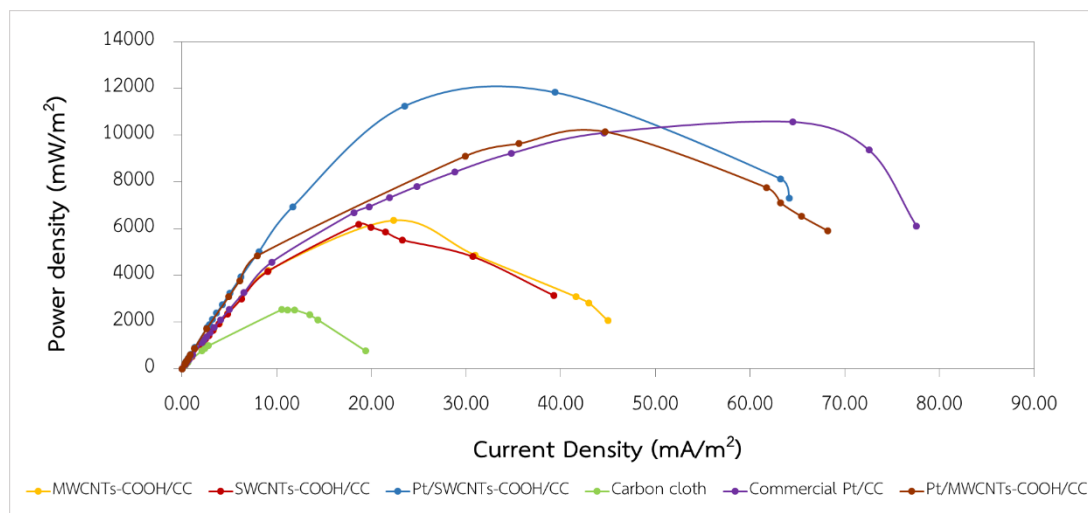
ด้วยวิธี DP สามารถนำมาใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทดแทน Commercial Pt/CC ได้



รูปที่ 40 Polarization curves ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง)







รูปที่ 41 Power density curves ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง)

ตารางที่ 4 ค่า OCV,  $R_{int}$  และ  $P_{max}$  ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด

Cathodes	OCV (V)	$R_{int}$ ( $\Omega \cdot m^2$ )	$P_{max}$ (mW/m <sup>2</sup> )
MWCNTs-COOH/CC	0.5455	11.4	6,351
Pt/MWCNTs-COOH/CC	0.6832	9.2	10,144
SWCNTs-COOH/CC	0.5276	11.8	6,188
Pt/SWCNTs-COOH/CC	0.6984	9.1	11,824
Carbon cloth	0.5060	22.6	2,530
Commercial Pt/CC	0.5634	6.4	10,563

#### 4.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้น้ำเสียจากโรงอาหารเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น

##### 4.3.1 ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD)

น้ำเสียเริ่มต้นที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ มีค่า COD เท่ากับ 668.0-711.1 mg O<sub>2</sub>/L เมื่อน้ำเสียผ่านในกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นเวลา 3-4 วัน พบว่าค่า

COD ที่ได้มีค่าลดลง โดยอยู่ในช่วง 100.6-186.8 mg O<sub>2</sub>/L โดยมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด (พ.ศ. 2539) ซึ่งอยู่ที่ 400 mg O<sub>2</sub>/L โดยค่า COD นั้นลดลงมากกว่า 75% ในทุกเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ซึ่งถือว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถบำบัดน้ำเสียได้ โดยค่า %COD removal แสดงดังตารางที่ 5 ค่า COD<sub>out</sub> ยังคงมีค่าที่ค่อนข้างสูง อาจเนื่องมาจากระยะเวลา 3-4 วันของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพอาจใช้เวลาไม่มากพอที่จะให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย นอกจากนี้แบคทีเรียที่อยู่ในน้ำเสียอาจจะมีปริมาณที่ใกล้เคียงกันในแต่ละเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ เนื่องจากน้ำเสียที่เข้ามาจากแหล่งเดียวกัน จึงอาจทำให้ค่า %COD removal มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5 ค่า COD<sub>in</sub>, COD<sub>out</sub> และ %COD removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด

Cathodes	COD <sub>in</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	COD <sub>out</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	%COD ± SD
MWCNTs-COOH/CC	668.0-711.1	165.2-186.8	75.0 ± 1.8
Pt/MWCNTs-COOH/CC		143.7-165.2	78.1 ± 1.8
SWCNTs-COOH/CC		100.6-122.1	83.3 ± 1.8
Pt/SWCNTs-COOH/CC		122.1-143.7	81.3 ± 1.8
Carbon cloth		165.2	76.0 ± 0.0
Commercial Pt/CC		122.1-143.7	80.2 ± 1.8

#### 4.3.2 ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (BOD)

น้ำเสียเริ่มต้นที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ มีค่า BOD เท่ากับ 184.8-241.7 mg O<sub>2</sub>/L เมื่อผ่านน้ำเสียในกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นเวลา 3-4 วันพบว่าค่า BOD ที่ได้มีค่าลดลง โดยอยู่ในช่วง 2.8-45.8 mg O<sub>2</sub>/L โดยมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด (พ.ศ. 2548) ซึ่งอยู่ที่ 200 mg O<sub>2</sub>/L โดยค่า BOD นั้นลดลงมากกว่า 78% ในทุกเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ค่า %BOD removal แสดงดังตารางที่ 6 ทั้งนี้อาจเนื่องจากมีเวลามากเพียงพอที่ให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย อีกทั้งอาจมีแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำเสียปริมาณที่ใกล้เคียงกันในแต่ละเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ จึงทำให้ค่า %BOD removal มีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับ %COD removal

ตารางที่ 6 ค่า BOD<sub>in</sub>, BOD<sub>out</sub> และ %BOD removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด

Cathodes	BOD <sub>in</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	BOD <sub>out</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	%BOD ± SD
MWCNTs-COOH/CC	184.8-241.7	17.3-31.6	88.5 ± 4.8
Pt/MWCNTs-COOH/CC		17.3-24.4	90.2 ± 2.4
SWCNTs-COOH/CC		24.4-17.1	90.3 ± 2.4
Pt/SWCNTs-COOH/CC		2.8-17.3	95.3 ± 4.8
Carbon cloth		31.6-46.1	81.8 ± 4.8
Commercial Pt/CC		45.9-45.8	78.5 ± 0.1

#### 4.3.3 ค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TDS และ TSS)

น้ำเสียเริ่มต้นที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีค่า TSS เท่ากับ 58.68-70.26 mg/L เมื่อน้ำเสียผ่านกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นเวลา 3-4 วันพบว่าค่า TSS ที่ได้มีค่าลดลง โดยอยู่ในช่วง 6.92-11.64 mg/L ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด (พ.ศ. 2548) ซึ่งอยู่ที่ 60 mg/L โดยค่า TSS นั้นลดลงมากกว่า 83% ในทุกเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ และค่า TDS ของน้ำเสียก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีค่าเท่ากับ 1,220-1,289 mg/L เมื่อน้ำเสียผ่านกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นเวลา 3-4 วันพบว่าค่า TSS ที่ได้มีค่ามากขึ้น โดยอยู่ในช่วง 1,456-2,316 mg/L โดยมีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด (พ.ศ. 2548) ซึ่งอยู่ที่ 500 mg/L ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากแบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ และสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำเสีย ทำให้มีขนาดเล็กลง (Mansoorian et al., 2013) โดยสารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กสามารถผ่านกระดาษกรองได้ ทำให้ค่า TDS เพิ่มมากขึ้น โดยค่า %TDS removal และ %TSS removal แสดงดังตารางที่ 7 และตารางที่ 8

จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณ TSS และ TDS ก่อนเข้ากระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีค่าน้อยมาก เนื่องมาจากก่อนน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพได้มีการกรองน้ำเสียด้วยผ้าขาวบาง 1 ครั้ง หลังจากผ่านกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพปริมาณ TSS จึงลดลง แต่ปริมาณ TDS เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำเสียย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นของแข็งให้มีขนาดเล็กลง และอาจมีของแข็งที่เกิดจาก Biofilm ที่ขั้วแอโนด หรือสะสมอยู่บนฝาปิด และเยื่อเลือกผ่าน ทำให้ค่า TDS มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 7 ค่า  $TSS_{in}$ ,  $TSS_{out}$  และ %TSS removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด

Cathodes	$TSS_{in}$ (mg/L)	$TSS_{out}$ (mg/L)	%TSS $\pm$ SD
MWCNTs-COOH/CC	58.68-70.26	7.69-11.54	85.1 $\pm$ 2.7
Pt/MWCNTs-COOH/CC		10.38-11.54	83.0 $\pm$ 0.8
SWCNTs-COOH/CC		8.46	86.9 $\pm$ 0.0
Pt/SWCNTs-COOH/CC		6.92-7.31	89.0 $\pm$ 0.3
Carbon cloth		8.85-11.15	84.5 $\pm$ 1.6
Commercial Pt/CC		8.08-10.00	86.0 $\pm$ 0.2

ตารางที่ 8 ค่า  $TDS_{in}$ ,  $TDS_{out}$  และ %TDS removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด

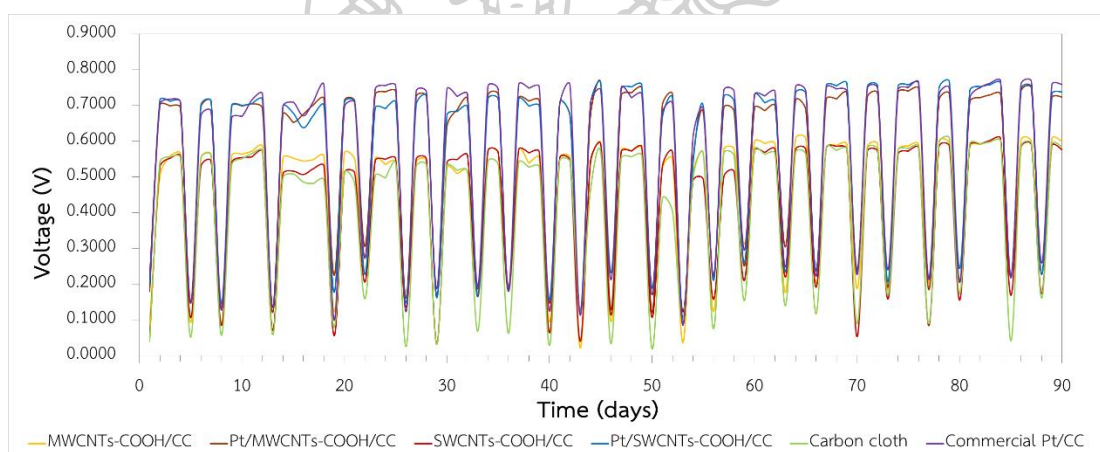
Cathodes	$TDS_{in}$ (mg/L)	$TDS_{out}$ (mg/L)	%TDS
MWCNTs-COOH/CC	1,220-1,289	1,949-1,969	-56.16
Pt/MWCNTs-COOH/CC		1,860-1,856	-48.10
SWCNTs-COOH/CC		2,013-2,071	-62.80
Pt/SWCNTs-COOH/CC		2,049-2,116	-65.99
Carbon cloth		1,456-1,487	-17.27
Commercial Pt/CC		2,291-2,316	-83.61

#### 4.4 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกันเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น

##### 4.4.1 ค่าศักย์ไฟฟ้า

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละวัน ทั้งหมด 90 วัน (ค่าศักย์ไฟฟ้าทั้ง 90 วันอยู่ที่ภาคผนวก) โดยใช้เครื่อง Data logger ต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่มีขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth, SWCNTs-COOH/CC, Pt/SWCNTs-COOH/CC, MWCNTs-COOH/CC, Pt/MWCNTs-COOH/CC และ Commercial Pt/CC ที่เตรียมขึ้น แสดงดังรูปที่ 42 จากผลการทดลองพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่

ตั้งแต่เริ่มต้นการ operate ทั้งนี้เนื่องมาจากได้ใช้ขั้วแอโนดและขั้วแคโทดขั้วเดิมของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้น้ำเสียจากโรงอาหารเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น โดยจะเห็นได้ว่าการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้นเนื่องจากเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียรอบใหม่ ทำให้แบคทีเรียมีการปรับตัวตามสารอาหารที่ได้รับ (Lag phase) โดยมีการกวนสารละลายตลอดเวลา เพื่อให้สารอาหารที่อยู่ในน้ำเสียเป็นเนื้อเดียวกันส่งผลให้แบคทีเรียปรับตัวเข้ากับสภาวะใหม่ได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่มี Pt/MWCNTs-COOH/CC ที่เตรียมขึ้นเป็นขั้วแคโทด มีค่าสูงสุดคือ 0.7081 V ซึ่งมากกว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของ Pt/SWCNTs-COOH/CC, Commercial Pt/CC, MWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC และ Carbon cloth เท่ากับ 0.7075 V, 0.7023 V, 0.5547 V, 0.5534 V และ 0.5454 V ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น 0.08%, 0.82%, 21.66%, 21.85%, และ 22.98% ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากการที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ปฏิกิริยาจึงเกิดได้เร็วขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพให้การเกิดปฏิกิริยา ORR เพิ่มขึ้น



**รูปที่ 42** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า (V) กับ เวลา (วัน) ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง)

#### 4.4.2 ค่า OCV, $R_{int}$ และ $P_{max}$

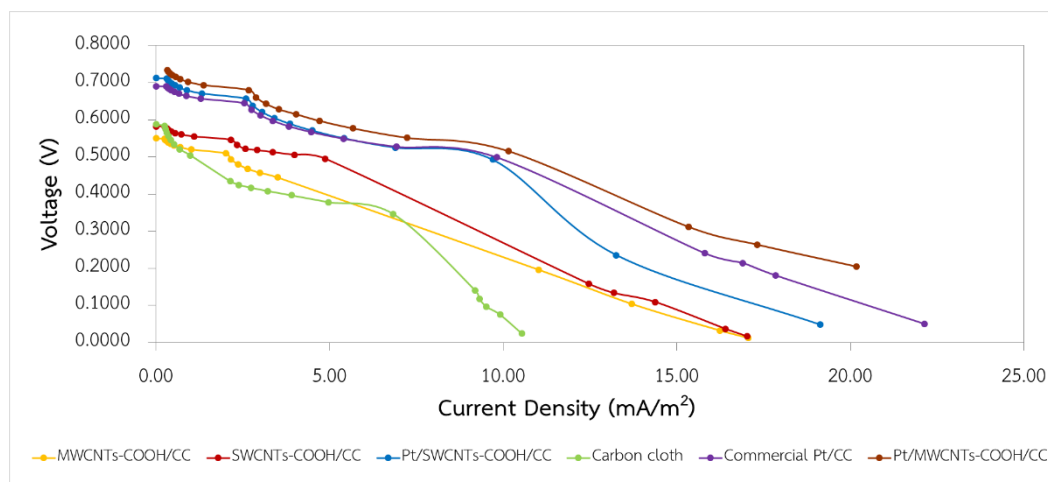
เมื่อทำการสร้าง Polarization curve ที่พล็อตระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า (V) กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $\text{mA}/\text{m}^2$ ) (รูปที่ 43) และสร้าง Power density curve ที่พล็อตระหว่างความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ) กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $\text{mA}/\text{m}^2$ ) (รูปที่ 44) โดยต่อเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพกับความต้านทานภายนอก ซึ่งปรับค่าตั้งแต่ 900,000 ถึง 10  $\Omega$  เพื่อให้ได้ค่า OCV ซึ่งมาจากค่า

ศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ เมื่อไม่ต่อกับความต้านทานภายนอก ค่า  $R_{int}$  ซึ่งได้จาก Slope ของ Polarization curve และค่า  $P_{max}$  ได้จากจุดสูงสุดของ Power density curve แสดงดังตารางที่ 9

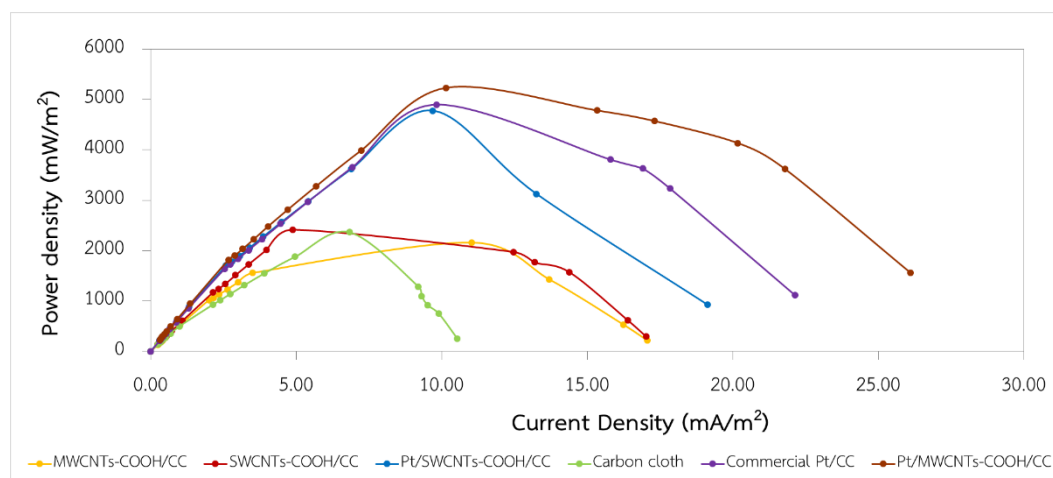
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด โดยมีน้ำเสียสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้นมีค่า OCV สูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 0.7351 V และมีค่าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดที่เป็น Pt/SWCNTs-COOH/CC, Commercial Pt/CC, Carbon cloth, SWCNTs-COOH/CC และ MWCNTs-COOH/CC 3.06%, 6.03%, 20.07%, 20.74% และ 25.13% ตามลำดับ โดยค่า  $R_{int}$  ของ Pt/MWCNTs-COOH/CC มีค่าน้อยที่สุด โดยเท่ากับ  $26.1 \Omega \cdot m^2$  และค่า  $R_{int}$  ของ Commercial Pt/CC, MWCNTs-COOH/CC, Pt/SWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC และ Carbon cloth มีค่าเท่ากับ 28.4, 32.1, 33.5, 34.1 และ  $48.2 \Omega \cdot m^2$  ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากในขั้นตอนการเตรียมขั้วแคโทด มีการใช้สารละลาย Nafion ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (Binder) เพื่อให้ Pt/MWCNTs-COOH สามารถติดอยู่บน Carbon cloth ได้ เมื่อมีการใช้ตัวประสานจะทำให้มีสิ่งปนเปื้อน (Impurity) เข้าไปผสมอยู่ในขั้วไฟฟ้า ทำให้ส่งผลไปยังประสิทธิภาพของเคมีไฟฟ้า จึงส่งผลให้ความต้านทานภายในสูงขึ้น (H. Tang et al., 2004) และขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทั้งที่เป็นขั้วแอโนดและขั้วแคโทดถูกใช้มาเป็นระยะเวลาอันนาน ทำให้ส่งผลต่อค่า  $R_{int}$  ที่สูงขึ้นสำหรับค่า  $P_{max}$  พบว่า เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทดมีค่า  $P_{max}$  สูงที่สุดเท่ากับ  $5,235.17 \text{ mW/m}^2$  และมีค่า  $P_{max}$  มากกว่าขั้วแคโทดที่เป็น Commercial Pt/CC, Pt/SWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC, Carbon cloth และ MWCNTs-COOH/CC 6.40%, 8.68%, 53.82%, 54.75% และ 58.68% ตามลำดับ เนื่องมาจากการมีตัวเร่งปฏิกิริยา โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ทำปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลต่อค่า  $P_{max}$  ทำให้  $P_{max}$  มีค่ามาก ซึ่งขั้วแคโทดที่ใช้เป็นขั้วแคโทดเดิม อาจทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ขั้วแคโทด Pt/SWCNTs-COOH หลุดออกไปมากกว่าขั้วแคโทด Pt/SWCNTs-COOH ส่วนขั้วแคโทด Commercial Pt/CC เกิดการกรอบเปราะและฉีกขาด เนื่องมาจากอายุการใช้งานที่นาน

การประเมินประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด แสดงประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ดี โดยมีประสิทธิภาพดีกว่าเมื่อใช้ Pt/SWCNTs-COOH/CC, Commercial-Pt/CC, MWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC และ Carbon cloth เป็นขั้วแคโทด นอกจากนี้ ค่า  $P_{max}$  ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทดที่เตรียมขึ้น โดยมีค่าสูงกว่างานวิจัยที่ใช้ น้ำเสียสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้นของคุณ Li และคณะ (B. Li et al., 2017) ที่เตรียม Pt<sub>7</sub>Sn<sub>3</sub>P/C ด้วยวิธี Chemical reduction เป็นขั้วแคโทดอยู่  $93.10\%$  ( $361 \pm 7.5 \text{ mW/m}^2$ ) งานวิจัยคุณ Zhang

และคณะ (Y. Zhang et al., 2011) ที่เตรียม  $\text{MnO}_2$  บน CNT ด้วยวิธี Hydrothermal method เป็นขั้วแคโทดอยู่ 95.99% ( $229 \text{ mW/m}^2$ ) และงานวิจัยคุณ Ghasemi และคณะ (Ghasemi et al., 2016) ได้เตรียม CNT/PPy ด้วยวิธี Chemical oxidation เป็นขั้วแคโทดอยู่ 97.84% ( $113 \text{ mW/m}^2$ ) ดังนั้น Pt/MWCNTs-COOH/CC ที่เตรียมขึ้นจากวิธี DP สามารถนำมาใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และทดแทน Commercial Pt/CC ได้



รูปที่ 43 Polarization curves ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง)



รูปที่ 44 Power density curves ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง)

ตารางที่ 9 ค่า OCV,  $R_{int}$  และ  $P_{max}$  ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด

Cathodes	OCV (V)	$R_{int}$ ( $\Omega \cdot m^2$ )	$P_{max}$ (mW/m <sup>2</sup> )
MWCNTs-COOH/CC	0.5504	32.1	2,163
Pt/MWCNTs-COOH/CC	0.7351	26.1	5,235
SWCNTs-COOH/CC	0.5826	34.1	2,418
Pt/SWCNTs-COOH/CC	0.7126	33.5	4,781
Carbon cloth	0.5875	48.2	2,369
Commercial Pt/CC	0.6907	28.4	4,900

4.5 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้นที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น

ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD)

น้ำเสียเริ่มต้นที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ มีค่า COD เท่ากับ 881.7 mg O<sub>2</sub>/L เมื่อน้ำเสียผ่านในกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นเวลา 3-4 วัน พบว่าค่า COD ที่ได้มีค่าลดลง โดยอยู่ในช่วง 87.7-276.1 mg O<sub>2</sub>/L โดยมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด (พ.ศ. 2539) ซึ่งอยู่ที่ 400 mg O<sub>2</sub>/L โดยค่า COD นั้นลดลงมากกว่า 69% ใน



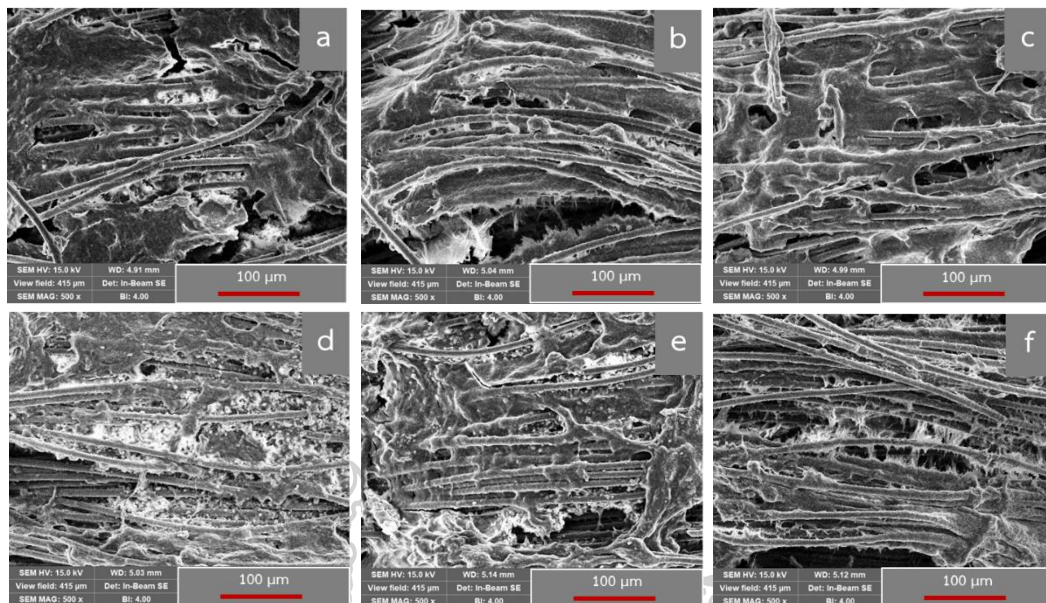
ทุกเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ค่า %COD removal แสดงดังตารางที่ 10 โดยค่า COD<sub>out</sub> ยังมีค่าที่ค่อนข้างสูง อาจเนื่องมาจากเวลา 3-4 วันของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพใช้เวลาไม่มากพอที่จะให้แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย นอกจากนี้แบคทีเรียอยู่ในน้ำเสียปริมาณที่ใกล้เคียงกันในแต่ละเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ เนื่องจากน้ำเสียที่เข้ามาจากแหล่งเดียวกัน จึงทำให้ค่า %COD removal มีค่าใกล้เคียงกัน

**ตารางที่ 10** ค่า COD<sub>in</sub>, COD<sub>out</sub> และ %COD removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด

Cathodes	COD <sub>in</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	COD <sub>out</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	%COD ± SD
MWCNTs-COOH/CC	881.7	220.8-231.9	74.5 ± 0.7
Pt/MWCNTs-COOH/CC		87.7-165.6	79.5 ± 1.5
SWCNTs-COOH/CC		231.9-276.1	71.2 ± 2.5
Pt/SWCNTs-COOH/CC		254.0-287.1	69.9 ± 2.2
Carbon cloth		265.0-276.1	69.5 ± 0.7
Commercial Pt/CC		209.8-231.9	75.4 ± 1.5

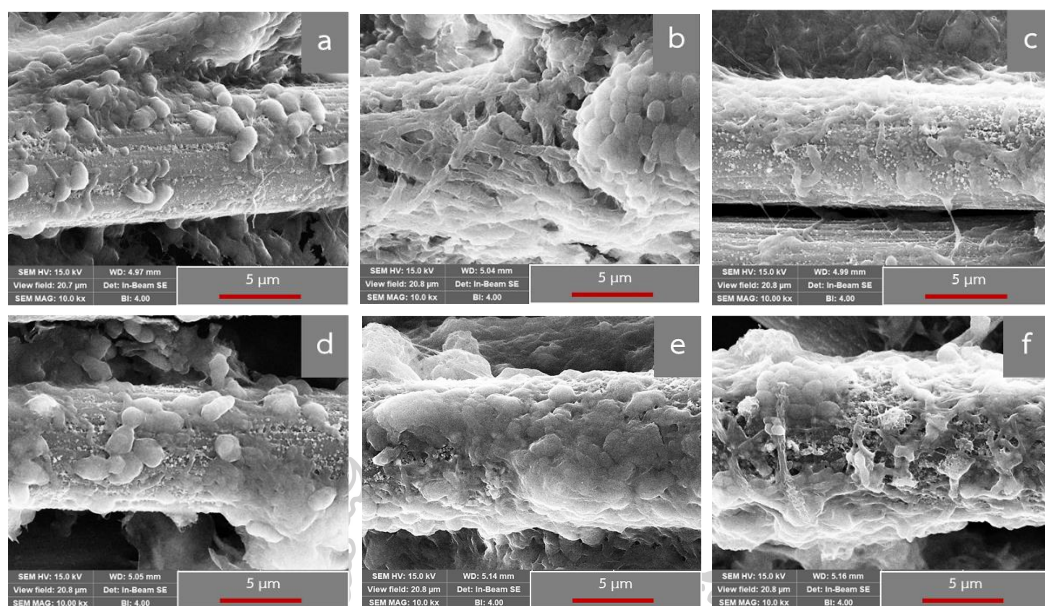
#### 4.6 ผลการประเมินประสิทธิภาพการยึดเกาะของ Biofilm บน Carbon cloth ที่ใช้เป็นขั้วแอโนดจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพด้วยเครื่อง FESEM

จากรูปที่ 45a-45f แสดงลักษณะพื้นผิวจาก เครื่อง FESEM ของ Carbon cloth ที่ถูกนำมาใช้เป็นขั้วแอโนด สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ในระยะเวลา 570 วัน พบแบคทีเรียเกาะอย่างหนาแน่นบนเส้นใยของ Carbon cloth จากรูปที่ 46a-46f ซึ่งเป็นรูป FESEM ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบแบคทีเรียรูปร่างทรงกลม และท่อน บ่งบอกถึงชนิดของแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายชนิด และแบคทีเรียสามารถยึดเกาะบน Carbon cloth ได้ดี มีการกระจายตัวของแบคทีเรียอยู่อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว จากภาพแสดงให้เห็นว่า Carbon cloth เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุขั้วแอโนด เนื่องจากแบคทีเรียสามารถเกาะบน Carbon cloth ได้ดี ทนทาน ไม่เป็นพิษต่อแบคทีเรีย



รูปที่ 45 FESEM images ที่กำลังขยาย 500 เท่า ของ Carbon cloth ที่นำมาใช้เป็นขั้วแอโนด สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดเป็น; a) MWCNTs-COOH/CC, b) Pt/MWCNTs-COOH/CC, c) SWCNTs-COOH/CC, d) Pt/SWCNTs-COOH/CC, e) Carbon cloth และ f) Commercial Pt/CC





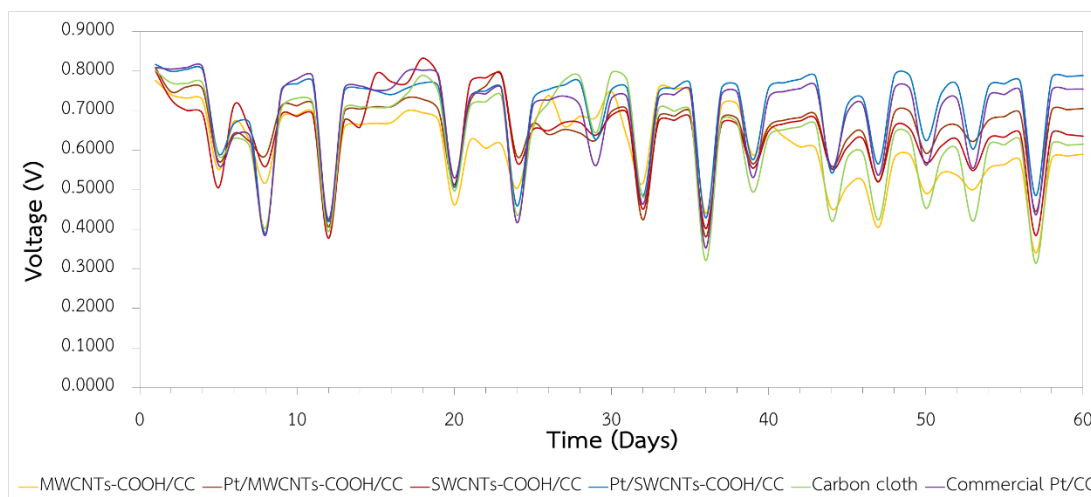
รูปที่ 46 FESEM images ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ของ Carbon cloth ที่นำมาใช้เป็นขั้วแอโนดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดเป็น; a) MWCNTs-COOH/CC, b) Pt/MWCNTs-COOH/CC, c) SWCNTs-COOH/CC, d) Pt/SWCNTs-COOH/CC, e) Carbon cloth และ f) Commercial Pt/CC

#### 4.7 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการกำจัดโลหะหนักของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้น

##### 4.7.1 ค่าศักย์ไฟฟ้า

ค่าศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละวันทั้งหมด 60 วัน (ค่าศักย์ไฟฟ้าทั้ง 60 วันอยู่ที่ภาคผนวก) โดยใช้เครื่อง Data logger ต่อกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่มีขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth, SWCNTs-COOH/CC, Pt/SWCNTs-COOH/CC, MWCNTs-COOH/CC, Pt/MWCNTs-COOH/CC และ Commercial Pt/CC แสดงดังรูปที่ 47 จากผลการทดลองพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าในวันแรกมีค่าสูงตั้งแต่เริ่มต้นการ Operate โดยขั้วแคโทด MWCNTs-COOH/CC, Pt/MWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC, Pt/SWCNTs-COOH/CC, Carbon cloth และ Commercial Pt/CC มีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.7768 V, 0.8084 V, 0.8011 V, 0.8172 V, 0.8018 V และ 0.8095 V ตามลำดับ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าในวันแรกมีค่าสูงตั้งแต่เริ่มต้นการ Operate อาจเนื่องมาจาก  $Ag^+$  สามารถเกิดปฏิกิริยารีดักชันเร็วที่ขั้วแคโทด จึงส่งผลให้  $Ag^+$  รั่วไหลเล็กน้อยได้ง่ายและทำให้ศักย์ไฟฟ้าสูง และจะเห็นได้ว่าการลดลงของค่าศักย์ไฟฟ้าเกิดขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนถ่ายน้ำเสียรอบใหม่

ทำให้แบคทีเรียมีการปรับตัวตามสารอาหารที่ได้รับ (Lag phase) โดยมีการกวนสารละลายตลอดเวลา เพื่อให้สารอาหารที่อยู่ในน้ำเสียเป็นเนื้อเดียวกันส่งผลให้แบคทีเรียปรับตัวเข้ากับสภาวะใหม่ได้ดีขึ้น



รูปที่ 47 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า (V) กับ เวลา (วัน) ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง)

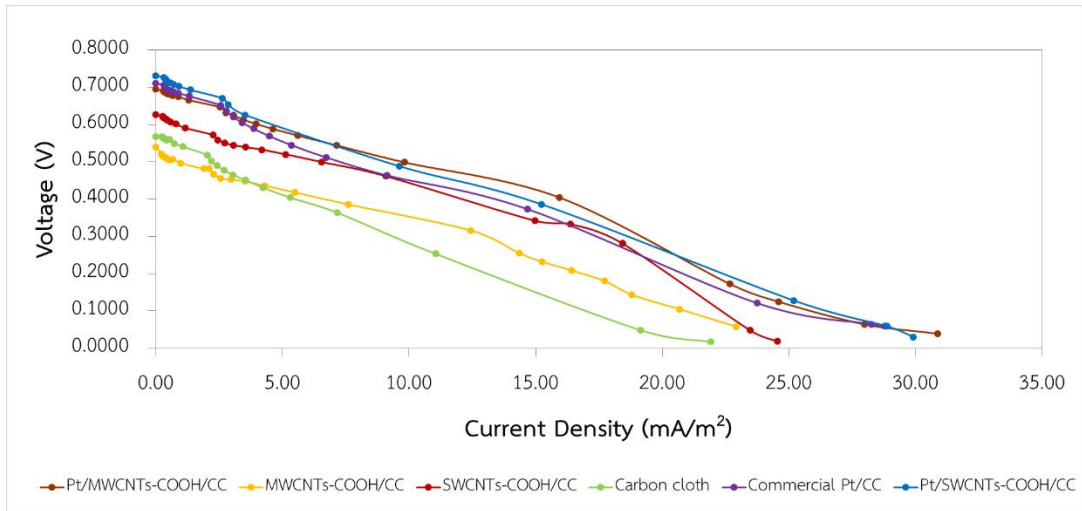
#### 4.7.2 ค่า OCV, $R_{int}$ และ $P_{max}$

เมื่อทำการสร้าง Polarization curve ที่พล็อตระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้า (V) กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $\text{mA}/\text{m}^2$ ) (รูปที่ 48) และสร้าง Power density curve ที่พล็อตระหว่างความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ) กับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ( $\text{mA}/\text{m}^2$ ) (รูปที่ 49) โดยต่อเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพกับความต้านทานภายนอก ซึ่งปรับค่าตั้งแต่ 900,000 ถึง 10  $\Omega$  เพื่อให้ได้ค่า OCV ซึ่งมาจากค่าศักย์ไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ เมื่อไม่ต่อกับความต้านทานภายนอก ค่า  $R_{int}$  ซึ่งมาจาก Slope ของ Polarization curve และค่า  $P_{max}$  ได้จากจุดสูงสุดของ Power density curve แสดงดังตารางที่ 11

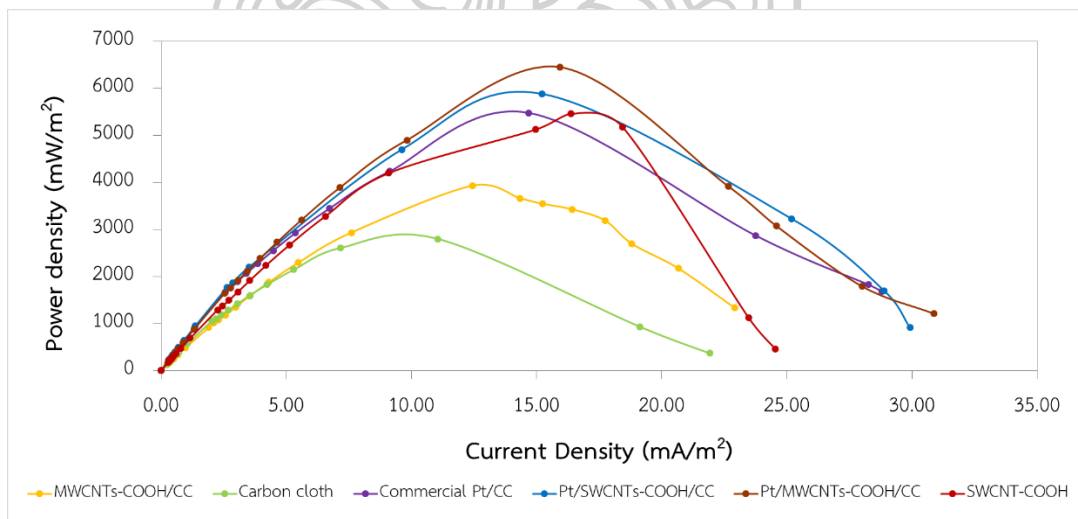
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด โดยมีน้ำเสียจากโรงอาหารเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้นมีค่า OCV เท่ากับ 0.6954 V และมีค่าสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดที่เป็น SWCNTs-COOH/CC, Carbon cloth และ MWCNTs-COOH/CC คิดเป็น 9.88%, 18.25% และ 22.35% ตามลำดับ แต่ยังมีค่าน้อยกว่า Commercial Pt/CC และ Pt/SWCNTs-COOH/CC คิดเป็น 2.08% และ 4.88% ตามลำดับ และโดยค่า  $R_{int}$  ของ MWCNTs-COOH/CC มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 19.5  $\Omega \cdot \text{m}^2$  และค่า  $R_{int}$  ของ

Pt/MWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC, Commercial Pt/CC, Pt/SWCNTs-COOH/CC, และ Carbon cloth มีค่าเท่ากับ 22.0, 22.0, 23.0, 23.3 และ 26.3  $\Omega \cdot m^2$  ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากในขั้นตอนการเตรียมขั้วแคโทด มีการใช้สารละลาย Nafion ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวประสาน (Binder) เพื่อให้ Pt/MWCNTs-COOH สามารถติดอยู่บน Carbon cloth ได้ เมื่อมีการใช้ตัวประสาน จะทำให้มีสิ่งปนเปื้อน (Impurity) เข้าไปผสมอยู่ในขั้วไฟฟ้า ทำให้ส่งผลไปยังประสิทธิภาพของเคมีไฟฟ้า จึงส่งผลให้ความต้านทานภายในสูงขึ้น (H. Tang et al., 2004) ทำให้ส่งผลต่อค่า  $R_{int}$  สำหรับค่า  $P_{max}$  พบว่า เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด มีค่า  $P_{max}$  สูงที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 6,448.11  $mW/m^2$  และมีค่า  $P_{max}$  มากกว่าขั้วแคโทดที่เป็น Pt/SWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC, Commercial Pt/CC, MWCNTs-COOH/CC และ Carbon cloth คิดเป็น 8.79%, 15.42%, %, 34.35%, 39.03% และ 56.61% ตามลำดับ เนื่องมาจากการมีตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องมาจากการมีตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา ORR โดยตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยลดพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation energy) ทำปฏิกิริยาเกิดได้เร็วขึ้น ส่งผลต่อค่า  $P_{max}$  ทำให้  $P_{max}$  มีค่ามาก

การประเมินประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด มีประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ดี โดยมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเมื่อใช้ Pt/SWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC, Commercial Pt/CC, MWCNTs-COOH/CC และ Carbon cloth เป็นขั้วแคโทด นอกจากนี้ ค่า  $P_{max}$  ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทดที่เตรียมขึ้นมีค่าสูงกว่าค่าจากงานวิจัยของคุณ Wang และ คณะ (Y.-H. Wang et al., 2013) ที่กำจัดโลหะ Ag จาก Ammonia chelated silver alkaline wastewater ที่ใช้ขั้วแคโทดเป็นแกรไฟต์ได้ 95.08% ( $P_{max}$  317  $mW/m^2$ ) งานวิจัยของคุณ Choi และ Cui (C. Choi & Cui, 2012) ที่กำจัดโลหะ Ag จากน้ำเสียได้ 34.09% ( $P_{max}$  4,250  $mW/m^2$ ) โดยใช้ Carbon cloth with gas diffusion layers เป็นขั้วแคโทด และงานวิจัยของคุณ Lim และคณะ (Lim et al., 2015) ได้กำจัดโลหะ Ag 70.07% ( $P_{max}$  1,930  $mW/m^2$ ) จากสารละลายแคโทไลต์ โดยใช้ Graphite felts เป็นขั้วแคโทด ดังนั้น Pt/MWCNTs-COOH/CC ที่เตรียมขึ้นจากวิธี DP สามารถนำมาใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 48 Polarization curves ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง)



รูปที่ 49 Power density curves ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ได้แก่ Carbon cloth (สีเขียว), SWCNTs-COOH/CC (สีแดง), Pt/SWCNTs-COOH/CC (สีน้ำเงิน), MWCNTs-COOH/CC (สีเหลือง), Pt/MWCNTs-COOH/CC (สีน้ำตาล) และ Commercial Pt/CC (สีม่วง)

ตารางที่ 11 ค่า OCV,  $R_{int}$  และ  $P_{max}$  ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด

Cathodes	OCV (V)	$R_{int}$ ( $\Omega \cdot m^2$ )	$P_{max}$ (mW/m <sup>2</sup> )
MWCNTs-COOH/CC	0.5400	19.5	3,931
Pt/MWCNTs-COOH/CC	0.6954	22.0	6,448
SWCNTs-COOH/CC	0.6267	22.0	5,454
Pt/SWCNTs-COOH/CC	0.7311	23.3	5,881
Carbon cloth	0.5685	26.3	2,798
Commercial Pt/CC	0.7102	23.0	4,233

4.8 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียในด้านการกำจัดโลหะหนักของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้น

#### 4.8.1 ค่าปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (COD)

น้ำเสียเริ่มต้นที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ มีค่า COD เท่ากับ 562.1-573.6 mg O<sub>2</sub>/L เมื่อน้ำเสียผ่านในกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นเวลา 3-4 วัน พบว่าค่า COD ที่ได้มีค่าลดลงอยู่ในช่วง 56.2-98.4 mg O<sub>2</sub>/L โดยมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด (พ.ศ. 2539) ซึ่งอยู่ที่ 400 mg O<sub>2</sub>/L โดยค่า COD นั้นลดลงมากกว่า 82% ในทุกเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ค่า %COD removal แสดงดังตาราง 12 ค่า COD<sub>out</sub> ยังมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ อาจเนื่องมาจากเวลาของกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเพียงพอที่จะทำให้แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสีย นอกจากนี้แบคทีเรียที่อยู่ในน้ำเสียมีปริมาณที่ใกล้เคียงกันในแต่ละเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ อาจเนื่องจากน้ำเสียที่ใช้มาจากแหล่งเดียวกัน จึงทำให้ค่า %COD removal มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 12 ค่า COD<sub>in</sub>, COD<sub>out</sub> และ %COD removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด

Cathodes	COD <sub>in</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	COD <sub>out</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	%COD ± SD
MWCNTs-COOH/CC	562.1-573.6	66.8-87.9	86.4 ± 1.9
Pt/MWCNTs-COOH/CC		66.8-77.3	87.0 ± 1.1
SWCNTs-COOH/CC		98.4	82.7 ± 0.0
Pt/SWCNTs-COOH/CC		77.3-98.4	84.0 ± 2.1
Carbon cloth		66.8-87.9	86.4 ± 1.9
Commercial Pt/CC		56.2-98.4	86.4 ± 3.7

#### 4.8.2 ค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลชีพใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ (BOD)

น้ำเสียเริ่มต้นที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ มีค่า BOD เท่ากับ 254.1-308.8 mg O<sub>2</sub>/L เมื่อผ่านน้ำเสียในกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นเวลา 3-4 วันพบว่าค่า BOD ที่ได้มีค่าลดลง โดยอยู่ในช่วง 0-29.9 mg O<sub>2</sub>/L โดยมีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด (พ.ศ. 2548) ที่ 200 mg O<sub>2</sub>/L โดยค่า BOD นั้นลดลงมากกว่า 91% ในทุกเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ ค่า %BOD removal แสดงดังตารางที่ 13 ทั้งนี้อาจเนื่องจากมีเวลามากเพียงพอเพื่อให้แบคทีเรียสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย อีกทั้งอาจมีแบคทีเรียอยู่ในปริมาณที่ใกล้เคียงกันในแต่ละเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ จึงทำให้ค่า %BOD removal มีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับ %COD removal

ตารางที่ 13 ค่า BOD<sub>in</sub>, BOD<sub>out</sub> และ %COD removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด

Cathodes	BOD <sub>in</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	BOD <sub>out</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	%BOD ± SD
MWCNTs-COOH/CC	254.1-308.8	19.9-29.9	91.2 ± 2.5
Pt/MWCNTs-COOH/CC		5.0-10.0	97.4 ± 1.2
SWCNTs-COOH/CC		10.0-19.9	94.7 ± 2.5
Pt/SWCNTs-COOH/CC		0.0-19.9	96.5 ± 5.0
Carbon cloth		15.0	94.7 ± 0.0
Commercial Pt/CC		10.0	96.5 ± 0.0



#### 4.8.3 ค่าปริมาณของแข็งละลายน้ำทั้งหมด และค่าปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (TDS และ TSS)

น้ำเสียเริ่มต้นที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีค่า TSS เท่ากับ 86.0-106.0 mg/L เมื่อน้ำเสียผ่านกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นเวลา 3-4 วันพบว่าค่า TSS ที่ได้มีค่าลดลง โดยอยู่ในช่วง 17.0-35.0 mg/L โดยมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด (พ.ศ. 2548) ที่ 60 mg/L โดยค่า TSS นั้นลดลงมากกว่า 65% ในทุกเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ และค่า TDS ของน้ำเสียก่อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีค่าเท่ากับ 1,280-1,373 mg/L เมื่อน้ำเสียผ่านกระบวนการของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเป็นเวลา 3-4 วันพบว่าค่า TSS ที่ได้มีค่ามากขึ้น โดยอยู่ในช่วง 1,307-1,676 mg/L โดยมีค่าสูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งตามที่กรมควบคุมมลพิษกำหนด (พ.ศ. 2548) ซึ่งอยู่ที่ 500 mg/L ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ และสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำเสีย ทำให้มีขนาดเล็กลง (Mansoorian et al., 2013) โดยสารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กสามารถผ่านกระดาษกรองแก้วได้ ทำให้ค่า TDS เพิ่มมากขึ้น โดยค่า %TDS removal และ %TSS removal แสดงดังตารางที่ 14 และตารางที่ 15

จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณ TSS และ TDS ก่อนเข้ากระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมีค่าน้อยมาก เนื่องจากก่อนน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพได้มีการกรองน้ำเสียด้วยผ้าขาวบาง 1 ครั้ง หลังจากผ่านกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพปริมาณ TSS จึงลดลง แต่ปริมาณ TDS เพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำเสียย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นของแข็งให้มีขนาดเล็กลง และอาจมีของแข็งที่เกิดจาก Biofilm ที่ชีวแอโนด หรือสะสมอยู่บนฝาปิด และเยื่อเลือกผ่าน ทำให้ค่า TDS มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 14 ค่า  $TSS_{in}$ ,  $TSS_{out}$  และ %TSS removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ชีวแคโทดต่างกัน 6 ชนิด

Cathodes	$TSS_{in}$ (mg/L)	$TSS_{out}$ (mg/L)	%TSS $\pm$ SD
MWCNTs-COOH/CC	86.0-106.0	17.0-34.0	73.4 $\pm$ 2.2
Pt/MWCNTs-COOH/CC		29.0-32.0	68.2 $\pm$ 2.2
SWCNTs-COOH/CC		24.0-29.0	72.4 $\pm$ 3.7
Pt/SWCNTs-COOH/CC		26.0-28.0	71.9 $\pm$ 1.5
Carbon cloth		32.0-35.0	65.1 $\pm$ 2.2
Commercial Pt/CC		21.0-24.0	76.6 $\pm$ 2.2

ตารางที่ 15 ค่า  $TDS_{in}$ ,  $TDS_{out}$  และ %TDS removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด

Cathodes	$TDS_{in}$ (mg/L)	$TDS_{out}$ (mg/L)	%TDS
MWCNTs-COOH/CC	1,280-1,373	1,644-1,569	-21.11
Pt/MWCNTs-COOH/CC		1,244-1,644	-8.88
SWCNTs-COOH/CC		1,511-1,542	-15.08
Pt/SWCNTs-COOH/CC		1,378-1,676	-15.08
Carbon cloth		1,578-1,613	-20.27
Commercial Pt/CC		1,307-1,613	-10.05

#### 4.9 ผลการประเมินการกำจัดโลหะหนักของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้น

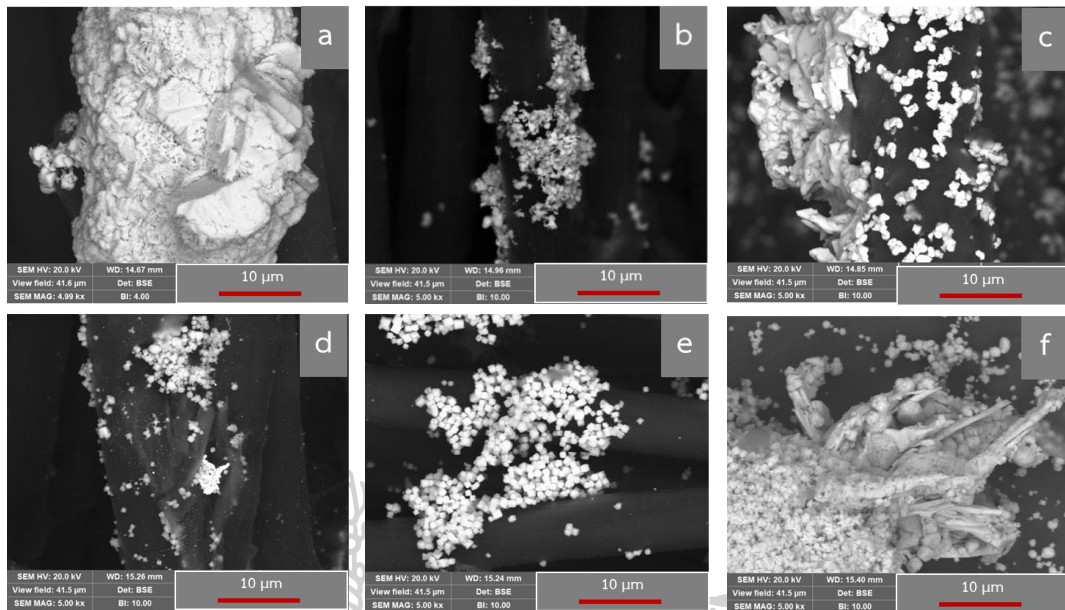
จากการทดลองที่ใช้  $Ag^+$  ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนตัวสุดท้ายในช่องแคโทดเพื่อกลายเป็นโลหะ  $Ag_{(s)}$  โดยใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ขั้ว ในการวิเคราะห์ FESEM (รูปที่ 50 และ 51) จะเห็นว่าผลึกที่เกิดขึ้นมี 2 ชนิด ซึ่งคาดว่าจะจะเป็น  $AgCl_{(s)}$  และ  $Ag_{(s)}$  โดยผลึกส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้น น่าจะเป็น  $AgCl_{(s)}$  โดยมีลักษณะของผลึกเหมือนในงานวิจัยของคุณ Polk และคณะ (Polk et al., 2006) และเมื่อวิเคราะห์ด้วย FESEM-EDX ของขั้วแคโทดทั้ง 6 ขั้ว จะพบพีคของ  $Ag_{(s)}$  (รูปที่ 52a-57a) โดยไม่มีพีคของ Cl แสดงให้เห็นถึง Ag ที่เป็นโลหะที่เกิดขึ้นบนผิวของขั้วแคโทด และพีคของ Ag และ Cl (รูปที่ 52b-57b) แสดงให้เห็นถึงผลึกของ  $AgCl_{(s)}$  ที่เกิดขึ้น โดยปกติแล้วปฏิกิริยาการเกิด  $AgCl_{(s)}$  (สมการที่ 4.3) จะประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อยๆ 2 ปฏิกิริยาได้แก่  $AgCl_{(s)}$  ไปได้รับ  $e^-$  แล้วเกิดเป็น  $Ag_{(s)}$  และ  $Cl_{(aq)}$  (สมการที่ 4.4) และ  $Ag^+_{(aq)}$  ไปได้รับ  $e^-$  และเกิดเป็น  $Ag_{(s)}$  (สมการที่ 4.5) กลไกที่เกิดภายในช่องแคโทดสามารถอธิบายได้ 2 กลไก โดยกลไกที่ 1 คือ  $Ag^+$  ไปได้รับ  $e^-$  ที่ขั้วแคโทดแล้วทำให้เกิดเป็นโลหะ  $Ag_{(s)}$  (สมการที่ 4.5) เกาะอยู่บนขั้ว จากนั้นโลหะ  $Ag_{(s)}$  สามารถสูญเสียอิเล็กตรอน แล้วกลายเป็น  $Ag^+$  จากนั้น  $Ag^+$  ที่เกิดขึ้นจะไปเกิดปฏิกิริยากับ  $Cl^-$  ที่แพร่ผ่าน Membrane จากน้ำเสียในช่องแอโนดมายังช่องแคโทด กลายเป็น  $AgCl_{(s)}$  โดย  $AgCl_{(s)}$  เกาะอยู่บนผิวของโลหะ  $Ag_{(s)}$  ที่อยู่บนผิวขั้วและกลไกที่ 2 คือ  $Ag^+$  ที่อยู่ในช่องแคโทดไปทำปฏิกิริยากับ  $Cl^-$  ที่แพร่มาจากน้ำเสียในช่องแอโนดกลายเป็น  $AgCl_{(s)}$  จากนั้น  $AgCl_{(s)}$  ไป Growth บนขั้วแคโทด แล้ว  $AgCl_{(s)}$  สามารถรับ  $e^-$  จากขั้วแคโทด ทำให้กลายเป็น  $Ag_{(s)}$  และ  $Cl^-$  (สมการที่ 4.4) โดยกลไกที่คาดว่าจะมีโอกาสดังกล่าวมากกว่าคือกลไกที่ 2 เนื่องจากปริมาณ  $Cl^-$  ในน้ำเสียจากโรงอาหารมีปริมาณมาก ทำให้  $Cl^-$  แพร่จากช่องแอโนดผ่าน membrane ไปยังช่องแคโทด จึงทำให้  $Cl^-$  เกิดปฏิกิริยากับ  $Ag^+$  ได้ อีกทั้งพื้นที่ที่เกิดปฏิกิริยา  $AgCl_{(s)}$  สามารถเกิดได้ทั่วทั้ง

สารละลายที่อยู่ในช่องแคโทด แต่การที่  $\text{Ag}^+$  จะไปรับ  $e^-$  นั้น  $\text{Ag}^+$  จะต้องเคลื่อนที่ไปรับ  $e^-$  ที่ผิวขั้วแคโทดเท่านั้น และจากรูป FESEM (รูปที่ 50) จะเห็นว่าผลึกของ  $\text{AgCl}_{(s)}$  และ  $\text{Ag}_{(s)}$  จะแยกออกจากกัน โดยที่ผลึก  $\text{AgCl}_{(s)}$  ส่วนใหญ่ไม่เกาะอยู่บนผิวของโลหะ  $\text{Ag}_{(s)}$  (Atkins & De Paula, 2005) และเมื่อนำสารละลายฝั่งแคโทดไปวิเคราะห์ด้วย ICP-OES เพื่อหาปริมาณ  $\text{Ag}^+$  ที่เหลืออยู่หลังจากผ่านกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ 60 วัน ผลการทดลองจะพบว่า  $\text{Ag}^+$  ถูกกำจัดไปมากกว่า 99% โดย  $\text{Ag}^+$  จะเกิดปฏิกิริยาแล้วเกิดเป็น  $\text{Ag}_{(s)}$  และ  $\text{AgCl}_{(s)}$  (ตารางที่ 16)

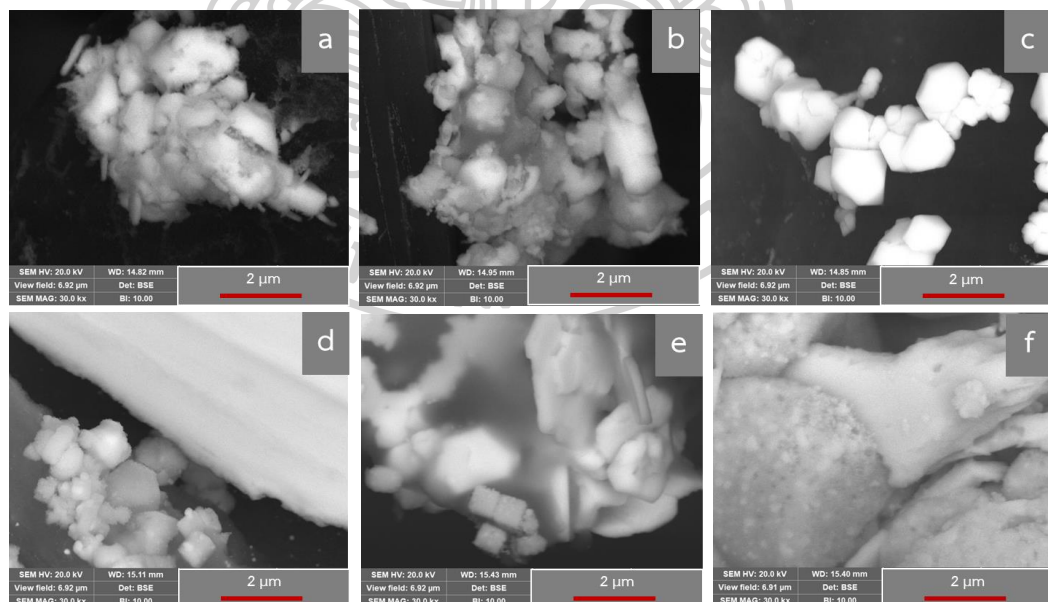
บริเวณใกล้ Membrane ในช่องแคโทดพบว่ามึตะกอนสีดำเกิดขึ้นในทุกๆ รีแอคเตอร์ (รูปที่ 58a และ 58b) เมื่อนำตะกอนไปวิเคราะห์ด้วย FESEM พบว่าตะกอนประกอบไปด้วยผลึก  $\text{AgCl}_{(s)}$  และ  $\text{Ag}_{(s)}$  ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นผลึก  $\text{AgCl}_{(s)}$  (รูปที่ 59a-59c) และยืนยันด้วยผลจาก FESEM-EDX จะเห็นพีคของ Ag และ Cl (รูปที่ 60a) แสดงถึงผลึกของ  $\text{AgCl}_{(s)}$  ที่เกิดขึ้น และผลึก  $\text{Ag}_{(s)}$  (รูปที่ 60b) แสดงถึงผลึก  $\text{Ag}_{(s)}$  ที่เกิดขึ้น



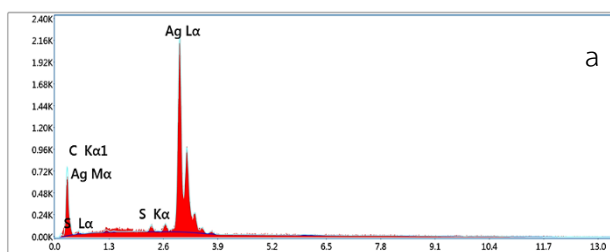
ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ขั้วต่างกัน 6 ชนิด สามารถกำจัดโลหะ Ag ได้ แต่สามารถกำจัดได้ในปริมาณไม่มาก เนื่องจากการรบกวนจาก  $\text{Cl}^-$  ที่มาจากน้ำเสียโรงอาหารที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับ  $\text{Ag}^+$  แล้วเกิดการตกตะกอนเป็น  $\text{AgCl}_{(s)}$  โดยในการแก้ปัญหาในการทดลองนี้คือ จะต้องมีการ Pre-treatment น้ำเสียเพื่อที่จะกำจัด  $\text{Cl}^-$  ออกจากน้ำเสียก่อนและในงานวิจัยก่อนหน้าของคุณ Choi และ Cui (C. Choi & Cui, 2012) และงานวิจัยของคุณ Lim และคณะ (Lim et al., 2015) ในการกำจัดโลหะเงินโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพ จะใช้น้ำเสียสังเคราะห์ในช่องแอโนดซึ่งช่วยในการควบคุมปริมาณไอออนที่มารบกวนได้ และนอกจากนี้มีการเติม  $\text{NaClO}_4$  ที่ใช้เป็น Supporting electrolyte เพื่อช่วยในการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้  $\text{Ag}^+$  สามารถรับ  $e^-$  และเกิดเป็นโลหะ  $\text{Ag}_{(s)}$  ได้ดีขึ้น



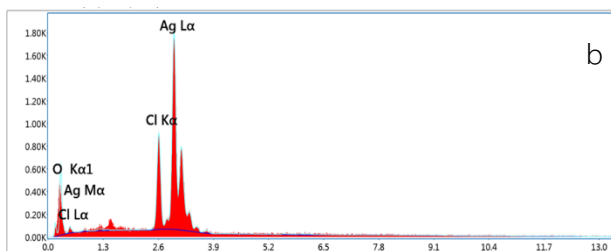
รูปที่ 50 FESEM images ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า ของขั้วแคโทดที่มี Ag เกาะอยู่บนขั้ว โดยมีขั้วแคโทดที่แตกต่างกัน: a) Carbon cloth, b) MWCNTs-COOH/CC, c) Pt/MWCNTs-COOH/CC, d) SWCNTs-COOH/CC, e) Pt/SWCNTs-COOH/CC และ f) Commercial Pt/CC



รูปที่ 51 FESEM images ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า ของขั้วแคโทดที่มี Ag เกาะอยู่บนขั้ว โดยมีขั้วแคโทดที่แตกต่างกัน: a) Carbon cloth, b) MWCNTs-COOH/CC, c) Pt/MWCNTs-COOH/CC, d) SWCNTs-COOH/CC, e) Pt/SWCNTs-COOH/CC และ f) Commercial Pt/CC

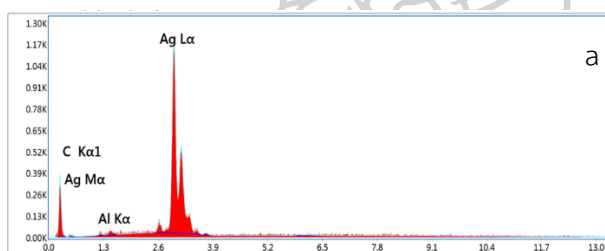


Element	Weight %	Atomic %
C K	9.41	47.47
S K	1.22	2.30
Ag L	89.38	50.23

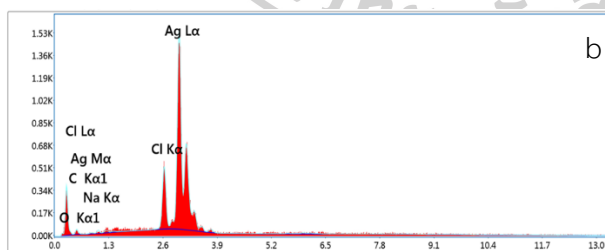


Element	Weight %	Atomic %
O K	4.34	18.78
Cl K	15.10	29.50
Ag L	80.56	51.72

รูปที่ 52 FESEM-EDX spectra ของ MWCNTs-COOH/CC ที่ใช้เป็นขั้วแคโทด: a) ผลึก Ag และ b) ผลึกโลหะ AgCl

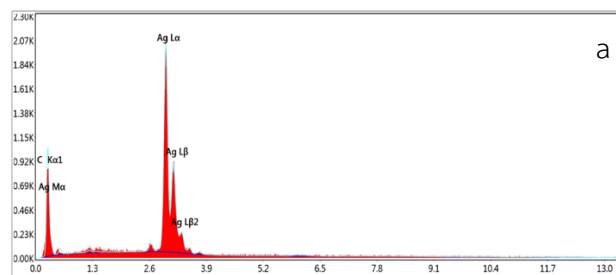


Element	Weight %	Atomic %
C K	11.76	53.41
Al K	1.29	2.61
Ag L	86.95	43.98

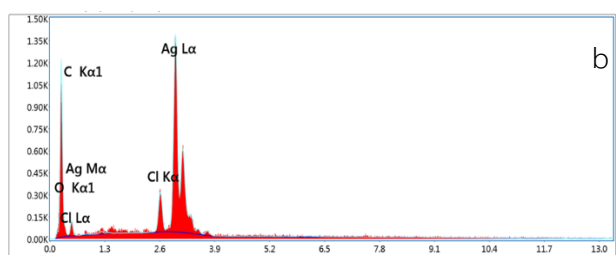


Element	Weight %	Atomic %
C K	14.78	51.62
O K	3.16	8.27
Na K	0.92	1.69
Cl K	8.65	10.23
Ag L	72.50	28.19

