

การเตรียมฟิล์มพอลิพีร์โรลบนแผ่นทองแดงโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF POLYPYRROLE FILM ON COPPER PLATE BY ELECTRODEPOSITION
METHOD



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Fuel Technology
Department of Chemical Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 2018
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมฟิล์มพอลิพีริโรลบนแผ่นทองแดงโดยวิธีการพอก พุนด้วยไฟฟ้า
โดย	น.ส.ธิดา คุณสมบัติ
สาขาวิชา	เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวลี พุกษาทร)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นิสิต ตันทวีเชษฐ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม)	

ธิดา คุณสมบัติ : การเตรียมฟิล์มพอลิไพร์โรลบนแผ่นทองแดงโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า. (PREPARATION OF POLYPYRROLE FILM ON COPPER PLATE BY ELECTRODEPOSITION METHOD) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.เก็จวลี พุกษาทร

งานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิไพร์โรล (Polypyrrole) บนแผ่นทองแดงโดยเทคนิคการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposit) เพื่อทดสอบผลต่อความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนและค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบ ศึกษาตัวแปร คือ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า เวลาในการพอกพูน และปริมาณผงคาร์บอน รวมถึงขนาดและรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊ส พบว่าชิ้นงานที่เคลือบด้วยฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ได้จากการเตรียมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โดยใช้กรดโตนิกและโซลโฟนิค และพอลิไพร์โรล ความเข้มข้น 0.05 และ 0.15 โมลต่อลิตร ตามลำดับ ที่ภาวะต่างกัน พบว่าที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นระยะเวลา 10 นาที มีประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนและค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด แต่เมื่อมีการเติมคาร์บอนวัลแคน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถนำไฟฟ้าได้มากขึ้นถึง 338 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และป้องกันการกัดกร่อนได้ดีขึ้นถึง 0.030 มิลลิเมตรต่อปี และมีค่าความต้านทานเชิงสัมผัสเท่ากับ 0.090 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร หลังจากนั้นศึกษาการเคลือบพอลิไพร์โรลบนแผ่นทองแดงที่เซาะร่อง 2 รูปแบบ คือ รูปแบบขนานและรูปตัวยู พบว่ากระบวนการเคลือบนี้สามารถเคลือบแผ่นทองแดงที่มีการเซาะร่องได้ทั้งสองแบบ รูปแบบ โดยประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงเคลือบดีขึ้น แต่ค่าการนำไฟฟ้าลดลง โดยเฉพาะการเซาะร่องแบบตัวยู

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา เทคโนโลยีเชื้อเพลิง
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

5872138023 : MAJOR FUEL TECHNOLOGY

KEYWORD: Polypyrrole Conductivity Corrosion resistance Electrodeposition
Copper

Tida Kunnasombut : PREPARATION OF POLYPYRROLE FILM ON COPPER
PLATE BY ELECTRODEPOSITION METHOD . Advisor: Assoc. Prof. KEJVALEE
PRUKSATHORN, Ph.D.

This research studied the preparation of polypyrrole films on copper plates by electrodeposition method for corrosion resistances and conductivity. The studied parameters are current densities, reaction times, carbon contents and shapes of gas flow channels. Copper plates coating by polypyrrole with the current density of 12.7 mA/cm^2 and reaction time of 10 minutes in electrolyte solution of 0.05 molar dodecylbenzene sulfonic acid and 0.15 molar polypyrrole monomers, showed the optimum corrosion resistance and conductivity. The addition of vulcan carbon of 13.3 mg/l gave high conductivity 338 S/cm and lower corrosion rate 0.030 mm/year than no vulcan carbon. The contact resistance was $0.090 \text{ m}\Omega/\text{cm}^2$. The effects of gas flow channels were also studied. The gas flow channels were parallel and U shape. The copper plates with two types of flow channels can be completely coated. The corrosion resistances increased but the conductivities decreased especially in U shapes of gas flow channels.

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Fuel Technology

Student's Signature

Academic Year: 2018

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เกี้ยวลี พงกษาทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำ และความช่วยเหลือให้งานวิจัยเสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอบคุณ คณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่กรุณาให้คำปรึกษา และคำแนะนำในงานวิจัย

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. นิสิต ตัณฑวิเชฐ และศาสตราจารย์ ดร. มะลิ หุ่นสม กรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ที่กรุณารับเชิญเป็นกรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และความคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัย จาก บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยในการ สนับสนุนค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่เกี่ยวกับงานวิจัยทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณคุณทวิศักดิ์ จันทร์ดวง ที่ช่วยเซาะร่องแผ่นทองแดง รวมถึงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการ ตัดแผ่นทองแดง

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกตลอดการทำวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้ กำลังใจ จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ธิดา คุณสมบัติ

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.5 ขั้นตอนการวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry).....	4
2.1.1 ความรู้พื้นฐานของเคมีไฟฟ้า [5].....	4
2.1.2 องค์ประกอบหลักที่สำคัญของเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	5
2.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า.....	6
2.2.1 ตัวแปรทางไฟฟ้า (Electrical parameters).....	6
2.2.2 ตัวแปรขั้วไฟฟ้า (Electrode parameters).....	7

2.2.3	ตัวแปรการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer parameter).....	8
2.2.4	ตัวแปรภายนอก (External parameter).....	8
2.3	วิธีการควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า.....	8
2.3.1	แบบโพเทนชิโอสแตติก (Potentiostatic mode) [12].....	9
2.3.2	ไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry) [13].....	10
2.3.3	แบบกัลวานอสแตติก (Galvanostatic mode) [14].....	10
2.3	พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Conductive polymer) [15].....	11
2.4	กลไกในการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี [17].....	15
2.5	การกัดกร่อน (Corrosion).....	19
2.5.1	การกัดกร่อนทางเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	20
2.5.2	ลักษณะของการกัดกร่อน.....	24
2.5.3	การป้องกันการกัดกร่อน.....	26
2.6	แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว (Bipolar plate).....	27
2.6.1	สมบัติของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว.....	28
2.6.2	ประเภทแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว.....	29
2.6.3	รูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สบนแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว.....	31
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	32
บทที่ 3	เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	35
3.1	เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	35
3.2	เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	36
3.3	เครื่องมือวัด.....	36
3.4	สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	36
3.5	ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	36
3.5.1	การกลั่นพีร์โรลมอนอเมอร์.....	36

3.5.2 การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการเคลือบ	37
3.5.3 ศึกษาลักษณะกราฟที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน/รีดักชัน โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry).....	38
3.5.4 การเตรียมเซลล์เคมีไฟฟ้าเพื่อทำการสังเคราะห์ (Electrochemical cell)	39
3.5.4.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลบนแผ่นทองแดงโดยให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยเทคนิคกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)	39
3.5.4.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลบนแผ่นทองแดงโดยระยะเวลาในการเคลือบแตกต่างกัน โดยเทคนิคกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)	40
3.5.4.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลบนแผ่นทองแดงโดยมีการใส่ผงคาร์บอนลงไปผสมด้วยโดยให้ปริมาณผงคาร์บอนในการเคลือบแตกต่างกัน โดยเทคนิคกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)	40
3.5.5 ศึกษาขนาดของช่องทางการไหลของแก๊ส	42
3.5.5.1 ศึกษาผลของขนาดของช่องทางการไหลของแก๊สรูปแบบขนาน (Parallel) ...	42
3.5.5.2 ศึกษาผลของขนาดของช่องทางการไหลของแก๊สรูปแบบตัวยู (U-shape).	42
3.5.6 การทดสอบการกัดกร่อนของโลหะ	43
3.5.7 วัดค่าความต้านทานสัมผัสของชิ้นงาน (Interfacial Contact Resistance, ICR)	44
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	46
4.1 การวิเคราะห์การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ของพอลิพีร์โรลในสารละลายกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมทรี	46
4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลบนแผ่นทองแดง	47
4.2.1 ผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า	47
4.2.2 ผลของเวลา	52
4.3 ผลของการเติมผงคาร์บอนวัลแคนลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างพอลิพีร์โรลมอนอเมอร์กับกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค	55

4.3.1 ที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรเป็นเวลา 10 นาที..... 56

4.3.2 ที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรเป็นเวลา 15 นาที..... 60

4.4 ผลของขนาดช่องทางการไหลของแก๊สที่มีผลต่อการเคลือบ 65

4.5 ผลของการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไร้เซชัน 73

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 75

5.1 สรุปผลการทดลอง 75

5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย 76

บรรณานุกรม..... 77

ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง..... 82

ก-1 ค่าการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงที่ไม่ได้เคลือบนำมาทดสอบในสารละลายกรด ซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้าแบบ ส่องผ่าน (Through-plane) 82

ก-2 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิล เบนซีนซัลโฟนิคที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์พิวโรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)..... 82

ก-3 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิล เบนซีนซัลโฟนิคที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์พิวโรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)..... 85

ก-4 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิล

ไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์พิริโรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic).....	96
ก-11 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์พิริโรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic).....	98
ก-12 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์พิริโรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic).....	99
ก-13 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์พิริโรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic).....	101
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	103
ข-1 การคำนวณค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงาน (Interfacial Contact Resistance, ICR).....	103
ข-2 การคำนวณค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity).....	106
ภาคผนวก ค.....	107
ประวัติผู้เขียน.....	113

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ความเหมือน และแตกต่างของเซลล์อิเล็กโทรไลติก เซลล์กัลวานิก [8].....	5
ตารางที่ 2 โครงสร้างและค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นชนิดต่างๆ [15].....	14
ตารางที่ 3 สมบัติมาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอ็่ม [27].....	28
ตารางที่ 4 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวัสดุที่นำมาทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว [28].....	30
ตารางที่ 5 ศึกษาปริมาณผงคาร์บอนวัลแคนที่เติมลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์	56
ตารางที่ 6 สรุปค่าการป้องกันการกัดกร่อน ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ได้จากการทดลอง.....	65
ตารางที่ 7 เปรียบเทียบความหนาของฟิล์มระหว่างบริเวณผิวเรียบกับบริเวณผิวร่องที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FESEM ที่ถูกเคลือบภาวะไม่มีคาร์บอนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลา 10 นาที ภาวะที่มีคาร์บอนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลา 15 นาที คาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร	71
ตารางที่ 8 ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 10.0 – 45.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร.....	83
ตารางที่ 9 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 10.0 – 45.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร.....	84
ตารางที่ 10 ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 – 30 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 10.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร	85

เป็นระยะเวลา 15 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตาราง
เซนติเมตร 96

ตารางที่ 24 ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้า
กัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของ
กรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร
เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตาราง
เซนติเมตร 97

ตารางที่ 25 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพ
อลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมล
ต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่
(Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร 97

ตารางที่ 26 ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้า
กัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของ
กรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร
เติมผงคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 15 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)
ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร 98

ตารางที่ 27 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพ
อลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมล
ต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เติมผงคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น
ระยะเวลา 15 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร
..... 99

ตารางที่ 28 ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้า
กัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของ
กรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร
เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตาราง
เซนติเมตร 100

ตารางที่ 29 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพ
อลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมล

ต่อลิตร และพีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร..... 100

ตารางที่ 30 ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพีโรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และพีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เติมผงคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 15 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร..... 101

ตารางที่ 31 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีโรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และพีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เติมผงคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 15 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร..... 102

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) [6]	4
รูปที่ 2 กราฟการควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ [12].....	9
รูปที่ 3 โหลดลิโวลแทมโมแกรมของการเกิดปฏิกิริยาแบบสมบูรณ [13]	10
รูปที่ 4 กราฟการควบคุมให้กระแสไฟฟ้าคงที่ [14].....	11
รูปที่ 5 ลักษณะโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ [15]	12
รูปที่ 6 การกระตุ้นให้เกิดพาหะประจุ แบบชนิด P และ N ด้วยสารกระตุ้นพาหะประจุชนิดต่างๆ [16]	13
รูปที่ 7 การเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน [18]	16
รูปที่ 8 แผนภูมิ Pourbaix ของโลหะทองแดง [22].....	21
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของทافلในกระบวนการกัดกร่อน [23].....	22
รูปที่ 10 บริเวณที่สำคัญของกราฟโพลาริเซชันของโลหะ ที่ภาวะการกัดกร่อน [24]	24
รูปที่ 11 ภาพจำลองแสดงการกัดกร่อนลักษณะต่าง ๆ	26
รูปที่ 12 จำแนกประเภทวัสดุที่ใช้ทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง [26]	29
รูปที่ 13 รูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สในรูปแบบต่าง ๆ ก) ช่องทางการไหลแบบ Conventional ข) ช่องทางการไหลแบบ Serpentine ค) ช่องทางการไหลแบบแบบ Interdigitated [30]	31
รูปที่ 14 การติดตั้งอุปกรณ์การกลับพีโรลมนอเมอร์	37
รูปที่ 15 รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ในการเคลือบ	38
รูปที่ 16 การจัดรูปเซลล์เคมีไฟฟ้า	39
รูปที่ 17 การติดตั้งอุปกรณ์ในการสังเคราะห์พอลิพีโรลบนแผ่นทองแดง	41
รูปที่ 18 แสดงการเจาะช่องทางการไหลของแก๊ส ก.) รูปแบบขนาน ข.) รูปตัวยู	42
รูปที่ 19 กราฟโพลาริเซชันของวิธี Tafel slope analysis [37].....	43

รูปที่ 20 แสดงการจัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบแนวทะลุผ่าน และค่าความต้านทานเชิงสัมผัส..... 44

รูปที่ 21 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิพีร์โรลของสารละลายกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 และพีร์โรลมอนอเมอร์ 0.05 โมลต่อลิตร กับสารละลายกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร 47

รูปที่ 22 ผลการเคลือบในสารละลายพีร์โรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร เวลา 15 นาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างกัน ก.) ลักษณะการเคลือบชั้นฟิล์มพอลิพีร์โรลไม่ทั่วทั้งแผ่นที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ข.) ลักษณะการเคลือบชั้นฟิล์มพอลิพีร์โรลที่เรียบเนียน ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค.) ลักษณะผิวชั้นฟิล์มพอลิพีร์โรลที่ไม่เรียบเนียนมีผิวขรุขระเริ่มมีลักษณะนี้เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 18.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร 48

รูปที่ 23 ความหนาของฟิล์มพอลิพีร์โรลกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ที่ได้จากการเคลือบในสารละลายพีร์โรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เวลา 15 นาที..... 49

รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนกับกระแสไฟฟ้าจากการเคลือบในสารละลายพีร์โรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เวลา 15 นาที 50

รูปที่ 25 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการเกิด Overoxidation ที่เกิดระหว่างการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลได้ หมูคาร์บอนิลเป็นองค์ประกอบ..... 51

รูปที่ 26 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการเกิด Overoxidation ที่เกิดระหว่างการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลเกิดเป็นพอลิพีร์โรลที่มีโครงสร้างแบบไม่คอนจูเกต 51

รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความต้านทานเชิงสัมผัสกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเคลือบในสารละลายพีร์โรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เวลา 15 นาที..... 52

รูปที่ 28 ความหนาของฟิล์มพอลิพีร์โรลกับเวลา ที่ได้จากการเคลือบในสารละลายพีร์โรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร..... 53

รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนกับเวลาของการเคลือบ ในสารละลายพีร์โรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร..... 54

รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความต้านทานเชิงสัมผัสกับเวลา ที่ได้จากการเคลือบในสารละลายพิริโรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร ... 55

รูปที่ 31 ลักษณะฟิล์มพอลิพิริโรลที่ถูกเคลือบบนแผ่นทองแดงที่มีคาร์บอนวัลแคน และไม่มีคาร์บอนวัลแคน ก.) มีคาร์บอนวัลแคนในฟิล์มพอลิพิริโรล ข.) ไม่มีคาร์บอนวัลแคน..... 57

รูปที่ 32 เปรียบเทียบความหนาของชั้นงานในการเคลือบที่มีและไม่มีคาร์บอน ในสารละลายพิริโรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร และคาร์บอนวัลแคน 3.3 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 57

รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนที่มีและไม่มีคาร์บอนเคลือบ ในสารละลายพิริโรลมอนอเมอร์ 0.15 กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร และคาร์บอนวัลแคน 3.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 10 นาที..... 58

รูปที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าที่มีและไม่มีคาร์บอนเคลือบ ในสารละลายพิริโรลมอนอเมอร์ 0.15 กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร และคาร์บอนวัลแคน 3.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแส 12.7 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 10 นาที 59

รูปที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงสัมผัสที่มีและไม่มีคาร์บอนเคลือบ ในสารละลายพิริโรลมอนอเมอร์ 0.15 กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร และคาร์บอนวัลแคน 3.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแส 12.7 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 10 นาที..... 59

รูปที่ 36 เปรียบเทียบความหนากับปริมาณคาร์บอน 6.7 ถึง 26.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายพิริโรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร 61

รูปที่ 37 การเคลือบที่มีการเติมผงคาร์บอนวัลแคนในปริมาณที่ต่างกันร่วมกับพอลิพิริโรลบนแผ่นทองแดง ศึกษาลักษณะการเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน หรือ Field emission scanning electron microscope (FESEM) ก.) พอลิพิริโรล ข.) ผงคาร์บอนวัลแคน [44] ค.) ผงคาร์บอนวัลแคน 6.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ง.) ผงคาร์บอนวัลแคน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร จ.) ผงคาร์บอนวัลแคน 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉ.) ผงคาร์บอนวัลแคน 26.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ช.) ผงคาร์บอนวัลแคน 33.3 มิลลิกรัมต่อลิตร 62

รูปที่ 38 รูปแบบพอลิพิริโรลที่เกิดขึ้นแบบไม่คอนจูเกตบางส่วนของสายโซ่..... 62

รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับปริมาณคาร์บอน 6.7 ถึง 26.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายพิริโรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร 63

รูปที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความต้านทานเชิงสัมผัสกับปริมาณคาร์บอน 6.7 ถึง 26.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เติมลงในสารละลายพริโรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโตนเดซิลเบนซีน ซัลโฟนิก 0.05 โมลต่อลิตร 64

รูปที่ 41 ลักษณะการเคลือบของฟิล์มพอลิพริโรลที่ความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊ส ต่าง ๆ ที่ ก. 1 มิลลิเมตร ข. 2 มิลลิเมตร ค. 3 มิลลิเมตร ความยาว 6 ลีค 0.4 มิลลิเมตร 66

รูปที่ 42 ลักษณะการเคลือบของฟิล์มพอลิพริโรลที่มีช่องทางการไหลของแก๊ส กว้าง 2 ยาว 6 ลีค 0.4 มิลลิเมตร ในภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 45 นาที 67

รูปที่ 43 ลักษณะการเคลือบของฟิล์มพอลิพริโรลที่มีช่องทางการไหลของแก๊ส ที่กว้าง 2 ยาว 6 ลีค 0.3 มิลลิเมตร ในภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ก.) ภาวะที่ไม่มีคาร์บอน เวลา 10 นาที ข.) ภาวะที่มีคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลา 15 นาที 67

รูปที่ 44 การเปรียบเทียบผลของความหนาระหว่างแผ่นเรียบกับแผ่นที่มีช่องทางการไหล ของแก๊ส รูปแบบขนานและรูปตัวยู ขนาดกว้าง 2 ยาว 6 ลีค 0.3 มิลลิเมตร ในภาวะที่ไม่มีคาร์บอนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 10 นาที ภาวะที่มีคาร์บอนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 15 นาที คาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร..... 68

รูปที่ 45 ลักษณะการเคลือบฟิล์มพอลิพริโรลที่มีช่องทางการไหลของแก๊ส ที่กว้าง 2 ยาว 6 ลีค 0.3 มิลลิเมตร ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน หรือ ในรูปแบบภาพตัดขวางที่กำลังขยาย 50 เท่า ในภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ก.) ภาวะที่ไม่มีคาร์บอน เวลา 10 นาที รูปแบบขนาน ข.) ภาวะที่มีคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตรเวลา 15 นาที รูปแบบขนาน ค.) ภาวะที่ไม่มีคาร์บอน ระยะเวลา 10 นาที รูปตัวยู ง.) ภาวะที่มีคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลา 15 นาที รูปตัวยู 69

รูปที่ 46 ค่าอัตราการกัดกร่อนระหว่างแผ่นเรียบกับแผ่นที่มีช่องทางการไหลของแก๊สรูปแบบขนาน และรูปตัวยู ขนาดกว้าง 2 ยาว 6 ลีค 0.3 มิลลิเมตร ในภาวะที่ไม่มีคาร์บอนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลา 10 นาที ภาวะที่มีคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 15 นาที 72

รูปที่ 47 ค่าการนำไฟฟ้าระหว่างแผ่นเรียบกับแผ่นที่มีช่องทางการไหลของแก๊สรูปแบบขนาน และรูปตัวยู ขนาดกว้าง 2 ยาว 6 ลีค 0.3 มิลลิเมตร ในภาวะที่ไม่มีคาร์บอน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 10 นาที ภาวะที่มีคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 15 นาที	72
รูปที่ 48 ผล FTIR ของพอลิพีริโรลบนแผ่นทองแดง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างกัน 12.7 และ 13.6 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 15 นาที และชนิดผสมคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 15 นาที	73
รูปที่ 50 เปิดโปรแกรม NOVA.....	107
รูปที่ 51 ป้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ รวมถึงกำหนดฟังก์ชันที่สำคัญในการวัดการกัดกร่อน.....	108
รูปที่ 52 กราฟทีวีเคราะห์ที่ได้ (Tafel plot).....	109
รูปที่ 53 วิธีการวิเคราะห์ที่ได้จากกราฟที่ได้ (Tafel plot).....	110
รูปที่ 54 ค่าพารามิเตอร์ที่เครื่องอ่านได้จากกราฟ Tafel plot.....	111
รูปที่ 55 กราฟ Tafel plot ที่ได้จากการทดลอง	112

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

โลหะมีประโยชน์มากมายในอุตสาหกรรมเนื่องจากมีความแข็งแรง คงทน นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดีเหมาะสำหรับนำไปใช้งานได้หลายด้าน แต่ปัญหาที่พบบ่อยที่เกิดขึ้นกับการใช้งานของโลหะ คือ ปัญหาการกัดกร่อน (Corrosion) ตัวอย่างเช่น ใช้เป็นท่อส่งน้ำหรือสารเคมี เครื่องปฏิกรณ์ สายไฟฟ้า เป็นต้น ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน หรือ Proton exchange membrane fuel cell จะมีส่วนประกอบของขั้วไฟฟ้าสองขั้ว (Bipolar plate) ที่ทำด้วยโลหะ หรือ แกรไฟต์ที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งแกรไฟต์จะได้รับความนิยมมากกว่า เนื่องจากทนการกัดกร่อนดีกว่า แต่มีข้อเสีย คือ แตกหักง่าย และขึ้นรูปได้ยากกว่าโลหะ ในเซลล์เชื้อเพลิงอิเล็กโทรไลต์จะมีฤทธิ์เป็นกรด หรือเบส เป็นเหตุทำให้เกิดการกัดกร่อนของขั้วไฟฟ้าแบบโลหะ ส่งผลให้ประสิทธิภาพลดลง และต้องมีการบำรุงรักษา หรือเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าบ่อย ๆ ทำให้ต้องคอยดูแล และเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าอยู่เสมอ จึงมีงานวิจัยที่คิดค้น และพัฒนาให้โลหะสามารถทนต่อการกัดกร่อนได้ดีขึ้น โดยการเคลือบ (Coating) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน และง่ายต่อการผลิต อีกทั้งยังเป็นวิธีที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้เพื่อป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ เนื่องจากการเคลือบไม่ทำให้รูปร่าง หรือ โครงสร้างของโลหะเปลี่ยนแปลง โดยการเคลือบนั้นมีหลากหลายวิธี เช่น การเคลือบโดยใช้ไฟฟ้า การพ่นบนผิวหน้า การเคลือบในสภาพสุญญากาศ การปรับปรุงผิวหน้าของโลหะ และอื่น ๆ อีกมากมาย การเคลือบโดยใช้ไฟฟ้ามีข้อดี คือ สามารถตกแต่งผลิตภัณฑ์ให้เกิดความสวยงามแวววาวได้ (Decorating) สามารถป้องกันการผุกร่อน (Anti - corrosion) ยืดอายุการใช้งานผลิตภัณฑ์ และเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะ ได้แก่ การนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) การสะท้อนแสง (Reflectivity and appearance) ทนทานต่อแรงบิด (Torque tolerance) ช่วยในงานเชื่อมประสานโลหะ (Solder ability) ทนทานต่อสารเคมี (Chemical resistance) ความสามารถในการยึดเกาะกับเนื้อในอุตสาหกรรมยางรถยนต์ เพิ่มความแข็ง (Hardness) [1] และที่สำคัญสามารถกำหนดสารที่จะนำมาเคลือบบนผิวของโลหะตามวัตถุประสงค์การใช้งาน ในปัจจุบันพบว่าการเคลือบโดยใช้โลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อนมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรงจึงไม่นิยมนำมาใช้งาน ต่อมาจึงเปลี่ยนมาเคลือบด้วยพอลิเมอร์แทน เนื่องจากพอลิเมอร์ มีน้ำหนักเบา บิดงอได้ง่าย นอกจากนี้ยังสามารถป้องกันการกัดกร่อนจากสารกัดกร่อนต่าง ๆ ได้ดี อีกทั้งพอลิเมอร์บางชนิดยังมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ การสร้างฟิล์มพอลิเมอร์บนผิวของโลหะ จะเริ่มจากมอนอเมอร์เกิดการต่อเป็นสายยาวจนเป็นพอลิ

เมอร์ เรียกกระบวนการนี้ว่า อิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน (Electropolymerization) มีข้อดี คือ ใช้มอนอเมอร์ซึ่งมีสมบัติในการละลายในตัวกลางได้ดี เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย นอกจากนี้ยังไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง และไม่ต้องใช้ภาวะรุนแรง [2] แต่โลหะที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์จะมีค่าการนำไฟฟ้าลดลง ดังนั้นถ้าต้องการนำโลหะเคลือบพอลิเมอร์ไปใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าต้องเลือกชนิดของพอลิเมอร์วิธีการเคลือบ และความหนาที่เหมาะสม

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของภาวะการเคลือบฟิล์มพอลิเมอร์กึ่งตัวนำไฟฟ้าโดยเทคนิคการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrodeposition) ต่อค่าการกักตร้อน และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดง เนื่องจากแผ่นทองแดงนิยมใช้เป็นขั้วไฟฟ้า เพราะมีค่าการนำไฟฟ้าสูง มีความแข็งแรง บิดงอได้ยาก แก๊สไม่ซึมผ่าน และมีราคาถูก [3] แต่ก็ยังคงมีข้อเสียคือ ความต้านทานการกักตร้อนต่ำเมื่ออยู่ในภาวะกรด พอลิเมอร์ที่เลือกใช้ คือ พอลิไพร์โรล (Polypyrrole) เนื่องจากมีสมบัติต้านทานการกักตร้อน เพราะว่ามีโครงสร้างที่เป็นปัจจัยสำคัญในการยับยั้งการกักตร้อนได้ น้ำหนักเบา ยืดหยุ่น และเป็นสารกึ่งตัวนำไฟฟ้า [4] เพื่อไม่ให้สูญเสียความสามารถในการนำไฟฟ้าของแผ่นทองแดง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มพอลิไพร์โรลบนแผ่นทองแดงโดยวิธีเคมีไฟฟ้า
2. ศึกษาความต้านทานการกักตร้อน และค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นทองแดงที่เคลือบฟิล์มพอลิไพร์โรล
3. ศึกษาการเตรียมฟิล์มพอลิไพร์โรลบนแผ่นทองแดงที่มีช่องทางการไหลของแก๊ส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ทำไซคลิกโวลแทมเมทรีกับมอนอเมอร์ไพร์โรลที่ใช้ทำเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์เพื่อหาภาวะการเกิดพอลิเมอร์
2. เมื่อได้ภาวะการเกิดมอนอเมอร์ไพร์โรลจากข้อ 1 แล้ว นำไปใช้ในการเคลือบพอลิไพร์โรลลงบนแผ่นทองแดงโดยวิธี electrodeposition โดยศึกษาผลของตัวแปร คือ กระแสไฟฟ้า เวลา และปริมาณผงคาร์บอน
3. นำแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบฟิล์มพอลิไพร์โรลไปวัดการกักตร้อน และค่าการนำไฟฟ้า
4. เคลือบพอลิไพร์โรลบนแผ่นทองแดงที่มีช่องทางการไหลของแก๊สที่ภาวะที่เหมาะสม และศึกษาค่าการกักตร้อน และค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นทองแดงที่ถูกเคลือบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ได้แผ่นทองแดงเคลือบฟิล์มพอลิไพร์โรลที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับทำเป็น Bipolar plate ใน เซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนโปรตอน

1.5 ขั้นตอนการวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาวิธีใช้เครื่องมือต่าง ๆ ที่ใช้งานวิจัย เช่น โพลเทนิซิโอแอสต เครื่องมือวัดความหนาแผ่นทองแดง และการทำความสะอาดแผ่นทองแดงเพื่อกำจัดออกไซด์ออกจากแผ่นทองแดงก่อนจะนำมาทดลอง
3. หาภาวะการเกิดพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์ไพร์โรลโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรีบนแผ่นทองแดง โดยทำการตรวจกราฟค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง 2.5 โวลต์ เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง
4. ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบพอลิเมอร์ลงบนแผ่นทองแดงโดยการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้า ศึกษาตัวแปรคือ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วง 10.0 ถึง 45.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาในช่วง 10 ถึง 30 นาที และปริมาณผงคาร์บอนในช่วง 1 ถึง 4 มิลลิกรัม
5. วิเคราะห์สมบัติของแผ่นทองแดงที่เคลือบได้ เช่น ความหนา ค่าการนำไฟฟ้าแนวทะลุผ่าน และค่าการกัดกร่อน โดยเทคนิค Tafel slope analysis
6. เคลือบฟิล์มพอลิไพร์โรลบนแผ่นทองแดงที่มีช่องทางการไหลของแก๊สรูปแบบต่าง ๆ จากภาวะที่เหมาะสมในข้อ 4 และวัดค่าการกัดกร่อน และค่าการนำไฟฟ้า
7. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

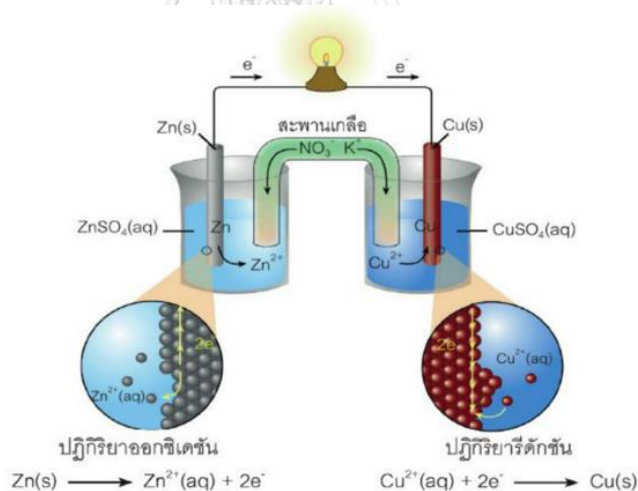
บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับไฟฟ้าเคมี (Electrochemistry)

2.1.1 ความรู้พื้นฐานของเคมีไฟฟ้า [5]

เคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) เป็นการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างสารในปฏิกิริยาเคมีทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าหรือต้องให้กระแสไฟฟ้า เรียกปฏิกิริยาดังกล่าวว่า ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) โดยปฏิกิริยารีดอกซ์จะประกอบด้วยครึ่งปฏิกิริยา (Half-reaction) สองประเภท คือปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) คือปฏิกิริยาที่มีการให้อิเล็กตรอนโดยมีสารที่ให้อิเล็กตรอน เรียกว่าตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) คือปฏิกิริยาที่มีการรับอิเล็กตรอนโดยมีสารที่มารับอิเล็กตรอน เรียกว่าตัวออกซิไดส์ (Oxidizing agent) ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาถ่ายเทอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นได้สมบูรณ์ก็ต่อเมื่อต้องนำครึ่งปฏิกิริยาทั้งสองมารวมกัน



รูปที่ 1 เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) [6]

เซลล์เคมีไฟฟ้าสามารถแบ่งตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 ประเภท ประเภทแรก คือ เซลล์อิเล็กโทรไลติก (electrolytic cell) เป็นเซลล์ที่ต้องให้กระแสไฟฟ้าเข้าไปเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่ต้องการในระบบ เช่น การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า การทำให้โลหะบริสุทธิ์ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า [5]

และประเภทที่สอง คือ เซลล์กัลวานิก หรือเซลล์โวลตาอิก (galvanic cell or voltaic cell) แสดงดังรูปที่ 1 เป็นเซลล์ที่ปฏิกิริยาเคมีสามารถเกิดขึ้นได้เองโดยไม่ต้องมีการให้กระแสไฟฟ้าเข้าระบบ แต่ให้กระแสไฟฟ้าเมื่อมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนสู่ภายนอก เช่น ถ่านไฟฉาย เซลล์เชื้อเพลิง แบตเตอรี่ [7] โดยเซลล์กัลวานิกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ชนิดแรก เซลล์ปฐมภูมิ (Primary cell) เป็นเซลล์ที่เกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์อย่างสมบูรณ์แล้วแต่ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ หรือนำมาอัดไฟฟ้าใหม่ไม่ได้ และชนิดที่สอง เซลล์ทุติยภูมิ (Secondary cell) เป็นเซลล์ที่เกิดปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์อย่างสมบูรณ์แล้วสามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ สามารถนำมาอัดไฟฟ้าใหม่ได้ ความเหมือนและแตกต่างของเซลล์กัลวานิก และเซลล์อิเล็กโทรไลติก ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความเหมือน และแตกต่างของเซลล์อิเล็กโทรไลติก เซลล์กัลวานิก [8]

ขั้วไฟฟ้า	เซลล์อิเล็กโทรไลติก	เซลล์กัลวานิก
แคโทด (cathode) สัญลักษณ์ของขั้ว	ปฏิกิริยารีดักชัน -	ปฏิกิริยารีดักชัน +
แอโนด (anode) สัญลักษณ์ของขั้ว	ปฏิกิริยาออกซิเดชัน +	ปฏิกิริยาออกซิเดชัน -
พลังงานที่เกี่ยวข้อง	ระบบต้องการใช้พลังงาน	ระบบผลิตพลังงาน

2.1.2 องค์ประกอบหลักที่สำคัญของเซลล์เคมีไฟฟ้า

องค์ประกอบเซลล์เคมีไฟฟ้าโดยทั่วไปประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ขั้วไฟฟ้าโดยทั่วไปมี 2 ชนิด คือ ขั้วว่องไว (Active electrode) ได้แก่ ขั้วโลหะทั่วไป เช่น สังกะสี (Zn) พลวง (Pb) ทองแดง (Cu) ขั้วพวกนี้ส่วนใหญ่จะมีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาด้วย ขั้วเฉื่อย (Inert electrode) คือ ขั้วที่ไม่มีส่วนร่วมใด ๆ ในการเกิดปฏิกิริยาเคมี เช่น Pt, C โดยในเซลล์ไฟฟ้าปกติประกอบไปด้วยขั้ว 2 ชนิด คือ ขั้วแคโทด (cathode) คือ ขั้วที่เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) และ ขั้วแอโนด (anode) คือ ขั้วที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ในบางกรณีจะมีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็นขั้วชนิดที่สามซึ่งเป็นขั้วที่ไม่มีส่วนร่วมในการเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือขั้วเฉื่อยนั่นเอง

อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) เป็นสารตัวกลางที่มีสถานะเป็นของเหลว ของแข็ง มีไอออนของสารเคลื่อนที่ไปมาอยู่ในสารละลาย ซึ่งไอออนของสารในสารละลายทำให้วงจรการแลกเปลี่ยน

ไอออนบวกวจร สารละลายอิเล็กโทรไลต์มี 2 ชนิด คือ สารประกอบไอออนิกหลอมเหลว เช่น สารละลาย NaCl และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น สารละลายกรด เบส เกลือ เป็นต้น

เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง หรือโหลด (Load) เป็นตัวนำอิเล็กตรอนผ่านจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด ตัวนำภายนอกนี้อาจจะเป็นตัวจ่ายหรือตัวรับอิเล็กตรอนก็ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์ โดยตัวจ่ายอิเล็กตรอนหรือจ่ายไฟฟ้าให้แก่ระบบ เช่น เครื่องจ่ายไฟฟ้า (power supply), แบตเตอรี่ (battery), ส่วนตัวนำภายนอกที่รับอิเล็กตรอน เช่น เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ (electrical devices) [8-10]

