

การเคลือบพอลิไพร์โรลและพอลิแอนิลีนบนขั้วไฟฟ้าเหล็กกล้าไร้สนิม

นางสาวพัชราลัย อรุณยงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

COATING OF POLYPYRROLE AND POLYANILINE ON STAINLESS STEEL ELECTRODE

Miss. Patcharalai Arunyong

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเคลือบพอลิไพร์โรลและพอลิแอนิไลน์บนขั้วไฟฟ้า เหล็กกล้าไร้สนิม
โดย	นางสาวพัชราลัย อรุณยงค์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พุกษาท

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.เก็จวดี พุกษาท)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.มะลิ หุ่นสม)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

พัชรวัลย์ อรุณยงค์ : การเคลือบพอลิไพร์โรลและพอลิแอนิไลน์บนขั้วไฟฟ้าเหล็กกล้าไร้  
สนิม. (COATING OF POLYPYRROLE AND POLYANILINE ON STAINLESS  
STEEL ELECTRODE) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ.ดร. เก็จวิไล พุกษาทร, 129  
หน้า.

ปัจจุบันแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิงที่ทำจากวัสดุโลหะกำลังได้รับความสนใจแทนวัสดุประเภทแผ่นแกรไฟต์ แต่เนื่องจากโลหะสามารถถูกกัดกร่อนได้จากภาวะกรดในเซลล์เชื้อเพลิง จึงได้ศึกษาวิธีป้องกันโดยการเคลือบด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ โดยงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาการสังเคราะห์พอลิไพร์โรล (PPY) และพอลิแอนิไลน์บนขั้วพอลิไพร์โรล(PPY/PANI) บนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ชนิดของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ วิธีในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ ในการศึกษาผลของความเข้มข้นมอนอเมอร์ไพร์โรล และชนิดของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต กรดออกซาลิก และ กรดซัลฟิวริก โดยทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอนอเมอร์ ส่งผลให้การป้องกันการกัดกร่อนลดลง และค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์สูงขึ้น และการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลความเข้มข้นมอนอเมอร์ 0.1 โมลต่อลิตร ในสารละลายกรดออกซาลิก 0.5 โมลต่อลิตร ให้ภาวะในการป้องกันการกัดกร่อนและความต้านทานเชิงสัมพัทธ์เหมาะสมที่สุด จากนั้นทำการปรับเปลี่ยนวิธีในการสังเคราะห์ เป็นวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่และค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ในสารละลายกรดออกซาลิก พบว่าการสังเคราะห์ด้วยวิธีกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE เป็นเวลา 350 วินาที ส่งผลให้การป้องกันการกัดกร่อนดีที่สุดสำหรับการเคลือบแบบชั้นเดียว และค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ต่ำ ส่วนการสังเคราะห์ PPY/PANI ด้วยวิธีกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ 1 มิลลิแอมแปร์ เวลาการสังเคราะห์ 600 วินาที พบว่าการเคลือบแบบสองชั้นให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนที่สูงกว่าการเคลือบชั้นเดียว ส่วนค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์สูงขึ้น เมื่อนำพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้มาศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM และศึกษาองค์ประกอบของฟิล์มด้วยเทคนิค FTIR พบว่าฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและมีหมู่ฟังก์ชันเป็น PPY และ PANI ที่สังเคราะห์ได้จริง

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา .....2554.....

# # 5272448023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: POLYPYRROLE (PPY) POLYANILINE (PANI) CORROSION INTERFACIAL CONTACT RESISTANT (ICR) STAINLESS STEEL

PATCHARALAI ARUNYONG: COATING OF POLYPYRROLE AND POLYANILINE ON STAINLESS STEEL ELECTRODE. ADVISOR: ASSOC. PROF.KEJVALEE PRUKSATHORN, Ph.D., 129 pp.

Currently, bipolar plate in PEM fuel cell that made from metal is used to replace with graphite materials. However, metal corrosion could be obtained from the acid conditions in fuel cell. Therefore, the prevention of metal corrosion is studied by coating with conductive polymers. In this research, monolayer polypyrrole (PPY) and bilayer polypyrrole/polyaniline (PPY/ PANI) were used to coat on stainless steel electrode by electrochemical methods. The target parameters were types of supporting electrolyte, monomer concentrations and electropolymerization methods. The results of pyrrole monomer concentration that synthesized by Cyclic voltammetry, Potentiostatic and Galvanostatic method were shown that corrosion resistivity was decreased with opposite to interfacial contact resistance (ICR) as increasing of monomer concentration. In aspect to supporting electrolyte types; sodiumdodecylsulfate, oxalic acid and sulfuric acid, it was found that the optimum conditions was synthesized PPY were Potentiostatic method at 0.6 V/SCE for 350 s containing 0.1 M of pyrrole monomer in oxalic acid that provided the best protection corrosion and low ICR value for first layer. The synthesized PANI in oxalic acid in the second layer (PPY/PANI) by Galvanostatic method at 0.1 mA for 600 s was indicated the corrosion protection efficiency and ICR value higher than monolayer. The results of morphology and composition of the PPY and PANI were confirmed by Scanning Electron Microscopy (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), respectively.

Department : .....Chemical Technology..... Student's Signature.....

Field of Study : ....Chemical Technology..... Advisor's Signature.....

Academic Year .....2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. เกียรติ พงษ์ชาติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และคณาจารย์ทุกท่านในกลุ่มวิจัยเซลล์เชื้อเพลิง ที่กรุณาให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิทิตสานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์รองศาสตราจารย์ ดร. มะลิหุ้ณสม และ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วรมงคลชัย ที่ได้กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์และให้คำแนะนำ แก้ไขข้อผิดพลาดเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซึ่งผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิงภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูงที่มอบทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่มอบทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิตในการทำวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา (EN276B)

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจจนงานวิจัยลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอขอบพระคุณบิดา-มารดาและทุกคนในครอบครัวที่เป็นกำลังใจ เข้าใจ ให้ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	6
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า.....	6
2.2 วิธีการสังเคราะห์สารด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า.....	7
2.2.1 ไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	7
2.2.2 ควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	8
2.2.3 ควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่.....	8
2.3 อิเล็กโทรพอลิเมอร์โรเซชัน.....	9
2.4 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	11
2.4.1 พอลิพีร์โรล.....	14
2.4.1.1 โครงสร้างของพอลิพีร์โรล.....	14
2.4.1.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์โรเซชันของพอลิพีร์โรล.....	15
2.4.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิพีร์โรล.....	16
2.4.2 พอลิแอนิไลน์.....	17
2.4.2.1 การสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์.....	18

บทที่	หน้า
2.4.2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของพอลิเอนิลีน.....	20
2.5 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว.....	21
2.5.1 ส่วนประกอบและสมบัติของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว.....	22
2.5.2 ประเภทของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว.....	24
2.6 เหล็กกล้าไร้สนิม.....	25
2.6.1 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม.....	26
2.6.2 ธาตุและการให้คุณสมบัติของธาตุที่ผสมลงในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม.....	28
2.7 การกัดกร่อน.....	29
2.7.1 ชนิดการกัดกร่อน.....	30
2.7.2 การป้องกันการเกิดการกัดกร่อน.....	32
2.7.3 การกัดกร่อนทางเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	33
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	40
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	40
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	41
3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	41
3.3.1 การกลั่นมอนอเมอร์.....	41
3.3.2 การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการเคลือบ.....	42
3.3.3 การเตรียมเซลล์เคมีไฟฟ้าเพื่อทำการวิเคราะห์.....	42
3.3.4 การสังเคราะห์พอลิเมอไรโดยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชัน.....	43
3.3.4.1 ศึกษาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชัน และภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิพีโรลแบบชั้นเดียว บนเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	44
3.3.4.2 ศึกษาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชัน ของพอลิเอนิลีนแบบชั้นเดียวบนเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเทคนิค ไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	44
3.3.4.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิพีโรลบนเหล็กกล้าไร้ สนิมแบบชั้นเดียวบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเทคนิคกำหนดค่า ศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	45



3.3.4.4	ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิพีริโรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมแบบชั้นเดียวบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเทคนิคกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าคงที่.....	45
3.3.4.5	ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์บนพอลิพีริโรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมแบบสองชั้นบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเทคนิคกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	45
3.3.4.6	ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์บนพอลิพีริโรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมแบบสองชั้นบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเทคนิคกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าคงที่.....	46
3.3.5	การทดสอบการกัดกร่อนของโลหะ.....	47
3.3.6	วัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงาน .....	47
3.3.7	การวิเคราะห์ลักษณะผิวและความหนาของชิ้นงาน.....	49
3.3.8	การวิเคราะห์หุ้ผึ้งกึ่งชั้นของชิ้นงานด้วยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชัน.....	49
3.3.9	การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด...	50
4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	51
4.1	ศึกษาความเข้มข้นสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิพีริโรลบนเหล็กกล้าไร้สนิม.....	50
4.2	ศึกษาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชันและภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิพีริโรลแบบชั้นเดียวบนเหล็กกล้าไร้สนิม ในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์สามชนิด โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	53
4.2.1	ผลของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	53
4.2.1.1	การสังเคราะห์พอลิพีริโรลในสารละลายโซเดียมไดอะซัลเฟต ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร.....	53
4.2.1.2	การสังเคราะห์พอลิพีริโรลในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร.....	54
4.2.1.3	การสังเคราะห์พอลิพีริโรลในสารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร.....	55
4.2.2	ผลความเข้มข้นของพีริโรลมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	57

4.2.2.1	การสังเคราะห์พอลิพีริโวลในสารละลายไซเตียมโดเดซิลซัลเฟต ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร.....	57
4.2.2.2	การสังเคราะห์พอลิพีริโวลในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร.....	60
4.2.2.3	การสังเคราะห์พอลิพีริโวลในสารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร.....	61
4.3	ศึกษาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชันและภาวะที่ เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิพีริโวลแบบชั้นเดียวบนเหล็กกล้าไร้สนิมในสาร สนับสนุนอิเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร โดยเทคนิคให้ ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	65
4.3.1	ผลของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	66
4.3.2	ผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	69
4.4	ศึกษาช่วงค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชันและภาวะที่ เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิพีริโวลแบบชั้นเดียวบนเหล็กกล้าไร้สนิมในสาร สนับสนุนอิเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร โดยเทคนิคให้ ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่.....	72
4.4.1	ผลของค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	72
4.4.2	ผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	75
4.5	ศึกษาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชันและภาวะที่ เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิแอนิลีนบนชั้นของพอลิพีริโวลบนเหล็กกล้าไร้สนิม ในสารละลายกรดออกซาลิก โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี .....	78
4.6	ศึกษาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชันและภาวะที่ เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิแอนิลีนบนชั้นพอลิพีริโวลบนเหล็กกล้าไร้สนิมใน สารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร โดย เทคนิคให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่.....	79
4.6.1	ผลของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	80
4.6.2	ผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	83

บทที่	หน้า	
4.7	ศึกษาช่วงค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันและภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิแอนิลินบนชั้นพอลิพีร์โรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร โดยเทคนิคให้กระแสไฟฟ้าคงที่.....	85
	4.7.1 ผลของค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์.....	85
	4.7.2 ผลของเวลาในการสังเคราะห์.....	88
4.8	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy	91
	4.8.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้.....	91
5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	94
	5.1 สรุปผลการทดลอง.....	94
	5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย.....	95
	รายการอ้างอิง.....	96
	ภาคผนวก.....	102
	ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง.....	103
	ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ.....	122
	ภาคผนวก ค ขั้นตอนการทดสอบและวิเคราะห์หาตัวแปรการกัดกร่อนโดยวิธี Tafel slope analysis ด้วยโปรแกรม GPES.....	125
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	129

## สารบัญญัตินำ

ตาราง		หน้า
2.1	โครงสร้างและค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ผ่านการโดป.....	13
2.2	รูปแบบที่แตกต่างกันของพอลิแอนิลีน.....	18
2.3	สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุที่ใช้ทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว.....	23
2.4	สมบัติที่ต้องการของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเซลล์	23
2.5	การเปรียบเทียบวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว.....	25
4.1	ความหนาแน่นกระแสการกักต่อนในความสัมพันธ์สารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ต่างกันสามชนิด.....	52
4.2	ความหนาของชั้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมทรีในสารละลายอิเล็กโทรไลต์พิวโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร ในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์โซเดียมโอดีซัลเฟต กรดซัลฟิวริก และกรดออกซาลิก.....	64
4.3	การเปรียบเทียบการสังเคราะห์พอลิพิวโรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า...	78
4.4	การเปรียบเทียบการสังเคราะห์พอลิแอนิลีนบนชั้นพอลิพิวโรลและพอลิพิวโรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า.....	90
4.5	ตำแหน่งการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เป็นลักษณะเฉพาะของพอลิพิวโรล.....	91
4.6	ตำแหน่งการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เป็นลักษณะเฉพาะของพอลิแอนิลีน.....	92
ก1	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากักต่อน และค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกักต่อนของฟิล์มพอลิพิวโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโซเดียมโอดีซัลเฟต และสารละลายมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร.....	104
ก2	ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพิวโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโซเดียมโอดีซัลเฟต และสารละลายมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร.....	104
ก3	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากักต่อน และค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกักต่อนของฟิล์มพอลิพิวโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดซัลฟิวริก และสารละลายมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร.....	105

## ตาราง

## หน้า

ก4	ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดซัลฟิวริก และสารละลายมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร.....	106
ก5	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากักตร้อน และค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกักตร้อนของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิก และสารละลายมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร .....	106
ก6	ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิก และสารละลายมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร.....	107
ก7	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากักตร้อน และค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกักตร้อนของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิก และสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.45 – 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE.....	108
ก8	ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิก และสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.45 – 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE.....	108
ก9	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากักตร้อน และค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกักตร้อนของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 300 – 1800 วินาที ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE.....	109
ก10	ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 300 – 1800 วินาที ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE.....	110
ก11	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากักตร้อน และค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกักตร้อนของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์ ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.5 – 0.8 มิลลิแอมแปร์.....	111
ก12	ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์ ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.5 – 0.8 มิลลิแอมแปร์.....	111

## ตาราง

## หน้า

ก13	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากััดกร่อน และค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 200 – 1800 วินาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.6 มิลลิแอมแปร์.....	112
ก14	ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 200 – 1800 วินาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.6 มิลลิแอมแปร์.....	113
ก15	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากััดกร่อนของฟิล์มพอลิพีริโรลที่สังเคราะห์ในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์สามชนิด.....	114
ก16	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากััดกร่อน และค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพีริโรล/ พอลิแอนิไลน์ ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายแอนิไลน์มอนอเมอร์ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.7 – 1.6 โวลต์เทียบกับ SCE.....	115
ก17	ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีริโรล/ พอลิแอนิไลน์ ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิก และสารละลายแอนิไลน์มอนอเมอร์ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.7 – 1.6 โวลต์เทียบกับ SCE.....	116
ก18	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากััดกร่อน และค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพีริโรล/ พอลิแอนิไลน์ ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายแอนิไลน์มอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 300 – 1800 วินาที ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE.....	117
ก19	ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีริโรล/ พอลิแอนิไลน์ ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิก และสารละลายแอนิไลน์มอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 300 – 1800 วินาที ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE.....	118
ก20	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากััดกร่อน และค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพีริโรล/ พอลิแอนิไลน์ ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์ ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.9 – 4 มิลลิแอมแปร์.....	119
ก21	ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีริโรล/ พอลิแอนิไลน์ ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์ ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.9 – 4 มิลลิแอมแปร์.....	119

ตาราง

หน้า

ก22	ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากััดกร่อน และค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพีร์โรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีร์โรลมอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 300 – 1800 วินาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1 มิลลิแอมแปร์.....	120
ก23	ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีร์โรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีร์โรลมอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 300 – 1800 วินาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1 มิลลิแอมแปร์.....	121

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1.1	โครงสร้างทั่วไปของพอลิแอนิลีน.....	2
1.2	โครงสร้างทั่วไปของพอลิไพร์โรล.....	3
2.1	ไซคลิกโวลแทมโมแกรม.....	8
2.2	โพเทนชิโอสแตติกไดอะแกรม.....	8
2.3	กัลวานอสแตติกไดอะแกรม.....	9
2.4	ก. แถบพลังงานของพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผ่านการโดป ข. สถานะโพลารอน (Polaron) มีสปินเท่ากับ $\frac{1}{2}$ (ระดับการโดปต่ำ) ค. สถานะไบโพลารอน (Bipolaron) มีสปินเท่ากับ 0 (ระดับการโดปสูง).....	12
2.5	โครงสร้างพอลิไพร์โรล.....	14
2.6	โครงสร้างแบบอะโรมาติกและแบบควินอยด์ของพอลิไพร์โรล.....	15
2.7	กลไกการเกิดพอลิไพร์โรล.....	16
2.8	โครงสร้างทั่วไปของพอลิแอนิลีน.....	17
2.9	กลไกกระบวนการโดปของพอลิแอนิลีน.....	19
2.10	ขั้นการเกิดเรดิคัลประจุบวกของแอนิลีน และโครงสร้างเรโซแนนซ์แบบต่างๆ.....	20
2.11	ขั้นการรวมตัว และการตั้งโปรตอนเกิดเป็นไดเมอร์ และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไดเมอร์.....	20
2.12	ขั้นขยายสายโซ่ได้เป็นพอลิเมอร์.....	21
2.13	ส่วนประกอบภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม.....	22
2.14	การจำแนกประเภทของวัสดุที่ใช้ทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง.....	24
2.15	การเกิดสนิมบนผิวเหล็ก.....	30
2.16	การเกิดการกัดกร่อนแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของกระแสแอนอดิกและแคโทดิก.....	33
2.17	ค่ากระแสการกัดกร่อน และค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนของทาทาเฟลพล็อต.....	36
3.1	การติดตั้งอุปกรณ์การกลั่นมอนอเมอร์.....	42
3.2	การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลงบนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า.....	43



ภาพที่	หน้า
3.3	เครื่องมือการวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัส..... 48
3.4	การจัดเรียงอุปกรณ์การวัดความต้านทานเชิงสัมผัส..... 48
4.1	ไซคลิกโวลแทจโมแกรมการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ( ———)พีวีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น0.1 โมลต่อลิตร ในสารละลายโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร และ ( - - - ) สารละลายโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร..... 54
4.2	ไซคลิกโวลแทจโมแกรมการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ( ———)พีวีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น0.1 โมลต่อลิตร ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และ ( - - - ) สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร..... 55
4.3	ไซคลิกโวลแทจโมแกรมการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ( ———)พีวีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ในสารละลายกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และ ( - - - - ) สารละลายกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร..... 56
4.4	ประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อนและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของการสังเคราะห์ พอลิพีวีโรลในสารละลายพีวีโรลมอนอเมอร์0.1 โมลต่อลิตร ในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกัน ได้แก่ โซเดียมโคเดซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร การละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และสารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร..... 57
4.5	ไซคลิกโวลแทจโมแกรมการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันฝั่งการเกิดออกซิเดชันของพอลิพีวีโรลในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของมอนอเมอร์พีวีโรล ( ———) 0.1 โมลต่อลิตร (.....) 0.2 โมลต่อลิตร ( - - - )0.3 โมลต่อลิตร ( ———)0.4 โมลต่อลิตร และ( - - - - )0.5 โมลต่อลิตร..... 58

ภาพที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสของการกักก่ร้อนและประสิทธิภาพป้องกันการกักก่ร้อน โดยสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโซเดียมโอดีเซลลิตเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร และพีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร.....	59
4.7 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิพีโรลโดยสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโซเดียมโอดีเซลลิตเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตรและพีโรลมอนอเมอร์ความเข้มข้น (ก) 0.1 โมลต่อลิตร (ข) 0.3 โมลต่อลิตร และ(ค) 0.5 โมลต่อลิตร ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า.....	60
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสของการกักก่ร้อนและประสิทธิภาพป้องกันการกักก่ร้อน โดยสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรและพีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร.....	61
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสของการกักก่ร้อนและประสิทธิภาพป้องกันการกักก่ร้อน โดยสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และพีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร.....	62
4.10 ประสิทธิภาพการป้องกันการกักก่ร้อนของการสังเคราะห์พอลิพีโรลด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์พีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร กับสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์สามชนิด.....	62
4.11 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรีในสารละลายอิเล็กโทรไลต์พีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร กับสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์สามชนิด.....	64
4.12 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิพีโรลโดยสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของพีโรลมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร กับสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ (ก) โซเดียมโอดีเซลลิตเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร (ข) กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และ (ค) กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า .....	65

ภาพที่	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการสังเคราะห์พอลิพีริโรลในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของพีริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า (---) 0.45 โวลต์ (—) 0.50 โวลต์ (- · - ·) 0.55 โวลต์ (- · ·) 0.60 โวลต์ และ (.....) 0.65 โวลต์.....	66
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสของการกักต่อนและประสิทธิภาพป้องกันการกักต่อน โดยทำการสังเคราะห์พอลิพีริโรลด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า 0.45 โวลต์ ถึง 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE เวลาในการสังเคราะห์ 1800 วินาที.....	67
4.15 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิพีริโรลโดยสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า (ก) 0.45 โวลต์ (ข) 0.60 โวลต์ และ (ค) 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE เวลาในการสังเคราะห์ 1800 วินาที.....	68
4.16 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและความหนาของชั้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า 0.45 โวลต์ ถึง 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE เวลาในการสังเคราะห์ 1800 วินาที.....	68
4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการกักต่อนและประสิทธิภาพป้องกันการกักต่อน โดยทำการสังเคราะห์พอลิพีริโรลด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ 300 ถึง 1800 วินาที ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.60 โวลต์เทียบกับ SCE .....	70
4.18 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่าความหนาของชั้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ 300 ถึง 1800 วินาที ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.60 โวลต์เทียบกับ SCE.....	71
4.19 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิพีริโรลโดยสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ (ก) 300 วินาที (ข) 350 วินาที (ค) 1400 วินาทีและ (ง) 1800 วินาทีที่ค่าศักย์ไฟฟ้าในการสังเคราะห์ 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE .....	71

ภาพที่	หน้า	
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลาในการสังเคราะห์พอลิพีริโรลในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของพีริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่ค่ากระแสไฟฟ้าศักย์ไฟฟ้า (— —) 0.5 มิลลิแอมแปร์ (- · - ·) 0.6 มิลลิแอมแปร์ (.....) 0.7 มิลลิแอมแปร์ (——) 0.8 มิลลิแอมแปร์ ในเวลาการสังเคราะห์ 1800 วินาที.....	73
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการกักก่อนและประสิทธิภาพป้องกันการกักก่อน โดยทำการสังเคราะห์พอลิพีริโรลด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.22 ถึง 0.35 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการสังเคราะห์ 1800 วินาที.....	74
4.22	ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่าความหนาของชั้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.22 ถึง 0.35 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการสังเคราะห์ 1800 วินาที.....	74
4.23	โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิพีริโรลโดยสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า (ก) 0.26 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และ (ข) 0.35 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เวลาในการสังเคราะห์ 1800 วินาที.....	75
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการกักก่อนและประสิทธิภาพป้องกันการกักก่อน โดยทำการสังเคราะห์พอลิพีริโรลด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ 200 ถึง 1800 วินาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.26 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร.....	76
4.25	ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่าความหนาของชั้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ 200 ถึง 1800 วินาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.26 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร.....	77
4.26	โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิพีริโรลโดยสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ที่เวลาการสังเคราะห์ (ก) 300 วินาที (ข) 600 วินาที และ (ค) 1800 วินาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.26 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร.....	77

ภาพที่	หน้า
4.27	79
4.28	80
4.29	81
4.30	82
4.31	83
4.32	84
4.33	84
4.34	85

ภาพที่	หน้า
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการสังเคราะห์พอลิแอนิลีนบนชั้นพอลิพีร์โรลในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของแอนิลีนนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE.....	86
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนและประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน โดยทำการสังเคราะห์พอลิแอนิลีนบนพอลิพีร์โรลด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงค่ากระแสไฟฟ้า 0.9 ถึง 4 มิลลิแอมแปร์ ที่เวลาในการสังเคราะห์ 600 วินาที.....	87
4.37 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่าความหนาของชั้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงค่ากระแสไฟฟ้า 0.9 ถึง 4 มิลลิแอมแปร์ เวลาในการสังเคราะห์ 600 วินาที.....	87
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนและประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน โดยทำการสังเคราะห์พอลิแอนิลีนบนชั้นพอลิพีร์โรลด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ 300 ถึง 1800 วินาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1.0 มิลลิแอมแปร์.....	88
4.39 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิแอนิลีนบนพอลิพีร์โรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ที่เวลาการสังเคราะห์ (ก) 600 วินาที และ (ข) 1800 วินาที ค่ากระแสไฟฟ้า 1 มิลลิแอมแปร์.....	89
4.40 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่าความหนาของชั้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ 300 ถึง 1800 วินาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1.0 มิลลิแอมแปร์.....	89
4.41 FTIR สเปกตรัมของพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้บนเหล็กกล้าไร้สนิม.....	92
ค.1 การเปิดโปรแกรม GPES.....	125
ค.2 การป้อนค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบด้วยโปรแกรม GPES.....	126
ค.3 กราฟที่วิเคราะห์ได้.....	127
ค.4 ค่าพารามิเตอร์ที่เครื่องอ่านได้หลังจาก Fit Tafel slope.....	128
ค.5 ค่าพารามิเตอร์ที่เครื่องอ่านได้หลังจากเลือกคลิก Start fit.....	128

## บทที่ 1

### บทนำ

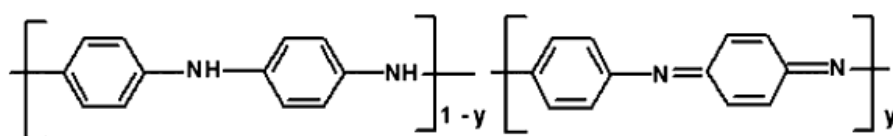
#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

การเสื่อมสภาพของโลหะเป็นปัญหาหนึ่งที่ไม่เพียงประสงค์ให้เกิดกับโลหะที่นำมาใช้งาน อาทิเช่นปัญหาเรื่องการกัดกร่อน (Corrosion) ของโลหะที่ใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้า (Electrode) นั้นเป็นปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) เนื่องจากภาวะที่เกิดขึ้นในเซลล์เชื้อเพลิงมีฤทธิ์เป็นกรด เมื่อเกิดปัญหาการกัดกร่อน ทำให้ต้องสิ้นเปลืองงบประมาณในส่วนของการซ่อมแซม บำรุงรักษา หรือการรีไซเคิลใหม่ทดแทน จึงมีการพัฒนาเทคนิคการป้องกันหรือเพิ่มความคงทนแก่โลหะ เพื่อลดปัญหาการกัดกร่อนและเพิ่มอายุการใช้งาน โดยการเคลือบหรือสร้างฟิล์มพอลิเมอร์นำไฟฟ้าบนผิวของโลหะ ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน (Electropolymerization) ซึ่งเป็นการเคลือบโดยอาศัยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยในขั้นแรกมอนอเมอร์จะเกิดออกซิเดชันหรือรีดักชันกลายเป็นพอลิเมอร์บนพื้นผิวที่เป็นตัวนำไฟฟ้าหรือขั้วไฟฟ้า ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่า อิเล็กโทรอินิทิเอตพอลิเมอร์ไรเซชัน (Initiated polymerization) ข้อดีของวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน คือใช้มอนอเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำทำให้มีความสามารถในการละลายในตัวกลางได้ดี นอกจากนั้นกระบวนการนี้ยังไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง และไม่ต้องใช้ภาวะรุนแรงในการดำเนินการโดยการควบคุมการเกิดอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันมีหลายวิธี เช่น ควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Potentiostatic) ควบคุมค่ากระแสคงที่ (Galvanostatic) และ ควบคุมโดยเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า (Cyclic voltammetry)

กระบวนการเกิดฟิล์มพอลิเมอร์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าที่จุ่มอยู่ในสารละลายซึ่งประกอบด้วยมอนอเมอร์และเอนไซม์ อธิบายได้โดยการที่มอนอเมอร์จะถูกออกซิไดซ์ด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าที่ค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดพอลิเมอร์จนกระทั่งแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ โดยอนุมูลอิสระเหล่านี้จะถูกดูดซับอยู่บนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า และเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องภายใต้ปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดโครงตาข่ายของพอลิเมอร์ หรือที่เรียกว่ากระบวนการอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน การเกิดฟิล์มพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับลักษณะทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์นั้น ถ้าพอลิเมอร์ที่ไม่นำไฟฟ้าการเคลือบจะเกิดได้เพียงเล็กน้อย ได้ฟิล์มที่มีความหนาประมาณ 10-100 นาโนเมตร แต่ในทางตรงกันข้ามฟิล์มที่เป็นตัวนำไฟฟ้าจะเกิดขึ้นได้ไม่จำกัด กระบวนการจะถูกควบคุมโดยศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้ [1]

ปกติพอลิเมอร์ส่วนใหญ่ถูกจัดไว้ในกลุ่มฉนวนไฟฟ้า เพราะพอลิเมอร์มีสภาพการนำไฟฟ้าน้อยมาก เนื่องจากไม่มีอิเล็กตรอนอิสระจำนวนมากเป็นพาหะในการนำไฟฟ้า แต่ต่อมาพบว่าพอลิเมอร์บางชนิดที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์ที่เหมาะสมจะสามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ใกล้เคียงกับโลหะ เรียกว่า พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Conducting polymer) โดยมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยพันธะเดี่ยวสลับพันธะคู่ หรือ ที่เรียกว่า “คอนจูเกชัน” (Conjugation) เช่น พอลิแอนิลีน พอลิไพร์โรล พอลิไทโอฟีน และพอลิพาราเฟนิลีนไวโวลีน เป็นต้น พอลิเมอร์เหล่านี้สามารถรับและให้อิเล็กตรอนได้ง่ายกว่าพอลิเมอร์ทั่วไป และแสดงพฤติกรรมคล้ายสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ประเภทซิลิกอน (Silicon) โดยสามารถปรับเปลี่ยนภาวะการนำไฟฟ้าได้โดยผ่านกระบวนการโดป (Doping Reaction) พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ถูกโดปจะมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน หรือประจุบวกภายในสายโซ่ส่งผลให้เกิดการนำไฟฟ้าในที่สุด ซึ่งในปัจจุบันมีการนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามาประยุกต์ใช้ในหลายๆด้าน โดยเฉพาะนำมาเป็นส่วนประกอบสำคัญทางอิเล็กทรอนิกส์ หรือมีการใช้งานเป็นขั้วแบตเตอรี่ที่ชาร์จไฟใหม่ได้ แต่ลักษณะพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่น่าสนใจคือ มีลักษณะเป็นแผ่นฟิล์มบางสามารถยึดเกาะติดบนผิวของโลหะดี จึงมีการนำแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์นำไฟฟ้าไปเคลือบบนผิวของวัตถุหลายชนิด เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการเพิ่มความแข็งแรง ลดการสึกหรอจากการเสียดทาน ป้องกันการเกิดสนิมหรือป้องกันการกัดกร่อน และทำให้เกิดการนำไฟฟ้าที่ผิววัสดุนั้นๆ โดยจะทำการเตรียมฟิล์มพอลิเมอร์โดยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน

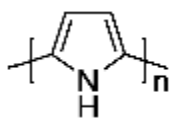
พอลิแอนิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่น่าสนใจซึ่งอยู่ในกลุ่มของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ชนิดนี้มาจากผลของ conjugated  $\pi$ -electrons ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้ประมาณ 10 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร [2] มีสมบัติเด่นคือ มีความเสถียรในสถานะต่างๆ สามารถป้องกันการกัดกร่อน และสังเคราะห์ได้ง่าย โดยมีโครงสร้างทั่วไปดังภาพที่ 1.1 ซึ่งมี 2 ส่วน คือ ส่วนรีดิวซ์ซิง (Reduced repeating units,  $1-y$ ) และส่วนออกซิไดซ์ซิง (Oxidized repeating units,  $y$ ) สามารถสังเคราะห์ได้โดยวิธีทางเคมี (Chemical method) หรือวิธีเคมีไฟฟ้า (Electrochemical method)



ภาพที่ 1.1 โครงสร้างทั่วไปของพอลิแอนิลีน [3]



พอลิไพร์โรลเป็นหนึ่งในพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีความสำคัญ พอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติหลายประการที่น่าสนใจในการป้องกันการกัดกร่อน โดยมอนอเมอร์ไพร์โรลมีโครงสร้างที่เป็นปัจจัยสำคัญในการยับยั้งการกัดกร่อน อีกทั้งการก่อตัวของพอลิไพร์โรลนั้นค่อนข้างนำไฟฟ้าได้ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการเคลือบด้วยวิธีการเคลือบทางไฟฟ้า (Electrodeposition) โดยทั่วไปแล้วพอลิไพร์โรลสามารถสังเคราะห์ได้จากวิธีทางเคมีและเคมีไฟฟ้า แต่การสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้าจะสามารถควบคุมความหนาและลักษณะของฟิล์มได้ โดยมีโครงสร้างทั่วไปดังภาพที่ 1.2



ภาพที่ 1.2 โครงสร้างทั่วไปของพอลิไพร์โรล [3]

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาวิธีทางเคมีไฟฟ้าในการเคลือบพอลิไพร์โรลและพอลิแอนิไลน์บนขั้วไฟฟ้าเหล็กกล้าไร้สนิม
2. หาภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบพอลิไพร์โรลและพอลิแอนิไลน์บนขั้วไฟฟ้าเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยพิจารณาสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อนและค่าความต้านทานเชิงสัมผัส

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยพอลิเมอร์นำไฟฟ้าสองชนิด คือ พอลิไพร์โรลและชั้นที่สองเป็นพอลิแอนิไลน์ ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยเปรียบเทียบการเคลือบชั้นเดียวและสองชั้น ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ชนิดของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ วิธีในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลงบนเหล็กกล้าไร้สนิม และนำมาทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนในภาวะสารละลายกรด และทดสอบความต้านทานที่ผิวสัมผัสฟิล์มที่เคลือบ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้าเหล็กกล้าไร้สนิมให้มีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนและความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี เพื่อที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเซลล์

## 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าบนเหล็กกล้าไร้สนิม
2. จัดเตรียมเครื่องมืออุปกรณ์การทดลองและสารเคมี
3. กลั่นมอนอเมอร์ฟิโรลและมอนอเมอร์แอนิลีน
4. เตรียมเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 โดยนำไปขัดด้วยกระดาษทราย และจุ่มกรดไนตริกและแอสซีโทน
5. สังเคราะห์พอลิเมอร์ลงบนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า
6. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการเตรียมการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลงบนเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมขั้วไฟฟ้า โดยทำการศึกษาตัวแปรดังต่อไปนี้
  - ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ฟิโรลและแอนิลีน โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1 โมลต่อลิตร ถึง 0.5 โมลต่อลิตร
  - ชนิดของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์
  - วิธีที่ใช้ในการเคลือบพอลิเมอร์ลงบนขั้วไฟฟ้าเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งได้แก่ ควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ควบคุมค่ากระแสคงที่ และ ควบคุมโดยเปลี่ยนแปลงค่าศักย์ไฟฟ้า
7. หาภาวะที่เหมาะสมโดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของมอนอเมอร์ ชนิดของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ และวิธีที่ใช้ในการเคลือบ
8. วิเคราะห์ฟิล์มโดยหาหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) และดูลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
9. ทดสอบการกัดกร่อนในสารละลายภาวะกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร โดยใช้วิธี Tafel slope analysis

10. ทดสอบสมบัติของฟิล์ม โดยการวัดค่าความต้านทานที่ผิวสัมผัสของฟิล์มบนเหล็กกล้าไร้สนิม
11. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับเคมีไฟฟ้า [4]

เคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยกระบวนการเคมีไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องกับการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่เรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน ซึ่งจะมีสารตัวหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอน เรียกสารตัวนี้ว่า ตัวรีดิวซ์ (Reducing agent) และอีกสารหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน เรียกสารนี้ว่า ตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing agent) โดยในการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้านี้ เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้หลักการวัดค่าความต่างศักย์ ประจุ หรือกระแสเพื่อวิเคราะห์ลักษณะการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อย่างไรก็ตามวิธีเคมีไฟฟ้าแต่ละประเภทมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันออกไป โดยมีหลักที่สำคัญที่ควรศึกษา 5 หลักด้วยกัน ได้แก่ 1. ค่าศักย์ไฟฟ้าจะเป็นตัวจำแนกรูปแบบของสารวิเคราะห์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้าได้ 2. ความเข้มข้นของสารวิเคราะห์ที่ผิวของขั้วไฟฟ้า อาจจะไม่เหมือนกับความเข้มข้นในสารละลาย 3. นอกเหนือจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน สารที่ทำการวิเคราะห์อาจเกิดปฏิกิริยาข้างเคียงร่วมด้วย 4. กระแสเป็นการวัดอัตราการเกิดปฏิกิริยาของสารที่ทำการวิเคราะห์ และ 5. ไม่สามารถควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าได้พร้อมกันในวิธีเดียว

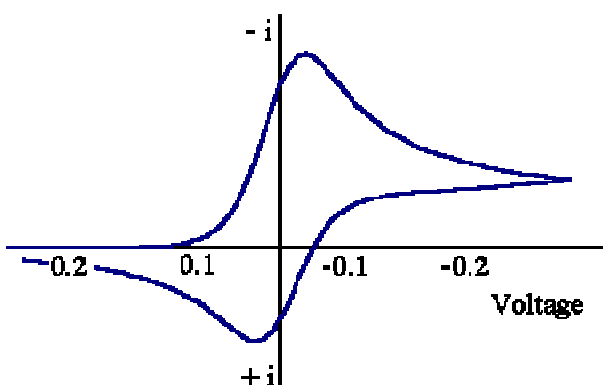
ในการควบคุมการวัดกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้า ทำโดยเครื่องมือวัดทางเคมีไฟฟ้าซึ่งสร้างมาจากเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้วขึ้นไปและแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการควบคุมและการวัดกระแสและศักย์ไฟฟ้า โดยองค์ประกอบพื้นฐานของเครื่องมือทางเคมีไฟฟ้าประกอบด้วย เซลล์เคมีไฟฟ้าอย่างง่ายใช้ขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ศักย์ของขั้วไฟฟ้าหนึ่งซึ่งไวต่อการวิเคราะห์ เรียกว่าขั้วไฟฟ้าใช้งานหรือขั้วไฟฟ้าบ่งชี้ (Working electrode) คือ ขั้วไฟฟ้าที่ใช้เคลือบ โดยการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในสารละลายอันเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่าง จะมีผลต่อค่าศักย์ของขั้วไฟฟ้าชนิดนี้ และขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) คือ ขั้วไฟฟ้าที่เป็นตัวช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วไฟฟ้าใช้งาน โดยไม่ต้องผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร ซึ่งทำให้วงจรไฟฟ้าสมบูรณ์ ในอุดมคติแล้วขั้วไฟฟ้าร่วมจะมีค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ทำให้สามารถระบุขั้วไฟฟ้าทำงานได้โดยการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดในขั้วไฟฟ้า แต่ถ้าหากขั้วไฟฟ้าร่วมไม่คงที่ จะแทนที่ด้วยขั้วไฟฟ้าอ้างอิงซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าคงที่ (Reference electrode) โดยศักย์ของ

ขั้วไฟฟ้านี้มีค่าเฉพาะที่ไม่แปรตามการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจร แต่เนื่องจากไม่สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าพร้อมกันได้ จึงทำให้มีการออกแบบการทดลอง 3 แบบด้วยกัน คือ วัดศักย์ไฟฟ้าเมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไป วัดศักย์ไฟฟ้าขณะที่กำลังควบคุมกระแสไฟฟ้า และสามารถวัดกระแสไฟฟ้าขณะที่กำลังควบคุมศักย์ไฟฟ้าโดยแต่ละการทดลองทั้งหมดนี้ออกแบบโดยอาศัยกฎของโอห์ม  $E = IR$  โดย  $I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่วิ่งผ่านวงจรไฟฟ้า  $R$  คือ ความต้านทานภายในวงจร และ  $E$  คือ ศักย์ไฟฟ้า

## 2.2 วิธีการสังเคราะห์สารด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า [5]

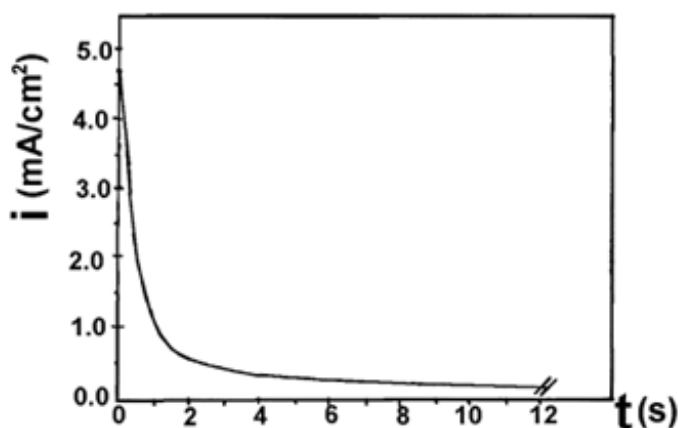
ปฏิกิริยาการสังเคราะห์สารด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าจะเกี่ยวข้องกับการที่สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาร่วมกับอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าจากภายนอก เมื่อสารดังกล่าวเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจะทำให้ได้ สารตัวกลาง (Intermediate) เช่น ไอออนประจุบวก ไอออนประจุลบ แรดิคัล และแรดิคัลที่มีประจุ ซึ่งจะสามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปเป็นสารผลิตภัณฑ์ โดยวิธีการสังเคราะห์นี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับกระบวนการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ เนื่องจากสามารถทำได้ง่ายและมีประสิทธิภาพในการควบคุมสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของการเคลือบ โดยการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้ามีด้วยกัน 3 วิธี ได้แก่

**2.2.1 ไซคลิกโวลแทมเมตรี** เป็นวิธีการตรวจวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปในช่วงที่ต้องการศึกษา ซึ่งจะแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า โดยจะทำการตรวจวัดค่าศักย์ไฟฟ้าไปในทางบวกจนเกิดค่ากระแสสูงสุดเนื่องจากเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของระบบ และเมื่อลดศักย์ไฟฟ้าไปในทางลบเดิมกระแสไฟฟ้าก็จะค่อย ๆ ลดลงจนถึงต่ำสุดเนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีดักชัน โดยลักษณะของไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่ได้จะมีลักษณะดังแสดงในภาพที่ 2.1 ซึ่งเป็นลักษณะของไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่สมมาตรกัน แต่ถ้าปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้จะไม่เกิดพีก และถ้าปฏิกิริยาผันกลับได้ไม่สมบูรณ์ ลักษณะพีกที่เกิดขึ้นจะไม่สมมาตรกัน โดยข้อดีเทคนิคนี้สามารถบอกได้ถึงกลไกการเกิดปฏิกิริยา บอกได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้อยู่ในรูปถูกออกซิไดซ์ (Oxidized) หรือถูกรีดิวซ์ (Reduced)



ภาพที่ 2.1 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม [6]

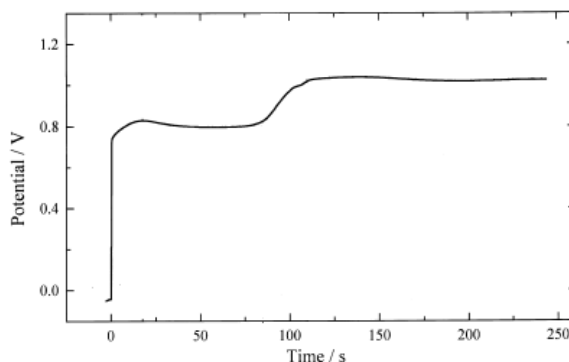
2.2.2 **ควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่** เป็นระบบที่ป้อนค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ให้กับขั้วไฟฟ้าใช้งาน แล้วทำการวัดกระแสไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา ดังแสดงในภาพที่ 2.2 โดยในระบบของการควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่จะประกอบด้วย 3 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าร่วม และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ข้อดีของการควบคุมค่าศักย์ไฟฟ้าให้คงที่ คือสามารถกำจัดไอออนที่ไม่ต้องการ และสามารถกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าให้ตรงกับศักย์ไฟฟ้าที่สารเกิดปฏิกิริยาได้โดยสามารถหาช่วงของค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมโมแกรม



ภาพที่ 2.2 โฟเทนซิโอสแตติกไดอะแกรม [7]

2.2.3 **ควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่** เป็นระบบที่ป้อนค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ระหว่างขั้วไฟฟ้าใช้งานและขั้วไฟฟ้าร่วม แล้วทำการวัดค่าศักย์ไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับเวลา ดังแสดงในภาพที่ 2.3 โดยในระบบประกอบไปด้วย 2 ขั้วไฟฟ้า คือ ขั้วไฟฟ้าทำงาน และขั้วไฟฟ้าร่วม ในระบบค่ากระแสไฟฟ้าคงที่นี้สามารถควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าได้โดยการคำนวณจาก

ประจวบที่วิ่งผ่านระหว่างการทำปฏิกิริยา แต่อย่างไรก็ตามค่าศักย์ไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้าทำงานอาจมีการเปลี่ยนแปลงไป จึงต้องใช้วิธีทางเคมีไฟฟ้าในรูปแบบอื่นเข้ามาช่วยในการวิเคราะห์



ภาพที่ 2.3 กัลวานอสแตติกไดอะแกรม [8]

### 2.3 อิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน [9, 10]

อิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน (Electropolymerization) เป็นปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์โมเลกุลขนาดใหญ่จากมอนอเมอร์หลายมอนอเมอร์รวมกันโดยอาศัยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ในขั้นแรกมอนอเมอร์จะเกิดกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสกลายเป็นพอลิเมอร์บนพื้นผิวที่เป็นตัวนำไฟฟ้า ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า อิเล็กโทรอินิทิเอตเตดพอลิเมอร์ไรเซชัน (Initiated Polymerization) จากนั้นมอนอเมอร์จะเกิดการเชื่อมขวาง (Cross-linking) ของมอนอเมอร์เกิดเป็นฟิล์มบางของพอลิเมอร์ที่ผิวของวัสดุต่างๆ โดยทั่วไปแล้วกระบวนการนี้จำเป็นต้องมีการควบคุมภาวะการเกิดปฏิกิริยาอย่างระมัดระวัง ในปัจจุบันได้มีการนำกระบวนการนี้มาใช้ในการเคลือบกันอย่างแพร่หลาย โดยข้อดีสำหรับกระบวนการอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันคือ ใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าในการสังเคราะห์ไม่สูงมาก และใช้มอนอเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งทำให้มีความสามารถในการละลายในตัวกลางได้ดี นอกจากนี้กระบวนการนี้ยังไม่ต้องใช้อุณหภูมิสูง และไม่ต้องใช้ภาวะรุนแรงในการดำเนินการ อีกทั้งการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยกระบวนการนี้เป็นการสังเคราะห์ในตัวกลางที่เป็นสารละลายที่ไม่มีส่วนประกอบของโลหะหนักผสมอยู่ จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้ต้นทุนสำหรับวัสดุที่ใช้ในการดำเนินการและในการกำจัดของเสียค่อนข้างต่ำ กระบวนการนี้เป็นการก่อตัวขึ้นของพอลิเมอร์และเป็นการเคลือบไปในเวลาเดียวกันและง่ายในการดำเนินการ เนื่องจากทำได้ทั้งที่ภาวะบรรยากาศและอุณหภูมิห้อง และใช้ค่ากระแสหรือความต่างศักย์ที่ป้อนต่ำ และยังสามารถควบคุมสมบัติของการเคลือบให้ออกมาได้ตามที่ต้องการโดยการควบคุมตัวแปร

ทางด้านกระบวนการเคมีไฟฟ้า โดยตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน ได้แก่

- **สารละลายอิเล็กโทรไลต์** เป็นตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพและโครงสร้างของพอลิเมอร์ โดยขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตัวเติมรวมถึงสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ (Supporting electrolyte) สารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์นอกจากมีหน้าที่ช่วยให้เกิดการนำไฟฟ้าในสารละลายแล้วยังทำหน้าที่เป็นสารตัวเติมของพอลิเมอร์ โดยไอออนของสารประกอบอิเล็กโทรไลต์จะเข้าไปอยู่ร่วมกับโมเลกุลของมอนอเมอร์ [11] สารตัวเติมแบ่งออกเป็นสารอินทรีย์และอนินทรีย์ โดยจะมีขนาดของไอออนต่างกัน ซึ่งขนาดของไอออนจะเป็นตัวกำหนดโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) และความเป็นรูพรุนของพอลิเมอร์และเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่เข้าไปในพอลิเมอร์ของสารตัวเติมระหว่างเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์

- **ความเข้มข้นของมอนอเมอร์** เนื่องจากมอนอเมอร์จะถูกออกซิไดซ์อย่างต่อเนื่องระหว่างการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันเพื่อเกิดเป็นพอลิเมอร์บนขั้วไฟฟ้า ทำให้ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่อยู่ในสารละลายลดลง และอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียง (Side reaction) รวมทั้งเกิดการเชื่อมขวาง หรือการเกิด Overoxidation ของพอลิเมอร์แทน

- **เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า** เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อลักษณะโครงสร้าง รูปร่างและการยึดติดของพอลิเมอร์ โดยการทำกระแสและค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่จะทำให้เกิดโครงสร้างโมเลกุลที่ซับซ้อน พอลิเมอร์มีความเป็นเนื้อเดียวกันต่ำเนื่องจากเกิดการปนเปื้อนของสารละลายระหว่างขั้วไฟฟ้าและฟิล์มพอลิเมอร์ แต่สามารถกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าหรือค่ากระแสที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาได้ ส่วนพอลิเมอร์ที่เตรียมได้จากเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี จะมีลักษณะเรียบเป็นเนื้อเดียวกันและเกาะติดดี

- **อุณหภูมิ** เป็นตัวแปรที่ส่งผลต่อจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ตลอดจนสมบัติเชิงกล สมบัติการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์และการนำไฟฟ้าของฟิล์มโดยเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นคุณสมบัติการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์จะลดลง ที่อุณหภูมิสูงจะเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง เช่น ตัวทำละลายและสาร Nucleophilic จะเป็นสารปนเปื้อนอยู่บนโมเลกุลพอลิเมอร์เรดิคัลส่งผลให้การนำไฟฟ้าของฟิล์มพอลิเมอร์ต่ำ อย่างไรก็ตามการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำทำให้ผิวของฟิล์มมีความขรุขระและการยึดเกาะไม่ดีมากกว่าที่อุณหภูมิสูง



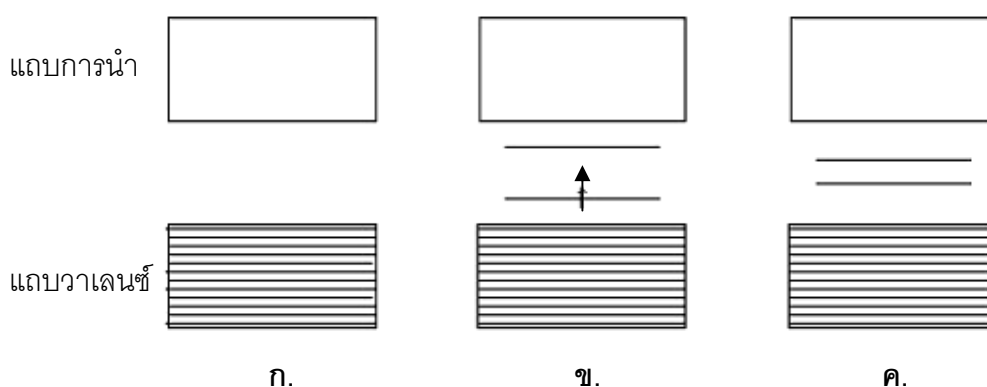
## 2.4 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า [12]

พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Conductive polymer) ได้ถูกทำการศึกษากันอย่างแพร่หลายในเรื่องเกี่ยวกับการนำไปใช้เป็นอุปกรณ์สะสมไฟฟ้า (Capacitor) เครื่องส่งสัญญาณ (Sensor) และป้องกันการกัดกร่อนของขั้วแอโนดสำหรับใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง โดยพอลิเมอร์ทั่วไปจะมีสภาพการนำกระแสไฟฟ้าน้อยมากหรืออาจเรียกได้เป็นฉนวนไฟฟ้าเนื่องจากโมเลกุลหรือหน่วยของอะตอมในพอลิเมอร์ไม่มีพาหะในการนำกระแสไฟฟ้าอยู่เลย แต่พอลิเมอร์บางชนิดพบว่ามีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้เรียกพอลิเมอร์ ชนิดนี้ว่า พอลิเมอร์นำไฟฟ้า เช่น พอลิอะเซทิลีน พอลิพาราฟินิลีน พอลิไพร์โรล และพอลิแอนิลีน ที่ถูกเจือด้วยสารเจือที่เหมาะสมดังในวัสดุข้างต้น

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ยังไม่ได้โด๊ป (Pristine sample) จะมีสภาพเป็นฉนวน กล่าวคือแถบนำ (Conductive band) และแถบวาเลนซ์ (Valence band) ของอิเล็กตรอนจะมีระดับพลังงานที่แตกต่างกันมาก และแถบวาเลนซ์จะมีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็ม ส่วนแถบนำจะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย เมื่อถูกโด๊ปในกระบวนการสังเคราะห์แบบเคมีไฟฟ้า อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังตัวโด๊ป ทำให้พอลิเมอร์เกิดประจุพาหะแบบพี (P-type) และตัวโด๊ปมีสภาพเป็นไอออนลบ หรืออาจเป็นการที่อิเล็กตรอนจากตัวโด๊ปเคลื่อนที่ไปอยู่แถบนำทำให้พอลิเมอร์มีประจุอิสระแบบเอ็น (N-type) และตัวโด๊ปมีสภาพเป็นไอออนบวกก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอะตอมที่ใช้โด๊ป

พอลิเมอร์บริสุทธิ์จะมีลักษณะโครงสร้างของแถบอิเล็กตรอนเป็นฉนวน ดังนั้นการเกิดอิเล็กตรอนอิสระและหลุมในพอลิเมอร์นำไฟฟ้าจะมาจากส่วนของอะตอมของสารเจือปนซึ่งทำให้เกิดแถบพลังงานใหม่ที่ซ้อนทับกันทั้งแถบวาเลนซ์และแถบการนำของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ทำให้ได้แถบพลังงานที่มีอิเล็กตรอนอยู่บางส่วน และทำให้อิเล็กตรอนอิสระหรือหลุมเป็นจำนวนมากที่อุณหภูมิห้อง การเรียงตัวของสายพอลิเมอร์ไม่ว่าจะเป็นเชิงกล หรือเชิงแม่เหล็กในช่วงการสังเคราะห์ มีผลให้เกิดเป็นวัสดุแอนไอโซทรอปี่ที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดตามทิศทางการเรียงตัว [13] โดยพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีระบบคอนจูชันอยู่ในโมเลกุล เมื่อได้รับการโด๊ปด้วยปฏิกิริยารีดักชันหรือออกซิเดชันแล้ว จะช่วยทำให้การนำไฟฟ้าสูงขึ้นได้ พอลิเมอร์ชนิดนี้แตกต่างจากพอลิเมอร์ที่มีการเติมโลหะหรือผงคาร์บอน เนื่องจากพอลิเมอร์ที่มีการเติมสารเหล่านี้จะนำไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่ออนุภาคของสารตัวเติมเหล่านี้มีการกระจายตัวในลักษณะที่เชื่อมต่อกันไปตลอดเท่านั้น กลไกการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้านั้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อพอลิเมอร์นำไฟฟ้าได้รับการกระตุ้นให้เกิดพาหะนำไฟฟ้า โดยการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากโครงสร้างโมเลกุล จะทำให้เกิดระดับพลังงานใหม่ขึ้นมาระหว่างระดับชั้นพลังงานสูงสุดที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่

(Highest occupied molecular orbital, HOMO) หรือเรียกว่าแถบวาเลนซ์ (Valence band) กับระดับชั้นพลังงานต่ำสุดที่ไม่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ (Lowest unoccupied molecular orbital, LUMO) หรือเรียกว่าแถบการนำ (Conduction band) เป็นผลทำให้โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงไปเกิดเป็นหลุม (Hole) หรือ แรดิคัลประจุบวก (Radical cation) ที่เรียกว่า โพลารอน คือเกิดจากบางส่วนของโมเลกุลที่เกิดการดีโลคัลไลเซชันได้เนื่องจากมีประจุและแรดิคัลอยู่ด้วยกัน บางครั้งถูกเรียกว่าแรดิคัลประจุบวก หรือแรดิคัลประจุลบ (Radical anion) ที่มีสปิน (Spin) เท่ากับครึ่งหนึ่ง และ โปโลารอน คือ บางส่วนของโมเลกุลที่ประกอบไปด้วยประจุ 2 ตำแหน่งอยู่ด้วยกันซึ่งไม่มีสปิน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทประจุในโมเลกุล โดยทั้งโพลารอนและโปโลารอนจะทำหน้าที่เป็นตัวพาประจุในโมเลกุล จึงเป็นตัวบอกระดับการโดดจากระดับการโดดเกิดขึ้นในปริมาณน้อยจะทำให้ได้โพลารอนสูง แต่หากเพิ่มระดับการโดดให้สูงขึ้นจะทำให้เกิดเป็น โปโลารอนขึ้น ซึ่งทั้งโพลารอนและโปโลารอนนี้จะเคลื่อนที่พาประจุไปตลอดความยาวของพอลิเมอร์ โดยที่โปโลารอนจะมีช่องว่างระหว่างแถบพลังงานที่แคบกว่า ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายกว่าโพลารอน [14] ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ก. แถบพลังงานของพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผ่านการโดด

ข. สถานะโพลารอนมีสปินเท่ากับ  $\frac{1}{2}$  (ระดับการโดดต่ำ)

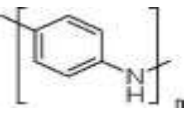
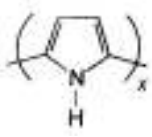
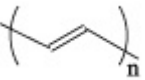

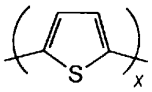
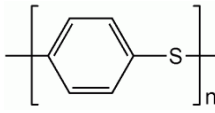
ค. สถานะโปโลารอนมีสปินเท่ากับ 0 (ระดับการโดดสูง) [14]

สำหรับกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าลงบนผิวของโลหะด้วยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันถือว่าเป็นข้อดีอย่างมาก เนื่องจากสามารถกำหนดปริมาณการเกิดปฏิกิริยาของมอนอเมอร์ได้ ทำให้ได้สมบัติทางกายภาพและทางเคมีได้ตามที่ต้องการ อาทิเช่น ความเสถียร การนำไฟฟ้า และโครงสร้างพื้นฐาน เป็นต้น โดยสมบัติของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับภาวะใน

กระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โพลีเมอร์โรเซชัน ซึ่งได้แก่ ค่าศักย์ไฟฟ้า ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า และ อุณหภูมิ องค์ประกอบของสารละลายอิเล็กทรอนิกส์โพลีโไลต์ เป็นต้น [15]

โพลีเมอร์นำไฟฟ้าเมื่อผ่านการโดปแล้วจะมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ดังตัวอย่างแสดงใน ตารางที่ 2.1 การโดปด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าเกิดจากขั้วไฟฟ้าจะส่งผ่านประจุไฟฟ้ารีดอกซ์ให้แก่โพลีเมอร์นำไฟฟ้า ขณะที่ไอออนจากสารละลายอิเล็กทรอนิกส์โพลีโไลต์จะแพร่เข้าหรือออกจากโครงสร้างของโพลีเมอร์แทนที่ประจุไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างและค่าการนำไฟฟ้าของโพลีเมอร์นำไฟฟ้าที่ผ่านการโดป [16]

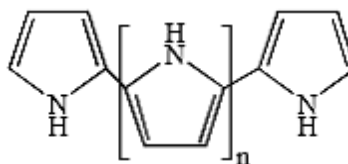
โพลีเมอร์	โครงสร้าง	วิธีการโดป (doping)	ค่าการนำไฟฟ้า (S/cm)
Polyaniline		เคมีไฟฟ้า เคมี (HCl, R-SO <sub>3</sub> H)	1-400
Polypyrrole		เคมีไฟฟ้า เคมี (FeCl <sub>3</sub> , BF <sub>3</sub> )	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>
Polyacetylene		เคมีไฟฟ้า เคมี (AsF <sub>5</sub> , I <sub>2</sub> , Li, K)	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>
Poly (p-phenylene)		เคมี (AsF <sub>5</sub> , I <sub>2</sub> , Li, K)	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>
Polythiophene		เคมีไฟฟ้า เคมี (FeCl <sub>3</sub> , BF <sub>3</sub> )	10-10 <sup>3</sup>
Poly (phenylenesulfide)		เคมี (AsF <sub>5</sub> )	100-500

### 2.4.1 พอลิไพร์โรล

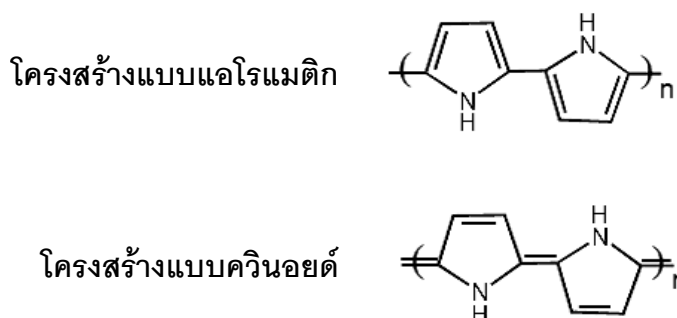
พอลิไพร์โรล (Polypyrrole) เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่ถูกค้นพบอย่างแพร่หลายตั้งตั้งแต่ปี ค.ศ.1916 เป็นต้นมา โดยเริ่มแรกนั้นได้ทำการสังเคราะห์ไพร์โรลมอนอเมอร์โดยวิธีทางเคมี แต่พอลิไพร์โรลที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ยากต่อการวิเคราะห์ ทำให้ได้มีการพัฒนาการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าโดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไพร์โรลมอนอเมอร์ การสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้ จะทำให้พอลิไพร์โรลที่ได้มีสมบัติในการนำไฟฟ้าสูง [17]

#### 2.4.1.1 โครงสร้างของพอลิไพร์โรล

พอลิไพร์โรลได้มีการศึกษาด้วยวิธีทางเคมีหลายรูปแบบ เพื่อที่จะทำความเข้าใจในเรื่องโครงสร้างทางเคมีและทางไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดนี้ แต่ด้วยโครงสร้างของพอลิไพร์โรลนั้นไม่สามารถละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ได้ ทำให้การวิเคราะห์เป็นไปได้ยาก นอกจากนี้โครงสร้างที่แท้จริงของพอลิไพร์โรลนั้นมีความซับซ้อนมากกว่าโครงสร้างในอุดมคติ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญมากในการหาข้อมูลโครงสร้างที่แน่นอน เพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างทางกายภาพอย่างเช่น สมบัติการนำไฟฟ้า สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อนและความเสถียรต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อที่จะพัฒนาและออกแบบพอลิไพร์โรลให้มีประสิทธิภาพสูงสุดต่อไป โครงสร้างในอุดมคติของพอลิไพร์โรลแสดงได้ดังภาพที่ 2.5 โดยทั่วไปจุดเด่นของพอลิไพร์โรลประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบวงแหวนแอโรแมติกและโครงสร้างแบบควินอยด์ดังแสดงในภาพที่ 2.6 โดยโครงสร้างแบบแอโรแมติกแสดงถึงโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ยังไม่ผ่านการโดปแล้ว



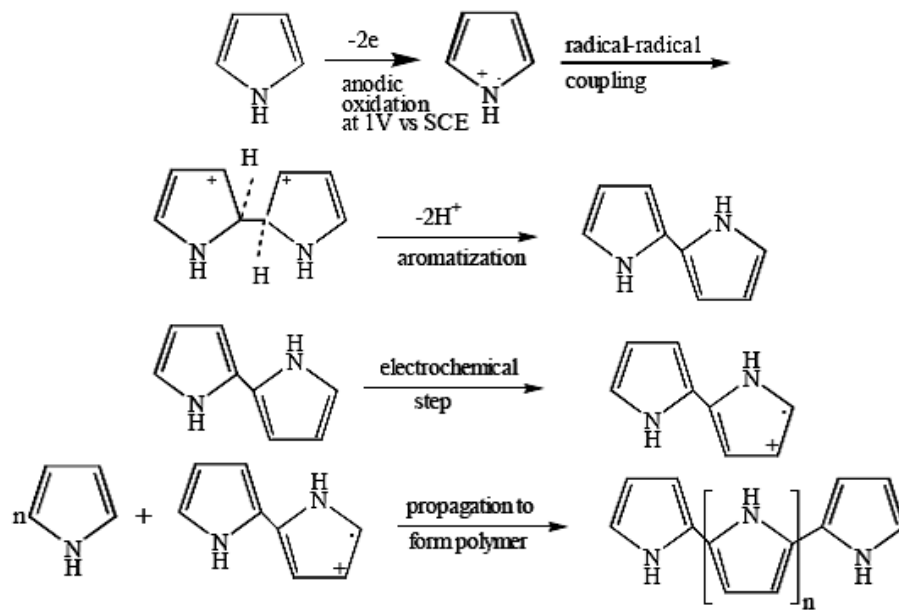
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างพอลิไพร์โรล [18]



ภาพที่ 2.6 โครงสร้างแบบแอโรแมติกและแบบควินอยด์ของพอลิไพร์โรล [18]

#### 2.4.1.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิไพร์โรล

ในขั้นตอนการสังเคราะห์จะเหมือนการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยทั่วไป คือ ทำการป้อนกระแสผ่านเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่มีสารละลายที่บรรจุมอนอเมอร์ไพร์โรลอยู่ จากนั้นมอนอเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกลายเป็นฟิล์มพอลิเมอร์บนผิวของขั้วไฟฟ้าทำงาน โดยกลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันนั้น ในขั้นแรกจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไพร์โรลมอนอเมอร์ เกิดเป็นแรดิคัลประจุบวก ซึ่งแรดิคัลนี้สามารถจับตัวกับแรดิคัลประจุบวกตัวอื่นต่อได้ โดยตำแหน่งที่ประจุบวกจับตัวกันนั้นคือ ตำแหน่งอัลฟา เป็นตำแหน่งที่มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสูงที่สุด จากนั้นจะมีการดึงโปรตอนออกกลายเป็นสารแอโรแมติก เมื่อแรดิคัลรวมตัวกันแล้วมอนอเมอร์จะกลายเป็นไดเมอร์ซึ่งง่ายต่อการเกิดออกซิเดชันมากขึ้น การเกิดออกซิเดชันหลายๆ ครั้งและการจับตัวกันของแรดิคัลนี้นำไปสู่สายโซ่พอลิเมอร์ที่ยาวขึ้นกลายเป็นพอลิเมอร์ โดยกลไกแสดงได้ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 กลไกการเกิดพอลิไพร์โรล [18]

#### 2.4.1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของพอลิไพร์โรล [19]

**ผลของโลหะ** พอลิไพร์โรลฟิล์มสามารถทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าบนขั้วของโลหะได้หลายชนิด เช่น คาร์บอน แพลทินัม ทอง ไทเทเนียม อะลูมิเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม และเงิน เป็นต้น โดยในการใช้แพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้า ค่าศักย์ไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไพร์โรลจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าจะลดลงเมื่อใช้ไทเทเนียม เหล็ก หรืออะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า เนื่องจากโลหะเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่ายกว่าไพร์โรลมอนอเมอร์ ทำให้เกิดการก่อตัวของออกไซด์ฟิล์มบนผิวของโลหะ ซึ่งจะต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

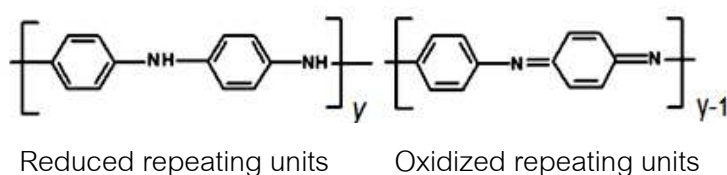
**ผลของสารตัวเติม** โมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ผ่านกระบวนการโดปแล้วจะมีประจุบวกหรือลบเกิดขึ้นบนสายโซ่หลัก และมีสารเจือปนที่มีประจุตรงกันข้าม (Counterion) กับโมเลกุลพอลิเมอร์ช่วยเพิ่มความเสถียรให้กับโครงสร้างของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์สามารถเปลี่ยนสภาพตัวเองเป็นสภาพที่สามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อผ่านการโดป และสามารถกลับไปสู่สภาพที่เป็นฉนวนได้เมื่อผ่านการ Dedoping โดยการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปคล้ายกับการชาร์ตแบตเตอรี่แบบชาร์ตไฟได้ โดยไอออนในสารละลายที่ใช้ในการสังเคราะห์จะส่งผลต่อสมบัติ

ของโครงสร้างพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วย สารเจือปนที่มีประจุตรงกันข้ามกับ โมเลกุลพอลิเมอร์ใช้เป็นสารละลายสนับสนุน (Supporting electrolyte) ใน กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าควรจะสามารถละลายได้ในสารละลายมอนอ เมอร์ ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารอื่นหรือขั้วไฟฟ้า มีความเสถียรที่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ มอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชัน

#### 2.4.2 พอลิแอนิไลน์ [20]

พอลิแอนิไลน์ (Polyaniline) ถูกค้นพบมากกว่าหนึ่งศตวรรษ โดยเรียกว่า “แอนิไลน์ แบล็ค” ได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี มีโครงสร้างแบบวงแหวนหกเหลี่ยม และมีสถานะของการ เกิดออกซิเดชันหลายรูปแบบ จนกระทั่ง Mac Diarmid และคณะ [10] ได้ค้นพบความสามารถใน การนำไฟฟ้าของพอลิแอนิไลน์ในรูปแบบของเกลือของเอมเมอร์รอลดีน โครงสร้างทั่วไปของพอลิ แอนิไลน์แสดงได้ดังภาพที่ 2.8 ซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ Reduced repeating units และ Oxidized repeating units โดยโครงสร้างของพอลิแอนิไลน์นี้แตกต่างจากโครงสร้างของพอลิ เมอร์นำไฟฟ้าตัวอื่น เช่น พอลิไพร์โรล และพอลิไทโอฟิน โดยพอลิแอนิไลน์นี้มีสถานะการเกิด ออกซิเดชัน 3 สถานะด้วยกัน คือ 1. รีดิวซ์แบบเต็มตัว จะมีค่า  $y = 1$  ตามสูตรโครงสร้าง เรียก รูปแบบนี้ว่า ลูโคเอมเมอร์รอลดีน (Leucoemeraldine) 2. ออกซิไดซ์แบบครึ่งหนึ่ง มีค่า  $y = 0.5$  เรียก เอมเมอร์รอลดีล (Emeraldine) 3. ออกซิไดซ์แบบเต็มตัว มีค่า  $y = 0$  เรียก เพอร์นิกรานิลีน (Pernigraniline) โดยโครงสร้างของพอลิแอนิไลน์ที่อยู่ในรูปแบบของเอมเมอร์รอลดีนให้ค่าการนำ ไฟฟ้าสูงสุด [10]

พอลิแอนิไลน์เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าประเภท  $\pi$ -conjugated linear polymers คือมี โมเลกุลสายยาวที่ภายในโครงสร้างประกอบด้วยพันธะเดี่ยวสลับพันธะคู่ทำให้อิเล็กตรอนสามารถ เคลื่อนที่ไปได้ตามออร์บิทัลที่เกิดการซ้อนเหลื่อมกัน ประกอบด้วย -NH- ต่อต้านข้างกับวงแหวน ของพินิไลน์ในสายโซ่ของพอลิเมอร์ โดยการเพิ่มโปรตอน การกำจัดโปรตอนออก และสมบัติทาง กายภาพและเคมีของพอลิแอนิไลน์ขึ้นอยู่กับหมู่ -NH- สามารถนำไฟฟ้าได้ ประมาณ 10 ซีเมนต์ต่อ ตารางเซนติเมตร [18] มีสมบัติเด่นคือ มีความเสถียรในสถานะต่าง ๆ มีความสามารถป้องกันการ กัดกร่อน และสังเคราะห์ง่าย [13]



ภาพที่ 2.8 โครงสร้างทั่วไปของพอลิแอนิไลน์ [21]

จากภาพที่ 2.8 สมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิแอนิไลน์จะขึ้นอยู่กับหน่วยของ Reduced repeating แทนด้วย  $y$  โดยจากสมบัติดังกล่าวสามารถแบ่งฟอร์มของพอลิแอนิไลน์ที่ไม่นำไฟฟ้าและนำไฟฟ้าได้แสดงดังตารางที่ 2.2 โดยพอลิแอนิไลน์ที่ไม่นำไฟฟ้าสามารถเปลี่ยนให้นำไฟฟ้าได้ในรูปของเกลือของเอมเมอร์รอลดีน ซึ่งมีสีเขียวและมีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 1-400 ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร [16] จากกระบวนการโดปแบ่งเป็น 2 วิธีโดยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation doping) กับสารออกซิแดนต์ เช่น  $FeCl_3$  หรือโดยทางเคมีไฟฟ้าของลูโคเอมเมอร์รอลดีนเบส (LEB) และการเกิดโปรโตเนชัน (Protonation doping) ของเอมเมอร์รอลดีนเบส (EB) จากการทำปฏิกิริยาของ EB กับกรดแก่ เช่น กรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริก เป็นต้น ซึ่งทั้ง 2 วิธีแสดงดังภาพที่ 2.9

ตารางที่ 2.2 รูปแบบที่แตกต่างกันของพอลิแอนิไลน์ [16]

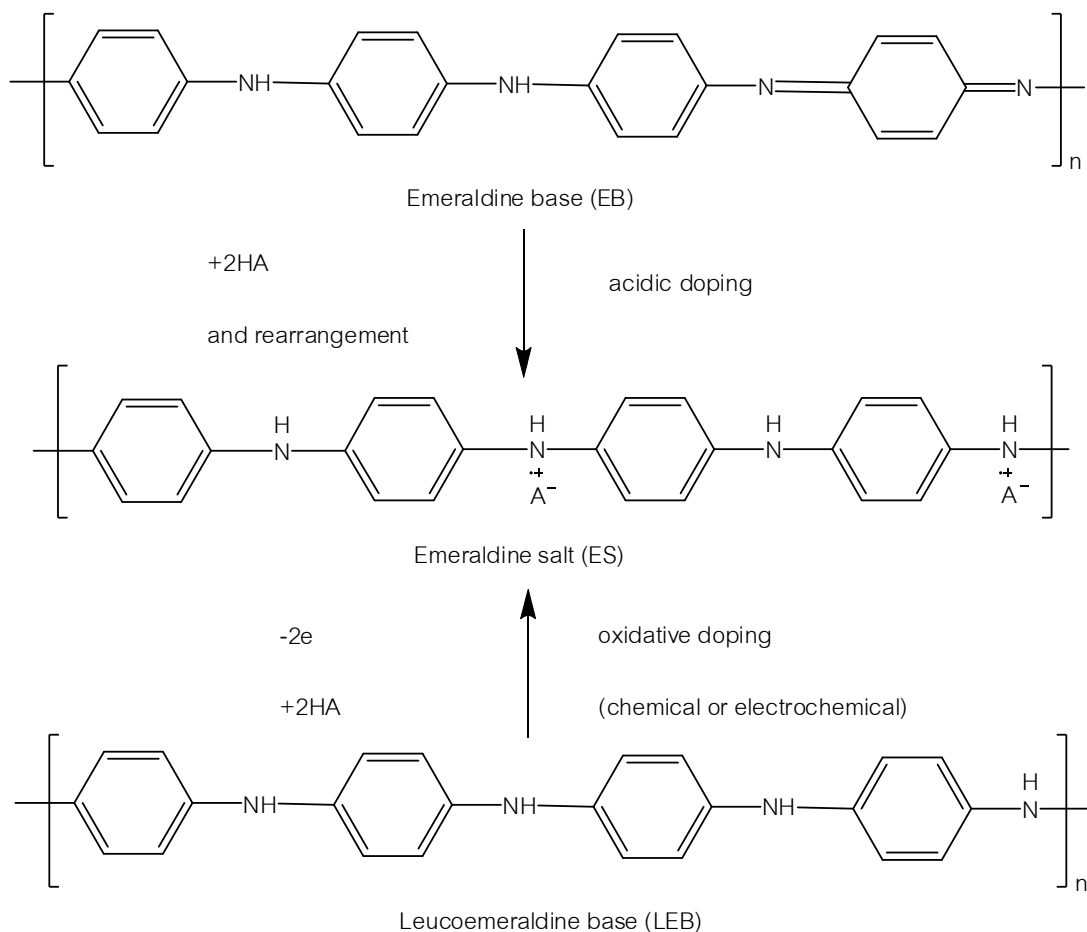
$y$	ชื่อ	สี	ค่าการนำไฟฟ้า ( $S\text{cm}^{-1}$ )
1 (รูปแบบทวิวาเลนต์)	ลูโคเอมเมอร์รอลดีนเบส (PANI-LEB)	เหลือง	$< 10^{-5}$
0.5	เอมเมอร์รอลดีนเบส (PANI-EB)	ฟ้า	$< 10^{-5}$
0 (รูปแบบถูกออกซิไดซ์)	เพอร์นิกรานอลีน (PANI-PNB)	ม่วง	$< 10^{-5}$
	เกลือของเอมเมอร์รอลดีน (PANI-ES)	เขียว	$\sim 1-400$

#### 2.4.2.1 การสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์

พอลิแอนิไลน์โดยส่วนใหญ่เป็นการสังเคราะห์ทางเคมี (Chemical polymerization) ซึ่งเป็นการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอนิไลน์กับสารออกซิแดนต์ เช่น แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulfate,  $(NH_4)_2S_2O_8$ ) โพแทสเซียมไดโครเมต (Potassium dichromate,  $K_2Cr_2O_7$ ) หรือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide,  $H_2O_2$ ) เป็นต้น โดยจะทำการพอลิเมอไรเซชันในภาวะกรดซึ่งในภาวะกรดทำให้เกิดการละลายของมอนอเมอร์ รวมทั้งเกิดการจัดรูปแบบนำ



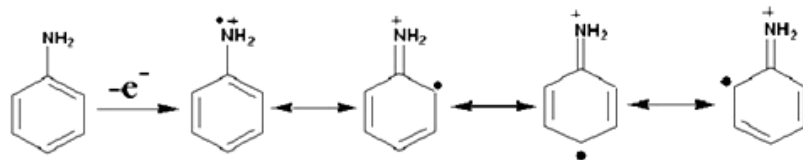
ไฟฟ้า (PANI-ES) หรือโดยทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical polymerization) โดยการสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์จะทำการสังเคราะห์บนขั้วไฟฟ้า เช่น แพลทินัมอัลลอยด์ อะลูมิเนียม และเหล็กกล้าไร้สนิม นอกจากนี้การสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์แบบอื่นๆ มีอีกหลายวิธี เช่น Photochemical initiated polymerization, Enzyme-catalyzed polymerization หรือ Polymerization employing electron acceptors [22] โดยวิธีการสังเคราะห์จะขึ้นอยู่กับลักษณะการนำไปใช้งาน เช่น ต้องการเตรียมแบบฟิล์มบาง ควรจะสังเคราะห์แบบเคมีไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมโดยจะทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์บนผิวของโลหะต่างๆ เพื่อป้องกันการกัดกร่อน



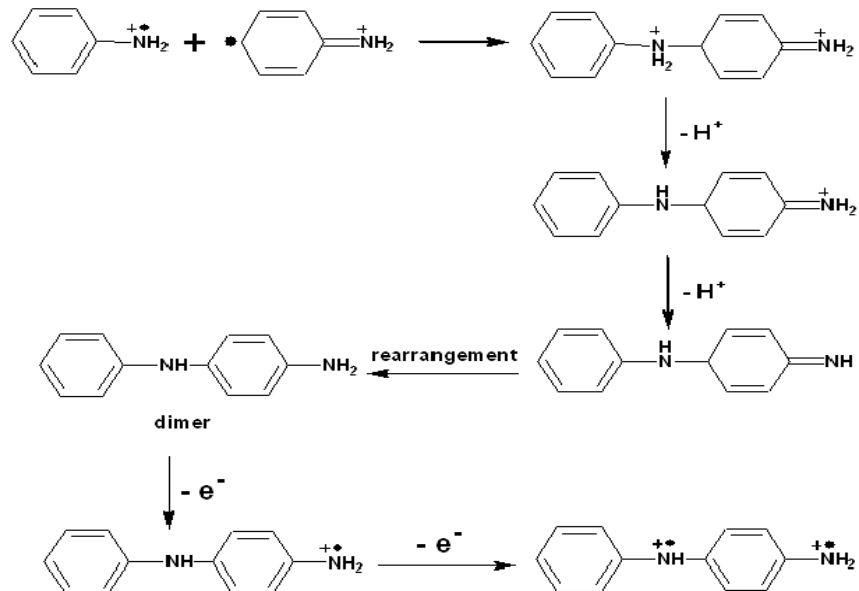
ภาพที่ 2.9 กลไกกระบวนการโด๊ปของพอลิแอนิไลน์ [22]

### 2.4.2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิแอนิลีน

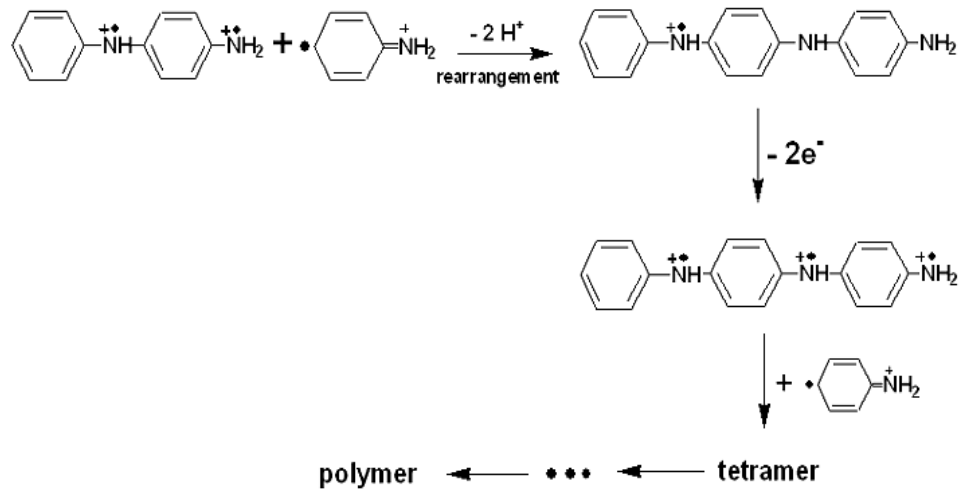
กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของการสังเคราะห์พอลิแอนิลีนทางเคมี และทางเคมีไฟฟ้า เกิดดังนี้ ขั้นที่ 1 เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอนิลีนมอนอเมอร์ได้เป็นเรดิคัลประจุบวกของมอนอเมอร์แอนิลีน และเกิดโครงสร้างเรโซแนนซ์หลายรูปแสดงดังภาพที่ 2.10 ขั้นที่ 2 เรดิคัลประจุบวกของมอนอเมอร์แอนิลีนเกิดการรวมตัวกัน (Coupling) ในตัวกลางภาวะกรด และมีการดึงโปรตอนออก (Deprotonation) ได้เป็นไดเมอร์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไดเมอร์ต่อไปแสดงดังภาพที่ 2.11 ขั้นสุดท้ายเป็นขั้นขยายสายโซ่โดยเรดิคัลประจุบวกของไดเมอร์จะรวมตัวกับเรดิคัลประจุบวกของแอนิลีนเกิดเป็นไตรเมอร์ เตตระเมอร์ และสายโซ่พอลิเมอร์ ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.10 ขั้นการเกิดเรดิคัลประจุบวกของแอนิลีน และโครงสร้างเรโซแนนซ์แบบต่างๆ [21]



ภาพที่ 2.11 ขั้นการรวมตัว และการดึงโปรตอนเกิดเป็นไดเมอร์ และเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของไดเมอร์ [21]



ภาพที่ 2.12 ชั้นขยายสายโซ่ได้เป็นพอลิเมอร์ [21]

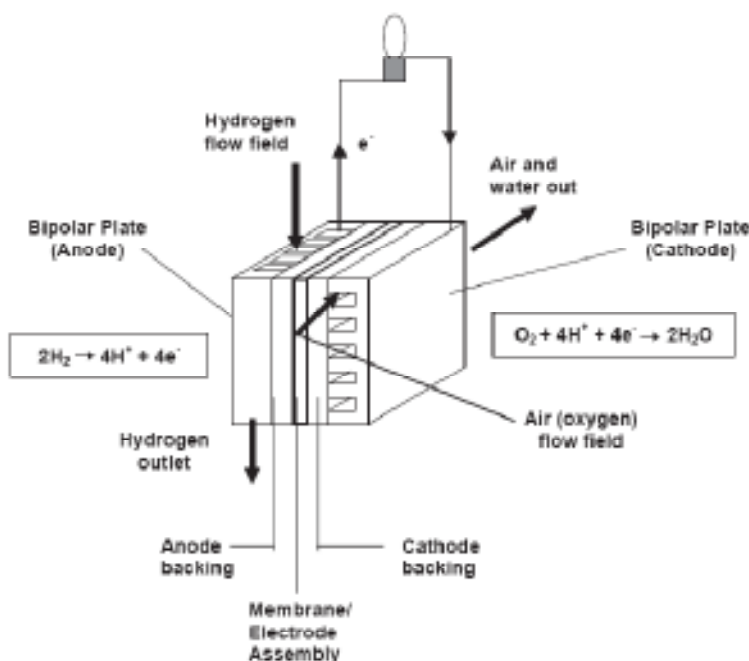
## 2.5 แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) [23]

แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (Bipolar plate) เป็นส่วนประกอบหลักที่อยู่ในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งทำหน้าที่นำกระแสไฟฟาระหว่างเซลล์ ระบายความร้อนและน้ำที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ เป็นทางเดินของสารตั้งต้นในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งได้แก่ แก๊สไฮโดรเจนและออกซิเจน ในการออกแบบเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟอสเฟต (PEMFC) แผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วได้ถูกคิดค้นและพัฒนา โดยใช้วัสดุที่มีคุณภาพและมีราคาที่เหมาะสม โดยวัสดุที่นิยมนำมาสร้างเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว คือ แกรไฟต์ เนื่องจากมีสมบัติที่โดดเด่นในด้านการนำไฟฟ้า และการทนทานการกัดกร่อนได้ดี แต่มีข้อเสีย คือ มีน้ำหนักสูง แก๊สสามารถซึมผ่านได้บ้าง และยากต่อการขึ้นรูปเนื่องจากแข็งและเปราะ อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายในการผลิตที่สูงเมื่อเทียบกับวัสดุที่เป็นโลหะอย่างเช่น อะลูมิเนียม เหล็กกล้า ไร้สนิม นิกเกิล ไททาเนียม เป็นต้น ทำให้ได้มีการทดลองนำโลหะมาใช้แทนวัสดุประเภทแกรไฟต์ โดยโลหะมีสมบัติทางเชิงกลที่สูง มีความทนต่อแรงสั่นสะเทือน ไม่มีการซึมผ่านของแก๊ส และมีค่าใช้จ่ายในการผลิตและดูแลรักษาที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทแกรไฟต์ อย่างไรก็ตามข้อเสียของโลหะคือ เกิดการกัดกร่อนในภาวะกรดภายในเซลล์เชื้อเพลิงได้ง่าย จึงมีการใช้วัสดุที่สามารถทนการกัดกร่อนได้ อย่างเช่น เหล็กกล้าไร้สนิม หรือหาวัสดุที่สามารถเคลือบผิวของโลหะเหล่านี้ได้เพื่อป้องกันการกัดกร่อน สมบัติสำคัญที่จำเป็นต่อแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วแบบโลหะคือ มีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนที่สูง และค่าความต้านทานที่ผิวสัมผัสต่ำเช่นเดียวกับแกรไฟต์ มีสมบัติเชิงกลสูง ความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สต่ำ และไม่แข็งเปราะเหมือน

แกรไฟต์ โลหะที่ได้รับความสนใจนำมาทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้ว ได้แก่ ไททาเนียม เหล็กกล้าไร้สนิม และอะลูมิเนียม ถึงแม้ว่าโลหะเหล่านี้สามารถเกิดการกัดกร่อนได้ แต่ด้วยคุณสมบัติของตัวโลหะสามารถสร้างชั้นของออกไซด์ฟิล์มบนผิวได้ จึงเป็นการป้องกันการกัดกร่อนได้ในระดับหนึ่ง แต่ส่งผลให้ความต้านทานไฟฟ้าของโลหะสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อให้เหมาะสมสำหรับใช้งานในเซลล์เชื้อเพลิง โลหะที่นำมาทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าสองขั้วจึงควรผ่านกระบวนการเคลือบโลหะ (Coating) ก่อน

### 2.5.1 ส่วนประกอบและสมบัติของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว [24]

ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเซลล์ประกอบด้วยขั้วด้านแอโนด ชั้นของเมมเบรน เยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้า (MEA) และ ขั้วด้านแคโทดที่อยู่ระหว่างแผ่นนำกระแสไฟฟ้า 2 แผ่น ที่ทำหน้าที่เหมือนเป็นขั้วด้านแอโนดและด้านแคโทด ดังแสดงในภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ส่วนประกอบภายในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟิวเซลล์ [24]

โดยหน้าที่ของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วประกอบไปด้วย

1. แจกจ่ายแก๊สเชื้อเพลิงและออกซิเจนภายในเซลล์
2. จัดการระบบน้ำเข้า-ออก ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์
3. ทำการแยกเซลล์ภายในชั้นเซลล์ (Stack) ออกจากกัน
4. ถ่ายเทกระแสภายในเซลล์
5. จัดการควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์

ดังนั้นวัสดุที่ใช้ทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วควรมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีต่างๆ เพื่อให้สอดคล้องกับการนำไปใช้งานดังตารางที่ 2.3

**ตารางที่ 2.3** สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของวัสดุที่ใช้ทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว [24]

หน้าที่การทำงาน	สมบัติทางกายภาพและทางเคมี
1. แจกจ่ายแก๊สเชื้อเพลิงและออกซิเจนภายในเซลล์	1. ป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส
2. ถ่ายเทกระแสภายในเซลล์	2. ป้องกันการกัดกร่อน
3. จัดการควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นภายในเซลล์	3. นำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี
4. ทำการแยกเซลล์ภายในชั้นเซลล์ออกจากกัน	4. ทนต่อแรงกดอัด

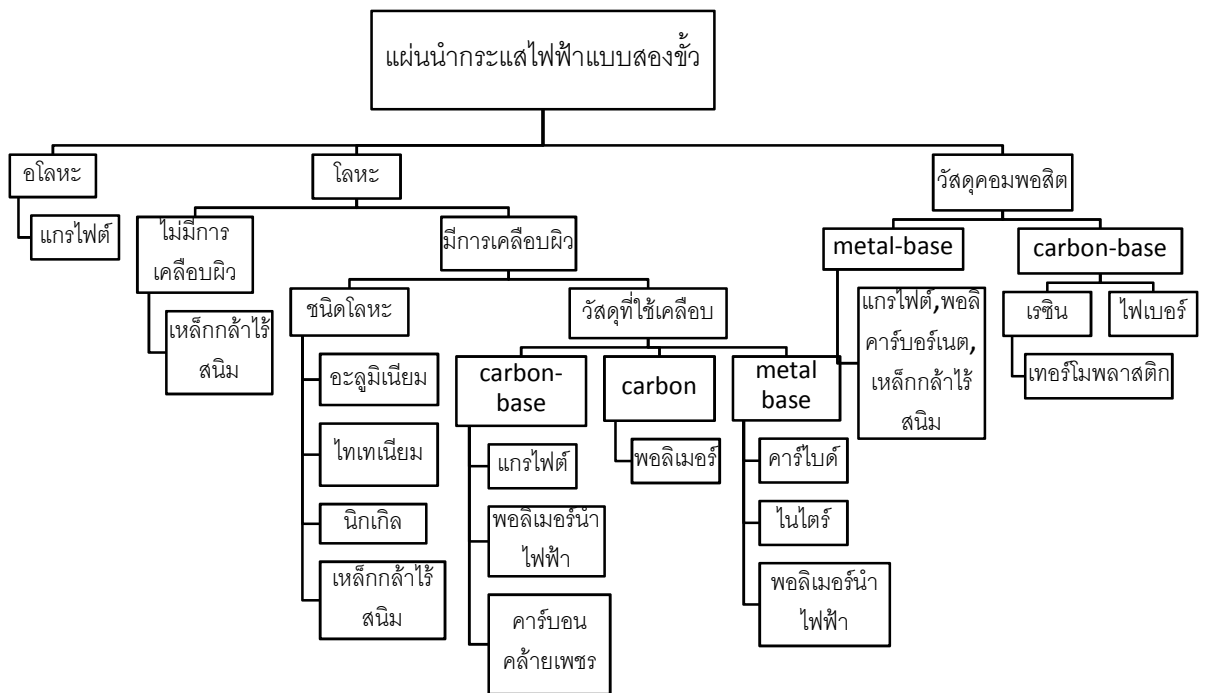
การเตรียมวัสดุเพื่อใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วนั้นจะอยู่บนพื้นฐานของความทนทานต่อสารเคมี ความทนทานต่อการกัดกร่อน ค่าการนำกระแสไฟฟ้าสูง การแพร่ผ่านของแก๊สหรือความสามารถในการให้แก๊สซึมผ่านมีค่าต่ำ และค่าการนำความร้อนที่ดี จึงมีค่ามาตรฐานของวัสดุที่จะใช้ทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วดังแสดงในตารางที่ 2.4

**ตารางที่ 2.4** สมบัติที่ต้องการของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดฟอสเฟต [25]

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

### 2.5.2 ประเภทของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว [26]

การจำแนกประเภทของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วนั้นจะทำการจำแนกตามวัสดุที่ใช้ แบ่งออกเป็น 3 ประเภทด้วยกัน ได้แก่ 1. วัสดุประเภทแกรไฟต์ โดยแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วชนิดนี้ทำมาจากของผสมแกรไฟต์ที่ประกอบด้วยแกรไฟต์ที่เป็นผลึก (Crystalline graphite) ที่มีสารเติมแต่ง (Additive) และตัวประสาน (Binder) มาขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) แล้วนำไปให้ความร้อน (Heat treatment) ในภาวะที่ปราศจากแก๊สออกซิเจน 2. วัสดุโลหะ การนำโลหะมาทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว เนื่องจากโลหะนำกระแสไฟฟ้าและความร้อนได้ดี แก๊สซึมผ่านเนื้อโลหะได้ยาก แต่เนื่องจากข้อจำกัดเรื่องการกัดกร่อนของโลหะจึงมีการเคลือบผิวเพื่อป้องกันการกัดกร่อนด้วย ตัวอย่างของโลหะที่ใช้ ได้แก่ เหล็กกล้าไร้สนิม นิกเกิล ไทเทเนียม อะลูมิเนียม และโลหะผสม 3. วัสดุคอมพอสิต คือวัสดุที่เกิดจากการนำเอาวัสดุตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มาผสมรวมกันเพื่อปรับปรุงสมบัติ สาเหตุที่ต้องมีการนำวัสดุมารวมกันนั้นก็เพราะสมบัติหรือข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกัน แต่เมื่อนำมารวมกันแล้วทำให้ได้วัสดุที่มีสมบัติที่ดีขึ้นเหมาะสมในการนำมาใช้งาน โดยการผสมนั้นจะต้องทำในสัดส่วนและวิธีการที่เหมาะสมกลายเป็นวัสดุคาร์บอนคอมพอสิตที่มีสมบัติต่างๆ ดีขึ้น ในการจำแนกประเภทและการเปรียบเทียบวัสดุที่ใช้ทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วนั้นแสดงได้ดังภาพที่ 2.14 และตารางที่ 2.5 ตามลำดับ



ภาพที่ 2.14 การจำแนกประเภทของวัสดุที่ใช้ทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วที่ใช้ในเซลล์เชื้อเพลิง [24]

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว [27]

วัสดุ	สภาพนำไฟฟ้า (S/cm)	ข้อดี	ข้อเสีย
แกรไฟต์ (คาร์บอน- คาร์บอน)	200-300	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีความเสถียร</li> <li>- ความหนาแน่นจำเพาะต่ำ</li> <li>- ความต้านทานสัมผัสกับขั้วไฟฟ้าต่ำ</li> <li>- ความต้านทานการกัดกร่อนสูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราคาแพง</li> <li>- เปราะ</li> <li>- มีความหนา</li> </ul>
คอมพอสิต	50-200	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความหนาแน่นต่ำ</li> <li>- อายุการใช้งานยาวนาน</li> <li>- มีสมบัติหลากหลาย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ใช้เครื่องมือในการผลิตที่ซับซ้อน</li> <li>- สมบัติแต่ละทิศทางไม่เท่ากัน</li> <li>- นำกลับมาใช้ใหม่ไม่ได้</li> </ul>
โลหะ	$\sim 5.5 \times 10^5$	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าการนำความร้อนสูง</li> <li>- สามารถรีไซเคิลได้</li> <li>- ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องการการเคลือบที่ทนการกัดกร่อนได้</li> <li>- เป็นพิษต่อเยื่อแลกเปลี่ยน</li> <li>- เกิดขนวนออกไซด์ที่พื้นผิว</li> </ul>

## 2.6 เหล็กกล้าไร้สนิม [28]

เหล็กที่พบเห็นมักเกิดสนิมได้ง่ายเพราะในบรรยากาศที่มีความชื้น โดยสนิมที่เกิดขึ้นจะหนาขึ้นเรื่อยๆ และเกิดขึ้นต่อไปอย่างไม่มีการหยุด การผสมธาตุโครเมียมปริมาณสูงๆ ในเหล็กจะช่วยทำให้เหล็กมีความต้านทานต่อการเกิดสนิมได้มากขึ้น จนกระทั่งไม่เกิดสนิมแม้อยู่ในน้ำ หรือสารละลายที่เป็นกรดเจือจาง เหล็กที่มีสมบัติดังกล่าวนี้ รู้จักกันดีในนามของ "เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) " ซึ่งถูกค้นพบโดยนักโลหะวิทยาชาวอังกฤษชื่อ Harry Brearley เมื่อปี พ.ศ.

2456 โดยลักษณะเด่นของเหล็กกล้าไร้สนิม คือ มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง ผิวเงางาม ทนความร้อนได้ดี ขึ้นรูปได้ดี และสามารถทำการเชื่อมได้ง่าย การเติมโครเมียมในเหล็กพบว่าต้องมีปริมาณโครเมียมมากกว่าร้อยละ 12 เนื่องจากในเหล็กทั่วๆ ไปจะมีคาร์บอนผสมอยู่ เมื่อผสมโครเมียมลงไป โครเมียมจะไปรวมตัวกับคาร์บอน ทำให้ปริมาณโครเมียมในเหล็กลดลงต่ำกว่าร้อยละ 12 ทำให้เหล็กไม่มีสมบัติต้านทานการเป็นสนิม โดยทั่วไปจะนิยมผสมโครเมียมร้อยละ 15-18 เพื่อให้ปริมาณโครเมียมสูงกว่าร้อยละ 12 โครเมียมเมื่อรวมกับออกซิเจนเกิดเป็นโครเมียมออกไซด์ มีลักษณะเป็นฟิล์มที่เกาะติดแน่นและมีความทึบ จนเป็นเสมือนเกราะป้องกันการทำปฏิกิริยาของโลหะกับบรรยากาศ การกัดกร่อนจึงหยุดลง แต่หากฟิล์มโครเมียมออกไซด์ที่เคลือบผิวถูกทำลายออกไปในภาวะที่สามารถเกิดสนิมได้ เช่น เกิดรอบขีดช่วงบริเวณผิวที่มีความชื้นอยู่ ทำให้ผิวเหล็กเกิดปฏิกิริยากับความชื้นและออกซิเจนกลายเป็นสนิมได้ นอกจากโครเมียมแล้ว ยังมีธาตุที่นิยมผสมลงไปในเหล็กเพื่อเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อน เพิ่มความแข็ง เพิ่มความเหนียว ธาตุเหล่านี้ ได้แก่ นิกเกิล โมลิบดีนัม ไทเทเนียม และทองแดง โดยการเติมธาตุนิกเกิลลงไปในเหล็กกล้าไร้สนิม จะทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมทนการกัดกร่อนได้ดีขึ้น แต่เนื่องจากนิกเกิลมีราคาแพง จึงทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมชนิดนี้มีราคาค่อนข้างสูง เหล็กกล้าไร้สนิมเกรดที่นิยม คือ เหล็กกล้า 18:8 ซึ่งเป็นเหล็กกล้าที่มีโครเมียมผสมอยู่ร้อยละ 18 และนิกเกิลร้อยละ 8 ใช้ทำเครื่องครัว ภาชนะบรรจุอาหาร รวบรวมน้ำ ประตุรั้วและอื่นๆ

### 2.6.1 ประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิม

การแบ่งแยกหรือจำแนกประเภทของเหล็กกล้าไร้สนิมนั้นสามารถทำได้ด้วยวิธีการเพิ่มหรือลดจำนวนของส่วนผสมที่เป็นธาตุแต่ละตัว ยกตัวอย่างเช่น การเพิ่มนิกเกิลจะช่วยทำให้โครงสร้างออสเทนไนท์ (Austenitic) ของเหล็กมีความมั่นคงยิ่งขึ้น จึงจัดว่าเหล็กกล้าไร้สนิม ประเภทที่มีจำนวนนิกเกิลสูงจะมีโอกาสของการไม่เกิดเป็นแม่เหล็กเจือปนสูงตามไปด้วย ในขณะที่การเพิ่มคาร์บอนจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงและความทนทาน อย่างไรก็ตามเราสามารถลดต้นทุนด้วยการเพิ่มแมงกานีสแทนนิกเกิล ซึ่งมีราคาสูงกว่าเพื่อให้ได้เหล็กกล้าไร้สนิมที่มีสมบัติดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นได้เช่นกัน

เหล็กกล้าไร้ สามารถจำแนกออกได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่

1. เหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติก (Ferritic grade) ที่มีสมบัติไม่เป็นแม่เหล็ก เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีธาตุโครเมียมเป็นส่วนผสมหลัก และมีคาร์บอนกับนิกเกิลในปริมาณต่ำ มีราคาถูกเมื่อเทียบกับประเภทที่สอง



2. เหล็กกล้าไร้สนิมออสเทนนิติก (Austenitic grade) ที่มีสมบัติไม่เป็นแม่เหล็ก ธาตุประกอบสำคัญของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ประกอบด้วย 3 ธาตุ คือ คาร์บอน โครเมียม และนิกเกิลหรือแมงกานีส จะมีสมบัติทนทานต่อการกัดกร่อนดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทแรก ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะนิยมใช้เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้ โดยมีการแบ่งเกรดดังนี้
  - เหล็กกล้าไร้สนิม 304  
เป็นเกรดที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีราคาถูกเมื่อเทียบกับคุณภาพ โดยมีโครเมียมร้อยละ 18 และนิกเกิลร้อยละ 8 เป็นส่วนผสมโดยประมาณ มีคุณสมบัติดังนี้ ความต้านทานต่อการกัดกร่อนดี สามารถขึ้นรูปเย็นและเชื่อมได้ดี ตัวอย่างการใช้งานคือเป็นอุปกรณ์ในกระบวนการเคมี ใช้งานในชีวิตประจำวัน และอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม เช่น เครื่องใช้ในบ้าน ภาชนะเครื่องครัว เครื่องหุงต้มความดัน แทงค์น้ำ อ่าง ช้อน ส้อม และงานตกแต่ง เป็นต้น
  - เหล็กกล้าไร้สนิม 316  
มีโครเมียมร้อยละ 16 ถึง 18 และนิกเกิลร้อยละ 11 ถึง 14 เป็นส่วนผสมโดยประมาณ และมีการเพิ่มโมลิบดีนัมเพื่อที่จะเพิ่มความต้านทานการกัดกร่อนในบรรยากาศแบบเจาะเป็นรู (Pit type attack) ให้กับเหล็ก ตัวอย่างการใช้งานเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 316 เช่น กระบวนการทางเคมีต่างๆ อุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ และการผลิตเครื่องดื่มและอาหาร ในกรณีที่อยู่ภายใต้ภาวะสิ่งแวดล้อมกัดกร่อนอย่างรุนแรง ควรมีปริมาณโมลิบดีนัมอย่างน้อยร้อยละ 2
3. เหล็กกล้าไร้สนิมมาร์เทนซิติก (Martensitic grade) เป็นประเภทที่มีส่วนผสมของธาตุโครเมียม โมลิบดีนัม และคาร์บอน แต่ไม่มีนิกเกิลเป็นส่วนผสม ดังนั้นเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้จึงไม่มีสมบัติความต้านทานการกัดกร่อน แต่จะมีสมบัติในส่วนของความแข็งแรงและทนทาน เนื่องจากมีคาร์บอนเป็นตัวที่ช่วยเพิ่มสมบัตินี้ อย่างไรก็ตามยังมีข้อเสีย คือยิ่งแข็งแรงมากขึ้น ก็สามารถเปราะและแตกหักได้ง่าย
4. เหล็กกล้าไร้สนิมดูเพล็กซ์ (Duplex grade) เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีโครงสร้างของเหล็กกล้าไร้สนิมประเภทแรกผสมกับประเภทที่สอง มีธาตุโครเมียมร้อยละ 19 – 28 และโมลิบดีนัมสูงกว่าร้อยละ 5 จะมีความต้านทานแรงดึงและค่าความยืดสูง จึงเรียกได้ว่ามีทั้งความแข็งแรงและความเหนียวสูง ใช้งานมากในที่ที่มีคลอไรด์สูง
5. เหล็กกล้าไร้สนิมอบชุบแข็งด้วยการตกผลึก (Precipitation-hardening grade) เหล็กกล้าไร้สนิมประเภทนี้มีสูตรผสมคือ โครเมียม และนิกเกิล มีสมบัติของการต้านทานการกัดกร่อน

และความแข็งแรงทนทานได้ดี เหล็กกล้ากลุ่มนี้สามารถทำการชุบแข็งได้ จึงเหมาะสำหรับ  
ทำแกน ปี่ม หัววาล์ว

## 2.6.2 ธาตุและการให้สมบัติของธาตุที่ผสมลงในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิม [29]

เหล็กกล้าไร้สนิมจะมีหลายเกรดซึ่งขึ้นอยู่กับกรรมวิธีผสมธาตุต่างๆ ลงไปในเนื้อเหล็กกล้าไร้  
สนิม ซึ่งสามารถปรับปรุงคุณสมบัติให้ตรงตามวัตถุประสงค์การใช้งานต่างๆ ได้ ซึ่งธาตุสำคัญที่ใช้  
ผสมมีดังนี้

### - โครเมียม

โครเมียมจะต้องผสมอยู่ในเนื้อของเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ต่ำกว่าร้อยละ 10.5 ซึ่งจะสามารถ  
สร้างฟิล์มโครเมียมออกไซด์ (Passive film) บนผิวโลหะได้ ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมมี  
ความต้านทานการกัดกร่อนไม่เกิดสนิมได้ง่ายในทุกๆ การใช้งาน

### - นิกเกิล

เมื่อเติมธาตุนิกเกิลในปริมาณที่มากพอเข้าไปในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมจะทำให้โครงสร้าง  
ผลึกของเหล็กกล้าไร้สนิมให้เปลี่ยนเป็นแบบออสเทนไนท์ ซึ่งถ้าปริมาณนิกเกิลไม่พอ จะ  
ทำให้โครงสร้างภายในเป็นโครงสร้างออสเทนไนต์อย่างสมบูรณ์ไม่ได้ แต่จะมีโครงสร้าง  
ภายในเป็นแบบดูเพล็กซ์

### - โมลิบดีนัม

ธาตุโมลิบดีนัมมีสมบัติในการปรับปรุงการสร้างฟิล์มป้องกันการกัดกร่อน (Passive film)  
ทำให้เกิดการป้องกันได้ดีขึ้น โดยเฉพาะการกัดกร่อนแบบสนิมขุม (Pitting corrosion)  
และทนต่อสภาพแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูง

### - คาร์บอน

ธาตุคาร์บอนทำให้เหล็กมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นและสามารถรวมตัวกับธาตุอื่นเกิดเป็นคาร์  
ไบด์ ซึ่งช่วยเพิ่มสมบัติการต้านทานการสึกหรอ โดยปกติแล้วเหล็กกล้าไร้สนิมควรมี  
ธาตุคาร์บอนผสมอยู่ไม่เกินร้อยละ 0.08 โดยน้ำหนัก เนื่องจากองค์ประกอบของ  
คาร์บอนสูงจะลดความยืดหยุ่น

### - ไทเทเนียม

เป็นธาตุที่ผสมในเนื้อเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อลดการกัดกร่อนตามขอบเกรนที่เกิดจากการ  
เชื่อมที่สามารถป้องกันการกัดกร่อนชนิดนี้ได้เนื่องจากคาร์บอนจะมารวมตัวเป็น

ไทเทเนียมเกิดเป็นไทเทเนียมคาร์ไบด์ นอกจากไทเทเนียมแล้ว ยังมีธาตุอื่นๆ เช่น ไนโอเบียม แทนทาลัม ซึ่งจะใช้ในลวดเชื่อม เป็นส่วนใหญ่เพื่อทดแทนไทเทเนียม

## 2.7 การกัดกร่อน [30]

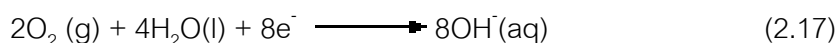
การกัดกร่อน (Corrosion) คือ การเสื่อมสภาพของโลหะที่ทำให้สมบัติของโลหะ เปลี่ยนไปในทางแย่งลงโดยโลหะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบของโลหะหรือที่เรียกว่าสนิม ดังภาพที่ 2.15 ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ของการกัดกร่อนเป็นเหตุให้โลหะเกิดความเสียหาย จึงมีการค้นคว้าวิจัยเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่ได้ให้มีความต้านทานการกัดกร่อนสูง สามารถใช้ได้แม้ในสิ่งแวดล้อมที่มีฤทธิ์กัดกร่อน

เมื่อโลหะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือถูกออกซิไดซ์ จะมีการกร่อนของโลหะนั้น ๆ เกิดขึ้น ดังนั้นหลักของการป้องกันการกร่อนก็คือ การป้องกันไม่ให้โลหะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนั่นเอง โลหะที่มีค่า  $E^\circ$  ครึ่งเซลล์รีดักชันสูงสุด ได้แก่ ทองคำจะสามารถทนต่อการกร่อนได้มากที่สุด ทองคำจึงเป็นโลหะมีค่า แพลทินัม เงิน และทองแดงที่มีค่า  $E^\circ$  ครึ่งเซลล์รีดักชันเป็นบวกก็มีความสามารถทนต่อการกร่อนได้ดีรองลงมา ส่วนโลหะอื่น ๆ ก็จะเป็นโลหะที่ถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย นั่นคือมีโอกาสกร่อนได้ง่ายกว่า ตัวอย่างการกร่อนที่พบบ่อยและชัดเจนคือการเกิดสนิมเหล็กหรือการเกิดออกไซด์ของเหล็ก เหล็กเป็นสนิมได้ก็ต่อเมื่อมีแก๊สออกซิเจนและน้ำอยู่ด้วย ปฏิกิริยาการเกิดสนิมเหล็กค่อนข้างซับซ้อนและมีลักษณะเฉพาะตัว แต่เชื่อว่ามีขั้นตอนที่สำคัญคือ

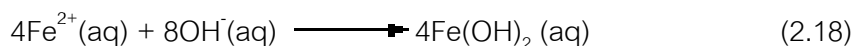
ปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวส่วนหนึ่งของเหล็กทำหน้าที่เป็นแอโนด ดังสมการ



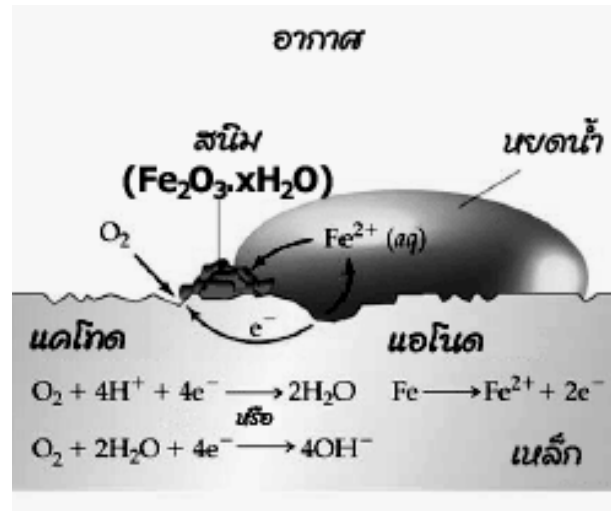
ออกซิเจนถูกรีดิวซ์ที่ผิวอีกส่วนหนึ่งของเหล็กซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทด เมื่อมีน้ำอยู่ด้วย ดังสมการ



และมีปฏิกิริยาต่อเนื่องต่อไปคือ

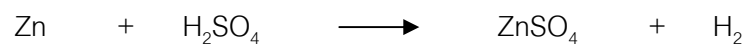


$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  คือสนิมเหล็ก



ภาพที่ 2.15 การเกิดสนิมบนผิวเหล็ก [31]

โลหะส่วนใหญ่จะเกิดการผุกร่อนได้ง่าย เมื่อ โลหะสัมผัสกับสารที่มีสมบัติเป็นกรด



### 2.7.1 ชนิดการผุกร่อน [32]

ชนิดของการผุกร่อนสามารถที่จะแบ่งออกได้โดยอาศัยรูปที่มองเห็นของโลหะที่ผุกร่อน โดยที่การผุกร่อนหลาย ๆ ชนิด สามารถที่จะชี้เฉพาะได้ดังนี้

2.7.1.1 การกัดกร่อนแบบสม่ำเสมอ (Uniform or general attack corrosion) เป็นแบบธรรมดาที่สุด การผุกร่อนมีทั่วไปตลอดผิวที่ติดกับอิเล็กโทรไลต์ โลหะจะบางลงจนกระทั่งใช้งานไม่ได้

2.7.1.2 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic or two – metal corrosion) การผุกร่อนแบบนี้ต้องมีโลหะ 2 ชนิดประกบกันเป็นเซลล์ไฟฟ้า โดยโลหะที่เป็นแอโนดจะผุกร่อนดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การผุกร่อนอาจจะเกิดเฉพาะจุดหรือมีอาณาเขตกว้างขวางก็ได้

2.7.1.3 การกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion) เป็นการกัดกร่อนเฉพาะที่ (Localized attack) รูปแบบหนึ่ง การกัดกร่อนแบบนี้ทำให้เกิดความเสียหายได้แม้สูญเสียน้ำหนักโลหะเพียงเล็กน้อยแต่เป็นอันตรายเพราะมักเป็นการเสียหายแบบฉับพลัน โดยจะทะลุเป็นรูและยากที่จะตรวจหา เพราะขนาดเล็กและอาจถูกปกคลุมด้วยผลิตภัณฑ์จากการกัดกร่อน (Corrosion product) การกัดกร่อนแบบเป็นหลุมมักเกิดกับโลหะที่ผิวเป็นออกไซด์ฟิล์ม ซึ่งจะทำให้มีแรงขับ (Driving force) ที่จะทำให้เกิดกระแสการกัดกร่อนไหลไปในหลุมสูง การกัดกร่อนแบบหลุมจะพบบ่อยในสารละลายที่มีคลอไรด์เป็นองค์ประกอบ เช่น น้ำทะเล

2.7.1.4 การกัดกร่อนบริเวณขอบเกรน (Intergranular and knife-line attack) การผุกร่อนแบบนี้มักเกิดกับเหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 18-8 (คือ โครเมียมร้อยละ 18 นิกเกิลร้อยละ 8) ที่ได้รับการอบชุบเหล็กกล้า (heat treatment) มาไม่ถูกต้อง ทำให้ปริมาณของโลหะโครเมียมจะมีน้อยกว่าปกติ โดยที่เหล็กชนิดนี้อาศัยโครเมียมเป็นตัวป้องกันการผุกร่อน (เพราะเกิดเป็นโครเมียมออกไซด์ป้องกันผิว)

2.7.1.5 การกัดกร่อนบริเวณซอก (Crevice corrosion) เป็นรูปแบบของการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าที่สามารถเกิดขึ้นได้ในรอยแยก รอยร้าว และภายใต้เกราะป้องกันผิวที่ซึ่งมีสารละลาย (นิ่ง) อยู่

2.7.1.6 การกัดเซาะ (Erosion corrosion) มักจะมีให้เห็นได้มากในเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่ต้องใช้กับน้ำหรือในของเหลวที่มีความเร็วสูง เช่น ใบพัดของเครื่องสูบน้ำ ข้อเสี้ยวของท่อ ฯลฯ การผุกร่อนเป็นไปด้วยเหตุ 2 อย่างร่วมกัน คือการกัดกร่อนทางเคมีไฟฟ้าแบบธรรมดา และจากแรงกระแทกของน้ำหรือผงอื่น ๆ ที่มากับน้ำ

2.7.1.7 การแตกร้าวจากแรงเค้นและการกัดกร่อน (Stress corrosion) การผุกร่อนแบบนี้เป็นผลของการกัดกร่อนรวมกับความเค้นในเนื้อโลหะ โดยมักเริ่มเกิดจากการกัดกร่อนที่จุดใดจุดหนึ่งบนผิวโลหะแบบหลุม ซึ่งจะเป็นจุดเริ่มต้นของการกัดกร่อนประเภทนี้ โดยที่ก้นของหลุมจะมีความเค้นเพิ่มขึ้นมาก จนทำให้โลหะแยกออกจากกันได้

## 2.7.2 การป้องกันการเกิดการกัดกร่อน

การยับยั้งการกัดกร่อนสามารถทำได้หลายวิธี ทั้งโดยการออกแบบอุปกรณ์ไม่ให้เชื่อมต่อการกัดกร่อนบางประเภท เช่น หลีกเลี่ยงการเชื่อมต่อโลหะต่างชนิดเข้าด้วยกันอันจะนำไปสู่การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic corrosion) หรือการลดปริมาณคลอไรด์ไอออนเพื่อป้องกันการกัดกร่อนแบบหลุม (Pitting corrosion) หรือการเติมสารเคมีบางชนิดเข้าไปในระบบเพื่อยับยั้งปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือแม้แต่การยับยั้งปฏิกิริยารีดักชัน ก็สามารถให้ผลในการลดการกัดกร่อนได้ เพราะการกัดกร่อนในเชิงเคมีไฟฟ้านั้นเป็นปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยการป้องกันการเกิดการกัดกร่อนมีหลายวิธี ดังนี้

### 2.7.2.1 การเลือกโลหะใช้งาน

เป็นการเลือกชนิดของโลหะหรืออัลลอยด์ที่เหมาะสมกับประเภทของงาน ซึ่งถือว่าเป็นวิธีที่ดีที่สุดในการป้องกัน

### 2.7.2.2 การเปลี่ยนภาวะแวดล้อม

การเปลี่ยนภาวะแวดล้อมให้มีการกัดกร่อนลดลง สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงสารตัวกลาง ได้แก่ ลดอุณหภูมิ การลดความเร็ว การกำจัดออกซิเจนหรือตัวออกซิไดซ์และการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น หรือ การใช้สารยับยั้ง

### 2.7.2.3 การป้องกันแบบทำให้โลหะใช้งานเป็นขั้วแคโทด

เป็นการทำให้วัสดุที่ใช้งานทุกส่วน มีหน้าที่เสมือนขั้วแคโทดในเซลล์ไฟฟ้าเคมีโดยเกิดการไหลกลับของอิเล็กตรอน และใส่กระแสไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปในโครงสร้าง

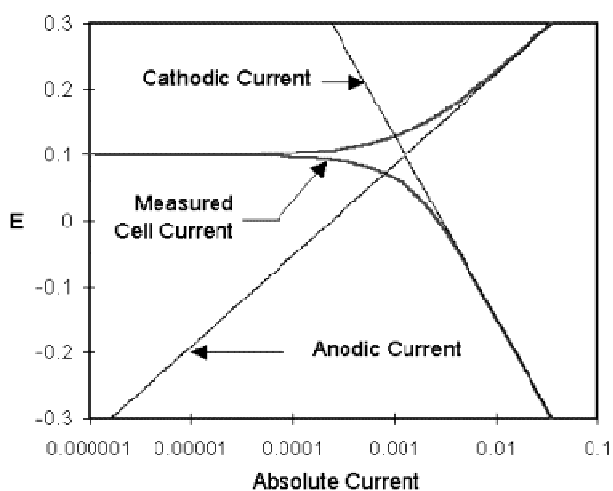
### 2.7.2.4 การป้องกันโดยการเคลือบ แบ่งออกเป็น

- 1) การเคลือบด้วยสารอินทรีย์ เช่น การทาสี การเคลือบผิว
- 2) การเคลือบด้วยโลหะ เช่น การชุบโลหะ
- 3) วิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์โรเซชันเป็นวิธีหนึ่งในเรื่องการป้องกันการเกิดการกัดกร่อนบนพื้นผิว โดยมีวัสดุที่เคลือบเป็นพอลิเมอร์ ทั้งนี้เนื่องจากความสะดวกในการเคลือบ ราคาถูก และมีความทนทานเหมาะสมต่อการใช้งาน

### 2.7.3 การกัดกร่อนทางเซลล์เคมีไฟฟ้า [33]

โลหะโดยส่วนใหญ่เกิดการกัดกร่อนผ่านทางปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าระหว่างผิวหน้าของโลหะกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งอัตราการกัดกร่อนจะถูกกำหนดโดยสมดุลระหว่างปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่ตรงข้ามกัน ปฏิกิริยาแรกคือปฏิกิริยาแอโนดิก โลหะจะถูกออกซิไดซ์และปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกมา ปฏิกิริยาอีกอันหนึ่งคือ ปฏิกิริยาแคโทดิก ซึ่งไอออนในสารละลาย (มักจะเป็น  $O_2$  หรือ  $H_2$ ) จะถูกรีดิวซ์และได้รับอิเล็กตรอนจากโลหะ เมื่อสองปฏิกิริยานี้อยู่ในสมดุลกันอัตราการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแต่ละปฏิกิริยาจะเท่ากัน และจะไม่มี การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสุทธิเกิดขึ้น ทั้งสองปฏิกิริยาสามารถเกิดขึ้นในโลหะเดียวกันหรือเกิดขึ้นในโลหะสองชนิดที่แตกต่างกัน ซึ่งมีการเชื่อมกันทางไฟฟ้า

ภาพที่ 2.16 เป็นแผนภาพของกระบวนการเกิดการกัดกร่อน แกนตั้งแสดงค่าศักย์ไฟฟ้าและแกนนอนแสดงค่าลอการิทึมสัมบูรณ์ของกระแสไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้าทางทฤษฎีของปฏิกิริยาแอโนดิก และปฏิกิริยาแคโทดิกจะแสดงเป็นเส้นตรง โดยเส้นโค้งจะเป็นค่ากระแสผลรวมของกระแสจากปฏิกิริยาแอโนดิกและแคโทดิกทั้งหมด ค่ากระแสไฟฟ้านี้จะถูกวัดเมื่อมีการป้อนค่าศักย์ไฟฟ้าเข้าไปที่จุดแหลมของเส้นโค้ง ซึ่งเป็นจุดที่กระแสได้แสดงสัญญาณว่ามีการเปลี่ยนปฏิกิริยาจากแอโนดิกเป็นแคโทดิก จุดแหลมนี้เกิดจากการใช้แกนลอการิทึมซึ่งมีความจำเป็นมากเนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าที่ต้องการแสดงในกราฟมีช่วงกว้างมาก และเนื่องจากเกิดปรากฏการณ์สร้างฟิล์มป้องกัน (Passivity) หรือภาวะที่โลหะและโลหะผสมมีแนวโน้มในการเกิดปฏิกิริยาต่ำ



ภาพที่ 2.16 การเกิดการกัดกร่อนแสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบของกระแสแอโนดิกและแคโทดิก [33]

จากภาพที่ 2.16 ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนของโลหะคือ ค่าเฉลี่ยระหว่างปฏิกิริยาแอนโอดิก และแคโทดิกที่สมดุล จะสังเกตได้ว่าค่ากระแสไฟฟ้าของแต่ละครึ่งปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับศักย์ทางเคมีไฟฟ้าของโลหะ สมมติว่าในปฏิกิริยาแอนโอดิก โลหะที่ให้อิเล็กตรอนออกมามากเกินไปจะทำให้ระดับศักย์ไฟฟ้าเคมีของโลหะมีความเป็นลบมากขึ้น ซึ่งจะชะลอการเกิดปฏิกิริยาแอนโอดิกและจะเร่งการเกิดปฏิกิริยาแคโทดิก

โดยศักย์ไฟฟ้าสมดุลที่เกิดจากทั้งปฏิกิริยาแอนโอดิกและแคโทดิกที่ค่า  $E_{\text{corr}}$  จะเรียกว่า ค่ากระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (Corrosion current,  $I_{\text{corr}}$ ) ซึ่งถ้าสามารถวัดค่า  $I_{\text{corr}}$  ได้จะสามารถใช้ค่านี้ในการคำนวณการกัดกร่อนได้ แต่ถ้าไม่สามารถวัดค่า  $I_{\text{corr}}$  ได้โดยตรงก็สามารถหาค่านี้ได้จากเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า โดยในระบบของการกัดกร่อนใดๆ ค่า  $I_{\text{corr}}$  และอัตราการกัดกร่อนจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรในระบบหลายตัวเช่น ชนิดของโลหะ สมบัติทางกายภาพของโลหะ องค์ประกอบของสารละลาย อุณหภูมิ และการเคลื่อนที่ของสารละลาย

โลหะหลายชนิดเมื่อเกิดการกัดกร่อนจะมีการก่อตัวของออกไซด์ขึ้นบนพื้นผิวขณะที่ถูกกัดกร่อน ถ้าพื้นผิวออกไซด์สามารถยับยั้งการเกิดการกัดกร่อนต่อไปได้พื้นผิวนั้นจะถูกเรียกว่า พิล์มป้องกัน ในบางกรณีพื้นผิวของฟิล์มป้องกันอาจแตกออกแล้วทำให้เกิดการกัดกร่อนในพื้นที่เล็กๆ นั้นซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การกัดกร่อนแบบหลุม

ในการศึกษาการกัดกร่อนด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โลหะตัวอย่างจะถูกจุ่มลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และมีการจุ่มขั้วไฟฟ้าเพิ่มเข้าไปในสารละลาย ขั้วไฟฟ้าทั้งหมดจะถูกต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่เรียกว่าโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) เครื่องโพเทนชิโอสแตทจะสามารถเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าให้กับโลหะ และทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลออกมาให้เป็นฟังก์ชันกับค่าศักย์ไฟฟ้าได้ โดยจะทำการควบคุมสมดุลของกระบวนการเกิดการกัดกร่อน ทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของโลหะตัวอย่างที่จุ่มลงในสารละลายถูกบังคับให้มีค่าออกห่างค่า  $E_{\text{oc}}$  หรือเรียกอีกอย่างว่าการทำโพลารไรซ์โลหะ และการตอบสนองของโลหะตัวอย่าง (การเปลี่ยนแปลงของค่ากระแส) ที่วัดได้จะหมายถึง โลหะนั้นถูกโพลารไรซ์

ถ้าใช้เครื่องโพเทนชิโอสแตทเพื่อบังคับค่าศักย์ไฟฟ้าให้อยู่ในช่วงแอนโอด (ไปทางด้านค่าบวกของศักย์ไฟฟ้าจากค่า  $E_{\text{oc}}$ ) ในภาพที่ 2.16 ให้ค่าเลื่อนขึ้นไปอยู่ในช่วงบนของกราฟ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาแอนโอดิก (เกิดการกัดกร่อน) และลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาแคโทดิก เมื่อปฏิกิริยาทั้งสองไม่อยู่ในสมดุลซึ่งกันและกัน ค่ากระแสสุทธิจะเคลื่อนจากวงจรไฟฟ้ามาสู่โลหะ



ตัวอย่าง ให้สัญลักษณ์ของกระแสค่านี้เป็นเครื่องหมายบวก และถ้าบังคับให้ค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าออกห่างจากค่า  $E_{oc}$  เพียงพอก็จะสามารถไม่คิดค่ากระแสไฟฟ้าจากปฏิกิริยาแคโทดิก และวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่มาจากปฏิกิริยาแอโนดิกเพียงอย่างเดียว ในภาพที่ 2.16 จะสังเกตเห็นว่าเส้นโค้งค่ากระแสไฟฟ้าจากเซลล์ และเส้นของกระแสไฟฟ้าแอโนดิกจะซ้อนกันอยู่ทางด้านบนซึ่งค่าศักย์ไฟฟ้ามีค่าเป็นบวกมากๆ หรือในอีกแง่หนึ่งคือ ในช่วงที่ค่าความต่างศักย์มีค่าเป็นลบมากๆ ค่ากระแสไฟฟ้าของแคโทดิกจะมีอิทธิพลกับค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์

### ทฤษฎีการกัดกร่อนเชิงปริมาณ (Quantitative corrosion theory)

ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน ( $i_{corr}$ ) สามารถวัดได้จากข้อมูลของค่ากระแสไฟฟ้ากับความต่างศักย์ โดยการวัดค่าลอการิทึมของกระแสไฟฟ้ากับค่าศักย์ไฟฟ้า และค่าศักย์ไฟฟ้าตรวจสอบจะอยู่ตรงกลางของ  $E_{oc}$  จากนั้นปรับข้อมูลที่ทำกรวัดให้อยู่ในรูปแบบจำลองทางทฤษฎีของการกัดกร่อน โดยสมมติว่าอัตราการกัดกร่อนของกระบวนการแอโนดิก และแคโทดิกจะถูกควบคุมด้วยจลนพลศาสตร์ที่เป็นของปฏิกิริยาการถ่ายโอนอิเล็กตรอนที่พื้นผิวของโลหะ โดยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีภายใต้การควบคุมทางจลนพลศาสตร์จะเป็นไปตามสมการของทาเฟล (Tafel Equation)

$$I = I_0 \exp[2.303(E - E^0) / B] \quad (2.20)$$

โดยที่	$I$	=	ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากปฏิกิริยา (A)
	$I_0$	=	ค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับปฏิกิริยา เรียกว่า Exchange Current (A)
	$E$	=	ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า (V)
	$E^0$	=	ค่าศักย์ไฟฟ้าที่สมดุล (เป็นค่าคงที่ของแต่ละปฏิกิริยา) (V)
	$B$	=	ค่าคงที่ทาเฟลของปฏิกิริยา (เป็นค่าคงที่ของแต่ละปฏิกิริยามีหน่วยเป็นโวลต์ต่อสิบปี, V/dec)

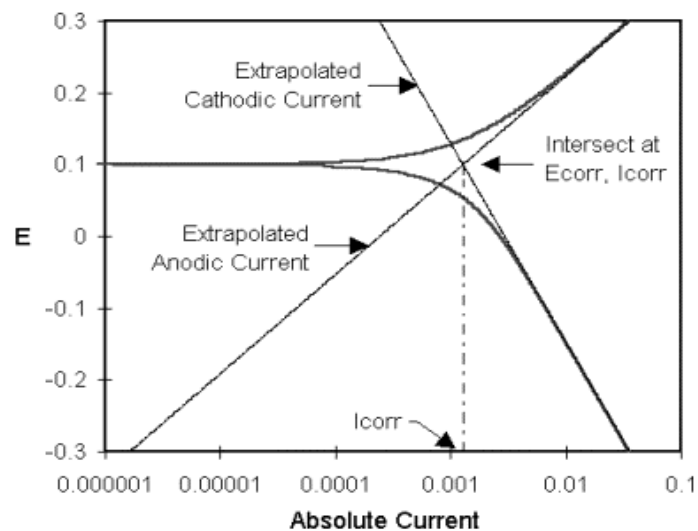
สมการทาเฟลของทั้งปฏิกิริยาแอโนดิก และแคโทดิกในระบบการกัดกร่อนสามารถรวมกันเกิดเป็นสมการ Butler – Volmer

$$I = i_{corr} [\exp(2.303(E - E_{corr}) / \beta_a) - \exp(-2.303(E - E_{corr}) / \beta_c)] \quad (2.21)$$

โดยที่	$I$	=	ค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์ที่วัดได้ (A)
	$i_{corr}$	=	ค่ากระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (A)

$$\begin{aligned}
 E &= \text{ค่าศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้า (V)} \\
 E_{\text{corr}} &= \text{ค่าศักย์ไฟฟ้ากั้ดกร่อน (V)} \\
 \beta_a &= \text{ค่าคงที่ Anodic beta Tafel (V/dec)} \\
 \beta_c &= \text{ค่าคงที่ Cathodic beta Tafel (V/dec)}
 \end{aligned}$$

กราฟของค่าลอการิทึมของค่ากระแสไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ เรียกว่า ทาเฟลพล็อต (Tafel plot) กราฟของทาเฟลพล็อตในภาพที่ 2.17 จะได้จากสมการ Butler – Volmer โดยตรง ให้สังเกตส่วนที่เป็นเส้นตรงของกราฟค่ากระแสไฟฟ้าของเซลล์ การวิเคราะห์กราฟทาเฟลจะทำโดยการลากส่วนที่เป็นเส้นตรงของกราฟของค่าลอการิทึมกระแสกับความต่างศักย์ย้อนกลับไปหาจุดตัดของกราฟดังแสดงในภาพที่ 2.17 ค่ากระแสไฟฟ้าของทั้งแอโนดิก และแคโทดิกที่จุดตัด เรียกว่า ค่ากระแสไฟฟ้ากั้ดกร่อน



ภาพที่ 2.17 ค่ากระแสการกั้ดกร่อน และค่าศักย์ไฟฟ้ากั้ดกร่อนของทาเฟลพล็อต [33]

## 2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shine และคณะ [34] ทำการศึกษาปัญหาของการใช้เหล็กกล้าไร้สนิมในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน คือเรื่องการกัดกร่อนของโลหะ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการเจือปนของโลหะภายในเยื่อแผ่นประกอบขั้วไฟฟ้า (MEA) จึงทำการศึกษากการเคลือบฟิล์มพอลิไพร์โรลและพอลิแอนิไลน์บนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อปรับปรุงปัญหาที่เกิดขึ้น ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (CV) แล้วนำมาทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนและความต้านทานที่ผิวภายใต้ภาวะของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ผลการทดลองพบว่าการเคลือบด้วยฟิล์มพอลิเมอร์จะช่วยป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ และค่าความต้านทานที่ผิว (หรือพื้นผิวสัมผัส) อยู่ในค่าที่สามารถยอมรับได้

Hasanov และ Bilgic [35] ศึกษาการเคลือบผิวเหล็กกล้าด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ชั้นเดียวกับสองชั้นของพอลิไพร์โรลและพอลิแอนิไลน์ (PPY, PANI, PPY/PANI, PANI/PPY) ในสารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.3 โมลต่อลิตร และมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี แล้วนำมาทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ด้วยเทคนิคโพเทนชิโอดนามิก โพลาริเซชัน เพื่อเปรียบเทียบความต่างศักย์กัดกร่อน และความหนาแน่นกระแสกัดกร่อน ผลการทดลองพบว่าการเคลือบด้วยฟิล์มพอลิเมอร์สองชั้น สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่าการเคลือบด้วยฟิล์มพอลิเมอร์ชั้นเดียว โดยการเคลือบของพอลิไพร์โรล/พอลิแอนิไลน์ สามารถป้องกันการกัดกร่อนได้ดีกว่าการเคลือบของพอลิแอนิไลน์/พอลิไพร์โรล

Ren และ Zeng [36] ศึกษาการเคลือบเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยฟิล์มพอลิเมอร์สองชั้น โดยชั้นแรกทำการเคลือบด้วยพอลิไพร์โรลที่โดปด้วยโซเดียมโดเดคซิลซัลเฟต (SDS) จากเทคนิคควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ และชั้นที่สองทำการเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ในสารละลายกรดซัลฟิวริก จากเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีแล้วนำมาทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ความเข้มข้น 0.3 โมลต่อลิตร โดยการวัดอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า และโพลาริเซชันผลการทดลองพบว่าการเคลือบด้วยฟิล์มพอลิไพร์โรล/พอลิแอนิไลน์และการเคลือบด้วยฟิล์มพอลิไพร์โรลสามารถเพิ่มค่าความต่างศักย์ของการกัดกร่อนได้มากกว่าชั้นงานที่ไม่ได้เคลือบถึง 400 มิลลิโวลต์ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนได้ดี อีกทั้งการเคลือบด้วยฟิล์มแบบสองชั้นจะสามารถป้องกันการกัดกร่อนของชั้นงานได้ดีกว่าการเคลือบด้วยฟิล์มชั้นเดียว

**Sathiyarayanan และคณะ** [37] ศึกษาการเคลือบฟิล์มพอลิเอนิลีนบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมจากสารละลายกรดซัลฟิวริก โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี, ควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ และควบคุมศักย์ไฟฟ้าคงที่ และทดสอบประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริก กรดไฮโดรคลอริกและโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่ทำการเคลือบด้วยพอลิเอนิลีนมีประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนมากกว่าร้อยละ 90 แต่ไม่สามารถป้องกันได้ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เมื่อทำการทดสอบที่ระยะเวลาต่าง ๆ พบว่าสามารถป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกได้นานกว่าในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

**Tan และ Blackwood** [38] ศึกษาการเคลือบฟิล์มพอลิเมอร์แบบสองชั้น และพอลิเมอร์ร่วมระหว่างพอลิไพร์โรลกับพอลิเอนิลีนลงบนเหล็กคาร์บอนและเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยเทคนิคควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่ จากนั้นนำไปทดสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ พบว่าสำหรับเหล็กคาร์บอนการเคลือบด้วยพอลิเมอร์สองชั้นมีประสิทธิภาพที่ไม่ต่างจากการเคลือบด้วยพอลิเอนิลีนชั้นเดียว แต่ในกรณีของเหล็กกล้าไร้สนิมนั้น การเคลือบด้วยพอลิเมอร์สองชั้นจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชั้นเดียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการป้องกันการกัดกร่อนแบบหลุม พบว่าความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนนั้นจะขึ้นอยู่กับลำดับในการเคลือบด้วยชนิดของพอลิเมอร์ โดยพบว่า การเคลือบพอลิเอนิลีนบนชั้นของพอลิไพร์โรลให้ผลที่ดีที่สุด

**Tunc** [39] ศึกษาการเคลือบฟิล์มพอลิไพร์โรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมจากสารละลายสองชนิดคือ ลิเทียมเปอร์คลอเรตในอะซีโตนไนไตร (ACN-LiClO<sub>4</sub>) ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร และกรดออกซาลิกในน้ำความเข้มข้น 0.3 โมลต่อลิตร โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี และควบคุมความหนาของฟิล์มประมาณ 1.7 ไมโครเมตร จากนั้นทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนของตัวอย่างที่ได้ทำการเคลือบและไม่ได้เคลือบในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า และกราฟแอนอดิกโพลาไรเซชัน พบว่าฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ด้วยสารละลายลิเทียมเปอร์คลอเรตในอะซีโตนไนไตรมีโครงสร้างเป็นรูพรุนที่น้อยกว่าและสมบัติของฟิล์มมีความเสถียรมากกว่าฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ด้วยสารละลายกรดออกซาลิก

**Ozyilmaz และคณะ** [40] ทำการเคลือบฟิล์มพอลิเอนิลีนบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายกรดออกซาลิก โดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี แล้วนำมาทดสอบประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร และกรดไฮโดร

คลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า และกราฟ แอนโอดิกโพลาร์ไรเซชัน พบว่าเหล็กกล้าไร้สนิมที่ผ่านการเคลือบด้วยพอลิเอนิลีนจะสามารถป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกได้ดีกว่าในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก

**Ren และคณะ [41]** ทำการศึกษาการเคลือบพอลิเอนิลีนที่โอบด้วยแอนไอออนของโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนต โดยเทคนิคควบคุมกระแสไฟฟ้าคงที่บนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ซึ่งใช้ทำเป็นแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้วในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดพีอีเอ็ม ทำการผสมสารละลายแอนิ ลีนมอนอเมอร์เข้มข้น 0.3 โมลต่อลิตร ในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์โดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนต และทำการทดสอบประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.3 โมลต่อลิตร ผลทดสอบพบว่าการเคลือบด้วยพอลิเอนิลีนทำให้ค่าศักย์ไฟฟ้าของการกัดกร่อนของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่ามากกว่า 300 และ 450 มิลลิโวลต์ ตามลำดับ และมีอัตราการกัดกร่อนต่ำกว่าสองเท่าเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเคลือบ

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่อง Potentiostat/Galvanostat ของ Auto Lab, model PG stato 30
2. ขั้วไฟฟ้า คือ แผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมเกรด 304 ขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร หนา 0.1 เซนติเมตร
3. ขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode) คือ ตะแกรงแพลทินัม
4. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ได้แก่ Saturated Calomel Electrode (SCE)
5. กระจกทรายน้ำเบอร์ 400 600 800 1000 1200
6. เครื่องกวนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) ยี่ห้อ CERAMAG Midi
7. แท่งกวนสาร (Magnetic bar)
8. เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Sartorius
9. เครื่องวัดความเป็นกรด-เบส รุ่น Sension 378, model HACH
10. เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า รุ่น Sension 378, model HACH
11. เครื่องวัดความหนา (Thickness guage) รุ่น 547-401 Mitutoyo
12. ไมโครปิเปต รุ่น SL-1000 ยี่ห้อ RAININ ขนาด 100-1000 ไมโครลิตร
13. มัลติมิเตอร์ (Multi-meter) Model RM-15 Sangchai meter
14. แหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) รุ่น HY 3002 ยี่ห้อ COMMUE
15. ผ้าคาร์บอน (Carbon cloth) บริษัท E-tek
16. แผ่นทองแดงเคลือบทอง
17. เครื่อง Fourier transform infrared spectroscopy ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum One
18. เครื่อง Scanning Electron Microscopy ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400
19. เครื่อง Surface Profile Measuring System รุ่น Dektak<sup>3</sup>ST
20. เครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
21. ตู้อบ

### 3.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. ฟิริโรลมอนอเมอร์ (C <sub>4</sub> H <sub>5</sub> N)	บริษัท Sigma-Aldrich
2. แอนิลีนมอนอเมอร์ (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub> )	บริษัท Panreac
3. กรดซัลฟิวริกเข้มข้น (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 98 % w/v)	บริษัท Fisher
4. กรดออกซาลิก(H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	บริษัท Carlo Erba
5. โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ( CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>11</sub> OSO <sub>3</sub> Na)	บริษัท Ajak Finechem
6. กรดไนตริกเข้มข้น (HNO <sub>3</sub> , 65% w/v)	บริษัท Merck
7. แอซีโตน (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O)	บริษัท Sigma-Aldrich
8. น้ำกลั่น	

### 3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.3.1 การกลั่นมอนอเมอร์ฟิริโรลและแอนิลีน

- ประกอบและติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการกลั่น แสดงดังภาพที่ 3.1
- ทำการกลั่นมอนอเมอร์ฟิริโรลที่อุณหภูมิประมาณ 130 องศาเซลเซียส และมอนอเมอร์แอนิลีนที่อุณหภูมิประมาณ 180 องศาเซลเซียส เพื่อแยกตัวยับยั้ง (Inhibitor) ที่ป้องกันมอนอเมอร์ไม่ให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันก่อนทำการสังเคราะห์ออก ที่มีอยู่ประมาณร้อยละ 2 โดยน้ำหนักเพื่อความบริสุทธิ์
- เติมมอนอเมอร์ลงในขวดก้นกลมที่ใช้ในการกลั่นตามปริมาณที่จะนำไปใช้งาน จากนั้นปิดให้สนิท
- เปิดเครื่องให้ความร้อนเพื่อทำการกลั่นมอนอเมอร์
- เมื่อกลั่นมอนอเมอร์เสร็จแล้ว จะสังเกตเห็นส่วนที่กลั่นได้จะถูกแยกในขวดก้นกลมของอีกฝั่งหนึ่ง
- นำมอนอเมอร์ในขวดก้นกลมที่ทำการกลั่นได้นำกลับไปกลั่นอีกรอบ จนกว่ามอนอเมอร์ที่ได้เป็นสารละลายใส
- เมื่อทำการกลั่นเสร็จสองรอบแล้วให้นำมอนอเมอร์ที่ทำการกลั่นได้ใส่ในขวดที่ห่อกระดาษฟอยด์ไว้ แล้วนำไปแช่ตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เนื่องจากพอลิเมอร์สองชนิดนี้ต้องเก็บไว้ในที่มืดและอุณหภูมิต่ำ



ภาพที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์การกลั่นมอโนเมอร์

### 3.3.2 การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ในการเคลือบ

1. นำเหล็กกล้าไร้สนิมขนาดกว้าง 1 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร หนา 0.1 เซนติเมตร มาทำการขัดด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ เพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดเกาะระหว่างฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการเคลือบได้และเหล็กกล้าไร้สนิม
2. จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น และจุ่มลงในสารละลายกรดไนตริกเป็นเวลาประมาณ 30 วินาที เพื่อเป็นการไล่ออกไซด์ของโลหะออก แล้วจุ่มชิ้นงานในแอซีโตนเป็นเวลา 60 วินาที
3. ตัดท่อหดเพื่อหุ้มชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมให้เหลือความยาว 1 เซนติเมตร (พื้นที่ 2.3 ตารางเซนติเมตร)
4. วัดความหนาของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิมก่อนทำการเคลือบ

### 3.3.3 การเตรียมเซลล์เคมีไฟฟ้าเพื่อทำการสังเคราะห์

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลงบนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันแบบระบบเปิด (ความดันบรรยากาศ) โดยใช้เซลล์เคมีไฟฟ้าชนิด 3 ขั้ว ในการเคลือบพอลิเมอร์ลงบนโลหะ โดยขั้วไฟฟ้าที่ใช้ประกอบด้วย

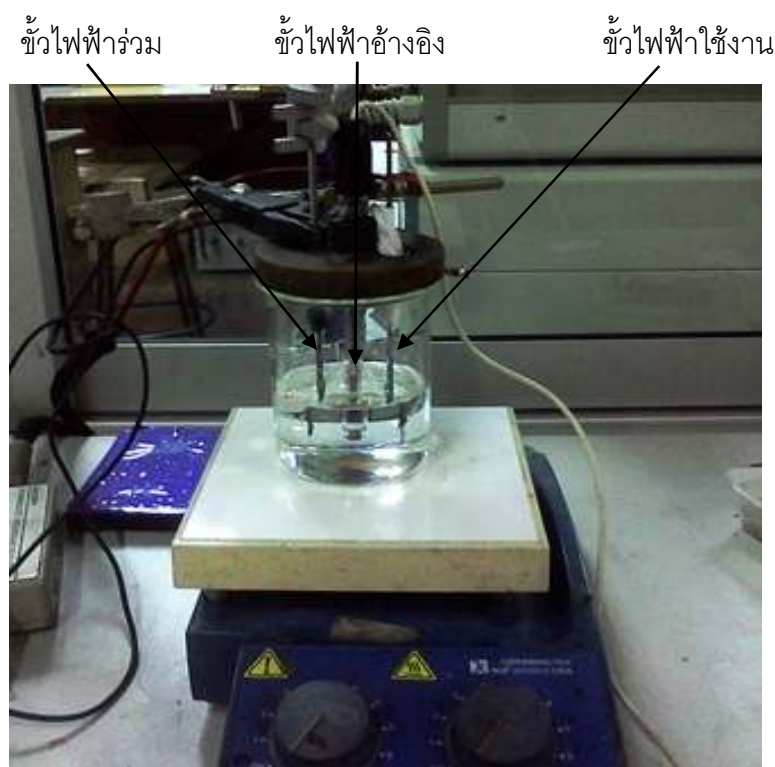
1. นำเหล็กกล้าไร้สนิมที่ได้จากการเตรียมไว้ในตอนที่ 3.3.2 ต่อเข้ากับขั้วไฟฟ้าใช้งาน (working electrode) ของเครื่อง Potentiostat/Galvanostat



2. ตะแกรงแพลทินัมขนาด 1 x 4 ตารางเซนติเมตร เป็นขั้วไฟฟ้าร่วม (counter electrode) โดยก่อนการใช้งานแต่ละครั้งให้ทำความสะอาดขั้วโดยการจุ่มลงในกรดไนตริกแล้วนำไปล้างด้วยน้ำกลั่น

3. Saturated Calomel Electrode (SCE) เป็นขั้วอ้างอิง (reference electrode) ทำความสะอาดขั้วด้วยน้ำกลั่นก่อนและหลังการใช้งาน โดยค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการทดลองจะเทียบกับ SCE ทั้งหมด

4. ต่อบางของเซลล์เคมีไฟฟ้างดภาพที่ 3.2



ภาพที่ 3.2 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลงบนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

### 3.3.4 การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน

ในขั้นตอนของการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลงบนเหล็กกล้าไร้สนิมจะแบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกทำการสังเคราะห์แบบชั้นเดียวด้วยพอลิพีร์โรล และส่วนที่สองทำการสังเคราะห์แบบสองชั้นโดยการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลเป็นชั้นแรกและสังเคราะห์พอลิแอนิลีนเป็นชั้นที่สองทับด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

### 3.3.4.1 ศึกษาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันและภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลแบบชั้นเดียวบนเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

ทำการศึกษาค้นคว้าช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าที่มอโนเมอร์พีร์โรลเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ พร้อมทั้งสังเคราะห์พอลิเมอร์ลงบนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยจัดรูปเซลล์เคมีไฟฟ้าดังภาพที่ 3.2 ในการศึกษาช่วงศักย์ไฟฟ้าของพีร์โรลมอโนเมอร์จะทำการตรวจกราฟค่าความต่างศักย์ในช่วง  $-0.2$  ถึง  $+0.8$  โวลต์เทียบกับ SCE ด้วยอัตราการตรวจกราฟ (Scan rate) 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์ได้แก่

- ชนิดของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ประกอบไปด้วยสารละลายโซเดียมโอดีเตด ซัลเฟต สารละลายกรดออกซาลิก และสารละลายกรดซัลฟิวริก
- ความเข้มข้นสารละลายพีร์โรลมอโนเมอร์ โดยทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตรในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ทุกชนิดจากที่ได้กล่าวมาข้างต้น

ทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยการผสมสารละลายของมอโนเมอร์และสารประกอบอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ เข้าด้วยกัน เมื่อทำการสังเคราะห์เสร็จเรียบร้อยแล้วให้นำชิ้นงานไปล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้ตัวทำละลายที่ติดอยู่หลุดออกไป จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้แห้ง

### 3.3.4.2 ศึกษาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิแอนิไลน์แบบชั้นเดียวบนเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

ทำการศึกษาค้นคว้าช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าที่มอโนเมอร์แอนิไลน์เกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ บนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat โดยจัดรูปเซลล์เคมีไฟฟ้าดังภาพที่ 3.2 ในการศึกษาช่วงศักย์ไฟฟ้าของแอนิไลน์มอโนเมอร์จะทำการตรวจกราฟค่าความต่างศักย์ในช่วง  $-0.2$  ถึง  $+2.0$  โวลต์เทียบกับ SCE ด้วยอัตราการตรวจกราฟ (Scan rate) 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที โดยใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ผสมกับสารละลายแอนิไลน์มอโนเมอร์ความเข้มข้น 0.1

โมลต่อลิตร [1] แล้วให้นำชิ้นงานไปล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อให้ตัวทำละลายที่ติดอยู่หลุดออกไป จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมงเพื่อให้แห้ง

### 3.3.4.3 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมแบบชั้นเดียวบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเทคนิคกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่

ทำการสังเคราะห์โดยเทคนิคที่กำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนมีค่าคงที่ (Potentiostatic mode) และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์พอลิพีร์โรล ซึ่งได้แก่

- ค่าศักย์ไฟฟ้าในการสังเคราะห์ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และพีร์โรลมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร โดยช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำการศึกษามาจากการทำไซคลิกโวลแทมโมแกรมในหัวข้อ 3.3.4.1 คือ 0.45 ถึง 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE ระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 1800 วินาที

- ระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ตั้งแต่ 200 ถึง 1800 วินาที ทำการทดลองโดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมจากด้านบน ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของพีร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

### 3.3.4.4 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมแบบชั้นเดียวบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเทคนิคกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าคงที่

ทำการสังเคราะห์โดยเทคนิคที่กำหนดให้กระแสที่ป้อนมีค่าคงที่ (Galvanostatic mode) และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์พอลิพีร์โรล ซึ่งได้แก่

- ค่ากระแสไฟฟ้าในการสังเคราะห์ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และพีร์โรลมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร โดยช่วงค่ากระแสที่ทำการศึกษามาจากการทำวิธีกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ในหัวข้อ 3.3.4.3 คือ 0.5 ถึง 0.8 มิลลิแอมแปร์ ระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 1800 วินาที

- ระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ตั้งแต่ 200 ถึง 1800 วินาที ทำการทดลองในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของพีร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

### 3.3.4.5 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์บนพอลิไพร์โรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมแบบสองชั้นบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเทคนิคกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่

ทำการสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์ทับชั้นของพอลิไพร์โรลโดยเทคนิคที่กำหนดให้ศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนมีค่าคงที่ และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์แบบสองชั้น ซึ่งได้แก่

- ค่าศักย์ไฟฟ้าในการสังเคราะห์ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรและแอนิไลน์มอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร โดยช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำการศึกษามาจากการทำไซคลิกโวลแทมโมแกรมในหัวข้อ 3.3.4.2 คือ 0.7 ถึง 1.6 โวลต์เทียบกับ SCE ระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 600 วินาที
- ระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ตั้งแต่ 200 ถึง 1800 วินาที ทำการทดลองโดยใช้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมจากด้านบน ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของแอนิไลน์มอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

### 3.3.4.6 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์บนพอลิไพร์โรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมแบบสองชั้นบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยเทคนิคกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าคงที่

ทำการสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์ทับชั้นของพอลิไพร์โรลโดยเทคนิคที่กำหนดให้กระแสที่ป้อนมีค่าคงที่ และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการสังเคราะห์แบบสองชั้น ซึ่งได้แก่

- ค่ากระแสไฟฟ้าในการสังเคราะห์ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และไพร์โรลมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร โดยช่วงค่ากระแสที่ทำการศึกษามาจากการทำวิธีกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ในหัวข้อ 3.3.4.5 คือ 1 ถึง 4 มิลลิแอมแปร์ ระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ 600 วินาที
- ระยะเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์ตั้งแต่ 200 ถึง 1800 วินาที ทำการทดลองในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของแอนิไลน์มอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

### 3.3.5 การทดสอบการกัดกร่อนของโลหะ

นำชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ได้ในทุกภาวะมาทำการทดสอบและวิเคราะห์หาค่ากระแสการกัดกร่อน โดยใช้เครื่อง Potentiostat/Galvanostat และใช้วิธี Tafel slope analysis ทำการทดสอบในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร จัดเซลล์เคมีไฟฟ้าเช่นเดียวกับขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิเมอร์ดังภาพที่ 3.2 [20]

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Tafel slope analysis จะได้ค่ากระแสไฟฟ้ากัดกร่อนนำมาคิดเป็นประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อนเทียบกับเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ได้เคลือบได้จากสมการที่ 3.1

$$\text{ประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน (\%)} = \left\{ \frac{I_{\text{corr(ss)}} - I_{\text{corr(c)}}}{I_{\text{corr(ss)}}} \right\} \times 100 \quad (3.1)$$

โดย  $I_{\text{corr(ss)}}$  = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ได้ทำการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

$I_{\text{corr(c)}}$  = ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ทำการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ (แอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)

### 3.3.6 วัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงาน [29]

นำชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ได้ในทุกภาวะมาทำการทดสอบวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (Interfacial Contact Resistance, ICR) อุปกรณ์การทดลองแสดงดังภาพที่ 3.3 ซึ่งประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งทำการป้อนกระแสไฟฟ้าทำให้แก่ระบบ และมัลติมิเตอร์ทำหน้าที่วัดความต่างศักย์ออกมา โดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า (Power supply) จะใช้กระแสไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 0.5 แอมแปร์ และวัดค่าความต่างศักย์ของชิ้นงานด้วยมัลติมิเตอร์ (Multi-miter) เมื่อได้ค่าความต่างศักย์ของกระแสไฟฟ้าในช่วง 0.1 ถึง 0.5 แอมแปร์

การคำนวณหาความต้านทานเชิงสัมผัสมีความสัมพันธ์กับพื้นที่สัมผัสระหว่างชิ้นงานและขั้วไฟฟ้าตามสมการที่ 3.2 และ ภาพที่ 3.4 แสดงการจัดเรียงอุปกรณ์การวัดความต้านทานเชิงสัมผัส (ICR)

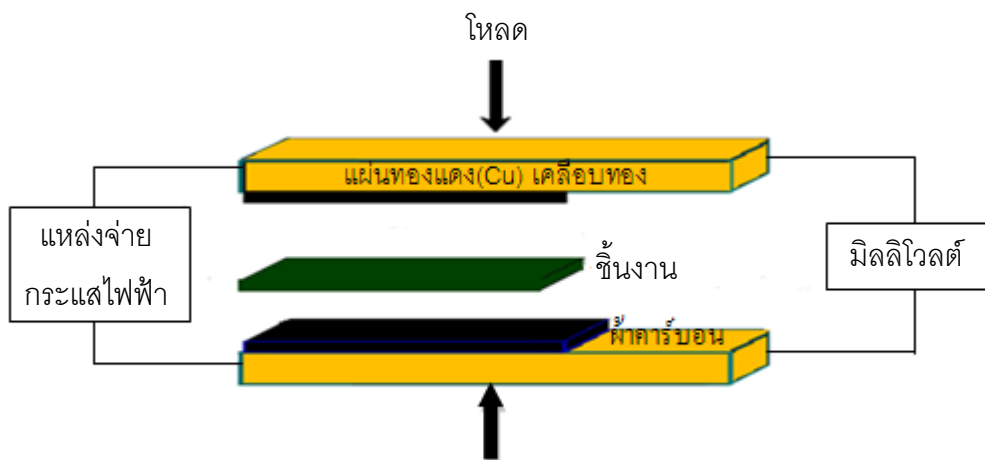
$$\text{ICR} = \{ [R_2 \times A_2] - [R_1 \times A_1] \} / 2 \quad (3.2)$$

โดย

ICR	=	ค่าความต้านทานเชิงสัมผัส
$R_1$	=	วัดค่าความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือวัด (โอห์มตารางเซนติเมตร)
$A_1$	=	พื้นที่ผิวสัมผัสของผ้าคาร์บอน (ตารางเซนติเมตร)
$R_2$	=	วัดค่าความต้านทานสัมผัสตอนมีชิ้นงาน (โอห์มตารางเซนติเมตร)
$A_2$	=	พื้นที่ผิวสัมผัสของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)



ภาพที่ 3.3 เครื่องมือการวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัส [20]



ภาพที่ 3.4 การจัดเรียงอุปกรณ์การวัดความต้านทานเชิงสัมผัส

### 3.3.7 การวิเคราะห์ลักษณะผิวและความหนาของชิ้นงาน

งานวิจัยนี้ทำการวัดรูปแบบผิวฟิล์มและความหนาของพอลิเมอร์ที่ทำการเคลือบได้โดยใช้เครื่อง Surface Profile Measuring System ยี่ห้อ Dektak<sup>3</sup> ST เป็นระบบที่ดูรูปแบบของพื้นผิว โดยสามารถทำการวัดความหนาได้เป็นระดับนาโนโดยวิธีการกราดลากหัวเข็มไปบนผิวของตัวอย่างที่ทำการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ เทียบกับผิวที่ไม่ได้ทำการเคลือบชิ้นงาน ตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์ภายใต้ภาวะการเคลื่อนที่ของหัวเข็มไปตามพารามิเตอร์ที่กำหนดโดยผู้ใช้ ซึ่งได้แก่ ความยาวและเวลาในการสแกน โดยในการลากหัวเข็มจะลากผ่านทั้งผิวที่ทำการเคลือบและไม่ได้ทำการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ ดังนั้นรูปแบบพื้นผิวจะถูกทำการบันทึกความแตกต่างไว้ ข้อมูลที่ทำการบันทึกได้สามารถนำไปวิเคราะห์ ความขรุขระ ความสูงต่ำ และรูปทรงทางเรขาคณิตได้ จากนั้นหน้าจอก็จะแสดงผลกราฟฟิกและเขียนกราฟข้อมูล [42]

### 3.3.8 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน

งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น Spectrum One ในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชัน (Function groups) ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีของสาร FTIR เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบเกี่ยวกับโมเลกุลของสาร โดยอาศัยหลักการเกี่ยวกับการสั่น (Vibration) ของโมเลกุลแสงอินฟราเรดช่วงกลาง (2.5-25 ไมโครเมตร) มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุลของสาร เมื่อสารตัวอย่างได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่พอเหมาะจะเกิดการสั่นของโมเลกุล ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลเกิดการดูดกลืนแสงแล้ววัดแสงที่ส่งผ่านออกมาแสดงผลเป็นความสัมพันธ์ของความถี่หรือ Wave number กับค่าการส่งผ่านของแสง เรียกว่า IR Spectrum ซึ่งลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะ โมเลกุลของสารจึงสามารถดูดกลืนแสงอินฟราเรดได้ที่ความถี่ต่างกันขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของพันธะและน้ำหนักของอะตอมของ Functional Groups ในโมเลกุลนั้นๆ [43]

การเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน จะทำการขูดฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้ออกจากผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ผสมกับ KBr 100 - 200 มิลลิกรัม แล้วบดให้ละเอียดจนเป็นเนื้อเดียวกัน เมื่อบดเข้ากันแล้วนำไปใส่ในเครื่องอัดหรือเรียกว่า Die จะได้ตัวอย่างที่เป็นแผ่นบางใสออกมา จากนั้น

นำไปใส่ลงใน Disk holder เพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไปโดยใช้เลขคลื่นในช่วง 400 – 4000 ต่อเซนติเมตร

### 3.3.9 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

งานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ยี่ห้อ JEOL รุ่น JSM-6400 ในการวิเคราะห์พื้นผิวของฟิล์มพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้ในภาวะต่างๆ โดยหลักการทำงานของเครื่องคือ อิเล็กตรอนที่มาจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกวาดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์นำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปและสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย [44]

การเตรียมตัวอย่างชิ้นงาน จะทำการสังเคราะห์พอลิเมอร์บนเส้นลวดเหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อที่จะนำชิ้นงานที่สังเคราะห์ได้ไปตัดให้มีความยาวประมาณ 2 - 3 มิลลิเมตร จากนั้นนำชิ้นงานวางบนก้านวางตัวอย่าง (Specimen stub) และนำไปฉาบผิวด้วยทองเพื่อเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้กับชิ้นงานก่อนนำไปศึกษา



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบผิวเหล็กกล้าไร้สนิมแบบชั้นเดียว และสองชั้นด้วยพอลิเมอร์นำไฟฟ้าสองชนิด คือ พอลิพีร์โรลสำหรับการเคลือบชั้นแรกและพอลิแอนิ ลินสำหรับการเคลือบชั้นที่สอง ด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยทำเปรียบเทียบการเคลือบแบบชั้นเดียวและ สองชั้น ตัวแปรที่ศึกษาประกอบด้วย ชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้นของมอนอ เมอร์ วิธีในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลงบนเหล็กกล้าไร้สนิม และนำมาทดสอบการป้องกันการกัด กร่อนในภาวะสารละลายกรด และทดสอบความต้านทานที่ผิวสัมผัสฟิล์มที่ทำการเคลือบ

#### 4.1 ศึกษาความเข้มข้นสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิ พิโรลบนเหล็กกล้าไร้สนิม

การทดลองทำการศึกษาผลของความเข้มข้นของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์สามชนิดที่ใช้ ในการสังเคราะห์พอลิพีร์โรล ในสารละลายพีร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และสาร สนับสนุนอิเล็กโทรไลต์สามชนิด ได้แก่ สารละลายโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.1 0.15 และ 0.5 โมลต่อลิตร สารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1, 0.5 และ 1 โมลต่อลิตร และ สารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.05 0.1 และ 0.5 โมลต่อลิตร ดังตารางที่ 4.1 ตามลำดับ

ผลการทดลอง พบว่าในการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลในสารละลายโซเดียมโคเดซิลซัลเฟต เข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร ให้ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนต่ำที่สุด และที่ความเข้มข้น สารละลายโซเดียมโคเดซิลซัลเฟตเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ฟิล์มพอลิพีร์โรลไม่เกิดบนผิวของ เหล็กกล้าไร้สนิม อาจเนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของสารละลายชนิดนี้มีขนาดใหญ่ ทำให้อาจ เกิดการบดบังการเกิดปฏิกิริยาของมอนอเมอร์พีร์โรลได้

ในการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้นแตกต่างกันสามค่า พบว่า การใช้ความเข้มข้นกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ให้ความหนาแน่นกระแสการ กัดกร่อนต่ำที่สุด ที่ความเข้มข้นสารละลาย 0.05 โมลต่อลิตร การป้องกันการกัดกร่อนยังไม่ได้ เนื่องจากความเข้มข้นของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์อาจยังน้อยเกินไป ทำให้ฟิล์มของพอลิ พิโรลเกิดได้น้อย ทำให้ความสามารถการป้องกันการกัดกร่อนออกมาแย่ และที่ความเข้มข้น สารละลาย 0.5 โมลต่อลิตร พบว่าการป้องกันการกัดกร่อนออกมาค่อนข้างไม่ดี อาจเนื่องจาก

ความเข้มข้นของสารละลายกรดมากเกินไป จึงอาจทำให้ระหว่างการสังเคราะห์เกิดการกัดกร่อนของผิวฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ได้ไปบางส่วน

ในส่วนการสังเคราะห์พอลิพีริโรลในสารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร พบว่าให้ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนเหมาะสมที่สุด ดังนั้นในการทดลองส่วนต่อไป จึงได้เลือกใช้ความเข้มข้นของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ในแต่ละชนิด ที่ให้ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนออกมาต่ำที่สุด ซึ่งได้แก่ สารละลายโซเดียมโตะเดซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร สารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และสารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

**ตารางที่ 4.1** ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนในความเข้มข้นสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ต่างกัน สามชนิด

ชนิดสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์		ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)
โซเดียมโตะเดซิลซัลเฟต	0.1 โมลต่อลิตร	100.07±3.72
	0.15 โมลต่อลิตร	63.75±0.04
	0.5 โมลต่อลิตร	เคลือบไม่ติด
กรดออกซาลิก	0.1 โมลต่อลิตร	54.00±0.65
	0.5 โมลต่อลิตร	8.56±0.46
	1.0 โมลต่อลิตร	86.49±2.10
กรดซัลฟิวริก	0.05 โมลต่อลิตร	63.48±1.71
	0.1 โมลต่อลิตร	11.82±0.74
	0.5 โมลต่อลิตร	70.62±1.54

## 4.2 ศึกษาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันและภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลแบบชั้นเดียวบนเหล็กกล้าไร้สนิม

การทดลองทำการศึกษาหาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าที่มอโนเมอร์ไพร์โรลเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน พร้อมทั้งสังเคราะห์พอลิเมอร์ลงบนเหล็กกล้าไร้สนิมในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไพร์โรลมอโนเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์สามชนิด ได้แก่ สารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร [36] สารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร [35] และสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร [45] ในการศึกษาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดพอลิไพร์โรลจะทำการตรวจกราฟค่าความต่างศักย์ในช่วง  $-0.2$  ถึง  $+0.8$  โวลต์เทียบกับ Saturated Calomel Electrode (SCE) ด้วยอัตราการตรวจกราฟ 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที

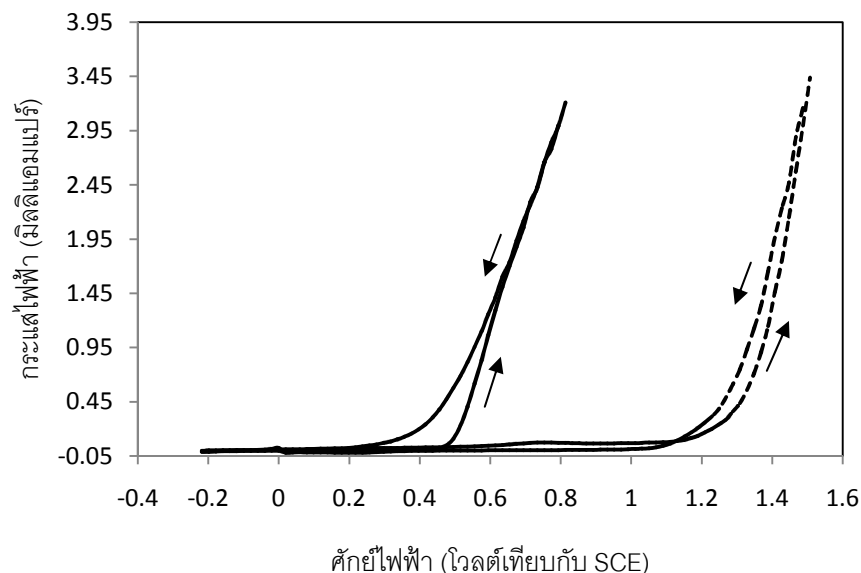
### 4.2.1 ผลของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการสังเคราะห์

ในการทดลองได้ทำการปรับเปลี่ยนชนิดสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดพอลิไพร์โรล ทั้งในด้านการป้องกันการกัดกร่อนและค่าการนำไฟฟ้า และในการทดลองขั้นต่อไปจะทำการเลือกชนิดสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมที่สุดนี้ไปทำการสังเคราะห์โดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรอื่นที่มีผลต่อไป

#### 4.2.1.1 การสังเคราะห์พอลิไพร์โรลในสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

ทำการศึกษาหาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าที่มอโนเมอร์ไพร์โรลเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน พร้อมทั้งสังเคราะห์พอลิไพร์โรลลงบนเหล็กกล้าไร้สนิมในเวลาเดียวกันในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์ไพร์โรลมอโนเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 8.1 ซึ่งมีสมบัติเป็นเบสอ่อน และมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 3.21 มิลลิซีเมนต์ต่อตารางเซนติเมตร จากผลการทดลองภาพที่ 4.1 พบว่าช่วงมอโนเมอร์ไพร์โรลเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.5 โวลต์เทียบกับ SCE จากค่าศักย์ไฟฟ้าค่านี้เมื่อทำการสังเกตขณะการสังเคราะห์จะเริ่มเห็นพอลิเมอร์ไพร์โรลเริ่มก่อตัวเป็นฟิล์มบนผิวเหล็กกล้าไร้สนิม ลักษณะจากการมองเห็นด้วยตาเปล่าฟิล์มที่ทำการเคลือบได้เป็นสีดำเข้มและผิวเรียบ ส่วนการวิเคราะห์ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตโดยที่ไม่มีสารมอโนเมอร์พบช่วงการ

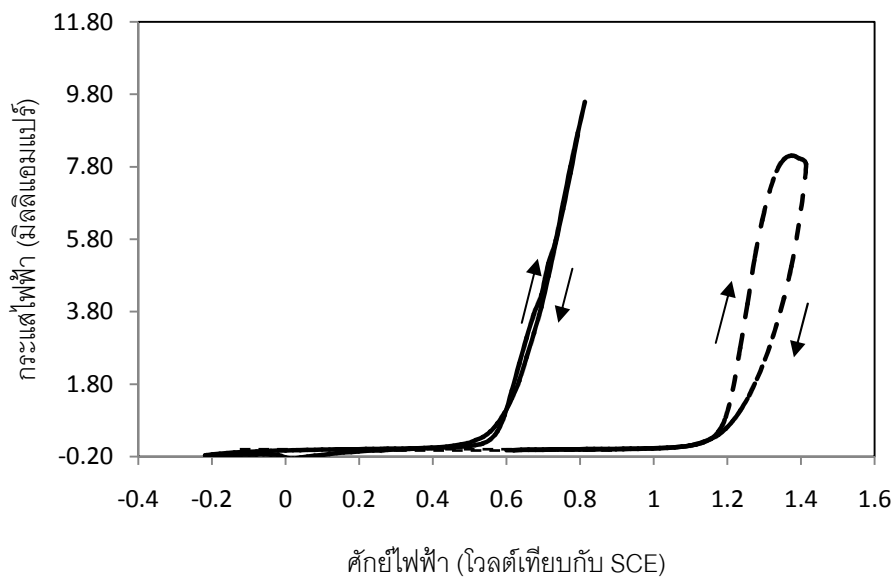
เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ประมาณ 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE ซึ่งคาดว่าจะเป็นการเกิดออกซิเดชันของออกซิเจนในสารละลาย โดยมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานอยู่ที่ประมาณ 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE [46]



**ภาพที่ 4.1** ไซคลิกโวลแทมโมแกรมการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ( — ) พรีโพลีเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ในสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร และ ( - - - ) สารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

#### 4.1.1.2 การสังเคราะห์พอลิไพร์โรลในสารละลายกรดซัลฟิวริก

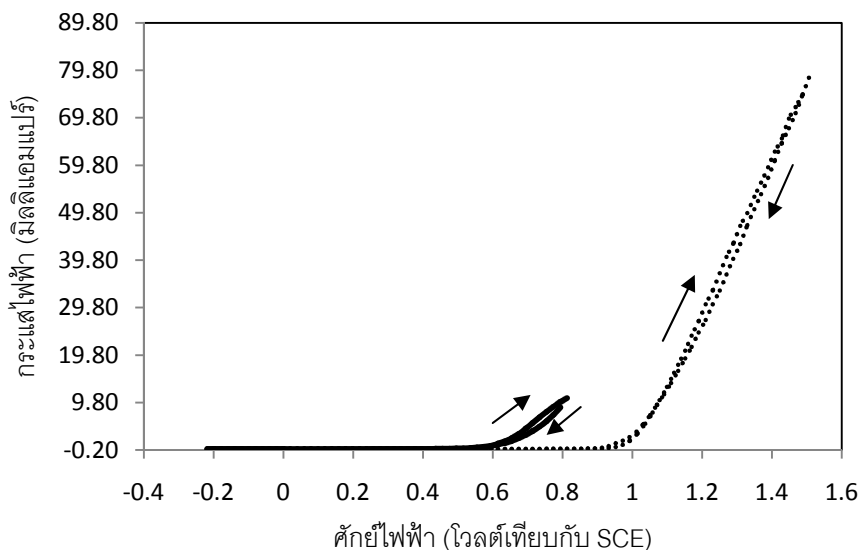
ทำการปรับเปลี่ยนชนิดของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลลงบนเหล็กกล้าไร้สนิม โดยทำการเตรียมการสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์พรีโพลีเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1.3 ซึ่งมีสมบัติเป็นกรดแก่ และมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 22.1 มิลลิซีเมนต์ต่อตารางเซนติเมตร จากผลการทดลองภาพที่ 4.2 พบว่าช่วงมอดูเลชันพรีโพลีเมอร์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Joseph และคณะ [45] พอลิไพร์โรลที่ทำการสังเคราะห์ได้บนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมจะมีสีดำ และผิวมีลักษณะเรียบ



**ภาพที่ 4.2** ไชคคลิกโวลแทมโมแกรมการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (—) ไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และ (- - -) สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

#### 4.2.1.3 การสังเคราะห์พอลิไพร์โรลในสารละลายกรดออกซาลิก

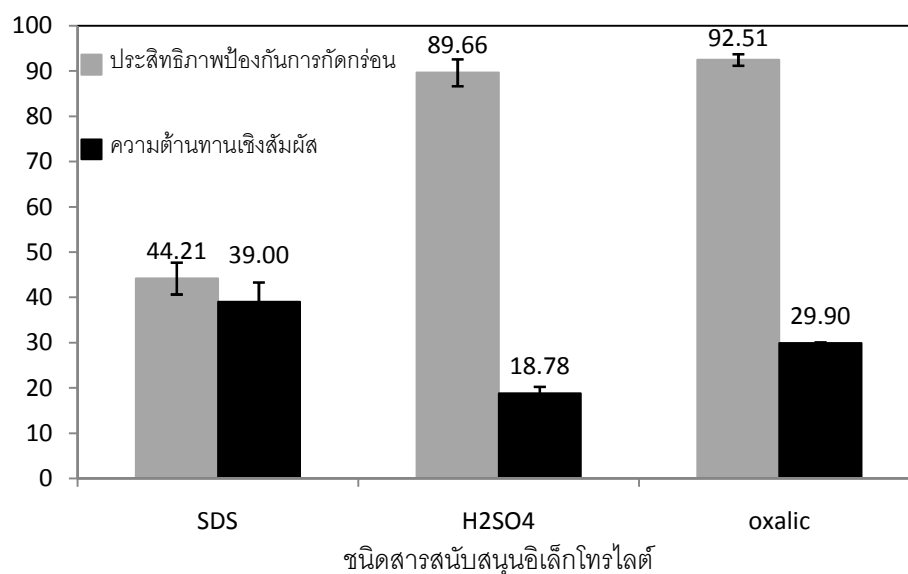
ทำการปรับเปลี่ยนชนิดของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในการหาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลลงบนเหล็กกล้าไร้สนิม โดยทำการเตรียมการสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ไพร์โรลมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ในสารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1.24 ซึ่งมีสมบัติเป็นกรดแก่ และมีค่าการนำไฟฟ้าเท่ากับ 39.25 มิลลิซีเมนต์ต่อตารางเซนติเมตร จากผลการทดลองภาพที่ 4.3 พบว่าช่วงมอนอเมอร์ไพร์โรลเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนผิวของเหล็กกล้าไร้สนิมอยู่ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hasanov และ Bilgic [35] โดยลักษณะพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มีสีดำอ่อนเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ด้วยสารละลายอีกสองชนิด และผิวที่ทำการสังเคราะห์มีลักษณะเรียบ นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของกรดออกซาลิกอย่างเดี่ยวพบพีกการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ประมาณ 1 โวลต์เทียบกับ SCE คาดว่าเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดออกซาลิก ซึ่งมีค่าศักย์ไฟฟ้ามาตรฐานอยู่ที่ประมาณ 1 โวลต์เทียบกับ SCE [47]



**ภาพที่ 4.3** ไชคลิกโวลแทมโมแกรมการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (—) พีวีแอลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ในสารละลายกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และ (---) สารละลายกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

เมื่อนำแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิมที่เคลือบด้วยพอลิพีวีแอลด้วยวิธีไชคลิกโวลแทมเมตรีในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า -0.2 ถึง 0.8 โวลต์เทียบกับ SCE ในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ต่างชนิดกันไปทดสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนและความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ พบว่าการสังเคราะห์ในสารละลายพีวีแอลมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ในสารละลายกรดออกซาลิก 0.5 โมลต่อลิตร จะให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนดีที่สุดถึงร้อยละ 92.51 ดังภาพที่ 4.4 ส่วนการสังเคราะห์ในสารละลายโซเดียมโอดีเตลซัลเฟตนั้น จะเห็นได้ว่าได้ค่าประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนต่ำที่สุด เมื่อทำการสังเกตกราฟไชคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันในสารละลายสามชนิดเปรียบเทียบกัน พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาในสารละลายโซเดียมโอดีเตลซัลเฟตมีค่าต่ำที่สุด จึงคาดว่าฟิล์มพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ในสารละลายนี้เกิดได้เร็ว และเมื่อสังเคราะห์ไชคลิกโวลแทมโมแกรมจะพบว่าเส้นขากลับของกราฟต่างจากขาไปมากกว่าสารละลายชนิดอื่น ผิวพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้จึงอาจเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากผลของการถูกออกซิไดซ์ ไอออนในสารละลายกรดที่ทำการทดสอบการกัดกร่อนจึงสามารถเข้าไปทำลายผิวเหล็กกล้าไร้สนิมได้ อีกทั้งในสารละลายโซเดียมโอดีเตลซัลเฟตมีสมบัติเป็นสารลดแรงตึงผิว ดังนั้นสารละลายจึงมีลักษณะเป็นฟอง ทำให้ระหว่างการสังเคราะห์อาจมีอากาศเข้าไปแทรกระหว่างผิวของฟิล์มกับเหล็กกล้าไร้สนิมได้ [36] ดังนั้นชั้นของพอลิพีวีแอล

ฟิล์มจึงอาจสังเคราะห์ได้ไม่เหมาะสมกับผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม และเมื่อนำชิ้นงานไปวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัสพบว่าการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลในสารละลายโซเดียมโอดีซิลซัลเฟตมีค่ามากที่สุด เนื่องจากฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ได้มีความหนาค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับสารละลายอีกสองชนิด รองลงมาคือสารละลายกรดออกซาลิก และสารละลายกรดซัลฟิวริก ตามลำดับ



**ภาพที่ 4.4** ประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อนและความต้านทานเชิงสัมผัสของการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลในสารละลายไพร์โรลมอนอเมอร์ 0.1 โมลต่อลิตร ในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ โซเดียมโอดีซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร สารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และสารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

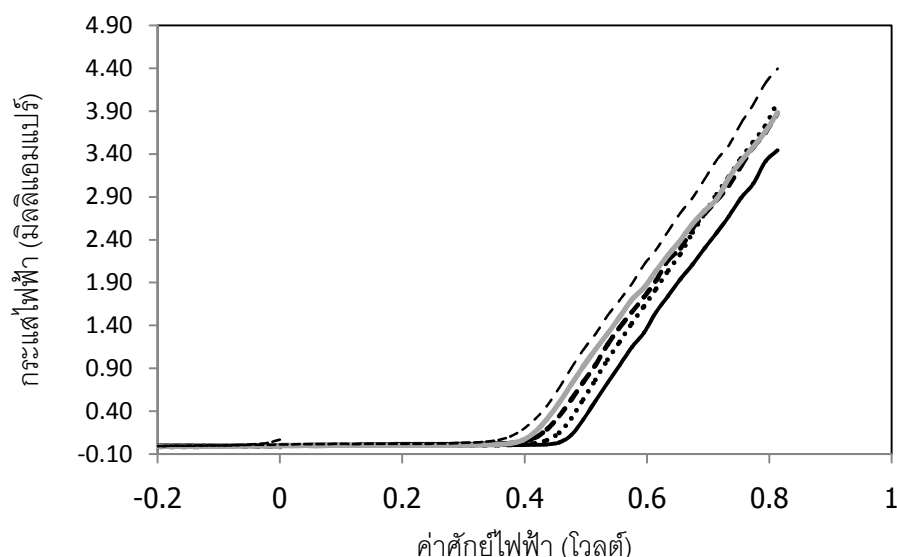
#### 4.2.2 ผลความเข้มข้นของไพร์โรลมอนอเมอร์ที่ใช้ในการสังเคราะห์

การทดลองในส่วนนี้ ได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของไพร์โรลมอนอเมอร์ที่ใช้ตั้งแต่ 0.1 โมลต่อลิตร ถึง 0.5 โมลต่อลิตร เพื่อดูผลต่อการสังเคราะห์ ค่าความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน และค่าความต้านทานที่ผิวสัมผัสของชิ้นงานในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แต่ละชนิด

##### 4.2.2.1 การสังเคราะห์พอลิไพร์โรลในสารละลายโซเดียมโอดีซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

จากการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมทรีในสารละลายโซเดียมโอดีซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร พบว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของไพร์โรลมอนอเมอร์ตั้งแต่ 0.1 โมลต่อลิตร ถึง 0.5 โมลต่อลิตร ค่ากระแสไฟฟ้าในการ

เกิดปฏิกิริยาจะสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอนอเมอร์ ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กทรอนิกส์โพรพอลิเมอร์ไรเซชันของพิริโรลมอนอเมอร์เกิดได้มากขึ้นตามลำดับ โดยแสดงดังภาพที่ 4.5 และส่งผลให้ความหนาของฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ได้เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่มากขึ้นดังตารางที่ 4.2 ซึ่งเป็นไปตามกฎของฟาราเดย์

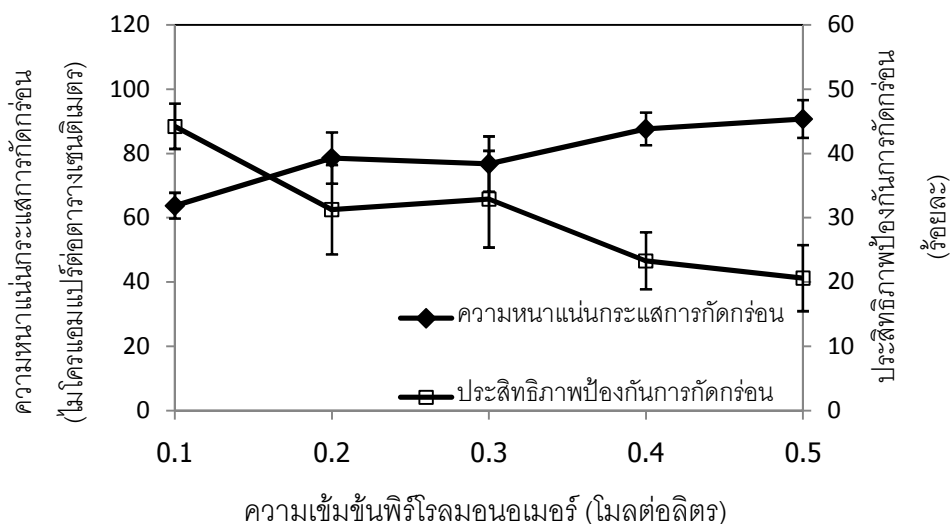


**ภาพที่ 4.5** ไซคลิกโวลแทมโมแกรมการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กทรอนิกส์โพรพอลิเมอร์ไรเซชันฝั่งการเกิดออกซิเดชันของพอลิพิริโรลในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโซเดียมโอดีดซิลซัลเฟตเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของมอนอเมอร์พิริโรล (—) 0.1 โมลต่อลิตร (.....) 0.2 โมลต่อลิตร (- - -) 0.3 โมลต่อลิตร (— · —) 0.4 โมลต่อลิตร และ (- - - -) 0.5 โมลต่อลิตร

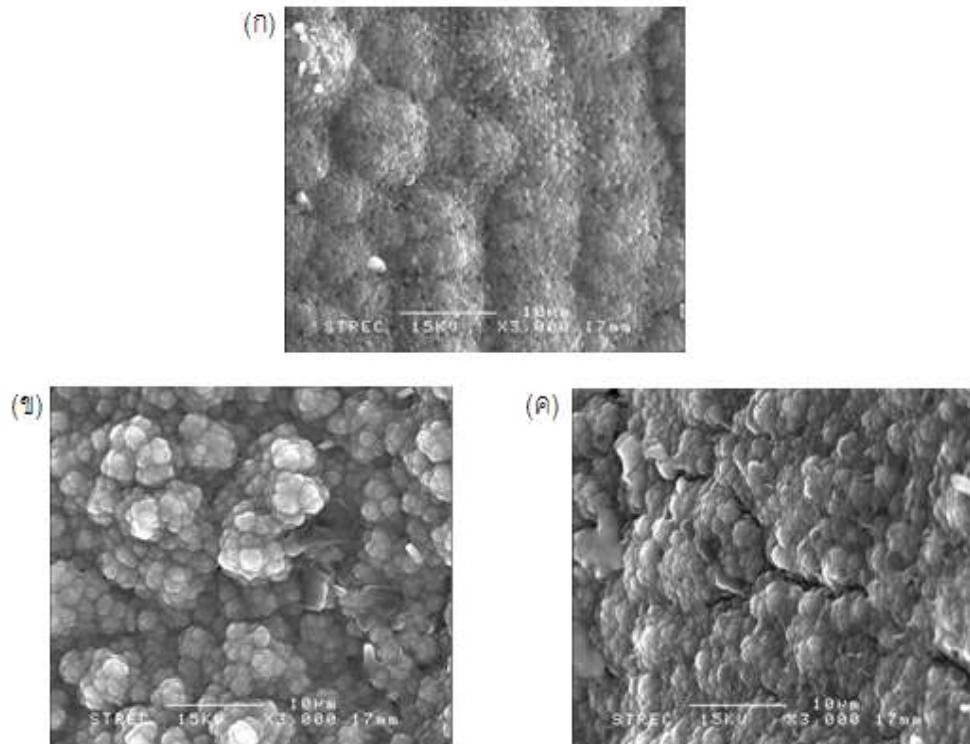
เมื่อนำชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ได้ไปทดสอบการป้องกันการกัดกร่อน พบว่าเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น หรือประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนมีค่าต่ำลง ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 4.6 โดยค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนที่ทำการวัดได้ ถือว่ายังไม่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (ควรต่ำกว่า 16 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร [48]) เมื่อความหนาของฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ได้มีค่าเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้การยึดเกาะระหว่างฟิล์มกับเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ดี อีกทั้งค่าความเข้มข้นมอนอเมอร์มากขึ้นจะส่งผลให้การจัดเรียงตัวของอนุภาคพอลิเมอร์มีการพอกพูนที่สูงจนทำให้ผิวของพอลิเมอร์ฟิล์มแตกได้ในที่สุด ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิพิริโรลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากภาพที่ 4.7 ก-ค แสดงลักษณะพื้นผิวของ



ฟิล์มพอลิไพโรลที่ทำการสังเคราะห์ได้ที่มีความเข้มข้นของไพโรลมอนอเมอร์ที่แตกต่างกัน พบว่า ที่ความเข้มข้นของไพโรลมอนอเมอร์ 0.3 โมลต่อลิตร อนุภาคของพอลิเมอร์เริ่มจับเป็นกลุ่มก้อนที่มากขึ้น และที่ความเข้มข้นไพโรลมอนอเมอร์ 0.5 โมลต่อลิตร เกิดรอยแตกที่ผิวของฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ได้



**ภาพที่ 4.6** ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสของการกัดกร่อนและประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน โดยสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร และไพโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร

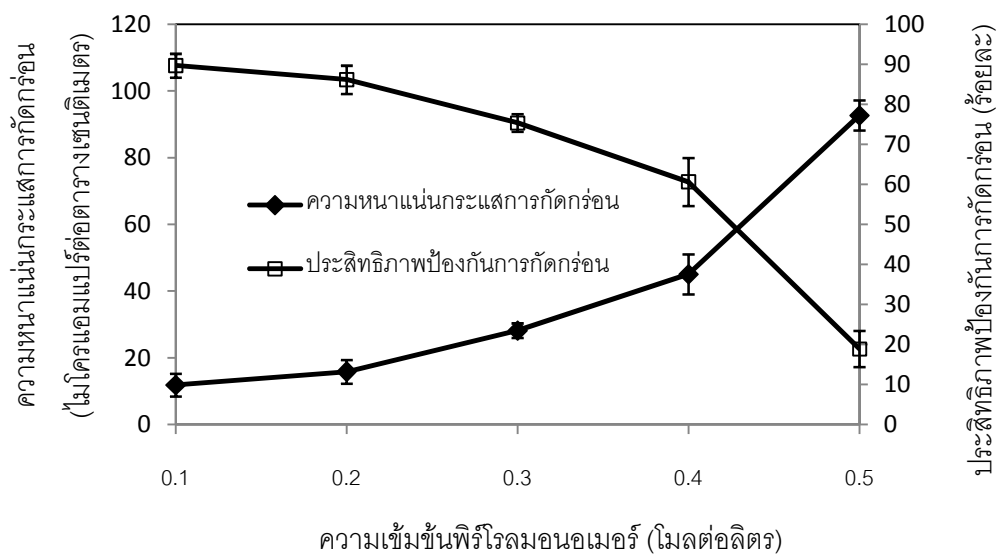


**ภาพที่ 4.7** โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิโพรพิลีนโดยสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร และโพรพิลีนมอนอเมอร์ความเข้มข้น (ก) 0.1 โมลต่อลิตร (ข) 0.3 โมลต่อลิตร และ (ค) 0.5 โมลต่อลิตร ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

#### 4.2.2.2 การสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนในสารละลายกรดซัลฟิวริก

จากการสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนโดยวิธีไฮคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลายกรดซัลฟิวริก ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรพบว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของโพรพิลีนมอนอเมอร์ตั้งแต่ 0.1 โมลต่อลิตร ถึง 0.5 โมลต่อลิตร ผลของการป้องกันการกัดกร่อนมีแนวโน้มเดียวกับการสังเคราะห์ในสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต นั่นคือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโพรพิลีนมอนอเมอร์ ฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ได้มีความหนาขึ้น ทำให้การยึดเกาะระหว่างฟิล์มกับเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ดีทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น หรือประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนมีค่าต่ำลง ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 4.8 และเมื่อทำการเปรียบเทียบการสังเคราะห์พอลิโพรพิลีนในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ระหว่างสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตกับสารละลายกรดซัลฟิวริกในความเข้มข้นสารละลายโพรพิลีน

มอนอเมอร์เท่ากัน พบว่าการสังเคราะห์พอลิพีริโรลในสารละลายกรดซัลฟิวริกจะให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนสูงกว่า และที่ความเข้มข้นของพีริโรลมอนอเมอร์ 0.1 โมลต่อลิตร จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนต่ำที่สุด หรือค่าประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อนสูงที่สุดถึงร้อยละ 89.66 ดังภาพที่ 4.10 แต่ถาลดความเข้มข้นของพีริโรลมอนอเมอร์เท่ากับ 0.05 โมลต่อลิตร การเคลือบจะเกิดขึ้นไม่ทั่วทั้งแผ่นเหล็กกล้าไร้สนิม

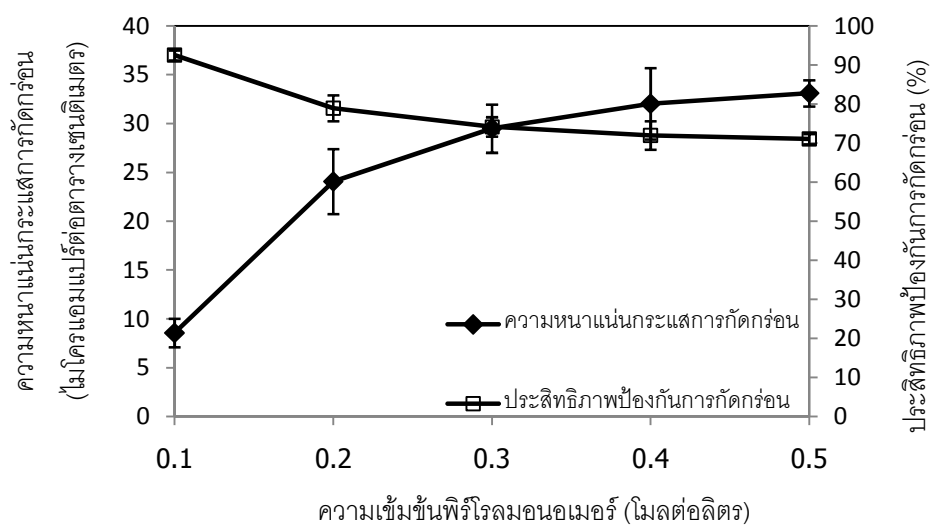


**ภาพที่ 4.8** ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสของการกัดกร่อนและประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน โดยสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และพีริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร

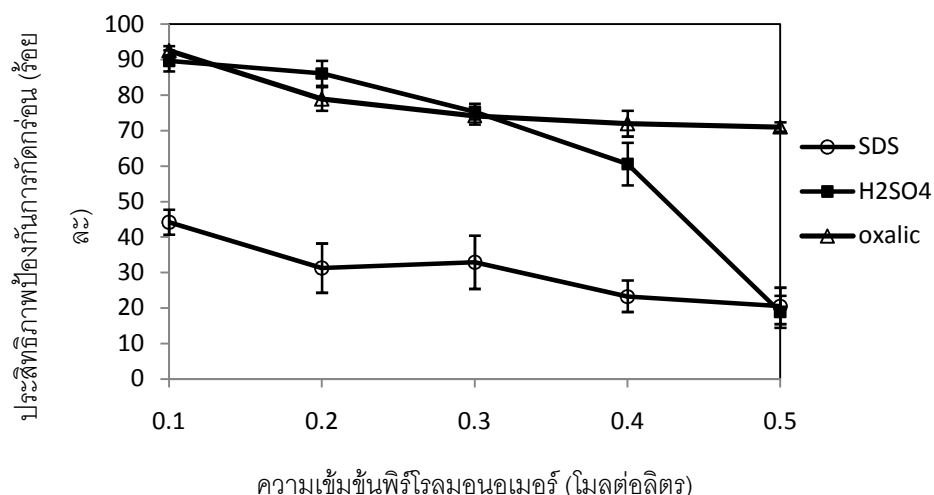
#### 4.2.2.3 การสังเคราะห์พอลิพีริโรลในสารละลายกรดออกซาลิก

เมื่อทำการเปลี่ยนสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์เป็นสารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร พบว่าเมื่อทำการปรับเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของพีริโรลมอนอเมอร์ตั้งแต่ 0.1 โมลต่อลิตร ถึง 0.5 โมลต่อลิตร ผลของการป้องกันการกัดกร่อนมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการสังเคราะห์ในสารละลายไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟตและสารละลายกรดซัลฟิวริก นั่นคือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพีริโรลมอนอเมอร์ การยึดเกาะระหว่างฟิล์มกับเหล็กกล้าไร้สนิมจะต่ำลงเนื่องจากความหนาที่เพิ่มมากขึ้น [20] ทำให้ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนมีค่าเพิ่มสูงขึ้น หรือประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนมีค่าต่ำลง ซึ่งแสดงได้ดังภาพที่ 4.9 และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับกราฟการสังเคราะห์พอลิพีริโรลในสารละลายไฮเดียมโดเดซิลซัลเฟตกับสารละลายกรดซัลฟิวริกในความเข้มข้นของสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์เท่ากัน

พบว่า การสังเคราะห์พอลิพีริโรลในสารละลายกรดออกซาลิกจะให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนสูงที่สุด และที่ความเข้มข้นของพีริโรลมอนอเมอร์ 0.1 โมลต่อลิตร จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนต่ำที่สุดดังภาพที่ 4.10 ซึ่งถือเป็นค่าที่สูงกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้สำหรับแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (ควรต่ำกว่า 16 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร, [48]) หรือค่าประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อนสูงที่สุดถึงร้อยละ 92.51



ภาพที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสของการกัดกร่อนและประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน โดยสังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และพีริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร



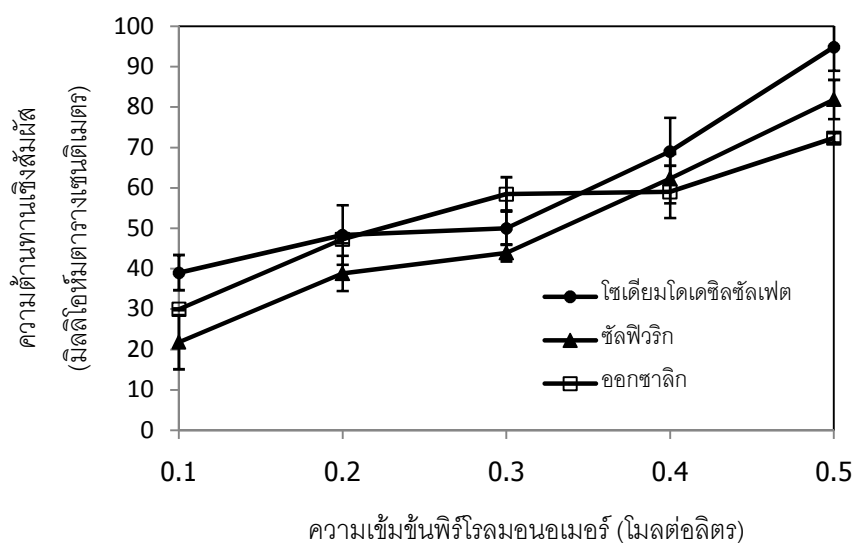
ภาพที่ 4.10 ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของการสังเคราะห์พอลิพีริโรลด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์พีริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร กับสารยับยั้งสนุนอิเล็กโทรไลต์สามชนิด

เมื่อนำชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ได้ไปทดสอบวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัส พบว่าในการสังเคราะห์พอลิพีโรลในสารละลายพีโรลมอนอเมอร์ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1 โมลต่อลิตร ถึง 0.5 โมลต่อลิตร กับสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ทั้งสามชนิด พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของพีโรลมอนอเมอร์ส่งผลให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากชิ้นงานที่เพิ่มความเข้มข้นของมอนอเมอร์ ผิดพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้จะหนากว่าดังตารางที่ 4.2 ส่งผลให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีแนวโน้มที่สูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.11 และการสังเคราะห์พอลิพีโรลในสารละลายพีโรลมอนอเมอร์ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์กรดซัลฟิวริก จะให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสต่ำที่สุด รองลงมาคือ กรดออกซาลิก และโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจากว่าโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตมีโครงสร้างที่ค่อนข้างใหญ่กว่าสารอีกสองชนิด โครงสร้างโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้จากสารละลายชนิดนี้จึงใหญ่กว่าอีกสองสารละลาย ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จากการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิพีโรลที่ทำการสังเคราะห์ได้ในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์สามชนิดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังภาพที่ 4.12 ก-ค จะเห็นว่าการสังเคราะห์ในสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ลักษณะอนุภาคของพอลิพีโรลจะเกาะกันหนาแน่นเมื่อเทียบกับการสังเคราะห์ในสารละลายอื่น ส่วนการสังเคราะห์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกและสารละลายกรดออกซาลิกจะให้ผิวของฟิล์มที่ได้มีลักษณะที่บางกว่า

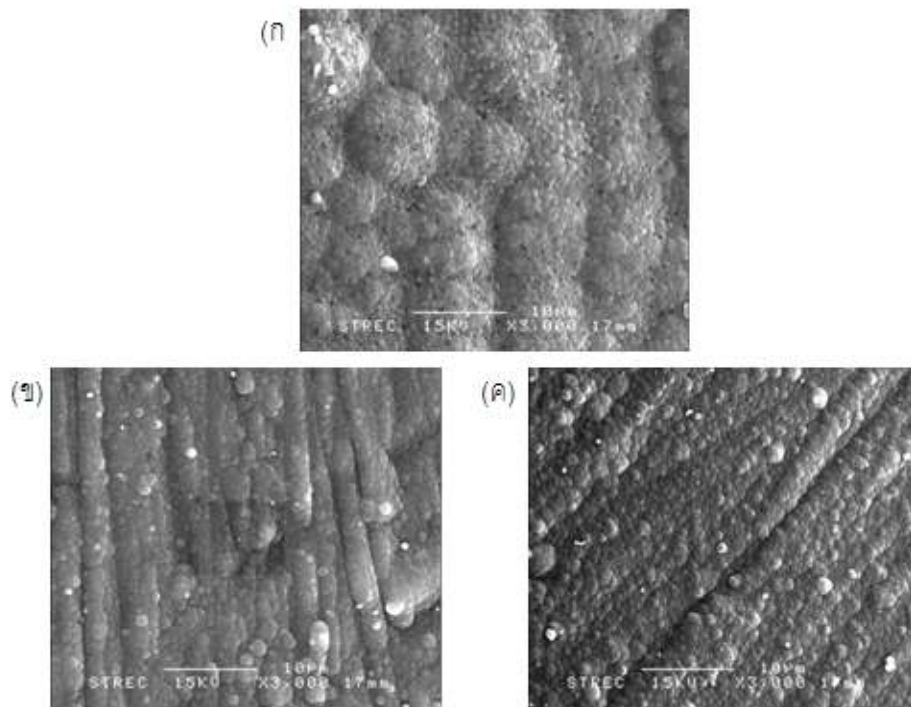
จากการศึกษาช่วงการเกิดปฏิกิริยาของพีโรลมอนอเมอร์ด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี ทำให้ทราบช่วงการเกิดปฏิกิริยาอยู่ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าประมาณ 0.5 โวลต์เทียบกับ SCE ดังนั้นในการศึกษาขั้นต่อไปจึงเลือกการสังเคราะห์พอลิพีโรลในสารละลายกรดออกซาลิก เนื่องจากให้ค่าการป้องกันการกัดกร่อนสูงที่สุด และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสที่ค่อนข้างต่ำ มาทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่และค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าและค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากการทดลองในส่วนนี้ต่อไป

**ตารางที่ 4.2** ความหนาของชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซเดียมโพลีเมอร์ในสารละลาย  
อิเล็กโทรไลต์โพโรมอเมอร์เข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร ในสารสนับสนุน  
อิเล็กโทรไลต์โซเดียมโพลีเมอร์ซัลเฟต กรดซัลฟิวริก และกรดออกซาลิก

ความเข้มข้นโพโรมอเมอร์ (โมลต่อลิตร)	ความหนา (ไมโครเมตร)		
	โซเดียมโพลีเมอร์ซัลเฟต	กรดซัลฟิวริก	กรดออกซาลิก
0.1	30.81±1.23	16.03±2.42	22.02±3.11
0.2	40.80±2.11	32.11±1.21	38.11±2.15
0.3	54.52±2.42	37.32±2.32	56.14±2.32
0.4	65.42±3.25	41.51±2.17	54.34±1.27
0.5	89.23±2.52	43.12±3.13	59.42±2.41



**ภาพที่ 4.11** ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีโซเดียมโพลีเมอร์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โพโรมอเมอร์เข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลต่อลิตร  
กับสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์สามชนิด



ภาพที่ 4.12 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิไพร์โรลโดยสังเคราะห์ในสารละลายอเล็กโทรไลต์ของไพร์โรลมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตรกับสารสนับสนุนอเล็กโทรไลต์ (ก) โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร (ข) กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และ (ค) กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่กำลังขยาย 3,000 เท่า

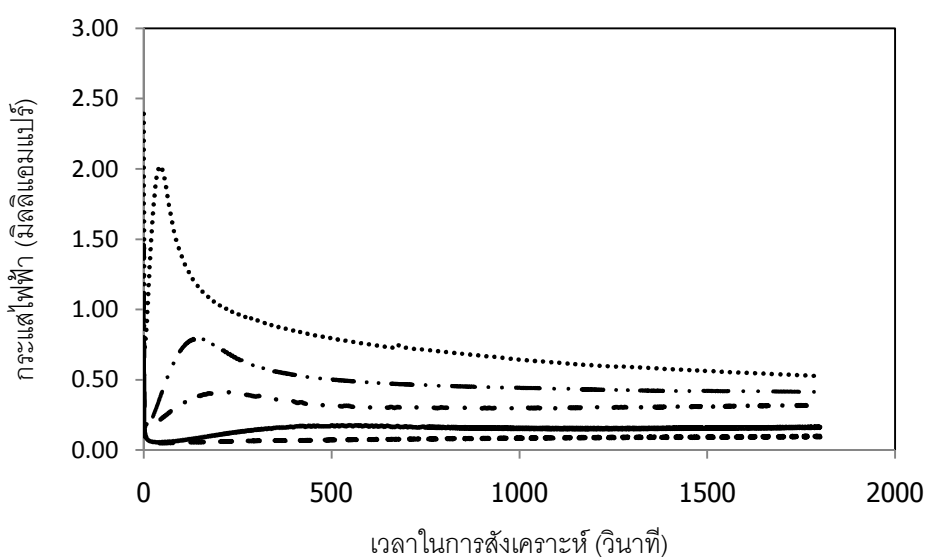
#### 4.3 ศึกษาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันและภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลแบบชั้นเดียวบนเหล็กกล้าไร้สนิมในสารสนับสนุนอเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร โดยเทคนิคให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่

การทดลองในส่วนนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนวิธีในการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลลงบนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีเคมีไฟฟ้าอีกวิธีหนึ่ง คือวิธีกำหนดให้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำการป้อนให้กับระบบมีค่าคงที่ (Potentiostatic) โดยจะศึกษาถึงผลของศักย์ไฟฟ้าในช่วงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและศึกษาถึงผลของเวลาในการสังเคราะห์ที่มีต่อสมบัติฟิล์มพอลิไพร์โรลที่ทำการสังเคราะห์ได้ ซึ่งทำการสังเคราะห์ในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าที่เกิดปฏิกิริยาของพอลิไพร์โรล ที่ได้จากการศึกษาช่วงการเกิดปฏิกิริยาจากเทคนิคไซคลิกโวลต์แอมเพอรี โดยทำการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลในสารละลาย

ของพีโรไลมอโนเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิก ความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เนื่องจากเป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากหัวข้อที่ 4.2

#### 4.3.1 ผลของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์

จากการศึกษาช่วงศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชันของพอลิพีโรไลในสารละลายกรดออกซาลิกดังภาพที่ 4.3 พบว่าช่วงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอยู่ที่ประมาณ 0.45 ถึง 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE การทดลองในส่วนนี้จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบในช่วงศักย์ไฟฟ้างดกล่าวโดยกำหนดเวลาในการสังเคราะห์เท่ากับ 1800 วินาทีเท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 4.13 พบว่า ในช่วงแรกค่ากระแสไฟฟ้าจะลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดออกไซด์ฟิล์มที่ผิวของเหล็กกล้าไร้สนิม หลังจากนั้นค่ากระแสไฟฟ้าจะเริ่มเพิ่มขึ้นในเวลาต่อมา เนื่องจากการเกิดฟิล์มในระยะนิวเคลียชัน (Nucleation) และต่อมากระแสไฟฟ้าเริ่มคงที่ เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันมากขึ้นทำให้ฟิล์มที่เคลือบขึ้นงานมีปริมาณมากขึ้น ตามลำดับ [49]

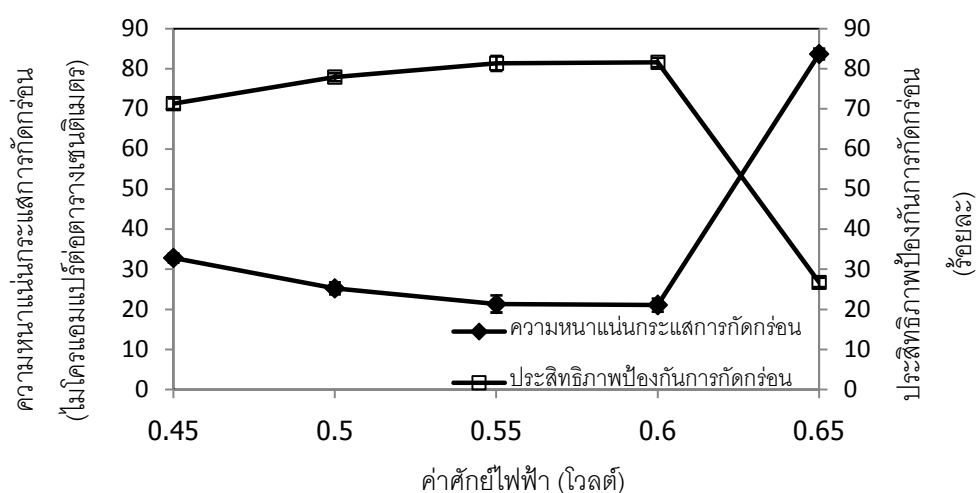


**ภาพที่ 4.13** ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการสังเคราะห์พอลิพีโรไลในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของพีโรไลมอโนเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า (— — —) 0.45 โวลต์ (——) 0.50 โวลต์ (- . - .) 0.55 โวลต์ (— . .) 0.60 โวลต์ และ (.....) 0.65 โวลต์

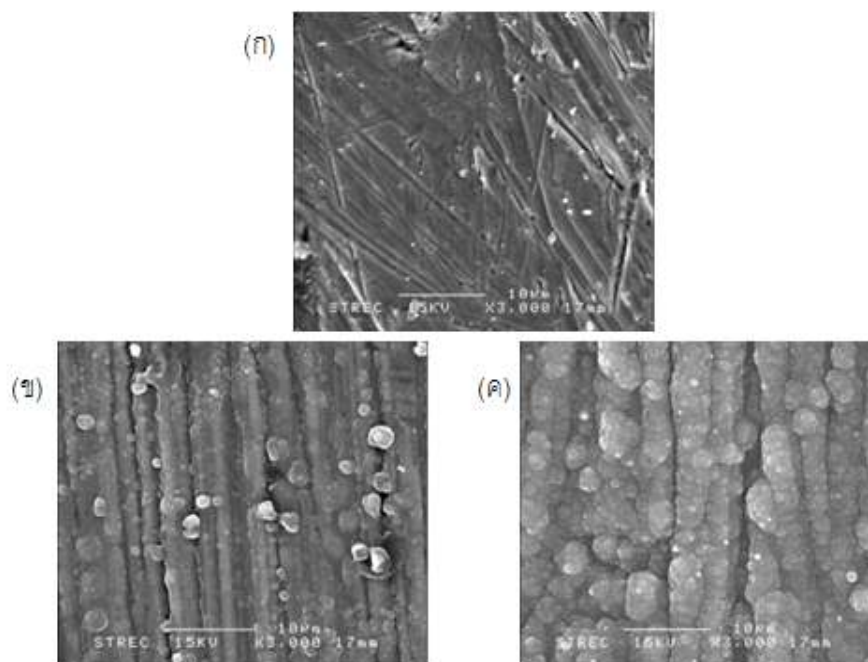
การสังเคราะห์ฟิล์มพอลิพีโรไลในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า 0.45 ถึง 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE พบว่าเมื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้าในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นหรืออัตราการ



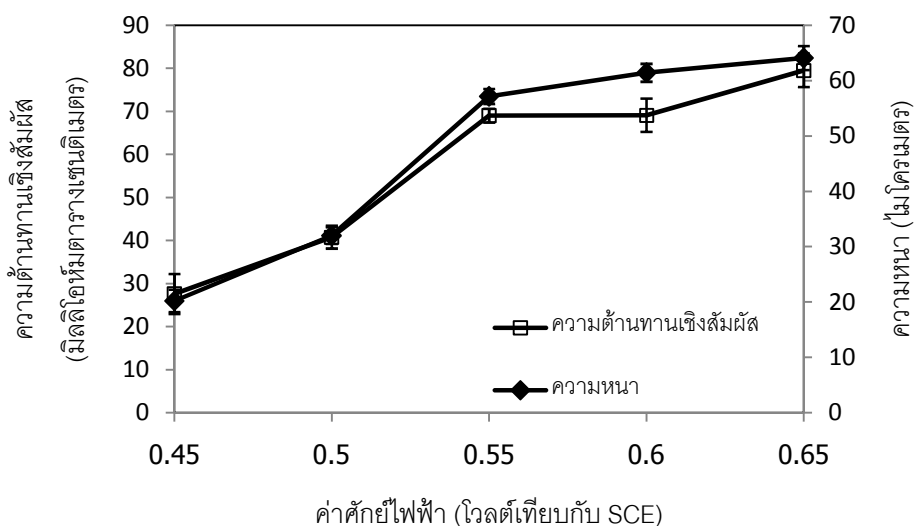
เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันมากขึ้น จากนั้นนำชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ได้ไปทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร พบว่าการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE จะให้ประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อนมากที่สุดที่ร้อยละ 81.59 ดังแสดงในภาพที่ 4.14 โดยเมื่อค่าศักย์ไฟฟ้ามากขึ้นที่ระยะเวลาการสังเคราะห์เท่ากัน การป้องกันการกัดกร่อนจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE การป้องกันการกัดกร่อนจะลดลง อาจเนื่องจากผลของโครงสร้างพอลิพีร์โรลฟิล์มที่ไม่เหมาะสมจากการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพอลิพีร์โรลที่ทำการสังเคราะห์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าต่างกัน ดังภาพที่ 4.15 ก-ค และเนื่องจากการทดลองในส่วนนี้ได้ทำการสังเคราะห์เป็นเวลา 1800 วินาที ซึ่งเวลาในการสังเคราะห์อาจนานเกินไปทำให้การป้องกันการกัดกร่อนยังไม่ดีมาก ในการทดลองต่อไปจึงได้ทำการปรับเปลี่ยนเวลาในการสังเคราะห์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ดีที่สุดในส่วนนี้เป็นช่วงเวลาการสังเคราะห์ตั้งแต่ 300 – 1600 วินาที และเมื่อนำชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ได้ที่ภาวะค่าความต่างศักย์ต่างๆ ไปทดสอบวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัส พบว่าเมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าในการสังเคราะห์ส่งผลให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงานมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากผลของความหนาที่มากขึ้น โดยชิ้นงานที่เพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้า ผิวฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ได้จะหนากว่า ส่งผลให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.16



**ภาพที่ 4.14** ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสของการกัดกร่อนและประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน โดยทำการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า 0.45 โวลต์ ถึง 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE เวลาในการสังเคราะห์ 1800 วินาที



ภาพที่ 4.15 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิไพร์โรลโดยสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่า ศักย์ไฟฟ้าคงที่ ที่ช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า (ก) 0.45 โวลต์ (ข) 0.60 โวลต์ และ (ค) 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE เวลาในการสังเคราะห์ 1800 วินาที

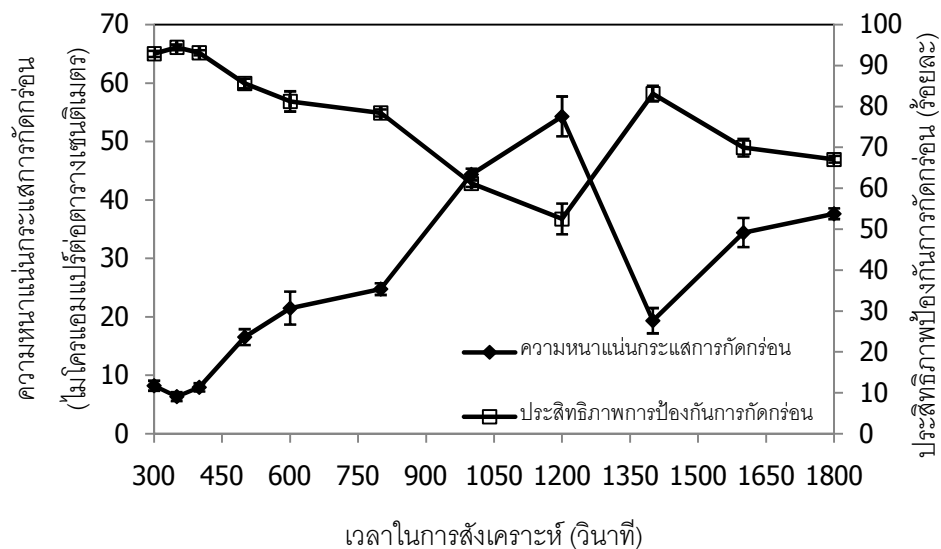


ภาพที่ 4.16 ค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์และความหนาของชั้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่า ศักย์ไฟฟ้าคงที่ ที่ช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า 0.45 โวลต์ ถึง 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE เวลาในการสังเคราะห์ 1800 วินาที

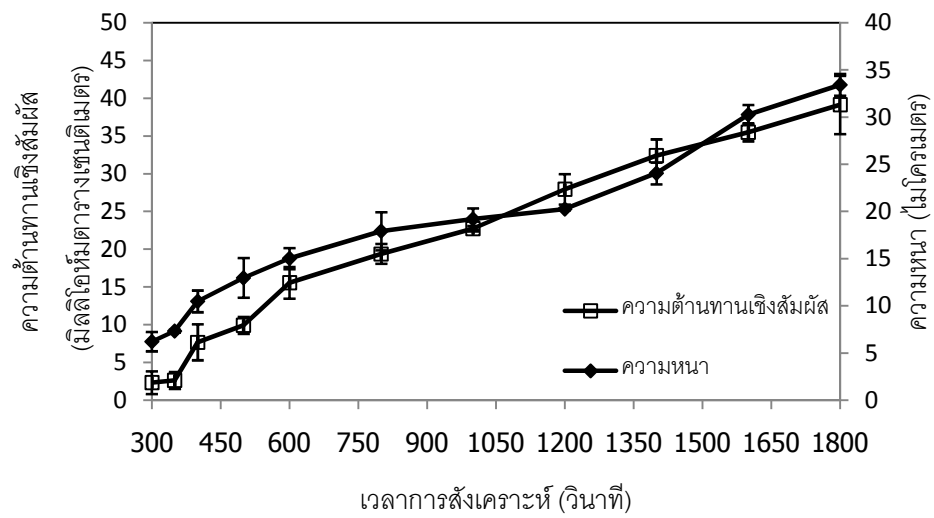
#### 4.3.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์

การทดลองในส่วนนี้ทำการศึกษาผลของเวลาในการสังเคราะห์ โดยกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเท่ากับ 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE เนื่องจากเป็นภาวะที่ดีที่สุดจากการสังเคราะห์ในตอนต้นที่ 4.3.1 และทำการปรับเปลี่ยนเวลาในการสังเคราะห์ตั้งแต่ 200 วินาที ถึง 1800 วินาที เพื่อหาภาวะที่ดีที่สุดต่อไป เนื่องจากตั้งสมมุติฐานว่าเวลาในการสังเคราะห์จะส่งผลถึงการจัดเรียงตัวของอนุภาคพอลิเมอร์และความหนาที่ทำการสังเคราะห์ได้ เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนพบว่าเมื่อเวลาในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นในช่วง 300 ถึง 350 วินาทีแรก ดังแสดงในภาพที่ 4.17 เนื่องจากของลักษณะฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ได้นั้นเหมาะสมสำหรับการป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งสามารถยืนยันได้จากผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิไพร์โรลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในภาพที่ 4.19 ก-ข แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์ได้ที่เวลา 300 และ 350 วินาที โดยที่เวลาการสังเคราะห์ 350 วินาทีให้ค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนต่ำที่สุด หรือให้ค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนมากที่สุดถึงร้อยละ 94.41 โดยที่ภาวะการสังเคราะห์นี้ถือว่าให้ค่าในการป้องกันการกัดกร่อนดีที่สุด เมื่อเทียบกับการทดลองที่ผ่านมาทั้งหมด แต่เมื่อระยะเวลาในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 400 ถึง 1200 วินาทีพบว่า ค่าประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อนจะลดลง เนื่องจากการยึดติดของฟิล์มอาจมีแนวโน้มลดลงเมื่อความหนาเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อเวลาการสังเคราะห์ตั้งแต่เวลา 1400 วินาทีไปนั้น ค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนกลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ทั้งนี้ที่ค่าการป้องกันการกัดกร่อนไม่เป็นแนวโน้มเดียวกันอาจเนื่องจากการจัดเรียงตัวของอนุภาคพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้มีหลายรูปแบบ โดยการขจัดตัวไปมาของสายโซ่พอลิเมอร์มีอยู่สามลักษณะ คือแบบงอ แบบบิด และแบบเกลียว [50] และเมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบค่าความต้านทานเชิงสัมผัสพบว่า เมื่อเวลาในการสังเคราะห์มากขึ้น ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงานจะมีค่ามากขึ้นตามความหนาของชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.18 โดยความหนาที่เพิ่มขึ้นเป็นไปตามหลักการของกฎฟาราเดย์

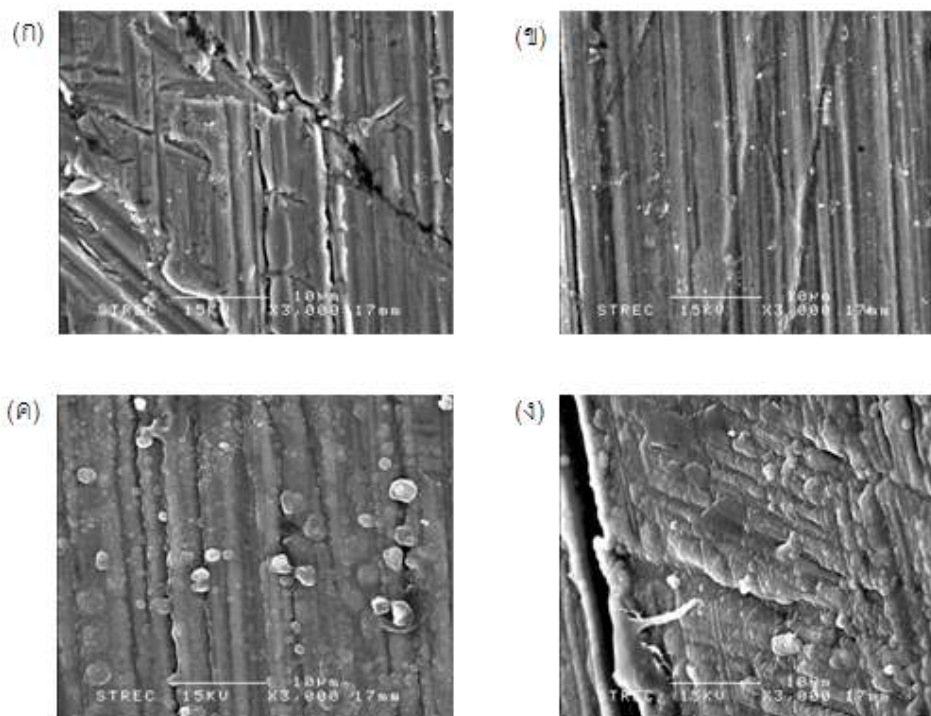
เมื่อนำชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ที่เวลาต่างๆ ไปทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของพอลิไพร์โรลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากภาพที่ 4.19 ก-ง แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์ได้ที่เวลาต่าง ๆ พบว่า (ก) ที่เวลาการสังเคราะห์ 300 วินาที ฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ได้มีผิวไม่สม่ำเสมอทำให้เห็นรอยที่มาจากขั้นตอนการขัดเพื่อเพิ่มการยึดเกาะของเหล็กกล้าไร้สนิมอย่างชัดเจน และ (ข) เมื่อเพิ่มเวลาเป็น 350 วินาทีพบว่าฟิล์มที่ทำการเคลือบเริ่มมีผิวที่สม่ำเสมอขึ้น ซึ่งผลสอดคล้องกับการทดสอบการกัดกร่อนที่มีการป้องกันการกัดกร่อนดีที่สุด (ค) ที่เวลาการสังเคราะห์ 1400 วินาที พบว่าการก่อตัวของอนุภาคพอลิไพร์โรลเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และ (ง) ที่เวลาการสังเคราะห์ 1800 วินาทีพบว่าผิวของพอลิไพร์โรลที่ทำการสังเคราะห์ได้มีความขรุขระอย่างชัดเจน อีกทั้งยังพบรอยแตกเกิดขึ้นบริเวณผิวฟิล์ม



ภาพที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนและประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน โดยทำการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ 300 ถึง 1800 วินาที ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.60 โวลต์เทียบกับ SCE



ภาพที่ 4.18 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่าความหนาของชั้นงานที่ทำกรสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ 300 ถึง 1800 วินาที ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.60 โวลต์เทียบกับ SCE



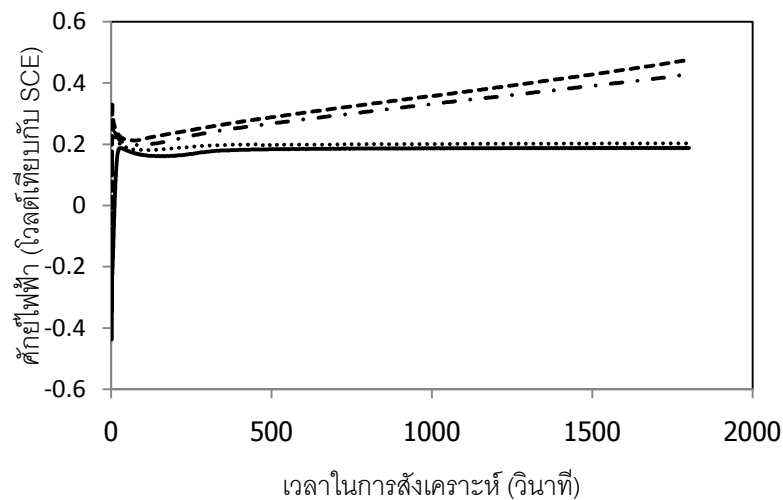
ภาพที่ 4.19 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิพีร์โรลโดยสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ที่ช่วงเวลาการสังเคราะห์ (ก) 300 วินาที (ข) 350 วินาที (ค) 1400 วินาที และ (ง) 1800 วินาที ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าในการสังเคราะห์ 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE

4.4 ศึกษาช่วงค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันและภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลแบบชั้นเดียวบนเหล็กกล้าไร้สนิมในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร โดยเทคนิคให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่

การทดลองในส่วนนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนวิธีในการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลลงบนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีเคมีไฟฟ้า โดยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำการป้อนให้กับระบบมีค่าคงที่ ศึกษาถึงผลของค่ากระแสไฟฟ้าในช่วงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและศึกษาถึงผลของเวลาในการสังเคราะห์ที่มีต่อสมบัติฟิล์มพอลิพีร์โรลที่ทำการสังเคราะห์ได้ โดยทำการสังเคราะห์พอลิพีร์โรลในสารละลายของพีร์โรลมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และสารละลายสนับสนุนกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร เนื่องจากเป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดจากหัวข้อที่ 4.3

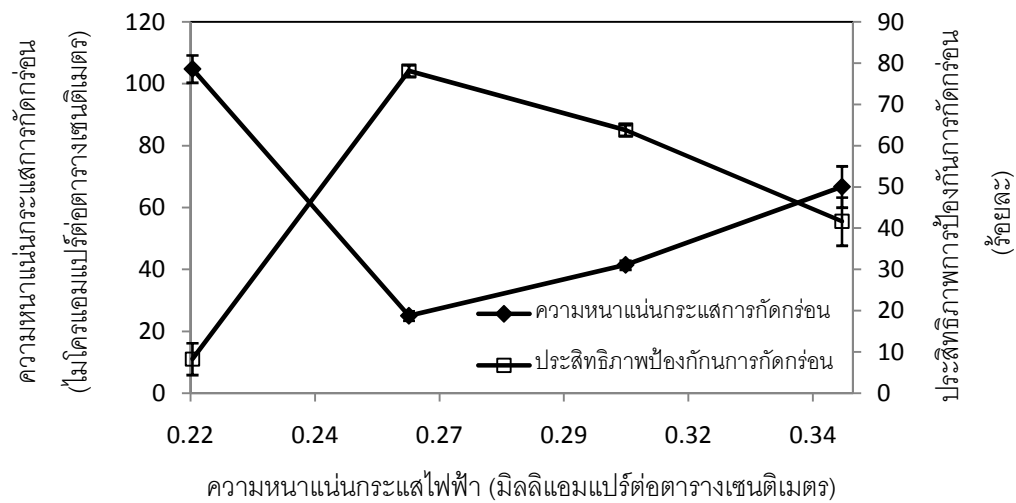
#### 4.4.1 ผลของค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์

จากการศึกษาช่วงกระแสไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิพีร์โรลในสารละลายกรดออกซาลิกของการสังเคราะห์ในตอนที่ 4.3 ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE ที่เวลา 1800 วินาที ดังภาพที่ 4.13 พบว่าช่วงค่ากระแสที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอยู่ที่ประมาณ 0.5 ถึง 0.8 มิลลิแอมแปร์ การทดลองในส่วนนี้จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบในช่วงค่ากระแสไฟฟ้างดกล่าว โดยกำหนดเวลาในการสังเคราะห์เท่ากับ 1800 วินาทีเท่ากัน ดังแสดงในภาพที่ 4.20

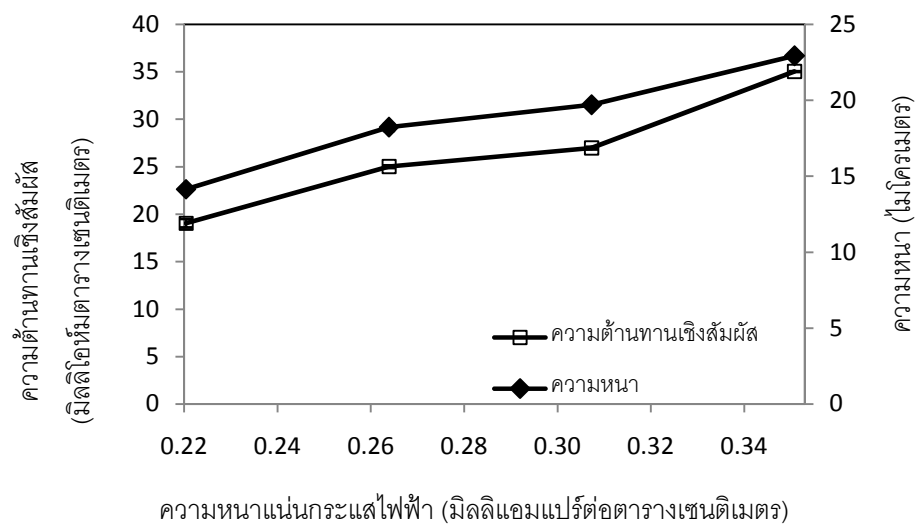


**ภาพที่ 4.20** ความสัมพันธ์ระหว่างค่าศักย์ไฟฟ้ากับเวลาในการสังเคราะห์พอลิพีริโวลในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของพีริโวลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่ค่ากระแสไฟฟ้าศักย์ไฟฟ้า (—) 0.5 มิลลิแอมแปร์ (- - -) 0.6 มิลลิแอมแปร์ (.....) 0.7 มิลลิแอมแปร์ (— · —) 0.8 มิลลิแอมแปร์ ในเวลาการสังเคราะห์ 1800 วินาที

เมื่อนำชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ได้มาทดสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนพบว่าที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าของการสังเคราะห์ 0.22 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการสังเคราะห์ 1800 วินาที ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนมีค่าที่ต่ำมาก เนื่องจากที่ค่ากระแสนี้อาจยังน้อยเกินไป สำหรับการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้ฟิล์มที่ทำการเคลือบได้มีสมบัติไม่ดี และเมื่อเพิ่มค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าเป็น 0.26 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าให้ค่ากระแสการกัดกร่อนออกมาต่ำที่สุด หรือให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนร้อยละ 78.13 ดังแสดงในภาพที่ 4.21 และเมื่อนำไปวัดความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงานพบว่า เมื่อเพิ่มค่ากระแสในการสังเคราะห์จะส่งผลให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันมากขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงานเพิ่มขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.22 ซึ่งเมื่อทำการพิจารณาจากลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากภาพที่ 4.23 ก - ข แสดงลักษณะพื้นผิวของฟิล์มพอลิพีริโวลที่สังเคราะห์ได้ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.26 และ 0.35 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มค่ากระแสไฟฟ้า อัตราการพอกพูนของอนุภาคพอลิเมอร์จะเพิ่มมากขึ้น โดยที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.35 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จะทำให้ฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ได้เกิดรอยแตกบริเวณผิว เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปอาจมากเกินไป จึงเป็นเหตุผลให้ค่าการป้องกันการกัดกร่อนออกมาไม่ดี

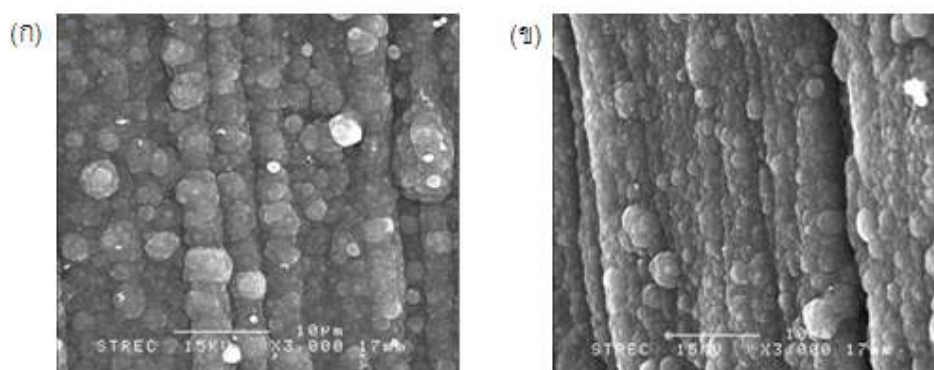


ภาพที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการกักถ่วงและประสิทธิภาพป้องกันกักถ่วง โดยทำการสังเคราะห์พอลิพีไรลด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.22 ถึง 0.35 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการสังเคราะห์ 1800 วินาที



ภาพที่ 4.22 ค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์และค่าความหนาของชั้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.22 ถึง 0.35 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เวลาในการสังเคราะห์ 1800 วินาที

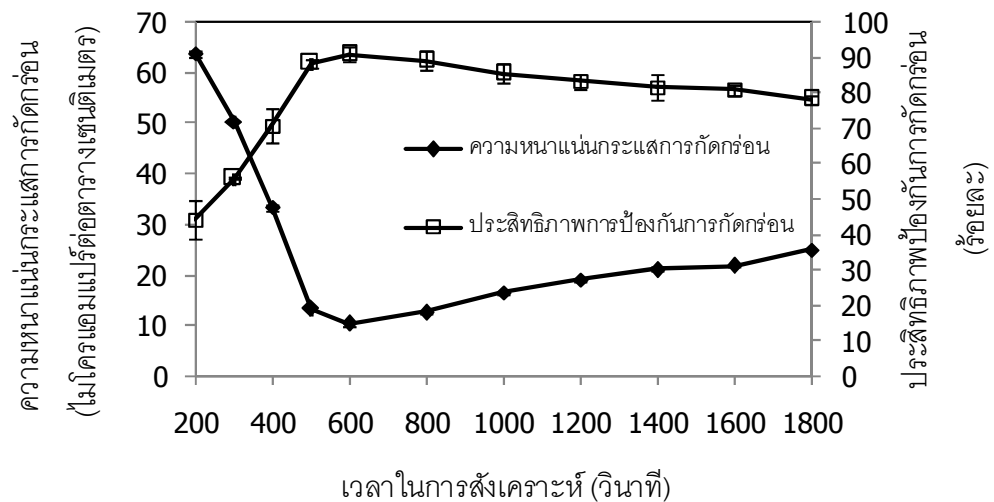




ภาพที่ 4.23 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิไพร์โรลโดยสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากระแสไฟฟ้า (ก) 0.26 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และ (ข) 0.35 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ที่เวลาในการสังเคราะห์ 1800 วินาที

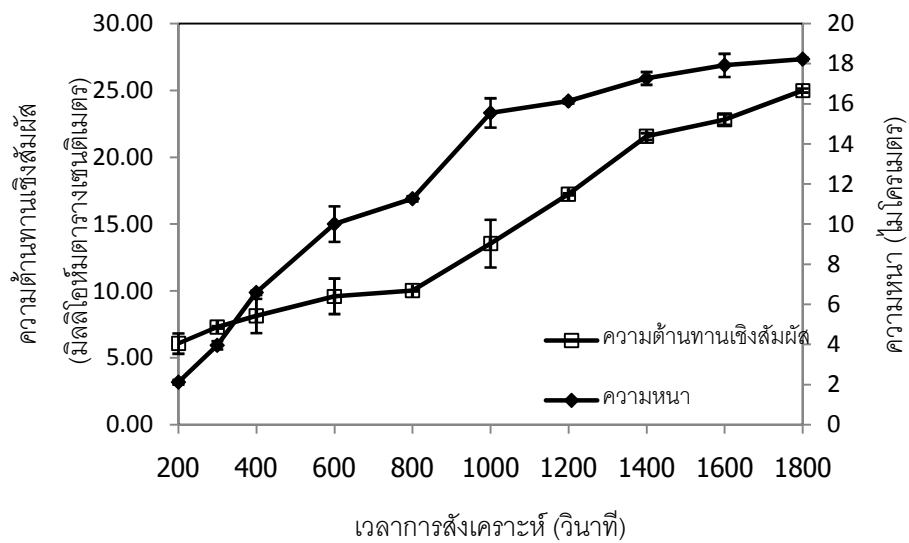
#### 4.4.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์

การทดลองในส่วนนี้ทำการศึกษาผลของเวลาในการสังเคราะห์ โดยกำหนดค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนเท่ากับ 0.26 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากเป็นภาวะที่ดีที่สุดจากการสังเคราะห์ในตอนต้นที่ 4.4.1 และทำการปรับเปลี่ยนเวลาในการสังเคราะห์ตั้งแต่ 200 วินาที ถึง 1800 วินาที เพื่อหาภาวะที่ดีที่สุดต่อไป เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบการป้องกันการกัดกร่อน ดังแสดงในภาพที่ 4.24 พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์ตั้งแต่ 200 ถึง 600 วินาที ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 91.06 แต่เมื่อเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์ตั้งแต่ 800 ถึง 1800 วินาทีพบว่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนค่อยๆลดลง เนื่องจากความหนาที่เพิ่มมากขึ้นทำให้การยึดเกาะของพอลิไพร์โรลฟิล์มกับเหล็กกล้าไร้สนิมไม่ดี ดังแสดงในภาพที่ 4.25

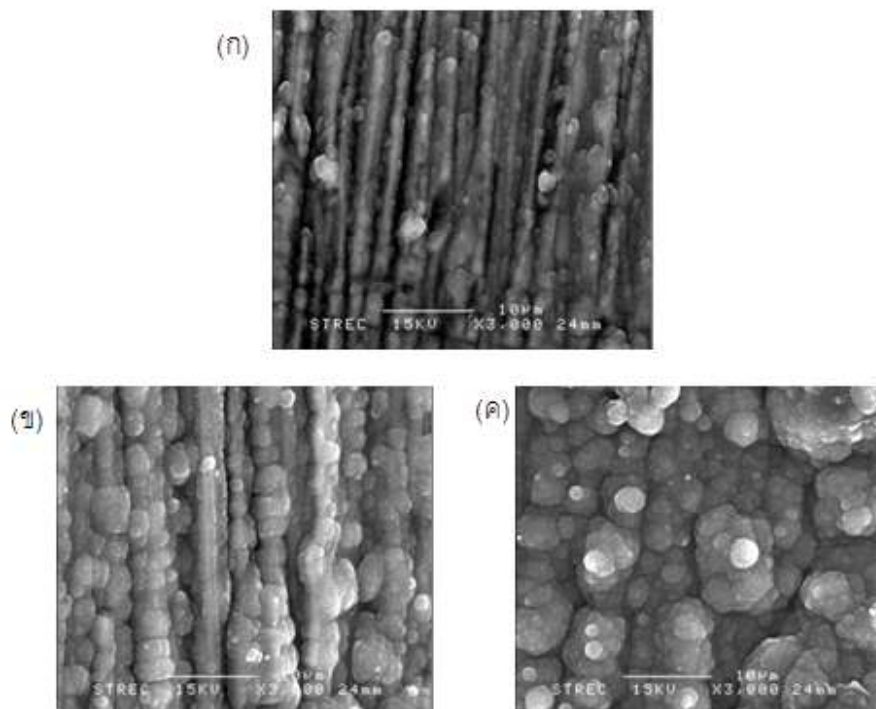


**ภาพที่ 4.24** ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการกักคร่อนและประสิทธิภาพป้องกันการกักคร่อน โดยทำการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ 200 ถึง 1800 วินาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.26 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

เมื่อนำชิ้นงานไปวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัส พบว่าเมื่อเวลาในการสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้มีความหนาเพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสจึงสูงขึ้นตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.25 จากนั้นนำชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ไปศึกษาลักษณะโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์อนุภาคพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้มีมากขึ้นจริง ดังแสดงในภาพที่ 4.26 ก - ค และพบว่าที่ 1800 วินาที ไม่พบรอยแตกของผิวพอลิไพร์โรล จึงทำให้ค่าการกักคร่อนของชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ได้ มีการประสิทธิภาพการป้องกันการกักคร่อนที่ดีกว่าวิธีคงค่าศักย์ไฟฟ้าเมื่อเทียบที่เวลาการสังเคราะห์เดียวกัน



ภาพที่ 4.25 ค่าความต้านทานเชิงสัมพันธ์และค่าความหนาของชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ 200 ถึง 1800 วินาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.26 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร



ภาพที่ 4.26 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิไพร์โรลโดยสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ที่เวลาการสังเคราะห์ (ก) 300 วินาที (ข) 600 วินาที และ(ค) 1800 วินาที ที่ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.26 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร

จากการสังเคราะห์ด้วยพอลิพีริโรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยการสังเคราะห์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า ได้แก่ วิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่และวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ พบว่าภาวะที่ดีที่สุดในการป้องกันการกัดกร่อน คือการสังเคราะห์พอลิพีริโรลด้วยวิธีคงค่าศักย์ไฟฟ้า ที่ 0.6 โวลต์ เวลาในการสังเคราะห์ 350 วินาที โดยมีประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนร้อยละ 94.41 และค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์เท่ากับ 2.62 มิลลิโอมตารางเซนติเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.3

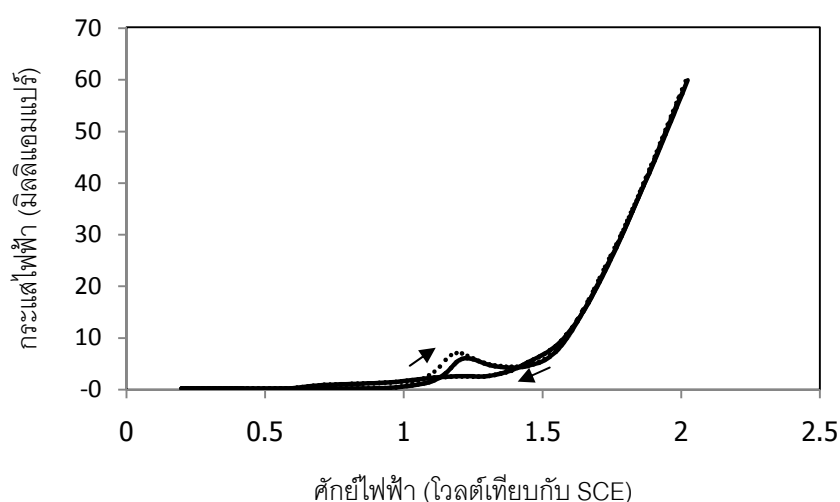
**ตารางที่ 4.3** การเปรียบเทียบการสังเคราะห์พอลิพีริโรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

วิธีการสังเคราะห์	ภาวะ	ประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน (ร้อยละ)	ความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ (มิลลิโอมตารางเซนติเมตร)
ค่ามาตรฐาน [25]		> 86	< 20
เหล็กกล้าไร้สนิม		82	25
ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่	0.6 โวลต์ 350 วินาที	94.41±0.67	2.62±0.11
ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่	0.6 มิลลิแอมแปร์ 600 วินาที	91.06±2.18	9.62±1.33

#### 4.5 ศึกษาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันและภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิแอนิลีนบนชั้นของพอลิพีริโรลบนเหล็กกล้าไร้สนิม ในสารละลายกรดออกซาลิก โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

การทดลองทำการศึกษานหาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าที่มอนอเมอร์แอนิลีนเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยใช้วิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี ทำการสังเคราะห์ในสารละลาย แอนิลีนมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และสารละลายกรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร [48] ค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ 1.3 และค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์เท่ากับ 31.2 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร โดยทำการตรวจจรวดค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วง +0.2 ถึง 2.0 โวลต์เทียบกับ SCE ด้วยอัตราการตรวจจรวด 20 มิลลิโวลต์ต่อวินาที พบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันของแอนิลีนมอนอเมอร์จะเริ่มเกิดที่ประมาณ 1.1 ถึง 1.5 โวลต์เทียบกับ SCE ดังแสดงในภาพที่ 4.27

เมื่อทราบช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิแอนิไลน์ว่าอยู่ที่ประมาณ 0.9 ถึง 1.1 โวลต์เทียบกับ SCE จึงได้ใช้ช่วงการตรวจกราดค่าศักย์ไฟฟ้างดังที่ได้กล่าวมา มาทำการศึกษาหาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าที่มอนอเมอร์แอนิไลน์เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนชั้นผิวของพอลิไพร์โรลที่ทำการสังเคราะห์ไว้ จากภาพที่ 4.27 พบว่าช่วงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิแอนิไลน์บนพอลิไพร์โรลอยู่ที่ประมาณ 1.0 ถึง 1.5 โวลต์เทียบกับ SCE ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะนำค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงที่เกิดปฏิกิริยาที่ได้ในช่วงนี้มาทำการสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์บนชั้นของพอลิไพร์โรลโดยเทคนิคให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่



**ภาพที่ 4.27** ไชคลิกโวลแทมโมแกรมการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเมอร์ไพร์โรลบนชั้นของพอลิแอนิไลน์บนเหล็กกล้าไร้สนิม (—) และพอลิแอนิไลน์บนชั้นพอลิไพร์โรล (.....) ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์แอนิไลน์มอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และสารละลายกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

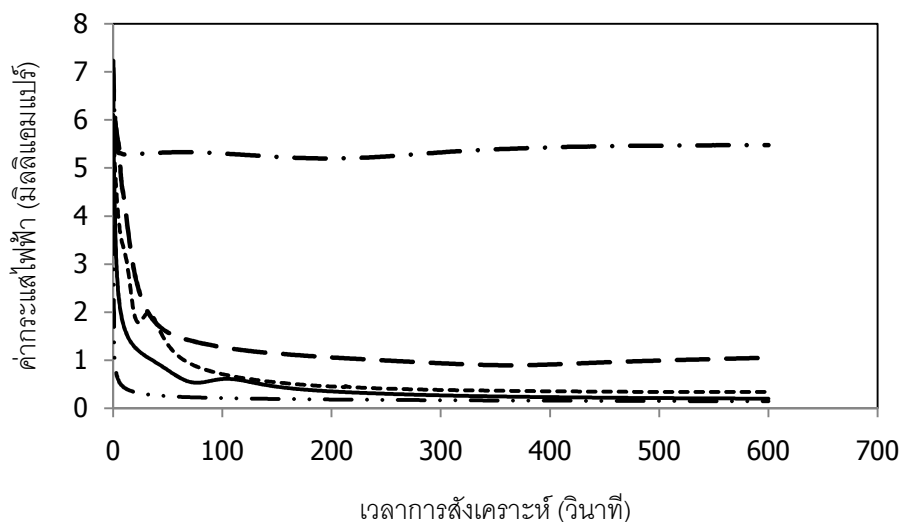
**4.6** ศึกษาช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของพอลิเมอร์ไพร์โรลและภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์บนชั้นพอลิไพร์โรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร โดยเทคนิคให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่

การทดลองในส่วนนี้ได้ทำการสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์บนชั้นของพอลิไพร์โรลด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ โดยจะศึกษาถึงผลของศักย์ไฟฟ้าในช่วงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและศึกษาถึงผลของเวลาในการสังเคราะห์ที่มีต่อสมบัติฟิล์มพอลิแอนิไลน์ที่ทำการสังเคราะห์ได้ โดยทำการ

สังเคราะห์ในสารละลายของแอนิซีนมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร [20]

#### 4.6.1 ผลของค่าศักย์ไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์

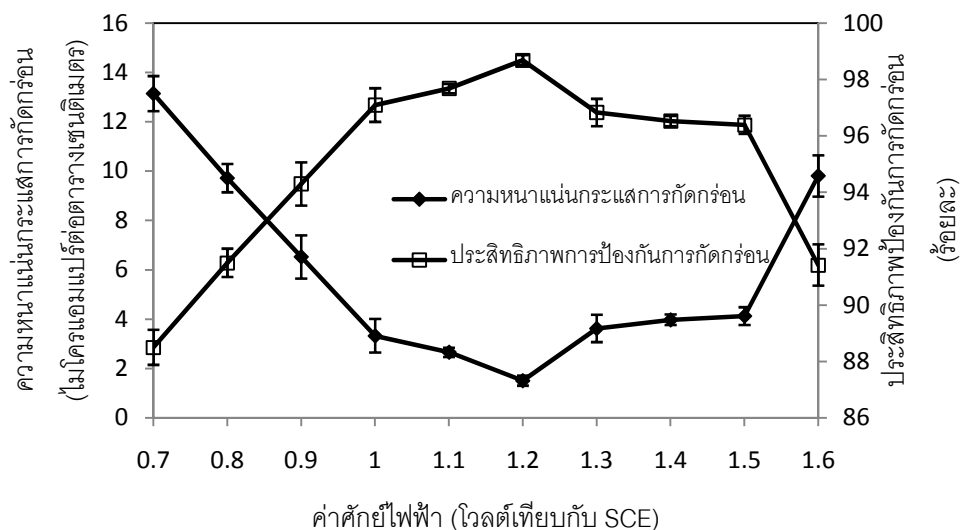
จากการศึกษาช่วงศักย์ไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิแอนิซีนในสารละลายกรดออกซาลิกดังภาพที่ 4.27 พบว่าช่วงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอยู่ที่ประมาณ 1 ถึง 1.5 โวลต์เทียบกับ SCE การทดลองในส่วนนี้จึงได้ทำการปรับเปลี่ยนค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้กับระบบในช่วงศักย์ไฟฟ้า 0.7 ถึง 1.6 โวลต์เทียบกับ SCE โดยกำหนดเวลาในการสังเคราะห์เท่ากับ 600 วินาทีเท่ากัน พบว่าเมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าทำให้ค่ากระแสหรืออัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิแอนิซีนเพิ่มขึ้นนั่นเอง ดังแสดงในภาพที่ 4.28



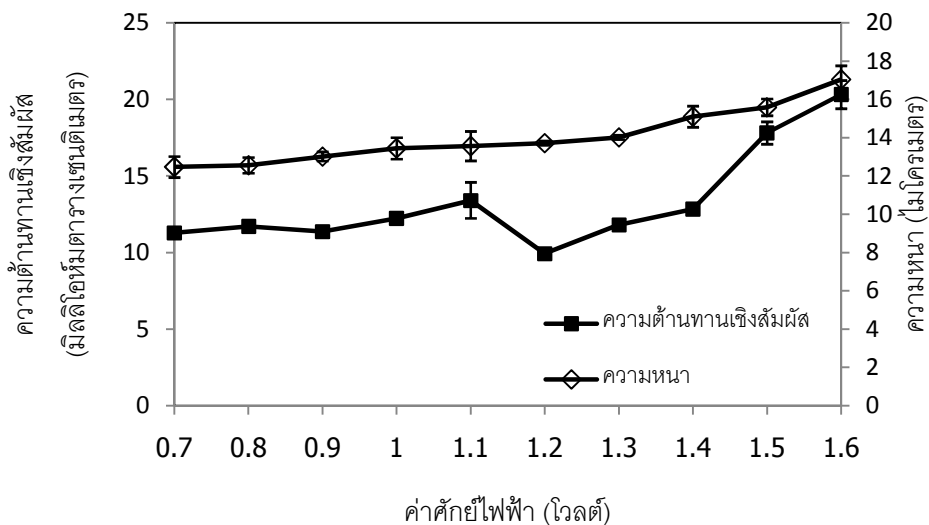
ภาพที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการสังเคราะห์พอลิแอนิซีนบนชั้นพอลิพีวีแอล ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของแอนิซีนมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า (— · ·) 0.7 โวลต์ (—) 1.0 โวลต์ (- - -) 1.2 โวลต์ (— -) 1.4 โวลต์ และ (— · · ·) 1.6 โวลต์ เวลาการสังเคราะห์ 600 วินาที

จากภาพที่ 4.29 เมื่อนำไปทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนพบว่าเมื่อเพิ่มศักย์ไฟฟ้าในการสังเคราะห์ตั้งแต่ 0.7 โวลต์ ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนจะเพิ่มขึ้นจนถึงค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE ซึ่งมีประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนร้อยละ 98.69 อาจเนื่องมาจากที่ค่าศักย์ไฟฟ้านี้ทำให้พอลิแอนิซีนที่ทำการสังเคราะห์ได้มีลักษณะโครงสร้างที่เหมาะสมและสร้างพันธะกับพอลิพีวีแอลได้ดี [51] แต่เมื่อทำการเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 1.3 ถึง 1.6 โวลต์ ค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนจะลดต่ำลง เนื่องจากผลของความหนาของชั้นพอลิแอนิซีนที่

ทำการสังเคราะห์ได้บนชั้นพอลิพีไรด์ และที่ค่าศักย์ไฟฟ้าสูงๆ อาจทำให้พอลิเอนิลีนเปลี่ยนโครงสร้างเป็นรูปแบบอื่นที่ทำให้สร้างพันธะยึดติดกับชั้นของพอลิพีไรด์ไม่ได้ [52] จากนั้นได้นำชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ได้ไปวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัส พบว่าเมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ทำให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากผลของความหนา แต่ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 ถึง 1.4 โวลต์เทียบกับ SCE จะพบว่าค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีค่าลดลงไม่เกินไปตามแนวโน้ม ดังแสดงในภาพที่ 4.30 อาจเนื่องจากว่า ที่ค่าศักย์ไฟฟ้าในช่วงนี้ทำให้โครงสร้างของพอลิเอนิลีนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดี และสามารถฉีกตัวแน่นกับชั้นของพอลิพีไรด์ที่ทำการสังเคราะห์ไว้เป็นชั้นแรก



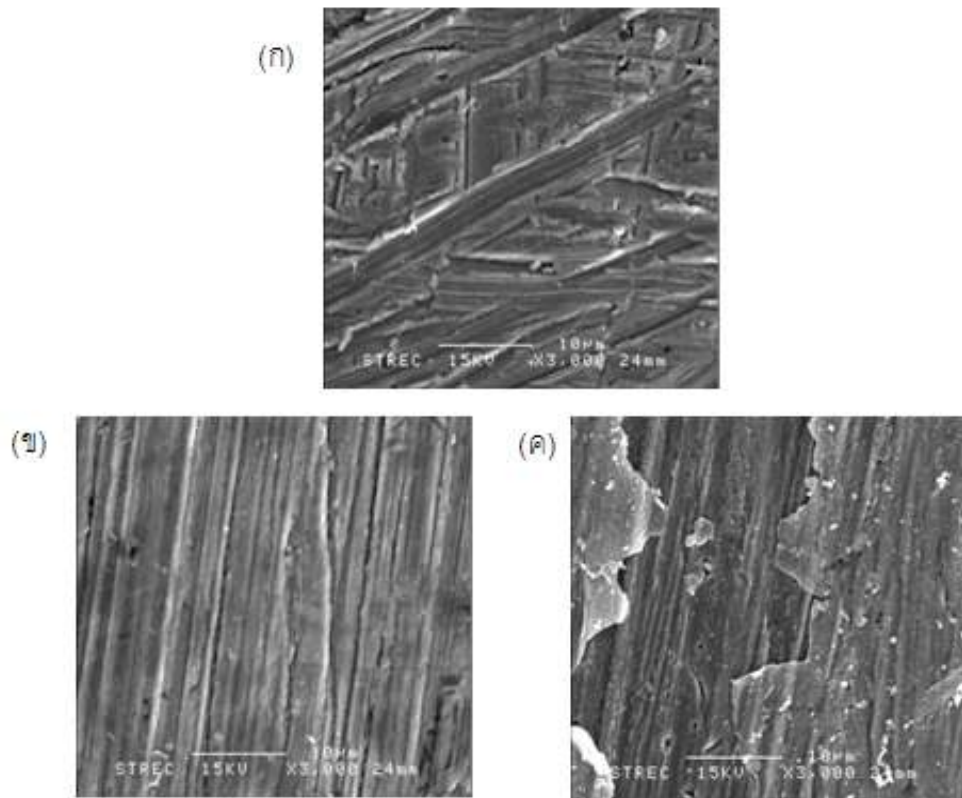
**ภาพที่ 4.29** ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการกักตร้อนและประสิทธิภาพป้องกันการกักตร้อน โดยทำการสังเคราะห์พอลิเอนิลีนบนชั้นพอลิพีไรด์ด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า 0.7 ถึง 1.6 โวลต์เทียบกับ SCE เวลาในการสังเคราะห์ 600 วินาที



ภาพที่ 4.30 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่าความหนาของชั้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า 0.7 ถึง 1.6 โวลต์เทียบกับ SCE เวลาในการสังเคราะห์ 600 วินาที

เมื่อนำชั้นงานที่ทำการสังเคราะห์ได้ไปดูลักษณะพื้นผิวที่เกิดขึ้นพบว่า เมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำการสังเคราะห์ ส่งผลให้เกิดพอลิแอนิไลน์บนชั้นของพอลิพีร์โรลเพิ่มมากขึ้น และที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.6 โวลต์เทียบกับ SCE เกิดรอบแตกขึ้นที่ผิวพอลิแอนิไลน์ที่สังเคราะห์ได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.31 จึงเป็นสาเหตุให้ความสามารถการป้องกันการกัดกร่อนไม่ดี



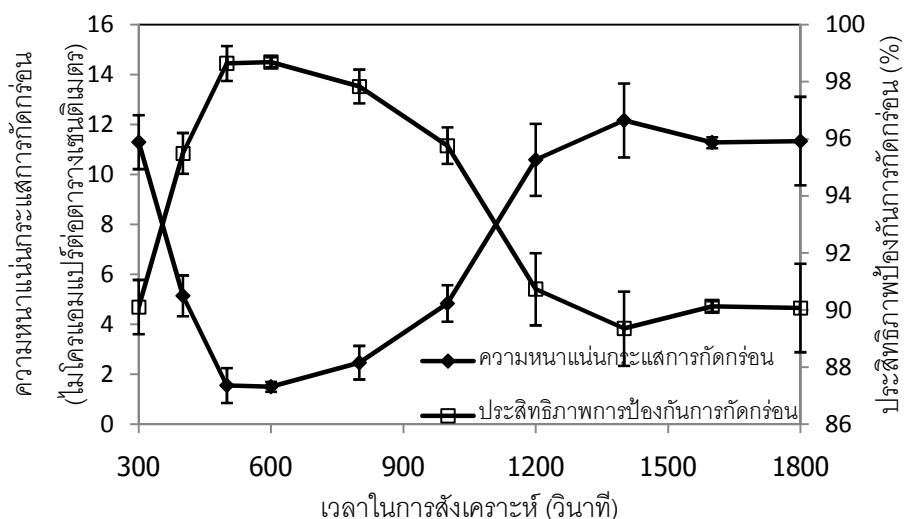


ภาพที่ 4.31 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอนิลีนบนพอลิไพร์โรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า (ก) 0.7 โวลต์ (ข) 1.2 โวลต์ และ (ค) 1.6 โวลต์เทียบกับ SCE เวลาในการสังเคราะห์ 600 วินาที

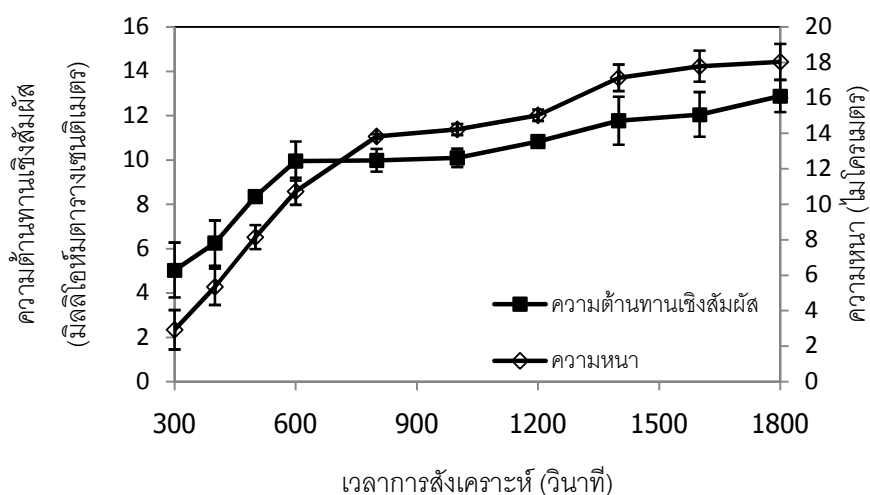
#### 4.6.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์

การทดลองในส่วนนี้ทำการศึกษาผลของเวลาในการสังเคราะห์พอลิเอนิลีน โดยทำการกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนเท่ากับ 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE เนื่องจากเป็นภาวะที่ดีที่สุดจากการสังเคราะห์ในตอนต้นที่ 4.6.1 และทำการปรับเปลี่ยนเวลาในการสังเคราะห์ตั้งแต่ 300 วินาที ถึง 1800 วินาที เพื่อหาภาวะที่ดีที่สุดต่อไป จากการนำไปทดสอบการป้องกันการกัดกร่อนพบว่าเวลาในการสังเคราะห์ 600 วินาทีจะให้ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนมากที่สุดถึงร้อยละ 98.69 และเมื่อเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์ ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนจะเริ่มลดลงดังแสดงในภาพที่ 4.32 จากนั้นได้นำชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ได้ไปวัดค่าความต้านทานเชิงสัมผัส พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์ ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากผลของความหนาดังภาพที่ 4.33 โดยที่เวลาในการสังเคราะห์ 300 วินาทีให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสต่ำที่สุดเท่ากับ 5.03 มิลลิโอมตารางเซนติเมตร และที่เวลาการสังเคราะห์ 1800 วินาทีให้ค่าความ

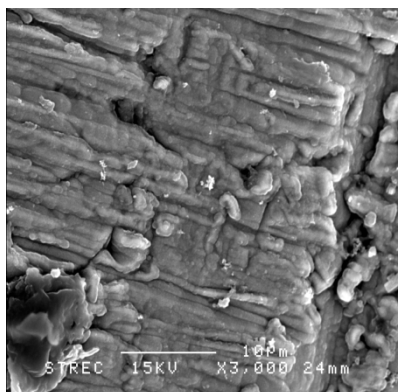
ต้านทานเชิงสัมผัสสูงสุดที่ 12.88 มิลลิโอมตารางเซนติเมตร ซึ่งสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายพื้นผิวพอลิเอทิลีนดังภาพที่ 4.33 พบว่าที่เวลาการสังเคราะห์ 1800 วินาที ชั้นของพอลิเมอร์มีความหนาค่อนข้างมาก อีกทั้งยังเกิดรอยแตกบนผิว จึงเป็นผลให้ค่าการป้องกันการกัดกร่อนไม่ดี



ภาพที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนและประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน โดยทำการสังเคราะห์พอลิเอทิลีนบนชั้นพอลิพีริโวลด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ 300 ถึง 1800 วินาที ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE



ภาพที่ 4.33 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่าความหนาของชั้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ 300 ถึง 1800 วินาที ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE



ภาพที่ 4.34 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอนิลีนบนพอลิไพร์โรล โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ที่เวลาการสังเคราะห์ 1800 วินาที ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE

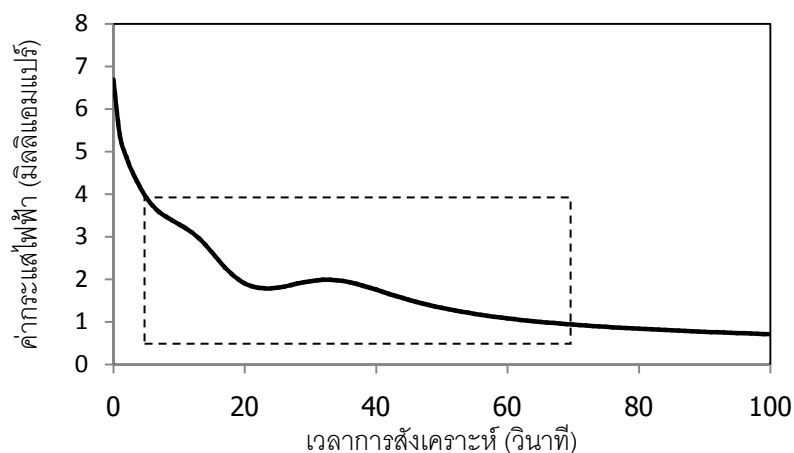
#### 4.7 ศึกษาช่วงค่ากระแสไฟฟ้าของการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันและภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์พอลิเอนิลีนบนชั้นพอลิไพร์โรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตรโดยเทคนิคให้กระแสไฟฟ้าคงที่

จากการสังเคราะห์พอลิเอนิลีนบนชั้นพอลิไพร์โรลในตอนที่ 4.6 ด้วยวิธีให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่พบว่าที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE ค่ากระแสที่เกิดปฏิกิริยาอยู่ที่ช่วงประมาณ 0.9 ถึง 4 มิลลิแอมแปร์ หรือ 0.39 ถึง 1.74 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4.35 ดังนั้นในขั้นตอนการสังเคราะห์พอลิเอนิลีนบนพอลิไพร์โรลจึงใช้ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าในช่วงนี้มาทำการศึกษาต่อไป โดยจะศึกษาถึงผลของค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนระหว่างการสังเคราะห์และผลของเวลาในการสังเคราะห์

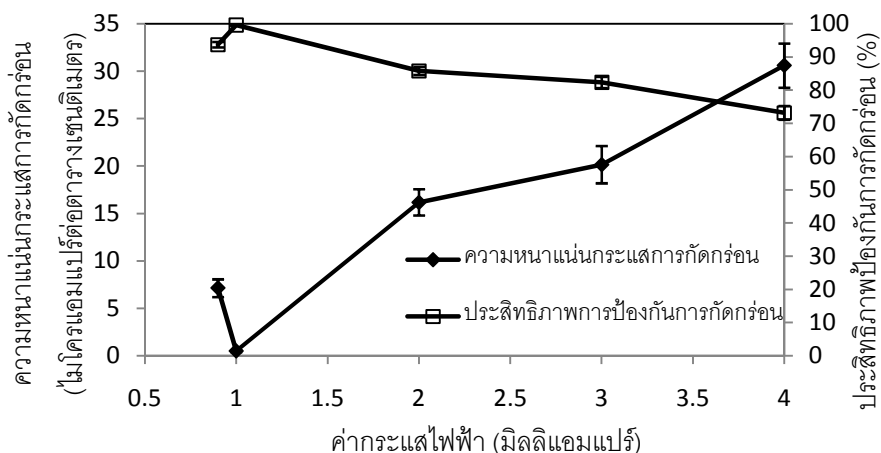
##### 4.7.1 ผลของค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์

การทดลองในส่วนนี้ ได้ทำการปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าที่ป้อนในการสังเคราะห์พอลิเอนิลีนบนพอลิไพร์โรล โดยทำการปรับเปลี่ยนค่ากระแสที่ช่วง 0.9 ถึง 4 มิลลิแอมแปร์ ที่เวลาในการสังเคราะห์ 600 วินาทีเท่ากัน แล้วนำชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ได้ในทุกภาวะไปทดสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนและความต้านทานเชิงสัมผัส จากภาพที่ 4.36 พบว่าที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1.0 มิลลิแอมแปร์ จะให้ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนดีที่สุดถึงร้อยละ 99.57 อาจเนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าให้คงที่ที่ 1.0 มิลลิแอมแปร์นี้ เป็นการ

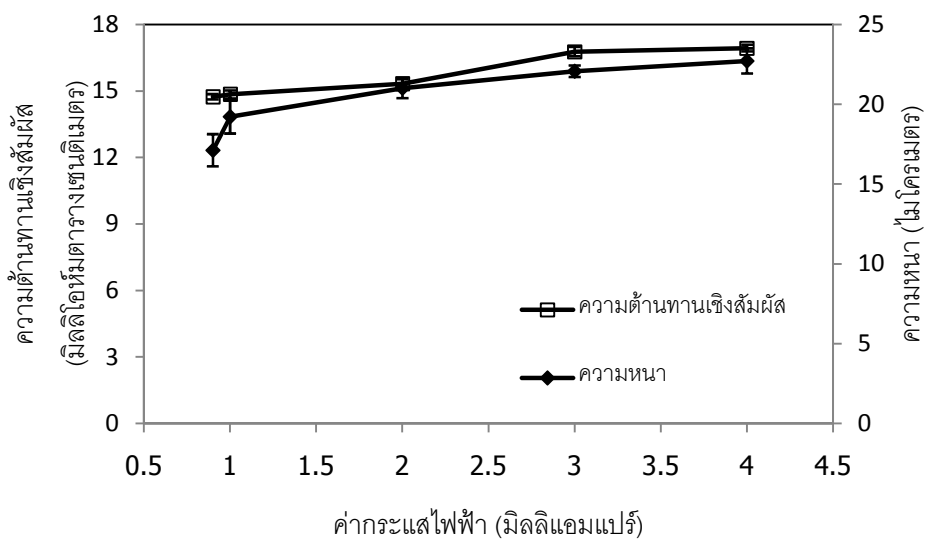
ลดช่วงขอบเขตในการเกิดปฏิกิริยาอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิแอนิลีนจากการสังเคราะห์ด้วยวิธีคงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ 1.2 โวลต์ลงไปอีก ค่ากระแสนี้จึงอาจทำให้พอลิแอนิลีนจัดเรียงตัวกันอย่างเหมาะสมบนชั้นของพอลิไพร์โรล อีกทั้งการสังเคราะห์ด้วยวิธีคงค่ากระแสไฟฟ้าจะให้การอัดตัวของระหว่างชั้นพอลิไพร์โรลกับพอลิแอนิลีนแน่น ทำให้ความแข็งแรงตัวของพอลิเมอร์มีค่ามาก จึงสามารถป้องกันไอออนที่จะไปทำลายเนื้อโลหะได้ดี [53] ซึ่งถือว่าเป็นภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการป้องกันการกัดกร่อนของชิ้นงานในขอบเขตงานวิจัยชิ้นนี้ ส่วนค่าความต้านเชิงสัมผัสที่ภาวะนี้พบว่ามีค่าเท่ากับ 14.85 มิลลิโอม์ตารางเซนติเมตร ดังภาพที่ 4.37 ซึ่งถือว่าย่างอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการใช้ทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองขั้ว (ควรน้อยกว่า 20 มิลลิโอม์ตารางเซนติเมตร [54])



**ภาพที่ 4.35** ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสไฟฟ้ากับเวลาในการสังเคราะห์พอลิแอนิลีนบนชั้นพอลิไพร์โรลในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของแอนิลีนนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร และกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE



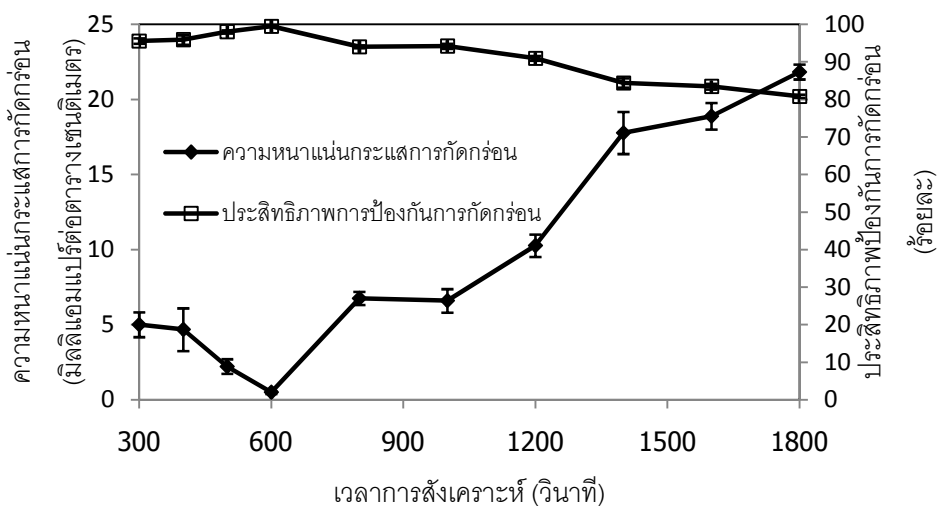
ภาพที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการกักตร้อนและประสิทธิภาพป้องกันการกักตร้อน โดยทำการสังเคราะห์พอลิแอนิซีนบนพอลิพีร์โรลด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงค่ากระแสไฟฟ้า 0.9 ถึง 4 มิลลิแอมแปร์ ที่เวลาในการสังเคราะห์ 600 วินาที



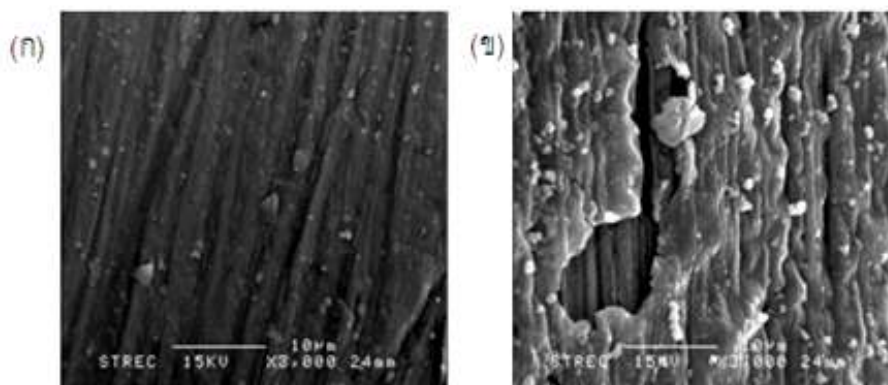
ภาพที่ 4.37 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่าความหนาแน่นของชั้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงค่ากระแสไฟฟ้า 0.9 ถึง 4 มิลลิแอมแปร์ เวลาในการสังเคราะห์ 600 วินาที

#### 4.7.2 ผลของเวลาในการสังเคราะห์

เมื่อได้ภาวะที่ดีที่สุดจากการปรับเปลี่ยนค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการสังเคราะห์พอลิแอนิลีน คือ 1.0 มิลลิแอมแปร์ หรือ 0.43 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร จากนั้นนำค่ากระแสไฟฟ้านี้ไปทำการปรับเปลี่ยนเวลาในการสังเคราะห์ตั้งแต่ 300 ถึง 1800 วินาที เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมต่อไป โดยเมื่อนำชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ไปทดสอบความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อน พบว่าที่เวลาการสังเคราะห์ 600 นาที ยังคงเป็นภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการป้องกันการกัดกร่อน ดังแสดงในภาพที่ 4.37 อาจเนื่องจากความหนาและการจัดเรียงตัวที่เหมาะสมของอนุภาคพอลิแอนิลีนบนชั้นของพอลิพีไรโรล ซึ่งสามารถยืนยันได้จากภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวของพอลิแอนิลีนดังภาพที่ 4.38

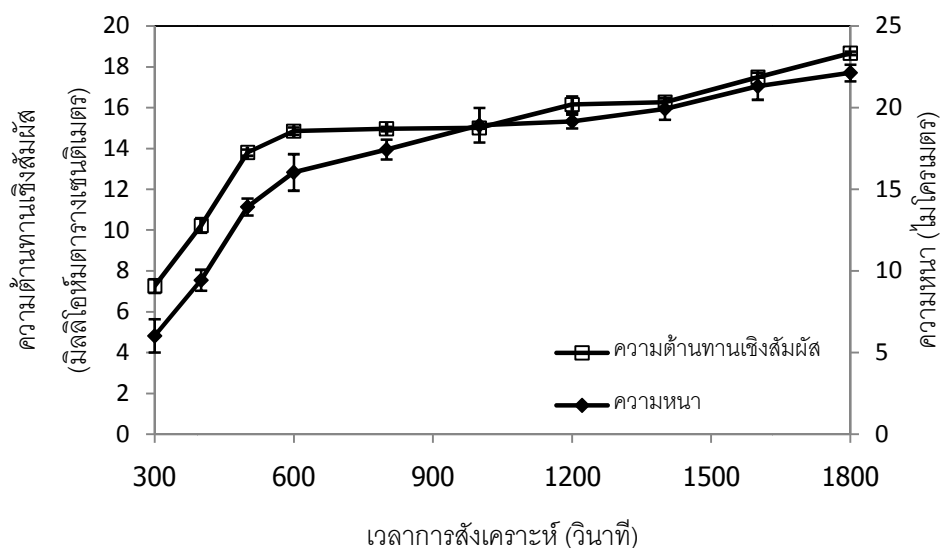


ภาพที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนและประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน โดยทำการสังเคราะห์พอลิแอนิลีนบนชั้นพอลิพีไรโรลด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ 300 ถึง 1800 วินาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1.0 มิลลิแอมแปร์



ภาพที่ 4.39 โครงสร้างทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มพอลิเอนิลีนบนพอลิอีทรีโรด โดยสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ที่เวลาการสังเคราะห์ (ก) 600 วินาที และ (ข) 1800 วินาที ค่ากระแสไฟฟ้า 1 มิลลิแอมแปร์

เมื่อนำชิ้นงานจากการสังเคราะห์ที่ภาวะเวลาต่างกันไปทดสอบวัดความต้านทานเชิงสัมผัส พบว่าค่าความต้านทานเชิงสัมผัสมีแนวโน้มเช่นเดียวกับผลที่ผ่านมา คือ เมื่อเพิ่มเวลาในการสังเคราะห์ ส่งผลให้เกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิเอนิลีนบนขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ความหนาจึงเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสสูงขึ้นตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 4.40



ภาพที่ 4.40 ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสและค่าความหนาของชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ในช่วงเวลาการสังเคราะห์ 300 ถึง 1800 วินาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1.0 มิลลิแอมแปร์

เมื่อทำการเปรียบเทียบการเคลือบแบบสองชั้นคือ สังกะระหะพอลิเอินิซีนทับชั้นของพอลิพีโรล ส่งผลให้มีประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนสูงกว่าการเคลือบพอลิพีโรลชั้นเดียว โดยมีความสามารถในการป้องกันการกัดกร่อนมากกว่าถึง 13 เท่า (เทียบจากค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนของการเคลือบแบบชั้นเดียวและสองชั้น) แต่ส่งผลให้ค่าความต้านทานเชิงสัมผัสเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความหนาที่มากกว่าการเคลือบแบบชั้นเดียว โดยตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อนและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงานในภาวะการเคลือบแบบชั้นเดียว สองชั้น และค่ามาตรฐานที่กำหนดใช้ทำแผ่นนำกระแสไฟฟ้าแบบสองชั้น

**ตารางที่ 4.4** การเปรียบเทียบการสังเคราะห์พอลิเอินิซีนบนชั้นพอลิพีโรลและพอลิพีโรลบนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

วิธีการสังเคราะห์		ภาวะ	ประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน (ร้อยละ)	ความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอม ตารางเซนติเมตร)
ค่ามาตรฐาน			> 86	< 20
เหล็กกล้าไร้สนิม			82	25
เคลือบชั้นเดียว (พอลิพีโรล)	ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่	0.6 โวลต์ 350 วินาที	94.41±0.67	2.62±0.11
	ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่	0.6 มิลลิแอมแปร์ 600 วินาที	91.06±2.18	9.62±1.33
เคลือบสองชั้น (พอลิพีโรล/ พอลิเอินิซีน)	ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่	1.2 โวลต์ 600 วินาที	98.69±0.18	9.94±0.18
	ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่	1.0 มิลลิแอมแปร์ 600 วินาที	99.57±0.08	14.85±0.58



#### 4.8 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

นำฟิล์มพอลิไพร์โรลและพอลิแอนิลีนที่ทำการสังเคราะห์ได้จากสารละลายสับสนุนอิเล็กโตรไลต์กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และสารละลายมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร มาทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน เพื่อยืนยันว่าฟิล์มที่ทำการสังเคราะห์ได้เป็นพอลิไพร์โรลและพอลิแอนิลีนจริง

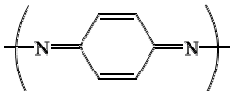
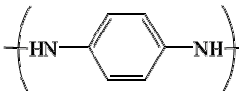
##### 4.8.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้

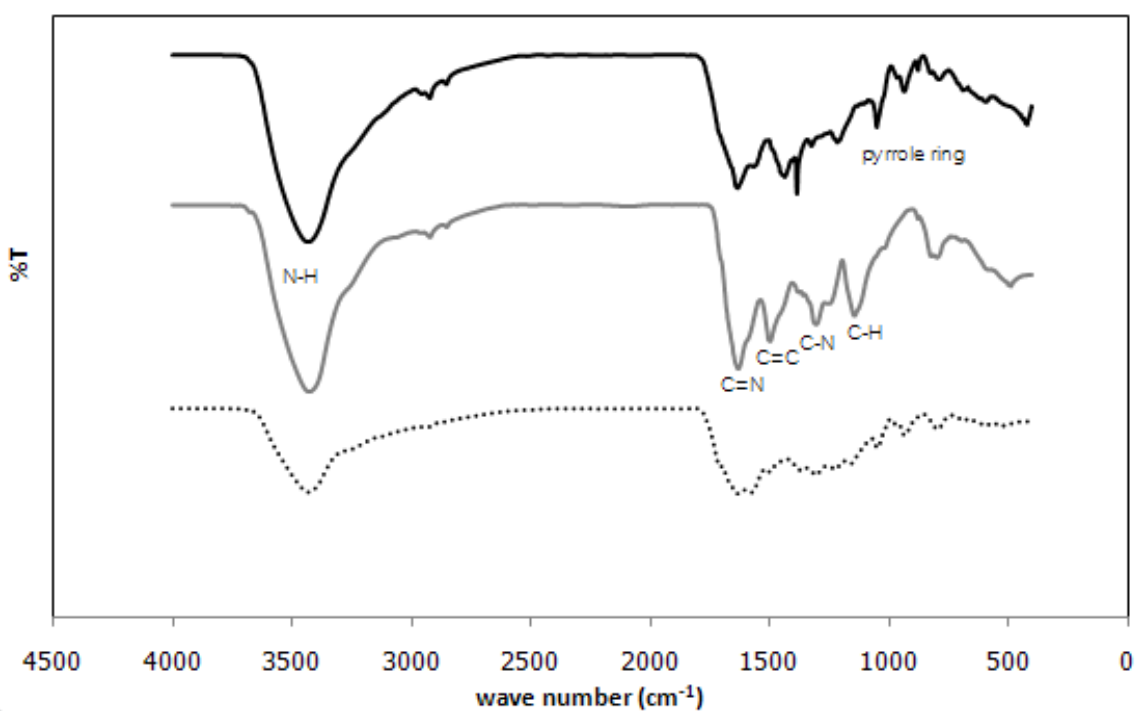
พอลิไพร์โรลจะมีตำแหน่งการดูดกลืนแสงที่สำคัญซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพอลิไพร์โรลและพอลิแอนิลีน แสดงดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

**ตารางที่ 4.5** ตำแหน่งการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่เป็นลักษณะเฉพาะของพอลิไพร์โรล [35, 45, 55]

IR band (cm <sup>-1</sup> )	Functional group
3300-3500	N-H stretching of aromatic amine
1600-1650	C=C stretching of aromatic ring
1440	C-C and C-N stretching
1310	Mixed bending and stretching vibrations associated with C-N links
1180	C=N stretching
1043	N-H wagging
964, 790	Ring vibrations of pyrrole

ตารางที่ 4.6 ตำแหน่งการดูดกลืนแสงอินฟราเรดที่สำคัญซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของพอลิแอนิลีน [56]

IR band ( $\text{cm}^{-1}$ )	Functional group
3300-3500	N-H stretching of aromatic amine
1500-1600	C=N stretching of quinoid imine 
1425-1500	C=C stretching of benzenoid diamine 
1350-1250	C-N stretching of aromatic amine
1130-1180	C-H in-plane bending aromatic



ภาพที่ 4.41 FTIR สเปกตรัมของพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้บนเหล็กกล้าไร้สนิม (—) พอลิไพร์โรล (—) พอลิแอนิลีน และ (.....) พอลิแอนิลีนบนชั้นพอลิไพร์โรล

เพื่อเป็นการยืนยันผลว่าฟิล์มที่สังเคราะห์ได้เป็นพอลิเมอร์ที่ต้องการ จึงทำการพิสูจน์เอกลักษณ์หาหมู่ฟังก์ชันที่มีอยู่ในชิ้นงาน จากภาพที่ 4.41 แสดง FTIR สเปกตรัมของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้บนเหล็กกล้าไร้สนิม โดยเส้นทึบเข้ม ( — ) เป็นสเปกตรัมของพอลิไพร์โรลที่ทำการสังเคราะห์ได้ ปรากฏตำแหน่งของพีคสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีของพอลิไพร์โรลดังตารางที่ 4.5 กล่าวคือมีการสั่นแบบยืดของพันธะ N-H ที่  $3433\text{ cm}^{-1}$  การสั่นแบบยืดของวงแหวนแอโรแมติก C=C ที่ประมาณ  $1632\text{ cm}^{-1}$  และการยืดของพันธะ C-C และ C-N ที่  $1435\text{ cm}^{-1}$  การสั่นแบบยืดและแบบงอของพันธะ C-N ที่  $1324\text{ cm}^{-1}$  การสั่นแบบยืดของพันธะ C=N ที่  $1168\text{ cm}^{-1}$  และการสั่นของวงแหวนไพร์โรลที่ตำแหน่ง  $965, 778\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งสเปกตรัมของพอลิเมอร์ที่กำหนดสอดคล้องกับงานของ Saville [54] และ Joseph และคณะ [44] จึงยืนยันได้ว่าพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้เป็นพอลิไพร์โรลจริง

ส่วนเส้นทึบจาง ( — ) แสดงสเปกตรัมของชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยพอลิแอนิลีนบนเหล็กกล้าไร้สนิม เมื่อนำไปทดสอบ FTIR ปรากฏตำแหน่งพีคที่พบสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีของพอลิแอนิลีนดังตารางที่ 4.6 กล่าวคือมีการสั่นแบบยืดของพันธะ N-H ที่  $3435\text{ cm}^{-1}$  การสั่นแบบยืดพันธะของ C=N ที่ประมาณ  $1600\text{ cm}^{-1}$  และการยืดของ C=C ที่  $1492\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงวงแหวนแอโรแมติกของวงแหวนควิโนอยด์ (Quinoid) และวงแหวนเบนซีนอยด์ (Benzenoid) ตามลำดับ การสั่นแบบงอของพันธะ C-N ที่  $1300\text{ cm}^{-1}$  การสั่นแบบงอของพันธะ C-H ในแนวระนาบและนอกระนาบของพันธะแอโรแมติก ที่  $1153\text{ cm}^{-1}$  และที่  $808\text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ He [15]

และเส้นประ (.....) แสดงสเปกตรัมของชิ้นงานที่ทำการสังเคราะห์ด้วยพอลิแอนิลีนทับพอลิไพร์โรลบนเหล็กกล้าไร้สนิม ปรากฏตำแหน่งพีคสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมีของพอลิแอนิลีนและพอลิไพร์โรลร่วมกัน คือ ตำแหน่งการสั่นแบบยืดของวงแหวนแอโรแมติก C=C ที่  $1632\text{ cm}^{-1}$  และการสั่นของวงแหวนไพร์โรลที่ตำแหน่ง  $965, 794\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงถึงโครงสร้างของพอลิไพร์โรล การสั่นแบบยืดพันธะของ C=N ที่ประมาณ  $1577\text{ cm}^{-1}$  และการยืดของ C=C ที่  $1505\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงวงแหวนแอโรแมติก ของวงแหวนควิโนอยด์ (Quinoid) และวงแหวนเบนซีนอยด์ (Benzenoid) ของโครงสร้างพอลิแอนิลีน ตามลำดับ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการสังเคราะห์พอลิไพร์โรล (PPY) และพอลิแอนิไลน์บนชั้นพอลิไพร์โรล (PPY/PANI) บนเหล็กกล้าไร้สนิมด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยตัวแปรที่ทำการศึกษาประกอบด้วย ชนิดของสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้นของมอนอเมอร์ วิธีในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ลงบนเหล็กกล้าไร้สนิม

การศึกษาภาวะของความเข้มข้นมอนอเมอร์ไพร์โรลตั้งแต่ 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร โดยทำการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของมอนอเมอร์ ส่งผลให้การป้องกันการกัดกร่อนมีค่าลดลง โดยที่ความเข้มข้นไพร์โรลมอนอเมอร์ 0.1 โมลต่อลิตร ให้ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนสูงสุดในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ทุกชนิด และค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์สูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นมอนอเมอร์เนื่องจากผลของความหนาที่เพิ่มมากขึ้น

การศึกษาชนิดสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ ได้แก่ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร กรดออกซาลิกความเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร โดยทำการสังเคราะห์ด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมทรี พบว่าการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลในสารละลายกรดออกซาลิกให้ประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนดีที่สุดคือร้อยละ 92.51 และมีค่าความต้านทานสัมพัทธ์เท่ากับ 29.9 มิลลิโอมตารางเซนติเมตร

การศึกษาวิธีที่ใช้ในการสังเคราะห์ คือ วิธีไซคลิกโวลแทมเมทรี วิธีกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ และกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ พบว่าการสังเคราะห์พอลิไพร์โรลความเข้มข้นมอนอเมอร์ 0.1 โมลต่อลิตร ในสารละลายกรดออกซาลิกด้วยวิธีกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE เป็นเวลา 350 วินาที ส่งผลให้การป้องกันการกัดกร่อนดีที่สุดสำหรับการเคลือบแบบชั้นเดียว โดยมีค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนเท่ากับร้อยละ 94.41 และค่าความต้านทานสัมพัทธ์เท่ากับ 2.62 มิลลิโอมตารางเซนติเมตร

การศึกษาการสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์บนชั้นของพอลิไพร์โรล (PPY/PANI) ด้วยวิธีกำหนดค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ และกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ พบว่าการสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์ด้วยวิธีกำหนดค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ 1 มิลลิแอมแปร์ เวลาการสังเคราะห์ 600 วินาที พบว่าการเคลือบแบบสองชั้นให้ประสิทธิภาพในการป้องกันการกัดกร่อนที่สูงกว่าการเคลือบชั้นเดียว โดยมีค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนสูงที่สุดที่ร้อยละ 99.57 ส่วนค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์มีค่า

สูงกว่าการเคลือบแบบชั้นเดียวเนื่องจากความหนาที่เพิ่มมากขึ้น และนำพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์ได้มาศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM) และศึกษาองค์ประกอบของฟิล์มด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared (FTIR) พบว่าฟิล์มที่ได้มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกันและมีหมู่ฟังก์ชันเป็น PPY และ PANI จริง

## 5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

1. เนื่องจากการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ที่ทำการสังเคราะห์อาจยังนำไฟฟ้าได้ไม่ดีเท่าวัสดุประเภทแกรไฟต์ ดังนั้นการปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้า อาจมีการเติม निकเกิดลงไประหว่างการสังเคราะห์ เนื่องจากนิเกิดเป็นองค์ประกอบที่อยู่ภายในเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีสมบัติด้านการนำไฟฟ้าและป้องกันการกัดกร่อนได้ ดังนั้นเมื่อทำการเติมลงไปแล้วจะทำให้เพิ่มสมบัติการนำไฟฟ้าของชิ้นงานได้บ้าง

2. การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้า ควรทำการสังเคราะห์ที่อัตราส่วนของสารประกอบ อิเล็กโทรไลต์และมอนอเมอร์ของแอนิไลน์มากขึ้น หรือศึกษาถึงสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ชนิดอื่นที่มีสมบัติเป็นกรด

3. ในการเลือกใช้สารประกอบอิเล็กโทรไลต์ประเภทสารลดแรงตึงผิว อาจเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีสมบัติเป็นกรด เช่น กรดโดเดซิลเบนซีนซัลโฟนิค (Dodecylbenzenesulfonic acid)

## รายการอ้างอิง

- [1] Zotti, G. Electrochemical Sensors Based on Polyconjugated Conducting Polymers. Synthetic Metals 51 (1992).
- [2] Kumar, D., and Sharma, R. C. Advance in conductive polymers. European Polymer Journal 34 (1998): 1053-1060.
- [3] Bai, H. and Shi, G. Gas Sensors Based on Conducting Polymers. Sensors 7 (2007): 267-307.
- [4] Cynthia, G. Z. Handbook of Electrochemical Methods, Elsevier B.V., 2007.
- [5] Xiaoping, L. Formation of Polymer Coatings by Electropolymerization. Doctor's thesis, Philosophy Chemical Engineering, University of Waterloo, Ontario, Canada, 1998.
- [6] Andrienko, D. Cyclic Voltammetry, 2008.
- [7] Amaral, S.T., Muller, I.L. Passivation of pure iron in alkaline solution containing silicate and sulphate - Galvanostatic and Potentiostatic studies, Corrosion Science 41 (1999): 747-758.
- [8] Morena, J.D., Marcosb, M.L., Agullo-Ruedac, Guerrero-Lemusa, F.R., Martõn-Palmaa, R.J., Martõnez-Duarta, and J.M., Gonzalvez-Velascob, J. A galvanostatic study of the electrodeposition of polypyrrole into porous silicon. Thin Solid Films 348 (1999): 152-156.
- [9] Wencheng, S., Iroh, J. O. Electrodeposition mechanism of polypyrrole coatings on steel substrates from aqueous oxalate solutions. Electrochimica Acta 46 (2000): 1-8.
- [10] Mac Diarmid, A.G., et al. Polyanilines: a novel class of conducting polymers. Molecular Crystals and Liquid Crystals (1985): 121-173.

- [11] Inzelt, G. Conducting Polymers A New Era in Electrochemistry, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [12] วันชัย เลิศวิจิตรจรัส, โกสินทร์ หาชะวี และ อำนาจ สิทธิตตระกูล, พัฒนาการของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและการนำไปใช้งาน, วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี 33, 189 (ตุลาคม 2549): 132-138.
- [13] ประสบชัย วิริยะศรีวัฒนา. ปรากฏการณ์ขนส่งทางไฟฟ้าในพอลิไพร์โรลที่สังเคราะห์แบบเคมี. รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2532.
- [14] Margolis, J., Conductive Polymers and Plastics, Chapman and Hall (1989): 2-11.
- [15] Biallozor, S., and Kupniewska, A. Conducting polymers electrodeposited on active metals. Synthetic Metals 155 (2005): 443–449.
- [16] Nalwa, H.S. Handbook of Organic Conductive Molecules and Polymers. Vol 2, John Wiley & Sons, 1997.
- [17] Street, G.B. et al. Characterization of Polypyrrole. Colloque C3 suppliment 44 (1983): 599-606.
- [18] Uyar, T. Formation and Characterization of Polypyrrole/(Polyaniline-Polypyrrole) bi-layer composite coatings. Thesis submitted to the Division of Research and Advanced studies Department of Chemical and Materials Engineering, University of Cincinnati, 2003.
- [19] Ansari, R., Polypyrrole Conducting Electroactive Polymers: Synthesis and Stability Studies, E-Journal of Chemistry 13, (2006): 186-201.
- [20] วิภาสศรี วิริยะรักษ์. การสังเคราะห์พอลิแอนิลีนบนเหล็กกล้าไร้สนิมโดยวิธีเคมีไฟฟ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [21] Wallace, G., Spinks, G., Kane-Maguire, L., and Teasdale, P. Conductive Electroactive Polymers: Intelligent Materials Systems. 2<sup>nd</sup> edition, New York CRC Press, 2002.

- [22] Stenger-Smith, J.D. Intrinsically Electrically Conducting Polymers synthesis characterization and their applications. Progress of Polymer Science 23 (1998): 57-59.
- [23] Tawfika H., Hunga, Y., and Mahajan, D. Metal bipolar plates for PEM fuel cell - A review. Journal of Power Sources 163 (2007): 755–767.
- [24] Allen, H., Tapas, C., and Priscila, S. Bipolar plates for PEM fuel cells: A review. International Journal of Hydrogen Energy 30 (2005): 1297 – 1302.
- [25] Renato, A. A., Mara, C.L.O., Gerhard, E., and Volkmar, E. Corrosion of metal bipolar plates for PEM fuel cells: A review. International Journal of Hydrogen Energy 35 (2010): 3632 – 3647.
- [26] Mark, V.B. Composites Materials, The University of Alabama in Huntsville, Huntsville, Alabama, 2000.
- [27] Lee, S.H., Huang, C.H., and Chen, Y.P. Investigation of PVD coating on corrosion resistance of metallic bipolar plates in PEM fuel cell. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003): 688-693.
- [28] มนัส สติระจินดา, เหล็กกล้าไร้สนิม, เหล็กกล้า, พิมพ์ครั้งที่ 5, 2539, หน้า 72-83.
- [29] จักรพงษ์ ศิริประสมทรัพย์. ผลขององค์ประกอบของคาร์บอน/เรซินคอมพอสิตต่อสมบัติของแผ่นโลหะเคลือบสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงฟิวเอ็ลล์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2553.
- [30] อนุวัฒน์ จุติลาภถาวร, ประกาศิต สถานเมือง และ ธนัท ธีรชัย. การกัดกร่อน. เอกสารประกอบการเรียนวิชา Engineering Material, หน้า 1-15, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2549.
- [31] Corrosion [online].2011. Available from: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/electrochemist/web/electrochem04.htm> [2011, August]



- [32] อรรจุมมา กอสนาน. การผูกกร่อน. ใน เอกสารประกอบการสอนวิชาวัสดุวิศวกรรม, หน้า 6-7, วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย, 2549.
- [33] Basic of Electrochemical Corrosion Measurement. Review of the Electrochemical Basic of Corrosion [online]. 2010. Available from: [http://www.gamry.com/App\\_Notes/DC\\_Corrosion/GettingStartedWithEchem\\_CorrMeasurements.htm](http://www.gamry.com/App_Notes/DC_Corrosion/GettingStartedWithEchem_CorrMeasurements.htm) [2011, January]
- [34] Shine, J.S., McClure, J.C., Chianelli, R., Pich, P., and Sebastian, P.J. Conducting polymer-coated stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFC). International Journal of Hydrogen Energy 30 (2005): 1339 – 1344.
- [35] Hasanov, R., and Bilgic, S. Monolayer and bilayer conducting polymer coatings for corrosion protection of steel in 1 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution. Progress in Organic Coatings 64 (2009): 435–445.
- [36] Ren, Y.J., and Zeng, C.L. Effect of conducting composite polypyrrole/polyaniline coatings on the corrosion resistance of type 304 stainless steel for bipolar plates of proton exchange membrane fuel cells. Journal of Power Sources 82 (2008): 524–530.
- [37] Sathiyarayanan, S., Devi, S., and Venkatachari, G. Corrosion protection of stainless steel by electropolymerised pani coating. Progress in Organic Coatings 56 (2006): 114-119.
- [38] Tan. C.K., and Blackwood, D.J. Corrosion protection by multilayered conducting polymer coatings. Corrosion Science 45 (2003): 545–557.
- [39] Tunc, T. Polypyrrole films on stainless steel. Surface & Coatings Technology 200 (2006): 4713 – 4719.

- [40] Ozyilmaz, A.T., Erbil, M., and Yazici, B. The corrosion behaviours of polyaniline coated stainless steel in acidic solutions. Thin Solid Films 496 (2006): 431-437.
- [41] Ren, Y.J., Chen, J., and Zeng, C.L. Corrosion protection of type 304 stainless steel bipolar plates of proton-exchange membrane fuel cells by doped polyaniline coating. Journal of Power Sources 195 (2010): 1914–1919.
- [42] Dektak<sup>3</sup>ST Surface Profiler - Measuring System [Online]. 2011. Available from: <http://www.wm.edu/sites/arc/labs/lab121/equipment/dektak/newdektakspec/index.php> [2011, August]
- [43] Thumanu, K., Tanthanuch, W., Lorthongpanich, J., Heraud, P., and Parnpai, R. FTIR microspectroscopic imaging as a new tool to distinguish the chemical composition of Mouse Blastocyst. Journal of Molecular Structure 933 (1-3) (2009): 104-111.
- [44] แม้น อมรสิทธิ .หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ พิมพ์ครั้งที่ .1กรุงเทพมหานคร: ห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงพิมพ์ชวนพิมพ์ ,2534.
- [45] Joseph, S., McClure, J.C., Chianelli, R., Pich, P., and Sebastian, P.J. Conducting polymer-coated stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells (PEMFC). International Journal of Hydrogen Energy 30 (2005): 1339 – 1344.
- [46] The Bodner Group Division of Chemistry Education, Purdue University West Lafayette, Indiana 47907-1393 Electrochemical Reaction [online]. Available from: <http://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/bp/ch20/electro.php> [2011, 14 September]
- [47] Ivandini, T. A., Akira F., and Einaga, Y. Elelctroanalytical Application of Conductive diamond electrodes by controlling its surface termination. (Unpublished Manuscript).

- [48] Hermanna, A., Chaudhuria, T., and Spagnolb, P. Bipolar plates for PEM fuel cells: A review. International Journal of Hydrogen Energy 30 (2005): 1297 – 1302.
- [49] Iroh, J. O. et al. Electrochemical synthesis: a novel technique for processing multi-functional coatings. Progress in Organic Coatings, 47 (2003): 365-375.
- [50] Vork, F. T. A. and Janssen, L. J. J. Structural Effects in Polypyrrole Synthesis. Electrochimica Acta 33 (1988): 1513-1517.
- [51] Ibrahim, M., and Koglin, E. Spectroscopic Study of Polyaniline Emeraldine Base: Modelling Approach. Acta Chimica Slovenica 52 (2005): 159–163.
- [52] Pruneanu, S., Veress, E., Marian, I., and Oniciu, L. Characterization of polyaniline by cyclic voltammetry and UV – Vis absorption spectroscopy. Materials Science 34 (1999): 2733-2739.
- [53] Herrasti, P., Diaz, L., Ocón, P., Ibáñez, A., and Fatas, E. Electrochemical and mechanical properties of polypyrrole coatings on steel. Electrochimica Acta 49 (2004): 3693 – 3699.
- [54] Renato, A. A., Mara, C. L.O., Ett, G., and Ett, V. Corrosion of metal bipolar plates for PEM fuel cells: A review. International Journal of Hydrogen Energy 35 (2010): 3632 – 3647.
- [55] Saville P. Polypyrrole Formation and Use. Canada: Technical Memorandum DRDC Atlantic, 2005.
- [56] He, Y. Interfacial synthesis and characterization of polyaniline nanofibers. Materials Science and Engineering 126 (2005): 76-79.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลการทดลอง

ก-1 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากักตัวของเหล็กกล้าไร้สนิมที่ไม่ได้เคลือบทดสอบในสารละลายกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

พื้นที่ผิวทดสอบของเหล็กกล้าไร้สนิม = 2.3 ตารางเซนติเมตร

ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากักตัว,  $i_{\text{corr(ss)}} = 114.27$  ไมโครแอมแปร์ต่อตาราง

เซนติเมตร

ก-2 ผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากักตัวค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อน ค่าความหนา และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิไพร์โรล ที่สังเคราะห์ในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ และสารละลายมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร

ตัวแปรที่ศึกษา: ความเข้มข้นไพร์โรลมอนอเมอร์

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์: โซเดียมโอดีดซัลเฟตเข้มข้น 0.15 โมลต่อลิตร

ไพร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร

วิธีการสังเคราะห์: ไฮคลิกโวลแทมเมทรี

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

**ตาราง ก1** ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากััดกร่อนและค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกััดกร่อนของฟิล์มพอลิพีรีโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟตและสารละลายมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นพรีโรลมอนอเมอร์ (โมลต่อลิตร)	ความหนาแน่นกระแสการกััดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ประสิทธิภาพป้องกันการกััดกร่อน (ร้อยละ)
0.1	63.75±4.02	44.21±3.52
0.2	78.56±7.95	31.25±6.95
0.3	76.70±8.58	32.88±7.51
0.4	87.63±5.07	23.31±4.43
0.5	90.72±5.86	20.60±5.13

**ตาราง ก2** ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีรีโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของโซเดียมโอดีเตซิลซัลเฟตและสารละลายมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นพรีโรลมอนอเมอร์ (โมลต่อลิตร)	ความหนา (ไมโครเมตร)	ความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร)
0.1	30.81±1.23	39.00±4.36
0.2	40.8±2.11	48.32±7.38
0.3	54.52±2.42	50.00±4.14
0.4	65.42±3.25	69.05±8.28
0.5	89.23±2.52	94.85±5.85

**ตัวแปรที่ศึกษา :** ความเข้มข้นพีริโรลมอนอเมอร์

**ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :**

สารละลายอิเล็กโทรไลต์: กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

พีริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร

วิธีในการสังเคราะห์ : โซดลิกโวลแทมเมตรี

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

**ตาราง ก3** ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนและค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพีโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดซัลฟิวริกและสารละลายมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร

ความเข้มข้น พีริโรลมอนอเมอร์ (โมลต่อลิตร)	ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ประสิทธิภาพป้องกันการ กัดกร่อน (ร้อยละ)
0.1	11.82±3.40	89.66±2.97
0.2	15.83±3.53	86.14±3.53
0.3	28.16±2.19	75.36±2.19
0.4	45.03±5.99	60.59±5.99
0.5	92.65±4.51	18.91±4.51

**ตาราง ก4** ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในของกรดซัลฟิวริกและสารละลายมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นพีริโรล มอนอเมอร์ (โมลต่อลิตร)	ความหนา (ไมโครเมตร)	ความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)
0.1	16.03±2.42	21.78±6.71
0.2	32.11±1.21	38.80±4.37
0.3	37.32±2.32	43.90±2.13
0.4	41.51±2.17	62.27±6.11
0.5	43.12±3.13	81.87±4.87

**ตัวแปรที่ศึกษา :** ความเข้มข้นพีริโรลมอนอเมอร์

**ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :**

สารละลายอิเล็กโทรไลต์: กรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

พีริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร

วิธีในการสังเคราะห์ : ไชคลิกโวลแทมเมตรี

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

**ตาราง ก5** ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนและค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายมอนอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร

ความเข้มข้น พีริโรลมอนอเมอร์ (โมลต่อลิตร)	ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ประสิทธิภาพป้องกันการ กัดกร่อน (ร้อยละ)
0.1	8.56±1.46	92.51±1.27
0.2	24.07±3.33	78.94±3.33
0.3	29.49±2.47	74.19±2.47
0.4	32.04±3.65	71.96±3.65
0.5	33.11±1.34	71.02±1.34



**ตาราง ก6** ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีร์โรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายมोनอเมอร์ความเข้มข้น 0.1 – 0.5 โมลต่อลิตร

ความเข้มข้นพีร์โรล มอนอเมอร์ (โมลต่อลิตร)	ความหนา (ไมโครเมตร)	ความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)
0.1	22.02±3.11	29.90±0.22
0.2	38.11±2.15	47.32±1.08
0.3	56.14±2.32	58.50±4.13
0.4	54.34±1.27	59.00±6.48
0.5	59.42±2.41	72.35±1.16

ก- 3 ผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากั้ดกร่อนค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกั้ดกร่อนค่าความหนา และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีร์โรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และพีร์โรลมอนอเมอร์ 0.1 โมลต่อลิตร โดยเทคนิคให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่

**ตัวแปรที่ศึกษา:** ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำการสังเคราะห์ที่เวลา 1800 วินาที

**ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :**

สารละลายอิเล็กโทรไลต์: กรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

พีร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

วิธีในการสังเคราะห์ : ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ที่ 0.45 – 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE

สารละลายทดสอบการกั้ดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

**ตาราง ก7** ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากััดกร่อนและค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกััดกร่อนของฟิล์มพอลิไพร์โรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายไพร์โรลมอนอเมอร์ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.45 – 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE

ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความหนาแน่นกระแสการกััดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ประสิทธิภาพป้องกันการกััดกร่อน (ร้อยละ)
0.45	32.81±1.15	71.29±1.31
0.50	25.21±1.50	77.93±1.01
0.55	21.33±2.13	81.33±1.86
0.60	21.04±1.64	81.59±1.17
0.65	83.70±1.34	26.75±1.17

**ตาราง ก8** ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิไพร์โรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายไพร์โรลมอนอเมอร์ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.45 – 0.65 โวลต์เทียบกับ SCE

ค่าศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความหนา (ไมโครเมตร)	ความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอมห์ตารางเซนติเมตร)
0.45	20.21±2.02	27.59±4.66
0.50	24.02±1.51	30.80±2.64
0.55	29.16±1.34	35.04±1.6
0.60	33.43±1.62	39.13±3.88
0.65	38.10±2.17	42.56±3.89

**ตัวแปรที่ศึกษา:** เวลาในการสังเคราะห์ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE

**ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :**

สารละลายอิเล็กโทรไลต์: กรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

พรีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

วิธีในการสังเคราะห์ : ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ที่ 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

**ตาราง ก9** ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนและค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพรีโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพรีโรลมอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 300 – 1800 วินาที ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE

เวลาการสังเคราะห์ (วินาที)	ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน (ร้อยละ)
300	8.21±0.86	92.81±0.75
350	6.37±0.76	94.41±0.67
400	7.92±0.71	93.07±0.62
500	16.52±1.35	85.54±1.18
600	21.49±2.82	81.19±2.47
800	24.73±0.99	78.36±0.87
1000	44.33±1.02	61.2±0.89
1200	54.28±3.4	52.5±3.75
1400	19.33±2.16	83.08±1.89
1600	34.41±2.48	69.89±2.17
1800	37.63±0.92	67.07±0.81

**ตาราง ก10** ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 300 – 1800 วินาที ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.6 โวลต์เทียบกับ SCE

เวลาการสังเคราะห์ (วินาที)	ความหนา (ไมโครเมตร)	ความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอม์ตารางเซนติเมตร)
300	6.21±1.02	2.33±1.51
350	7.32±0.14	2.62±1.11
400	10.48±1.15	7.68±2.38
500	12.97±2.11	9.92±1.10
600	15.02±1.12	15.55±2.10
800	17.92±2.02	19.40±1.32
1000	19.20±1.14	22.72±0.35
1200	20.26±0.12	27.94±2.01
1400	24.04±1.16	32.39±2.17
1600	30.27±1.03	35.50±1.19
1800	33.43±1.15	39.13±3.88

ก- 4ผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัลดกร่อนค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อน ค่าความหนา และค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และพีริโรลมอนอเมอร์ 0.1 โมลต่อลิตรโดยเทคนิคให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่

ตัวแปรที่ศึกษา : ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำการสังเคราะห์ที่เวลา 1800 วินาที

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์: กรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

พีริโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

วิธีในการสังเคราะห์ : ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ 0.5 – 0.8 มิลลิแอมแปร์

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

**ตาราง ก11** ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากััดกร่อนและค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพีรีโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีรีโรลมอนอเมอร์ ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.5 – 0.8 มิลลิแอมแปร์

กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน (ร้อยละ)
0.5	104.75±4.41	8.33±3.86
0.6	24.99±1.53	78.13±1.34
0.7	41.45±1.49	63.73±1.3
0.8	66.71±6.67	41.62±5.84

**ตาราง ก12** ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีรีโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีรีโรลมอนอเมอร์ ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.5 – 0.8 มิลลิแอมแปร์

ค่ากระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	ความหนา (ไมโครเมตร)	ความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอมห์ตารางเซนติเมตร)
0.5	14.14±0.11	19.06±0.45
0.6	18.22±0.23	25.00±0.15
0.7	19.69±0.13	26.97±0.14
0.8	22.92±0.15	35.03±0.05

**ตัวแปรที่ศึกษา:** เวลาในการสังเคราะห์ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.6 มิลลิแอมแปร์

**ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :**

สารละลายอิเล็กโทรไลต์: กรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

พีวีโรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

วิธีในการสังเคราะห์ : ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ 0.6 มิลลิแอมแปร์

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

**ตาราง ก13** ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนและค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพีวีโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีวีโรลมอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 200 – 1800 วินาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.6 มิลลิแอมแปร์

เวลาการสังเคราะห์ (วินาที)	ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน (ร้อยละ)
200	63.9±0.64	44.08±5.56
300	50.31±0.06	55.97±0.49
400	33.36±0.55	70.81±4.81
500	13.21±0.12	88.44±1.03
600	10.21±0.25	91.06±2.18
800	12.58±0.31	88.99±2.72
1000	16.42±0.34	85.63±2.98
1200	19.00±0.26	83.37±2.23
1400	21.06±0.4	81.57±3.48
1600	21.74±0.17	80.98±1.50
1800	24.99±0.15	78.13±1.34

**ตาราง ก14** ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีไรโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายปิโรลมอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 200 – 1800 วินาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.6 มิลลิแอมแปร์

เวลาการสังเคราะห์ (วินาที)	ความหนา (ไมโครเมตร)	ความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร)
200	2.13±0.12	6.08±0.76
300	3.97±0.21	7.30±0.1
400	6.59±0.11	8.14±1.28
600	10.01±0.89	9.62±1.33
800	11.27±0.13	10.03±0.04
1000	15.55±0.73	13.56±1.78
1200	16.13±0.11	17.24±0.08
1400	17.27±0.32	21.56±0.25
1600	17.92±0.58	22.83±0.39
1800	18.22±0.07	25.00±0.15

ก- 5 ผลของค่าความเข้มข้นสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์สามชนิดในพอลิพีร์โรลความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ที่มีต่อค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อน

ตาราง ก15 ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิพีร์โรลที่สังเคราะห์ในสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์สามชนิด

ชนิดสารสนับสนุนอิเล็กโทรไลต์		ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต	0.1 โมลต่อลิตร	100.07±3.72
	0.15 โมลต่อลิตร	63.75±0.04
	0.5 โมลต่อลิตร	เคลือบไม่ติด
กรดออกซาลิก	0.1 โมลต่อลิตร	54±0.65
	0.5 โมลต่อลิตร	8.56±0.46
	1 โมลต่อลิตร	86.49±2.10
กรดซัลฟิวริก	0.05 โมลต่อลิตร	63.48±1.71
	0.1 โมลต่อลิตร	11.82±0.74
	0.5 โมลต่อลิตร	70.62±1.54

ก- 6 ผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนค่าประสิทธิผลการป้องกันการกัดกร่อน ค่าความหนาแน่นและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีร์โรล/ พอลิแอนิไลน์ ที่สังเคราะห์ในสารละลายกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และพีร์โรลมอนอเมอร์ 0.1 โมลต่อลิตร โดยเทคนิคให้ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่

ตัวแปรที่ศึกษา: ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ทำการสังเคราะห์ที่เวลา 600 วินาที

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์: กรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

แอนิไลน์มอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

วิธีในการสังเคราะห์ : ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ที่ 0.7 – 1.6 โวลต์เทียบกับ SCE

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร



**ตาราง ก16** ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากััดกร่อนและค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์ม  
พอลิไพร์โรล/ พอลิแอนิไลน์ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิก  
และสารละลายแอนิไลน์มอนอเมอร์ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.7 – 1.6 โวลต์เทียบกับ SCE

ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน (ร้อยละ)
0.7	13.14±0.71	88.5±0.62
0.8	9.72±0.57	91.50±0.5
0.9	6.52±0.88	94.29±0.77
1	3.32±0.68	97.09±0.60
1.1	2.65±0.19	97.68±0.16
1.2	1.50±0.20	98.69±0.18
1.3	3.62±0.55	96.83±0.48
1.4	3.97±0.21	96.52±0.19
1.5	4.12±0.36	96.39±0.32
1.6	9.81±0.84	91.42±0.73

**ตาราง ก17** ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีริโรล/ พอลิแอนิลีนที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายแอนิซีนมอนอเมอร์ ที่ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.7 – 1.6 โวลต์เทียบกับ SCE

ศักย์ไฟฟ้า (โวลต์)	ความหนา (ไมโครเมตร)	ความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอม์ตารางเซนติเมตร)
0.7	12.47±0.55	11.30±0.06
0.8	12.56±0.41	11.71±0.04
0.9	13.02±0.24	11.38±0.24
1	13.44±0.56	12.23±0.19
1.1	13.56±0.77	13.41±1.18
1.2	13.72±0.11	9.94±0.18
1.3	14.02±0.12	11.82±0.24
1.4	15.1±0.55	12.84±0.08
1.5	15.59±0.44	17.81±0.73
1.6	17.04±0.72	20.32±0.92

**ตัวแปรที่ศึกษา:** เวลาที่ทำการสังเคราะห์ที่ 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE

**ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :**

สารละลายอิเล็กโทรไลต์: กรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

แอนิไลน์มอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

วิธีในการสังเคราะห์ : ค่าศักย์ไฟฟ้าคงที่ ที่ 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

**ตาราง ก18** ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนและค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิไพร์โรล/ พอลิแอนิไลน์ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายแอนิไลน์มอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 300 – 1800 วินาที ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE

เวลาการสังเคราะห์ (วินาที)	ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน (ร้อยละ)
300	11.30±1.08	90.11±0.95
400	5.15±0.82	95.49±0.71
500	1.55±0.7	98.64±0.61
600	1.50±0.2	98.69±0.18
800	2.47±0.67	97.84±0.59
1000	4.84±0.73	95.76±0.64
1200	10.59±1.44	90.73±1.26
1400	12.17±1.48	89.35±1.30
1600	11.28±0.22	90.13±0.19
1800	11.34±1.77	90.08±1.55

**ตาราง ก19** ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ของฟิล์มพอลิพีร์โรล/ พอลิแอนิไลน์ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายแอนิไลน์มอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 300 – 1800 วินาที ค่าศักย์ไฟฟ้า 1.2 โวลต์เทียบกับ SCE

เวลาการสังเคราะห์ (วินาที)	ความหนา (ไมโครเมตร)	ความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ (มิลลิโอมตารางเซนติเมตร)
300	2.91±1.11	5.03±1.24
400	5.34±1.03	6.24±1.02
500	8.14±0.68	8.34±0.12
600	10.72±0.76	9.94±0.88
800	13.82±0.12	9.98±0.51
1000	14.21±0.31	10.09±0.41
1200	15.01±0.32	10.82±0.17
1400	17.12±0.75	11.76±1.08
1600	17.78±0.88	12.05±1.01
1800	18.02±1.02	12.88±0.73

**ก- 7 ผลของค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากััดกร่อนค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกััดกร่อน ค่าความหนา และค่าความต้านทานเชิงสัมพัทธ์ของฟิล์มพอลิพีร์โรล/ พอลิแอนิไลน์ ที่สังเคราะห์ในสารละลายกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร และพีร์โรลมอนอเมอร์ 0.1 โมลต่อลิตร โดยเทคนิคให้ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่**

ตัวแปรที่ศึกษา : ค่ากระแสไฟฟ้าที่ทำการสังเคราะห์ที่เวลา 600 วินาที

ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :

สารละลายอิเล็กโทรไลต์: กรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

พีร์โรลมอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

วิธีในการสังเคราะห์ : ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ 0.9 – 4 มิลลิแอมแปร์

สารละลายทดสอบการกััดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

**ตาราง ก20** ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากััดกร่อนและค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกััดกร่อนของฟิล์มพอลิพีริโรล/ พอลิแอนิไลน์ ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์ ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.9 – 4 มิลลิแอมแปร์

กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	ความหนาแน่นกระแสการกััดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ประสิทธิภาพป้องกันการกััดกร่อน (ร้อยละ)
0.9	7.13±0.93	93.76±0.82
1	0.49±0.09	99.57±0.08
2	16.18±1.38	85.84±1.21
3	20.16±1.97	82.36±1.72
4	30.60±2.32	73.22±2.03

**ตาราง ก21** ค่าความหนาแน่นและความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีริโรล/ พอลิแอนิไลน์ ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์ ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 0.9 – 4 มิลลิแอมแปร์

กระแสไฟฟ้า (มิลลิแอมแปร์)	ความหนาแน่น (ไมโครเมตร)	ความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโอมห์ตารางเซนติเมตร)
0.9	17.12±1.01	14.74±0.12
1.0	19.23±1.06	14.85±0.18
2.0	21.01±0.62	15.33±0.21
3.0	22.07±0.36	16.78±0.21
4.0	22.72±0.79	16.94±0.15

**ตัวแปรที่ศึกษา:** เวลาในการสังเคราะห์ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1 มิลลิแอมแปร์

**ภาวะที่ใช้ในการสังเคราะห์ :**

สารละลายอิเล็กโทรไลต์: กรดออกซาลิกเข้มข้น 0.5 โมลต่อลิตร

แอนิไลน์มอนอเมอร์เข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

วิธีในการสังเคราะห์ : ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ 1 มิลลิแอมแปร์

สารละลายทดสอบการกัดกร่อน : กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร

**ตาราง ก22** ค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้ากัดกร่อนและค่าประสิทธิภาพการป้องกันการกัดกร่อนของฟิล์มพอลิไพร์โรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายไพร์โรลมอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 300 – 1800 วินาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1 มิลลิแอมแปร์

เวลาการสังเคราะห์ (วินาที)	ความหนาแน่นกระแสการกัดกร่อน (ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร)	ประสิทธิภาพป้องกันการกัดกร่อน (ร้อยละ)
300	5.00±0.83	95.62±0.73
400	4.67±1.42	95.91±1.24
500	2.22±0.49	98.06±0.43
600	0.49±0.09	99.57±0.08
800	6.76±0.43	94.09±0.38
1000	6.59±0.78	94.23±0.68
1200	10.26±0.75	91.02±0.65
1400	17.78±1.40	84.44±1.23
1600	18.89±0.89	83.47±0.78
1800	21.84±0.49	80.89±0.43

**ตาราง ก23** ค่าความหนาและค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของฟิล์มพอลิพีริโรล ที่สังเคราะห์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ของกรดออกซาลิกและสารละลายพีริโรลมอนอเมอร์ ที่เวลาการสังเคราะห์ 300 – 1800 วินาที ที่ค่ากระแสไฟฟ้า 1 มิลลิแอมแปร์

เวลาการสังเคราะห์ (วินาที)	ความหนา (ไมโครเมตร)	ความต้านทานเชิงสัมผัส (มิลลิโห์มตารางเซนติเมตร)
300	6.02±1.02	7.25±0.34
400	9.43±0.64	10.23±0.36
500	13.91±0.52	13.79±0.15
600	16.03±1.12	14.85±0.18
800	17.43±0.61	14.95±0.11
1000	18.92±1.06	15.01±0.04
1200	19.15±0.43	16.15±0.40
1400	19.92±0.66	16.26±0.21
1600	21.31±0.83	17.48±0.01
1800	22.12±0.51	18.66±0.08

## ภาคผนวก ข

### ตัวอย่างการคำนวณ

ข-1การคำนวณค่าความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงาน (Interfacial Contact Resistance, ICR)

$$\text{สมการหาค่าความต้านทานเชิงสัมผัส (ICR)} = \frac{[(R_2 \times A_2) - (R_1 \times A_1)]}{2}$$

$R_1$  = ค่าความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือวัด (โอห์ม)

$R_2$  = ค่าความต้านทานสัมผัสตอนมีชิ้นงาน (โอห์ม)

$A_1$  = พื้นที่ผิวสัมผัสของผ้าคาร์บอน (ตารางเซนติเมตร)

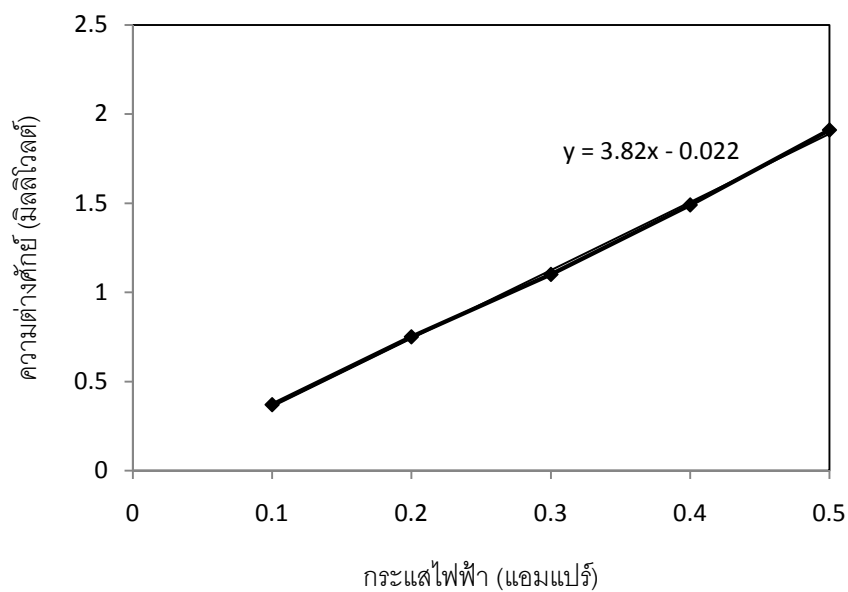
$A_2$  = พื้นที่ผิวสัมผัสของชิ้นงาน (ตารางเซนติเมตร)

ค่าความต้านทานสัมผัสของเครื่องมือ  $R_1$

เขียนกราฟระหว่างค่าความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าจากนั้นคำนวณหาความต้านทานโดยสมการกฎของโอห์ม  $V=IR$  โดยค่า  $R$  คือ ความชันที่ได้จากกราฟ

กระแสไฟฟ้า(แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (มิลลิโวลต์)
0.1	0.37
0.2	0.75
0.3	1.1
0.4	1.49
0.5	1.91

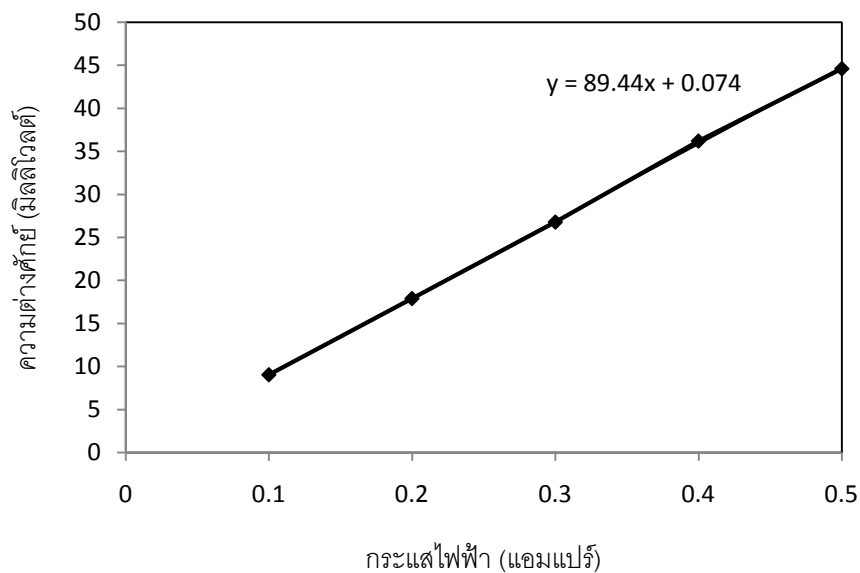




จากกราฟ ค่าความต้านทาน  $R_1 = 3.82$  มิลลิโอห์ม

ค่าความต้านทานของชิ้นงาน  $R_2$

กระแสไฟฟ้า(แอมแปร์)	ความต่างศักย์ (โวลต์)
0.1	9.03
0.2	17.9
0.3	26.8
0.4	36.2
0.5	44.6



จากกราฟ ค่าความต้านทาน  $R_2 = 89.44$  มิลลิโอห์ม

**คำนวณความต้านทานเชิงสัมผัสของชิ้นงาน**

พื้นที่ผิวสัมผัสของผ้าคาร์บอน ( $A_1$ ) = 3.50 ตารางเซนติเมตร พื้นที่ผิวสัมผัสของชิ้นงาน ( $A_2$ ) = 1 ตารางเซนติเมตร

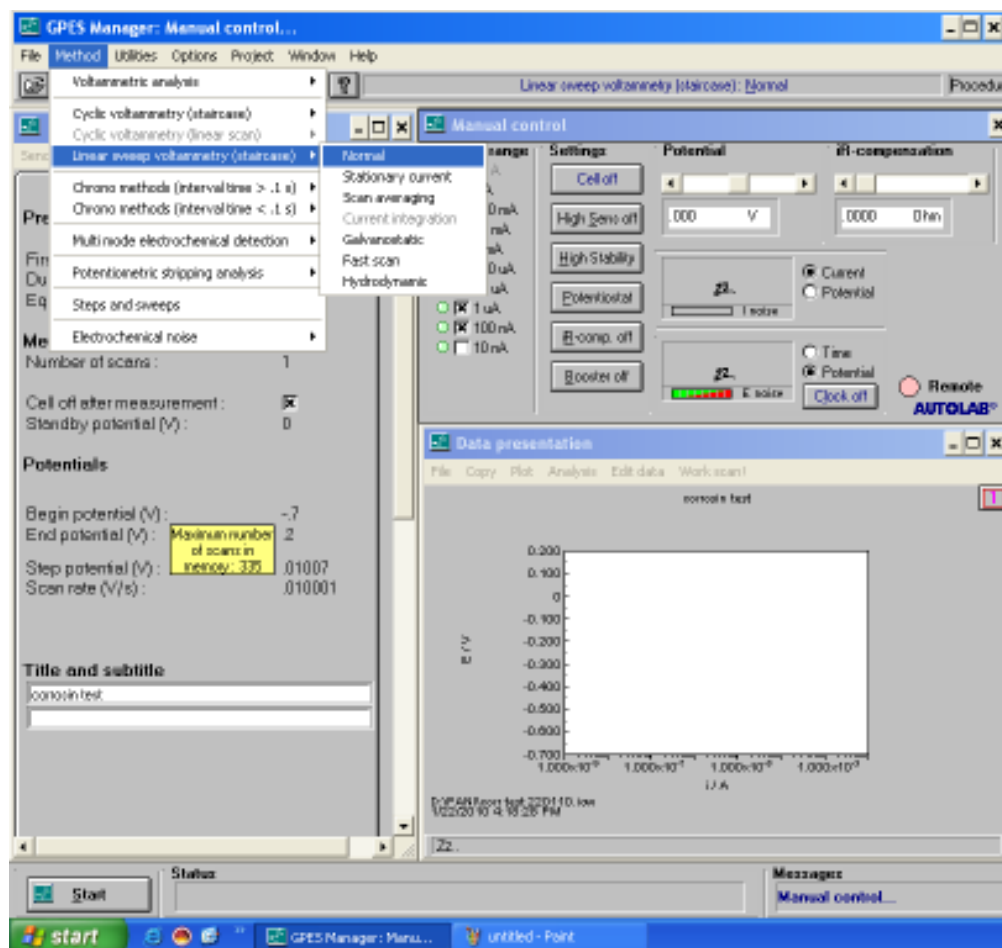
$$\begin{aligned}
 ICR &= \frac{[(R_2 \times A_2) - (R_1 \times A_1)]}{2} \\
 &= \frac{[(89.44 \times 1) - (3.82 \times 3.5)]}{2} \\
 &= 38.035 \text{ มิลลิโอห์มตารางเซนติเมตร}
 \end{aligned}$$

## ภาคผนวก ค

## ขั้นตอนการทดสอบและวิเคราะห์หาตัวแปรการกัดกร่อนโดยวิธี Tafel slope analysis ด้วยโปรแกรม GPES

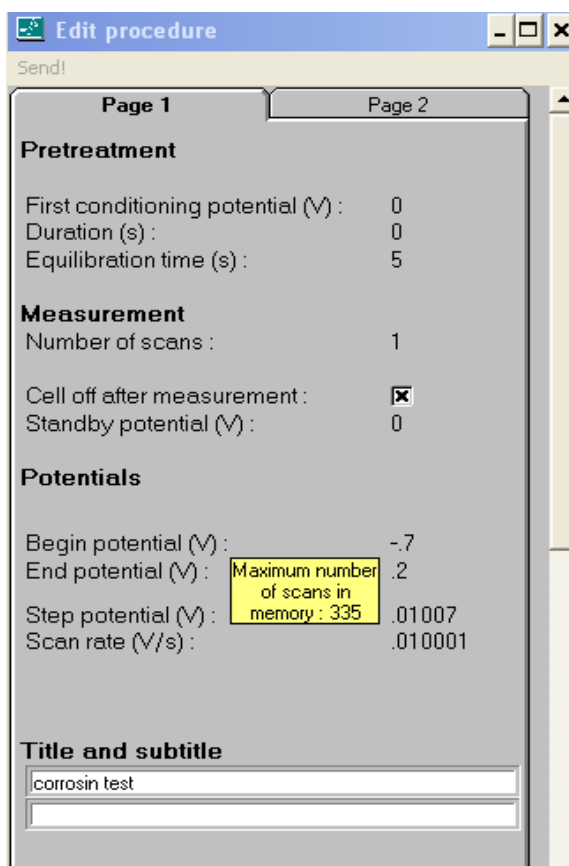
- ขั้นตอนในการทดสอบหาอัตราการกัดกร่อน [20]

1.เปิดโปรแกรม GPESเลือกเมนู Method → Linear sweep voltammetry(staircase): Normal ดังแสดงในรูป ค.1



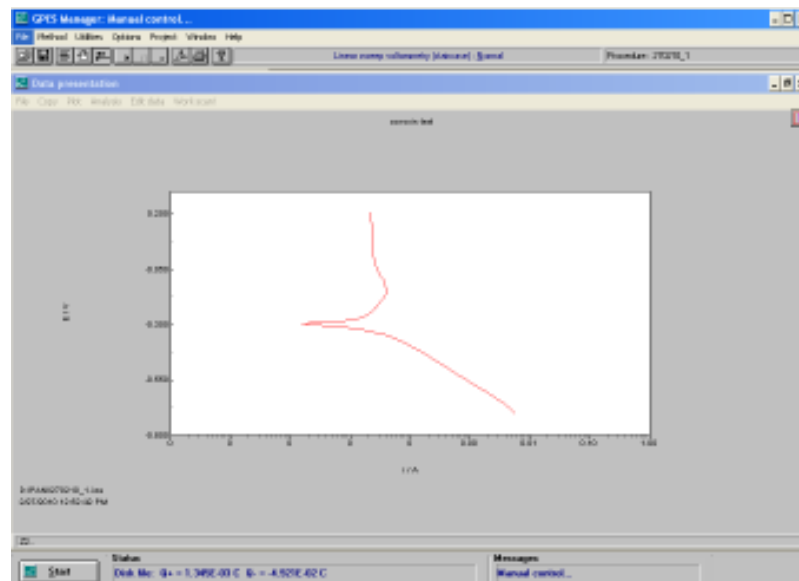
ภาพที่ ค.1การเปิดโปรแกรม GPES

2. ในpage 1ให้กำหนดพารามิเตอร์เบื้องต้นที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ Begin potential (V), End potential (V), Step potential (V), Scan rate (V/s) ดังแสดงในรูป ค.2 และสามารถระบุรายละเอียดโดยป้อนชื่อชิ้นงานในส่วนของ Title and subtitle



ภาพที่ ค.2 การป้อนค่าพารามิเตอร์ในการทดสอบด้วยโปรแกรม GPES

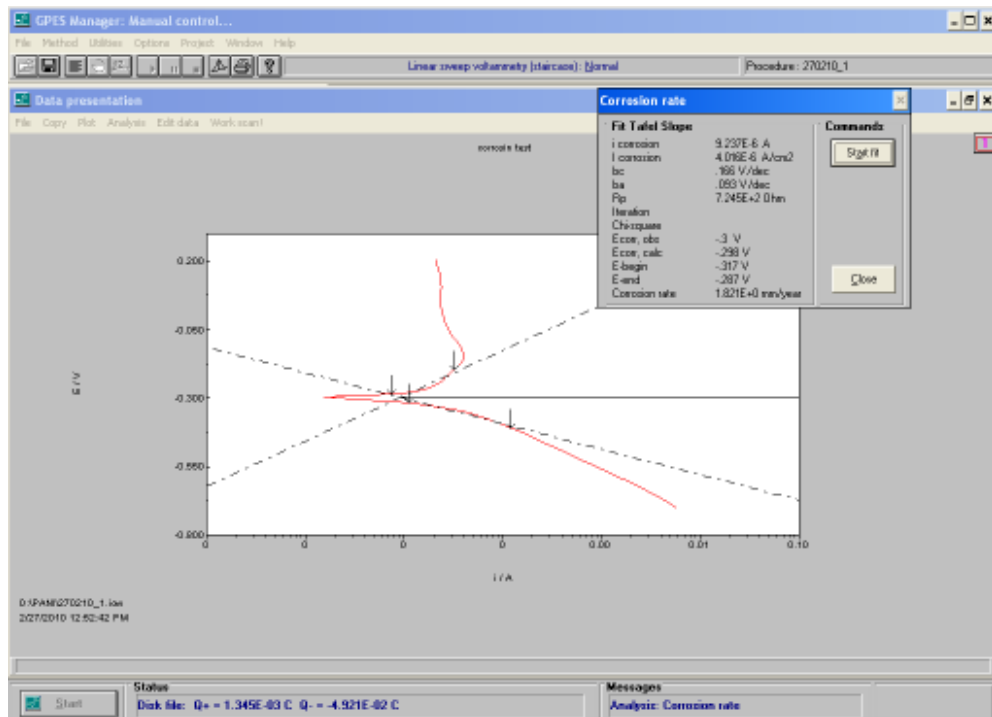
- 3.เตรียมชิ้นงานและอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ให้พร้อม
4. เมื่อต่อสายต่างๆ เข้าที่ test cell เรียบร้อยแล้ว เริ่มทำการทดสอบโดยกดปุ่ม cell enable ที่เครื่อง Potentiostat แล้วกดปุ่ม start ที่หน้าจอ GPES
5. โปรแกรมเริ่มทำงานและวัดค่ากระแสออกมา สามารถดูกราฟได้ที่หน้าต่าง Data presentation ดังแสดงในรูป ค.3 เมื่อได้กราฟที่ต้องการแล้วสามารถนำไปคำนวณหาค่าอัตราการกัดกร่อนได้ต่อไป
6. หลังการทำงานถ้าต้องการเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ เลือกเมนู File → Save procedure As และถ้าต้องการเก็บผลกราฟที่ได้ เลือกเมนู File → Save work data ที่หน้าต่าง presentatio



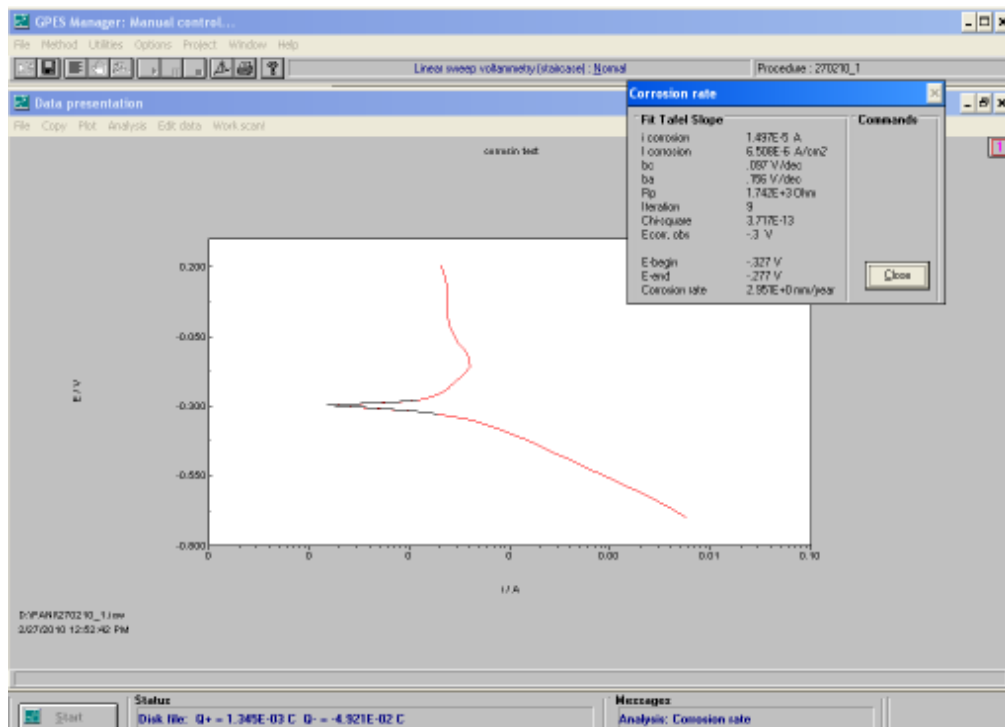
ภาพที่ ค.3 กราฟที่วิเคราะห์ได้ (Tafel plot)

- ขั้นตอนในการวิเคราะห์หาอัตราการกัดกร่อน

1. จากหน้าต่าง Data presentation เลือกเมนู Analysis → Corrosion rate
2. จากหน้าต่าง Corrosion rate ในช่อง result ใส่ค่าที่จำเป็นต่อการคำนวณการหาตัวแปรการกัดกร่อนของชิ้นงานที่ทดสอบ ดังนี้ ชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม ได้แก่ พื้นที่ผิว (Surface area) 2.3 ตารางเซนติเมตร น้ำหนักสมมูลย์ (Equivalent weight) 27.92 กรัมต่ออิกิเวเลนซ์ ความหนาแน่น (density) 7.87 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ชิ้นงานพอลิพีริโรล ได้แก่ น้ำหนักสมมูลย์ 134 กรัมต่ออิกิเวเลนซ์ ความหนาแน่น 0.967 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และพอลิเอนิลีน ได้แก่ น้ำหนักสมมูลย์ 186.26 กรัมต่ออิกิเวเลนซ์ ความหนาแน่น 1.02 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
3. เมื่อใส่ข้อมูลที่จำเป็นครบแล้ว เลือก Tafel slopes
4. กำหนดจุด 2 จุด ที่ด้านล่างของกราฟแล้วกดปุ่ม OK
5. กำหนดจุด 2 จุด ที่ด้านล่างของกราฟแล้วกดปุ่ม OK จะได้เส้นตรง 2 เส้นตัดกัน สังเกตให้จุดตัดอยู่ตรงกลางของกราฟเมื่อเลือกจุดเสร็จแล้วจะมีหน้าต่าง Fit Tafel Slope ปรากฏซึ่งแสดงค่าต่าง ๆ ที่เครื่องอ่านได้ แสดงดังภาพที่ ค.4
6. ค่าที่ปรากฏในหน้าต่าง Fit Tafel slope ยังไม่ใช่ค่าที่แท้จริง ให้คลิก Start fit ในช่อง Commands พิจารณาให้กราฟสีดำทับกับกราฟที่วิเคราะห์ได้ (สีแดง) เครื่องจะทำการคำนวณเพื่อตรวจสอบค่าที่ได้อีกครั้ง จะได้ค่าใหม่ที่น่าไปใช้ได้แสดงดังภาพที่ ค.5



ภาพที่ ค.4 ค่าพารามิเตอร์ที่เครื่องอ่านได้หลังจาก Fit Tafel slope



ภาพที่ ค.5 ค่าพารามิเตอร์ที่เครื่องอ่านได้หลังจากเลือกคลิก Start fit

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพัชราลัย อรุณยงค์ เกิดเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสมุทรสาครบูรณะ จังหวัดสมุทรสาคร เมื่อ พ.ศ. 2546 สำเร็จการศึกษา ระดับปริญญาตรี ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิตสาขาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พ.ศ. 2552 และศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2552