รูปที่ 53 FESEM-EDX spectra ของ Pt/MWCNTs-COOH/CC ที่ใช้เป็นขั้วแคโทด: a) ผลึก Ag และ b) ผลึกโลหะ AgCl

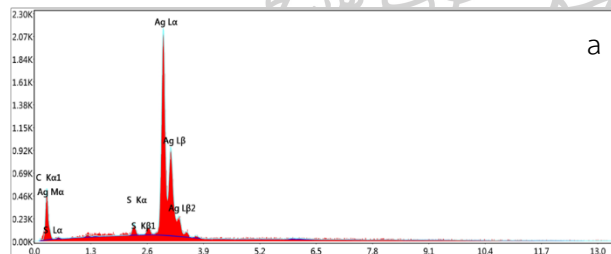


Element	Weight %	Atomic %
C K	14.81	60.96
Ag L	85.19	39.04

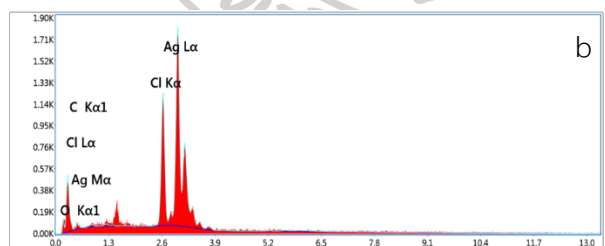


Element	Weight %	Atomic %
C K	31.27	70.18
O K	7.35	12.38
Cl K	4.13	3.14
Ag L	57.25	14.30

รูปที่ 54 FESEM-EDX spectra ของ SWCNTs-COOH/CC ที่ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า: a) ผลึก Ag และ b) ผลึกโลหะ AgCl

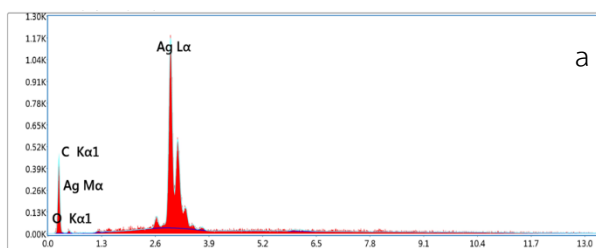


Element	Weight %	Atomic %
C K	7.01	39.19
S K	2.01	4.21
Ag L	90.97	56.60

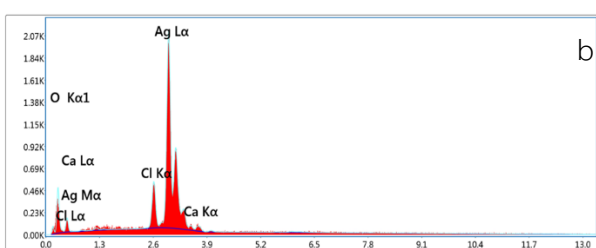


Element	Weight %	Atomic %
C K	16.03	51.05
O K	3.61	8.62
Cl K	16.34	17.63
Ag L	64.03	22.70

รูปที่ 55 FESEM-EDX spectra ของ Pt/SWCNTs-COOH/CC ที่ใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า: a) ผลึก Ag และ b) ผลึกโลหะ AgCl

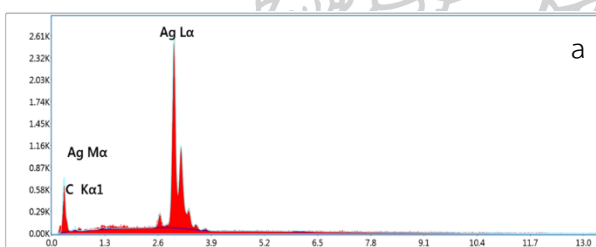


Element	Weight %	Atomic %
C K	14.19	56.04
O K	2.47	7.32
Ag L	83.34	36.65

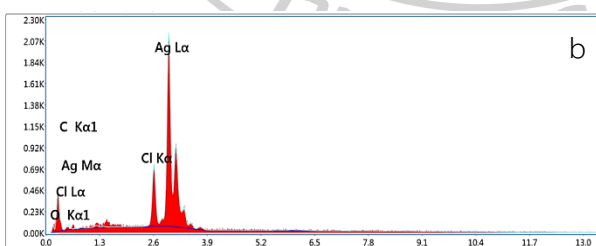


Element	Weight %	Atomic %
O K	10.45	39.83
Cl K	6.92	11.91
Ag L	81.02	45.81
Ca K	1.61	2.44

รูปที่ 56 FESEM-EDX spectra ของ Carbon cloth ที่ใช้เป็นขั้วแคโทด: a) ผลึก Ag และ b) ผลึกโลหะ AgCl

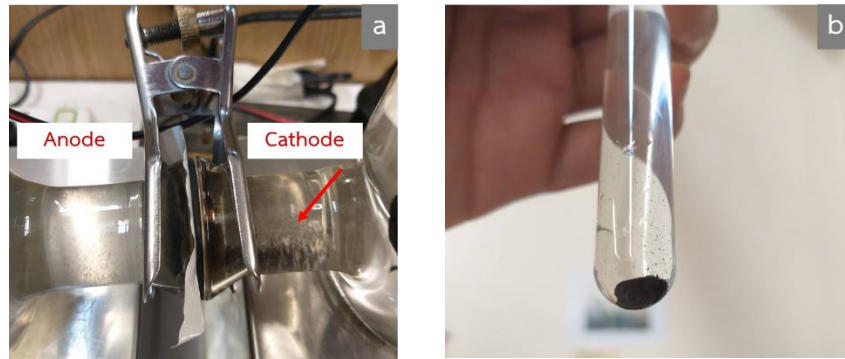


Element	Weight %	Atomic %
C K	6.04	36.59
Ag L	93.96	63.41

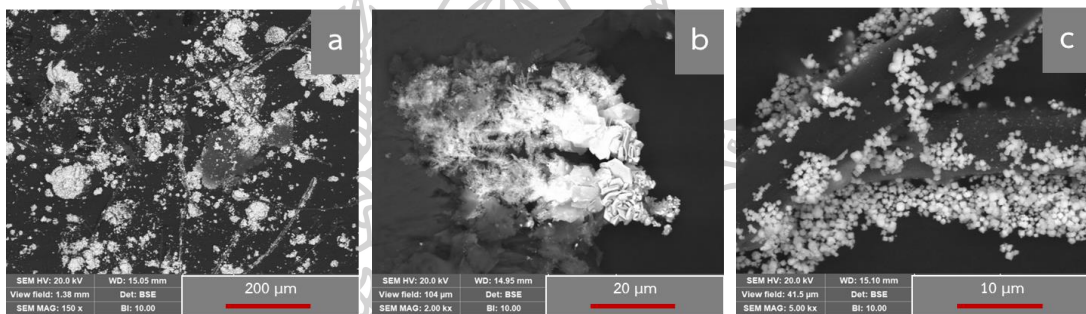


Element	Weight %	Atomic %
C K	7.04	33.47
O K	2.28	8.15
Cl K	9.57	15.42
Ag L	81.11	42.95

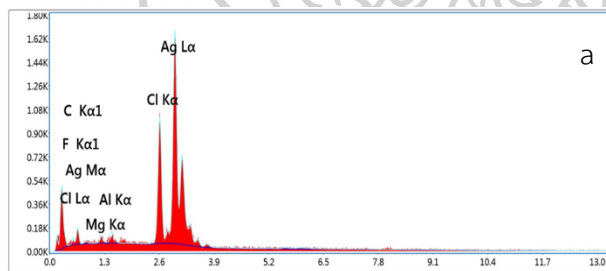
รูปที่ 57 FESEM-EDX spectra ของ Commercial Pt/CC ที่ใช้เป็นขั้วแคโทด: a) ผลึก Ag และ b) ผลึกโลหะ AgCl



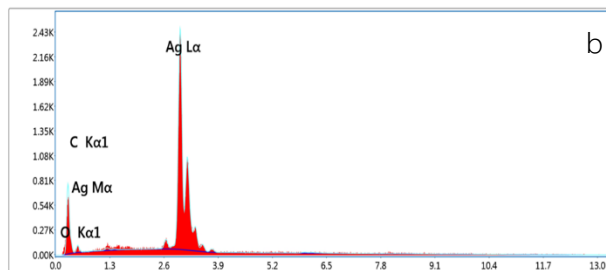
รูปที่ 58 ตัวอย่างของตะกอนที่เกิดขึ้นในช่องแคโทดของ MWCNTs-COOH/CC



รูปที่ 59 FESEM images ของตัวอย่างตะกอนในช่องแคโทดของ MWCNTs-COOH/CC: a) ที่กำลังขยาย 150 เท่า b) ที่กำลังขยาย 2,000 เท่า และ c) ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



Element	Weight %	Atomic %
C K	13.82	45.10
F K	6.07	12.53
Mg K	0.81	1.31
Al K	1.38	2.01
Cl K	14.46	15.99
Ag L	63.45	23.06



Element	Weight %	Atomic %
C K	8.07	37.29
O K	5.21	18.09
Ag L	86.72	44.63

รูปที่ 60 FESEM-EDX spectra ของตะกอนที่เกิดขึ้นในช่องแคโทด: a) ผลึก AgCl และ b) ผลึกโลหะ Ag

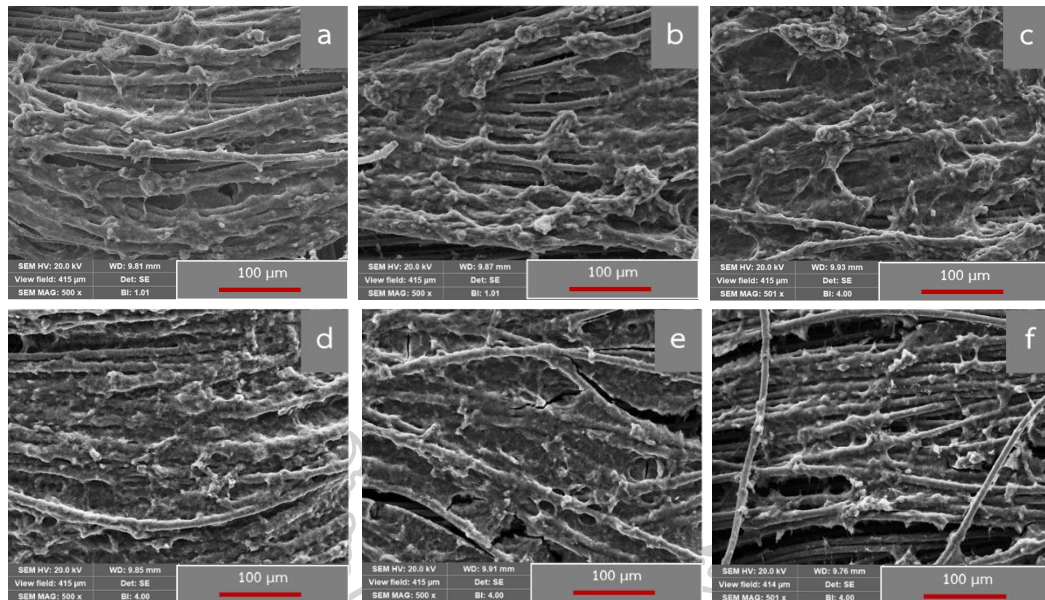


ตารางที่ 16 ค่า % Ag removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดต่างกัน 6 ชนิด

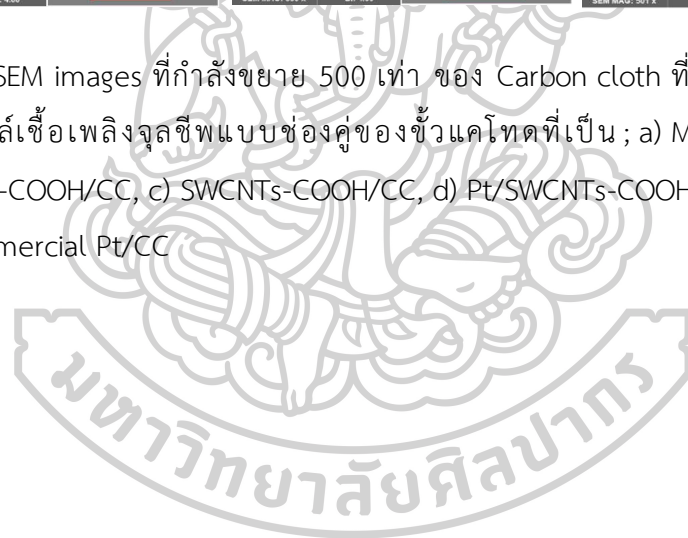
Cathodes	% Ag removal
MWCNTs-COOH/CC	99.95
Pt/MWCNTs-COOH/CC	99.98
SWCNTs-COOH/CC	99.76
Pt/SWCNTs-COOH/CC	99.93
Carbon cloth	99.81
Commercial Pt/CC	99.71

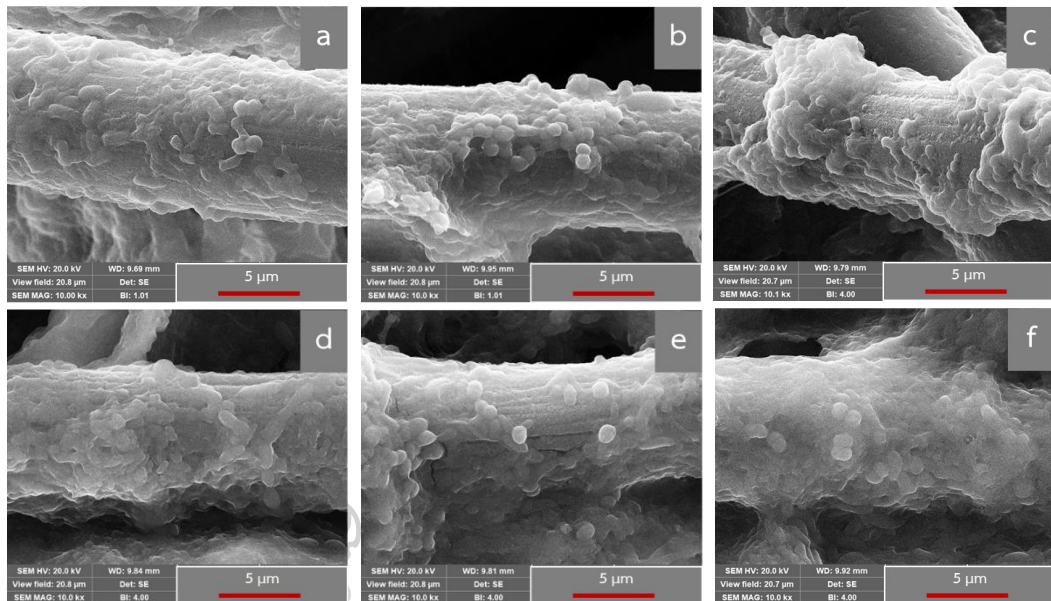
#### 4.10 ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการยึดเกาะของ Biofilm บน Carbon cloth ที่ใช้เป็นขั้วแอโนดเพื่อกำจัดโลหะหนักจากเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพด้วยเครื่อง FESEM

จากรูปที่ 61a-61f แสดงลักษณะพื้นผิวของ Carbon cloth ที่ถูกนำมาใช้เป็นขั้วแอโนดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่เตรียมขึ้น โดยใช้เครื่อง FESEM ผลการทดลองพบแบคทีเรียเกาะอย่างหนาแน่นบนเส้นใยของ Carbon cloth จากรูปที่ 62a-62f พบแบคทีเรียรูปร่างทรงกลมและท่อน บ่งบอกถึงชนิดของแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำเสียนั้นมีอยู่หลายชนิด แบคทีเรียสามารถยึดเกาะบน Carbon cloth ได้ดี และมีการกระจายตัวของแบคทีเรียอยู่อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว จากภาพแสดงให้เห็นว่า Carbon cloth เหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุของขั้วแอโนด เนื่องจากแบคทีเรียสามารถเกาะบน Carbon cloth ได้ดี โดยไม่เป็นพิษต่อแบคทีเรีย

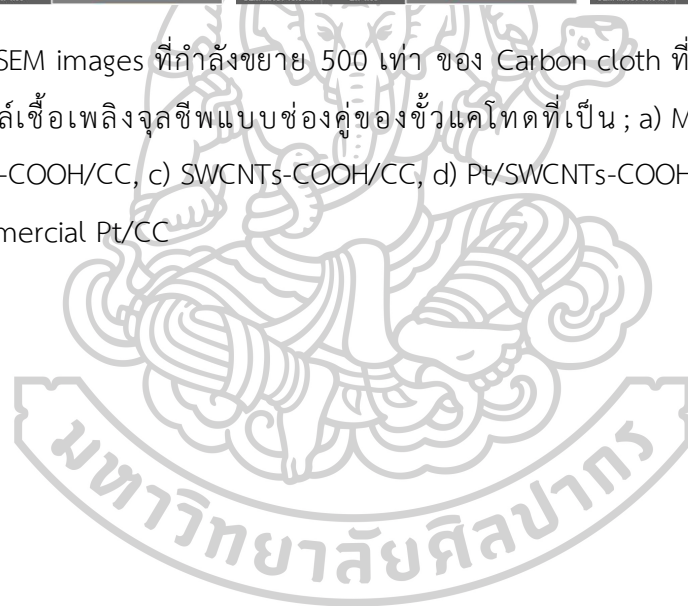


รูปที่ 61 FESEM images ที่กำลังขยาย 500 เท่า ของ Carbon cloth ที่นำมาใช้เป็นขั้วแอโนด สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ของขั้วแคโทดที่เป็น ; a) MWCNTs-COOH/CC, b) Pt/MWCNTs-COOH/CC, c) SWCNTs-COOH/CC, d) Pt/SWCNTs-COOH/CC, e) Carbon cloth และ f) Commercial Pt/CC





รูปที่ 62 FESEM images ที่กำลังขยาย 500 เท่า ของ Carbon cloth ที่นำมาใช้เป็นขั้วแอโนดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ของขั้วแคโทดที่เป็น ; a) MWCNTs-COOH/CC, b) Pt/MWCNTs-COOH/CC, c) SWCNTs-COOH/CC, d) Pt/SWCNTs-COOH/CC, e) Carbon cloth และ f) Commercial Pt/CC



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Pt บนตัวรองรับ MWCNTs-COOH ด้วยวิธี Deposition-precipitation (DP) โดยมี Carbon cloth เป็นวัสดุขั้วแคโทด ผลการทดลองในการทดสอบคุณสมบัติด้านโครงสร้างของ Pt/MWCNTs-COOH ที่เตรียมขึ้น ด้วยเครื่อง TEM พบว่าสถานะที่เหมาะสมในการเตรียม Pt/MWCNTs-COOH ได้แก่ ความเข้มข้นของ  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ 1.5 mM, pH สารแขวนลอยเท่ากับ 7, อุณหภูมิที่ใช้ในการรีฟลักซ์เท่ากับ  $70\text{ }^\circ\text{C}$  และเวลาที่ใช้ในการรีฟลักซ์เท่ากับ 120 นาที นอกจากนี้ DP ยังเป็นวิธีที่ง่าย ราคาถูก ไม่ต้องอาศัยเครื่องมือที่มีราคาแพง และมีประสิทธิภาพสูงในการสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ให้มีขนาดเล็กในระดับนาโน เพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยารีดักชันบนขั้วแคโทด และได้ตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ที่มีขนาดเล็ก (0.65-4.13 nm) และมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบน MWCNTs-COOH และจากการทดสอบคุณสมบัติด้านลักษณะทางสัณฐานวิทยาและการมีอยู่ของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt ด้วยเครื่อง FESEM-EDX ยังแสดงให้เห็นว่ามีการกระจายตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา Pt มีปริมาณมาก และกระจายตัวกันอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวของขั้วแคโทด นอกจากนี้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีด้วย XPS พบว่าเลขออกซิเดชันของ Pt คือ +4 โดยพบในรูปแบบ  $\text{Pt}(\text{OH})_4$  และ  $\text{PtCl}_4$

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด และใช้ Carbon cloth เป็นวัสดุขั้วแอโนด มี Polytetrafluoroethylene membrane เป็นเยื่อเลือกผ่าน โดยใช้น้ำเสียจากโรงอาหารสระแก้ว มหาวิทยาลัยศิลปากร เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น ได้ถูกเตรียมขึ้น และประเมินประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยประเมินจากค่า  $\text{OCV}$ ,  $R_{\text{int}}$  และ  $P_{\text{max}}$  พบว่าประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าดีกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นแคโทด มีค่าใกล้เคียงกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ Pt/SWCNTs-COOH/CC และ Commercial Pt/CC เป็นขั้วแคโทด และมีค่ามากกว่าที่ใช้ MWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC และ Carbon cloth เป็นขั้วแคโทด ประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียประเมินจากค่า %COD removal, %BOD removal, %TDS removal และ %TSS removal (ตารางที่ 17) พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ขั้วแคโทดทั้ง 6 ชนิด ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 17 ค่า OCV,  $R_{int}$ ,  $P_{max}$ , %COD removal, %BOD removal, %TDS removal และ %TSS removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ที่ใช้น้ำเสียโรงอาหารเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น

Cathodes	OCV (V)	$R_{int}$ ( $\Omega \cdot m^2$ )	$P_{max}$ (mW/m <sup>2</sup> )	%COD removal	%BOD removal	%TDS removal	%TSS removal
MWCNTs-COOH/CC	0.5455	11.4	6,351	75.0 ± 1.8	88.5 ± 4.8	85.1 ± 2.7	-56.16
Pt/MWCNTs-COOH/CC	0.6832	9.2	10,143	78.1 ± 1.8	90.2 ± 2.4	83.0 ± 0.8	-48.10
SWCNTs-COOH/CC	0.5276	11.8	6,188	83.3 ± 1.8	90.3 ± 2.4	86.9 ± 0.0	-62.80
Pt/SWCNTs-COOH/CC	0.6984	9.1	11,824	81.3 ± 1.8	95.3 ± 4.8	89.0 ± 0.3	-65.99
Carbon cloth	0.5060	22.6	2,530	76.0 ± 0.0	81.8 ± 4.8	84.5 ± 1.6	-17.27
Commercial Pt/CC	0.5634	6.4	10,563	80.2 ± 1.8	78.5 ± 0.1	86.0 ± 0.2	-83.61