2.2 ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า

2.2.1 ตัวแปรทางไฟฟ้า (Electrical parameters)

ศักย์ไฟฟ้า (Potential, E) ศักย์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็นโวลต์ (V) ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้ามีผลต่อทิศทางการเกิดปฏิกิริยา โดยพิจารณาในรูปผลต่างของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้ากับค่าศักย์ไฟฟ้าของปฏิกิริยาที่เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) ชนิดเดียวกัน โดยชนิดของขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้ส่วนมาก คือ ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานไฮโดรเจน (Standard (Normal) Hydrogen Electrode, SHE, NHE) หรือเขียนในรูปแผนภูมิได้เป็น $\text{Pt}/\text{H}_2(\text{g}), \text{H}^+$ ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับศูนย์, ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานคาโลเมอรัมตัว (Standard Saturated Calomel Electrode, SCE) หรือเขียนในรูปแผนภูมิได้เป็น $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2, \text{KCl}(\text{sat.})$ มีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.245 V/SHE ซึ่งเป็นขั้วที่นิยมนำมาใช้กันเป็นส่วนใหญ่, ขั้วไฟฟ้ามาตรฐานเงิน-เงินคลอไรด์ (Silver-Silver chloride electrode) หรือเขียนในรูปแผนภูมิได้เป็น $\text{Ag}/\text{AgCl}, \text{KCl}(\text{sat.})$ มีค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 0.222 V/SHE

ค่ากระแสไฟฟ้าหรือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current, I หรือ current density, j) จะมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่า potential หรือชนิดของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ

ประจุ (Charge) หรือปริมาณไฟฟ้า (Quantity of electricity, Q) [11] ไมเคิล ฟาราเดย์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสกับเวลา โดยปริมาณไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับปริมาณสารที่เปลี่ยนแปลงที่ขั้วไฟฟ้า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านสารละลายอิเล็กโทรไลต์กับระยะเวลาที่ปล่อยให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านซึ่งตามกฎของฟาราเดย์ (Faraday's laws) กฎฟาราเดย์มี 2 ข้อ คือ กฎข้อที่ 1 ปริมาณของผลิตภัณฑ์ (m) ที่ได้จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณประจุ (charge) ที่ใช้ในระบบ และกฎข้อที่ 2 ปริมาณประจุที่ใช้ค่าหนึ่งๆ น้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จะแปรผันตามน้ำหนักสมมูลไฟฟ้า

เคมีของผลิตภัณฑ์ซึ่งไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของสารในสารอิเล็กโทรไลต์ ชนิดของตัวทำละลายและอุณหภูมิจากกฎทั้งสองของฟาราเดย์จะสามารถหาปริมาณของสารที่เกิดปฏิกิริยากับปริมาณกระแสไฟฟ้าได้ คือ

$$m = \frac{sMit}{nF} \quad (2.1)$$

s = stoichiometric coefficient of the species หรือ ค่าสัมประสิทธิ์มวลสารสัมพันธ์ของชนิดสารเคมี โดยปกติจะทำให้ค่า $s = 1$, ฉะนั้นสมการจะได้เป็น

$$m = \frac{Mit}{nF} \quad (2.2)$$

m = น้ำหนักมวลสารที่เกิดปฏิกิริยา (กรัม)

M = มวลอะตอมหรือมวลโมเลกุล

I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

n = จำนวนอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้อง (กรัมสมมูลต่อโมล)

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ = 96,500 คูลอมป์ (แอมแปร์. วินาทีต่อกรัมสมมูล) = 26.8 (แอมแปร์. ชั่วโมงต่อกรัมสมมูล)

t = เวลา (วินาที)

ตัวแปรสารละลาย (Solution variables) สารละลายที่มีสมบัติส่งผลต่อปฏิกิริยาและในระบบ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-เบส ในสารละลาย, ค่าการนำไฟฟ้า, ตัวทำละลายที่ผสมอยู่ในสารละลาย และ ความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility)

2.2.2 ตัวแปรขั้วไฟฟ้า (Electrode parameters)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นบริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารละลาย เนื่องจากบริเวณการกระจายตัวของประจุบนขั้วไฟฟ้ามีความหนาแน่นแตกต่างกับ บริเวณที่ไกลออกไปหรือเรียกอีกอย่างว่า Bulk solution ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้าชนิดที่แตกต่างกันจะมีความสามารถในการแบ่งแยกประจุทางไฟฟ้า และความยากง่ายของการถ่ายโอนประจุเนื่องจากความต้านทานไฟฟ้า โดยขั้วไฟฟ้าจะทำหน้าที่รับหรือจ่ายอิเล็กตรอนระหว่างขั้วไฟฟ้ากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งมีพื้นที่ผิว รูปร่างและลักษณะของขั้วไฟฟ้าเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่กำหนดความเปลี่ยนแปลงของค่าศักย์ไฟฟ้า

2.2.3 ตัวแปรการถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer parameter)

การถ่ายโอนมวลสารเป็นการเคลื่อนที่ของไอออนหรือสารต่าง ๆ ที่อยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในระบบ โดยที่ผิวของขั้วไฟฟ้าสามารถเกิดกลไกได้ 3 กลไก ดังนี้ การแพร่ (Diffusion), การพา (Convection) และ การไมเกรชัน (Migration) โดยสารในระบบจะเกิดการถ่ายโอนมวลสารทั้ง 3 กลไก พร้อม ๆ กันอย่างต่อเนื่อง การไมเกรชันจะเกิดการเคลื่อนที่ของไอออนเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในสารละลาย โดยไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนด และไอออนลบจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด การแพร่จะเป็นการเคลื่อนที่ของไอออนจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปบริเวณที่มีความเข้มข้นของไอออนต่ำจนมีความเข้มข้นของไอออนเท่ากันจะหยุดการแพร่ โดยอัตราของการแพร่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของไอออน ส่วนการพาเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนหรือโมเลกุลเข้าหรือออกจากบริเวณขั้วไฟฟ้าเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นของสารละลายในระบบ และอุณหภูมิ

2.2.4 ตัวแปรภายนอก (External parameter)

ตัวแปรภายนอกที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ขั้วไฟฟ้า คือ อุณหภูมิ, ความดัน และเวลา

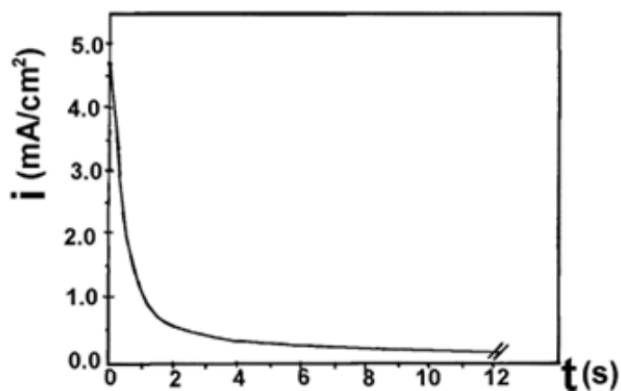
2.3 วิธีการควบคุมการทำงานของกระบวนการเคมีไฟฟ้า

ในการควบคุมกระบวนการทางเคมีไฟฟ้ามีอยู่หลายปัจจัย อาทิเช่น ตัวแปรภายนอก (External parameters) เช่น อุณหภูมิ มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา ความดัน มีผลต่อระบบที่เป็นแก๊ส และเวลา มีผลต่อปริมาณสารที่เกิดปฏิกิริยา ตัวแปรขั้วไฟฟ้า (Electrode parameters) พื้นที่ผิว ลักษณะ รูปร่างของขั้วไฟฟ้า และชนิดของขั้วไฟฟ้า มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ตัวแปรถ่ายโอนมวลสาร (Mass transfer parameters) ลักษณะของการแพร่ (Diffusion) การพา (Convection) การเคลื่อนย้าย (Migration) และความเข้มข้นของไอออนที่พื้นที่ผิวขั้วไฟฟ้า มีผลต่อการทำงานของระบบ ตัวแปรสารละลาย (Solution parameters) สมบัติของสารละลายมีผลต่อปฏิกิริยาและการทำงานของระบบ เช่นความเข้มข้นของสารในสารละลาย pH ค่าการนำไฟฟ้า ค่าความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) สารอื่นๆ ที่ปนอยู่ในสารละลาย เช่น ตัวทำละลาย การวัดกระแสไฟฟ้า และ ศักย์ไฟฟ้าก็เป็นอีกปัจจัยที่สามารถทำได้โดยเครื่องมือวัดทางเคมีไฟฟ้าที่ทำมาจากเซลล์เคมีไฟฟ้า ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วขึ้นไป รวมถึงแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุมค่ากระแสไฟฟ้า และค่าศักย์ไฟฟ้า โดยมีองค์ประกอบพื้นฐานของเซลล์เคมีไฟฟ้าประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ขั้วไฟฟ้าที่มีความว่องไวต่อการวิเคราะห์ เรียกว่าขั้วไฟฟ้าใช้งานหรือขั้วไฟฟ้าบ่งชี้ (Working electrode) และขั้วไฟฟ้าวร่วม (Counter electrode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำให้ระบบครบวงจรโดยจะช่วยให้

ในการส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยปกติแล้วขั้วไฟฟ้าร่วมจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ทำให้สามารถระบุขั้วไฟฟ้าใช้งานได้ แต่ถ้าขั้วไฟฟ้าร่วมมีค่าไม่คงที่สามารถแทนที่ด้วยขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ซึ่งจะสามารถระบุขั้วไฟฟ้าใช้งานได้โดยขั้วไฟฟ้านี้จะมีค่าเฉพาะไม่แปรตามการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร แต่เนื่องจากในระบบไม่สามารถควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าพร้อมกันได้จึงทำให้มีการออกแบบการทดลอง 3 วิธี คือ

2.3.1 แบบโพเทนชิโอสแตติก (Potentiostatic mode) [12]

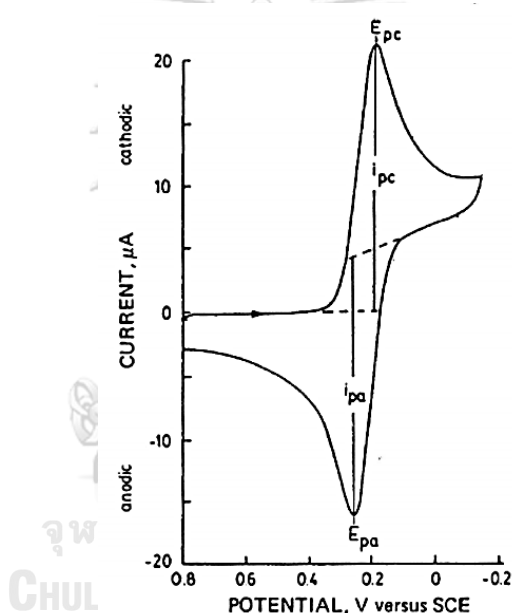
เป็นการควบคุมการทำงานแบบให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยค่ากระแสไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 2 โดยระบบที่ควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ในระบบจะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 3 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าร่วม และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง โดยข้อดีของการควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ คือ สามารถกำจัดไอออนที่ไม่ต้องการออกได้ สามารถควบคุมการเกิดปฏิกิริยาของสารได้โดยการกำหนดหาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสม ตัวอย่างเทคนิคที่ใช้การควบคุมการทำงานแบบให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ คือ เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี



รูปที่ 2 กราฟการควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ [12]

2.3.2 ไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry) [13]

เป็นการควบคุมแบบการตรวจกราดค่าศักย์ไฟฟ้าโดยจะป้อนความต่างศักย์ในช่วงที่เราต้องการ ซึ่งจะทำให้การตรวจกราดจากค่าศักย์ไฟฟ้าบวกจนเกิดค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดเนื่องจากระบบเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน แล้วเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้าไปทางลบจนถึงกระแสไฟฟ้าต่ำสุดเนื่องจากระบบเกิดปฏิกิริยารีดักชัน กราฟไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จะมีความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์กับกระแสไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3 ลักษณะของกราฟที่ปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้จะไม่เกิดพีก ถ้าปฏิกิริยาสามารถผันกลับได้แบบไม่สมบูรณ์จะเกิดพีกที่ไม่สมมาตร และถ้าเกิดแบบสมบูรณ์จะมีลักษณะพีกที่สมมาตร โดยเทคนิคนี้สามารถบอกกลไกการเกิดปฏิกิริยาได้ สามารถบอกได้ว่าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) หรือเกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Reduction reaction) ได้

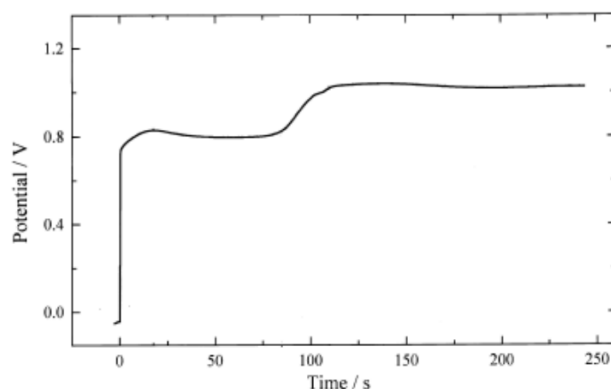


รูปที่ 3 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดปฏิกิริยาแบบสมบูรณ์ [13]

2.3.3 แบบกัลวานอสแตติก (Galvanostatic mode) [14]

เป็นการควบคุมการทำงานแบบให้กระแสไฟฟ้าคงที่ โดยค่าศักย์ไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 4 โดยระบบควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ในระบบจะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าทำงาน และขั้วไฟฟ้าร่วมโดยในระบบสามารถควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางไฟฟ้าได้โดยการคำนวณประจุรวมที่วิ่งผ่านระหว่างทำปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตามค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าใช้งานอาจมีการเปลี่ยนแปลงไป จึงต้องมีกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าในรูปแบบอื่นมาช่วยในการ

วิเคราะห์ ตัวอย่างเทคนิคที่ใช้การควบคุมการทำงานแบบให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ คือ การใช้เครื่องพาวเวอร์ซัพพลาย (Power supply) ในการให้กระแสไฟฟ้า



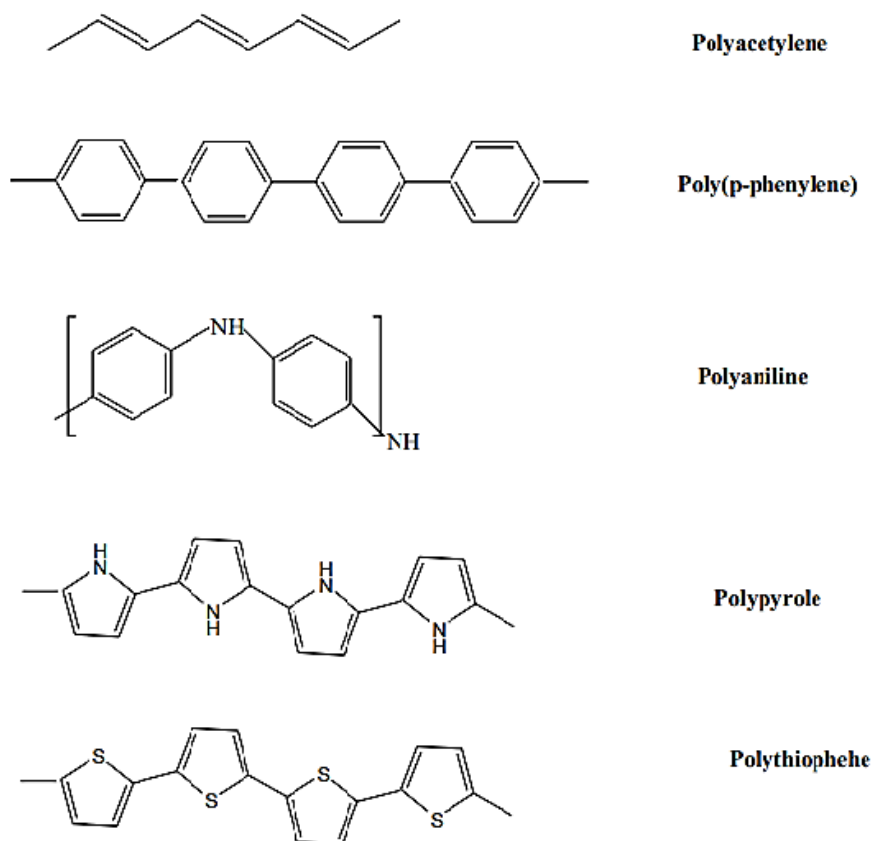
รูปที่ 4 กราฟการควบคุมให้กระแสไฟฟ้าคงที่ [14]

โดยวิธี โปเทนชิโอสเตติก ไซคลิกโวลแทมเมตรี และแบบกัลวานอสเตติก สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ เนื่องจากทำได้ง่ายสามารถควบคุมสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของการเคลือบด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

2.3 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Conductive polymer) [15]

พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Conductive polymer) ถูกค้นพบโดย ศาสตราจารย์ อัลัน เจ ฮีเกอร์ (Alan J. Heeger) ศาสตราจารย์ อัลัน จี แมคไดอาร์มิด (Alan G. MacDiarmid) ชาวอเมริกัน และศาสตราจารย์ ฮิเดกิ ชิรากาวา (Hideki Shirakawa) ชาวญี่ปุ่น ท่านทั้งสามได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมี เมื่อปี ค.ศ. 2000 ที่ร่วมกันศึกษาและค้นพบวิธีการสังเคราะห์ ผลึกพอลิอะเซทิลีน (Crystalline Polyacetylene) ที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงเทียบเท่ากับโลหะ จึงเป็นจุดเริ่มต้นให้นักวิทยาศาสตร์หลายท่านเริ่มสนใจวัสดุพอลิเมอร์ ชนิดนี้มากขึ้น และนำไปใช้งานหลากหลาย อาทิเช่น นำไปใช้เป็นอุปกรณ์สะสมไฟฟ้า (Capacitor) เครื่องส่งสัญญาณ (Sensor) และการป้องกันการกัดกร่อนของขั้วแอโนดสำหรับใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง พอลิเมอร์โดยทั่วไปมักไม่นำไฟฟ้า หรือที่เรียกว่าฉนวน แต่พอลิเมอร์บางชนิดมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ เรียกพอลิเมอร์ชนิดนี้ว่า พอลิเมอร์นำไฟฟ้า ซึ่งพอลิเมอร์ชนิดนี้มีโครงสร้างทางเคมีแบบพันธะคู่สลับเดี่ยว หรือ โพลีคอนจูเกต (π - Conjugated polymers) ทำให้โครงสร้างดังกล่าวสามารถเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโมเลกุลได้ ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่สามารถ

นำไฟฟ้าได้ เช่น พอลิไพร์โรล (Polypyrrole, PPy), พอลิอะนิลีน (Polyaniline, PAn), พอลิอะเซทีลีน (Polyacetylene, PAc) และ พอลิธิโอเฟน (Polythiophene, PTh) แสดงดังรูปที่ 5

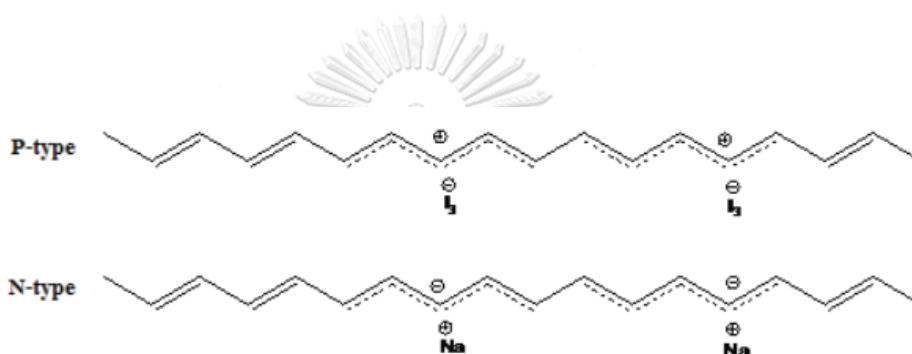


รูปที่ 5 ลักษณะโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ [15]

พอลิเมอร์เมื่ออยู่ในสภาวะปกติหรือสภาวะที่เป็นกลางจะไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ แต่เมื่อถูกกระตุ้น หรือ โด๊ป (Dope) เพื่อไม่ให้เกิดโครงสร้างที่ไม่เป็นกลาง เช่น การทำให้ประจุบวกเกิดขึ้นในโครงสร้าง หรือ การเติมโปรตอน (Protonation) จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ชนิดนั้นมีค่าสูงขึ้น โดยการกระตุ้น หรือการโด๊ป (Doping) นั้นในทางเคมีหมายถึง การทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยอาจจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือ เกิดปฏิกิริยารีดักชัน (Oxidation – Reduction reaction) โดยขึ้นอยู่กับชนิดของสารกระตุ้นพาหะประจุ (Dopant) ที่เติมลงไปกระตุ้น มี 2 ประเภท คือ P-dopant และ N-dopant แสดงดังรูปที่ 6

P-dopant เป็นสารที่ขาดอิเล็กตรอนเติมลงไปเพื่อให้ต้องการรับอิเล็กตรอนหรือตัวออกซิไดส์ในทางเคมี ดังนั้นกระบวนการกระตุ้นสารด้วย P-dopant คือ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโมเลกุลพอลิเมอร์ สารกระตุ้นพาหะประจุในกลุ่มนี้ ได้แก่ I_2 , AsF_5 , $FeCl_3$, H_2SO_4 , $HClO_4$

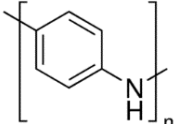
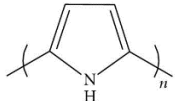
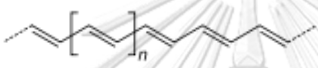
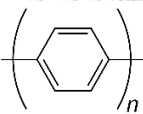
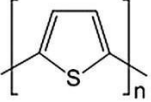
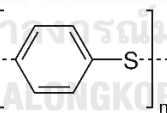
N-dopant เป็นสารที่มีอิเล็กตรอนมากเติมลงไปเพื่อต้องการให้อิเล็กตรอนหรือตัวรีดิวซ์ในทางเคมี และ กระบวนการกระตุ้นสารด้วย N-dopant คือ กระบวนการเกิดปฏิกิริยารีดักชันกับโมเลกุลของพอลิเมอร์ สารกระตุ้นพาหะประจุในกลุ่มนี้ ได้แก่ โซเดียม หรือโพแทสเซียม



รูปที่ 6 การกระตุ้นให้เกิดพาหะประจุ แบบชนิด P และ N ด้วยสารกระตุ้นพาหะประจุชนิดต่างๆ [16]

โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ผ่านการกระตุ้นพาหะประจุแล้วจะมีประจุบวกหรือประจุลบเกิดขึ้นบนสายโซ่หลัก โดยมีสารกระตุ้นพาหะประจุซึ่งมีประจุตรงข้ามกับโมเลกุลพอลิเมอร์ทำหน้าที่เป็น Counterion ช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น Na^+ , K^+ , I_3^- , I_5^- , AsF_6^- , $FeCl_4^-$ พอลิเมอร์สามารถเปลี่ยนสภาพตัวเองให้สามารถนำไฟฟ้าได้ การโด๊ปทำให้พอลิเมอร์เหล่านี้ซึ่งเดิมเป็นฉนวนไฟฟ้าหรือกึ่งตัวนำไฟฟ้าในช่วง 10^{-10} ถึง 10^{-5} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เปลี่ยนไปเป็นวัสดุsemioโลหะที่มีค่าการนำไฟฟ้าในช่วง 1 ถึง 10^4 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ได้ แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 โครงสร้างและค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นชนิดต่างๆ [15]

พอลิเมอร์นำไฟฟ้า	โครงสร้าง	วิธีการโด๊ป (Doping)	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนตต่อเซนติเมตร)
พอลิอะนิลีน		เคมีไฟฟ้า เคมี (HCl, R-SO ₃ H)	1-400
พอลิไพร์โรล		เคมีไฟฟ้า เคมี (FeCl ₃ , BF ₃)	10 ² -10 ³
พอลิอะเซทิลีน		เคมีไฟฟ้า เคมี (AsF ₅ , I ₂ , Li, K)	10 ⁴ -10 ³
พอลิพาราฟินิลีน		เคมี (AsF ₅ , I ₂ , Li, K)	10 ² -10 ³
พอลิไทโอฟีน		เคมีไฟฟ้า เคมี (FeCl ₃ , BF ₃)	10-10 ³
พอลิฟีนิลีนซัลไฟด์		เคมี (AsF ₅)	100-500

นอกจากนี้ระดับหรือองศาการโด๊ป (Degree of doping) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้ายังสามารถควบคุมได้อีกด้วย และที่สำคัญ คือ สภาพตัวนำและฉนวนไฟฟ้าของพอลิเมอร์ กล่าวคือการโด๊ปและการดีโด๊ป (Doping-dedoping) สามารถเกิดซ้ำได้ไม่จำกัด จึงมีสมบัติเป็นสวิตช์ (Switching property) นอกจากนี้ในกระบวนการโด๊ปและดีโด๊ป ซึ่งมีการเข้าออกของสารโด๊ปในโครงสร้างของพอลิเมอร์ นอกจากนี้อาจเกิดสภาพตัวนำไฟฟ้าและฉนวนแล้ว ยังมักทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติอื่นด้วย เช่น สี และปริมาตร ทำให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าจัดเป็นวัสดุแอคทีฟ (Active materials)

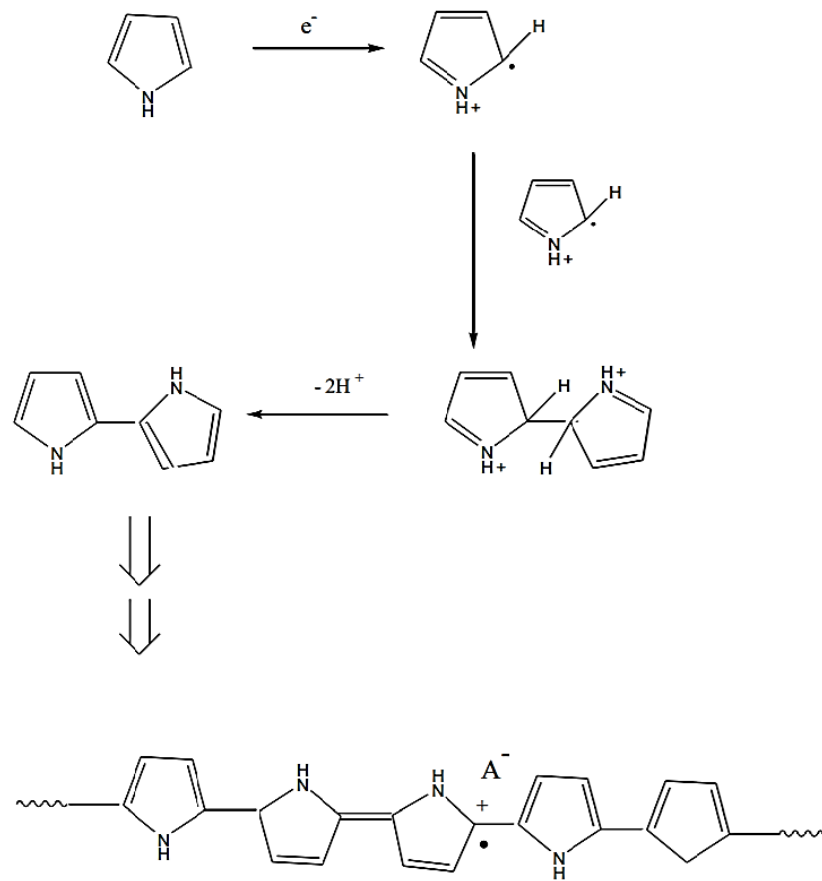
พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ถูกลำนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุด ได้แก่ พอลิอะนิลีน, พอลิไพร์โรล และพอลิไทโอฟีน เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วงที่ใช้ประโยชน์ได้และมีความเสถียร ส่วนพอลิอะเซทีลีนแม้จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดในบรรดาพอลิเมอร์ทั้งหมด แต่มีความเสถียรต่ำเมื่ออยู่ในสภาวะบรรยากาศ

2.4 กลไกในการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยวิธีทางไฟฟ้าเคมี [17]

การสังเคราะห์พอลิเมอร์โมเลกุลขนาดใหญ่จากมอนอเมอร์หลาย ๆ มอนอเมอร์มารวมกันมาเคลือบบนขั้วไฟฟ้าที่เราต้องการหรือบนวัสดุต่าง ๆ โดยวิธีเคมีไฟฟ้า เรียกระบวนการนี้ว่า อิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน (Electropolymerization) โดยกระบวนการนี้เริ่มจากการผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปยังสารละลายที่มีมอนอเมอร์ผสมอยู่ด้วยเพื่อให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) โดยส่วนใหญ่แล้วมอนอเมอร์มักเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) โดยมอนอเมอร์จะสูญเสียอิเล็กตรอนเกิดเป็นประจุบวก และอนุมูลอิสระ (Radical cation หรือ Polaron) โดยถ้าหากพิจารณาว่าเป็นไพร์โรลมอนอเมอร์ซึ่งไพร์โรลมอนอเมอร์จะมีโครงสร้างเป็นรูปวงแหวน 5 เหลี่ยม หรือ Heterocyclic พบว่า จะมีการสูญเสียอิเล็กตรอนที่ตำแหน่ง ortho หรือ 2 และ 5 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูงที่สุด จากนั้น Radical cation จะเกิดปฏิกิริยารวมตัวกัน (Coupling) เกิดเป็น Dimer cation หรือเรียกว่า Bi polaron ซึ่งหลังจากนั้น Dimer cation จะเกิดการสูญเสียโปรตอนได้เป็นไดเมอร์ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะสังเกตได้ว่าค่า pH ในสารละลายมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ จากนั้นไดเมอร์ที่เกิดขึ้นก็จะสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อโดยจะถูกออกซิไดส์ได้เป็น Dimer radical cation และเกิดปฏิกิริยาต่อไปจนกระทั่งได้เป็นโอลิโกเมอร์และพอลิเมอร์ในที่สุด จะสังเกตได้ว่าอนุมูลอิสระในตัวกลาง Radical cation จะสามารถเกิดการรวมตัวกันเป็นไดเมอร์ได้ถึงแม้ว่าจะมีประจุบวกอยู่ในโมเลกุลของ Radical cation ที่จะรวมตัวกันเองด้วยก็ตาม ทั้งนี้การรวมตัวกันเกิดขึ้นได้เนื่องจากตำแหน่งของอนุมูลอิสระไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันกับประจุบวก ซึ่งในกรณีของพอลิไพร์โรลประจุบวกจะอยู่ที่อะตอมของไนโตรเจน อีกทั้งอนุมูลอิสระดังกล่าวสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งหรือการ Delocalize ไปรอบ ๆ วงแหวนได้จึงทำให้เกิดการรวมตัวกันได้หลายรูปแบบแสดงดังรูปที่ 7

พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในรูปของโมเลกุลที่ถูกออกซิไดส์ ซึ่งจะไปเคลือบอยู่บนผิวของขั้วไฟฟ้าอิเล็กโทรดในที่นี้ คือ ขั้วแอโนด โดยเมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันไปเรื่อย ๆ จนกลายเป็นโอลิโกเมอร์ที่เกิดขึ้นมีความยาวโมเลกุลถึงจุด ๆ หนึ่ง จะเริ่มเกิดการตกสะสมหรือ Deposition ลงบนผิวของขั้วไฟฟ้าบริเวณจุดที่เป็นนิวเคลียส หรือ Nucleation site จากนั้นพอลิ

เมอร์ที่เกิดขึ้นจะเกิดการตกตะกอนซ้อนทับกันจนมีความหนาของชั้นฟิล์มพอลิเมอร์สูงถึงระดับไมโครเมตร ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ในกรณีของ พอลิไพโรลฟิล์มที่ได้จะมีลักษณะสีดำอยู่ในรูปของ Doped form แต่เมื่ออยู่ในสภาพที่เป็นกลาง หรือ Non-conducting form จะมีลักษณะสีเหลือง



รูปที่ 7 การเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน [18]

โดยกระบวนการนี้ต้องมีการควบคุมภาวะการเกิดปฏิกิริยาอย่างระมัดระวัง ซึ่งในปัจจุบันกระบวนการนี้นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีข้อดี คือ ใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าในการสังเคราะห์ไม่สูงมาก และใช้มอนอเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งทำให้สามารถละลายในสารละลายได้ดี นอกจากนี้ไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูงในการเคลือบ และไม่ต้องใช้ภาวะที่รุนแรงในการสังเคราะห์เนื่องจากทำได้ที่ภาวะบรรยากาศ และอุณหภูมิห้อง ใช้ค่ากระแสไฟฟ้าหรือความต่างศักย์ที่ป้อนต่ำ อีกทั้งการสังเคราะห์นี้มีตัวกลางที่ไม่มีส่วนผสมของโลหะหนักผสมอยู่ จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ต้นทุนวัสดุที่ใช้และการกำจัด

ของเสียค่อนข้างต่ำ และยังสามารถควบคุมการเคลือบได้โดยการควบคุมตัวแปรทางด้านกระบวนการเคมีไฟฟ้า โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน มีดังนี้

ตัวทำละลาย ตัวทำละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์ต้องมีค่า Dielectric constant สูงเพื่อให้ไอออนได้ดี และควรทนต่อการเสื่อมสภาพภายใต้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการออกซิไดส์มอนอเมอร์ โดยตัวทำละลายที่ใช้จะต้องไม่มีความเป็น Nucleophile สูง เนื่องจากจะไปรบกวนทำให้เกิด Radical cation ส่งผลให้เกิดโครงสร้างของพอลิเมอร์เป็นแบบ Conjugation และค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์มีค่าลดลง โดยตัวทำละลายที่นิยมใช้ส่วนใหญ่เป็นประเภท Polar aprotic solvent คือ ตัวทำละลายที่มีขั้วแล้วไม่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้ อาทิเช่น กรดพาราโทลูอินซัลโฟนิค (P-toluene sulfonate) กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค (Dodecylbenzene sulfonic acid, DBSA) [17]

อิเล็กโทรไลต์ สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะต้องละลายได้ดีในตัวทำละลาย และสามารถเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ดี นอกจากนั้นควรคำนึงถึงไอออนลบที่เกิดการแตกตัวด้วย เนื่องจากไอออนลบจะทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้น Dopant ในระบบ ผลกระทบของความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีต่อการสังเคราะห์พอลิเมอร์ คือ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น [19] ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าสูงขึ้น หรืออาจจะเป็นผลเนื่องมาจากการที่ Radical cation ที่กำลังเกิดปฏิกิริยามีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากมีไอออนลบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มากขึ้น

ขั้วไฟฟ้า ในกรณีที่ใช้ขั้วโลหะที่มีความว่องไว หรือ Active metal เช่น ไททาเนียม (Ti), เหล็ก (Fe), สแตนเลส (Stainless steel), ทองแดง (Cu) หรือ อะลูมิเนียม (Al) เป็นอิเล็กโทรด พบว่าจะเกิดฟิล์มออกไซด์ของโลหะดังกล่าวเกิดขึ้น โดยออกไซด์ของโลหะเหล่านี้จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากมีน้ำเป็นตัวทำละลายหรือในตัวทำละลายอินทรีย์ที่อาจจะมีน้ำแฝงอยู่ในปริมาณเล็กน้อยก็ตาม ซึ่งการเกิดฟิล์มออกไซด์บนโลหะที่ใช้เป็นขั้วจะเข้าไปรบกวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์บนแผ่นโลหะที่ใช้ในการเคลือบ โดยทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดออกซิเดชันของพอลิเมอร์ในกรณีพอลิพีโรลมีค่าสูงขึ้น และทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามีค่าลดลง หรืออาจจะสามารถยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาได้ [20] ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มออกไซด์ของโลหะจะทำหน้าที่เป็นกำแพงกั้นไม่ให้เกิดการถ่ายโอนของประจุในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา ทำให้ไม่สามารถสังเคราะห์พอลิเมอร์บนขั้วที่เราต้องการเคลือบได้

สารกระตุ้น สารกระตุ้น หรือ Dopant คือไอออนลบที่แตกตัวมาจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งไอออนลบจะเคลื่อนที่เข้าและออกระหว่างการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของฟิล์มพอลิเมอร์ ดังนั้น สารกระตุ้นหรือไอออนลบควรจะมีขนาดเล็กและมีความสามารถในการเคลื่อนที่สูง ตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์พอลิไพร์โรลโดยใช้เปอร์คลอเรตไอออนเป็นสารกระตุ้น พบว่าศักย์ไฟฟ้าของระบบที่ใช้มีค่าสูงมาก เนื่องจากการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลเกิดได้ยากมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากเปอร์คลอเรตไอออนมีขนาดใหญ่ และมีความสามารถในการเคลื่อนที่ต่ำ

อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะมีผลทั้งอัตราการเกิดปฏิกิริยา และค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่ได้ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยา การสังเคราะห์พอลิเมอร์สูงขึ้น [21] แต่ค่าการนำไฟฟ้าพอลิเมอร์จะมีค่าลดลงตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น [17] ตัวอย่างเช่น การสังเคราะห์พอลิไพร์โรลที่อุณหภูมิต่ำ หรือ -20 องศาเซลเซียส จะได้พอลิเมอร์ที่มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 300 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ในขณะที่การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จะได้พอลิเมอร์ที่มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 100 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการใช้อุณหภูมิที่สูงมีผลทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น เช่นตัวทำละลายไปทำปฏิกิริยากับอนุภาคอิสระของพอลิเมอร์ส่งผลให้ฟิล์มพอลิเมอร์มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำลง อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำก็ทำให้ผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้มีความขรุขระ และการยึดเกาะไม่ดีมากเท่าที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิที่สูง

เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ส่งผลต่อโครงสร้าง รูปร่าง และการยึดเกาะของฟิล์มพอลิเมอร์ การให้ค่ากระแสไฟฟ้าและค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่จะทำให้เกิดโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อน พอลิเมอร์มีความเป็นเนื้อเดียวกันต่ำ เนื่องจากการปนเปื้อนของสารละลายระหว่างขั้วไฟฟ้า และฟิล์มพอลิเมอร์ แต่สามารถกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ให้มีพอลิเมอร์ที่มีเนื้อเรียบเป็นเนื้อเดียวกัน และยึดเกาะได้ดีได้ ส่วนการเคลือบด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี จะมีลักษณะของฟิล์มพอลิเมอร์ที่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีการยึดเกาะของเนื้อฟิล์มที่ดี

เวลา มีผลต่อลักษณะสัญญาณ และปริมาณของสารที่พอกพูนได้

การกวน การกวนสารทำได้โดยใช้แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic stir) หรือการหมุนขั้วไฟฟ้า (Rotating electrode) ทำให้เกิดการถ่ายเทไอออนได้ดีบริเวณพื้นผิวขั้วไฟฟ้าขั้วงาน และ

ทำให้เกิดการพอกพูนดีชั้น เนื่องจากเป็นการช่วยการถ่ายเทมวลสารจากสารละลายไปยังขั้วไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น

2.5 การกัดกร่อน (Corrosion)

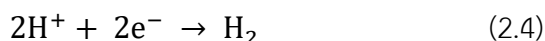
การกัดกร่อน หรือ การสึกหรอทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุ เช่น โลหะ อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible) ทำให้เกิดการสูญเสียเนื้อโลหะไปเรื่อย ๆ ดังนั้นเพื่อไม่ให้โลหะเกิดการกัดกร่อนจึงต้องป้องกันการกัดกร่อนโดยการไม่ให้โลหะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนั่นเอง โดยสามารถดูได้จากค่า E^0 ของโลหะ เช่น ทองคำมีค่า E^0 ครึ่งเซลล์รีดักชันสูงที่สุดจะทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ยาก หรือเกิดการกัดกร่อนได้ยากขึ้น ส่วนโลหะที่มีค่า E^0 ครึ่งเซลล์รีดักชันน้อย ๆ ส่งผลต่อการเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายขึ้น แต่อย่างไรก็ตามโลหะไม่จำเป็นต้องเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เกิดการกัดกร่อนได้อย่างเดียว ยังสามารถเกิดปฏิกิริยาการยับยั้งการเกิดออกซิเดชันได้ด้วยเกิดการป้องกันการกัดกร่อนได้เมื่อเกิดฟิล์มออกไซด์ของโลหะ โดยฟิล์มออกไซด์ของโลหะที่เกิดขึ้นสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ โดยปฏิกิริยาการกัดกร่อนของโลหะต้องมีปัจจัยที่ครบสำหรับการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ปฏิกิริยารีดักชัน มีการรับและให้อิเล็กตรอนในตัวกลางสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังสมการ

โดยโลหะจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันทำหน้าที่เหมือนขั้วแอโนด

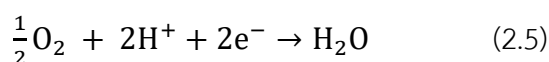


โดยสารออกซิไดส์ (Oxidizing agent) จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน จะอยู่ในรูปของของเหลว เช่น กรด ต่าง หรือแก๊สออกซิเจน เกิดปฏิกิริยา ดังนี้

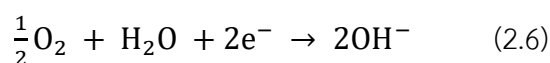
สารชนิดกรดที่ไม่อากาศ หรือมีความเข้มข้นของออกซิเจนน้อยมากเมื่อเทียบกับไฮโดรเจน



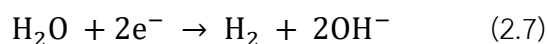
สารชนิดกรด และมีอากาศละลายอยู่ โดยมีความเข้มข้นของออกซิเจนมากเมื่อเทียบกับไฮโดรเจน



สารชนิดกลางหรือเบสมีความเข้มข้นของออกซิเจนปนอยู่มาก



สารที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนปนอยู่น้อย



ดังนั้นตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมี คือ โครงสร้างของโลหะ ความเป็นกรด-เบส สมบัติทางกายภาพ อุณหภูมิ โครงสร้างของโลหะ องค์ประกอบทางเคมีของโลหะ

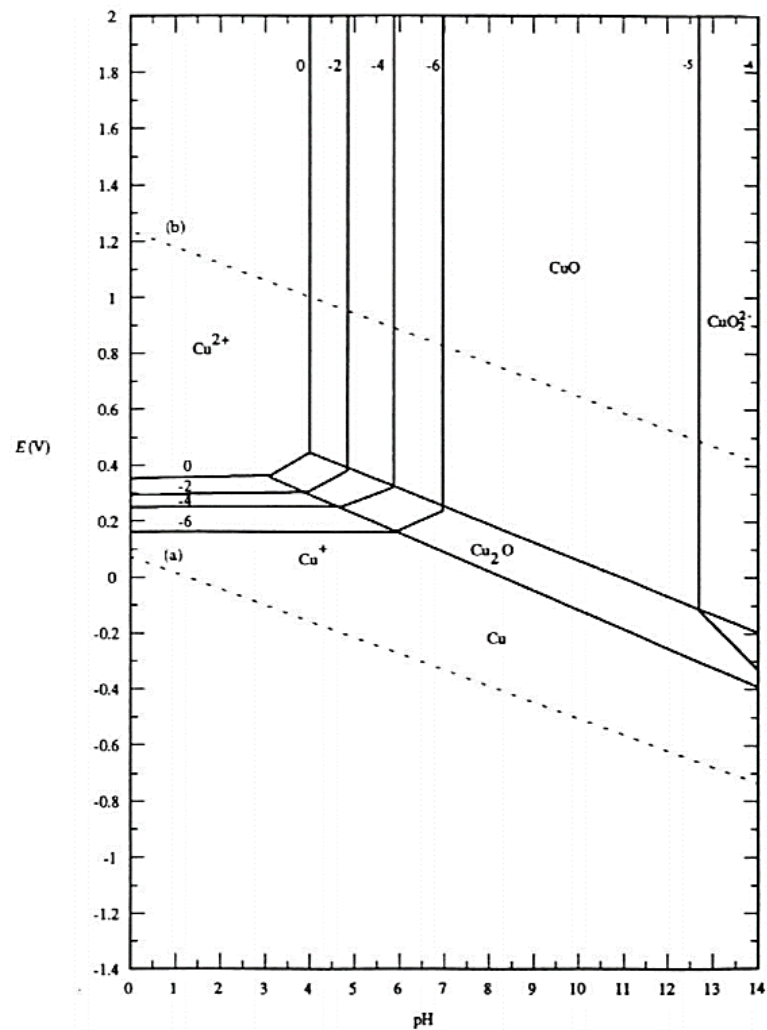
2.5.1 การกัดกร่อนทางเซลล์เคมีไฟฟ้า

โลหะส่วนใหญ่เกิดการกัดกร่อนผ่านทางปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าผ่านระหว่างผิวขั้วไฟฟ้ากับ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ แผนภูมิ Pourbaix แสดงดังรูปที่ 8 [22] ตั้งชื่อตามผู้คิดค้น คือ Prof. Macel Pourbaix โดยจะมีแผนภูมิ Pourbaix ของโลหะแต่ละชนิดแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ศักย์ไฟฟ้ากับค่าความเป็น กรด-เบส ที่แต่ละรูปแบบของไอออน การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ โลหะปฏิกิริยารีดักชันของโปรตอนและออกซิเจน ที่จะแสดงบนแผนภูมิ Pourbaix โดยในแผนภูมิจะ แสดงโซนต่าง ๆ ไว้ 3 โซน ดังนี้

การมีภูมิคุ้มกัน (Immunity) เป็นโซนที่โลหะมีความเสถียรสามารถทนการกัดกร่อนได้ดี ที่สุดส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วงศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าเป็นลบมาก ๆ อยู่ในภาวะอยากรับอิเล็กตรอน

การกัดกร่อน (Corrosion) เป็นโซนที่สามารถเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายที่สุดพร้อมจ่าย อิเล็กตรอนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดีที่สุด เมื่อสังเกตจากแผนภูมิที่บริเวณเส้นประ a และ b โดย เส้นประ a บ่งบอกถึงสภาวะที่น้ำจะเกิดไอออนไฮดรอกไซด์ได้แก่ไฮโดรเจนที่ความดัน 1 บรรยากาศ และ เส้นประ b บ่งบอกถึงสภาวะที่เกิดแก๊สออกซิเจนที่ความดัน 1 บรรยากาศ ซึ่งบ่งบอกถึงภาวะที่ขึ้นกับ ค่าความเป็น กรด-เบส และศักย์ไฟฟ้าขณะนั้นด้วย

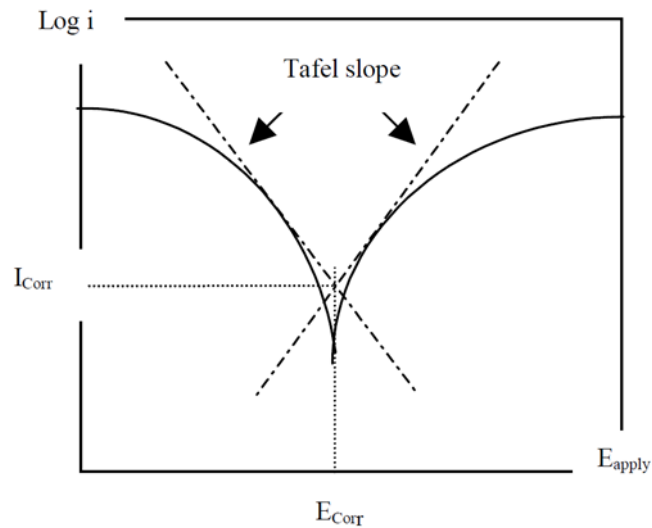
การเกิดพาสซีเวชัน (Passivation) เป็นโซนที่โลหะเกิดปฏิกิริยาในการสร้างแผ่นฟิล์มหรือ เปลี่ยนโครงสร้างของผิวโลหะที่เคลือบบริเวณพื้นผิวของโลหะสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ ที่ภาวะ นี้จะขึ้นอยู่กับค่าความเป็น กรด-เบส และค่าศักย์ไฟฟ้าขณะนั้น เช่นเดียวกับโซนการกัดกร่อน



รูปที่ 8 แผนภูมิ Pourbaix ของโลหะทองแดง [22]

แผนภูมิ Pourbaix ไม่สามารถระบุได้ว่าโลหะชนิดนี้สามารถเกิดอัตราการกัดกร่อนได้เร็วหรือช้า แต่สามารถระบุอัตราการกัดกร่อนได้จาก ชนิดของโลหะ สภาวะแวดล้อม อุณหภูมิ และชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ สามารถทราบค่าอัตราการกัดกร่อนได้จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ของทافلแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าศักย์ไฟฟ้ากับค่ากระแสไฟฟ้า [23] แสดงดังรูปที่ 9 โดยกราฟจะได้จากโลหะในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ไม่มีออกซิเจน ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนจะไม่มีค่ากระแสไฟฟ้ารวม เนื่องจากค่าปฏิกิริยาการเกิดออกซิเดชันของโลหะเท่ากับค่าปฏิกิริยารีดักชันของน้ำ จะสามารถรู้ค่ากระแสไฟฟ้ากัดกร่อนได้จากกราฟความสัมพันธ์ทافلนั่นเอง แต่ถ้าในระบบมีออกซิเจนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะทำให้ภาวะการกัดกร่อนมีความรุนแรงมากกว่าได้ค่ากระแสกัดกร่อนน้อยกว่า หรือเกิดการกัดกร่อนได้ง่ายกว่าที่ไม่มีออกซิเจนรวมอยู่ด้วย นอกจากนี้ค่ากระแสกัด

กร่อนจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ ชนิดของโลหะ ค่ากระแสไฟฟ้าแลกเปลี่ยน i_0 ค่าศักย์สมดุลของโลหะ และสารออกซิไดส์



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ของทาเฟลในกระบวนการกัดกร่อน [23]

กระแสกัดกร่อนสามารถคำนวณได้จากสมการของทาเฟล ดังนี้
ปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะ คำนวณจาก

$$E_{cor} - E_{eq,M} = -b_M \log j_{cor} + b_M \log j_{0,M} \quad (2.8)$$

ปฏิกิริยารีดักชันไฮโดรเจนหรือของน้ำ คำนวณจาก

$$E_{cor} - E_{eq,H^+} = b_{H^+} \log j_{cor} - b_{H^+} \log j_{0,H^+} \quad (2.9)$$

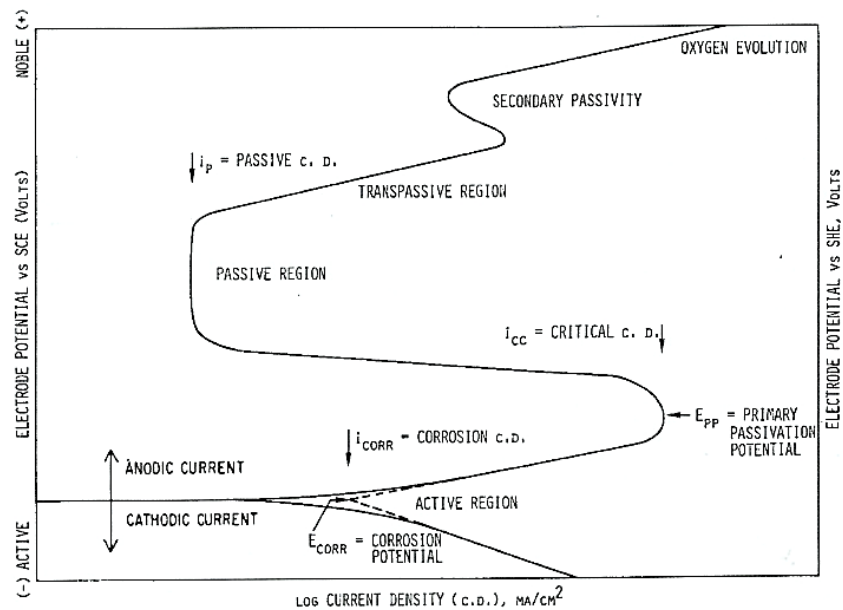
เมื่อ

$$b_M = -\frac{2.303RT}{\alpha_M n F} \quad (2.10) \quad b_{H^+} = -\frac{2.303RT}{\alpha_{H^+} n F} \quad (2.11)$$

อัตราการกัดกร่อนสามารถหาได้จาก มวลที่หายไปต่อหน่วยเวลา, ค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดกับความสัมพันธ์ของพาราเดย์โดยใช้ค่ากระแสไฟฟ้าจากสมการทาเฟล (Tafel equation) และการลดลงของความหนาต่อพื้นที่ต่อเวลา ดังสมการ

$$\text{อัตราการกัดกร่อน} = \frac{MW_M j_{cor}}{\rho n F} \quad (2.12)$$

โดยโลหะเมื่อจุ่มลงสารละลายที่เป็นสารออกซิไดส์ในบางครั้งก็ไม่จำเป็นต้องเกิดการกัดกร่อนของโลหะเสมอไป ตัวอย่างเช่น เหล็กเมื่อจุ่มลงในสารละลายออกซิไดส์เข้มข้นของกรดไนตริกจะไม่เกิดการกัดกร่อนเกิดเป็นชั้นฟิล์มของออกไซด์บางที่ไม่ละลายเคลือบที่ผิวหน้าของโลหะ ทั้งนี้เนื่องจากฟิล์มออกไซด์ของเหล็กสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้จึงเรียกรวมการเกิดปรากฏการณ์นี้ว่าการเกิดแพสซิชั่น (Passivation) โดยปรากฏการณ์นี้สามารถหาได้จากการทดลองทางเคมีไฟฟ้าที่หากราฟโพลารไรเซชัน โดยปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่ได้จากการทดลองเริ่มแรกจะพบว่าเห็นที่ค่าศักย์ไฟฟ้าหนึ่งโลหะเริ่มเกิดการกัดกร่อนแสดงจุดตัดของเส้นกราฟแคโนดิกและเส้นกราฟแอนอดิกสามารถหาค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) และค่ากระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (I_{corr}) ได้ โดยมีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นเป็นไอออนของโลหะ เมื่อเกิดการกัดกร่อนมากขึ้นเรื่อย ๆ ตามกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นตามการเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าเกินตัวจากนั้นเมื่อมีการเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้ามากขึ้นไปอีกถึงค่าหนึ่งพบว่ากระแสไฟฟ้ามีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนเกือบไม่มีกระแสไฟฟ้าผ่าน และเมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ก็พบว่ายังไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเนื่องจากมีการเกิดชั้นฟิล์มออกไซด์เคลือบบริเวณผิวหน้าของโลหะ เรียกช่วงศักย์ช่วงนี้ว่า ช่วงแพสซิฟ (Passive region) เมื่อมีการเพิ่มค่าศักย์มากกว่านี้จะเริ่มเกิดกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นใหม่และเพิ่มอย่างรวดเร็ว ซึ่งบริเวณนี้เป็นช่วงทรานสปาสซิฟ (Transpassive region) เกิดการแตกของฟิล์มออกไซด์มีลักษณะการกัดกร่อนแบบรูเข็ม (Pitting corrosion) หรือหลุมที่ใหญ่ขึ้นเมื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะเกิดการแตกของชั้นฟิล์มออกไซด์ที่มากขึ้นและเกิดแก๊สออกซิเจนด้วย แสดงดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 บริเวณที่สำคัญของกราฟโพลาริเซชันของโลหะ ที่ภาวะการกัดกร่อน [24]

2.5.2 ลักษณะของการกัดกร่อน

ลักษณะของการกัดกร่อนนั้นมีหลายชนิด โดยอาศัยลักษณะรูปร่างของการผุกร่อน สามารถจำแนกได้ดังนี้ แสดงดังรูปที่ 11

การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform or general attack corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่มีการกัดกร่อนทั่วกันตลอดทั้งผิวที่ติดกับอิเล็กโทรด โลหะจะค่อย ๆ บางลงจนไม่สามารถใช้งานได้อีก

การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic or two – metal corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่ต้องประกอบไปด้วยโลหะ 2 ชนิด ได้แก่ โลหะที่ขี้วแอโนด และโลหะที่ขี้วแคโทด โดยโลหะที่ขี้วแอโนดจะเกิดการกัดกร่อนอาจจะเกิดการกัดกร่อนเฉพาะจุดหรือมีอาณาเขตที่กว้างขึ้นได้

การกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion) เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ (Localized attack) รูปแบบหนึ่ง ถึงแม้ว่าการกัดกร่อนแบบนี้จะเกิดการสูญเสียเนื้อโลหะเป็นปริมาณเล็กน้อย แต่เป็นอันตราย มากเนื่องจากเป็นการเสียหายแบบฉับพลัน โดยจะเกิดการทะลุเป็นรูและตรวจสอบการกัดกร่อนได้ยาก เพราะมีขนาดเล็กและถูกปกคลุมไปด้วยผลิตภัณฑ์อื่น ๆ จากการกัดกร่อน (Corrosion product) เช่น ออกไซด์ฟิล์ม ซึ่งจะทำให้มีแรงขับเคลื่อน (Driving force) ซึ่งจะทำให้

กระแสกัดกร่อนไหลลงไปในหลุมสูง พบบ่อได้ในสารละลายที่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ เช่น น้ำทะเล

การกัดกร่อนขอบเกรน (Intergranular corrosion) มักเกิดกับเหล็กกล้าไร้สนิม ในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อโดยเหล็กจะสูญเสียโครเมียมในรูปแบบคาร์ไบด์เมื่อเกิดการสูญเสียจะขาดโครเมียมในการสร้างการป้องกันเหล็กโดยมากมักเกิดขึ้นบ่อยกับเหล็กกล้าไร้สนิม ชนิด 18-8 ที่ได้รับการชุบเหล็กกล้ามาแบบไม่ถูกต้อง ทำให้มีปริมาณของโลหะน้อยกว่าโครเมียมจะมีปริมาณที่น้อยกว่าปกติ โดยเหล็กชนิดนี้อาศัยโครเมียมเป็นตัวป้องกันการผุกร่อนเพราะเกิดออกไซด์ปกป้องผิวของเหล็ก

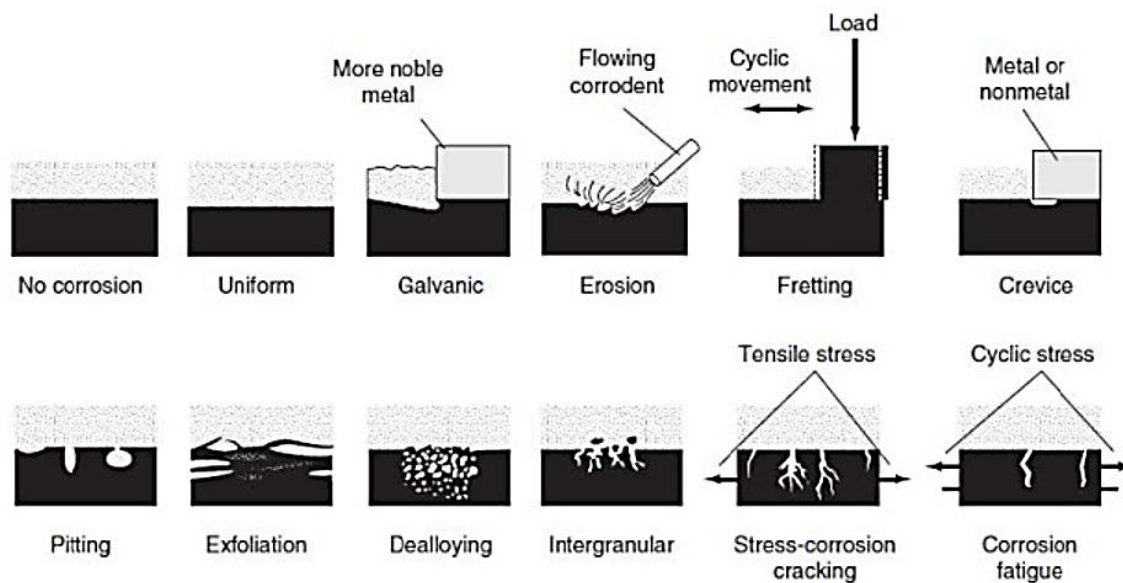
การกัดกร่อนแบบถูครูด (Fretting corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในสภาวะบรรยากาศปกติ บริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างโลหะเมื่อโลหะนั้นกำลังถูกแรงกระทำ

การกัดกร่อนบริเวณช่องแคบ (Crevice corrosion) เป็นการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าที่สามารถเกิดขึ้นได้จากรอยแยก รอยร้าว และภายใต้เกราะป้องกันผิวที่มีสารละลายอยู่

การกัดเซาะ (Erosion corrosion) มักเกิดกับเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่ต้องใช้น้ำหรือของเหลวที่ใช้ความเร็วสูง เช่น ใบพัดของเครื่องสูบน้ำ ข้อเสี้ยวของท่อ และ อื่น ๆ สาเหตุเกิดจากการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าแบบธรรมดา และเศษหรือผงที่มากระทบพร้อมกับแรงของน้ำ

การสูญเสียส่วนผสมบางตัว (Selective leaching) เป็นรูปแบบหนึ่งของการกัดกร่อนซึ่งเกิดโดยการละลายของธาตุบางตัวจากโลหะอัลลอยด์ เป็นผลมาจากการกระทำของสิ่งแวดล้อมโลหะที่ว่างไว้ออกจากอัลลอยด์ เหลือไว้แต่โครงสร้างพูนซึ่งเต็มไปด้วยโลหะเสถียรที่สุด วัสดุที่เหลือจึงสูญเสียความแข็งแรงทางกายภาพไปมาก การกัดกร่อนแบบนี้มีชื่อตามธาตุที่ละลายออกมา เช่น ถ้าสังกะสีละลายออกมาเรียกว่า Dezincification

การแตกร้าวจากแรงเค้นและการกัดกร่อน (Stress corrosion) เป็นการกัดกร่อนที่เป็นผลมาจากการกัดกร่อนรวมกับความเค้นในเนื้อโลหะ โดยส่วนใหญ่มักเริ่มเกิดบริเวณจุดใดจุดหนึ่งบนแผ่นโลหะแบบหลุม ซึ่งจะเป็จุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนประเภทนี้ โดยกันหลุมจะมีความเค้นเพิ่มขึ้นมากจนทำให้โลหะสามารถแยกออกจากกันได้



รูปที่ 11 ภาพจำลองแสดงการกัดกร่อนลักษณะต่าง ๆ

2.5.3 การป้องกันการกัดกร่อน

การป้องกันการกัดกร่อนสามารถทำได้หลายวิธี โดยต้องมีการออกแบบอุปกรณ์ที่ดีเพื่อไม่ให้เอื้อต่อการกัดกร่อน เช่น หลีกเลี่ยงการใช้ขั้วไฟฟ้าแอโนดและแคโทดตัวเดียวกันซึ่งจะทำให้เกิดการกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion) หรือลดปริมาณคลอไรด์ลงเพื่อไม่ให้เกิดการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion) หรือการเติมสารเคมีบางอย่างเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของโลหะ และปฏิกิริยารีดักชัน เนื่องจากการกัดกร่อนเกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยการป้องกันการกัดกร่อนนั้นมีหลายวิธี ดังนี้

การเลือกโลหะในการนำมาใช้งาน การเลือกโลหะหรืออัลลอยด์ที่เหมาะสมกับประเภทของการใช้งานจะสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้

การเปลี่ยนภาวะแวดล้อม สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงสารตัวกลาง เช่น การลดความเร็ว ลดอุณหภูมิ การกำจัดออกซิเจนหรือตัวออกซิไดส์ และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นหรือการใช้สารยับยั้ง

การป้องกันการกัดกร่อนแบบทำให้โลหะใช้งานเป็นขั้วแคโทด คือ การทำให้วัสดุทุกชิ้นส่วนในระบบทำหน้าที่เสมือนขั้วแคโทดในเซลล์เคมีไฟฟ้า โดยเกิดการไหลกลับของอิเล็กตรอน และใส่กระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปในโครงสร้าง

การป้องกันการกัดกร่อนโดยการเคลือบ โดยการเคลือบสามารถแบ่งออกได้หลายประเภท ดังนี้ การเคลือบด้วยสารอินทรีย์ เช่น การทาสี การเคลือบผิว, การเคลือบด้วยโลหะ เช่น การเคลือบด้วยโลหะ เช่น การชุบโลหะ และวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์โรเซชัน เป็นวิธีการเคลือบโดยใช้พอลิเมอร์ในการเคลือบบนผิวโลหะเพื่อให้มีคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนได้ อีกทั้งยังมีราคาถูก สะดวกในการเคลือบ และมีความทนทาน และเหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน

2.6 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว (Bipolar plate)

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) เป็นส่วนประกอบหนึ่งที่อยู่ในเซลล์เชื้อเพลิง มีหน้าที่เป็นทั้งขั้วบวกและขั้วลบ โดยมีหน้าที่หลักคือ ช่วยกระจายเชื้อเพลิงและตัวออกซิไดส์ภายในเซลล์จัดการน้ำในเซลล์นำกระแสไฟฟ้าจากเซลล์ต่อเซลล์ กำจัดความร้อนออกจากพื้นที่และป้องกันการรั่วไหลของแก๊สและสารหล่อเย็น ในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตรอน (PEMFC) แผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วได้ถูกนำมาคิดค้นและพัฒนา โดยใช้วัสดุที่มีราคาที่เหมาะสม มีคุณภาพในการนำมาใช้งาน โดยส่วนใหญ่วัสดุที่นิยมนำมาใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าสองขั้ว คือ แกรไฟต์ เนื่องจากมีข้อดี คือ มีค่าการนำไฟฟ้าสูง ทนทานต่อการกัดกร่อนได้ดี แต่มีข้อเสีย คือ มีน้ำหนักมาก แก๊สสามารถซึมผ่านได้และยากต่อการนำมาขึ้นรูป เนื่องจากแกรไฟต์มีความแข็งและแตกเปราะได้ง่าย อีกทั้งยังมีราคาในการผลิตสูงจึงมีการทดลองนำวัสดุอื่น เช่น โลหะ มาใช้งานแทน ตัวอย่างของโลหะ เช่น ทองแดง อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม ไททาเนียม นิกเกิล โดยโลหะมีสมบัติเชิงกลสูง มีความทนต่อแรงสั่นสะเทือน ไม่มีการซึมผ่านของแก๊ส และมีค่าใช้จ่ายในดูแลรักษาและการผลิตต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุแกรไฟต์ แต่ข้อเสียของโลหะ คือ เกิดการกัดกร่อนได้ง่ายมากในภาวะที่เป็นกรดซึ่งในเซลล์เชื้อเพลิงมีฤทธิ์เป็นกรด ทำให้ต้องหาวัสดุที่จะนำมาทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ เช่น เหล็กกล้าไร้สนิม หรือหาวัสดุที่นำมาเคลือบบนผิวของโลหะ เพื่อให้โลหะสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีขึ้น โดยสมบัติที่สำคัญของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว คือ สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดี มีค่าการนำไฟฟ้าสูง และมีค่าความต้านทานเชิงสัมผัสต่ำ เช่นเดียวกับแกรไฟต์ มีสมบัติเชิงกลสูง ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สต่ำ และมีความแข็งแรงไม่เปราะเหมือนแกรไฟต์ โดยโลหะที่ได้รับความนิยมในการนำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าสองขั้ว คือ เหล็กกล้าไร้สนิม ทองแดง อะลูมิเนียม และไททาเนียม ซึ่งโลหะจำพวกนี้สามารถเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย แต่ด้วยคุณสมบัติของโลหะสามารถสร้างชั้นฟิล์มออกไซด์บนผิวของโลหะได้หรือปรากฏการณ์แพสซีเวชัน (Passivation) ทำให้สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ในระดับหนึ่ง แต่ส่งผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้า

สูงขึ้น ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมสำหรับใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิง โลหะที่นำมาทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วจึงควรนำไปเคลือบก่อนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการกัดกร่อนและค่าการนำไฟฟ้าที่ลดลง [25]

2.6.1 สมบัติของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว

หน้าที่ของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว มีดังนี้ แจกจ่ายแก๊สเชื้อเพลิงและออกซิเจนภายในเซลล์ สามารถจัดการระบบน้ำเข้าออกที่เกิดภายในเซลล์ได้ ทำการแยกเซลล์ภายในชั้นเซลล์ (Stack) ออกจากกัน ถ่ายเทกระแสภายในเซลล์ และสามารถจัดการควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ [26] ดังนั้นวัสดุที่ทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วควรมีสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมีต่าง ๆ เพื่อให้สอดคล้องกับการนำไฟฟ้าไปใช้งาน โดยต้องมีสมบัติทางกายภาพและทางเคมี ดังนี้ ป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส ป้องกันการกัดกร่อน นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี และทนต่อแรงกดอัด

ในการเตรียมวัสดุเพื่อนำไปใช้งานเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วจะต้องทนต่อสารเคมีทนต่อการกัดกร่อน มีค่าการนำไฟฟ้าสูง สามารถป้องกันการแพร่ผ่านของแก๊สได้ และมีค่าการนำความร้อนที่ดี จึงมีค่ามาตรฐานของวัสดุที่จะใช้ทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติมาตรฐานของแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเอ็ม [27]

สมบัติ	หน่วย	ค่า
ความเค้นแรงดึง – ASTM D638	MPa	>41
ความทนการดัดโค้ง – ASTM D790	MPa	>59
การนำไฟฟ้า	Scm ⁻¹	>100
อัตราการกัดกร่อน	μAcm ⁻²	<1
ความทนทานการกัดกร่อน (pH<4)	μAcm ⁻²	<16
ความต้านทานเชิงสัมผัส	mΩcm ⁻¹	<20
การซึมผ่านแก๊สไฮโดรเจน	Cm ³	<2*10 ⁻⁶
น้ำหนัก	Kg/kW	<1
การนำความร้อน	W (mK) ⁻¹	>10

2.6.2 ประเภทแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว

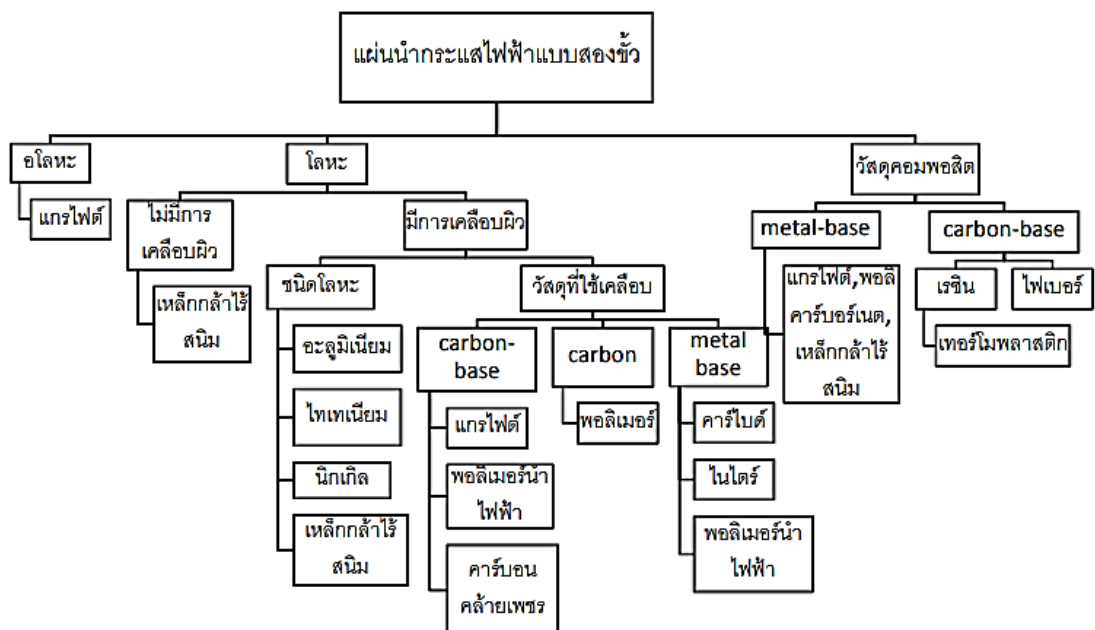
ประเภทของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วสามารถจำแนกตามวัสดุที่ใช้ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทด้วยกัน ได้แก่ [28]

วัสดุประเภทแกรไฟต์ โดยวัสดุประเภทนี้ทำมาจากของผสมแกรไฟต์ที่ประกอบด้วยแกรไฟต์ที่เป็นผลึก (Crystalline graphite) ที่มีสารเติมแต่ง (Additive) และตัวประสาน (Binder) มาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) แล้วนำไปให้ความร้อน (Heat treatment) ในภาวะที่ปราศจากออกซิเจน

วัสดุโลหะ เนื่องจากโลหะมีค่าการนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี แก๊สซึมผ่านได้ยาก แต่ป้องกันการกัดกร่อนได้แย่ ดังนั้นจึงต้องมีการเคลือบบนผิวของโลหะเพื่อป้องกันการกัดกร่อนได้ดีขึ้นโลหะที่ใช้ เช่น ทองแดง เหล็กกล้าไร้สนิม นิกเกิล อะลูมิเนียม โลหะผสม และไทเทเนียม

วัสดุคอมพอสิต คือ การนำวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไปมาผสมรวมกันเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติต่าง ๆ สาเหตุที่ต้องมีการนำวัสดุมารวมกันเพื่อที่จะได้วัสดุที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้นตามที่เรากำลังต้องการนำไปใช้งาน โดยในการผสมนั้นต้องให้สัดส่วน และวิธีการเหมาะสมกลายเป็นวัสดุคาร์บอนคอมพอสิตที่มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