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด และใช้ Carbon cloth เป็นวัสดุขั้วแอโนด มี Polytetrafluoroethylene membrane เป็นเยื่อเลือกผ่าน โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น ได้ถูกเตรียมขึ้น และประเมินประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยประเมินจากค่า OCV,  $R_{int}$  และ  $P_{max}$  พบว่าประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าดีกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด มีค่าสูงที่สุด และมีค่าใกล้เคียงกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ Pt/SWCNTs-COOH/CC และ Commercial Pt/CC เป็นขั้วแคโทด และมีค่ามากกว่าที่ใช้ SWCNTs-COOH/CC, Carbon cloth และ MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด ประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียประเมินจากค่า %COD removal (ตารางที่ 18) พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ขั้วแคโทดเป็น Pt/MWCNTs-COOH/CC มีค่ามากที่สุด

ตารางที่ 18 ค่า OCV,  $R_{int}$ ,  $P_{max}$  และ %COD removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ที่ใช้น้ำเสียสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น

Cathodes	OCV (V)	$R_{int}$ ( $\Omega \cdot m^2$ )	$P_{max}$ (mW/m <sup>2</sup> )	%COD removal
MWCNTs-COOH/CC	0.5504	32.1	2,163	74.5 ± 0.7
Pt/MWCNTs-COOH/CC	0.7351	26.1	5,235	79.5 ± 1.5
SWCNTs-COOH/CC	0.5826	34.1	2,418	71.2 ± 2.5
Pt/SWCNTs-COOH/CC	0.7126	33.5	4,781	69.9 ± 2.2
Carbon cloth	0.5875	48.2	2,369	69.5 ± 0.7
Commercial Pt/CC	0.6907	28.4	4,900	75.4 ± 1.5

เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด และใช้ Carbon cloth เป็นขั้วแอโนด มี Polytetrafluoroethylene membrane เป็นเยื่อเลือกผ่าน โดยใช้น้ำเสียจากโรงอาหารสระแก้ว มหาวิทยาลัยศิลปากร เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น ได้ถูกเตรียมขึ้นเพื่อกำจัดโลหะหนัก และประเมินประสิทธิภาพในด้านต่างๆ ได้แก่ ประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยประเมินจากค่า OCV,  $R_{int}$  และ  $P_{max}$  พบว่าประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าดีกว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด มีค่าใกล้เคียงกับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ Pt/SWCNTs-COOH/CC และ Commercial Pt/CC เป็นขั้วแคโทด และมีความมากกว่าที่ใช้ MWCNTs-COOH/CC, SWCNTs-COOH/CC และ Carbon cloth เป็นขั้วแคโทด ประสิทธิภาพด้านการบำบัดน้ำเสียประเมินจากค่า %COD removal, %BOD removal, %TDS removal และ %TSS removal (ตารางที่ 19) พบว่าเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ขั้วแคโทดทั้ง 6 ชนิด ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน โดย % Ag recovery ของทุกรีแอกเตอร์สามารถกำจัดได้มากถึง 99% โดยในการกำจัดโลหะเงินโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพสามารถกำจัดโลหะเงินได้บางส่วน เนื่องจากมีการรบกวนจาก  $Cl^-_{(aq)}$  ทำให้  $Ag^+_{(aq)}$  ในสารละลายเกิดปฏิกิริยากับ  $Cl^-_{(aq)}$  เกิดเป็น  $AgCl_{(s)}$  ดังนั้นจึงจะต้องมีการ Pre-treatment น้ำเสียก่อนที่จะนำน้ำเสียใส่ในช่องแอโนด หรือมีการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ เพื่อที่จะกำจัดไอออนที่รบกวน

**ตารางที่ 19** ค่า OCV,  $R_{int}$ ,  $P_{max}$ , %COD removal, %BOD removal, %TDS removal และ %TSS removal ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่มีขั้วแคโทด 6 ชนิด ที่ใช้น้ำเสียโรงอาหารเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น เพื่อใช้กำจัดโลหะหนัก

Cathodes	OCV (V)	$R_{int}$ ( $\Omega \cdot m^2$ )	$P_{max}$ ( $mW/m^2$ )	%COD removal	%BOD removal	%TDS removal	%TSS removal
MWCNTs-COOH/CC	0.5400	19.5	3,931	$86.4 \pm 1.9$	$91.2 \pm 2.5$	$73.4 \pm 2.2$	-21.11
Pt/MWCNTs-COOH/CC	0.6954	22.0	6,448	$87.0 \pm 1.1$	$97.4 \pm 1.2$	$68.2 \pm 2.2$	-8.88
SWCNTs-COOH/CC	0.6267	22.0	5,454	$82.7 \pm 0.0$	$94.7 \pm 2.5$	$72.4 \pm 3.7$	-15.08
Pt/SWCNTs-COOH/CC	0.7311	23.3	5,881	$84.0 \pm 2.1$	$96.5 \pm 5.0$	$71.9 \pm 1.5$	-15.08
Carbon cloth	0.5685	26.3	2,798	$86.4 \pm 1.9$	$94.7 \pm 0.0$	$65.1 \pm 2.2$	-20.27
Commercial Pt/CC	0.7102	23.0	4,233	$86.4 \pm 3.7$	$96.5 \pm 0.0$	$76.6 \pm 2.2$	-10.05

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการยึดเกาะของแบคทีเรียจากเครื่อง FESEM พบว่าแบคทีเรียที่พบในน้ำเสียจากบ่อพักน้ำของโรงอาหารสระแก้ว มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ จังหวัดนครปฐม มีรูปร่างแบบทรงกลม และ ท่อน เกาะอยู่บนเส้นใยของผ้าคาร์บอนกันอย่างหนาแน่นบนผิวของขั้วแอโนด แสดงให้เห็นว่า Carbon cloth ที่นำมาใช้เป็นวัสดุสำหรับขั้วแอโนด แบคทีเรียสามารถยึดเกาะได้ดี

ราคาของขั้วแคโทดที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดังตารางที่ 20 พบว่า Pt/MWCNTs-COOH/CC ที่เตรียมขึ้นมีราคาสูงกว่า Carbon cloth และ MWCNTs-COOH/CC แต่อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพด้านการผลิตกระแสไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด ยังคงให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า Carbon cloth และ MWCNTs-COOH/CC และจากราคาของขั้วแคโทดที่เตรียมขึ้น จะเห็นได้ว่ามีราคาน้อยกว่า SWCNTs-COOH/CC, Pt/SWCNTs-COOH/CC และ Commercial Pt/CC อยู่ประมาณ 27.0%, 44.3% และ 51.8% ตามลำดับ แต่ยังคงให้ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้น Pt/MWCNTs-COOH/CC ที่เตรียมขึ้นสามารถถูกนำมาใช้เป็นขั้วแคโทดสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ และสามารถนำมาใช้แทน Commercial Pt/CC ได้

ตารางที่ 20 ราคาของขั้วแคโทดที่แตกต่างกัน 6 ชนิด

Cathodes	Cost (Baht/25 cm <sup>2</sup> )
MWCNTs-COOH/CC	253
Pt/MWCNTs-COOH/CC	440
SWCNTs-COOH/CC	603
Pt/SWCNTs-COOH/CC	790
Carbon cloth	85
Commercial Pt/CC	913

ดังนั้นเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพที่ใช้ Pt/MWCNTs-COOH/CC เป็นขั้วแคโทด สามารถนำมาใช้แทน Pt/SWCNTs-COOH/CC และ Commercial Pt/CC ได้ เนื่องจาก Pt/MWCNTs-COOH/CC ให้ขนาดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีขนาดเล็ก มีราคาที่ถูกกว่า และมีประสิทธิภาพในด้านการผลิตกระแสไฟฟ้า และการบำบัดน้ำเสียที่ใกล้เคียงกับ Pt/SWCNTs-COOH/CC และ Commercial Pt/CC อีกทั้งมีความทนทานมากกว่าขั้วแคโทด Commercial Pt/CC เนื่องจากเมื่อใช้ขั้วแคโทด Commercial Pt/CC เป็นเวลานานขั้วแคโทด Commercial Pt/CC เกิดการกรอบเปราะและฉีกขาด





### ข้อเสนอแนะ

1. ทำการทดลองโดยศึกษาผลของชนิดแบคทีเรีย เพื่อเป็น Biocatalyst ในช่องแอนโดโดยจำเป็นต้องมีการควบคุมสภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย
2. ทำการทดลองโดยนำเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมาใช้ในการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่นๆ ที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย เช่น  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  เป็นต้น
3. ในการทดลองที่นำเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพมาใช้ในการกำจัดโลหะเงินที่มีการใช้น้ำเสียจากโรงอาหารเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้นจะต้องมีการ Pre-treatment เพื่อกำจัด Interference ที่รบกวนในการเกิดปฏิกิริยา เช่น  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$  เป็นต้น
4. ทำการทดลองโดยใช้โลหะอื่นๆ เช่น Fe, Sn, Pb เป็นต้น ผสมกับ Pt ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทั้งนี้เพื่อลดปริมาณ Pt ซึ่งมีราคาสูง แต่ยังคงให้ประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าและบำบัดน้ำเสียเท่าเดิมหรือมากกว่าเดิม



## รายการอ้างอิง

- Abourached, C., Catal, T., & Liu, H. (2014). Efficacy of single-chamber microbial fuel cells for removal of cadmium and zinc with simultaneous electricity production. *Water research, 51*, 228-233.
- Ahn, Y., & Logan, B. E. (2010). Effectiveness of domestic wastewater treatment using microbial fuel cells at ambient and mesophilic temperatures. *Bioresource Technology, 101*(2), 469-475.
- Aldrovandi, A., Marsili, E., Stante, L., Paganin, P., Tabacchioni, S., & Giordano, A. (2009). Sustainable power production in a membrane-less and mediator-less synthetic wastewater microbial fuel cell. *Bioresource Technology, 100*(13), 3252-3260.
- Association, A. P. H. (2005a). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater In *Oxygen (Dissolved) 4500*. Washington, D.C.
- Association, A. P. H. (2005b). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. In *Biochemical oxygen demand 5210*. Washington, D.C.
- Association, A. P. H. (2005c). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater In *Chemical oxygen demand 5220*. Washington, D.C.
- Atkins, P. W., & De Paula, J. (2005). Elements of Physical Chemistry. New York. In: WH Freeman & Co.
- Beltrán-Gastélum, M., Salazar-Gastélum, M. I., Félix-Navarro, R. M., Pérez-Sicairos, S., Reynoso-Soto, E. A., Lin, S. W., Flores-Hernández, J. R., Romero-Castañón, T., Albarrán-Sánchez, I. L., & Paraguay-Delgado, F. (2016). Evaluation of Pt Au/MWCNT (Multiwalled Carbon Nanotubes) electrocatalyst performance as cathode of a proton exchange membrane fuel cell. *Energy, 109*, 446-455.
- Berkday, A., Demirbas, A., Kocak, S., & Nas, B. (2004). Electrical energy prices and losses respect to Turkish social-economic situations. *Energy Exploration & Exploitation, 22*(3), 195-206.
- Castaner, L., & Silvestre, S. (2002). *Modelling photovoltaic systems using PSpice*: John Wiley and Sons.

- Catal, T., Li, K., Bermek, H., & Liu, H. (2008). Electricity production from twelve monosaccharides using microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 175(1), 196-200.
- Chen, C.-M., Chen, M., Yu, H.-W., Lu, S.-C., & Chen, C.-F. (2008). Rapid and homogeneous dispersion of Pt catalyst particles on multi-walled carbon nanotubes by temperature-controlled microwave polyol method. *Japanese Journal of Applied Physics*, 47(4R), 2324-2329.
- Chen, Y., Lv, Z., Xu, J., Peng, D., Liu, Y., Chen, J., Sun, X., Feng, C., & Wei, C. (2012). Stainless steel mesh coated with MnO<sub>2</sub>/carbon nanotube and polymethylphenyl siloxane as low-cost and high-performance microbial fuel cell cathode materials. *Journal of Power Sources*, 201, 136-141.
- Cheng, S., Liu, H., & Logan, B. E. (2006). Increased power generation in a continuous flow MFC with advective flow through the porous anode and reduced electrode spacing. *Environmental Science & Technology*, 40(7), 2426-2432.
- Choi, C., & Cui, Y. (2012). Recovery of silver from wastewater coupled with power generation using a microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 107, 522-525.
- Choi, J. D., Chang, H. N., & Han, J. I. (2011). Performance of microbial fuel cell with volatile fatty acids from food wastes. *Biotechnology letters*, 33(4), 705-714.
- Choudhury, P., Uday, U. S. P., Mahata, N., Nath Tiwari, O., Narayan Ray, R., Kanti Bandyopadhyay, T., & Bhunia, B. (2017). Performance improvement of microbial fuel cells for waste water treatment along with value addition: A review on past achievements and recent perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 372-389.
- Dai, H. (2002). Carbon nanotubes: Synthesis, integration, and properties. *Accounts of Chemical Research*, 35(12), 1035-1044.
- Das, S., & Mangwani, N. (2010). Recent developments in microbial fuel cells: a review. *Journal of scientific & industrial research*, 69, 727-731.
- de Radiguès, Q., Santoro, R., & Proost, J. (2010). Kinetic transitions during Ag and Cu electrorecovery on reticulated vitreous carbon electrodes in flow-by mode. *Chemical Engineering Journal*, 162(1), 273-277.

- Do, M. H., Ngo, H. H., Guo, W. S., Liu, Y., Chang, S. W., Nguyen, D. D., Nghiem, L. D., & Ni, B. J. (2018). Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production: A mini review. *Sci Total Environ*, *639*, 910-920.
- Du, Z., Li, H., & Gu, T. (2007). A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. *Biotechnol Adv*, *25*(5), 464-482.
- Fangzhou, D., Zhenglong, L., Shaoqiang, Y., Beizhen, X., & Hong, L. (2011). Electricity generation directly using human feces wastewater for life support system. *Acta Astronautica*, *68*(9-10), 1537-1547.
- Feng, J., Jiang, W., Yuan, C., Shi, X., Zang, K., & Zhang, Y. (2018). Deposition-precipitation approach for preparing core/shell SiO<sub>2</sub>@Ni-Rh nanoparticles as an advanced catalyst for the dehydrogenation of 2-methoxycyclohexanol to guaiacol. *Applied Catalysis A: General*, *562*, 106-113.
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of environmental management*, *92*(3), 407-418.
- Ghangrekar, M. M., & Shinde, V. B. (2007). Performance of membrane-less microbial fuel cell treating wastewater and effect of electrode distance and area on electricity production. *Bioresource Technology*, *98*(15), 2879-2885.
- Ghasemi, M., Ismail, M., Kamarudin, S. K., Saeedfar, K., Daud, W. R. W., Hassan, S. H. A., Heng, L. Y., Alam, J., & Oh, S.-E. (2013). Carbon nanotube as an alternative cathode support and catalyst for microbial fuel cells. *Applied Energy*, *102*, 1050-1056.
- Ghasemi, M., Wan Daud, W. R., Hassan, S. H. A., Jafary, T., Rahimnejad, M., Ahmad, A., & Yazdi, M. H. (2016). Carbon nanotube/polypyrrole nanocomposite as a novel cathode catalyst and proper alternative for Pt in microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(8), 4872-4878.
- Haasch, R. T. (2014). X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) and Auger Electron Spectroscopy (AES). In *Practical Materials Characterization* (pp. 93-132).
- Halakoo, E., Khademi, A., Ghasemi, M., Yusof, N. M., Gohari, R. J., & Ismail, A. F. (2015). Production of sustainable energy by carbon nanotube/platinum catalyst in microbial fuel cell. *Procedia CIRP*, *26*, 473-476.

- Haruta, M. (1997). Size- and support-dependency in the catalysis of gold. *Catalysis Today*, 36(1), 153-166.
- He, Z., & Angenent, L. T. (2006). Application of bacterial biocathodes in microbial fuel cells. *Electroanalysis*, 18(19-20), 2009-2015.
- Heijne, A. T., Liu, F., Weijden, R. V. D., Weijma, J., Buisman, C. J., & Hamelers, H. V. (2010). Copper recovery combined with electricity production in a microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology*, 44(11), 4376-4381.
- Hosseini, M. G., & Ahadzadeh, I. (2012). A dual-chambered microbial fuel cell with Ti/nano-TiO<sub>2</sub>/Pd nano-structure cathode. *Journal of Power Sources*, 220, 292-297.
- Hou, X., Amals, R. S., Jones, B. T., & Donati, G. L. (2016). Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry. In *Encyclopedia of Analytical Chemistry* (pp. 1-25).
- Ichihashi, O., Tada, C., & Nakai, Y. (2019). *Power Generation from Animal Wastewater Using Microbial Fuel Cell*.
- Inkson, B. J. (2016). 2 - Scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) for materials characterization. In G. Hübschen, I. Altpeter, R. Tschuncky, & H.-G. Herrmann (Eds.), *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods* (pp. 17-43): Woodhead Publishing.
- Ishii, S., Watanabe, K., Yabuki, S., Logan, B. E., & Sekiguchi, Y. (2008). Comparison of electrode reduction activities of *Geobacter sulfurreducens* and an enriched consortium in an air-cathode microbial fuel cell. *Applied and Environmental Microbiology*, 74(23), 7348-7355.
- Jadhav, G. S., & Ghangrekar, M. M. (2009). Performance of microbial fuel cell subjected to variation in pH, temperature, external load and substrate concentration. *Bioresource Technology*, 100(2), 717-723.
- Jang, J. K., Pham, T. H., Chang, I. S., Kang, K. H., Moon, H., Cho, K. S., & Kim, B. H. (2004). Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell. *Process Biochemistry*, 39(8), 1007-1012.
- Jiang, Y., Liu, Z., Song, J., Chang, I., & Zeng, J. (2018). Preparation and characterization of bimetallic Pt<sup>0</sup>Ni-P/CNT catalysts via galvanic displacement reaction on electrolessly-plated Ni-P/CNT. *Green Energy & Environment*, 3(4), 360-367.

- Ju, X., Liu, L., Yu, P., Guo, J., Zhang, X., He, T., Wu, G., & Chen, P. (2017). Mesoporous Ru/MgO prepared by a deposition-precipitation method as highly active catalyst for producing CO<sub>x</sub>-free hydrogen from ammonia decomposition. *Applied Catalysis B: Environmental*, 211, 167-175.
- Kakarla, R., & Min, B. (2014). Photoautotrophic microalgae *Scenedesmus obliquus* attached on a cathode as oxygen producers for microbial fuel cell (MFC) operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(19), 10275-10283.
- Karhu, H., Kalantar, A., Väyrynen, I. J., Salmi, T., & Murzin, D. Y. (2003). XPS analysis of chlorine residues in supported Pt and Pd catalysts with low metal loading. *Applied Catalysis A: General*, 247(2), 283-294.
- Kim, H. J., Park, H. S., Hyun, M. S., Chang, I. S., Kim, M., & Kim, B. H. (2002). A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *Enzyme and Microbial Technology*, 30(2), 145-152.
- Kim, J. R., Jung, S. H., Regan, J. M., & Logan, B. E. (2007). Electricity generation and microbial community analysis of alcohol powered microbial fuel cells. *Bioresource Technology*, 98(13), 2568-2577.
- Knop-Gericke, A., Kleimenov, E., Hävecker, M., Blume, R., Teschner, D., Zafeiratos, S., Schlögl, R., Bukhtiyarov, V. I., Kaichev, V. V., Prosvirin, I. P., Nizovskii, A. I., Bluhm, H., Barinov, A., Dudin, P., & Kiskinova, M. (2009). Chapter 4 X-Ray Photoelectron Spectroscopy for Investigation of Heterogeneous Catalytic Processes. In *Advances in Catalysis* (Vol. 52, pp. 213-272): Academic Press.
- Koo, K. Y., Jung, U. H., & Yoon, W. L. (2014). A highly dispersed Pt/V-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst prepared via deposition-precipitation method for preferential CO oxidation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(11), 5696-5703.
- Latake, P. T., Pawar, P., & Ranveer, A. C. (2015). The greenhouse effect and its impacts on environment. *International Journal of Innovative Research and Creative Technology*, 1(3), 333-337.
- Li, B., He, Z., Wang, M., & Wang, X. (2017). PtSnP/C and PtSn/C as efficient cathode catalysts for oxygen reduction reaction in microbial fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(8), 5261-5271.

- Li, M., & Zhou, S. (2019). Efficacy of Cu(II) as an electron-shuttle mediator for improved bioelectricity generation and Cr(VI) reduction in microbial fuel cells. *Bioresour Technol*, 273, 122-129.
- Li, W., Wang, X., Chen, Z., Waje, M., & Yan, Y. (2006). Pt-Ru Supported on double-walled carbon nanotubes as high-performance anode catalysts for direct methanol fuel cells. *The Journal of Physical Chemistry B*, 110(31), 15353-15358.
- Li, X., & Hsing, I. M. (2006). The effect of the Pt deposition method and the support on Pt dispersion on carbon nanotubes. *Electrochimica Acta*, 51(25), 5250-5258.
- Lim, B. S., Lu, H., Choi, C., & Liu, Z. X. (2015). Recovery of silver metal and electric power generation using a microbial fuel cell. *Desalination and Water Treatment*, 54(13), 3675-3681.
- Liu, H., Cheng, S., & Logan, B. E. (2005). Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration. *Environmental Science & Technology*, 39(14), 5488-5493.
- Liu, H., & Logan, B. E. (2004). Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane. *Environmental Science & Technology*, 38(14), 4040-4046.
- Liu, H., Ramnarayanan, R., & Logan, B. E. (2004). Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology*, 38(7), 2281-2285.
- Logan, B. E. (2008). *Microbial fuel cells*: John Wiley & Sons.
- Logan, B. E., Cheng, S., Watson, V., & Estadt, G. (2007). Graphite fiber brush anodes for increased power production in air-cathode microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 41(9), 3341-3346.
- Logan, B. E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., & Rabaey, K. (2006). Microbial fuel cells: Methodology and technology. *Environmental Science & Technology*, 40(17), 5181-5192.
- Ma, Y., Wang, H., Ji, S., Linkov, V., & Wang, R. (2014). PtSn/C catalysts for ethanol oxidation: The effect of stabilizers on the morphology and particle distribution. *Journal of Power Sources*, 247, 142-150.

- Manohar, A. K., & Mansfeld, F. (2009). The internal resistance of a microbial fuel cell and its dependence on cell design and operating conditions. *Electrochimica Acta*, 54(6), 1664-1670.
- Mansoorian, H. J., Mahvi, A. H., Jafari, A. J., Amin, M. M., Rajabizadeh, A., & Khanjani, N. (2013). Bioelectricity generation using two chamber microbial fuel cell treating wastewater from food processing. *Enzyme and Microbial Technology*, 52(6), 352-357.
- Materials, A. S. F. T. A. (2013). Standard Test Methods for Filterable Matter (Total Dissolved Solids) and Nonfilterable Matter (Total Suspended Solids) in Water D5907-13. *ASTM International, West Conshohocken*.
- Min, B., & Logan, B. E. (2004). Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *Environmental Science & Technology*, 38(21), 5809-5814.
- Moraes, M. B., Cividanes, L., & Thim, G. (2018). Synthesis of graphene oxide and functionalized CNT nanocomposites based on epoxy resin. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 10.
- Nadimi, R., & Tokimatsu, K. (2017). Analyzing of renewable and non-renewable energy consumption via Bayesian Inference. *Energy Procedia*, 142, 2773-2778.
- Nimje, V. R., Chen, C.-Y., Chen, H.-R., Chen, C.-C., Huang, Y. M., Tseng, M.-J., Cheng, K.-C., & Chang, Y.-F. (2012). Comparative bioelectricity production from various wastewaters in microbial fuel cells using mixed cultures and a pure strain of *Shewanella oneidensis*. *Bioresource Technology*, 104, 315-323.
- Pant, D., Van Bogaert, G., Diels, L., & Vanbroekhoven, K. (2010). A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology*, 101(6), 1533-1543.
- Parkash, A. (2016). Microbial fuel cells: A source of bioenergy. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, 8(3).
- Peuckert, M., Coenen, F. P., & Bonzel, H. P. (1984). XPS study of the electrochemical surface oxidation of Platinum in 1 N H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> acid electrolyte. *Electrochimica Acta*, 29(10), 1305-1314.



- Polk, B. J., Stelzenmuller, A., Mijares, G., MacCrehan, W., & Gaitan, M. (2006). Ag/AgCl microelectrodes with improved stability for microfluidics. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 114(1), 239-247.
- Pusomjit, P., Chailapakul, O., Ng, H. Y., & Thepsuparungsikul, N. (2018). Development of platinum supported on single-walled carbon nanotubes by deposition-precipitation for microbial fuel cells. *Water Science Technology*, 2017(3), 887-895.
- Pusomjit, P., Sangkum, N., Junwaowam, P., & Thepsuparungsikul, N. (2016). Preparation of carbon nanotubes supported platinum catalyst as a cathode for microbial fuel cells. *Veridian E-journal Science and Technology Silpakorn University*, 3, 249-259.
- Qiao, Y., Li, C. M., Bao, S.-J., & Bao, Q.-L. (2007). Carbon nanotube/polyaniline composite as anode material for microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 170(1), 79-84.
- Quan, X., Mei, Y., Xu, H., Sun, B., & Zhang, X. (2015). Optimization of Pt-Pd alloy catalyst and supporting materials for oxygen reduction in air-cathode Microbial Fuel Cells. *Electrochimica Acta*, 165, 72-77.
- Rabbani, M. M., Ko, C. H., Bae, J.-S., Yeum, J. H., Kim, I. S., & Oh, W. (2009). Comparison of some gold/carbon nanotube composites prepared by control of electrostatic interaction. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 336(1-3), 183-186.
- Reddy, K. R., Sin, B. C., Ryu, K. S., Kim, J.-C., Chung, H., & Lee, Y. (2009). Conducting polymer functionalized multi-walled carbon nanotubes with noble metal nanoparticles: Synthesis, morphological characteristics and electrical properties. *Synthetic Metals*, 159(7-8), 595-603.
- Rinaldi, A., Mecheri, B., Garavaglia, V., Licoccia, S., Di Nardo, P., & Traversa, E. (2008). Engineering materials and biology to boost performance of microbial fuel cells: a critical review. *Energy & Environmental Science*, 1(4).
- Romanchenko, A., Likhatski, M., & Mikhlin, Y. (2018). X-ray Photoelectron spectroscopy (XPS) study of the products formed on sulfide minerals upon the interaction with aqueous platinum (IV) chloride complexes. *Minerals*, 8(12).
- Roth, S., & Park, H. J. (2010). Nanocarbonic transparent conductive films. *Chemical Society Reviews*, 39(7), 2477-2483.

- Sadri, R., Hosseini, M., Kazi, S., Bagheri, S., Zubir, N., Solangi, K., Zaharinie, T., & Badarudin, A. (2017). A bio-based, facile approach for the preparation of covalently functionalized carbon nanotubes aqueous suspensions and their potential as heat transfer fluids. *Journal of colloid and interface science*, *504*, 115-123.
- Samad, S., Loh, K. S., Wong, W. Y., Lee, T. K., Sunarso, J., Chong, S. T., & Wan Daud, W. R. (2018). Carbon and non-carbon support materials for platinum-based catalysts in fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, *43*(16), 7823-7854.
- Sandoval, A., Aguilar, A., Louis, C., Traverse, A., & Zanella, R. (2011). Bimetallic Au–Ag/TiO<sub>2</sub> catalyst prepared by deposition–precipitation: High activity and stability in CO oxidation. *Journal of Catalysis*, *281*(1), 40-49.
- Seyama, H., Soma, M., & Theng, B. K. G. (2006). Chapter 12.4 X-ray Photoelectron Spectroscopy. In F. Bergaya, B. K. G. Theng, & G. Lagaly (Eds.), *Developments in Clay Science* (Vol. 1, pp. 865-878): Elsevier.
- Sharma, T., Mohanareddy, A., Chandra, T., & Ramaprabhu, S. (2008). Development of carbon nanotubes and nanofluids based microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, *33*(22), 6749-6754.
- Sheng, W., Lee, S. W., Crumlin, E. J., Chen, S., & Shao-Horn, Y. (2011). Synthesis, activity and durability of Pt nanoparticles supported on multi-walled carbon nanotubes for oxygen reduction. *Journal of The Electrochemical Society*, *158*(11).
- Singh, S. K., Sharma, D., Husain, M., Kishan, H., Kumar, R., & Awana, V. (2012). Exploring the superconductors with scanning electron microscopy (SEM). In *Scanning Electron Microscopy*: IntechOpen.
- Slate, A. J., Whitehead, K. A., Brownson, D. A. C., & Banks, C. E. (2019). Microbial fuel cells: An overview of current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *101*, 60-81.
- Sneddon, J., & Vincent, M. D. (2008). ICP-OES and ICP-MS for the determination of metals: application to oysters. *Analytical Letters*, *41*(8), 1291-1303.
- Song, S., Sheng, Z., Liu, Y., Wang, H., & Wu, Z. (2012). Influences of pH value in deposition-precipitation synthesis process on Pt-doped TiO<sub>2</sub> catalysts for photocatalytic oxidation of NO. *Journal of Environmental Sciences*, *24*(8), 1519-1524.

- Sun, J., Hu, Y. Y., Bi, Z., & Cao, Y. Q. (2009). Simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation using a microfiltration membrane air-cathode single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, *100*(13), 3185-3192.
- Sutton, M. A., Li, N., Joy, D. C., Reynolds, A. P., & Li, X. (2007). Scanning electron microscopy for quantitative small and large deformation measurements part I: SEM imaging at magnifications from 200 to 10,000. *Experimental Mechanics*, *47*(6), 775-787.
- Tan, L., Liu, Z.-Q., Li, N., Zhang, J.-Y., Zhang, L., & Chen, S. (2016). CuSe decorated carbon nanotubes as a high performance cathode catalyst for microbial fuel cells. *Electrochimica Acta*, *213*, 283-290.
- Tang, C. Y., & Yang, Z. (2017). Chapter 8 - Transmission Electron Microscopy (TEM). In N. Hilal, A. F. Ismail, T. Matsuura, & D. Oatley-Radcliffe (Eds.), *Membrane Characterization* (pp. 145-159): Elsevier.
- Tang, H., Chen, J., Huang, Z., Wang, D., Ren, Z., Nie, L., Kuang, Y., & Yao, S. (2004). High dispersion and electrocatalytic properties of platinum on well-aligned carbon nanotube arrays. *Carbon*, *42*(1), 191-197.
- Tao, H.-C., Lei, T., Shi, G., Sun, X.-N., Wei, X.-Y., Zhang, L.-J., & Wu, W.-M. (2014). Removal of heavy metals from fly ash leachate using combined bioelectrochemical systems and electrolysis. *Journal of hazardous materials*, *264*, 1-7.
- Thepsuparungsikul, N., Phonthamachai, N., & Ng, H. Y. (2012). Multi-walled carbon nanotubes as electrode material for microbial fuel cells. *Water Science Technology*, *65*(7), 1208-1214.
- Tian, Z., Liu, C., Li, Q., Hou, J., Li, Y., & Ai, S. (2015). Nitrogen-and oxygen-functionalized carbon nanotubes supported Pt-based catalyst for the selective hydrogenation of cinnamaldehyde. *Applied Catalysis A: General*, *506*, 134-142.
- Timur, S., Anik, U., Odaci, D., & Gorton, L. (2007). Development of a microbial biosensor based on carbon nanotube (CNT) modified electrodes. *Electrochemistry Communications*, *9*(7), 1810-1815.
- Tsai, H.-Y., Wu, C.-C., Lee, C.-Y., & Shih, E. P. (2009). Microbial fuel cell performance of multiwall carbon nanotubes on carbon cloth as electrodes. *Journal of Power Sources*, *194*(1), 199-205.

- Venkata Mohan, S., Mohanakrishna, G., Reddy, B. P., Saravanan, R., & Sarma, P. N. (2008). Bioelectricity generation from chemical wastewater treatment in mediatorless (anode) microbial fuel cell (MFC) using selectively enriched hydrogen producing mixed culture under acidophilic microenvironment. *Biochemical Engineering Journal*, 39(1), 121-130.
- Villalva, M., De Siqueira, T., & Ruppert, E. (2010). Voltage regulation of photovoltaic arrays: small-signal analysis and control design. *IET Power Electronics*, 3(6), 869-880.
- Wang, G., Huang, L., & Zhang, Y. (2008). Cathodic reduction of hexavalent chromium [Cr(VI)] coupled with electricity generation in microbial fuel cells. *Biotechnology letters*, 30(11), 1959-1966.
- Wang, H., & Ren, Z. J. (2014). Bioelectrochemical metal recovery from wastewater: a review. *Water research*, 66, 219-232.
- Wang, H., Wu, Z., Plaseied, A., Jenkins, P., Simpson, L., Engtrakul, C., & Ren, Z. (2011). Carbon nanotube modified air-cathodes for electricity production in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 196(18), 7465-7469.
- Wang, X., Feng, Y., Ren, N., Wang, H., Lee, H., Li, N., & Zhao, Q. (2009). Accelerated start-up of two-chambered microbial fuel cells: Effect of anodic positive poised potential. *Electrochimica Acta*, 54(3), 1109-1114.
- Wang, Y.-H., Wang, B.-S., Pan, B., Chen, Q.-Y., & Yan, W. (2013). Electricity production from a bio-electrochemical cell for silver recovery in alkaline media. *Applied Energy*, 112, 1337-1341.
- Wang, Z., Cao, C., Zheng, Y., Chen, S., & Zhao, F. (2014). Abiotic oxygen reduction reaction catalysts used in microbial fuel cells. *ChemElectroChem*, 1(11), 1813-1821.
- Williams, D. B., & Carter, C. B. (1996). The transmission electron microscope. In *Transmission electron microscopy* (pp. 3-17): Springer.
- Xie, X., Hu, L., Pasta, M., Wells, G. F., Kong, D., Criddle, C. S., & Cui, Y. (2011). Three-dimensional carbon nanotube-textile anode for high-performance microbial fuel cells. *Nano Letters*, 11(1), 291-296.
- Xing, Y. (2004). Synthesis and electrochemical characterization of uniformly-dispersed high loading Pt nanoparticles on sonochemically-treated carbon nanotubes. *The Journal of Physical Chemistry B*, 108(50), 19255-19259.

- Xue, X., Ge, J., Tian, T., Liu, C., Xing, W., & Lu, T. (2007). Enhancement of the electrooxidation of ethanol on Pt–Sn–P/C catalysts prepared by chemical deposition process. *Journal of Power Sources*, 172(2), 560-569.
- Yen, S. J., Tsai, M. C., Wang, Z. C., Peng, H. L., Tsai, C. H., & Yew, T. R. (2013). The improvement of catalytic efficiency by optimizing Pt on carbon cloth as a cathode of a microbial fuel cell. *Electrochimica Acta*, 108, 241-247.
- Zhang, B., Feng, C., Ni, J., Zhang, J., & Huang, W. (2012). Simultaneous reduction of vanadium (V) and chromium (VI) with enhanced energy recovery based on microbial fuel cell technology. *Journal of Power Sources*, 204, 34-39.
- Zhang, B., Zhao, H., Shi, C., Zhou, S., & Ni, J. (2009). Simultaneous removal of sulfide and organics with vanadium (V) reduction in microbial fuel cells. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 84(12), 1780-1786.
- Zhang, J.-N., You, S.-J., Yuan, Y.-X., Zhao, Q.-L., & Zhang, G.-D. (2011). Efficient electrocatalysis of cathodic oxygen reduction with Pt–Fe alloy catalyst in microbial fuel cell. *Electrochemistry Communications*, 13(9), 903-905.
- Zhang, L., Zhou, S., Zhuang, L., Li, W., Zhang, J., Lu, N., & Deng, L. (2008). Microbial fuel cell based on *Klebsiella pneumoniae* biofilm. *Electrochemistry Communications*, 10(10), 1641-1643.
- Zhang, Y., Hu, Y., Li, S., Sun, J., & Hou, B. (2011). Manganese dioxide-coated carbon nanotubes as an improved cathodic catalyst for oxygen reduction in a microbial fuel cell. *Journal of Power Sources*, 196(22), 9284-9289.
- Zhang, Y., Liu, L., Van der Bruggen, B., & Yang, F. (2017). Nanocarbon based composite electrodes and their application in microbial fuel cells. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(25), 12673-12698.
- Zhou, M., Chi, M., Luo, J., He, H., & Jin, T. (2011). An overview of electrode materials in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources*, 196(10), 4427-4435.
- Zou, Y., Xiang, C., Yang, L., Sun, L.-X., Xu, F., & Cao, Z. (2008). A mediatorless microbial fuel cell using polypyrrole coated carbon nanotubes composite as anode material. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(18), 4856-4862.



## ภาคผนวก

### 1. เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope; TEM)  
(ยี่ห้อ JEOL รุ่น JEM-2100, ญี่ปุ่น)



รูปที่ 2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน  
(Field Emission Scanning Electron Microscope) (ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM 7610F, ญี่ปุ่น)



รูปที่ 3 เครื่องเคลือบตัวอย่าง (Sputter coater) (ยี่ห้อ Balzers รุ่น SCD 040, ลิกเตนสไตน์)



รูปที่ 4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชัน ร่วมกับเครื่องเอ็กซ์เรย์แบบพลังงานกระจาย (Field Emission Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy; FESEM-EDX) (ยี่ห้อ TESCAN รุ่น MIRA3, สาธารณรัฐเช็ก)





รูปที่ 5 เครื่องเคลือบตัวอย่าง (Sputter coater)  
(ยี่ห้อ Cressington รุ่น sputter coater 108, อังกฤษ)



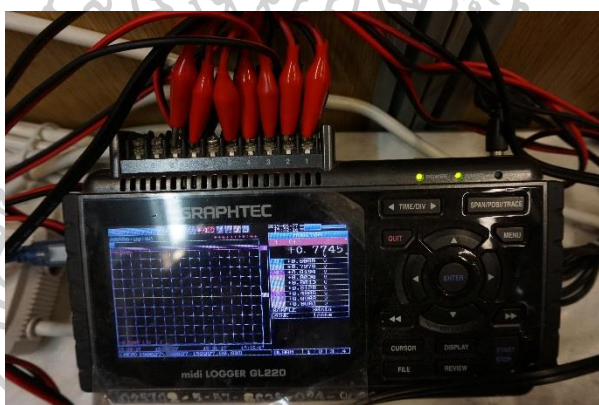
รูปที่ 6 เครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dryer)  
(ยี่ห้อ Labconco รุ่น 78060 series, สหรัฐอเมริกา)



รูปที่ 7 เครื่องวิเคราะห์พื้นผิววัสดุ (X-ray Photoelectron Spectroscopy; XPS)  
(ยี่ห้อ Khatos analytical รุ่น AXIS Ultra DLD, อังกฤษ)



รูปที่ 8 Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer; ICP-OES  
(ยี่ห้อ Agilent รุ่น 710 ICP-OES, สหรัฐอเมริกา)



รูปที่ 9 เครื่องวัด และบันทึกข้อมูล (Data logger) (ยี่ห้อ Graphtec รุ่น GL220, ญี่ปุ่น)



รูปที่ 10 Copper grid  
(ยี่ห้อ EMS รุ่น FCF 300-Cu, สหรัฐอเมริกา)



รูปที่ 11 การต่อเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเข้ากับ Resistance box เพื่อสร้าง Polarization curve และ Power density curve

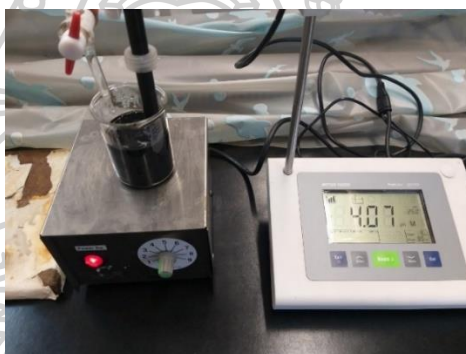
## 2. ภาพประกอบวิธีการเตรียม Pt/MWCNTs-COOH



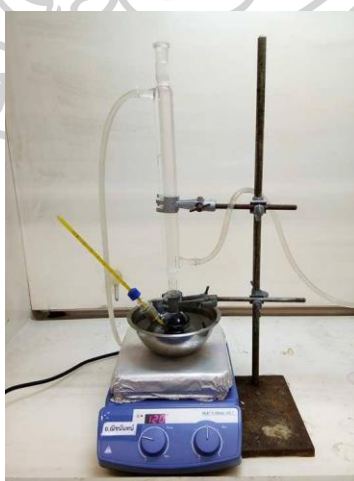
รูปที่ 12 การทำให้ MWCNTs-COOH กระจายตัวใน 1% (v/v) Triton X-100 เป็นเวลา 90 นาที ด้วย Sonicator bath



รูปที่ 13 การเทสารละลาย  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  25.00 mL ลงในสารแขวนลอย  
MWCNTs-COOH



รูปที่ 14 การปรับค่า pH ของสารแขวนลอย MWCNTs-COOH โดยค่อยๆ  
หยดสารละลาย 0.1 M NaOH อย่างช้าๆ จากบิวเรต

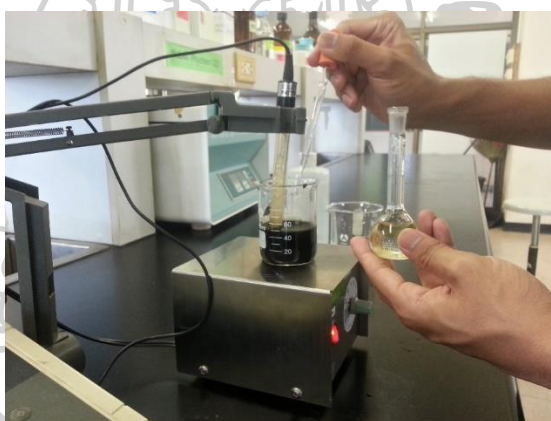


รูปที่ 15 การจัดอุปกรณ์สำหรับการรีฟลักซ์สารแขวนลอย Pt/MWCNTs-COOH  
ที่อุณหภูมิ 70 °C เป็นเวลา 120 นาที

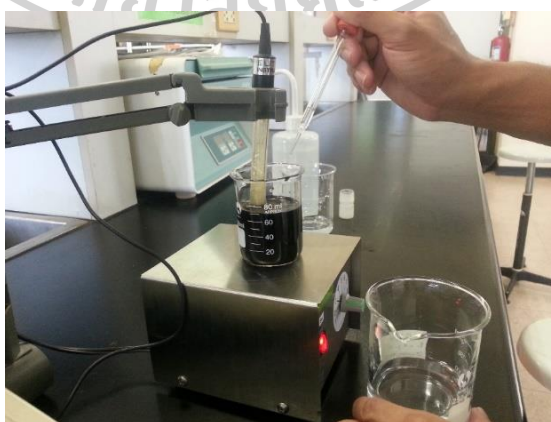
### 3. ภาพประกอบวิธีการเตรียม Pt/SWCNTs-COOH



รูปที่ 16 การทำให้ SWCNTs-COOH กระจายตัวในน้ำ DI เป็นเวลา 60 นาที ด้วย Sonicator bath



รูปที่ 17 การหยดสารละลาย  $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  25.00 mL ลงในสารแขวนลอย SWCNTs-COOH



รูปที่ 18 การปรับค่า pH ของสารแขวนลอย Pt/SWCNTs-COOH ด้วยสารละลาย 0.1 M NaOH

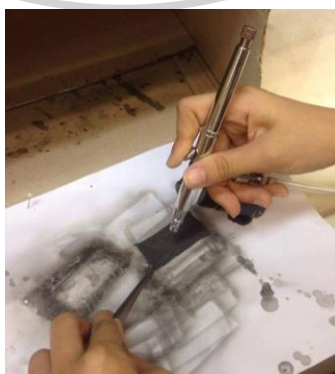


รูปที่ 19 การจัดอุปกรณ์สำหรับการรีฟลักซ์สารแขวนลอย Pt/SWCNTs-COOH ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 60 นาที