โดยในการจำแนกประเภทและการเปรียบเทียบวัสดุที่ใช้ในการทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วนั้นสามารถ แสดงดังรูปที่ 12 และแสดงดังตารางที่ 4 ตามลำดับ



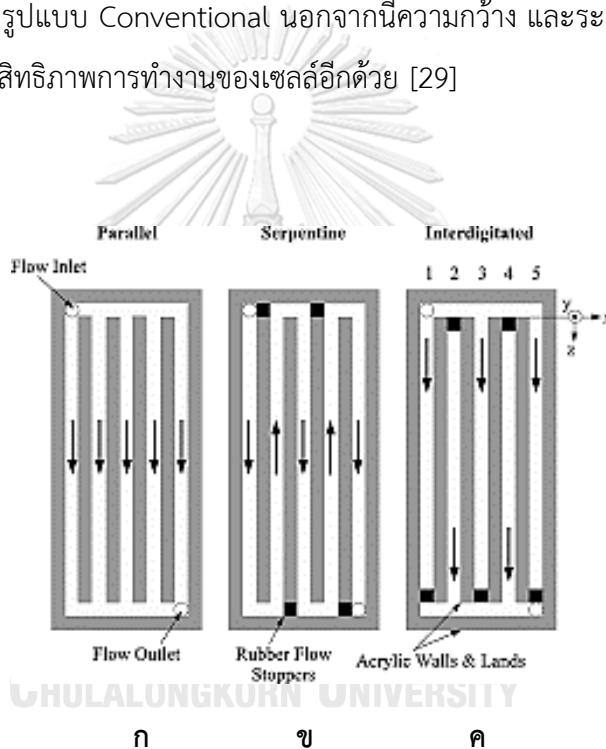
รูปที่ 12 จำแนกประเภทวัสดุที่ใช้ทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง [26]

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของวัสดุที่นำมาทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว [28]

วัสดุ	สภาพการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ข้อดี	ข้อเสีย
แกรไฟต์	200-300	<ul style="list-style-type: none"> ■ ความหนาแน่นจำเพาะต่ำ ■ ความต้านทานการกัดกร่อนสูง ■ มีความเสถียร ■ ความต้านทานสัมผัสกับขั้วไฟฟ้าต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> ■ เปราะแตกหักง่าย ■ มีราคาแพง ■ ความหนามาก
โลหะ	5.5×10^5	<ul style="list-style-type: none"> ■ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ■ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอ ■ ค่าการนำไฟฟ้าและความร้อนสูง 	<ul style="list-style-type: none"> ■ การป้องกันการกัดกร่อนต่ำ ■ เป็นพิษต่อเยื่อเลือกผ่าน ■ เกิดฉนวนออกไซด์ได้ง่าย
คอมพอสิต	50-200	<ul style="list-style-type: none"> ■ มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน ■ มีสมบัติหลากหลาย ■ มีความหนาแน่นจำเพาะต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> ■ มีสมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน ■ นำกลับมาใช้งานใหม่ไม่ได้ ■ ใช้เครื่องมือในการผลิตซับซ้อน ■ มีราคาแพง

2.6.3 รูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สบนแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วโดยปกติมีหน้าที่ที่สำคัญหลายอย่างดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.6.1 อีกทั้งยังช่วยในการนำแก๊สเข้าสู่เซลล์ ดังนั้นรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สบนแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วจึงมีผลต่อการถ่ายโอนมวลสารภายในขั้วอิเล็กโทรดมีรูพรุน และประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์อย่างมาก โดยเฉพาะขั้วทางด้านแคโทดรูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สที่ใช้ในปัจจุบันมีทั้งหมด 3 รูปแบบใหญ่ ๆ คือ Conventional, Serpentine และ Interdigitated แสดงดังรูปที่ 13 ซึ่งในงานวิจัยที่พบโดยทั่วไปพบว่าช่องทางการไหลของแก๊สรูปแบบ interdigitated มีค่าประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ดีกว่ารูปแบบ Conventional นอกจากนี้ความกว้าง และระยะของช่องทางการไหลของแก๊สก็มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์อีกด้วย [29]



รูปที่ 13 รูปแบบช่องทางการไหลของแก๊สในรูปแบบต่าง ๆ ก) ช่องทางการไหลแบบ Conventional ข) ช่องทางการไหลแบบ Serpentine ค) ช่องทางการไหลแบบ Interdigitated [30]

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Pan และคณะ [23] ศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนบนแผ่นทองแดงที่ทำเป็นแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน ด้วยวิธี Electrodeposition โดยในงานวิจัยนี้ใช้พอลิเมอร์ฟิล์ม คือ พอลิไพร์โรล และพอลิแอนิลิน โดยนำมาเคลือบบนแผ่นทองแดง จากนั้นนำมาทดสอบการกัดกร่อนโดยวิธี Electrochemical polarization พบว่าแผ่นทองแดงที่ถูกเคลือบด้วยพอลิไพร์โรล และพอลิแอนิลิน ได้ค่ากระแสการกัดกร่อน เท่ากับ $1.62 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ แผ่นทองแดงที่ถูกเคลือบด้วยพอลิไพร์โรลได้ค่ากระแสการกัดกร่อน เท่ากับ $4.59 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ และแผ่นทองแดงเปล่าได้ค่ากระแสการกัดกร่อน เท่ากับ $5.14 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าพอลิแอนิลินผสมพอลิไพร์โรลเคลือบบนแผ่นทองแดงสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุดรองลงมาคือเคลือบด้วยพอลิไพร์โรล แต่การเคลือบพอลิเมอร์ 2 ชั้นทำให้นำไฟฟ้าได้น้อยกว่าเคลือบพอลิเมอร์ชั้นเดียว สามารถทดสอบการนำไฟฟ้าได้โดยวิธี Interfacial contact resistance หรือ ICR

Lim และคณะ [31] ศึกษาการทำตัวเก็บประจุไฟฟ้าสูงสุดโดยการเคลือบด้วยพอลิไพร์โรลและแกรฟีนโดยวิธี Electrodeposition เพื่อนำมาใช้เป็นตัวเก็บประจุที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยงานวิจัยนี้ใช้พอลิไพร์โรลและแกรฟีนเคลือบบนแผ่นอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธี Electrodeposition โดยศึกษาความเข้มข้นของพอลิไพร์โรลตั้งแต่ 0.1-0.5 โมลาร์ และ แกรฟีน 0.5, 1.0, 2.0 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ค่า Scan rate ที่ 10-100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ศักย์ไฟฟ้าที่ 0.6, 0.8, 1.0, 1.3 โวลต์ และ เวลา ที่ 1, 2, 4 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อเคลือบบนแผ่นอินเดียมทินออกไซด์เสร็จแล้ว นำแผ่นที่ได้มาศึกษาการนำไฟฟ้าพบว่าแผ่นอินเดียมทินออกไซด์ที่ถูกเคลือบด้วย 0.1 โมลาร์พอลิไพร์โรลผสมกับ 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรแกรฟีน Scan rate ที่ 10 มิลลิโวลต์ต่อวินาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และค่า ศักย์ไฟฟ้าที่ 0.8 โวลต์ดีที่สุด เนื่องจากได้ค่าการนำไฟฟ้าสูงที่สุด แสดงว่าที่ภาวะนี้เหมาะสำหรับนำมาทำเป็นตัวเก็บประจุที่มีประสิทธิภาพสูงสุดได้

Yang และคณะ [32] ศึกษาการเคลือบผงแกรไฟต์ และพอลิไพร์โรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 316L เป็นแผ่นนำไฟฟ้าสองขั้วสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน โดยในงานวิจัยนี้ศึกษาการเคลือบผงแกรไฟต์ผสมกับพอลิไพร์โรลบนเหล็กกล้าไร้สนิม เพื่อป้องกันการกัดกร่อน และค่าการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น พบว่าเมื่อทดสอบการกัดกร่อนโดยวิธี Electrochemical polarization พบว่าค่ากระแสการกัดกร่อนของแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยแกรไฟต์ผสมพอลิไพร์โรลมีค่าน้อยกว่าการเคลือบพอลิไพร์โรลอย่างเดียวมากๆ จึงสามารถสรุปได้ว่าการเคลือบด้วยแกรไฟต์ผสมพอลิไพร์โรลบนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดี อีกทั้งการเคลือบพอลิไพร์โรลผสมแกรไฟต์บนแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมยังให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ดีอีกด้วยสามารถทดสอบค่าการนำไฟฟ้าได้จาก Interfacial contact resistance หรือ ICR

วิภาสศรี [2] ศึกษาการสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์บนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยในงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมแอนิไลน์มาสังเคราะห์บนเหล็กกล้าไร้สนิม โดยศึกษาช่วงศักย์ไฟฟ้าที่ต่างกัน ,ความเข้มข้นของมอนอเมอร์แอนิไลน์ ตั้งแต่ 0.05-0.5 โมลาร์ และเวลาที่ 10-90 นาที โดยวิธี Chronoamperometry คือการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ แล้วนำเหล็กกล้าไร้สนิมที่ถูกเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์แล้วมาทดสอบการป้องกันการกัดกร่อน พบว่าหลังจากมีการเคลือบสารพอลิแอนิไลน์เข้าไปแล้ว ทำให้มีการป้องกันการกัดกร่อนดีขึ้น มากสุดถึงร้อยละ 99.7

Tunc [33] ศึกษาการเคลือบพอลิพีร์โรลฟิล์มบนเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายสองชนิด ลิเทียมเปอร์คลอเรตในอะซีโตนไนไตร (ACN-LiClO₄) ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร และกรดออกซาลิกในน้ำความเข้มข้น 0.3 โมลต่อลิตร โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี และควบคุมความหนาของชั้นฟิล์มพอลิพีร์โรลประมาณ 1.7 ไมโครเมตร จากนั้นทำการศึกษาลักษณะการกัดกร่อนของทั้งแบบที่ถูกเคลือบและแบบที่ไม่ถูกเคลือบ ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า และกราฟแอนดิกโพลาไรเซชัน พบว่าฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ด้วยสารละลายลิเทียมเปอร์คลอเรตในอะซีโตนไนไตรมีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่น้อยกว่า และชั้นฟิล์มความเสถียรมากกว่าฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ด้วยสารละลายกรดออกซาลิก

Dyihuey และคณะ [34] ศึกษาผลกระทบของช่องทางการไหลของแก๊สที่มีผลต่อประสิทธิภาพในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตรอน โดยรูปแบบที่ใช้ศึกษา คือ Serpentine ที่มีช่องทางการไหล 3 ทาง มีขนาดความกว้างของช่อง และระยะห่างระหว่างช่องเท่ากับ 500 ไมโครเมตร และความลึกของช่องเท่ากับ 200, 400 และ 600 ไมโครเมตร ตามลำดับ ที่พื้นที่ผิว 4 ตารางเซนติเมตร พบว่าที่ความลึก 400 ไมโครเมตร ให้ประสิทธิภาพการทำงานในเซลล์เชื้อเพลิงดีที่สุดเนื่องจากให้ค่าอัตราการไหลของแก๊สสูงที่สุด ในทางกลับกันยังมีความลึกที่มากกว่านี้จะทำให้มีค่าอัตราการไหลของแก๊สต่ำลง

Prissanaroon และคณะ [3] ศึกษาการเคลือบฟิล์มพอลิพีร์โรลโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้าบนแผ่นทองแดงในสารละลายกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเพื่อช่วยในการป้องกันขั้วไฟฟ้า พบว่าเมื่อทำการชำระล้างผิวของแผ่นทองแดงหรือวิธีการ Electropolished ทำให้เกิดปรากฏการณ์การแพสซิฟเกิดขึ้นเกิดเป็น Cu₂O ที่ผิวของแผ่นทองแดงทำให้เกิดการเคลือบได้ยากขึ้น จะพบชั้นฟิล์มที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิพีร์โรลและโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค PPy (DBSA) เมื่อศึกษาด้วยเครื่องมือ TOF-SIMS พบว่า โดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเกิดขึ้นที่ชั้นกลางระหว่างแผ่นทองแดงและพอลิพีร์โรลอยู่ที่ชั้นบริเวณผิวนอก

Andrea และคณะ [35] ศึกษาการป้องกันการกัดกร่อน และการพอกพูนพอลิไพร์โรลฟิล์มบนแผ่นอะลูมิเนียมอัลลอยด์ (2024-T3) ในสารละลายกรดโทเดคซิลเบนซีนซัลโฟนิคเคลือบโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ที่ความต่างศักย์ 0.8 โวลต์ จะได้ผิวหน้าของฟิล์มที่มีความเรียบเนียนเมื่อวิเคราะห์ด้วย Scanning electron microscopy (SEM) พบว่า มีฟิล์มพอลิไพร์โรลที่เคลือบอยู่บนอะลูมิเนียมอัลลอยด์ และตรวจสอบด้วย FTIR เพื่อยืนยันว่าเกิดฟิล์มพอลิไพร์โรลจริง หลังจากนั้นศึกษาการป้องกันการกัดกร่อนด้วยเทคนิคต่าง ๆ พบว่าพอลิไพร์โรลสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่าอะลูมิเนียมอัลลอยด์ที่ไม่มีการเคลือบ



บทที่ 3

เครื่องมือและวิธีการทดลอง

3.1 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode) คือ แผ่นทองแดง ความหนา 0.5 เซนติเมตร บริษัท ตั้ง เว่ง เส็ง
2. ขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) คือ ตะแกรงแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม
3. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) คือ Silver-silver chloride electrode (Ag/AgCl)
4. เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) บริษัท CERAMAG Midi
5. แท่งกวนสาร (Magnetic bar)
6. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท SARTORIUS รุ่น BSA224S-CW
7. ชุดเครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
 - 7.1 กระจกตวงขนาด 10 mL, 100 mL
 - 7.2 ปีกเกอร์ขนาด 250 mL, 500mL
 - 7.3 ขวดปรับปริมาตร 1000 mL
 - 7.4 หลอดหยด
 - 7.5 ขวดกั่นกลม
 - 7.6 คอนเดนเซอร์
 - 7.7 ขั้วต่อสามทาง
 - 7.8 ขั้วต่อลดความดัน
8. ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) บริษัท ELECTROCHEM
9. ไมโครปิเปต ขนาด 100-1000 ไมโครลิตร บริษัท RAININ
10. แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) บริษัท COMMUE รุ่น HY 3002
11. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบ (In-plane) บริษัท JANDEL รุ่น RM3-AR
12. เครื่องตัดมุมฉาก สำหรับตัดแผ่นโลหะ
13. เครื่องตัดแผ่นโลหะ
14. เครื่องเซาะร่อง ทำช่องทางการไหลของแก๊สบนแผ่นทองแดง
15. ตู้อบ (Oven) บริษัท MEMMERT
16. กรรไกรตัดโลหะ

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์

1. เครื่อง Potentiostat/Galvanostat บริษัท AUTOLAB รุ่น PG STATO 30
2. เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy บริษัท PERKIN ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. Scanning electron microscope บริษัท JEOL ศูนย์เครื่องมือวิเคราะห์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 เครื่องมือวัด

1. เครื่องวัดความหนา (Thickness guage) บริษัท MITUTOYO รุ่น 547-401
2. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส และวัดค่าการนำไฟฟ้า บริษัท HACH SENSION+ รุ่น MM 378 GLP
3. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบ (Through-plane) บริษัท SUNKEY COV-2.5
4. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบ (In-plane) บริษัท JANDEL รุ่น RM3-AR

3.4 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. พิโรลมอนอเมอร์ (98% w/v) บริษัท Sigma-Aldrich
2. กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค บริษัท Sigma-Aldrich
3. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (98% w/v) บริษัท Fisher
4. กรดไนตริกเข้มข้น (65% w/v) บริษัท Merck
5. น้ำกลั่น
6. ผงคาร์บอนวัลแคน

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.5.1 การกลั่นพิโรลมอนอเมอร์

1. เติมพิโรลมอนอเมอร์ลงในขวดกั่นกลมที่ใช้ในการกลั่นตามปริมาณที่จะนำไปใช้งาน จากนั้นปิดด้วยแผ่นพอยล์
2. ประกอบและติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการกลั่น ดังรูปที่ 14

3. เปิดเครื่องให้ความร้อนเพื่อกลั่นพีริโรลมอนอเมอร์ที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส เพื่อแยกสารยับยั้ง (Inhibitor) ที่ป้องกันไม่ให้ออนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันก่อนทำการสังเคราะห์ออก
4. เมื่อกลั่นเสร็จแล้ว จะสังเกตเห็นของเหลวใสไม่มีสีที่กลั่นได้อยู่ที่ขวดก้นกลมของอีกฝั่งหนึ่ง
5. นำมอนอเมอร์ที่กลั่นได้ใสในขวดที่ห่อกระดาษฟอยด์ไว้แล้วปิดฝาให้สนิทเพื่อไม่ให้อากาศเข้าไปได้ จากนั้นนำไปแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อรอการใช้งาน

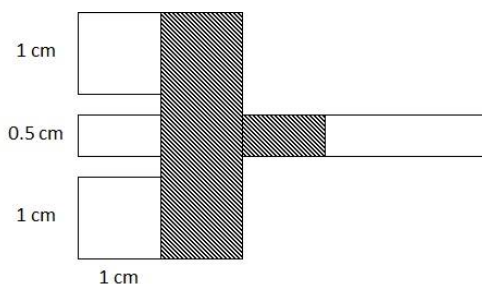


รูปที่ 14 การติดตั้งอุปกรณ์การกลั่นพีริโรลมอนอเมอร์

3.5.2 การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการเคลือบ

1. นำแผ่นทองแดงที่มีความหนา 0.5 มิลลิเมตร ไปตัดให้มีขนาดที่ต้องการคือสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1x1 เซนติเมตร จำนวน 2 ชิ้น และ 0.5x1 เซนติเมตร ให้อยู่ในแผ่นเดียวกันแสดงดังรูป 15
2. ตัดท่อหด และเทฟลอนเทปหุ้มชิ้นงานในส่วนที่เราไม่ต้องการให้พอลิพีริโรลเคลือบ
3. จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น และจุ่มลงในสารละลายกรดไนตริกเป็นเวลาประมาณ 30 วินาที เพื่อกำจัดออกไซด์ออกจากแผ่นทองแดง หลังจากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้กรดไนตริกที่อยู่บนแผ่นทองแดงออกให้หมดแล้วสะบัดให้แห้ง

4. วัดความหนาของชิ้นงานก่อนแล้วรีบทำการเคลือบเพื่อไม่ให้เกิดออกไซด์บนแผ่นทองแดง



รูปที่ 15 รูปแบบชิ้นงานที่ใช้ในการเคลือบ

3.5.3 ศึกษาลักษณะกราฟที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน/รีดักชัน โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic voltammetry)

ในงานวิจัยนี้ทำการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลบนแผ่นทองแดงด้วยเทคนิคการพอกพูนด้วยกระแสไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้อง และระบบเปิด (ความดันบรรยากาศ) โดยใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าชนิด 3 ขั้ว เพื่อทราบการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน/รีดักชันของมอนอเมอร์จะศึกษาจากเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี โดยใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยจัดรูปเซลล์เคมีไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 16

1. เตรียมสารละลายกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และสารละลายผสมระหว่างกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และกับไพร์โรลมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร
2. เตรียมขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) เป็นแท่งแพลทินัม และขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode) เป็นแท่งแพลทินัม ใช้ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็น Silver-silver chloride electrode (Ag/AgCl)
3. ทำการตรวจกราดค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง -1.0 ถึง 2.5 โวลต์ เทียบกับ Ag/AgCl ด้วยอัตราการตรวจกราด (Scan rate) 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที



รูปที่ 16 การจัดรูปเซลล์เคมีไฟฟ้า

3.5.4 การเตรียมเซลล์เคมีไฟฟ้าเพื่อทำการสังเคราะห์ (Electrochemical cell)

เมื่อศึกษาลักษณะกราฟที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาการเคลือบแล้วที่หัวข้อ 3.3.3 ในขั้นตอนของการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลบนแผ่นทองแดงโดยศึกษาตัวแปร 3 ตัว คือ กระแสไฟฟ้า เวลา และการเติมปริมาณผงคาร์บอน โดยตัวแปรแรกทำการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลโดยให้กระแสไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ตัวแปรที่สองทำการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลโดยให้เวลาในการสังเคราะห์แตกต่างกัน และตัวแปรสุดท้ายสังเคราะห์พอลิพีร์โรลที่ผสมกับคาร์บอนวัลแคน โดยให้ปริมาณคาร์บอนที่แตกต่างกัน แสดงการติดตั้งอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 17

3.5.4.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลบนแผ่นทองแดงโดยให้ปริมาณกระแสไฟฟ้าแตกต่างกัน โดยเทคนิคกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)

ทำการสังเคราะห์โดยเทคนิคที่กำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ป้อนมีค่าคงที่ และศึกษากระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อการสังเคราะห์พอลิพีร์โรล

1. เตรียมสารละลายผสมระหว่างกรดโตะเดซิลซัลโฟนิคความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และ ขพอลิพีร์โรลมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

2. ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบให้ขั้วแอโนดเป็นขั้วที่เราต้องการให้เกิดการสังเคราะห์คือ แผ่นทองแดง และให้ขั้วแคโทดเป็นตะแกรงสแตนเลส ใช้เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (Power supply) ในการให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างกันในช่วง 10.0 ถึง 45.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 15 นาที
3. นำแผ่นทองแดงที่ได้มาวัดค่าการป้องกันการกัดกร่อน และค่าการนำไฟฟ้า

3.5.4.2 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลบนแผ่นทองแดงโดยระยะเวลาในการเคลือบแตกต่างกัน โดยเทคนิคกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)

ทำการสังเคราะห์โดยเทคนิคที่กำหนดให้กระแสไฟฟ้าที่ป้อนมีค่าคงที่ และศึกษาระยะเวลาในการเคลือบที่มีผลต่อการสังเคราะห์พอลิพีร์โรล

1. ทำตามขั้นตอนที่ 1 ถึง 2 ของหัวข้อ 3.3.4.1 โดยใช้กระแสไฟฟ้าในช่วง 10.0 ถึง 45.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร
2. ระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ที่ 10 ถึง 30 นาที
3. นำแผ่นทองแดงที่ได้มาวัดค่าการป้องกันการกัดกร่อน และค่าการนำไฟฟ้า

3.5.4.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลบนแผ่นทองแดงโดยมีการใส่ผงคาร์บอนลงไปผสมด้วยโดยให้ปริมาณผงคาร์บอนในการเคลือบแตกต่างกัน โดยเทคนิคกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)

ทำการสังเคราะห์โดยกำหนดค่ากระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการสังเคราะห์ที่ดีที่สุดที่ได้จากหัวข้อ 3.3.4.1 และ 3.3.4.2 จากนั้นนำมาศึกษาปริมาณคาร์บอนที่เติมลงไปมีผลต่อการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลอย่างไร

1. เตรียมสารละลายผสมระหว่าง กรดโตนิกซัลโฟนิกความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และ พอลิพีร์โรลมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร
2. ทำการทรีตผงคาร์บอนก่อนนำไปใช้งาน [36] โดยการเติมผสมผงคาร์บอนวัลแคนกับสารละลายผสมกรดไนตริก-ซัลฟิวริก ในสัดส่วนของผงคาร์บอนวัลแคนและสารละลายกรดเป็น 70 ต่อ 30 โดยปริมาตร โดยให้สัดส่วนความเข้มข้นระหว่างกรดไนตริกและซัลฟิวริกเป็น 1 ต่อ 1 และความเข้มข้นของกรดเท่ากับ 12 M

3. บรรจุผงคาร์บอนวัลแคนและสารละลายในขวดรูปชมพู่ ปิดฝาขวดด้วยอะลูมิเนียมฟลอยด์ที่เจาะรูไว้
4. นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า โดยใช้อัตราการเขย่า 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง เมื่อครบ 6 ชั่วโมง แล้วนำขวดสารละลายดังกล่าวไปเก็บในตู้ดูดควันเป็นเวลา 18 ชั่วโมง
5. เมื่อครบ 18 ชั่วโมง ล้างสารละลายในขวดรูปชมพู่ด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งสารละลายนั้นมีความเป็นกรด-เบสเท่ากับน้ำกลั่น
6. นำไปกรองเพื่อแยกผงคาร์บอนวัลแคนออกและอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง
7. ใส่ผงคาร์บอนที่ปริมาณต่างกันในช่วง 1 ถึง 4 มิลลิกรัม
8. ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบให้ขั้วแอโนดเป็นขั้วที่เราต้องการให้เกิดการสังเคราะห์คือ แผ่นทองแดง และให้ขั้วแคโทดเป็นตะแกรงสแตนเลส ใช้เครื่องจ่ายกระแสไฟฟ้า (Power supply) ในการให้กระแสไฟฟ้าที่ดีที่สุดที่ได้จากหัวข้อ 3.3.4.1
9. ระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์เท่ากับค่าที่ดีที่สุดที่ได้จากหัวข้อ 3.3.4.2
10. นำแผ่นทองแดงที่ได้มาวัดค่าการป้องกันการกัดกร่อน และค่าการนำไฟฟ้า



รูปที่ 17 การติดตั้งอุปกรณ์ในการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลบนแผ่นทองแดง

3.5.5 ศึกษาขนาดของช่องทางการไหลของแก๊ส

ในการศึกษาขนาดของช่องทางการไหลของแก๊สสามารถทำได้โดยใช้ภาวะที่ดีที่สุดของการทดลองก่อนหน้านี้นำมาใช้ในการเคลือบ โดยรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สในปัจจุบันมีทั้งหมด 3 รูปแบบ

คือ Conventional, Serpentine และ Interdigitated [8] โดยจะเลือกใช้รูปแบบ serpentine และเจาะช่องทางการไหลแก๊สบนแผ่นทองแดง เป็น 2 รูปแบบ โดยเราจะเลือกทำรูปแบบขนาน (Parallel) และแบบตัวยู (U-shape) มีลักษณะดังรูปที่ 18

3.5.5.1 ศึกษาผลของขนาดของช่องทางการไหลของแก๊สรูปแบบขนาน (Parallel)

1. เตรียมแผ่นทองแดงที่ใช้ในการเจาะช่องทางการไหลของแก๊สขนาด ความกว้าง 1 ยาว 1 เซนติเมตร ใช้ท่อหดหุ้มส่วนที่ไม่ต้องการให้ถูกเคลือบ
2. เจาะช่องทางการไหลของแก๊สบนแผ่นทองแดงที่เตรียมไว้ขนาด ความกว้าง 1 ถึง 3 มิลลิเมตร ความยาว 6 มิลลิเมตร และความลึก 0.3 มิลลิเมตร และ 0.4 มิลลิเมตร
3. นำแผ่นทองแดงที่ได้มาเคลือบในภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองก่อนหน้าทั้งแบบที่มีคาร์บอน และไม่มีคาร์บอนเข้ามาเคลือบ

3.5.5.2 ศึกษาผลของขนาดของช่องทางการไหลของแก๊สรูปแบบตัวยู (U-shape)

1. เตรียมแผ่นทองแดงที่ใช้ในการเจาะช่องทางการไหลของแก๊สขนาด ความกว้าง 1 ยาว 1 เซนติเมตร ใช้ท่อหดหุ้มส่วนที่ไม่ต้องการให้ถูกเคลือบ
2. เจาะช่องทางการไหลของแก๊สบนแผ่นทองแดงที่เตรียมไว้ขนาด ความกว้าง 2 มิลลิเมตร ความยาว 6 มิลลิเมตร และความลึก 0.3 มิลลิเมตร
3. นำแผ่นทองแดงที่ได้มาเคลือบในภาวะที่ดีที่สุดจากการทดลองข้างต้นทั้งแบบที่มีคาร์บอน และไม่มีคาร์บอนเข้ามาเคลือบ



ก.) รูปแบบขนาน

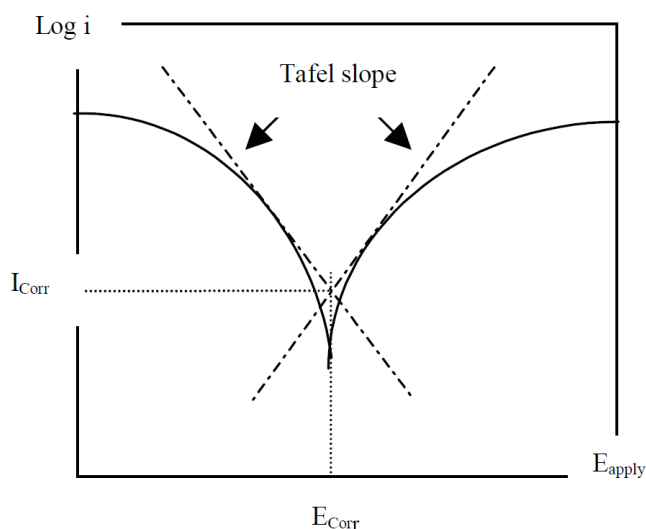


ข.) รูปตัวยู

รูปที่ 18 แสดงการเจาะช่องทางการไหลของแก๊ส ก.) รูปแบบขนาน ข.) รูปตัวยู

3.5.6 การทดสอบการกัดกร่อนของโลหะ

นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบแล้วมาทดสอบค่าการป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์และวิเคราะห์หาค่ากระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (I_{corr}) ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) และค่าอัตราการกัดกร่อน โดยใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ใช้วิธี Tafel slope analysis แสดงดังรูปที่ 19 ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของอัตราการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงที่ถูกเคลือบ โดยค่าอัตราการกัดกร่อนสามารถหาได้ดังสมการที่ 3.1



รูปที่ 19 กราฟโพลาริเซชันของวิธี Tafel slope analysis [37]

$$W = \frac{ItM}{nF} = \frac{iAtM}{nF} \quad (3.1)$$

โดยที่ W = น้ำหนักของโลหะ (กรัม) ที่ผุกร่อนในสารละลาย ณ เวลา t วินาที

I = ค่าของกระแสไฟฟ้าที่ไหล (แอมแปร์)

M = มวลอะตอมของโลหะ (กรัมต่อโมล)

n = จำนวนของ อิเล็กตรอนต่ออะตอม ที่ถูกผลิต หรือที่ใช้ไปในการผุกร่อน

F = ค่าคงที่ของฟาราเดย์ (96,500 คูลอมบ์ต่อโมล หรือ 96,500 แอมแปร์วินาทีต่อโมล)

i = ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

A = พื้นที่หน้าตัดโดยเฉลี่ย (ตารางเซนติเมตร)

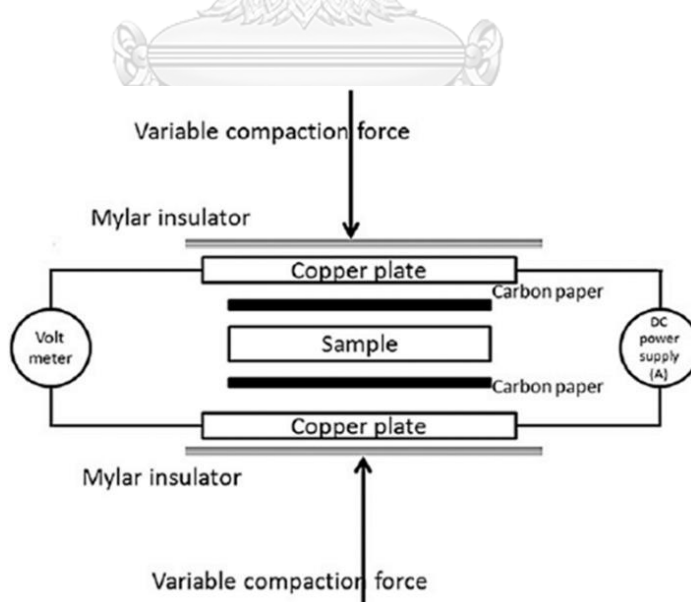
3.5.7 วัดค่าความต้านทานสัมผัสของชิ้นงาน (Interfacial Contact Resistance, ICR)

ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส หรือ ICR คือ การวัดค่าความต้านทานของวัสดุที่สัมผัสกัน บริเวณผิวหน้าของวัสดุสองชิ้น โดยมีวิธีการทดลองดังนี้ นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบแล้วมา ทดสอบวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้าโดยติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง แสดงดังรูปที่ 20 จ่ายกระแสไฟฟ้าจากเครื่อง Power supply โดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 2.0 แอมแปร์ และวัดความต่างศักย์ได้จากเครื่องมัลติโวลต์มิเตอร์ (Multi-meter) เมื่อได้ค่าความต่างศักย์แล้วนำมาพล็อตกราฟโดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.2 เพื่อหาค่าความต้านทานนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า

ค่าการนำไฟฟ้า หรือ Conductivity คือ ความสามารถในการนำกระแสไฟฟ้าของวัสดุหนึ่งที่มีความสามารถให้กระแสไฟฟ้าผ่านวัสดุได้ มีค่าเท่ากับค่าผกผันของค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุนั้น

โดยการคำนวณหาค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีความสัมพันธ์กับพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานกับขั้วไฟฟ้าตามสมการที่ 3.3

การคำนวณหาค่าการนำไฟฟ้าแบบแนวทะลุผ่าน (Through-plane) สามารถหาได้จากค่าความชันของกราฟที่สามารถหาได้จากค่าความต่างศักย์ที่วัดได้ และค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าระบบโดยใช้ความสัมพันธ์ของสมการที่ 3.2 แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณในสมการที่ 3.4



รูปที่ 20 แสดงการจัดอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบแนวทะลุผ่าน และค่าความต้านทานเชิงสัมผัส

วัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัส หรือ ICR

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.2)$$

$$ICR = \left(\frac{(R_2 \times A_2) - (R_1 \times A_1)}{2} \right) \quad (3.3)$$

วัดค่าการนำไฟฟ้า หรือ Conductivity แบบ Through-plane

$$\text{Conductivity} = \frac{\text{Thickness}}{\text{Resistance } (R_2) \times \text{Area } (A_2)} \quad (3.4)$$

โดย	ICR	=	ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (โอห์มตารางเซนติเมตร)
	R_1	=	วัดค่าความต้านทานสัมผัสเครื่องมือวัด (โอห์ม)
	A_1	=	พื้นที่ผิวสัมผัสของผ้าคาร์บอน (ตารางเซนติเมตร)
	R_2	=	ค่าความต้านทานสัมผัสตอนมีชิ้นงาน (โอห์มตารางเซนติเมตร)
	A_2	=	พื้นที่ผิวสัมผัสของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)
	V	=	ค่าความต่างศักย์ (โวลต์)
	R	=	ค่าความต้านทาน (โอห์ม)
	A	=	พื้นที่ (ตารางเซนติเมตร)
	I	=	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

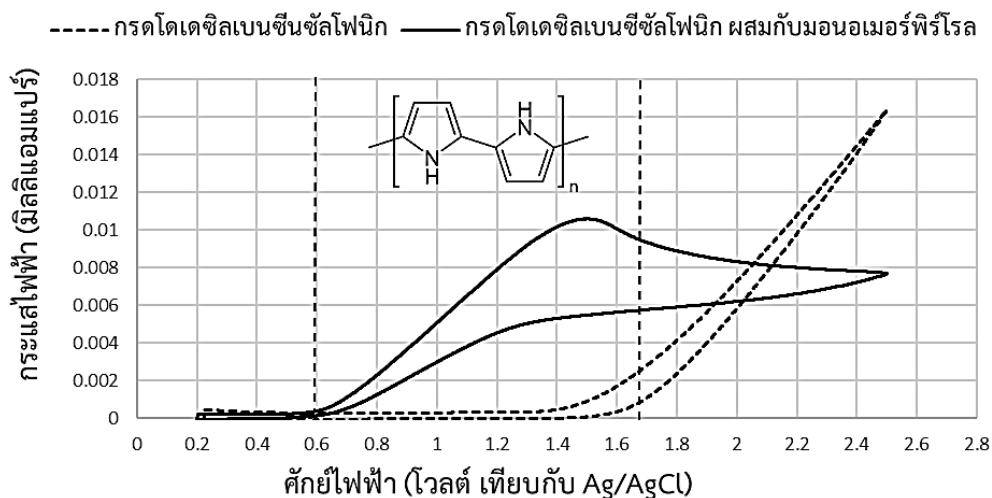
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์ฟิล์มพอลิไพร์โรลบนแผ่นทองแดง โดยวิธีทางเคมีไฟฟ้าหรือที่เรียกว่า อิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชัน โดยศึกษาผลของตัวแปรดังนี้ ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาในการสังเคราะห์ การเติมผงคาร์บอน รูปแบบ และขนาดช่องทางการไหลของแก๊สต่อการเคลือบ และสมบัติของแผ่นทองแดง