#### 4. ภาพประกอบการพ่นเคลือบสารแขวนลอย Pt/MWCNTs-COOH ลงบนผ้าคาร์บอน



รูปที่ 20 อุปกรณ์การพ่นเคลือบสารแขวนลอย Pt/MWCNTs-COOH



รูปที่ 21 การพ่นเคลือบสารแขวนลอย Pt/MWCNTs-COOH บนผ้าคาร์บอนโดยใช้เครื่องพ่นต่อกับปั๊มลม



รูปที่ 22 การวางผ้าคาร์บอนที่ถูกพันเคลือบด้วย Pt/MWCNTs-COOH บน Hot plate เพื่อให้สารแขวนลอย Pt/MWCNTs-COOH แห้ง และเกาะบนผ้าคาร์บอน



รูปที่ 23 การต่อเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพเข้ากับ Data logger พร้อมการแสดงผลบนหน้าจอ Computer

## 5. การวิเคราะห์หาค่า COD

### 5.1 การเตรียมสารละลาย

สารละลายมาตรฐาน Potassium dichromate ความเข้มข้น 0.016700 M ในขวด ปริมาตร 250.00 mL

1. ชั่ง  $K_2Cr_2O_7$  1.2280 g
2. น้ำกลั่น 125 mL
3. Conc.  $H_2SO_4$  41.75 mL
4. ชั่ง  $HgSO_4$  8.32 g



กวนให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 250.00 mL ในขวดปริมาตร



- สารละลายมาตรฐาน Potassium dichromate ความเข้มข้น 0.041700 M ในขวด ปริมาตร 100.00 mL



ชั่ง  $K_2Cr_2O_7$  1.2260 g



ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100.00 mL ในขวดปริมาตร

- Sulphuric acid reagent



1. Conc.  $H_2SO_4$  274 mL

2. ชั่ง  $AgSO_4$  2.75 g



กวนจนกระทั่ง  $AgSO_4$  ละลายจนหมด

สารละลายมาตรฐาน Ferrous ammonium sulfate (FAS) ความเข้มข้น 0.05 M  
ปริมาตร 500 mL



1. น้ำกลั่น 250 mL
2. Conc.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  10 mL
3. ชั่ง FAS 9.80 g

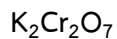
กวนให้ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 500



## 5.2 วิธีการทดลอง

การเทียบมาตรฐานสารละลาย 0.05 M FAS ด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.014700 M



1. น้ำกลั่น 10.00 mL
2. 0.041700 M  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  5.00 mL
3. Sulphuric acid reagent 15 mL
4. ชั่ง  $\text{HgSO}_4$  0.20 g

หมายเหตุ หาก  $\text{HgSO}_4$  ละลายไม่หมดให้ใส่น้ำกลั่นเพิ่มครั้งละ 10.00 mL จำนวน 2 ครั้ง

ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

หยด Ferroin indicator 2 หยด

ไตเตรตด้วยสารละลาย 0.05 M FAS จนถึงจุดยุติ สารละลายจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอมเขียว เป็นสีน้ำตาลแดง

### 5.3 การหาค่า COD

1. Blank : น้ำกลั่น 10.00 mL  
Sample : น้ำตัวอย่าง 10.00 mL



2. 0.016700 M  $K_2Cr_2O_7$  6.00 mL  
3. Sulphuric acid reagent 14 mL

กวนให้สารละลายเป็นเนื้อเดียวกันด้วยแท่งแม่เหล็ก

ปิดฝา โดยคลายเกลียวฝาเล็กน้อย

นำหลอด COD ใส่ในตู้อบ ที่อุณหภูมิ  
 $150 \pm 2$  °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

หยด Ferriin indicator 2 หยด

ไตเตรตด้วยสารละลาย 0.05 M FAS จนถึงจุดยุติ  
สารละลายจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอมเขียว เป็นสีน้ำตาลแดง

## 6. การวิเคราะห์หาค่า BOD

### 6.1 การเตรียมสารละลาย

+ สารละลาย Manganese(II) sulphate monohydrate ปริมาตร 100 mL



1. ชั่ง  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  36.40 g
2. น้ำกลั่น 100 mL



กวนจนสารละลายใส

กรองสารละลายด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1  
(รูพรุน 1  $\mu\text{m}$ )

+ สารละลาย Alkalide-azide ปริมาตร 100 mL



ชั่ง  $\text{NaN}_3$  25.00 g  
ละลายในน้ำ 100 mL

เติม  $\text{NaN}_3$  4.0 mL

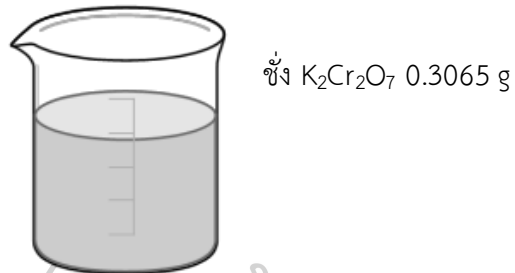


1. ชั่ง KOH 70.00 g
2. ชั่ง KI 15.00 g



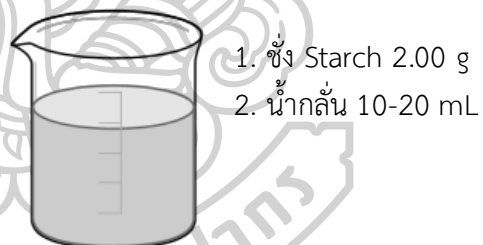
ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 100 mL

- สารละลายมาตรฐาน Potassium dichromate ความเข้มข้น 0.02500 N ปริมาตร 250.00 mL



ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 250.00 mL ในขวดปริมาตร

- สารละลาย 2% (w/v) Starch



กวนให้เป็นเนื้อเดียวกัน



ตม่น้ำกลั่น

ต้มต่อจนสารละลายใส และ  
ทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้  
เป็น 100 mL

✚ สารละลายมาตรฐาน Sodium thiosulfate ความเข้มข้น 0.025 M ปริมาตร 400 mL



ชั่ง  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  2.50 g

ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 400 mL

## 6.2 วิธีการทดลอง

✚ การเทียบมาตรฐานสารละลาย 0.025 N  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  ด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.025 N  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$



1. ชั่ง KI 2.00 g
2. น้ำกลั่น 150 mL
3. Conc.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  10.0 mL
4.  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  20.00 mL

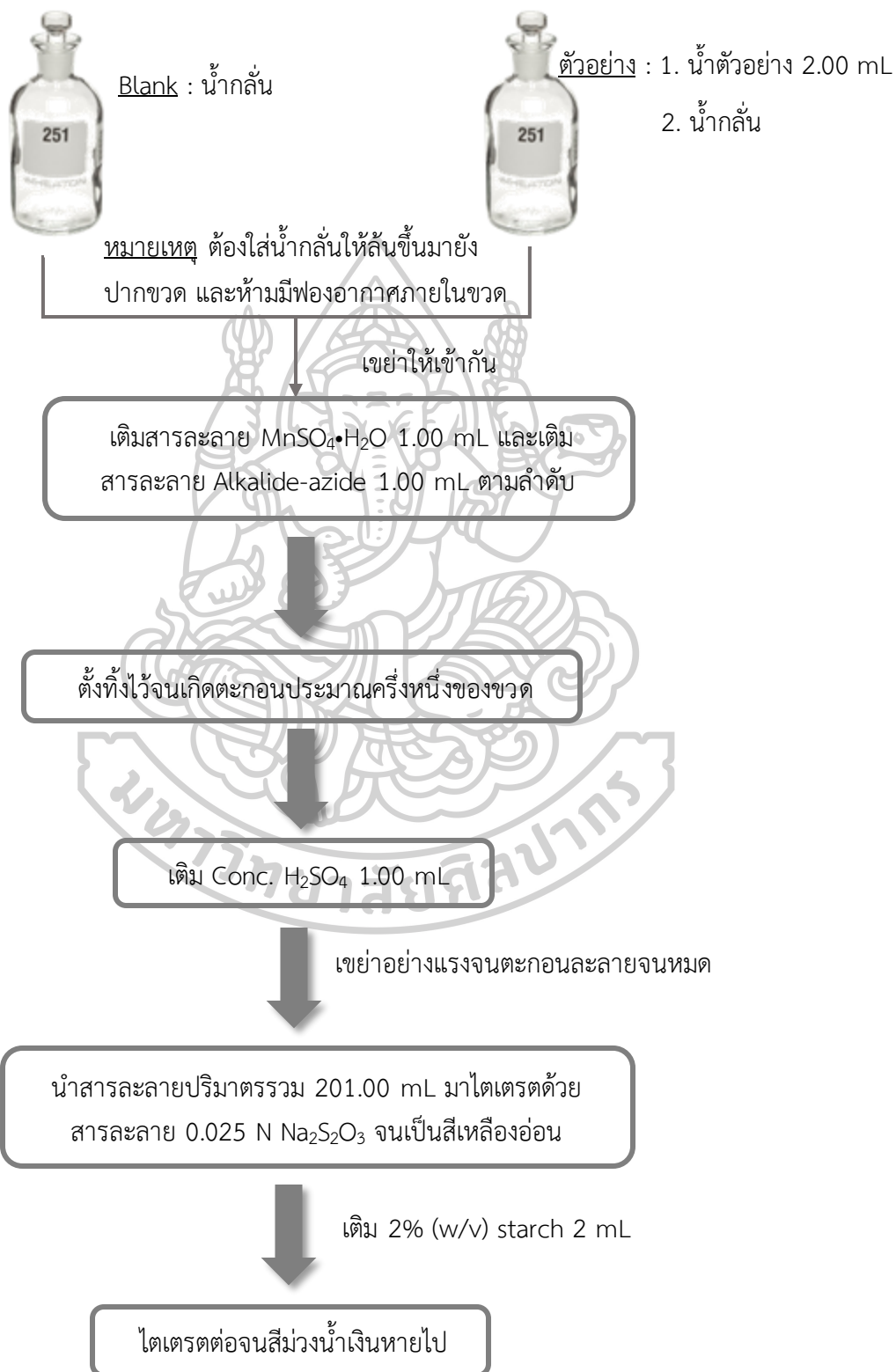
ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 200 mL

ไตเตรตด้วยสารละลาย  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  จนเป็นสีเหลืองอ่อน

เติม 2% (w/v) starch 2 mL

ไตเตรตต่อจนสีม่วงน้ำเงินจางหายไป

## 6.3 การวิเคราะห์ BOD





## 7. ข้อมูลค่าศักย์ไฟฟ้า

ตารางที่ 1 ข้อมูลค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละวัน ทั้งหมด 90 วัน ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดแตกต่างกัน 6 ชนิด โดยใช้น้ำเสียจากโรงอาหารเป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น

Day	Voltage (V)					
	MWCNTs -COOH/CC	Pt/MWCNTs -COOH/CC	SWCNTs -COOH/CC	Pt/SWCNTs -COOH/CC	Carbon cloth	Commercial Pt/CC
1	0.1084	0.0259	0.0552	0.0245	0.1480	0.2610
2	0.3558	0.4745	0.3776	0.1540	0.2919	0.5186
3	0.4950	0.6003	0.4654	0.3245	0.3548	0.5907
4	0.3798	0.4704	0.3054	0.3542	0.2913	0.3990
5	0.4737	0.6612	0.4833	0.4875	0.3313	0.4778
6	0.1962	0.3045	0.1954	0.4952	0.1689	0.3000
7	0.5262	0.7051	0.5222	0.5001	0.4182	0.6187
8	0.5226	0.7072	0.5220	0.5341	0.4278	0.6175
9	0.5197	0.7077	0.5138	0.5389	0.4338	0.5808
10	0.4765	0.6998	0.5240	0.5421	0.4113	0.5944
11	0.4612	0.5371	0.4215	0.5419	0.3847	0.4943
12	0.4814	0.7022	0.5347	0.6791	0.4513	0.5915
13	0.2152	0.3251	0.2068	0.3255	0.2013	0.3016
14	0.4699	0.6450	0.5020	0.6687	0.3468	0.5760
15	0.4489	0.6521	0.5074	0.6461	0.3380	0.5295
16	0.4571	0.6390	0.4969	0.6348	0.3540	0.5716
17	0.4237	0.3574	0.2732	0.5879	0.3429	0.4288
18	0.5196	0.6680	0.5138	0.6719	0.4606	0.5452
19	0.5130	0.6721	0.5221	0.6818	0.4577	0.5859
20	0.4068	0.4456	0.4173	0.4856	0.4489	0.4283
21	0.4878	0.6819	0.5183	0.6908	0.4580	0.5726
22	0.4982	0.6836	0.5217	0.6936	0.4662	0.5574
23	0.3336	0.4032	0.3317	0.4195	0.2805	0.3901
24	0.5000	0.6509	0.5200	0.6818	0.4536	0.5451
25	0.4993	0.6694	0.5289	0.6937	0.4703	0.5558
26	0.5010	0.6018	0.4919	0.6137	0.4391	0.5463
27	0.5004	0.6678	0.5250	0.6848	0.4774	0.5625
28	0.5052	0.6671	0.5307	0.6897	0.4794	0.5780

Day	Voltage (V)					
	MWCNTs -COOH/CC	Pt/MWCNTs -COOH/CC	SWCNTs -COOH/CC	Pt/SWCNTs -COOH/CC	Carbon cloth	Commercial Pt/CC
29	0.5090	0.6735	0.5334	0.6994	0.4972	0.5724
30	0.5205	0.6834	0.5427	0.7088	0.5137	0.5991
31	0.5340	0.6773	0.5494	0.6960	0.5214	0.5834
32	0.3142	0.2940	0.3342	0.2810	0.3010	0.3265
33	0.5132	0.7007	0.5318	0.6658	0.4931	0.5802
34	0.5135	0.7094	0.5204	0.6732	0.4865	0.5855
35	0.5296	0.6708	0.5212	0.6669	0.4568	0.5822
36	0.5261	0.6778	0.5282	0.6791	0.4810	0.5775
37	0.5117	0.6790	0.5285	0.6839	0.4840	0.5712
38	0.5468	0.6169	0.5449	0.6266	0.4875	0.5222
39	0.5078	0.6732	0.5357	0.6706	0.4756	0.5420
40	0.5018	0.6759	0.5424	0.6859	0.4836	0.5648
41	0.4478	0.4595	0.3062	0.3934	0.2331	0.3174
42	0.4866	0.6745	0.4941	0.6784	0.4285	0.6760
43	0.4931	0.6805	0.5218	0.6930	0.4535	0.6870
44	0.5117	0.6700	0.5391	0.7067	0.4777	0.6993
45	0.5167	0.6765	0.5357	0.6995	0.4766	0.6848
46	0.5254	0.6267	0.5341	0.6686	0.4571	0.7049
47	0.5034	0.6387	0.5323	0.6928	0.4945	0.7088
48	0.3946	0.3903	0.4369	0.4186	0.2759	0.4175
49	0.5177	0.6770	0.5368	0.6893	0.4932	0.7003
50	0.5132	0.6754	0.5459	0.6922	0.4924	0.6976
51	0.5128	0.6724	0.5514	0.6957	0.4943	0.7000
52	0.5113	0.6296	0.5540	0.6927	0.4966	0.6464
53	0.5164	0.6607	0.5472	0.6959	0.4989	0.6580
54	0.5138	0.6687	0.5378	0.6930	0.4972	0.6407
55	0.5089	0.6296	0.5363	0.6927	0.4971	0.6464
56	0.5008	0.6677	0.5272	0.6793	0.4822	0.5786
57	0.5050	0.6650	0.5347	0.6871	0.4815	0.5761
58	0.5138	0.6682	0.5400	0.6929	0.4788	0.5806
59	0.5228	0.6694	0.5423	0.7107	0.4827	0.6099

Day	Voltage (V)					
	MWCNTs -COOH/CC	Pt/MWCNTs -COOH/CC	SWCNTs -COOH/CC	Pt/SWCNTs -COOH/CC	Carbon cloth	Commercial Pt/CC
60	0.4120	0.5826	0.4210	0.6019	0.3808	0.5675
61	0.5447	0.6742	0.5490	0.7256	0.5019	0.6150
62	0.5212	0.6916	0.5492	0.7270	0.5031	0.5995
63	0.5272	0.6603	0.5443	0.6381	0.4833	0.5663
64	0.5311	0.6851	0.5583	0.7172	0.5074	0.5966
65	0.5354	0.6834	0.5551	0.7400	0.5141	0.6024
66	0.3871	0.4810	0.3330	0.4092	0.4118	0.3650
67	0.5714	0.6508	0.5565	0.7228	0.5017	0.6102
68	0.5554	0.6439	0.5545	0.7097	0.4947	0.5827
69	0.5503	0.6411	0.5327	0.6940	0.5031	0.6047
70	0.5512	0.6955	0.5409	0.6952	0.4961	0.5796
71	0.5493	0.7080	0.5414	0.7080	0.5189	0.5707
72	0.5376	0.6925	0.5374	0.7032	0.4931	0.5868
73	0.5540	0.6722	0.5326	0.7033	0.5069	0.5838
74	0.5478	0.6858	0.5409	0.7112	0.4996	0.5687
75	0.5439	0.6900	0.5468	0.7225	0.5032	0.5955
76	0.5385	0.6788	0.5422	0.7206	0.4988	0.5629
77	0.5092	0.6451	0.5342	0.7249	0.5040	0.5799
78	0.5272	0.6304	0.5267	0.7115	0.5041	0.5721
79	0.4397	0.4268	0.5391	0.5162	0.5093	0.5849
80	0.4096	0.3044	0.4110	0.5411	0.3483	0.3790
81	0.5328	0.6413	0.5247	0.6851	0.5001	0.5428
82	0.5226	0.6607	0.5243	0.6955	0.5108	0.5686
83	0.5399	0.6666	0.5336	0.6931	0.5192	0.5795
84	0.4820	0.5242	0.4735	0.6088	0.2769	0.4421
85	0.5427	0.6952	0.5447	0.7188	0.5016	0.5515
86	0.5415	0.6692	0.5499	0.6840	0.5416	0.5876
87	0.5703	0.7025	0.5083	0.7295	0.5070	0.5716
88	0.5612	0.7066	0.5473	0.7311	0.5082	0.5840
89	0.5710	0.7164	0.5544	0.7408	0.5091	0.5710
90	0.4726	0.4524	0.4339	0.4918	0.3546	0.4617

ตารางที่ 2 ข้อมูลค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละวัน ทั้งหมด 90 วัน ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดแตกต่างกัน 6 ชนิด โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์เป็นเชื้อเพลิงตั้งต้น

Day	Voltage (V)					
	MWCNTs -COOH/CC	Pt/MWCNTs -COOH/CC	SWCNTs -COOH/CC	Pt/SWCNTs -COOH/CC	Carbon cloth	Commercial Pt/CC
1	0.0915	0.1796	0.0510	0.2014	0.0399	0.2217
2	0.5022	0.7005	0.5281	0.7150	0.5422	0.7032
3	0.5587	0.6991	0.5525	0.7121	0.5563	0.7177
4	0.5652	0.6933	0.5581	0.7094	0.5543	0.7098
5	0.0927	0.1463	0.1066	0.1482	0.0518	0.1495
6	0.5538	0.6954	0.5292	0.7011	0.5526	0.6711
7	0.5619	0.7110	0.5431	0.7116	0.5603	0.6829
8	0.0863	0.1309	0.0845	0.1453	0.0569	0.1273
9	0.5591	0.6976	0.5392	0.6995	0.5336	0.6644
10	0.5641	0.6990	0.5542	0.7003	0.5513	0.6699
11	0.5724	0.7045	0.5568	0.7059	0.5662	0.7167
12	0.5857	0.6920	0.5710	0.7169	0.5726	0.7324
13	0.0589	0.1211	0.0708	0.1351	0.0591	0.1352
14	0.5531	0.6751	0.5076	0.6970	0.4975	0.6974
15	0.5526	0.6532	0.5163	0.6792	0.5087	0.7095
16	0.5452	0.6762	0.5071	0.6381	0.4860	0.6711
17	0.5490	0.7029	0.5237	0.6737	0.4823	0.7127
18	0.5586	0.7190	0.5311	0.7002	0.4919	0.7571
19	0.1225	0.2250	0.0558	0.1773	0.0794	0.0991
20	0.5663	0.7134	0.5123	0.7092	0.5110	0.6955
21	0.5504	0.7130	0.5118	0.7100	0.4819	0.7089
22	0.2797	0.3055	0.2061	0.2273	0.1593	0.2724
23	0.5513	0.7299	0.5447	0.6928	0.5034	0.7458
24	0.5353	0.7386	0.5498	0.6915	0.4975	0.7561
25	0.5425	0.7387	0.5509	0.7093	0.5385	0.7551
26	0.1266	0.1618	0.1358	0.1479	0.0255	0.1233
27	0.5423	0.7244	0.5504	0.7031	0.5292	0.7400
28	0.5448	0.7247	0.5499	0.7259	0.5330	0.7377
29	0.0342	0.1687	0.0326	0.1623	0.0314	0.1871

Day	Voltage (V)					
	MWCNTs -COOH/CC	Pt/MWCNTs -COOH/CC	SWCNTs -COOH/CC	Pt/SWCNTs -COOH/CC	Carbon cloth	Commercial Pt/CC
30	0.5269	0.6416	0.5397	0.6732	0.5308	0.7457
31	0.5097	0.6884	0.5490	0.6832	0.5189	0.7257
32	0.5172	0.7185	0.5610	0.6961	0.5168	0.7320
33	0.1781	0.1867	0.1650	0.1672	0.0684	0.1947
34	0.5735	0.7291	0.5732	0.7181	0.5438	0.7538
35	0.5663	0.7308	0.5683	0.7174	0.5343	0.7447
36	0.1954	0.1869	0.1799	0.1819	0.0624	0.1864
37	0.5761	0.7211	0.5766	0.7174	0.5408	0.7591
38	0.5390	0.7125	0.5678	0.6984	0.5275	0.7487
39	0.5539	0.7139	0.5701	0.6979	0.5279	0.7519
40	0.0941	0.1473	0.0641	0.1569	0.0285	0.1245
41	0.5547	0.7081	0.5534	0.7075	0.5454	0.7023
42	0.5534	0.6708	0.5457	0.6715	0.5433	0.7560
43	0.0217	0.1159	0.0400	0.1232	0.1204	0.1133
44	0.5354	0.6725	0.5438	0.7043	0.4628	0.7073
45	0.5937	0.7610	0.5917	0.7628	0.5675	0.7423
46	0.0946	0.1288	0.1138	0.2316	0.0336	0.2123
47	0.5742	0.7281	0.5702	0.7455	0.5524	0.7493
48	0.5732	0.7357	0.5729	0.7523	0.5565	0.7221
49	0.5798	0.7489	0.5840	0.7576	0.5605	0.7317
50	0.1062	0.1210	0.1075	0.1896	0.0193	0.1704
51	0.5239	0.7002	0.5284	0.6649	0.4382	0.6798
52	0.5504	0.7306	0.5691	0.7192	0.4044	0.7053
53	0.0362	0.0973	0.1230	0.0982	0.0985	0.0849
54	0.5103	0.5498	0.4902	0.5386	0.4991	0.6118
55	0.5673	0.6806	0.4933	0.6977	0.5642	0.6906
56	0.1231	0.2220	0.1573	0.2106	0.0753	0.2240
57	0.5768	0.6933	0.5004	0.7238	0.5662	0.7425
58	0.5796	0.6840	0.5153	0.7116	0.5603	0.7397
59	0.3129	0.2509	0.2103	0.2596	0.1537	0.2953
60	0.5989	0.6934	0.5742	0.7294	0.5781	0.7304

Day	Voltage (V)					
	MWCNTs -COOH/CC	Pt/MWCNTs -COOH/CC	SWCNTs -COOH/CC	Pt/SWCNTs -COOH/CC	Carbon cloth	Commercial Pt/CC
61	0.5941	0.6858	0.5689	0.7079	0.5635	0.7271
62	0.5925	0.6989	0.5772	0.7116	0.5655	0.7386
63	0.1771	0.3046	0.2201	0.2346	0.1401	0.2483
64	0.6079	0.7143	0.5761	0.7345	0.5689	0.7515
65	0.6070	0.6875	0.5764	0.7333	0.5625	0.7404
66	0.2018	0.2382	0.1914	0.2379	0.1173	0.2222
67	0.5820	0.7177	0.5817	0.7555	0.5838	0.7500
68	0.5885	0.7187	0.5857	0.7554	0.5747	0.7466
69	0.5915	0.7349	0.5777	0.7623	0.5777	0.7394
70	0.1877	0.2417	0.0532	0.2351	0.0892	0.2267
71	0.5836	0.7234	0.5713	0.7524	0.5801	0.7485
72	0.5913	0.7337	0.5712	0.7546	0.5772	0.7489
73	0.1826	0.1912	0.1585	0.2069	0.1698	0.2402
74	0.5753	0.7364	0.5639	0.7533	0.5743	0.7441
75	0.5868	0.7407	0.5727	0.7580	0.5798	0.7507
76	0.5909	0.7470	0.5813	0.7621	0.5850	0.7649
77	0.2026	0.1845	0.0844	0.2186	0.0895	0.2130
78	0.5997	0.7161	0.5858	0.7490	0.5961	0.7306
79	0.5924	0.7321	0.5863	0.7662	0.6082	0.7481
80	0.2101	0.2058	0.1552	0.2438	0.1736	0.2050
81	0.5853	0.7101	0.5889	0.7420	0.5932	0.7206
82	0.5916	0.7222	0.5928	0.7530	0.5932	0.7500
83	0.5985	0.7301	0.6025	0.7585	0.5985	0.7629
84	0.6003	0.7313	0.6072	0.7624	0.6009	0.7687
85	0.2188	0.2184	0.1692	0.2243	0.0416	0.2177
86	0.6040	0.7405	0.5838	0.7470	0.5870	0.7600
87	0.5992	0.7488	0.5902	0.7515	0.5942	0.7671
88	0.2288	0.2272	0.1730	0.2275	0.1615	0.2587
89	0.6077	0.7208	0.5874	0.7318	0.5932	0.7583
90	0.5999	0.7236	0.5762	0.7378	0.5837	0.7588

ตารางที่ 3 ข้อมูลค่าศักย์ไฟฟ้าในแต่ละวัน ทั้งหมด 60 วัน ของเซลล์เชื้อเพลิงจุลชีพแบบช่องคู่ที่ใช้ขั้วแคโทดแตกต่างกัน 6 ชนิด เพื่อใช้ในการกำจัดโลหะหนัก

Day	Voltage (V)					
	MWCNTs -COOH/CC	Pt/MWCNTs -COOH/CC	SWCNTs -COOH/CC	Pt/SWCNTs -COOH/CC	Carbon cloth	Commercial Pt/CC
1	0.7768	0.8084	0.8011	0.8172	0.8018	0.8095
2	0.7409	0.7478	0.7279	0.7997	0.7706	0.8054
3	0.7317	0.7604	0.7007	0.8047	0.7692	0.8094
4	0.7261	0.7549	0.6920	0.8029	0.7690	0.8099
5	0.5514	0.5729	0.5050	0.5921	0.5870	0.5636
6	0.6732	0.6430	0.7145	0.6681	0.6303	0.6378
7	0.6227	0.6217	0.6520	0.6676	0.6088	0.6355
8	0.5170	0.5862	0.5585	0.3892	0.4026	0.3851
9	0.6815	0.7114	0.6902	0.7516	0.7040	0.7460
10	0.6885	0.7127	0.6858	0.7679	0.7316	0.7802
11	0.6949	0.7157	0.6899	0.7729	0.7203	0.7863
12	0.4237	0.4060	0.3774	0.4192	0.3945	0.4249
13	0.6560	0.6952	0.6738	0.7480	0.7032	0.7554
14	0.6651	0.7042	0.6583	0.7571	0.7096	0.7627
15	0.6682	0.7104	0.7917	0.7506	0.7081	0.7519
16	0.6700	0.7101	0.7735	0.7409	0.7115	0.7571
17	0.7000	0.7330	0.7702	0.7573	0.7432	0.8004
18	0.6947	0.7288	0.8331	0.7702	0.7899	0.8020
19	0.6745	0.7012	0.7852	0.7605	0.7467	0.7904
20	0.4619	0.5118	0.5119	0.5060	0.4971	0.5298
21	0.6240	0.7223	0.7699	0.7334	0.7098	0.7339
22	0.6053	0.7624	0.7833	0.7499	0.7225	0.7427
23	0.6147	0.7930	0.7898	0.7578	0.7373	0.7559
24	0.5037	0.5842	0.5683	0.4589	0.4356	0.4167
25	0.6517	0.6675	0.6516	0.7269	0.6603	0.7122
26	0.7384	0.6398	0.6496	0.7539	0.7196	0.7270
27	0.6604	0.6527	0.6705	0.7652	0.7772	0.7371
28	0.6860	0.6434	0.6699	0.7722	0.7853	0.7127
29	0.6826	0.6253	0.6381	0.6273	0.6437	0.5609

Day	Voltage (V)					
	MWCNTs -COOH/CC	Pt/MWCNTs -COOH/CC	SWCNTs -COOH/CC	Pt/SWCNTs -COOH/CC	Carbon cloth	Commercial Pt/CC
30	0.7489	0.6978	0.6882	0.7529	0.7958	0.7302
31	0.6315	0.7008	0.6928	0.7559	0.7761	0.7323
32	0.5168	0.4240	0.4508	0.4853	0.4808	0.4636
33	0.7566	0.6832	0.6724	0.7460	0.7045	0.7311
34	0.7544	0.6863	0.6758	0.7563	0.6987	0.7406
35	0.7469	0.6962	0.6823	0.7684	0.7009	0.7523
36	0.4403	0.3808	0.4020	0.4291	0.3208	0.3526
37	0.7120	0.6781	0.6649	0.7554	0.6745	0.7389
38	0.7168	0.6799	0.6654	0.7632	0.6692	0.7466
39	0.5882	0.5656	0.5549	0.5758	0.4942	0.5310
40	0.6590	0.6595	0.6488	0.7571	0.6350	0.7322
41	0.6334	0.6762	0.6673	0.7710	0.6522	0.7486
42	0.6085	0.6829	0.6744	0.7797	0.6591	0.7561
43	0.6042	0.6891	0.6793	0.7852	0.6643	0.7621
44	0.4522	0.5595	0.5529	0.5430	0.4213	0.5542
45	0.5079	0.6281	0.6074	0.7141	0.5801	0.6960
46	0.5228	0.6445	0.6293	0.7306	0.5928	0.7157
47	0.4053	0.5202	0.5210	0.5656	0.4238	0.5370
48	0.5803	0.6950	0.6596	0.7888	0.6421	0.7554
49	0.5881	0.6968	0.6533	0.7869	0.6371	0.7545
50	0.4908	0.5924	0.5687	0.6245	0.4535	0.5624
51	0.5426	0.6545	0.6113	0.7446	0.5833	0.7148
52	0.5363	0.6633	0.6276	0.7646	0.6018	0.7288
53	0.5000	0.6222	0.5484	0.6027	0.4204	0.5540
54	0.5541	0.6760	0.6297	0.7616	0.6121	0.7366
55	0.5638	0.6853	0.6332	0.7682	0.6136	0.7410
56	0.5735	0.6925	0.6420	0.7736	0.6249	0.7500
57	0.3397	0.4451	0.3843	0.4852	0.3140	0.4364
58	0.5777	0.6996	0.6406	0.7823	0.6132	0.7495
59	0.5854	0.7027	0.6395	0.7864	0.6128	0.7543
60	0.5897	0.7056	0.6355	0.7891	0.6155	0.7549



## ผลงานตีพิมพ์และการนำเสนอผลงานวิจัย

### การนำเสนอผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีโอกาสนำเสนอผลงานในรูปแบบโปสเตอร์ ณ งานประชุมวิชาการ Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON) 2019 ตั้งแต่วันที่ 7-8 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2562 ที่ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค (BITEC) จังหวัดกรุงเทพฯ ในหัวข้อ Development of Platinum/carbon nanotubes spray-coated on Carbon cloth for Microbial Fuel Cell

**Development of Platinum/carbon nanotubes spray-coated on Carbon cloth for Microbial Fuel Cell**  
 Sasiprapa Witwan, Warapoj Foonsri, Thanun Nipant, Sasiing Somsaeng, Varaporn Paradaml, Nichanon Thepsuparungikul  
 Department of Chemistry, Faculty of Science, Sripakorn University, Nakorn Pathom 73000, Thailand  
 E-mail: thepsuparungikul@psu.ac.th

**INTRODUCTION**  
 Microbial fuel cell (MFC) is an innovative technology for treating wastewater and producing electricity at the same time. In this study, Pt nanocatalysts on multi-walled carbon nanotubes (Pt/MWCNTs) were prepared by deposition-precipitation (DP) method. Pt/MWCNTs-COOH spray-coated on carbon cloth with carbon cloth anode were used for dual-chamber microbial fuel cell, and compared with Pt/MWCNTs-COOH on carbon cloth and commercial carbon cloth.

**OBJECTIVES**  
 To prepare Pt/MWCNTs-COOH by DP method and then characterize in terms of structure, morphology and catalyst availability. To evaluate prepared MFC system with Pt/MWCNTs-COOH cathode in terms of electricity generation and organic removal efficiency.

**EXPERIMENT**  
 STEP 1 Synthesize Pt/MWCNTs by DP  
 STEP 2 Characterize Pt/MWCNTs by TEM  
 STEP 3 Indicate Pt nanocatalysts on carbon cloth by EDX  
 STEP 4 Operate and Evaluate MFCs  
 Cathodes: Carbon cloth (CC), Pt/MWCNTs-COOH/CC, Pt/MWCNTs-COOH/CC

**DISCUSSION**  
 Fig. 1 TEM images (A) MWCNTs-COOH and (B) Pt/MWCNTs-COOH from optimal conditions of DP method.  
 The size of Pt is between 0.5 and 6.0 nm.  
 The highest frequency of Pt nanocatalysts size is 2.5-3.0 nm.  
 EDX image indicates a highly uniform dispersion and small size of Pt nanocatalysts on MWCNTs.

**CONCLUSIONS**  
 DP method for decoration of Pt nanocatalysts on MWCNTs-COOH provides small and highly uniform dispersion of Pt. Pt/MWCNTs-COOH cathode in MFC shows the great potential on electricity generation and organic removal efficiency.

**Table 1 Comparison of electricity generation from MFCs using different cathodes**

Cathodes	OCV (V)	$R_p$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$P_{max}$ ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )
Carbon cloth	0.4953	1.80	3.044
MWCNTs-COOH/CC	0.5887	1.19	7.518
Pt/MWCNTs-COOH/CC	0.6821	0.82	11.391

**Table 2 Comparison of organic removal efficiency from MFCs using different cathodes**

Cathodes	COD removal (%)	BOD removal (%)	TSS removal (%)
Carbon cloth	76.04	76.84	84.49
MWCNTs-COOH/CC	80.21	61.30	88.07
Pt/MWCNTs-COOH/CC	78.13	84.86	83.00

**Fig. 3** SEM images (A) Carbon cloth, (B) MWCNTs-COOH/CC, and (C) Pt/MWCNTs-COOH/CC.  
 The surface of Pt/MWCNTs on carbon cloth cathode shows high roughness providing a large surface area for oxygen reduction reaction (ORR).  
 Fig. 4 EDX image shows the presence of Pt nanocatalysts indicating the successful decoration of Pt on MWCNTs by DP method.

**References:**  
 Journal of Science and Technology, 2018, 20(17), 857-865  
 International Journal of Environment and Pollution, 2015, 14(6), 75-77  
 Journal of Water Science and Technology, 2014, 69(9), 1700-1915

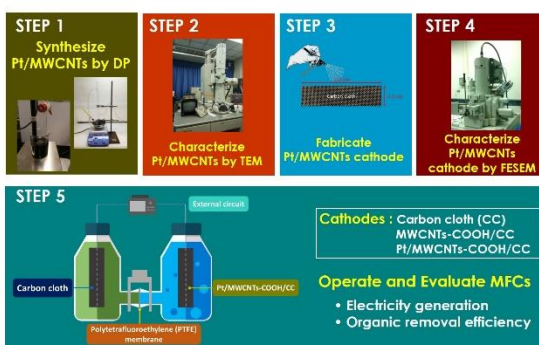
# Development of Platinum/carbon nanotubes spray-coated on Carbon cloth for Microbial Fuel Cell

Sasiprapa Wilawan, Worraraj Poonsri, Thanun Niparat,  
 Sasina Somsaeng, Varaporn Paradamit, Nichanan Thepsuparungsikul\*  
 Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakorn Pathom 73000, Thailand  
 \*E-mail: tepsuparungsiku\_n@su.ac.th

## INTRODUCTION

Microbial fuel cell (MFC) is an innovative technology for treating wastewater and producing electricity at the same time. In this study, Pt nanocatalysts on multi-walled carbon nanotubes (Pt/MWCNTs) were prepared by deposition-precipitation (DP) method. Pt/MWCNTs-COOH spray coated on carbon cloth with carbon cloth anode were used for dual-chamber microbial fuel cell, and compared with MWCNTs-COOH on carbon cloth and commercial carbon cloth.

## EXPERIMENT



## RESULTS & DISCUSSION

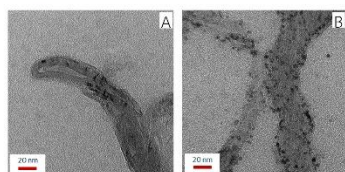


Fig. 1 TEM images (A) MWCNTs-COOH; and (B) Pt/MWCNTs-COOH from optimal conditions of DP method.

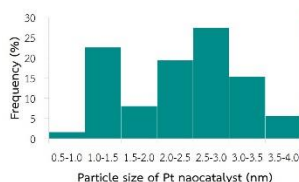


Fig. 2 Size distribution histogram of Pt/MWCNTs under optimal DP conditions.

- The size of Pt is between 0.5 and 4.0 nm.
- The highest frequency of Pt nanocatalysts size is 2.5-3.0 nm.
- TEM image indicates a highly uniform dispersion and small size of Pt nanocatalysts on MWCNTs.

## OBJECTIVES

- To prepare Pt/MWCNTs-COOH by DP method and then characterize in terms of structure, morphology and catalyst availability.
- To evaluate prepared MFC system with Pt/MWCNTs-COOH cathode in terms of electricity generation and organic removal efficiency.

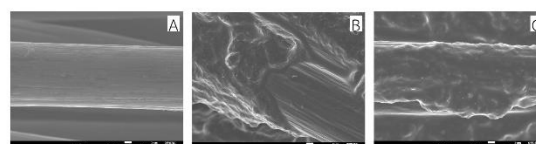


Fig. 3 FESEM images (A) Carbon cloth; (B) MWCNTs-COOH/CC; and (C) Pt/MWCNTs-COOH/CC.

The surface of Pt/MWCNTs on carbon cloth cathode shows **high roughness** providing a large surface area for **oxygen reduction reaction (ORR)**.

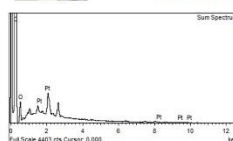


Fig. 4 EDX image shows the presence of Pt nanocatalysts indicating the successful decoration of Pt on MWCNTs by DP method.

Table 1 Comparison of electricity generation from MFCs using different cathodes.

Cathodes	OCV (V)	$R_{int}$ ( $\Omega \cdot m^2$ )	$P_{max}$ ( $mW/m^2$ )
Carbon cloth	0.4993	1.80	3,044
MWCNTs-COOH/CC	0.5887	1.19	7,528
Pt/MWCNTs-COOH/CC	0.6821	0.82	11,391

Table 2 Comparison of organic removal efficiency from MFCs using different cathodes.

Cathodes	COD removal (%)	BOD removal (%)	TSS removal (%)
Carbon cloth	76.04	76.44	84.49
MWCNTs-COOH/CC	80.21	61.30	88.07
Pt/MWCNTs-COOH/CC	78.13	84.86	83.00

## CONCLUSIONS

- DP method for decoration of Pt nanocatalysts on MWCNTs-COOH provides **small and highly uniform dispersion** of Pt.
- Pt/MWCNTs-COOH cathode in MFC shows the great **potential** on electricity generation and organic removal efficiency.

## References

- Pusomjit et al., *Water Science and Technology*. **2018**, 2017(3), 887-895.
- Quan et al., *Electrochimica Acta*. **2015**, 165, 72-77.
- Thepsuparungsikul et al., *Water Science and Technology*. **2014**, 69.9, 1900-1910.



ผู้วิจัยได้มีโอกาสนำเสนอผลงานทางการศึกษา ณ งานประชุมวิชาการ The 6<sup>th</sup> International Conference on Education (ICE 2019) and The 15<sup>th</sup> National Conference Creative Paradigms towards Internationalizing Education ครั้งที่ 15 ณ คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วันที่ 22 มิถุนายน พ.ศ. 2562



ผู้วิจัยได้มีโอกาสฝึกอบรมเรื่อง Atomic absorption spectrometry and application of atomic absorption spectrometry in environmental studies ที่ภาควิชาชีววิทยาและเคมี มหาวิทยาลัย Bialystok ประเทศโปแลนด์ ระหว่างวันที่ 14-18 พฤษภาคม พ.ศ. 2561



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ศศิประภา วิลาวลัย
วัน เดือน ปี เกิด	31 พฤษภาคม 2538
สถานที่เกิด	โรงพยาบาลสรรพสิทธิประสงค์ อำเภอเมืองอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2555 สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนนารีนุกูล อำเภอเมืองอุบลราชธานี จังหวัดอุบลราชธานี ปีการศึกษา 2559 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิชา เคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ ประสบการณ์: ผู้ช่วยคุมปฏิบัติการรายวิชา - General chemistry laboratory (513 105) ปี พ.ศ. 2561 - General chemistry laboratory II (513 104) ปี พ.ศ. 2561 - Chemical analysis of water (513 435) ปี พ.ศ. 2561 และ 2562 - เคมี ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 (ว. 32207) โรงเรียนสิรินธรราชวิทยาลัย โครงการสนับสนุนการจัดตั้งห้องเรียนวิทยาศาสตร์โดยการกำกับดูแลของ มหาวิทยาลัยศิลปากร ปี พ.ศ. 2560-2561
ที่อยู่ปัจจุบัน	108/10 ถนนเทศบาล 9 อำเภอวารินชำราบ จังหวัดอุบลราชธานี 34190 Email: Wilawan.s203@gmail.com
ผลงานตีพิมพ์	ผลงานตีพิมพ์: Handee, W., Khanjai, T., Lumpol, V. and Wilawan, S., (2019) A Study of Metacognitive Regulation of Sport Science Students in the Basic Chemistry Laboratory. The 6th International Conference on Education (ICE 2019) and The 15th National Conference Creative Paradigms towards Internationalizing Education, 445-456.  การนำเสนอผลงานวิจัย: Sasiprapa Wilawan, Worrarpoj Poonsri, Thanun Niparat, Sasina

Somsaeng, Varaporn Paradamit, Nichanan Thepsuparungsikul, Development of Platinum/carbon nanotubes spray-coated on Carbon cloth for Microbial Fuel Cell. Poster presentation at Pure and Applied Chemistry International Conference 2019, Bangkok, Thailand, 7th-8th February 2019.

Sasiprapa Wilawan, Pannaporn Pusomjit, Saralee Raknetsakorn, Nichanan Thepsuparungsikul. Fabrication of Platinum/Carbon Nanotubes Spray-coated on Carbon cloth for Microbial Fuel Cell. Poster presentation at Pure and Applied Chemistry International Conference 2017, Bangkok, Thailand, 2nd-3rd February 2017.

Saingam T., Suphratthanya P., Saensook K., Wilawan S., Innoy P., Rodthanom W., Jabthien J., Chumpuphol N., Sangsuk O., Jeenbubpha T. Thepsuparungsikul N., Study of binder in ground layers for restoration of Thai mural painting. Poster presentation at Pure and Applied Chemistry International Conference 2015, Bangkok, Thailand, 9th-11th February 2016.