4.1 การวิเคราะห์การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ของพอลิไพร์โรลในสารละลายกรดโตะเดซิลเบนซีน ซัลโฟนิคด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมทรี

จากการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชันโดยใช้วิธีไซคลิกโวลแทมเมทรีโดยมีการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดลองตามหัวข้อที่ 3.5.3 ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไพร์โรลมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และสารละลายโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร มีความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1.08 และมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 5.56 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร โดยทำการตรวจรูดค่าศักย์ไฟฟ้า -1.0 ถึง +2.5 โวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl ด้วยอัตราการตรวจรูด 25 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ช่วงไพร์โรลมอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอยู่ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.6 โวลต์เทียบกับ Ag/AgCl ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Pan และคณะ [23] กล่าวว่าช่วงที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิไพร์โรลมอนอเมอร์ที่ประมาณ 0.6 โวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Standard Saturated Calomel Electrode (SCE) จากกราฟรูปที่ 21 พบว่ามีกระแสออกซิเดชันเกิดขึ้นในสารละลายที่ผสมไพร์โรลมอนอเมอร์ในช่วงความต่างศักย์ที่มากกว่า 0.6 โวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl ซึ่งจะไม่พบในสารละลายที่มีกรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเพียงอย่างเดียวแต่มีการเกิดปฏิกิริยาที่ 1.43 โวลต์เทียบกับ Ag/AgCl ซึ่งเป็นพีคการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของออกซิเจนที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาของน้ำในสารละลาย แต่ในสารละลายที่มีไพร์โรลมอนอเมอร์ผสมอยู่ไม่เกิดพีคที่ 1.43 โวลต์เทียบกับ Ag/AgCl เนื่องจากมีชั้นฟิล์มพอลิไพร์โรลเคลือบที่ขั้วทำให้ไม่เห็นพีคนี้เกิดขึ้นที่สารละลายที่มีไพร์โรลมอนอเมอร์ผสมอยู่ แสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิไพร์โรลมอนอเมอร์เกิดขึ้นในช่วงศักย์ไฟฟ้างกล่าว ดังนั้นในการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลจะเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด เนื่องจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชัน จึงนำแผ่นทองแดงไว้ที่ขั้วแอโนด



รูปที่ 21 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิพิริโรลของสารละลายกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 และพิริโรลมอนอเมอร์ 0.05 โมลต่อลิตร กับสารละลายกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร

4.2 ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิพิริโรลบนแผ่นทองแดง

จากการทดลองในข้อ 4.1 พบว่าพอลิพิริโรลจะเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของพิริโรลมอนอเมอร์ ดังนั้นการหาภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบพอลิพิริโรลบนแผ่นทองแดงจะใช้แผ่นทองแดงเป็นขั้วแอโนด และ สแตนเลสเป็นขั้วแคโทด โดยการเคลือบชั้นฟิล์มด้วยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันจะขึ้นกับกระแสไฟฟ้า ระยะเวลาการสังเคราะห์ ความเข้มข้นของสาร เป็นต้น [38] โดยงานวิจัยนี้จะทำที่ความเข้มข้นของมอนอเมอร์คงที่ และศึกษาผลของกระแสไฟฟ้า กับ เวลา ดังนี้

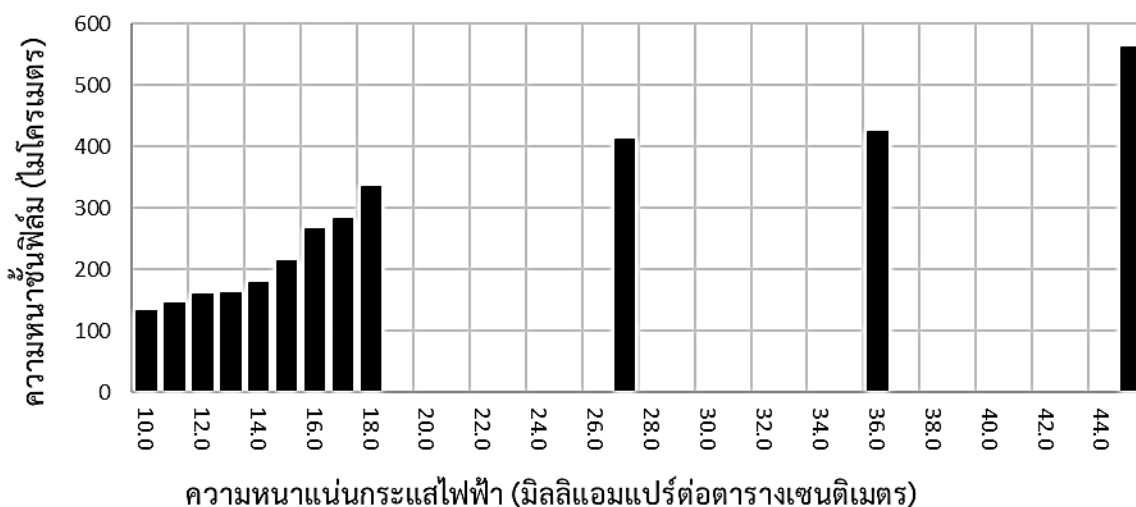
4.2.1 ผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า

ส่วนนี้เป็นการศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (Current density) ในสารละลายผสมระหว่างกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร กับพิริโรลมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยใช้ระยะเวลาในการเคลือบครั้งที่ 15 นาที พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 1.4 โวลต์ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 1.23 ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 5.59 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เริ่มมีการเคลือบพอลิพิริโรลแต่เกิดการเคลือบไม่ทั่วทั้งแผ่น แสดงดังรูปที่ 22 ก.) สามารถยืนยันผลด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ว่ามีการเคลือบพอลิพิริโรลจริง แสดงดังรูปที่ 48 เนื่องจากปริมาณความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อการเคลือบ เมื่อเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้นทำให้เกิดการเคลือบพอลิพิริโรลทั่วทั้งแผ่น และเมื่อเคลือบที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่มากขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์

ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 1.9 โวลต์ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 1.25 ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 5.46 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เกิดการเคลือบของชั้นฟิล์มพอลิไพร์โรลที่เรียบเนียน แสดงดังรูปที่ 22 ข.) หลังจากนั้นเมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้นจะทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มพอลิไพร์โรลมากขึ้นเรื่อย ๆ จนเกิดเป็นชั้นฟิล์มที่ไม่เรียบเนียนมีผิวขรุขระ โดยเริ่มมีลักษณะนี้เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 18.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าความต่างศักย์เท่ากับ 4.1 โวลต์ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีค่าความเป็นกรด-เบส เท่ากับ 1.23 ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 5.43 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 22 ค.) จะเกิดการหลุดร่อนของพอลิไพร์โรลที่เคลือบบนผิวทองแดงออกมา เนื่องจากฟองแก๊สที่มากขึ้นอีกทั้งสารละลายโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเป็นสารลดแรงตึงผิวทำให้มีฟองมากกว่าสารละลายอื่น ทำให้ฟองไปแทรกบริเวณระหว่างผิวทองแดงกับชั้นฟิล์มพอลิไพร์โรลทำให้ฟิล์มพอลิไพร์โรลหลุดร่อนออกมาบางส่วนได้อีกทั้งยังมีการเกิดขึ้นของชั้นฟิล์มที่หนาและขรุขระซึ่งไม่เหมาะต่อการนำมาใช้งาน สรุปผลที่ได้พบว่าเมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงขึ้นความหนาของชั้นฟิล์มจะมีความหนาเพิ่มมากขึ้นด้วย แสดงดังรูปที่ 23



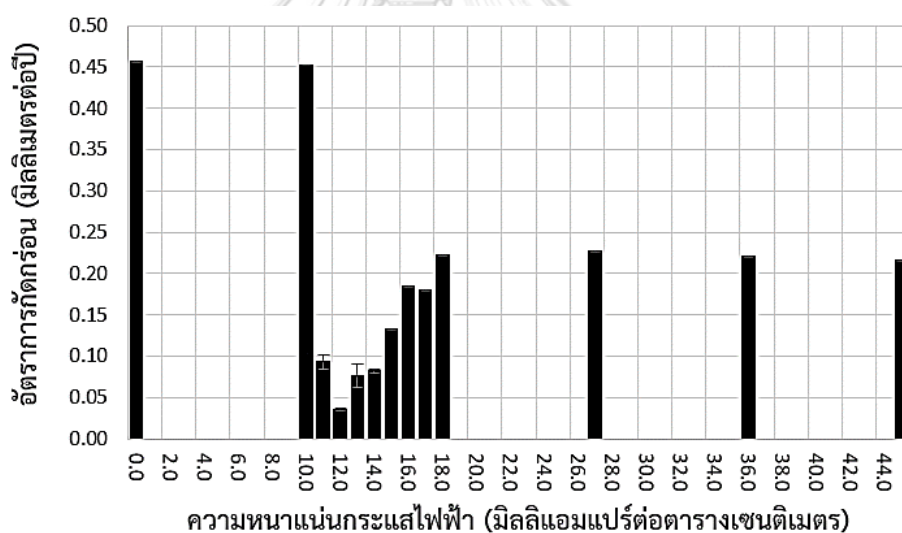
รูปที่ 22 ผลการเคลือบในสารละลายไพร์โรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร เวลา 15 นาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างกัน ก.) ลักษณะการเคลือบชั้นฟิล์มพอลิไพร์โรลไม่ทั่วทั้งแผ่นที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ข.) ลักษณะการเคลือบชั้นฟิล์มพอลิไพร์โรลที่เรียบเนียน ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ค.) ลักษณะผิวชั้นฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ไม่เรียบเนียนมีผิวขรุขระเริ่มมีลักษณะนี้เมื่อใช้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 18.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร



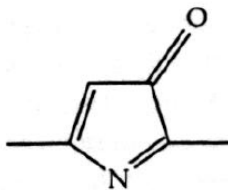
รูปที่ 23 ความหนาของฟิล์มพอลิพิริโรลกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า ที่ได้จากการเคลือบในสารละลายพริโรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เวลา 15 นาที

นำแผ่นทองแดงที่ผ่านการเคลือบแล้วมาวัดค่าการป้องกันการกัดกร่อนสามารถวัดได้จากกราฟ Tafel plot แสดงดังรูปที่ 55 และค่าการนำไฟฟ้า โดยค่าการป้องกันการกัดกร่อนสามารถดูได้จากค่าอัตราการกัดกร่อน (Corrosion rate) โดยค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าน้อย หมายถึงมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนดี ถ้ามีค่ามากประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนลดลง นอกจากนี้สามารถดูได้จากค่ากระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (Corrosion current density, I_{corr}) และศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (Corrosion potential, E_{corr}) โดยค่า I_{corr} น้อย หมายถึงมีอัตราการกัดกร่อนน้อย พบว่าเมื่อค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ค่า I_{corr} มีค่าลดลง ส่วนค่า E_{corr} มีค่าเพิ่มมากขึ้น หมายถึงเกิดการกัดกร่อนได้ยาก แต่ในที่นี้จะพูดถึงอัตราการกัดกร่อนเนื่องจากพิจารณาค่าป้องกันการกัดกร่อนได้ง่ายกว่าตัวแปรอื่นที่กล่าวมา ผลการทดลองพบว่า ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ให้ค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ 0.4523 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งมีความอัตราการกัดกร่อนใกล้เคียงกับแผ่นทองแดงที่ไม่ผ่านการเคลือบมีค่าเท่ากับ 0.4567 มิลลิเมตรต่อปี แสดงว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีการเคลือบพอลิพิริโรลไม่ทั่วทั้งแผ่นเนื่องจากความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าไม่เพียงพอต่อการเคลือบ และเมื่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้นค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าลดลงจนถึงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร หลังจากนั้นค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 24 อาจเนื่องมาจากการเคลือบพอลิพิริโรลบนผิวของแผ่นทองแดงเริ่มมีการเคลือบที่ไม่เรียบเนียนสม่ำเสมอทั้งแผ่น ทั้งนี้สาเหตุเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่สูงเกินไปทำให้เกิดฟองแก๊สขึ้นที่ผิวแผ่นทองแดง

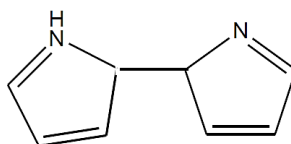
ทำให้การยึดเกาะของฟิล์มไม่ดี อีกทั้งยังสามารถเกิด Overoxidation ได้เนื่องจากน้ำที่อยู่ในสารละลายเป็นนิวคลีโอไฟล์ (Nucleophile) ชนิดหนึ่งที่สามารถทำปฏิกิริยากับเรดิคัลแคทไอออน (Radical cation) หรือมอนอเมอร์พรีโพลทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีหมู่คาร์บอนิลเป็นองค์ประกอบ [17] แสดงดังรูปที่ 25 สามารถยืนยันได้ด้วยผลของ Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ว่ามีหมู่คาร์บอนิลเป็นองค์ประกอบจริง แสดงดังรูปที่ 48 เมื่อพอลิพรีโพลจากเดิมมีไนโตรเจนประจุบวกแต่เกิดเป็นหมู่คาร์บอนิล และหมู่ไฮดรอกซิลแทน ทำให้เกิดความขรุขระของชั้นฟิล์มมากขึ้น การป้องกันการกัดกร่อนแย่ง นอกจากนี้ตัวกลางเรดิคัลแคทไอออนของมอนอเมอร์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการสังเคราะห์ อาจเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงในรูปแบบอื่น ๆ ได้ เช่น การเกิดปฏิกิริยาการจับกันของอะตอมไฮโดรเจนได้เป็นโมเลกุลอิสระซึ่งสามารถเกิดการรวมตัวกับมอนอเมอร์พรีโพลตัวอื่นทำให้พอลิเมอร์มีโครงสร้างแบบไม่คอนจูเกตซึ่งส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าทำให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลงอีกด้วย [35] แสดงดังรูปที่ 26



รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนกับกระแสไฟฟ้าจากการเคลือบในสารละลายพรีโพลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เวลา 15 นาที



รูปที่ 25 ผลิตรภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการเกิด Overoxidation ที่เกิดระหว่างการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลได้หมู่คาร์บอนิลเป็นองค์ประกอบ

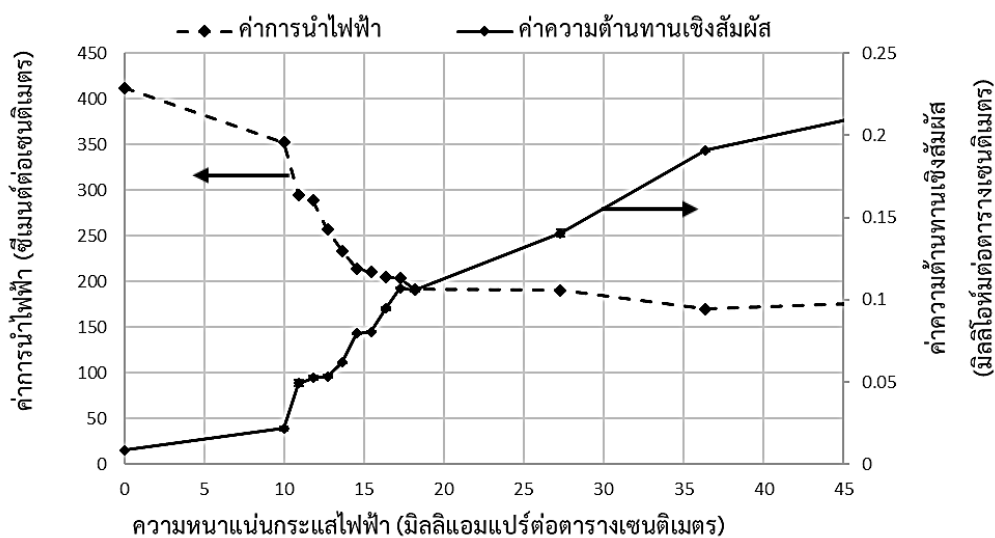


รูปที่ 26 ผลิตรภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการเกิด Overoxidation ที่เกิดระหว่างการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลเกิดเป็นพอลิไพร์โรลที่มีโครงสร้างแบบไม่คอนจูเกต

ค่า ICR หรือ ค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น และค่าการนำไฟฟ้าลดลงเมื่อความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลเกิดเป็นหมู่ดังกล่าวและโครงสร้างที่ไม่เหมาะสมต่อการนำไฟฟ้า ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ให้ค่าการนำไฟฟ้าและค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ใกล้เคียงกับแผ่นทองแดงที่ไม่ผ่านการเคลือบ สามารถยืนยันได้ว่าเคลือบฟิล์มพอลิไพร์โรลไม่ทั่วทั้งแผ่นจริง แสดงดังรูปที่ 27

เปรียบเทียบค่าการนำไฟฟ้าและค่าการป้องกันการกัดกร่อนเพื่อให้เหมาะสมสำหรับนำไปทำเป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง พบว่าที่ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 257 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 0.077 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าการป้องกันการกัดกร่อนที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร กับที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าอื่น ๆ พบว่าให้ค่าการป้องกันการกัดกร่อนดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 0.0352 มิลลิเมตรต่อปี เมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานของขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงพบว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือต้องมีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 100 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ต้องมีค่าน้อยกว่า 20 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร และค่าการป้องกันการกัดกร่อนต้องมีค่าน้อยกว่า 0.37 มิลลิเมตรต่อปี [27] แต่ที่ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 192 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์มีค่าเท่ากับ 0.167 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 18.2 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าการป้องกัน

การกัดกร่อนเท่ากับ 0.2225 มิลลิเมตรต่อปี พบว่าให้ค่าการนำไฟฟ้า และค่าการป้องกันการกัดกร่อน อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เช่นเดียวกัน แต่มีค่าการป้องกันการกัดกร่อนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถป้องกันการกัดกร่อน และมีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด



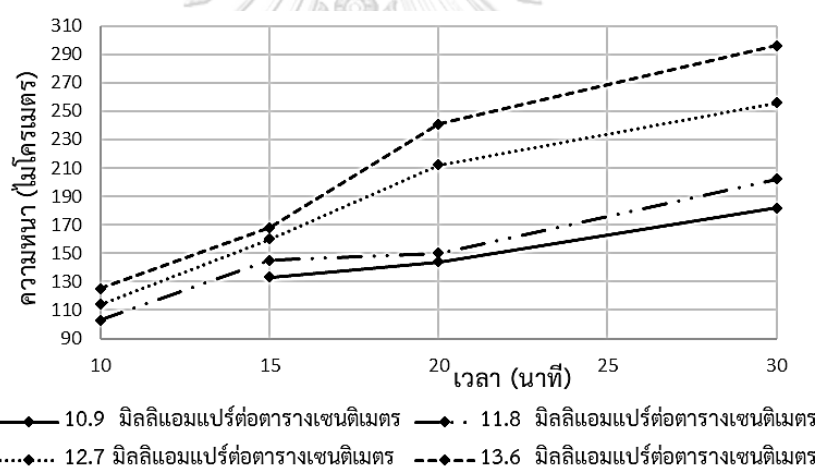
รูปที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความต้านทานเชิงสัมผัสกับความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการเคลือบในสารละลายพริโรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างๆ เวลา 15 นาที

4.2.2 ผลของเวลา

จากการทดลองตอนที่ 4.2.1 พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นระยะเวลา 15 นาที ได้ค่าการป้องกันการกัดกร่อนดีที่สุด แต่ได้ค่าการนำไฟฟ้ายังไม่สูงมากนักมีค่าเท่ากับ 257 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นทองแดงที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 412 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร จึงต้องการการปรับปรุงให้มีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดี โดยศึกษาผลของการเพิ่มและลดระยะเวลาในการเคลือบ ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 10.0, 10.9, 11.8, 12.7 และ 13.6 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเคลือบพอลิพริโรลบนแผ่นทองแดงที่ค่ากระแสไฟฟ้าต่าง ๆ โดยคาดว่าหากมีการให้เวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะสามารถป้องกันการกัดกร่อนได้เพิ่มขึ้น และมีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น โดยจะศึกษาในช่วงระยะเวลา 10 - 30 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.0 มิลลิแอมแปร์

ต่อตารางเซนติเมตร การเคลือบฟิล์มพอลิพีร์โรลิตดั่วทั้งแผ่นที่เวลา 30 นาที แต่ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.9 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถเคลือบได้ทั่วทั้งแผ่นที่เวลา 15 ถึง 30 นาที

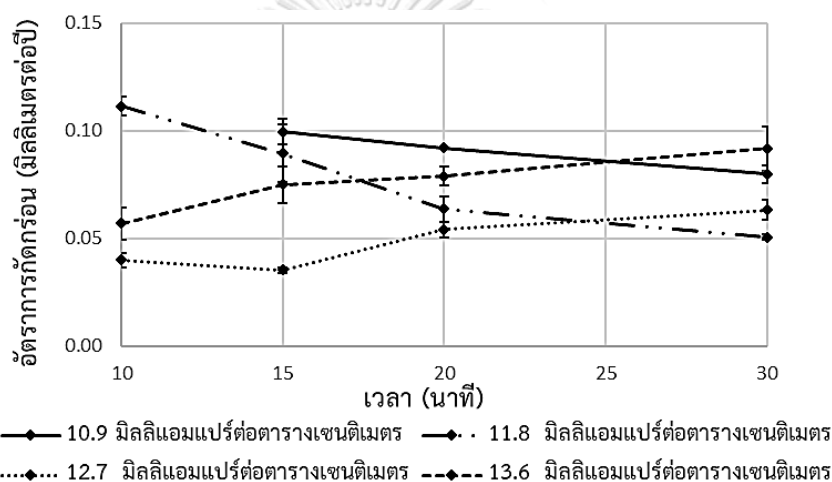
เมื่อเปรียบเทียบที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเดียวกันความหนาของฟิล์มพอลิพีร์โรลหนามากขึ้นเมื่อให้เวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบที่กระแสไฟฟ้าต่างกันที่เวลาเดียวกันพบว่าความหนาของฟิล์มพอลิพีร์โรลเพิ่มมากขึ้นเมื่อให้ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ามากขึ้น แสดงดังรูปที่ 28 เป็นไปตามการทดลองของพัชราลัย [39] ที่ทุกค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลักษณะฟิล์มพอลิโรลที่ได้จะมีลักษณะเรียบเนียนจนถึงนาที่ที่ 15 นาที หลังจากนั้นที่ 20 ถึง 30 นาที เริ่มมีการเคลือบที่หนาเกินจนลักษณะของฟิล์มพอลิพีร์โรลที่ได้เรียงตัวไม่เป็นระเบียบดังรูปที่ 22 ค.) ยกเว้นที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นระยะเวลา 30 นาที มีลักษณะการเคลือบฟิล์มพอลิพีร์โรลที่เรียบเนียน เนื่องจากพืงมีการเคลือบฟิล์มพอลิพีร์โรลิตดั่วทั้งแผ่น



รูปที่ 28 ความหนาของฟิล์มพอลิพีร์โรลกับเวลา ที่ได้จากการเคลือบในสารละลายพืร์โรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร

การป้องกันการกัดกร่อน โดยปกติแล้วเมื่อให้เวลาในการเคลือบมากขึ้นค่าอัตราการกัดกร่อนจะต้องมีค่าลดลงเนื่องจากมีชั้นฟิล์มพอลิเมอร์เข้าไปเคลือบบนโลหะมีลักษณะของฟิล์มที่เรียบมีการยึดเกาะฟิล์มที่ดี แต่เมื่อถึงที่ระยะเวลาหนึ่งที่เกิดขึ้นฟิล์มที่หนาเกินไปทำให้การยึดเกาะของฟิล์มไม่ดีเป็นเหตุให้การป้องกันการกัดกร่อนต่ำลง [40] ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 10.9 และ 11.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าอัตราการกัดกร่อนลดลงเมื่อให้ระยะเวลาในการเคลือบพอลิพีร์โรลเพิ่มขึ้น เนื่องจากให้ระยะเวลาในการเคลือบพอลิพีร์โรลมากพอส่งผลให้การยึดเกาะของฟิล์มพอลิพีร์โรลดีขึ้นมีลักษณะของฟิล์มที่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานมากขึ้นทำให้อัตราการกัดกร่อนลดลง ส่วน

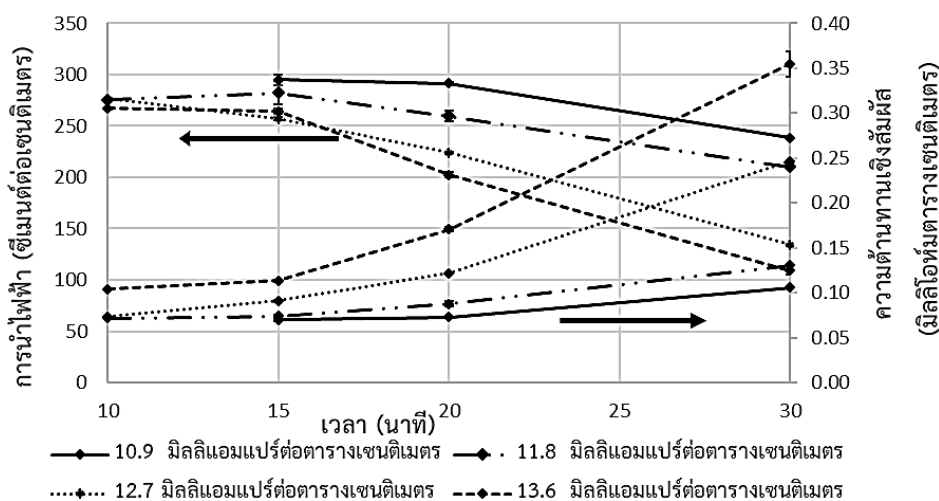
ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 12.7 และ 13.6 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการให้ระยะเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้น แต่เมื่อให้ระยะเวลาในการเคลือบลดลงเหลือ 10 นาที พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 13.6 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าอัตราการกัดกร่อนลดลง ส่วนที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อสรุปจากรูปที่ 29 ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ 15 นาที มีค่าอัตราการกัดกร่อนน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างกัน ที่เวลาเท่ากัน เนื่องจากมีการยึดเกาะของฟิล์ม และลักษณะของฟิล์มที่ดีที่สุดซึ่งสามารถสรุปได้ว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่ากับ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่ 15 นาที สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด



รูปที่ 29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนกับเวลาของการเคลือบ ในสารละลายพีวีโรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซินซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร

ค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์มีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบซึ่งแปลผลผกผันกับค่าการนำไฟฟ้า ค่าการนำไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 30 สามารถสรุปได้ว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เวลา 15 นาที สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีที่สุด เนื่องจากมีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.0352 มิลลิเมตรต่อปี เมื่อดูที่ค่าการนำไฟฟ้าพบว่ามีความเท่ากับ 257 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์เท่ากับ 0.091 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร ในขณะที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เวลา 10 นาที พบว่ามีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.040 มิลลิเมตรต่อปี ซึ่งไม่แตกต่างจากการเคลือบที่ระยะเวลา 15 นาที มากนัก เมื่อดูที่ค่าการนำไฟฟ้าพบว่ามีความเท่ากับ 277 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์เท่ากับ 0.073 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร ดังนั้นจึงสรุปว่าเมื่อให้ระยะเวลาในการเคลือบเป็น 10 นาที ที่ภาวะค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตาราง

เซนติเมตร มีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน และค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด แต่ค่าการนำไฟฟ้ายังมีค่าไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นทองแดง เราจึงหาวิธีที่จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้นโดยจะกล่าวในลำดับถัดไป



รูปที่ 30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความต้านทานเชิงสัมพันธ์กับเวลา ที่ได้จาก การเคลือบในสารละลายพิริโรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร

4.3 ผลของการเติมผงคาร์บอนวอลล์แคนลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างพอลิพิริโรลมอนอเมอร์กับกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค

จากผลการทดลองที่ 4.2.2 พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เมื่อให้ระยะเวลาในการเคลือบลดลงเป็น 10 นาที ยังให้ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนได้ดี และค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นมีค่าเท่ากับ 277 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร แต่สูงไม่มากนักเนื่องจากค่าการนำไฟฟ้าของแผ่นทองแดงมีค่าเท่ากับ 412 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร แต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือต้องมีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 100 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร [27] จึงมีการเติมผงคาร์บอนซึ่งในการทดลองนี้ใช้ผงคาร์บอนวอลล์แคนมีขนาดเล็กขนาด 50 นาโนเมตร และมีค่าการนำไฟฟ้าสูง ที่ผ่านการทรีตด้วยกรดแล้วทำให้เกิดหมู่ฟังก์ชันบริเวณพื้นผิวของคาร์บอนประกอบไปด้วยหมู่ -OH, -NH₂, และ -SH₂ แล้วเมื่อเกิดการแตกตัวในสารละลายจะส่งผลให้พื้นผิวของคาร์บอนมีประจุเป็นลบสามารถเกิดการจับกับบริเวณไนโตรเจนประจุบวกของพิริโรลมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ทำให้มีคาร์บอนวอลล์แคนเกาะบนสายโซ่ของพอลิเมอร์ [41] เติมนลงไปในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมโดยคาดว่าจะทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มเพิ่มขึ้น โดยภาวะที่เลือกใช้มี 2 ภาวะ คือ ภาวะแรก ที่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 10 นาที และภาวะที่สองที่ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 15 นาที

4.3.1 ที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรเป็นเวลา 10 นาที

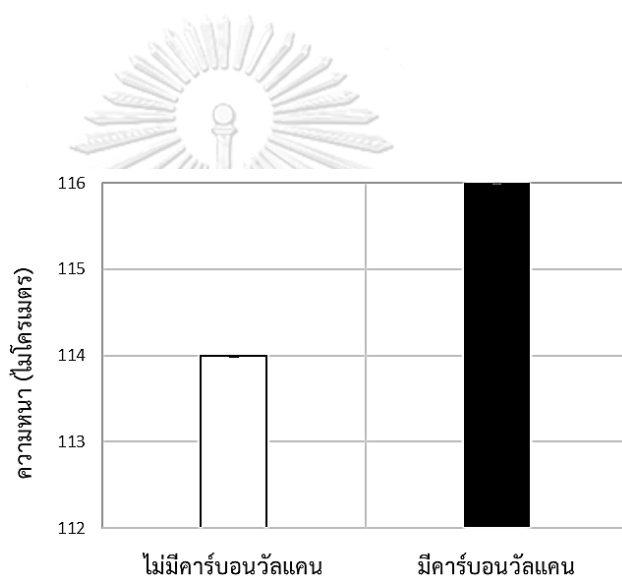
ศึกษาปริมาณผงคาร์บอนวัลแคนที่สามารถเติมได้ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมแล้วสามารถเคลือบพอลิพีร์โรลบนแผ่นทองแดงได้ทั่วทั้งแผ่น โดยศึกษาปริมาณในช่วง 2.7 – 6.7 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าภาวะนี้ปริมาณผงคาร์บอนที่สามารถเติมได้มากที่สุด คือ 3.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ถึงจะสามารถเคลือบได้ทั่วทั้งแผ่นโดยมีคาร์บอนที่เข้าไปเคลือบบนแผ่นทองแดงเพียงแค่ส่วนหนึ่งเท่านั้น แสดงดังรูปที่ 31 นอกนั้นไม่สามารถเคลือบได้ทั่วทั้งแผ่นยังคงเหลือพื้นที่ที่ไม่ถูกเคลือบอยู่ ดังแสดงในตารางที่ 5 และมีลักษณะของฟิล์มที่ได้ต่างจากเดิม คือมีลักษณะสีดำและเงามากขึ้นที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากมีคาร์บอนไปเกาะรวมกับฟิล์มพอลิพีร์โรล ทำให้พีร์โรลมอนอเมอร์ต้องเข้าไปเกาะบริเวณพื้นผิวของคาร์บอนที่พีร์โรลมอนอเมอร์ยังไม่ได้เข้าไปเกาะ ส่งผลให้มีพื้นที่ในการเคลือบเพิ่มขึ้นจากเดิม มีค่าการนำไฟฟ้าลดลงมีความต้านทานในระบบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปฏิกิริยาในเคลือบลดลง จึงไม่สามารถเคลือบได้ทั่วทั้งแผ่น ความหนาที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเติมผงคาร์บอนวัลแคน ในสารละลายปริมาณ 3.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยมีค่าเท่ากับ 116 ไมโครเมตร มีความหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับที่ไม่เติมผงคาร์บอน เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอนวัลแคนเข้าไปรวมด้วยทำให้มีความหนาเพิ่มขึ้น แสดงดังรูปที่ 32

ตารางที่ 5 ศึกษาปริมาณผงคาร์บอนวัลแคนที่เติมลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ปริมาณคาร์บอนวัลแคนที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ผลของการเคลือบ
2.7	เคลือบ ไม่ติดทั่วทั้งแผ่น
3.3	เคลือบ ติดทั่วทั้งแผ่น
4.0	เคลือบ ไม่ติดทั่วทั้งแผ่น
4.6	เคลือบ ไม่ติดทั่วทั้งแผ่น
5.3	เคลือบ ไม่ติดทั่วทั้งแผ่น
6.0	เคลือบ ไม่ติดทั่วทั้งแผ่น
6.7	เคลือบ ไม่ติดทั่วทั้งแผ่น

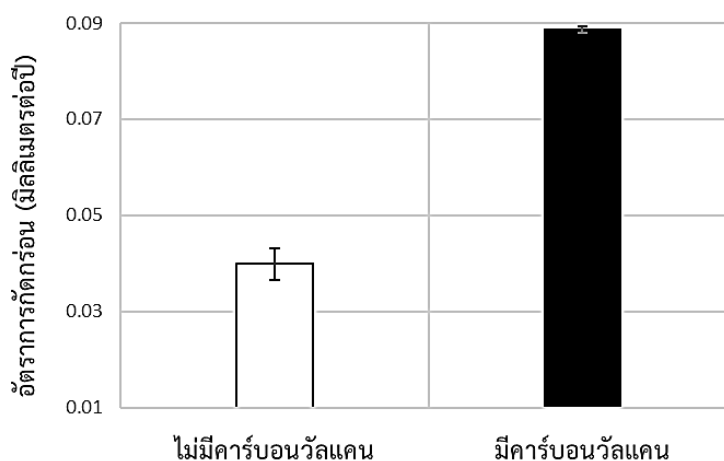


รูปที่ 31 ลักษณะฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกเคลือบบนแผ่นทองแดงที่มีคาร์บอนวัลแคน และไม่มีคาร์บอนวัลแคน ก.) มีคาร์บอนวัลแคนในฟิล์มพอลิไพร์โรล ข.) ไม่มีคาร์บอนวัลแคน



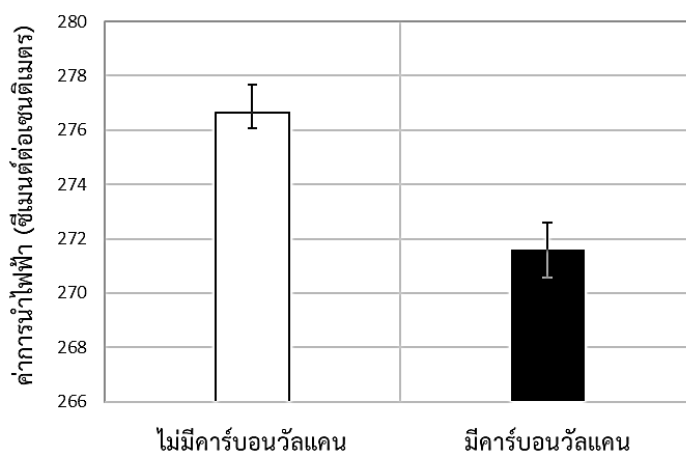
รูปที่ 32 เปรียบเทียบความหนาของชิ้นงานในการเคลือบที่มีและไม่มีคาร์บอน ในสารละลายไพร์โรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร และคาร์บอนวัลแคน 3.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนลดลง เนื่องจากอัตราการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ 0.089 มิลลิเมตรต่อปี ค่าอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับที่ไม่เติมผงคาร์บอน แต่ก็ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือน้อยกว่า 0.37 มิลลิเมตรต่อปี [27] แสดงดังรูปที่ 33 ทั้งนี้เนื่องจากที่ภาวะนี้ทำให้การฟอร์มตัวระหว่างคาร์บอน และพอลิไพร์โรลบนแผ่นทองแดงมีโครงสร้างที่ไม่เหมาะสมต่อการป้องกันการกัดกร่อนคือมีโครงสร้างการจับกันระหว่างคาร์บอนกับพอลิไพร์โรลที่สามารถเกิดการซึมผ่านของกรดกัดกร่อนได้ง่าย ทำให้เกิดการกัดกร่อนได้ง่ายกว่าที่เคลือบด้วยพอลิไพร์โรลชนิดเดียวซึ่งมีโครงสร้างเป็นร่างแหปกคลุมแผ่นทองแดงได้ดีเกิดการซึมของกรดการกัดกร่อนได้ยากกว่า [42]

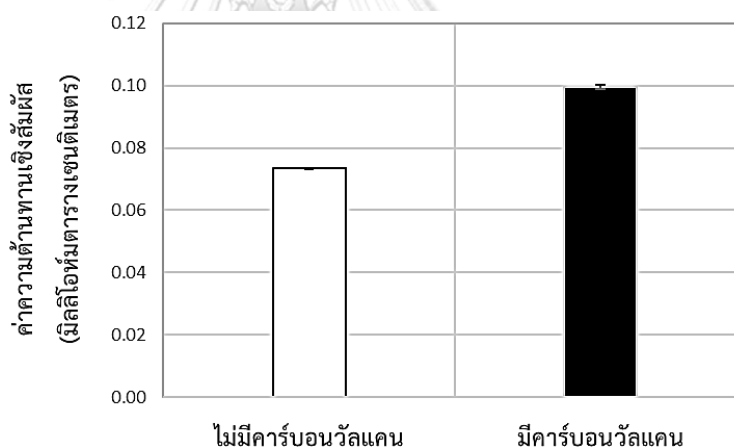


รูปที่ 33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราการกัดกร่อนที่มีและไม่มีคาร์บอนเคลือบ ในสารละลายฟิโรลอมอนอเมอร์ 0.15 กรดโตนิกเบนซีนซัลโฟนิก 0.05 โมลต่อลิตร และคาร์บอนวัลแคน 3.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 10 นาที

ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 271 ซีเมนตต่อเซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 34 ค่าการนำไฟฟ้าลดลงเมื่อเทียบกับที่ไม่เติมผงคาร์บอน และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าเท่ากับ 0.1 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 35 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับที่ไม่เติมผงคาร์บอน ที่ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าลดลงเนื่องจากความหนาของฟิล์มพอลิฟิโรลที่ผสมกับคาร์บอนทำให้มีความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้น อีกทั้งปริมาณในการเคลือบผงคาร์บอนวัลแคนที่น้อยเกินไปทำให้คาร์บอนไม่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าลดลงจากเดิม ดังนั้นเพื่อที่จะทำให้ค่าการนำไฟฟ้าและค่าการป้องกันการกัดกร่อนดีขึ้น สามารถแก้ปัญหาได้โดยการเพิ่มระยะเวลาในการเคลือบเพิ่มขึ้นเป็น 15 นาที ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเดิม เนื่องจากที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเดิมที่ 12.7 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร ให้ค่าการนำไฟฟ้า และการป้องกันการกัดกร่อนดีอยู่แล้ว แต่เมื่อมีการผสมผงคาร์บอนวัลแคนเข้าไปทำให้การเคลือบฟิล์มพอลิฟิโรลบนแผ่นทองแดงยากขึ้น จึงเพิ่มระยะเวลาในการเคลือบเพื่อให้มีระยะเวลาในการเคลือบเพียงพอที่จะทำให้สามารถเคลือบฟิล์มพอลิฟิโรลที่ผสมผงคาร์บอนได้ทั่วทั้งแผ่น นอกจากนี้ยังต้องทำให้ปริมาณการเติมผงคาร์บอนเพียงพอที่จะส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าได้มากขึ้น และการฟอร์มตัวกันระหว่างคาร์บอนกับพอลิฟิโรลได้ดีขึ้นทำให้มีโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการป้องกันการกัดกร่อน โดยมีสมมติฐานว่าเมื่อเพิ่มระยะเวลาในการเคลือบจะสามารถเพิ่มปริมาณผงคาร์บอนทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น สามารถเคลือบฟิล์มพอลิฟิโรลผสมคาร์บอนวัลแคนได้ทั่วทั้งแผ่น อีกทั้งยังต้องมีโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการป้องกันการกัดกร่อนทำให้ค่าการป้องกันการกัดกร่อนดีขึ้นจากเดิม



รูปที่ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าที่มีและไม่มีคาร์บอนเคลือบ ในสารละลายพรีโพลมอโนเมอร์ 0.15 กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร และคาร์บอนวัลแคน 3.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแส 12.7 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 10 นาที

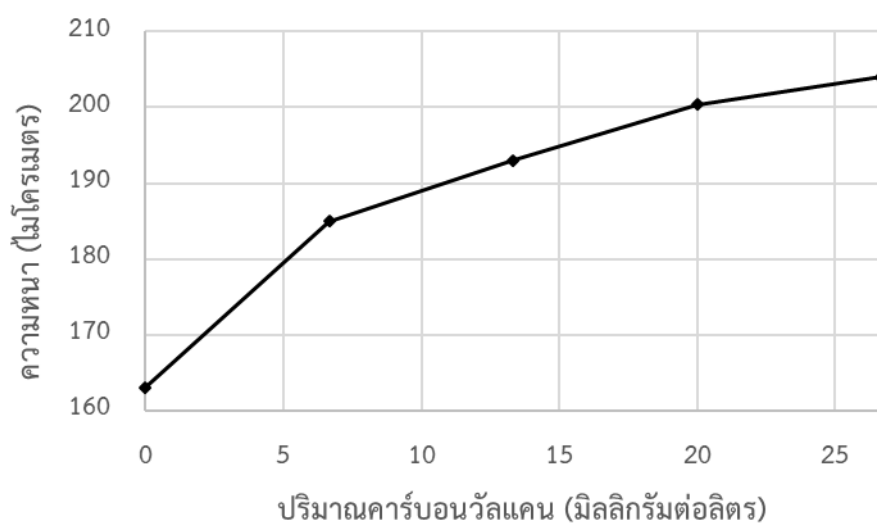


รูปที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงสัมผัสที่มีและไม่มีคาร์บอนเคลือบ ในสารละลายพรีโพลมอโนเมอร์ 0.15 กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร และคาร์บอนวัลแคน 3.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแส 12.7 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 10 นาที

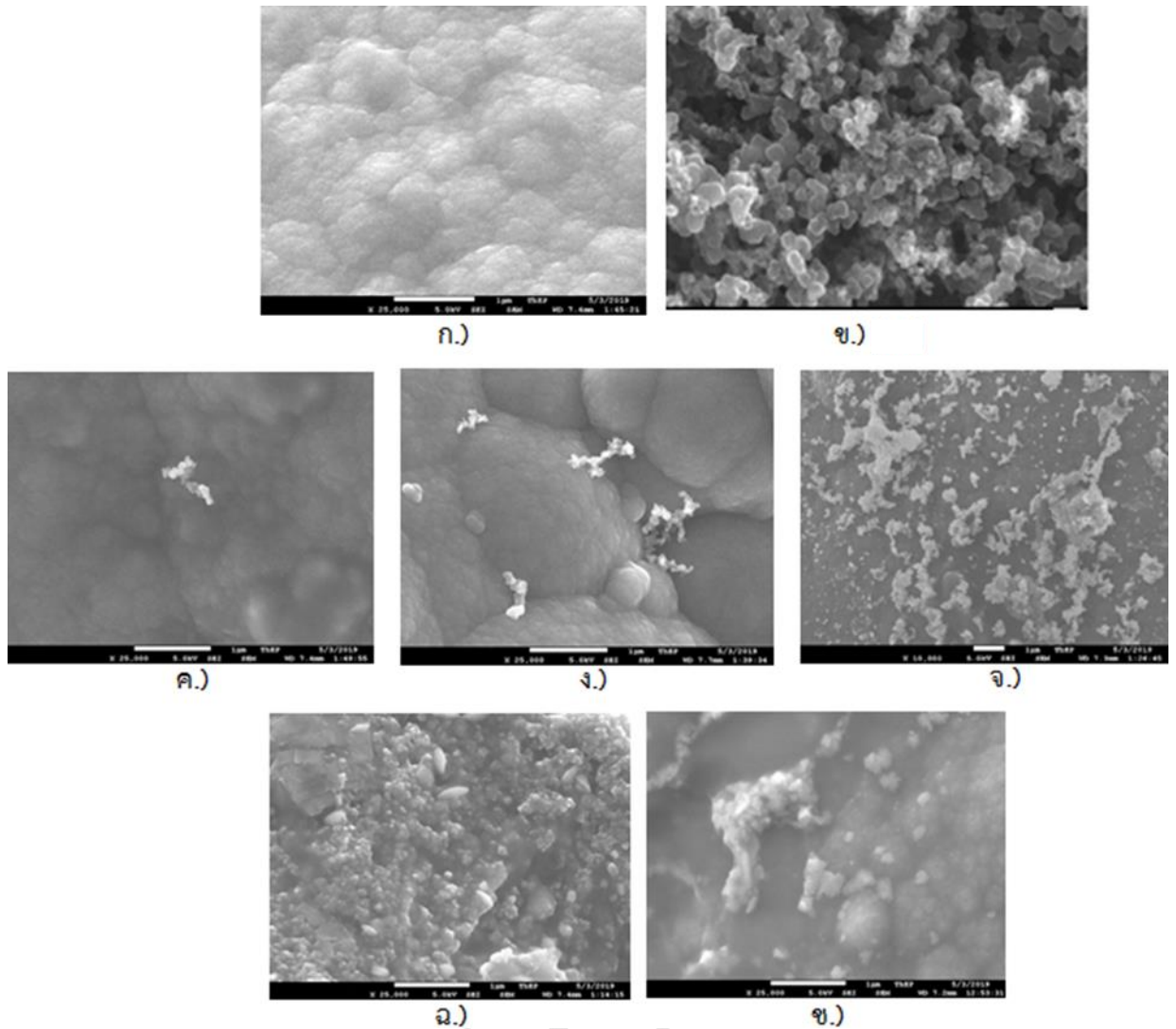
4.3.2 ที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรเป็นเวลา 15 นาที

เนื่องจากการทดลองที่ 4.3.1 พบว่าที่การเคลือบที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 10 นาที สามารถเติมคาร์บอนวัลแคนได้แค่ 3.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่งผลให้ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนลดลง และค่าการนำไฟฟ้าลดลง ดังนั้นจึงทำการเพิ่มเวลาในการเคลือบให้มากขึ้นที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเดิมที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็น 15 นาที เริ่มจากศึกษาปริมาณผงคาร์บอนวัลแคนที่สามารถเติมได้ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แล้วสามารถเคลือบพอลิพีโรล บนแผ่นทองแดงได้ทั่วทั้งแผ่น โดยศึกษาปริมาณคาร์บอนวัลแคนที่เติมลงในสารละลาย พบว่าในภาวะนี้สามารถเติมผงคาร์บอนวัลแคนได้ ตั้งแต่ 6.7 – 26.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ปริมาณผงคาร์บอนวัลแคนมากกว่า 26.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่สามารถเคลือบได้ทั่วทั้งแผ่น เนื่องจากมีปริมาณผงคาร์บอนมากเกินไปทำให้ไปขัดขวางการเคลือบของพอลิพีโรลที่จะมาเกาะบนแผ่นทองแดงทำให้เกิดการเคลือบยากขึ้น อีกทั้งมีฟิล์มออกไซด์ของแผ่นทองแดง และสารเติมแต่งอย่างกรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเกิดขึ้นบริเวณที่ไม่ถูกเคลือบอีกด้วย ลักษณะของฟิล์มที่สามารถเคลือบติดได้ทั่วทั้งแผ่นมีลักษณะเป็นสีดำเงา ความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นมากเมื่อมีการเติมคาร์บอนวัลแคนปริมาณ 6.7 มิลลิกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นมีความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มขึ้นแต่ไม่สูงมากนัก แสดงดังรูปที่ 36 เนื่องจากมีโมเลกุลของคาร์บอนวัลแคนเข้าไปเคลือบด้วยจึงทำให้มีความหนาเพิ่มขึ้นจากเดิมสูงมาก หลังจากนั้นเมื่อเติมคาร์บอนมากขึ้นพบว่าโมเลกุลของคาร์บอนวัลแคนเริ่มกระจายตัวบนพอลิพีโรลทำให้มีความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อยสามารถยืนยันผลด้วยผลวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน หรือ Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) แสดงดังรูปที่ 37 โดยรูป ก.) ลักษณะพื้นผิวของพอลิพีโรลฟิล์มที่เคลือบอยู่บนแผ่นทองแดง ข.) ลักษณะของผงคาร์บอน ค.) ลักษณะพื้นผิวพอลิพีโรลฟิล์มที่เคลือบผงคาร์บอนลงบนแผ่นทองแดงเมื่อใช้ปริมาณคาร์บอนที่น้อยจะพบว่าพื้นผิวมีปริมาณคาร์บอนน้อยตามด้วย ง.) ลักษณะพื้นผิวพอลิพีโรลฟิล์มที่เคลือบผงคาร์บอนลงบนแผ่นทองแดงเมื่อใช้ปริมาณคาร์บอนเพิ่มขึ้นพบว่าพื้นผิวมีปริมาณคาร์บอนเคลือบเพิ่มขึ้นและกระจายตัวตามพื้นผิวพอลิพีโรลได้ดี จ.) ลักษณะพื้นผิวพอลิพีโรลฟิล์มที่เคลือบผงคาร์บอนลงบนแผ่นทองแดงเมื่อใช้ปริมาณคาร์บอนที่มากเกินไป พบว่าพื้นผิวมีปริมาณคาร์บอนเป็นกลุ่ม ๆ กระจายในชั้นเคลือบ และเริ่มมีพอลิพีโรลที่เกิด Overoxidation คือมีหมู่คาร์บอนิลผสมด้วย แสดงดังรูปที่ 48 รวมถึงเกิดพอลิพีโรลที่มีโครงสร้างแบบไม่มีคอนจุกเกตเกิดขึ้นบางส่วนของสายพอลิเมอร์ แสดงดังรูปที่ 38 [43] เนื่องจากเมื่อมีการเติมคาร์บอนลงในสารละลายทำให้ความเป็นกรด-เบสของสารละลายเปลี่ยนไปมีค่าความเป็นกรดมากขึ้น มีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 0.92 สังเกตได้จากบริเวณแผ่นใหญ่ที่ขยับเยียนทับบริเวณที่มีคาร์บอนอยู่ ซึ่งเป็นสาเหตุในการทำให้ค่าการป้องกันการกัดกร่อนและค่าการนำไฟฟ้าลดลง ส่วนใน

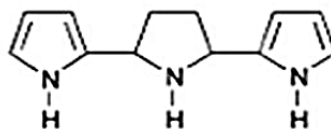
รูปที่ 37 ฉ.) ลักษณะพื้นผิวพอลิพีไรโรลฟิล์มมีการเคลือบคาร์บอนเพิ่มขึ้นเป็นกลุ่มใหญ่ แต่มีการเคลือบพอลิพีไรโรลหมุดังกล่าวสูงกว่าปริมาณคาร์บอนที่เข้าไปเคลือบส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าลดลง ส่วนในรูปที่ 37 ข.) พอลิพีไรโรลฟิล์มไม่สามารถเคลือบได้ทั่วทั้งแผ่น ทำให้คาร์บอนถูกเคลือบทับด้วยออกไซด์ของโลหะ สังเกตได้จากปริมาณคาร์บอนที่ถูกเคลือบเริ่มมีลักษณะกลมกลืนกับผิวของพอลิพีไรโรล



รูปที่ 36 เปรียบเทียบความหนากับปริมาณคาร์บอน 6.7 ถึง 26.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายพีไรโรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร

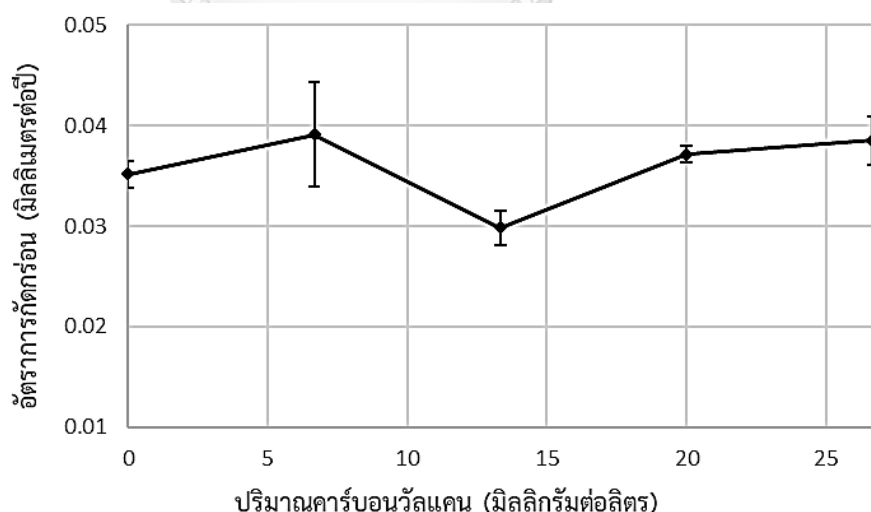


รูปที่ 37 การเคลือบที่มีการเติมผงคาร์บอนวัลแคนในปริมาณที่ต่างกันร่วมกับพอลิไพร์โรลบนแผ่นทองแดง ศึกษาลักษณะการเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน หรือ Field emission scanning electron microscope (FESEM) ก.) พอลิไพร์โรล ข.) ผงคาร์บอนวัลแคน [44] ค.) ผงคาร์บอนวัลแคน 6.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ง.) ผงคาร์บอนวัลแคน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร จ.) ผงคาร์บอนวัลแคน 20.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ฉ.) ผงคาร์บอนวัลแคน 26.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ช.) ผงคาร์บอนวัลแคน 33.3 มิลลิกรัมต่อลิตร



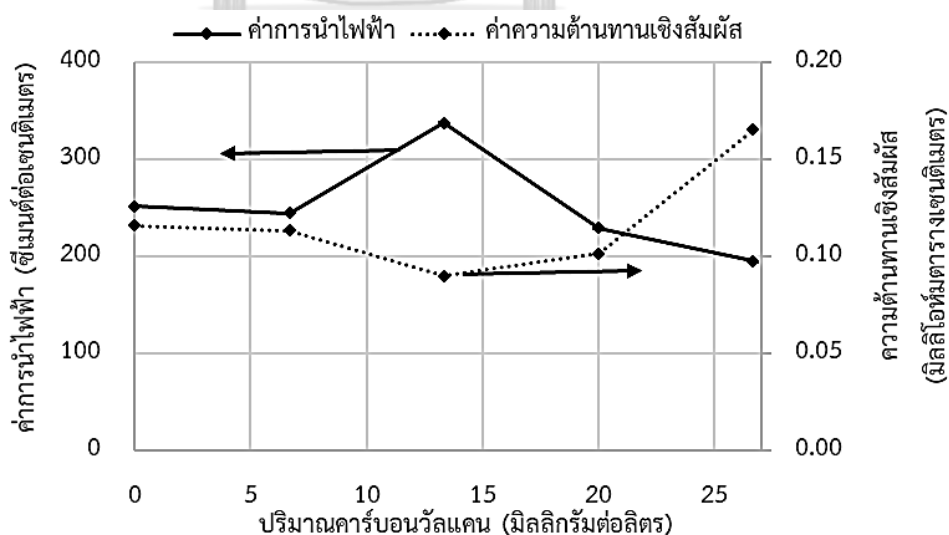
รูปที่ 38 รูปแบบพอลิไพร์โรลที่เกิดขึ้นแบบไม่คอนจูเกตบางส่วนของสายโซ่

ประสิทธิภาพการกัดกร่อนพบว่าเมื่อเติมคาร์บอนวัลแคนไป 6.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.039 มิลลิเมตรต่อปี มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นทองแดงที่เคลือบด้วยพอลิพีโรลที่ไม่มีคาร์บอนวัลแคนมีค่าเท่ากับ 0.035 มิลลิเมตรต่อปี เนื่องจากยังมีการฟอร์มตัวที่ไม่ดีระหว่างคาร์บอนวัลแคนกับพอลิพีโรลทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่ไม่เหมาะสมต่อการป้องกันการกัดกร่อนการยึดเกาะของฟิล์มไม่ดีจึงทำให้มีค่าอัตราการกัดกร่อนเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนวัลแคนเป็น 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าให้ค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ 0.030 มิลลิเมตรต่อปี มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับแผ่นทองแดงที่เคลือบด้วยพอลิพีโรลที่ไม่มีคาร์บอนวัลแคน แสดงว่าที่ 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร การเคลือบระหว่างคาร์บอนวัลแคนกับพอลิพีโรลเกิดการฟอร์มตัวกันที่ดีมีโครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนจึงทำให้ค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอนเป็น 20.0 และ 26.7 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ามีค่าอัตราการกัดกร่อนใกล้เคียงกันมีค่าเท่ากับ 0.037 และ 0.039 มิลลิเมตรต่อปี แต่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นทองแดงที่เคลือบแบบไม่มีคาร์บอนวัลแคน และที่ใส่ผงคาร์บอนวัลแคน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 39 เนื่องจากเริ่มมีความหนาของชั้นฟิล์มมากขึ้นเมื่อมีการเติมผงคาร์บอนในปริมาณที่มากขึ้น ส่งผลให้การยึดเกาะของฟิล์มที่มีคาร์บอนมากเกินไปเริ่มเกิดการหลุดร่อนของชั้นฟิล์มได้ง่ายขึ้นแต่ยังมีการยึดเกาะของฟิล์มที่ไม่แย่มาก จึงทำให้ค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่ยังมีโครงสร้างที่เหมาะสมต่อการป้องกันการกัดกร่อนจึงทำให้ค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่ามากกว่าแผ่นทองแดงที่เคลือบด้วยพอลิพีโรลที่ไม่มีคาร์บอนวัลแคน



รูปที่ 39 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนกับปริมาณคาร์บอน 6.7 ถึง 26.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ในสารละลายพริโรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร

ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสเมื่อนำมาเปรียบเทียบระหว่างการเติมผงคาร์บอนที่ปริมาณต่าง ๆ กับที่ไม่เติมผงคาร์บอนวัลแคน พบว่ามีค่าลดลงเมื่อเติมคาร์บอนวัลแคนไป 6.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 245 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และมีค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าเท่ากับ 0.114 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร เนื่องจากเติมผงคาร์บอนวัลแคนในปริมาณที่น้อย แต่มีความหนาของชั้นฟิล์มเพิ่มมากขึ้นทำให้ปริมาณคาร์บอนที่ใส่ลงไปส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าได้น้อย ทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าต่ำลง จากนั้นมีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดเมื่อเติมผงคาร์บอนวัลแคนในปริมาณ 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 338 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าเท่ากับ 0.090 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร เนื่องจากคาร์บอนวัลแคนที่เข้าไปเคลือบมีปริมาณที่มากเพียงพอ ทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่ามากขึ้น หลังจากนั้นที่ปริมาณคาร์บอนวัลแคน 20.0 และ 26.7 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าการนำไฟฟ้าลดลง และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น มีค่าเท่ากับ 230 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และ 0.102 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร 195 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และ 0.166 มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร ที่ 20.0 และ 26.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงดังรูปที่ 40 เนื่องจากมีความหนาของชั้นฟิล์มมากขึ้น อีกทั้งยังเริ่มมีพอลิไพร์โรลโครงสร้างแบบไม่มีคอนจุกเกตเกิดขึ้นบางส่วนของสายพอลิเมอร์ แสดงดังรูป 38 ทำให้ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าลดลงถึงแม้จะมีคาร์บอนวัลแคนปริมาณคาร์บอนที่มากขึ้นเพียงพอต่อการนำไฟฟ้า สรุปค่าการป้องกันการกัดกร่อนและค่าการนำไฟฟ้า ดังตารางที่ 6 ดังนั้นผลของการเติมผงคาร์บอนวัลแคนในปริมาณ 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าการนำไฟฟ้า และค่าการป้องกันการกัดกร่อนดีที่สุด ที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 15 นาที



รูปที่ 40 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความต้านทานเชิงสัมผัสกับปริมาณคาร์บอน 6.7 ถึง 26.7 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่เติมลงในสารละลายไพร์โรลมอนอเมอร์ 0.15 และกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค 0.05 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 6 สรุปค่าการป้องกันการกัดกร่อน ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ได้จากการทดลอง

ปริมาณผงคาร์บอนที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)	ความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอม์ตารางเซนติเมตร)	การนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ลักษณะฟิล์มที่ได้
ไม่มี	0.035 ± 0.00	0.077 ± 0.00	257.01 ± 1.81	มีสีดำเนื้อด้าน
6.7	0.039 ± 0.01	0.114 ± 0.00	244.84 ± 1.19	มีสีดำมันวาว
13.3	0.030 ± 0.00	0.090 ± 0.00	337.62 ± 0.86	มีสีดำมันวาว
20.0	0.037 ± 0.00	0.102 ± 0.00	229.58 ± 0.31	มีสีดำมันวาว
26.7	0.039 ± 0.00	0.166 ± 0.00	195.33 ± 2.23	มีสีดำมันวาว

4.4 ผลของขนาดช่องทางการไหลของแก๊สที่มีผลต่อการเคลือบ

ศึกษาช่องทางการไหลของแก๊สบนแผ่นทองแดง ขนาด และรูปแบบที่เหมาะสมของช่องทางการไหลของแก๊สที่สามารถเคลือบติดได้ทั่วทั้งแผ่น และประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อน รวมถึงค่าการนำไฟฟ้า นำมาเคลือบที่ภาวะที่ดีที่สุด คือ ที่ไม่มีการเติมคาร์บอนวัลแคนลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ใช้ภาวะที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นระยะเวลา 10 นาที และที่มีการเติมคาร์บอนวัลแคนใช้ภาวะที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมป์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นระยะเวลา 15 นาที ใส่ผงคาร์บอนวัลแคนปริมาณ 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีวัตถุประสงค์ คือ เมื่อมีช่องทางการไหลของแก๊ส ขนาดของช่องทางการไหลของแก๊ส และรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สบนแผ่นทองแดงที่แตกต่างกันจะส่งผลอย่างไรต่อการเคลือบฟิล์มรวมถึงประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อน และค่าการนำไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการนำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งมีเอกสารอ้างอิง 2 ฉบับ [34, 45] ที่เกี่ยวกับการศึกษาขนาด และรูปแบบของช่องทางการไหลแก๊สที่มีผลต่อประสิทธิภาพในเซลล์เชื้อเพลิง โดยเอกสารอ้างอิงของ Kapseung และคณะ [45] ใช้วัสดุเป็นแกรไฟต์คอมพอสิตที่สร้างช่องทางการไหลของแก๊ส ขนาด กว้าง 1 ยาว 10 ลึก 0.34 มิลลิเมตร ความกว้างระหว่างช่องเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ให้ค่าประสิทธิภาพในเซลล์เชื้อเพลิงที่ดีที่สุด และเอกสารอ้างอิงของ Dyihuey และคณะ [34] ใช้วัสดุเป็นโลหะแผ่นสแตนเลส สร้างขนาดช่องทางการ

ไหลของแก๊ส เท่ากับ กว้าง 0.5 ยาว 20 โดยที่ความลึก 0.4 มิลลิเมตร ให้ประสิทธิภาพในเซลล์เชื้อเพลิงดีที่สุด ความกว้างระหว่างช่องเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเริ่มศึกษาที่ขนาดกว้าง 1 ยาว 6 ลึก 0.4 มิลลิเมตร ความกว้างระหว่างช่องเท่ากับ 1 มิลลิเมตร โดยรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊สในปัจจุบันมีทั้งหมด 3 รูปแบบ conventional, serpentine และ interdigitated [8] โดยจะเลือกใช้รูปแบบ serpentine ในการเซาะร่องบนแผ่นทองแดง โดยจะศึกษา 2 รูปแบบ มีรูปแบบขนาน (Parallel) และแบบรูปตัวยู (U-shape)

ผลของขนาดช่องทางการไหลของแก๊สรูปแบบขนาน (Parallel) และแบบรูปตัวยู (U-shape)

โดยเริ่มจากรูปแบบขนานที่มีขนาดความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊ส มีขนาดกว้าง 1 ยาว 6 ลึก 0.4 มิลลิเมตร เคลือบที่ภาวะที่ไม่มีผงคาร์บอนวัลแคนผสม ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นระยะเวลา 10 นาที พบว่าที่ขนาดความกว้าง 1, 2, และ 3 มิลลิเมตร ยาว 6 ลึก 0.4 มิลลิเมตร ไม่สามารถเคลือบได้ทั่วทั้งแผ่นที่ แสดงดังรูปที่ 41 เหลือบริเวณช่องทางการไหลของแก๊สที่ไม่ถูกเคลือบ



ก.)

ข.)

ค.)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 41 ลักษณะการเคลือบของฟิล์มพอลิพีร์โรลที่ความกว้างของช่องทางการไหลของแก๊สต่าง ๆ ที่ ก. 1 มิลลิเมตร ข. 2 มิลลิเมตร ค. 3 มิลลิเมตร ความยาว 6 ลึก 0.4 มิลลิเมตร

เมื่อลองเพิ่มระยะเวลาในการเคลือบไปเรื่อย ๆ เพราะถ้าเพิ่มความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะทำให้เกิดการเคลือบที่แย่งลงเนื่องจากผลการทดลอง 4.2.1 ทำที่ภาวะเดิมไม่ผสมคาร์บอน พบว่าสามารถเคลือบติดได้ทั่วทั้งแผ่นที่ระยะเวลา 45 นาที แต่มีลักษณะที่ไม่เรียบเกิดการหลุดร่อนของฟิล์มพอลิพีร์โรลได้ง่ายแสดงดังรูปที่ 42 ส่งผลต่อค่าการป้องกันการกัดกร่อนลดลงจึงไม่เหมาะต่อการนำมาใช้งาน



รูปที่ 42 ลักษณะการเคลือบของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่มีช่องทางการไหลของแก๊ส กว้าง 2 ยาว 6 ลีค 0.4 มิลลิเมตร ในภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 45 นาที

ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเท่าเดิม ความลึกให้มีความลึกลดลงเป็น 0.3 มิลลิเมตร กว้าง 2 ยาว 6 มิลลิเมตร พบว่าสามารถเคลือบติดได้ทั่วทั้งแผ่นทั้ง 2 ภาวะ ที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เป็นระยะเวลา 10 นาที และที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 15 นาที เติมผงคาร์บอนวัลแคน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 43 สามารถสรุปได้ว่าที่ขนาดความลึก 0.4 มิลลิเมตร ไม่สามารถเคลือบติดได้ทั่วทั้งแผ่นที่ภาวะที่ดีที่สุด เนื่องจากมีความลึกของช่องทางการไหลของแก๊สมากเกินไปทำให้พอลิไพร์โรลเข้าไปเคลือบได้ยากที่ความลึก 0.4 มิลลิเมตร



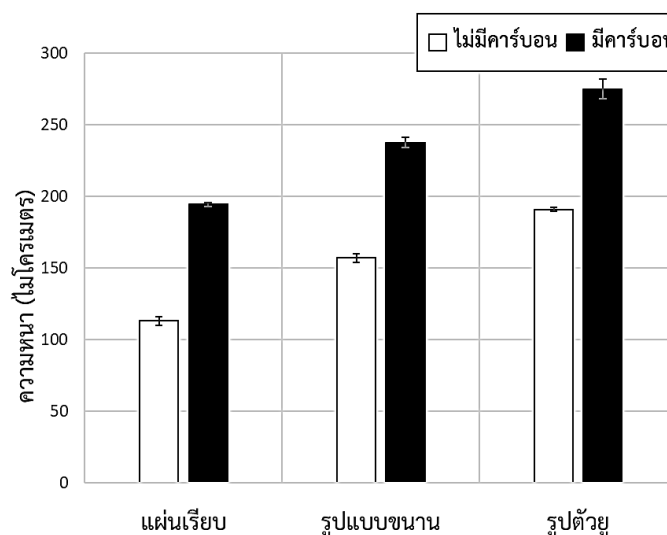
ก.)



ข.)

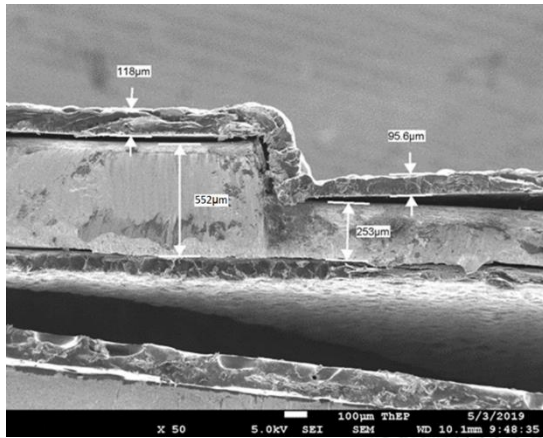
รูปที่ 43 ลักษณะการเคลือบของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่มีช่องทางการไหลของแก๊ส ที่กว้าง 2 ยาว 6 ลีค 0.3 มิลลิเมตร ในภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ก.) ภาวะที่ไม่มีคาร์บอน เวลา 10 นาที ข.) ภาวะที่มีคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลา 15 นาที

ความหนาที่ได้จากการเคลือบ เมื่อเปรียบเทียบความหนาระหว่างแผ่นเรียบกับแผ่นที่มีช่องทางไหลของแก๊สขนาดกว้าง 2 ยาว 6 ลึก 0.3 มิลลิเมตร พบว่าที่มีช่องทางไหลของแก๊สมีความหนาเท่ากับ 157 ไมโครเมตร และเมื่อมีคาร์บอนวัลแคนเข้าไปเคลือบทำให้มีความหนาเท่ากับ 238 ไมโครเมตร มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแผ่นเรียบทั้งที่มีคาร์บอน และไม่มีคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 44

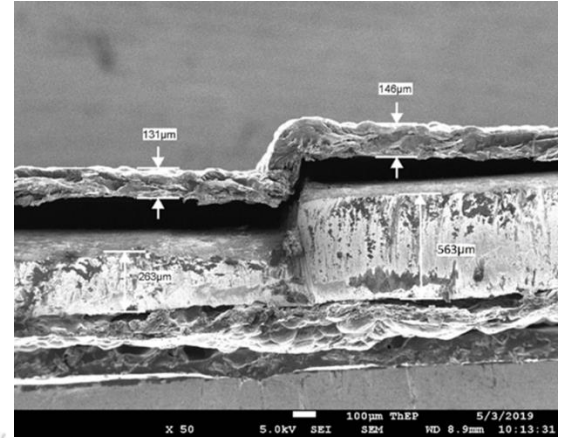


รูปที่ 44 การเปรียบเทียบผลของความหนาระหว่างแผ่นเรียบกับแผ่นที่มีช่องทางไหลของแก๊สรูปแบบขนานและรูปตัวยู ขนาดกว้าง 2 ยาว 6 ลึก 0.3 มิลลิเมตร ในภาวะที่ไม่มีคาร์บอน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 10 นาที ภาวะที่มีคาร์บอน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 15 นาที คาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

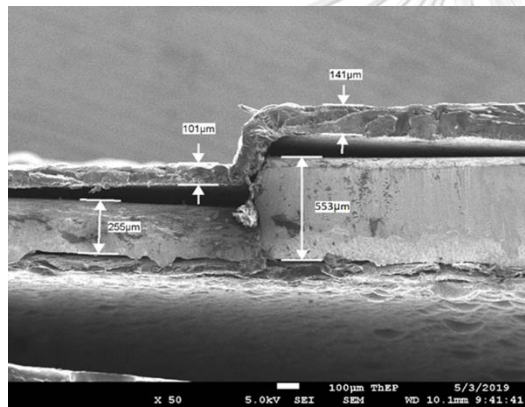
เนื่องจากมีช่องทางไหลของแก๊สทำให้มีการเคลือบบริเวณที่เป็นผิวเรียบมากกว่าบริเวณที่เป็นช่อง ทำให้มีความหนามากกว่าแบบแผ่นเรียบที่ไม่มีช่องทางไหลของแก๊ส ซึ่งสามารถยืนยันผลได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน หรือ Field emission scanning electron microscope (FESEM) ในรูปแบบภาพตัดขวาง แสดงดังรูปที่ 45 แต่ที่ความหนาของรูป FESEM บริเวณพื้นผิวเรียบ มีความหนาน้อยกว่าที่วัดด้วยไมโครมิเตอร์ เนื่องจากก่อนทำ FESEM ได้มีการตัดชิ้นงานทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มยู่บตัวลงส่งต่อความหนาของชั้นฟิล์มมีค่าลดลงจากที่วัดด้วยไมโครมิเตอร์ในการทดลอง จากรูปพบว่าแบบที่ไม่มีคาร์บอนวัลแคนเคลือบความหนาของร่องมีความหนาลดลงร้อยละ 19 เมื่อเทียบกับความหนาของชั้นฟิล์มบริเวณผิวเรียบ และแบบที่มีคาร์บอนวัลแคนเคลือบความหนาของร่องมีความหนาลดลงร้อยละ 10 เมื่อเทียบกับความหนาของชั้นฟิล์มบริเวณผิวเรียบ



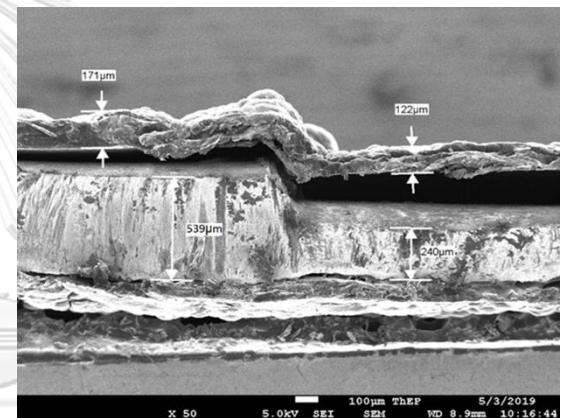
ก.)



ข.)



ค.)



ง.)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 45 ลักษณะการเคลือบฟิล์มพอลิไพร์โรลที่มีช่องทางการไหลของแก๊ส ที่กว้าง 2 ยาว 6 ลึก 0.3 มิลลิเมตร ด้วยกลิ้งจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน หรือ ในรูปแบบภาพตัดขวางที่ กำลังขยาย 50 เท่า ในภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ก.) ภาวะที่ไม่มีคาร์บอน เวลา 10 นาที รูปแบบขนาน ข.) ภาวะที่มีคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลา 15 นาที รูปแบบขนาน ค.) ภาวะที่ไม่มีคาร์บอน ระยะเวลา 10 นาที รูปตัวยู ง.) ภาวะที่มีคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เวลา 15 นาที รูปตัวยู

การป้องกันการกัดกร่อน พบว่าเมื่อมีช่องทางการไหลของแก๊สมีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.018 มิลลิเมตรต่อปี มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับแผ่นเรียบ และแผ่นที่มีคาร์บอนวัลแคนเข้าไปเคลือบ มีค่าอัตราการกัดกร่อนลดลงเท่ากับ 0.017 มิลลิเมตรต่อปี เมื่อเทียบกับแผ่นเรียบที่เคลือบคาร์บอน เนื่องจากแผ่นที่มีช่องทางการไหลของแก๊สฟิล์มพอลิพีโรลสามารถยึดเกาะได้ดีบริเวณที่เป็นช่องทางการไหลของแก๊ส ทำให้สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างมีคาร์บอนกับไม่มีคาร์บอน พบว่าไม่มีผลต่อการป้องกันการกัดกร่อนเมื่อมีคาร์บอนเข้าไปเคลือบ แสดงดังรูปที่ 46 ค่าการนำไฟฟ้าพบว่ามีค่าลดลงเมื่อมีช่องทางการไหลของแก๊สมีค่าเท่ากับ 241 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เมื่อเทียบกับแผ่นเรียบ ส่วนที่มีคาร์บอนเข้าไปเคลือบมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 314 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับแผ่นเรียบที่มีคาร์บอนเช่นกัน อาจเพราะเกิดการเคลือบบริเวณผิวเรียบทำให้มีความหนาของชั้นฟิล์มมากกว่าส่วนของช่องทางการไหลของแก๊ส อีกทั้งเครื่องมือสามารถวัดได้แค่บริเวณที่เป็นผิวเรียบเท่านั้นไม่สามารถวัดบริเวณที่เป็นร่องได้ ซึ่งเป็นบริเวณที่ทำให้ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้า ทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าลดลง เมื่อเทียบกับค่าการนำไฟฟ้าแบบแผ่นเรียบที่ไม่มีช่องทางการไหลของแก๊ส แสดงดังรูปที่ 47 สรุปขนาดช่องทางการไหลของแก๊สที่เหมาะสมต่อการเคลือบสามารถเคลือบได้ทั่วทั้งแผ่นมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ มีประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อน และค่าการนำไฟฟ้าเหมาะสมที่สุดในการทำเป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง ควรมีความกว้าง 2 ยาว 6 ลึก 0.3 มิลลิเมตร ในภาวะไม่มีคาร์บอนวัลแคนผสม ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลา 10 นาที และในภาวะมีคาร์บอนวัลแคนผสม ระยะเวลา 15 นาที เติมผงคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการทดลองข้างต้นพบว่าขนาดช่องทางการไหลของแก๊สที่สามารถเคลือบติดได้ดีที่สุด คือ ขนาด ความกว้าง 2 ยาว 6 ลึก 0.3 มิลลิเมตร ดังนั้นช่องทางการไหลของแก๊สรูปตัวยู (U-shape) จึงใช้ที่ขนาดช่องทางการไหลของแก๊สเดียวกันในการเคลือบที่ขนาด ความกว้าง 2 ยาว 6 ลึก 0.3 มิลลิเมตร โดยทดสอบว่าเมื่อเปลี่ยนรูปทรงของช่องทางการไหลของแก๊สแล้วที่ขนาดช่องทางการไหลของแก๊สเดียวกัน สามารถนำมาเคลือบแล้วให้ผลใกล้เคียงกันกับรูปแบบขนานหรือไม่ ในภาวะไม่มีคาร์บอนวัลแคนผสมที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลา 10 นาที และในภาวะมีคาร์บอนวัลแคนผสมที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลา 15 นาที เติมผงคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

พบว่าที่ไม่มีคาร์บอน และมีคาร์บอนเข้าไปเคลือบมีความหนาเท่ากับ 191 ไมโครเมตร และ 275 ไมโครเมตร ตามลำดับ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับรูปแบบขนานและแผ่นเรียบ แสดงดังรูปที่ 44 แสดงว่ารูปตัวยูบริเวณร่องลดลงเมื่อเทียบกับบริเวณผิวเรียบ ที่ภาวะการเคลือบแบบไม่มีคาร์บอน พบว่าเมื่อเปรียบเทียบความหนาของชั้นฟิล์มบริเวณร่องของรูปตัวยูกับความหนาของชั้นฟิล์มบริเวณผิวเรียบ และความหนาของชั้นฟิล์มบริเวณร่องของรูปแบบขนานเปรียบเทียบกับบริเวณผิวเรียบ มีค่า

ลดลงร้อยละ 28 และร้อยละ 19 ตามลำดับ ส่วนความหนาของชั้นฟิล์มพอลิไพร์โรลที่มีคาร์บอนผสม เมื่อเปรียบเทียบความหนาของชั้นฟิล์มบริเวณร่องของรูปตัวยูกับความหนาของผิวเรียบ และความหนาของชั้นฟิล์มบริเวณร่องของรูปแบบขนานเปรียบเทียบกับบริเวณผิวเรียบ พบว่ามีค่าลดลงร้อยละ 29 และร้อยละ 10 ตามลำดับ แสดงดังรูป 44 สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเปลี่ยนรูปแบบของช่องทางการไหลของแก๊ส ทำให้ประสิทธิภาพในการเคลือบเปลี่ยนไปเนื่องจากมีพื้นที่ในการเคลือบบริเวณช่องทางการไหลของแก๊สเพิ่มขึ้นส่งผลให้ความหนาของชั้นฟิล์มพอลิไพร์โรลที่เข้าไปเคลือบเปลี่ยนแปลงด้วย แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบความหนาของฟิล์มระหว่างบริเวณผิวเรียบกับบริเวณผิวร่องที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FESEM ที่ถูกเคลือบภาวะไม่มีคาร์บอนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลา 10 นาที ภาวะที่มีคาร์บอนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลา 15 นาที คาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

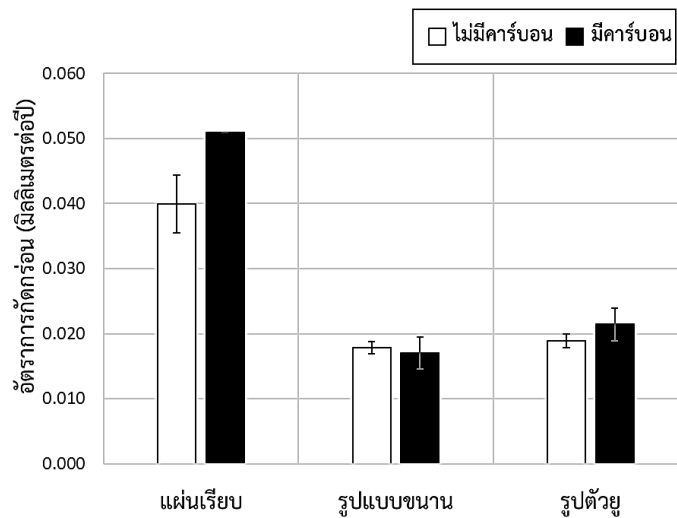
รูปแบบช่องทางการไหลของแก๊ส	ความหนาผิวเรียบ		ความหนาของร่อง	
	ไม่มีคาร์บอน (ไมโครเมตร)	มีคาร์บอน (ไมโครเมตร)	ไม่มีคาร์บอน (ไมโครเมตร)	มีคาร์บอน (ไมโครเมตร)
รูปแบบขนาน	118	146	95.6	131
รูปตัวยู	141	171	101	122

ค่าอัตราการกัดกร่อนที่ไม่มีคาร์บอน และมีคาร์บอนเข้าไปเคลือบ มีค่าเท่ากับ 0.019 มิลลิเมตรต่อปี และ 0.021 มิลลิเมตรต่อปี ตามลำดับ มีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับรูปแบบขนาน แต่มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับแผ่นเรียบ แสดงดังรูปที่ 46 ที่มีค่าอัตราการกัดกร่อนของรูปตัวยูใกล้เคียงกับรูปแบบขนาน ถึงแม้จะเคลือบบริเวณร่องได้น้อยกว่าบริเวณผิวเรียบ แต่มีการเคลือบของชั้นฟิล์มทั่วทั้งแผ่นทั้งบริเวณผิวเรียบ และบริเวณร่อง ทำให้ความสามารถป้องกันการกัดกร่อนมีค่าใกล้เคียงกับรูปแบบขนาน

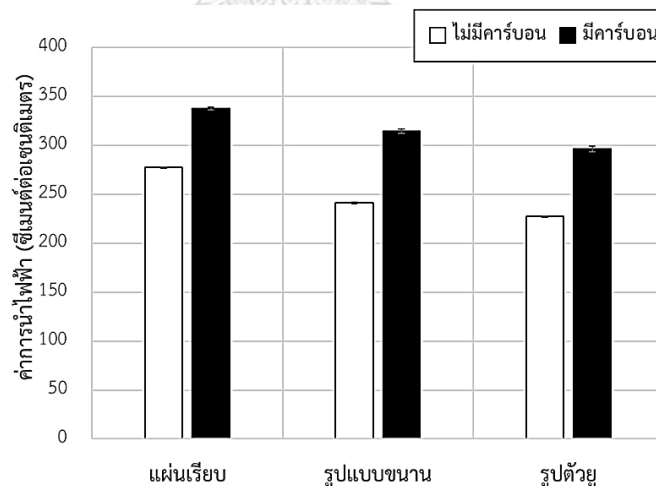
ส่วนค่าการนำไฟฟ้ามีค่าลดลง เนื่องจากมีชั้นฟิล์มที่บริเวณผิวเรียบหนาเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับรูปแบบขนาน ทำให้ค่าการนำไฟฟ้าที่ได้เท่ากับ 227 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับรูปแบบขนาน และแบบแผ่นเรียบ เมื่อมีคาร์บอนเข้าไปเคลือบมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 296 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 47 มีค่าลดลงเมื่อเทียบกับรูปแบบขนาน และแผ่นเรียบ

ดังนั้นผลของช่องทางการไหลของแก๊สรูปตัวยูสามารถเคลือบติดได้ทั่วทั้งแผ่นที่ขนาดช่องกว้าง 2 ยาว 6 ลึก 0.3 มิลลิเมตร เหมือนกับช่องทางการไหลของแก๊สรูปแบบขนาน แต่ค่าที่ได้มีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อน และค่าการนำไฟฟ้าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากมีพื้นที่ในการ

เคลือบเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เพราะมีรูปทรงของช่องทางการไหลของแก๊สที่เปลี่ยนไป สามารถสรุปได้ว่าเมื่อเปลี่ยนรูปทรงของช่องทางการไหลของแก๊สแล้วจะมีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบ การป้องกันการกัดกร่อน และค่าการนำไฟฟ้า



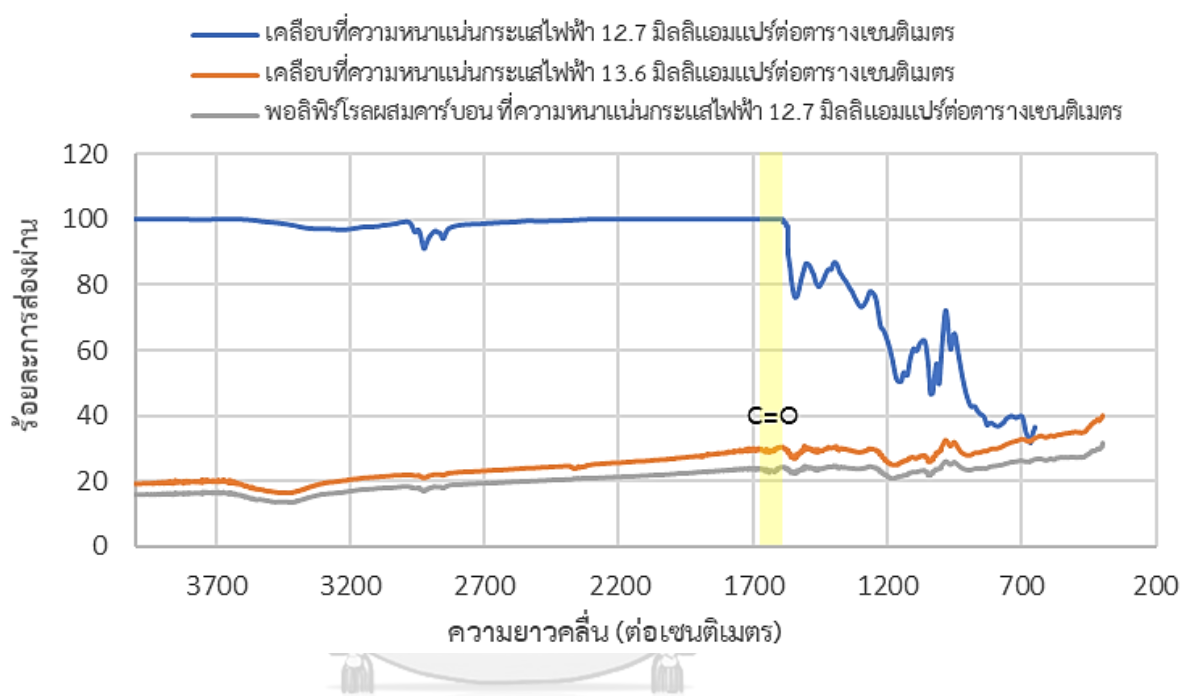
รูปที่ 46 ค่าอัตราการกัดกร่อนระหว่างแผ่นเรียบกับแผ่นที่มีช่องทางการไหลของแก๊สรูปแบบขนาน และรูปตัวยู ขนาดกว้าง 2 ยาว 6 ลึก 0.3 มิลลิเมตร ในภาวะที่ไม่มีคาร์บอนความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ระยะเวลา 10 นาที ภาวะที่มีคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 15 นาที



รูปที่ 47 ค่าการนำไฟฟ้าระหว่างแผ่นเรียบกับแผ่นที่มีช่องทางการไหลของแก๊สรูปแบบขนาน และรูปตัวยู ขนาดกว้าง 2 ยาว 6 ลึก 0.3 มิลลิเมตร ในภาวะที่ไม่มีคาร์บอน ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 10 นาที ภาวะที่มีคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 15 นาที

4.5 ผลของการวิเคราะห์ชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบด้วยอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไร้เซชัน

นำฟิล์มพอลิพีร์โรลที่ทำการสังเคราะห์ได้จากสารละลายสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์กรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และสารละลายมอนอเมอร์พีร์โรลความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร พบว่าฟิล์มที่ได้จากการเคลือบมีลักษณะเป็นสีดำเนื้อด้าน เมื่อนำมาทดสอบด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) ซึ่งพอลิพีร์โรลจะมีตำแหน่งการดูดกลืนแสงที่สำคัญซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพอลิพีร์โรล แสดงดังรูปที่ 48



รูปที่ 48 ผล FTIR ของพอลิพีร์โรลบนแผ่นทองแดง ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าต่างกัน 12.7 และ 13.6 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 15 นาที และชนิดผสมคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลา 15 นาที

ผลที่ได้ปรากฏตำแหน่งของพีคที่พบมีดังนี้ มีการสั่นแบบยืดพันธะของพันธะ N-H ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชัน (Amine) เป็นหมู่ฟังก์ชันหลักที่สำคัญที่ปรากฏอยู่ในพอลิพีร์โรล ที่ 3229 cm^{-1} การสั่นแบบยืดของวงแหวนอะโรมาติก C=C ที่ประมาณ 1538 cm^{-1} การสั่นแบบยืดและแบบงอของพันธะ C-N ที่ 1296 cm^{-1} การสั่นแบบยืดของพันธะ C=N ที่ 1149 cm^{-1} การสั่นของพันธะ N-H ที่ 1091 cm^{-1} และการสั่นของวงพีร์โรลที่ตำแหน่ง $963, 787\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสเปกตร้าของพอลิเมอร์ที่กำหนดสอดคล้องกับงานของ Saville [46] และ พัชราลัย [39] จึงยืนยันได้ว่าพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้เป็นพอลิพีร์โรลจริง นอกจากนี้ยังพบว่าพีคที่ 2920 cm^{-1} และ 1079 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการสั่นแบบยืดพันธะ

ของ C-H ของสายโซ่ยาวไฮโดรคาร์บอน และการสั่นของพันธะ O=S=O ตามลำดับ ของโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Saidman [47]

เมื่อพอลิพีไรโรลเกิดปฏิกิริยา Overoxidation จะปรากฏตำแหน่งของพีคดังนี้ที่ 1656 cm^{-1} เป็นลักษณะการยืดของพันธะ C=O หรือหมู่คาร์บอนิล ที่เกิดการ Overoxidation ของพอลิพีไรโรล และการยืดของพันธะ C-C ที่ 1455 cm^{-1} ที่เกิดเป็นพอลิพีไรโรลแบบไม่มีคอนจูเกตบางส่วนของสายพอลิเมอร์ [48] สามารถสรุปได้ว่าการเกิด Overoxidation มักเกิดขึ้นที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงเกิน 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และที่มีการผสมคาร์บอนเข้าไปเคลือบด้วย เนื่องจากที่ภาวะความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และไม่มีการผสมคาร์บอน พบว่าไม่มีพีคที่ 1656 cm^{-1} ของหมู่คาร์บอนิล โดยการเกิด Overoxidation จะส่งผลเสียต่อลักษณะของพื้นผิวฟิล์มที่เคลือบบนแผ่นทองแดง และค่าการป้องกันการกัดกร่อน รวมถึงค่าการนำไฟฟ้าอีกด้วย



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการสังเคราะห์พอลิไพร์โรล (Polypyrrole, PPy) บนแผ่นทองแดงด้วยการพอกพูนทางเคมีไฟฟ้าโดยมีตัวแปรที่ต้องการศึกษาดังต่อไปนี้ ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์ เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ปริมาณการเติมผงคาร์บอนที่เหมาะสม และขนาดช่องทางการไหลของแก๊ส หลังจากนั้นนำมาวิเคราะห์การป้องกันการกัดกร่อน และค่าการนำไฟฟ้าที่เหมาะสมต่อการนำไปทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว คือต้องมีค่าการนำไฟฟ้ามากกว่า 100 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสต้องน้อยกว่า 20 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร และค่าอัตราการป้องกันการกัดกร่อนต้องมีค่าน้อยกว่า 0.37 มิลลิเมตรต่อปี [28]

การศึกษาปฏิกิริยาการเกิดอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของไพร์โรลมอนอเมอร์ พบว่าช่วงไพร์โรลมอนอเมอร์เกิดการพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอยู่ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.6 โวลต์เทียบกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง Ag/AgCl แสดงว่ามีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิไพร์โรลมอนอเมอร์เกิดขึ้นในช่วงศักย์ไฟฟ้างกล่าว ดังนั้นในการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลจะเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด

ศึกษาค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่เหมาะสม พบว่าที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเคลือบที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร สามารถป้องกันการกัดกร่อนมีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด เนื่องจากมีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.0352 มิลลิเมตรต่อปี ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 257 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าเท่ากับ 0.077 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร

ศึกษาผลของระยะเวลาในการสังเคราะห์ พบว่าระยะเวลาในสังเคราะห์ที่ 10 นาที สามารถป้องกันการกัดกร่อนและค่าการนำไฟฟ้าที่ดีที่สุด ให้ค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.040 มิลลิเมตรต่อปี เมื่อดูที่ค่าการนำไฟฟ้าพบว่ามีค่าเท่ากับ 277 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสเท่ากับ 0.073 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร

ศึกษาปริมาณการเติมผงคาร์บอน พบว่าเติมผงคาร์บอนวัลแคนปริมาณ 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้ค่าการป้องกันการกัดกร่อนและค่าการนำไฟฟ้าดีที่สุด ให้ค่าอัตราการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ 0.030 มิลลิเมตรต่อปี มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 338 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร และมีค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าเท่ากับ 0.090 มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร

ศึกษาช่องทางการไหลของแก๊ส มีสองรูปแบบ คือ รูปขนาน และรูด้วย รูแบบขนานมีขนาดที่เหมาะสม คือ ความกว้าง 2 ยาว 6 ลึก 0.3 มิลลิเมตร สามารถเคลือบติดได้ทั่วทั้งแผ่นและมีขนาดที่เหมาะสมที่สุดต่อการนำไปทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว มีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.018 มิลลิเมตรต่อปี ค่าการนำไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 241 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เมื่อมีคาร์บอนมีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.017 มิลลิเมตรต่อปี มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 314 ซีเมนต์ต่อ และรูด้วยที่ขนาดเดียวกับรูปแบบขนาน อัตราการป้องกันการกัดกร่อนมีค่าเท่ากับ 0.019 มิลลิเมตรต่อปี มีค่าการนำไฟฟ้า 227 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เมื่อมีคาร์บอนมีค่าอัตราการกัดกร่อนเท่ากับ 0.021 มิลลิเมตรต่อปี มีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 296 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร สามารถสรุปได้ว่าเมื่อมีช่องทางการไหลของแก๊ส และมีรูปแบบของช่องที่แตกต่างกันทำให้มีผลต่อประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนและค่าการนำไฟฟ้า

นำแผ่นทองแดงที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์มาศึกษาองค์ประกอบของฟิล์มด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) พบว่าฟิล์มที่ได้มีหมู่ฟังก์ชันเป็นพอลิไพโรลจริง ศึกษาฟิล์มที่มีคาร์บอนวัลแคน และศึกษาชั้นฟิล์มที่เคลือบบนช่องทางการไหลของแก๊สทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน หรือ Field emission scanning electron microscope (FESEM) ในรูปแบบภาพตัดขวาง พบว่ามีคาร์บอนเข้าไปเคลือบอยู่จริง และมีการเคลือบบริเวณช่องทางการไหลของแก๊สที่ตรงตามผลการทดลอง

5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

5.2.1 ในการสังเคราะห์ไพโรลมอนอเมอร์ในสารละลายดังกล่าวต้องรีบให้กระแสไฟฟ้าอย่างรวดเร็วเมื่อมีการนำขั้วที่ต้องการเคลือบจุ่มลงในสารละลายดังกล่าวแล้ว เพื่อลดการกัดกร่อนก่อนการเคลือบแล้วทำให้เนื้อของโลหะเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากสารละลายดังกล่าวมีฤทธิ์เป็นกรดสูง

5.2.2 ในขั้นตอนการเตรียมขั้วที่ต้องการเคลือบต้องมีการล้างขั้วด้วยกรดไนตริกเพื่อให้สามารถเคลือบติดได้ง่ายขึ้นในทางกลับกันก็ต้องรีบนำไปเคลือบอย่างรวดเร็วเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดฟิล์มออกไซด์เคลือบที่ผิวของขั้วทำให้ความสามารถในการเคลือบลดลง

5.2.3 ในการเลือกใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ต้องใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมกับขั้วที่ต้องการเคลือบในที่นี้ คือ แผ่นทองแดง เนื่องจากแผ่นทองแดงเกิดการกัดกร่อนได้ง่าย เช่น ใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นกรดซัลฟิวริกจะทำให้ไม่สามารถเคลือบพอลิไพโรลบนแผ่นทองแดงได้จะเกิดการกัดกร่อนก่อนที่จะเกิดการเคลือบฟิล์ม

บรรณานุกรม

1. อุตสาหกรรมชุบโลหะ 2019; Available from:
http://www2.diw.go.th/l_Standard/Web/pane_files/Industry26.asp
2. วิภาสศรี วิริยะรักษ์, การสังเคราะห์พอลิอะนิลีนบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยวิธีเคมีไฟฟ้า. สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ 2553, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
3. Prissanaroon W., Brack, N., Pigram P, J., Liesegang, J. , *Electropolymerisation of pyrrole on copper in aqueous media*. Synthetic Metals, 2004. 142: p. 25-34.
4. Shine J., McClure, J. C., Chianelli, R., Pich, P., Sebastian, P. J. , *Conducting polymer-coated stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFC)*. Hydrogen Energy, 2005. 30: p. 1339-1344.
5. นายสนธิ พลชัยยา นายศักดิ์ศรี สุภาธร, นางสาวกุลธิดา นุกุลธรรม, นางสาวกานต์ตระกูล วุฒิเสลา, นางสาวณัฐินี โมพันธ์, นายวันชัย น้อยวงศ์, นายเสนา ชัยรัมย์, ดร. ภิญโญ พานิชพันธ์, ดร. พันธุ์ทิพย์ รื่นวงษา, ดร. นกตล ไชยคำ., เซลล์ไฟฟ้าเคมี. สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรีนรู้ มหาวิทยาลัยมหิดล.
6. *Electrochemical*. 2016; Available from:
www.digitalschool.club/digitalschool/chemical2_2_1/chemical9_3/index9_3.php.
7. จัดทำโดยสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี พิมพ์ครั้งที่หนึ่ง, หนังสือเรียนวิชาเคมี 3 ว 037 ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2533 ของกระทรวงศึกษาธิการ พ.ศ. 2541
8. เกื้อจวลี พฤกษาทร., เคมีไฟฟ้าประยุกต์ *Applied Electrochemistry*. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
9. นางสาวจิราพร ชูบัณฑิต. เซลล์ไฟฟ้าเคมี. Available from:
<https://sites.google.com/site/itg65620114132/swn-prakxb-khxng-sell-fifa-khemi>.
10. เซลล์ไฟฟ้าเคมีและประเภทของเซลล์กัลวานิก. 06/24/2015; Available from:
<https://gongchanit.wordpress.com/2015/06/24>.
11. มารุต โปราณานนท์. วารสารปริทัศน์. 2553; Available from:
http://cuir.car.chula.ac.th/dspace/bitstream/123456789/53161/5/marut_po_ch2.pdf
12. Morenoa. J. D., Marcosb, M. L., Agulloa, R., Guerrero-Lemusa, F. R., MartoAn-Palmaa, R. J., MartoAnez-Duarta, J. M., GonzaAlez-Velascob, J., *A Galvanostatic study of the electrodeposition of polypyrrole into porous silicon*. Thin Solid

- Films 1999. 348: p. 152-156.
13. Evansville. B.; Available from: <http://www.bioanalytical.com>.
 14. Amaral S. T., Muller, I. L., *Passivation of pure iron in alkaline solution containing silicate and sulphate – Galvanostatic and potentiostatic studies*. Corrosion Science 1999. 41 p. 747-758.
 15. Hatada K., Kitayama, T., *Macromolecular design of polymeric materials*. Marcel Dekker, 1997.
 16. Murrae J. B., Richard, T., *Electronic and Photonic Applications of Polymers*. Washington DC: American Chemical Society, 1988. 41.
 17. Satoh M., Kaneto, K., Yoshino, K., *Electrical and Optical Polymer Systems: Fundamentals: Methods, and Applications*. Synth. Met, 1986. 14: p. 289-296.
 18. รศ.ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์., การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยใช้ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี. คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 166-169.
 19. Cheung K. M., Bloor, D., Stevens, G. C., *The influence of unusual counterions on the electrochemistry and physical properties of polypyrrole*. Materials Science, 1990. 25(9): p. 3814–3837.
 20. Grande H., Otero, T. F., Rodriguez, J., in *Electrical and Optical Polymer Systems*. 1998.
 21. Otero T. F., Rodriguez, J., Anguro, E., Santamaria, C., *Redox behaviour of thin polypyrrole films. Optimization of response times*. Synth Met, 1991. 43: p. 2831.
 22. กระบวนการแยกโลหะจากสินแร่. Available from: <http://www.inc.science.cmu.ac.th/thai/upload/article/file/2018-02-08-08-41-42-548860007.pdf>.
 23. Pan T. J., Zao, X. W., Wang, T., Hu, J., Chen, Z. D., Ren, Y. J. , *Electrodeposited conductive polypyrrole/polyaniline composite film for the corrosion protection of copper bipolar plates in protonexchange membrane fuel cells*. Power Source, 2016. 302: p. 180-188.
 24. Popov B. N., *Chapter 7 - Pitting and Crevice Corrosion Corrosion Engineering*. 1 ed. Principles and Solved Problems. 2015.
 25. Tawfika H., Hung, Y., Mahajan, D., *Metal bipolar plates for PEM fuel cell – A review*. Power of Sources 2007. 163 p. 755-767.

26. Allen H., Tapas, C., Priscila, S., *Bipolar plates for PEM fuel cells A review.* . International Journal of Hydrogen Energy 2007. 30: p. 755-767.
27. Renato A. A., Mara, C. L. O., Gerhard, E., Volkmar, E., *Corrosion of metal bipolar plates for PEM fuel cells: A review.* . International Journal of Hydrogen Energy 2010. 35: p. 3632-3647.
28. Mark V. B., *Composites Materials.* 2000, The University of Alabama in Huntsville.
29. Lee S. H., Huang, C. H., Chen, Y. P., *Investigation of PVD coating on corrosion resistance of metallic bipolar plates in PEM fuel cell.* Materials Processing Technology 2003. 140: p. 688-693.
30. Feser J. P., Prasad, A. K., Advani, S. G., *Particle Image velocimetry measurements in a model proton exchange membrane fuel cell.* Vol. 4. 2007, Department of mechanical Engineering University.
31. Lim Y. S., Tan, Y. P., Lim, H. N., Huang, N. M., Tan, W. T. , *Preparation and characterization of polypyrrole/graphene nanocomposite films and their electrochemical performance.* Polymer Research, 2013: p. 20-156.
32. Yang L. J., Yu, H. J., Jiang, L. J., Zhu, L., Jian, X. Y., Wang, Z., *Graphite-polypyrrole coated 316L stainless steel as bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells.* International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2012. 18(1): p. 53-58.
33. Tunc T., *Polypyrrole films on stainless steel.* Surface & Coatings Technology 200 Surface and Coatings Technology 200, 2006. 16: p. 4713-4719.
34. Dyihuey C., Jungchung, H., *Effects of channel depths and anode flow rates on the performance of miniature proton exchange membrane fuel cells.* . Applied science and engineering, 2012. 10,4: p. 273-280.
35. Andrea S. L., Karine, M. B., Liu, Y. C., *Electrodeposition of Polypyrrole on aluminum alloy 2024-T3 from dodecylbenzenesulfonic acid medium.* International Journal of Recent scientific research, 2017. 8(11): p. 21449-21454.
36. Kaewsai D., Piumsomboon, P., Pruksatorn, K., Hunsoom, M. , *Synthesis of polyaniline-warpped carbon nanotube-supported PtCo catalysts for proton exchange membrane fuel cell : activity and stability tests.* Royal society of chemistry advances, 2017. 7: p. 20801-20810.

37. ตรีเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ ปริญญา บุญสาม, อภิชาติ โรจนโรวรรณ., ภาพรวมของการใช้สารยับยั้งการกัดกร่อนในอุตสาหกรรม. มกราคม –เมษายน, 2560.
38. Kiralp S., *synthesis of conductive block copolymers and their use in the immobilization of invertase and polyphenol oxidase enzyme.*, in *Department of chemistry, Faculty of science.*, 2003., Middle East Technical University.
39. พัชราลัย อรุณยงค์., การเคลือบพอลิไพร์โรลและพอลิแอนิลินบนขั้วไฟฟ้าเหล็กกล้าไร้สนิม. 2554., วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
40. Liu Y. C., Andrea, L., *ELECTRODEPOSITION OF POLYPYRROLE ON ALUMINUM ALLOY 2024-T3 FROM DODECYLBENZENESULFONIC ACID MEDIUM.* 8, 2017. 21449-21454.
41. Pech-Rodríguez W. J., González-Quijano, D., Vargas-Gutiérrez, G. Rodríguez-Varela, F. J., *Electrophoretic deposition of polypyrrole/Vulcan XC-72 corrosion protection coatings on SS-304 bipolar plates by asymmetric alternating current for PEM fuel cells.* hydrogen energy, 2014. 39: p. 1640-1649.
42. Ganash A. A., *Electrochemical synthesis and corrosion behaviour of polypyrrole and polypyrrole/carbon nanotube nanocomposite films.* Composite Materials, 2014. 48: p. 2215–2225.
43. Hassan K., Azam Rahimi, N., *Investigation of Pulse-Electropolymerization of Conductive Polypyrrole Nanostructures* Electrochem Science, 2013. 8: p. 8905 - 8921.
44. Mora-Hernandez J. M., Carmen. R., *Electrochemical activity towards ORR of mechanically alloyed PdCo supported on Vulcan carbon and carbon nanospheres.* Applied Electrochemistry 2014. 44(12): p. 1307-1315.
45. Kapseung C., *The flow-field pattern Optimization of the bipolar plate for PEMFC considering the nonlinear material.* Electrochemical science, 2015. 10: p. 2564-2579.
46. Saville P., *Polypyrrole Formation and Use. Technical Memorandum DRDC Atlantic.* 2005. 14.
47. saidman S. B., Vela, M. E., *Electropolymerization of pyrrole onto aluminium from alkane solution containing a surfactant.* Thin solid 2005: p. 96-103.
48. Lehr I. L., Saidman, S. B., *Characterisation and corrosion protection properties of*

polypyrrole electropolymerised onto aluminium in the presence of molybdate and nitrate. *Electrochimica Acta*, 2006. 51: p. 3249-3255



ภาคผนวก ก

ข้อมูลการทดลอง

ก-1 ค่าการป้องกันการกัดกร่อนของแผ่นทองแดงที่ไม่ได้เคลือบนำมาทดสอบในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้าแบบส่องผ่าน (Through-plane)

พื้นที่ผิวทดสอบของแผ่นทองแดง = 1 ตารางเซนติเมตร

ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน หรือ $I_{\text{corr}(\text{Cu})} = 19.70$ ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ค่าอัตราการกัดกร่อนของแผ่นทองแดง = 0.4567 มิลลิเมตรต่อปี

ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน หรือ $E_{\text{corr}(\text{Cu})} = -59.35$ มิลลิโวลต์

ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส = 0.01 มิลลิโอมห์ตารางเซนติเมตร

ค่าการนำไฟฟ้า = 411.77 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

ก-2 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโตเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์ไพโรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)

ตัวแปรที่ศึกษา: ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ 10.0 – 45.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์:

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ : กรดโตเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร

: ไพโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ : 15 นาที

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 8 ค่าการป้องกันกรัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรด โดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร ที่ กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 10.0 – 45.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (มิลลิโวลต์)	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
10.0	19.51 ± 0.00	-46.20 ± 0.01	0.452 ± 0.00
10.9	4.29 ± 0.25	10.95 ± 0.69	0.100 ± 0.00
11.8	3.853 ± 0.58	87.39 ± 0.95	0.089 ± 0.01
12.7	1.51 ± 0.36	103.51 ± 1.08	0.035 ± 0.00
13.6	3.23 ± 0.37	97.55 ± 1.41	0.075 ± 0.01
14.6	3.53 ± 0.61	65.34 ± 1.88	0.082 ± 0.00
15.5	5.73 ± 0.12	23.11 ± 0.00	0.133 ± 0.00
16.4	7.97 ± 0.01	22.58 ± 0.57	0.185 ± 0.00
17.3	7.75 ± 0.02	20.92 ± 0.00	0.180 ± 0.00
18.2	9.59 ± 0.01	19.92 ± 0.01	0.223 ± 0.00
27.3	9.84 ± 0.01	18.40 ± 0.01	0.228 ± 0.00
36.4	9.57 ± 0.00	17.62 ± 0.00	0.222 ± 0.00
45.5	9.36 ± 0.00	16.18 ± 0.00	0.217 ± 0.00

ตารางที่ 9 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 10.0 – 45.5 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ความหนาชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)
10.0	0.034 ± 0.00	352.39 ± 5.97	107 ± 0.00
10.9	0.055 ± 0.00	295.00 ± 4.98	132 ± 0.00
11.8	0.060 ± 0.00	288.37 ± 2.78	144 ± 0.00
12.7	0.077 ± 0.00	257.01 ± 1.81	159 ± 0.00
13.6	0.090 ± 0.00	233.68 ± 0.34	162 ± 0.00
14.6	0.107 ± 0.00	214.26 ± 0.47	177 ± 0.00
15.5	0.119 ± 0.00	210.11 ± 0.22	214 ± 0.00
16.4	0.136 ± 0.00	204.93 ± 1.03	266 ± 0.01
17.3	0.141 ± 0.00	203.59 ± 0.22	282 ± 0.00
18.2	0.167 ± 0.00	191.60 ± 0.18	333 ± 0.00
27.3	0.189 ± 0.00	190.26 ± 1.97	412 ± 0.00
36.4	0.212 ± 0.00	175.60 ± 0.05	423 ± 0.02
45.5	0.262 ± 0.00	169.82 ± 0.02	560 ± 0.03

ก-3 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์พริโรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)

ตัวแปรที่ศึกษา : เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 10 – 30 นาที

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ : กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร

: พริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า : กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) 10.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 10 ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพริโรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และพริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 – 30 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 10.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลา (นาที)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (มิลลิโวลต์)	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
10	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น
15	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น
20	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น
30	7.45 ± 0.18	-1.378 ± 0.41	0.173 ± 0.00

ตารางที่ 11 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 – 30 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 10.0 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนตต่อเซนติเมตร)	ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)
10	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น
15	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น
20	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น
30	0.066 ± 0.00	340.20 ± 5.16	188 ± 0.00

ก-4 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์ไพร์โรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)

ตัวแปรที่ศึกษา : เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 10 – 30 นาที

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ : กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร

: ไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า : กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) 10.9 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 12 ค่าการป้องกันกรกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพีโรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และพีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 – 30 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 10.9 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลา (นาที)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (มิลลิโวลต์)	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
10	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น
15	4.29 ± 0.25	10.95 ± 0.69	0.100 ± 0.00
20	3.961 ± 0.00	15.61 ± 0.00	0.092 ± 0.00
30	3.45 ± 0.18	23.39 ± 0.50	0.080 ± 0.00

ตารางที่ 13 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีโรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และพีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 – 30 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 10.9 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)
10	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น
15	0.070 ± 0.00	295.00 ± 4.98	133 ± 0.00
20	0.073 ± 0.00	291.64 ± 0.83	144 ± 0.00
30	0.106 ± 0.00	228.16 ± 1.28	152 ± 0.00

ก-5 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์พริโรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)

ตัวแปรที่ศึกษา : เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 10 – 30 นาที

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ : กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร

: พริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า : กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) 11.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 14 ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพริโรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และพริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 – 30 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 11.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลา (นาที)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (มิลลิโวลต์)	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
10	4.796 ± 0.19	86.68 ± 0.21	0.111 ± 0.00
15	3.853 ± 0.58	87.39 ± 0.95	0.089 ± 0.01
20	2.739 ± 0.26	90.91 ± 1.01	0.063 ± 0.01
30	2.175 ± 0.05	86.86 ± 5.36	0.050 ± 0.00

ตารางที่ 15 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 – 30 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 11.8 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนตต่อเซนติเมตร)	ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)
10	0.072 ± 0.00	275.45 ± 1.14	103 ± 0.00
15	0.074 ± 0.00	288.37 ± 2.78	145 ± 0.00
20	0.088 ± 0.00	259.58 ± 4.91	150 ± 0.00
30	0.130 ± 0.00	203.95 ± 1.36	182 ± 0.00

ก-6 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์ไพร์โรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)

ตัวแปรที่ศึกษา : เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 10 – 30 นาที

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ : กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร
: ไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า : กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 16 ค่าการป้องกันกรกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพีโรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และพีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 – 30 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลา (นาที)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (มิลลิโวลต์)	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
10	1.723 ± 0.14	97.19 ± 3.63	0.040 ± 0.00
15	1.517 ± 0.06	103.50 ± 1.52	0.035 ± 0.00
20	2.328 ± 0.16	102.79 ± 1.23	0.054 ± 0.00
30	2.726 ± 0.20	107.33 ± 0.74	0.063 ± 0.00

ตารางที่ 17 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีโรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และพีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 – 30 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)
10	0.073 ± 0.00	276.66 ± 0.61	114 ± 0.00
15	0.091 ± 0.00	257.01 ± 1.81	160 ± 0.00
20	0.122 ± 0.00	224.02 ± 0.29	212 ± 0.00
30	0.246 ± 0.00	134.08 ± 0.13	256 ± 0.00

ก-7 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์พริโรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)

ตัวแปรที่ศึกษา : เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 10 – 30 นาที

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ : กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร

: พริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า : กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) 13.6 มิลลิ

แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 18 ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพริโรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และพริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 – 30 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 13.6 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เวลา (นาที)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (มิลลิโวลต์)	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
10	2.81 ± 0.17	94.55 ± 1.17	0.057 ± 0.00
15	3.23 ± 0.37	97.55 ± 1.41	0.075 ± 0.01
20	3.40 ± 0.19	102.68 ± 0.51	0.079 ± 0.00
30	3.45 ± 0.27	103.97 ± 1.10	0.092 ± 0.01

ตารางที่ 19 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซินซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 – 30 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 13.6 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลา (นาที)	ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)
10	0.104 ± 0.00	267.15 ± 0.95	125 ± 0.00
15	0.121 ± 0.01	264.34 ± 2.62	168 ± 0.00
20	0.170 ± 0.00	202.47 ± 2.35	241 ± 0.00
30	0.355 ± 0.01	109.03 ± 4.17	296 ± 0.00

ก-8 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิลเบนซินซัลโฟนิกที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์ไพร์โรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) **วิทยาลัย**

ตัวแปรที่ศึกษา : ปริมาณผงคาร์บอนที่เติม 2.7 – 6.7 มิลลิกรัมต่อลิตร

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ : กรดโดเดซิลเบนซินซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร
: ไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า : กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ : 10 นาที

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 20 ค่าการป้องกันกรกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพีริโรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และพีริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เติมน้ำคาร์บอน 2.7 – 6.7 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ปริมาณผงคาร์บอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (มิลลิโวลต์)	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
2.7	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น
3.3	3.824 ± 0.03	70.13 ± 1.11	0.089 ± 0.00
4.0	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น
4.6	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น
5.3	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น
6.0	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น
6.7	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม้ทั่วทั้งแผ่น

ตารางที่ 21 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เติมผงคาร์บอน 2.7 – 6.7 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ปริมาณผงคาร์บอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)
2.7	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น
3.3	0.090 ± 0.00	271.59 ± 1.00	116 ± 0.00
4.0	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น
4.6	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น
5.3	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น
6.0	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น
6.7	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น

ก-9 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมोनอเมอร์พริโรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)

ตัวแปรที่ศึกษา : ปริมาณผงคาร์บอนที่เติม 6.7 – 33.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ : กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร

: พริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า : กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ : 15 นาที

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 22 ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพริโรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และพริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เติมผงคาร์บอน 6.7 – 33.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 15 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ปริมาณผงคาร์บอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (มิลลิโวลต์)	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
6.7	1.69 ± 0.23	115.19 ± 0.28	0.039 ± 0.01
13.3	1.29 ± 0.08	120.19 ± 0.53	0.030 ± 0.00
20.0	1.60 ± 0.03	117.79 ± 0.71	0.037 ± 0.00
26.7	1.66 ± 0.10	119.84 ± 0.40	0.039 ± 0.00
33.3	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น

ตารางที่ 23 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เติมผงคาร์บอน 6.7 – 33.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 15 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ปริมาณผงคาร์บอน (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)
6.7	0.114 ± 0.00	244.84 ± 1.19	185 ± 0.00
13.3	0.090 ± 0.00	337.62 ± 0.86	193 ± 0.00
20.0	0.102 ± 0.00	229.58 ± 0.31	200 ± 0.00
26.7	0.166 ± 0.00	195.33 ± 2.23	204 ± 0.00
33.3	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น	เคลือบติดไม่ทั่วทั้งแผ่น

ก-10 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์ไพร์โรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)

ตัวแปรที่ศึกษา : ช่องทางการไหลรูปแบบขนาน

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ : กรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร

: ไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า : กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) 12.7 มิลลิ

แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ : 10 นาที

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 24 ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (มิลลิโวลต์)	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
0.769 ± 0.04	90.66 ± 0.43	0.018 ± 0.00

ตารางที่ 25 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)
0.127 ± 0.00	241.00 ± 0.54	157 ± 2.82

ก-11 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์พริโรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)

ตัวแปรที่ศึกษา : ช่องทางการไหลรูปแบบขนาน

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ : กรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร

: พริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

: ผงคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า : กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) 12.7 มิลลิ

แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ : 15 นาที

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 26 ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพริโรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโตะเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และพริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เติมผงคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 15 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (มิลลิโวลต์)	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
0.736 ± 0.12	81.92 ± 0.19	0.017 ± 0.00

ตารางที่ 27 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เติมนิกคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 15 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)
0.108 ± 0.00	314.38 ± 1.97	238 ± 3.52

ก-12 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์ไพร์โรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)

ตัวแปรที่ศึกษา : ช่องทางการไหลรูปตัวยู

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ : กรดโตนเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร

CHULALONGKORN UNIVERSITY : ไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า : กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) 12.7 มิลลิ

แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ : 10 นาที

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 28 ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (มิลลิโวลต์)	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
0.898 ± 0.05	32.47 ± 1.10	0.019 ± 0.00

ตารางที่ 29 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เป็นระยะเวลา 10 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)
0.050 ± 0.00	227.23 ± 0.19	191 ± 1.41

ก-13 ผลของความหนา ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อน ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส และค่าการนำไฟฟ้า ของแผ่นทองแดงที่มีการถูกเคลือบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ผสมระหว่างกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคที่ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์พิริโรลที่ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยการให้กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic)

ตัวแปรที่ศึกษา : ช่องทางการไหลรูปตัวยู

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ : กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร

: พิริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

: ผงคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า : กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) 12.7 มิลลิ

แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ : 15 นาที

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

ตารางที่ 30 ค่าการป้องกันการกัดกร่อน อาทิเช่น ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน และอัตราการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพิริโรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และพิริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เติมผงคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 15 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (มิลลิโวลต์)	อัตราการกัดกร่อน (มิลลิเมตรต่อปี)
1.017 ± 0.12	62.82 ± 2.01	0.021 ± 0.00

ตารางที่ 31 ค่าความหนาของชั้นฟิล์ม ค่าการนำไฟฟ้า และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ถูกสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิกเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร เติมผงคาร์บอน 13.3 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นระยะเวลา 15 นาที ที่กระแสไฟฟ้าคงที่ (Galvanostatic) ที่ 12.7 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)	ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ความหนาของชั้นฟิล์ม (ไมโครเมตร)
0.041 ± 0.00	296.36 ± 2.94	275 ± 7.07



ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณ

ข-1 การคำนวณค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงาน (Interfacial Contact Resistance, ICR)

$$\text{สมการในการหาค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (ICR) : } ICR = \left(\frac{(R_2 \times A_2) - (R_1 \times A_1)}{2} \right)$$

โดย ICR = ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (โอห์มตารางเซนติเมตร)

R_1 = วัดค่าความต้านทานสัมผัสเครื่องมือวัด (โอห์ม)

A_1 = พื้นที่ผิวสัมผัสของผ้าคาร์บอน (ตารางเซนติเมตร)

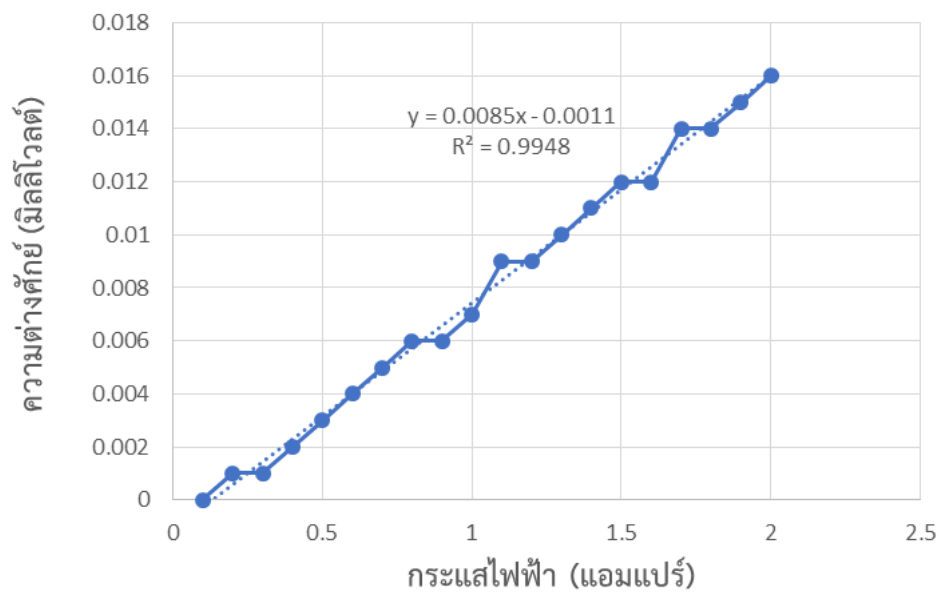
R_2 = ค่าความต้านทานสัมผัสตอนมีชิ้นงาน (โอห์มตารางเซนติเมตร)

A_2 = พื้นที่ผิวสัมผัสของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)

ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของเครื่องมือ R_1

พล็อตกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้าจากนั้นคำนวณหาความต้านทานโดยสมการกฎของโอห์ม $V = IR$ โดยค่า R คือ ความชันที่ได้จากการพล็อต

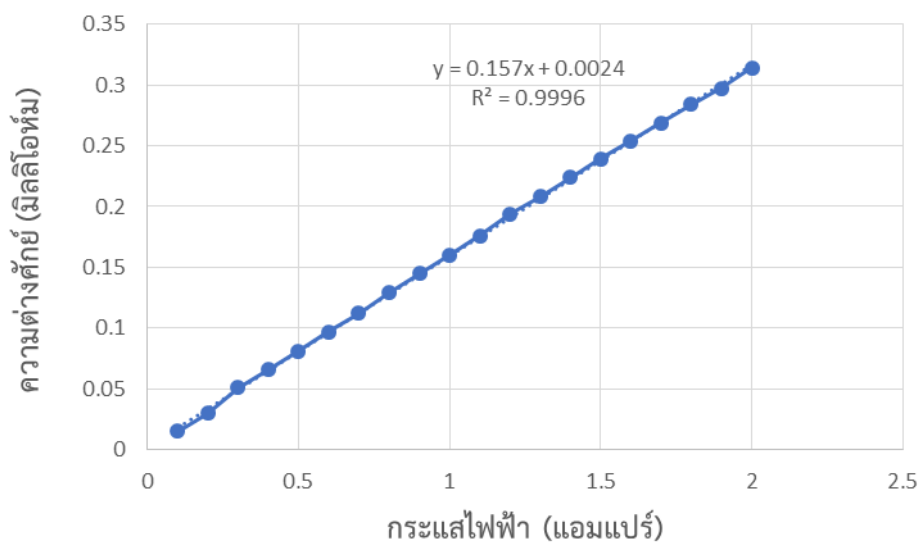
กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (มิลลิ โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่าง ศักย์ (มิลลิ โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่าง ศักย์ (มิลลิ โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่าง ศักย์ (มิลลิ โวลต์)
0.1	0	0.6	0.004	1.1	0.009	1.6	0.012
0.2	0.001	0.7	0.005	1.2	0.009	1.7	0.014
0.3	0.001	0.8	0.006	1.3	0.01	1.8	0.014
0.4	0.002	0.9	0.006	1.4	0.011	1.9	0.015
0.5	0.003	1	0.007	1.5	0.012	2	0.016



จากกราฟ ค่าความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือวัด $R_1 = 0.0085$ มิลลิโอห์ม

ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงาน R_2

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่าง ศักย์ (มิลลิ โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่าง ศักย์ (มิลลิ โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่าง ศักย์ (มิลลิ โวลต์)	กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	ความต่าง ศักย์ (มิลลิ โวลต์)
0.1	0.015	0.6	0.097	1.1	0.176	1.6	0.254
0.2	0.03	0.7	0.112	1.2	0.194	1.7	0.269
0.3	0.051	0.8	0.129	1.3	0.208	1.8	0.284
0.4	0.066	0.9	0.145	1.4	0.224	1.9	0.297
0.5	0.081	1	0.16	1.5	0.239	2	0.314



จากกราฟ ค่าความต้านทานสัมผัสของชิ้นงาน $R_2 = 0.157$ มิลลิโวลต์

คำนวณความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงาน

ค่าความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือวัด $R_1 = 0.0085$ มิลลิโวลต์

พื้นที่ผิวสัมผัสของผ้าคาร์บอน (A_1) = 2.6 ตารางเซนติเมตร

พื้นที่ผิวสัมผัสของชิ้นงาน (A_2) = 1.76 ตารางเซนติเมตร

ค่าความต้านทานสัมผัสของชิ้นงาน $R_2 = 0.157$ มิลลิโวลต์

$$\begin{aligned}
 \text{จุพาลกรณ} &= \left(\frac{(R_2 \times A_2) - (R_1 \times A_1)}{2} \right) \\
 &= \left(\frac{(0.157 \times 1.76) - (0.0085 \times 2.6)}{2} \right) \\
 &= 0.127 \text{ มิลลิโวลต์ตารางเซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

ข-2 การคำนวณค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)

สมการในการหาค่าความการนำไฟฟ้าแบบทะลุผ่าน (Through-plane) :

$$\text{Conductivity} = \frac{\text{Thickness}}{\text{Resistance (R)} \times \text{Area (A)}}$$

โดย Conductivity = ค่าการนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)
 R = ค่าความต้านทานสัมผัสต่อหน้ามีชิ้นงาน (โอห์มตารางเซนติเมตร)
 A = พื้นที่ผิวสัมผัสของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)
 Thickness = ความหนาของชิ้นงาน (เซนติเมตร)

คำนวณความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงาน

R = 0.157 (โอห์มตารางเซนติเมตร)

A = 1.76 (ตารางเซนติเมตร)

Thickness = 0.067 (เซนติเมตร)

$$\text{Conductivity} = \frac{\text{Thickness}}{\text{Resistance (R)} \times \text{Area (A)}}$$

$$= \frac{0.067}{0.157 \times 10^{-3} \times 1.76}$$

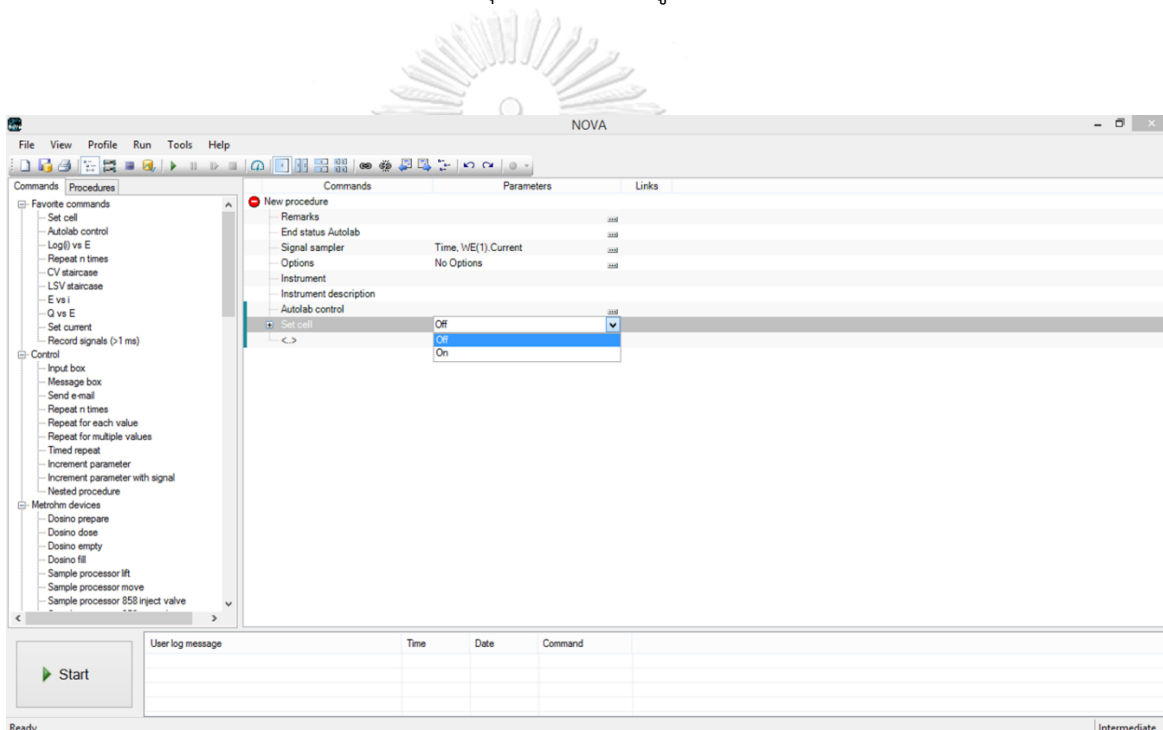
= 241 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

ภาคผนวก ค

ขั้นตอนการทดสอบและวิเคราะห์หาตัวแปรการกัดกร่อนโดยวิธี Tafel slope analysis ด้วยโปรแกรม NOVA

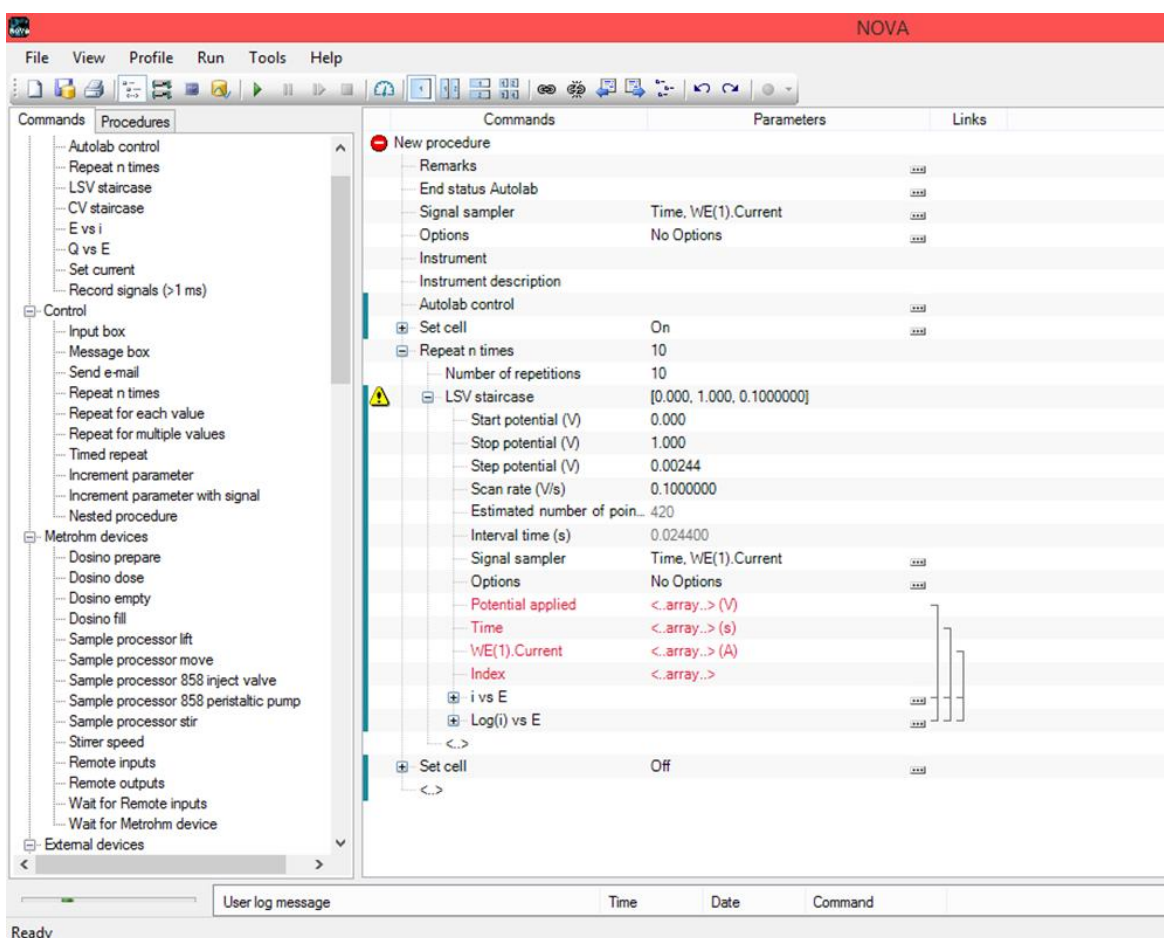
ขั้นตอนในการทดสอบหาอัตราการกัดกร่อน

1. เปิดโปรแกรม NOVA สร้าง Procedure ลากคำสั่งจากฝั่งซ้าย มาวางยัง Command เริ่มจาก Autolab control และ Set cell On ทุกครั้ง แสดงดังรูปที่ 50



รูปที่ 49 เปิดโปรแกรม NOVA

2. สร้างชื่อ ลากเพิ่มจำนวนรอบที่ต้องการทำซ้ำ ค่าน้อยสุด คือ 1 (Repeat n time) ลากเพิ่มฟังก์ชันที่ต้องการทดสอบ (LSV staircase) ลากเพิ่มกราฟ (Plot) ที่ต้องการจะทราบเพิ่มเติม Log(i) vs E กำหนด Set cell Off และกำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ Start potential (V), Stop potential (V), Step potential (V), Scan rate (V/s) แสดงดังรูปที่ 51

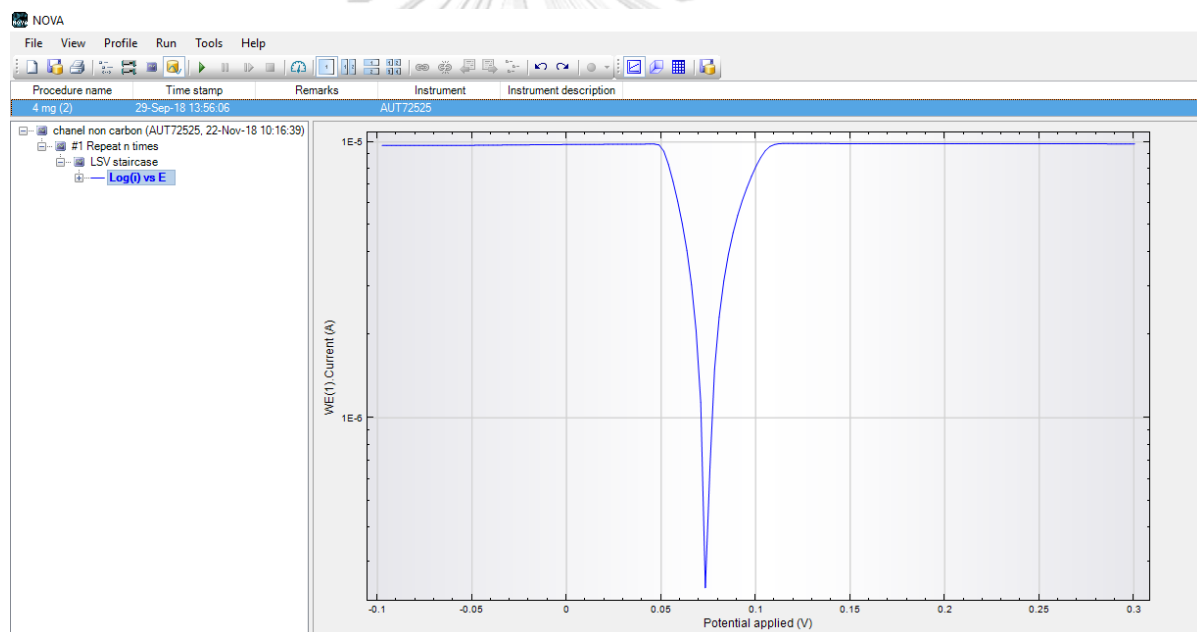


รูปที่ 50 ป้อนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ รวมถึงกำหนดฟังก์ชันที่สำคัญในการวัดการกัดกร่อน

3. เตรียมชิ้นงาน และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ให้พร้อม
4. เมื่อต่อสายต่าง ๆ เข้าที่ testcell เรียบร้อยแล้ว เริ่มทำการทดสอบโดยกดปุ่ม cellenable ที่เครื่องมือ Potentiostat แล้วกดปุ่ม start ที่หน้าจอ
5. โปรแกรมเริ่มทำงานและวัดค่ากระแสไฟฟ้าออกมา สามารถดูกราฟได้ที่ Measurement view เมื่อรันจนครบรอบแล้วจะได้กราฟโดยสามารถเปิดได้จาก Analysis view แล้วสามารถนำไปหา ค่าอัตรากัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน และค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน

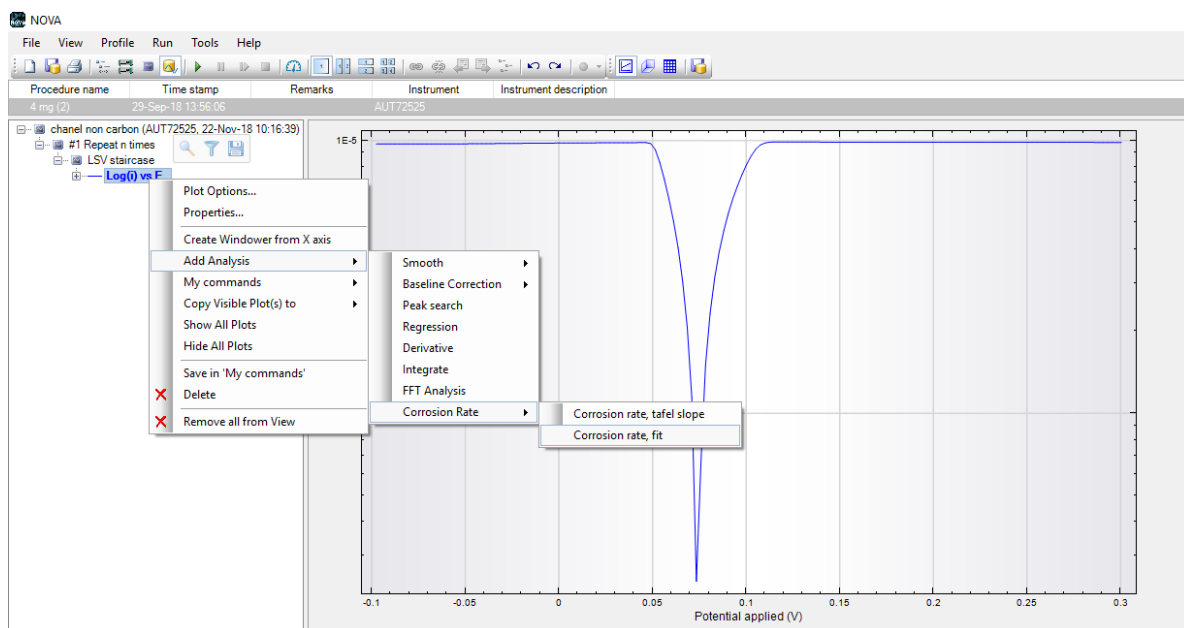
ขั้นตอนในการวิเคราะห์หาอัตราการกัดกร่อน

1. การดูข้อมูล คลิก Analysis view → เลือกชื่อ Procedure ที่ทดสอบ → ดับเบิลคลิก จะปรากฏข้อมูลด้านล่าง คลิกเลือก Log (i) vs E จะแสดงกราฟ แสดงดังรูปที่ 52



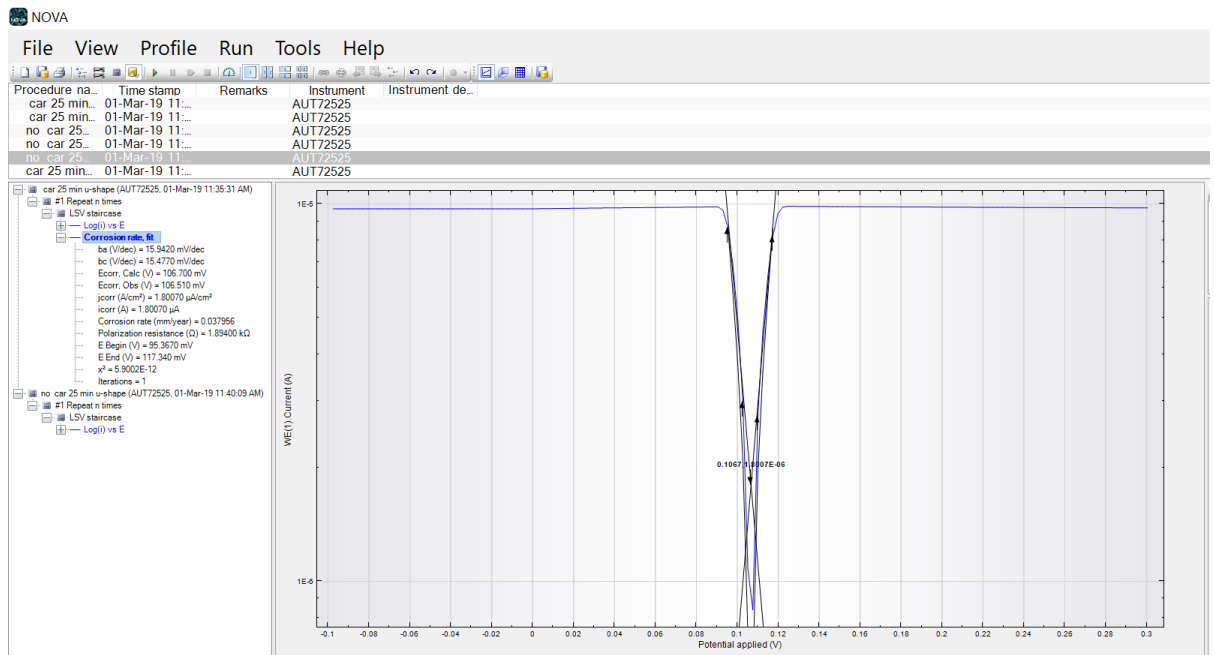
รูปที่ 51 กราฟที่วิเคราะห์ได้ (Tafel plot)

2. สามารถหา ค่าอัตรากัดกร่อน ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน และค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน
คลิกขวาที่ตัวหนังสือสีน้ำเงิน คลิกขวาเลือก Add Analysis → เลือก Corrosion rate →
เลือก Corrosion rate, fit แสดงดังรูปที่ 53



รูปที่ 52 วิธีการวิเคราะห์ที่ได้จากกราฟที่ได้ (Tafel plot)

3. นำหน้าต่างที่ได้ตามข้อ 2 นำมาใส่ข้อมูล ดังนี้ ชี้นงานเป็นแผ่นทองแดง ต้องใส่ข้อมูล พื้นที่ผิว (Surface area) 1 ตารางเซนติเมตร น้ำหนักสมมูลย์ (Equivalent weight) 31.773 กรัมต่ออิกิวาเลนซ์ ความหนาแน่น (Density) 8.96 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ถ้าชี้นงานพอลิพีร์โรล พื้นที่ผิว 1 ตารางเซนติเมตร น้ำหนักสมมูลย์ 134 กรัมต่ออิกิวาเลนซ์ ความหนาแน่น 0.967 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
4. เมื่อกรอกข้อมูลครบแล้วกำหนดจุดสองจุดของทั้ง 2 เส้น จะได้ 2 เส้น ตัดกันสังเกตให้เส้นตัดอยู่ตรงกลางของกราฟโดยค่าที่เราเลือกเป็น Fit Tafel Slope อยู่แล้วจะได้ค่าที่แท้จริงของกราฟอยู่แล้ว แสดงดังรูปที่ 54



รูปที่ 53 ค่าพารามิเตอร์ที่เครื่องอ่านได้จากกราฟ Tafel plot

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ธิดา คุณสมบัติ
วัน เดือน ปี เกิด	17 ตุลาคม 2535
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	356/2 หมู่ 5 ต.หนองหญ้าไซ อ.หนองหญ้าไซ จ.สุพรรณบุรี 72240
ผลงานตีพิมพ์	หัวข้อเรื่อง การเตรียมฟิล์มพอลิไพร์โรลบนแผ่นทองแดงโดยวิธีการพอกพูนด้วยไฟฟ้า (Preparation of polypyrrole film on copper plate by electrodeposition method) ในการประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 "Designing Tomorrow Towards Sustainable Engineering and Technology" โรงแรมเอ-วัน เดอะ รอยัล ครุส พัทยา 8-9 พฤศจิกายน 2561
รางวัลที่ได้รับ	ทุนอุดหนุนการวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุนผู้ช่วยสอน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย