



โครงการ

การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ	การเตรียมพอลิเมอร์นำไฟฟ้าห่อหุ้มอนุภาคสังกะสีออกไซด์และ การประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนดของแบตเตอรี่สังกะสีไอออน		
	Preparation of conductive polymer wrapped ZnO particles and their application for Zinc ion anode battery		
ชื่อนิสิต	นางสาวณิชารีย์ ทินกรสุติบุตร	เลขประจำตัว	5833226123
	นางสาวธีรนนท์ สุระเจริญชัยกุล		5833233523
ภาควิชา	วัสดุศาสตร์ แขนงพอลิเมอร์และสิ่งทอ		
ปีการศึกษา	2561		

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของโครงการทางวิชาการที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของโครงการทางวิชาการที่ส่งผ่านทางคณะที่สังกัด

The abstract and full text of senior projects in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the senior project authors' files submitted through the faculty.

โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

เรื่อง

การเตรียมพอลิเมอร์นำไฟฟ้าห่อหุ้มอนุภาคสังกะสีออกไซด์และการประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนดของ
แบตเตอรี่รีสังกะสีไอออน

เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์

นางสาวณิชารีย์ ทินกรสุติบุตร 5833226123

นางสาวธีรนนท์ สุระเจริญชัยกุล 5833233523

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ดร.ประสิทธิ์ พัฒนะนุวัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช

อนุมัติโดย

ประสิทธิ์ พัฒนะนุวัฒน์

(ดร. ประสิทธิ์ พัฒนะนุวัฒน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

ปีการศึกษา 2561

หัวข้องานวิจัย	การเตรียมวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์นำไฟฟ้า/สังกะสีออกไซด์และการประยุกต์ใช้เป็นขั้วแอโนดของแบตเตอรี่สังกะสีไอออน
ชื่อผู้วิจัย	ณิชารีย์ ทินกรสุติบุตร ธีรนนท์ สุระเจริญชัยกุล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ประสิทธิ์ พัฒนะนุวัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โพธิยะราช

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาการและเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการเกิดปฏิกิริยากัดกร่อนที่ขั้วแอโนดสังกะสีออกไซด์ ด้วยวัสดุพอลิเมอร์นำไฟฟ้า 2 ชนิด ได้แก่ พอลิไพโรล และพอลิอะนิลีน โดยวัสดุเชิงประกอบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า/สังกะสีออกไซด์ถูกสังเคราะห์โดยวิธีอินซิทูพอลิเมโรเซชัน และกระบวนการโซโนเคมีคัล โดยองค์ประกอบในการศึกษามุ่งเน้นศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์นำไฟฟ้า/สังกะสีออกไซด์ โดยใช้อัตราส่วนโมลของมอนอเมอร์ ต่อแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1:0.5, 1:1 และ 1:1.5 ตามลำดับ และใช้อัตราส่วนโมลของมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกัน 1:0.5, 1:0.75, 1:1, 1:2, 1:4, และ 1:6 ตามลำดับ โดยลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์นำไฟฟ้า/สังกะสีออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดพบว่า สัณฐานของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าของ พอลิไพโรล หรือพอลิอะนิลีน มีลักษณะเป็นแผ่นกระจายอยู่ร่วมกับอนุภาคที่เป็นแท่งของสังกะสีออกไซด์ และการโครงสร้างทางเคมีหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของพอลิไพโรลและพอลิอะนิลีนที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นนั้นถูกยืนยันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี หลังจากนั้นวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์นำไฟฟ้า/สังกะสีออกไซด์นั้นถูกนำไปขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการลดการเกิดปฏิกิริยากัดกร่อนที่ขั้วแอโนด และศึกษาประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าแอโนดจากวัสดุเชิงประกอบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า/สังกะสีออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ โดยจากการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลทามาเมตรี และเทคนิคทาเฟล เอ็กซ์ทราโพรเซชันพบว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์นำไฟฟ้า/สังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วนไพโรลมอนอเมอร์และกรดไฮโดรคลอริกที่ 1:0.75 ให้ค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนที่ดีที่สุด คือที่ร้อยละการยับยั้ง 69.88 เปอร์เซ็นต์ จึงนำมาทำการเลือกอัตราส่วนที่ดีที่สุดเพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นแบตเตอรี่ที่มีขั้วแคโทดเป็น นิกเกิลไฮดรอกไซด์ เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคกลาวโนสแตติก ชาร์จ ดิสชาร์จ พบว่าสามารถให้ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า คือ 458 มิลลิแอมแปร์ชั่วโมงต่อกรัม ที่กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ต่อกรัม

คำสำคัญ : แบตเตอรี่สังกะสีไอออน, แบตเตอรี่ทุติยภูมิ, พอลิเมอร์นำไฟฟ้า, พอลิไพโรล, พอลิอะนิลีน, การกัดกร่อน

Research title	Preparation of conductive polymer/ZnO composites and their application for Zinc ion anode battery
Researchers	Nicharee Thinnakornsutibutr Teeranun Suracharoenchaikul
Advisor	Dr. Prasit Pattananuwat
Co-advisor	Prof. Pranut Potiyaraj

Abstract

Polypyrrole/zinc oxide nanoparticle (PPy/ZnO) composites and polyaniline/zinc oxide nanoparticle (PANI/ZnO) composites are successfully synthesized via in-situ polymerization by aiding of ultrasonic irradiation. The different ratios of monomer to ammonium persulfate (APS) at 1:0.5, 1:1 and 1:1.5 and the different ratios of monomer to hydrochloric acid (HCl) at 1:0.5, 1:0.75, 1:1, 1:2, 1:4 and 1:6 are used to control the amounts of conductive polymers in composites. Scanning Electron Microscopy indicates the surface morphology of PPy/ZnO and PANi/ZnO composites. The chemical structure is studied by Fourier Transform Infrared Spectroscopy, revealing the evident characteristic of polypyrrole and polyaniline signals. The surface electrochemical activity of ZnO/PPy anodic electrode is characterized by linear polarization and cyclic voltammetry (CV). The introduction of PPy onto ZnO surface with the appropriate content and structure can improve the anti-corrosion and charge performance of electrode composites. The synthesized ZnO/PPy electrode at PPy/HCl ratio of 1:0.75 can yield the highest values of corrosion inhibition efficiency of 69.88 % in 6 M KOH aqueous solution. Furthermore, the performance of zinc oxide/nickel battery examined by Galvanostatic charge-discharge at 1 A/g in KOH with saturated ZnO solution reveals the highest specific capacity at 458 mAh/g.

Keywords: zinc ion battery, secondary battery, conductive polymer, polypyrrole, polyaniline, corrosion

กิตติกรรมประกาศ

รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ การสนับสนุน และความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ การดำเนินงาน และเงินทุนสนับสนุนจากคณาจารย์ ท่านทั้งหลายและหน่วยงานต่าง ๆ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ดร.ประสิทธิ์ พัฒนะนิวรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ และคำปรึกษาตลอดการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ประณัฐ โภธิยะราช ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ส่งเสริม ในด้านวิชาการและความช่วยเหลือในการดำเนินงาน

ขอขอบคุณพีนิสิตปริญญาเอก ปริญญาโท สาขาวิชาพอลิเมอร์และสิ่งทอ และเพื่อนนิสิตปริญญาตรี ชั้นปีที่ 4 ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และเป็นกำลังใจในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นแบบอย่างที่ดี ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดี ทำให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นางสาวณิชารีย์ ทินกรสุติบุตร

นางสาวธีรนนท์ สุระเจริญชัยกุล

สารบัญ

บทคัดย่อ.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญรูป.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน.....	3
2.1.1 เซลล์เชื้อเพลิง	3
2.1.2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด	4
2.1.3 แบตเตอรี่	4
2.2 แบตเตอรี่โลหะไอออน	5
2.3 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า	7
2.3.1 พอลิอะนิลีน	7
2.3.2 พอลิไพโรล	10
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	12
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี.....	12
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	12
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	13
3.3.1 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์	13
3.3.2 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์	13
3.3.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบธาตุ.....	14
3.3.4 การขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าแบตเตอรี่	14
3.3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมี.....	14

3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง	16
3.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน	17
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	18
4.1 ผลการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและสังกะสีออกไซด์	18
4.1.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมี.....	18
4.2 ผลการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์	19
4.2.1 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	20
4.2.2 วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลทามาเมตรี	22
4.2.3 วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคทาเฟลเอ็กซ์ทราโพรเซชัน.....	25
4.3 ผลการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์	28
4.3.1 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	29
4.3.2 วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลทามาเมตรี.....	31
4.3.3 วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีเทคนิคทาเฟลเอ็กซ์ทราโพรเซชัน	34
4.4 ผลการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์เป็นขั้วแอโนดของแบตเตอรี่	37
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	39
5.1 สรุปผลการทดลอง	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	40
เอกสารอ้างอิง.....	41

สารบัญรูป

		หน้า
รูปที่ 2.1	ค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดขณะอัดและคายประจุ	4
รูปที่ 2.2	สูตรโครงสร้างทั่วไปของพอลิอะนิลีน	7
รูปที่ 2.3	โครงสร้างทางเคมีของพอลิอะนิลีนแบบต่างๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์	8
รูปที่ 2.4	โครงสร้างทั่วไปของอนุพันธ์พอลิอะนิลีนที่มีหมู่ซัลโฟเนตเป็นหมู่แทนที่บนวงเบนซีน ในสถานะที่เป็นกลาง กรด และด่าง	9
รูปที่ 2.5	TEM ของ Co_3O_4 และ $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-PANI}$	10
รูปที่ 2.6	สูตรโครงสร้างทั่วไปของพอลิไพโรล	10
รูปที่ 2.7	แผนภาพของวัสดุเชิงประกอบของสังกะสีออกไซด์ โลหะเงินและพอลิไพโรล	11
รูปที่ 3.1	แผนภาพแสดงการทดลอง	16
รูปที่ 4.1	หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของ (a) อนุภาคสังกะสีออกไซด์ (b) วัสดุเชิงประกอบของ พอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ และ (c) วัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและ สังกะสีออกไซด์	18
รูปที่ 4.2	วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ โดยอัตราส่วนมอโนเมอร์: แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (a) 1:0.5 (b) 1:1 (c) 1:1.5	19
รูปที่ 4.3	วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ โดยอัตราส่วนมอโนเมอร์: ไฮโดรคลอริก (a) 1:0.5 (b) 1:0.75 (c) 1:1 (d) 1:2 (e) 1:4 (f) 1:6	19
รูปที่ 4.4	สัณฐานวิทยาของ (a) อนุภาคสังกะสีออกไซด์ และวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรล และสังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วนมอโนเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตแตกต่างกัน (b) 1:0.5 (c) 1:1 (d) 1:1.5	20
รูปที่ 4.5	สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วน มอโนเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกแตกต่างกัน (a) 1:0.5 (b) 1:0.75 (c) 1:1 (d) 1:2 (e) 1:4 (f) 1:6	21
รูปที่ 4.6	เปรียบเทียบความสามารถในการเก็บประจุของสังกะสีออกไซด์และวัสดุเชิงประกอบ ของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนมอโนเมอร์ : แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ที่แตกต่างกัน	23
รูปที่ 4.7	เปรียบเทียบความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและ สังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนมอโนเมอร์ : กรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกัน	24

รูปที่ 4.8	เปรียบเทียบการกัดกร่อนของวัสดุเชิงประกอบของพอลิไฟโรลและสังกะสีออกไซด์ ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 โมลาร์	26
รูปที่ 4.9	เปรียบเทียบการกัดกร่อนของวัสดุเชิงประกอบของพอลิไฟโรลและสังกะสีออกไซด์ ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 โมลาร์	27
รูปที่ 4.10	วัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ โดยอัตราส่วนมอโนเมอร์: แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (a) 1:0.5 (b) 1:1 (c) 1:1.5	28
รูปที่ 4.11	วัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ โดยอัตราส่วนมอโนเมอร์: ไฮโดรคลอริก (a) 1:0.25 (b) 1:0.5 (c) 1:0.75 (d) 1:1	28
รูปที่ 4.12	สัณฐานวิทยาของ (a) อนุภาคสังกะสีออกไซด์ และวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีน และสังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วนมอโนเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตแตกต่างกัน (b) 1:0.5 (c) 1:1 (d) 1:1.5	29
รูปที่ 4.13	สัณฐานวิทยาของพอลิอะนิลีนห่อหุ้มอนุภาคสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนมอโนเมอร์: กรดไฮโดรคลอริก แตกต่างกัน (a) 1:0.25 (b) 1:0.5 (c) 1:0.75 (d) 1:1	30
รูปที่ 4.14	เปรียบเทียบความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนและ สังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วนมอโนเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตแตกต่างกัน	32
รูปที่ 4.15	เปรียบเทียบความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนและ สังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนมอโนเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกแตกต่างกัน	33
รูปที่ 4.16	กราฟการกัดกร่อนของพอลิไฟโรลห่อหุ้มอนุภาคสังกะสีออกไซด์ในสารละลาย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 โมลาร์ ที่อัตราส่วนมอโนเมอร์ : แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่แตกต่างกัน	35
รูปที่ 4.17	กราฟการกัดกร่อนของพอลิอะนิลีนห่อหุ้มอนุภาคสังกะสีออกไซด์ในสารละลาย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 โมลาร์	36
รูปที่ 4.18	เปรียบเทียบค่าความสามารถในการเก็บและจ่ายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่ใช้ วัสดุเชิงประกอบของพอลิไฟโรลและสังกะสีออกไซด์เป็นขั้วแอโนด	38

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1	Corrosion parameters 7
ตารางที่ 3.1	ขอบเขตระยะเวลาการดำเนินงาน 17
ตารางที่ 4.1	ค่าความเก็บประจุของสังกะสีออกไซด์และวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์ : แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่แตกต่างกัน 23
ตารางที่ 4.2	ค่าความเก็บประจุของวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์ : กรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกัน 24
ตารางที่ 4.3	ค่าการกักตร่อนของการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ในการใช้อัตราส่วนไพโรลมอนอเมอร์และแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่ต่างกัน 26
ตารางที่ 4.4	ค่าการกักตร่อนของการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ในการใช้อัตราส่วนไพโรลมอนอเมอร์และกรดไฮโดรคลอริกที่ต่างกัน 27
ตารางที่ 4.5	ค่าความเก็บประจุของวัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตแตกต่างกัน 32
ตารางที่ 4.6	ค่าความเก็บประจุของวัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกแตกต่างกัน 33
ตารางที่ 4.7	ค่าการกักตร่อนของการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนสังกะสีออกไซด์ในการใช้อัตราส่วนอะนิลีนมอนอเมอร์และแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่ต่างกัน 35
ตารางที่ 4.8	ค่าการกักตร่อนของการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนสังกะสีออกไซด์ในการใช้อัตราส่วนอะนิลีนมอนอเมอร์และกรดไฮโดรคลอริกที่ต่างกัน 37

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

ในปัจจุบันความต้องการในการใช้พลังงานมีการเติบโตที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การใช้แหล่งพลังงานฟอสซิล ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ใช้แล้วหมดไปถูกทดแทนด้วยแหล่งพลังงานหมุนเวียน และพลังงานจากกระบวนการเคมี เช่น พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ และเซลล์เชื้อเพลิง เป็นต้น การแปรรูปพลังงานดังกล่าวในรูปของพลังงานไฟฟ้านั้น จำเป็นต้องมีอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าเพื่อสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าในการใช้งานต่าง ๆ เช่น ไฟฟ้าครัวเรือน รถยนต์ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น อุปกรณ์กักเก็บพลังงานแบบไฟฟ้าเคมี เป็นอุปกรณ์ที่สามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าในรูปพลังงานเคมี และเปลี่ยนพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้าผ่านปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี รูปแบบหนึ่งของอุปกรณ์ดังกล่าวคือ แบตเตอรี่ทุติยภูมิ (secondary battery) ที่มีความสามารถในการอัดประจุซ้ำได้ แบตเตอรี่ทุติยภูมิที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลาย และที่รู้จักกันดีคือ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion battery) เนื่องจากมีความหนาแน่นของพลังงานไฟฟ้าที่สูง และอายุการใช้งานยาวนาน อย่างไรก็ตาม แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น ความไวไฟของลิเทียมไอออนทำให้ระเบิดได้ง่าย ความพิษต่อสิ่งแวดล้อม และแนวโน้มของปริมาณลิเทียมที่ลดลงในอนาคต เป็นต้น

การพัฒนาขั้ววัสดุโลหะไอออนชนิดอื่น ๆ ซึ่งใช้เป็นขั้วแอโนด (Anode) นั้น สามารถใช้โลหะได้หลากหลาย อาทิเช่น โซเดียม อลูมิเนียม สังกะสี และแมกนีเซียม เป็นต้น สังกะสีเป็นโลหะหนึ่งที่น่าสนใจมาใช้ขั้วไฟฟ้าที่ใช้กันแพร่หลาย โดยมีข้อดีคือ มีความปลอดภัยกว่าลิเทียม มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ราคาถูก มีความสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ และมีปริมาณที่มากเกินพอในประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตามพบว่า ข้อเสียของการใช้วัสดุขั้วสังกะสีที่พบคือ การเกิดกัตกร่อน การเกิดแก๊สไฮโดรเจน (hydrogen evolution reaction) และการเติบโตของเดนไดรต์ (dendrite growth) ซึ่งเป็นผลมาจากการละลายของขั้วสังกะสีระหว่างจ่ายประจุไฟฟ้า และการฝังตัวใหม่ของสังกะสีที่ไม่เป็นระเบียบ (non-uniform) ระหว่างอัดประจุไฟฟ้า ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการเก็บประจุไฟฟ้า และประสิทธิภาพต่อรอบระยะเวลาของการเก็บพลังงานไฟฟ้าลดลง เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีแนวคิดในการนำวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและสังกะสี โดยใช้พอลิเมอร์ เช่น พอลิอะนิลีน (polyaniline) และพอลิไพโรล (polypyrrole) เป็นต้น ซึ่งพอลิเมอร์นำไฟฟ้ายังคงมีความสามารถในการป้องกันการกัตกร่อนของโลหะ โดยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรของพอลิเมอร์กับไอออนของโลหะ

ลิเมอร์นำไฟฟ้า-สังกะสีออกไซด์ ที่ช่วยลดการละลายของขั้วไฟฟ้าระหว่างการจ่ายไฟฟ้า นอกจากนี้พอลิเมอร์นำไฟฟ้า ยังมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูง ราคาถูก และง่ายต่อการสังเคราะห์ ซึ่งทำให้เป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจในการศึกษา ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการพัฒนาขั้วแอโนดโดยสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและสังกะสีออกไซด์ระดับนาโนเมตร เพื่อช่วยในการช่วยลดการกัดกร่อน ลดการเกิดแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแอโนด และการเติบโตของเดนไดรต์ โดยทำการเปรียบเทียบชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้คือ พอลิอะนิลีน และพอลิไพโรล

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ และวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์
2. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงานของขั้วไฟฟ้าแอโนดระหว่าง วัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ และวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

ในปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีด้านพลังงานมีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือกต่าง ๆ อาทิเช่น พลังงานลม พลังงานสุริยะ และพลังงานไฮโดรเจน เป็นต้น ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจำเป็นต้องมีเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (energy storage) ที่เหมาะสมสามารถตอบสนองต่อการใช้งานในการดำรงชีวิตของมนุษย์ได้ตลอดเวลา ดังนั้นเทคโนโลยีการกักเก็บพลังงานจึงเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่ต้องการการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สามารถรองรับการพัฒนาเทคโนโลยีอื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในอนาคต ซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากบทบาทของเทคโนโลยีอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่เข้ามาอำนวยความสะดวกสบายต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน เช่น แบตเตอรี่แบบผสมในยานพาหนะที่นำเอาเทคโนโลยีของเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cells) ร่วมกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor) หรือแบตเตอรี่ลิเทียม (Li-ion battery) ขนาดเล็กสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เคลื่อนที่ เป็นต้น

2.1 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (Energy storage)

การนิยามและแนวทางการพัฒนาอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าจะถูกกล่าวถึงดังนี้

2.1.1 เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells)

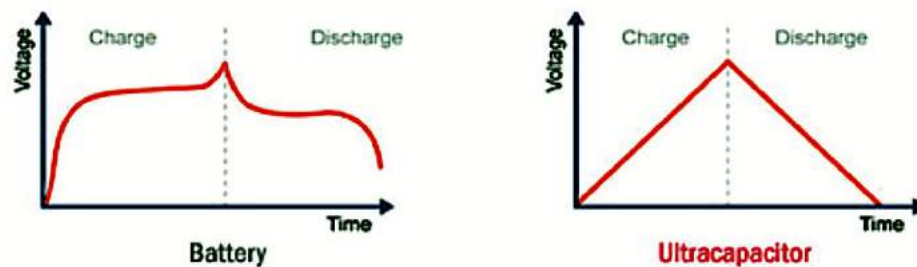
เซลล์เชื้อเพลิง^[1] คือ อุปกรณ์ที่ผลิตพลังงานไฟฟ้าผ่านกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี โดยการเปลี่ยนโมเลกุลไฮโดรเจนและออกซิเจนให้กลายเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยไม่ผ่านปฏิกิริยาการเผาไหม้ จึงไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ เป็นพลังงานสะอาด และยังมีประสิทธิภาพสูงกว่าเครื่องยนต์ที่ใช้พลังงานจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงถึง 2-3 เท่า สารตั้งต้นที่ใช้โดยทั่วไปในเซลล์เชื้อเพลิง ได้แก่ ก๊าซไฮโดรเจนที่ขั้วแอโนด และก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแคโทด โดยมีองค์ประกอบสำคัญของเซลล์เชื้อเพลิง คือ

1. ขั้วแอโนด (anode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ให้ประจุลบกับเซลล์เชื้อเพลิง มีหน้าที่ส่งผ่านประจุอิเล็กตรอนหรือประจุไฟฟ้าลบออกไปทางขั้วไฟฟ้า ส่วนแก๊สไฮโดรเจนที่ถูกดึงอิเล็กตรอนออกไปจะแสดงประจุบวกที่เรียกว่าโปรตอน
2. ขั้วแคโทด (cathode) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ให้ประจุบวกกับเซลล์เชื้อเพลิง มีหน้าที่ต่อเข้ากับสายไฟภายนอก รับอิเล็กตรอนมารวมกับอะตอมของแก๊สออกซิเจนกับไฮโดรเจนกลายเป็นโมเลกุลของน้ำ

3. สารพาประจุ (electrolyte) เป็นสารที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของไอออนชนิดต่าง ๆ และทำหน้าที่เป็นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (proton exchange membrane) เท่านั้น ซึ่งมีลักษณะเหมือนแผ่นพลาสติกโดยจะให้โปรตอนผ่านได้ แต่จะไม่ยอมให้อิเล็กตรอนผ่าน

2.1.2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitors)

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่มีค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) สูงกว่าตัวเก็บประจูนอื่น ๆ หลายเท่า และมีความสามารถในการคายและอัดประจุไฟฟ้าในเวลาได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังมีข้อดีคือ มีราคาถูก ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แรงกระแทก และการสั่นสะเทือนได้ดี



รูปที่ 2.1 ค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (ซ้าย) และตัวเก็บประจุยิ่งยวด (ขวา) ขณะอัดและคายประจุ^[2]

ข้อแตกต่างที่สำคัญระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุยิ่งยวด คือ ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะมีแรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic charge) ระหว่างประจุต่างขั้วกันเป็นหลักในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า ในขณะที่แบตเตอรี่ทั่วไปอาศัยปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าดังแสดงในรูป 2.1 ส่งผลให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีอายุตามจำนวนรอบการใช้งานมากกว่า เนื่องจากไม่เกิดการเสื่อมสภาพจากการเกิดปฏิกิริยาเคมี

2.1.3 แบตเตอรี่ (Battery)

แบตเตอรี่^[3] คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จัดเก็บพลังงานไฟฟ้า สามารถแปลงพลังงานเคมีให้เป็นไฟฟ้าได้โดยตรง ด้วยการใช้เซลล์กัลวานิก (galvanic cell) มีโครงสร้างประกอบด้วยขั้วบวกและขั้วลบ พร้อมกับสารพาประจุ แบตเตอรี่อาจประกอบด้วยเซลล์กัลวานิกเพียง 1 เซลล์ หรือมากกว่าก็ได้ โดยแบตเตอรี่แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. แบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ไม่ได้ หรือ แบตเตอรี่ปฐมภูมิ (primary battery) เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถใช้ได้เพียงครั้งเดียว ดังนั้น เมื่อสารเคมีเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพหมด ไฟฟ้าก็จะหมดจาก

แบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่เหล่านี้เหมาะสำหรับใช้ในอุปกรณ์ขนาดเล็กที่สามารถเคลื่อนย้ายได้สะดวก และมีความต้องการใช้กระแสไฟฟ้าต่ำ เช่น แบตเตอรี่อัลคาไลน์ (alkali battery) ที่ใช้สำหรับไฟฉาย เป็นต้น

2. แบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ หรือ แบตเตอรี่ทุติยภูมิ (secondary battery) เป็นแบตเตอรี่ที่สามารถประจุไฟฟ้าใหม่ได้หลังจากไฟหมด เนื่องจากสารเคมีที่ใช้ทำแบตเตอรี่ชนิดนี้สามารถทำให้กลับไปอยู่ในสภาพเดิมได้โดยการประจุไฟฟ้าเข้าไปใหม่ จึงสามารถคายและอัดประจุใหม่ได้หลาย ครั้ง ตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่ตะกั่วกรดที่ใช้ในยานพาหนะ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนที่ใช้สำหรับโทรศัพท์มือถือ เป็นต้น

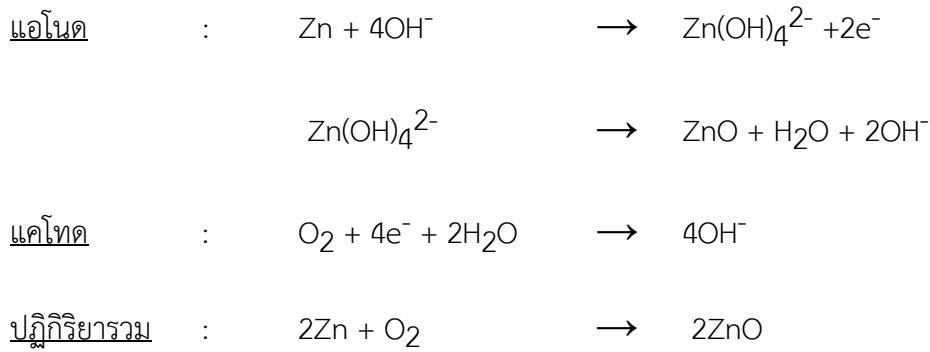
ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์จัดเก็บและจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำรองที่เป็นที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ แบตเตอรี่ทุติยภูมิชนิดโลหะไอออนเป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางเนื่องจากสามารถอัดประจุซ้ำได้หลายครั้ง มีความหลากหลายของระดับในการเก็บพลังงาน และมีประเภทการใช้งานที่หลากหลาย

2.2. แบตเตอรี่โลหะไอออน (Metal-ion Battery)

แบตเตอรี่โลหะไอออนเป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่สามารถอัดประจุซ้ำได้ โดยขั้วโลหะไอออนที่จะถูกใช้เป็นขั้วแอโนดของแบตเตอรี่มีอยู่หลายชนิด เช่น ลิเทียม โซเดียม อะลูมิเนียม และสังกะสี เป็นต้น โดยแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายและรู้จักกันดีคือ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน (Li-ion battery) เนื่องจาก แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนสามารถอัดประจุไฟฟ้าได้เร็ว มีความหนาแน่นของพลังงานที่สูง และมีระยะเวลาการใช้งานที่นาน แต่จากการมีข้อจำกัดบางประการ เช่น ความไวไฟของลิเทียมไอออนทำให้ระเบิดได้ง่าย ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และแนวโน้มของปริมาณลิเทียมที่ลดลงในอนาคต เป็นต้น

สังกะสี (zinc) เป็นโลหะหนึ่งที่ถูกนิยมนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าแอโนด (anode electrode) ที่ใช้กันแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น ในผลการวิจัยของ Ning Zhang และคณะ^[4] ได้ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ในระบบแมงกานีสไดออกไซด์-สังกะสี (Zn-MnO₂) โดยใช้สารละลายสังกะสีไตรฟลูออโรเมทเธนซัลโฟเนต (Zn(CF₃SO₃)₂) เป็นสารพาประจุ เนื่องจากแบตเตอรี่ชนิดนี้ใช้สังกะสีเป็นขั้วแอโนด ซึ่งมีข้อดีคือ มีราคาถูก ความปลอดภัยสูง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และมีกระบวนการผลิตที่ง่าย จึงส่งผลให้มีการพัฒนาแบตเตอรี่ชนิดนี้เป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่พบในการใช้งานแบตเตอรี่ชนิดนี้คือ มีจำนวนรอบการใช้งานที่น้อยเนื่องจากเกิดการจ่ายประจุไฟฟ้าที่ไม่ผันกลับ (irreversible) และยังพบว่าค่าความจุไฟฟ้าเมื่อจ่ายประจุไฟฟ้ามีค่าจำกัด นอกจากนี้ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นยังพบว่า โลหะสังกะสีที่ใช้เป็น

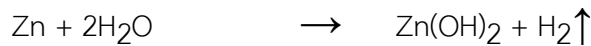
ขั้วไฟฟ้าแอโนดนั้น สามารถเกิดกัดกร่อน (corrosion) ซึ่งเป็นผลมาจากการละลายของขั้วสังกะสีระหว่างจ่ายประจุไฟฟ้าที่ขั้วแอโนด และการเติบโตของเดนไดรต์ (dendrite growth) ซึ่งเป็นผลมาจากการฝังตัวใหม่อย่างไม่เป็นระเบียบ (non-uniform) ระหว่างการอัดประจุไฟฟ้าของสารละลายสังกะสีในระหว่างการอัดประจุไฟฟ้า ดังเช่น ในปฏิกิริยาการอัดและจ่ายไฟฟ้า



ในขณะเดียวกันการเกิดแก๊สไฮโดรเจนเป็นปฏิกิริยารีดักชันที่เกิดขึ้นในสารละลายแอลคาไลน์ จะเกิดขึ้นดังนี้



โดยปฏิกิริยาโดยรวมของการเกิดแก๊สไฮโดรเจน เกิดขึ้นดังสมการต่อไปนี้



การเกิดแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen Evolution Reaction) ที่เกิดขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียอิเล็กตรอน ส่งผลให้เกิดการเกิดการคายประจุเอง (self-discharge) ให้ประสิทธิภาพของการเก็บประจุไฟฟ้า และประสิทธิภาพต่อรอบระยะเวลาของการเก็บพลังงานไฟฟ้าลดลง

จากการทบทวนวรรณกรรมของแนวทางวิจัยพบว่า การนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามาใช้ห่อหุ้มสังกะสีสามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ ดังเช่น จากผลการวิจัยของ Yong Nam Jo, และคณะ^[5] ได้ศึกษาการใช้พอลิอะนิลีนในการห่อหุ้มอนุภาคสังกะสีในแบตเตอรี่สังกะสี-อากาศชนิดประจุไฟฟ้าใหม่ได้ เพื่อช่วยลดปัญหาดังกล่าวในขั้วแอโนด ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบการสังเคราะห์พอลิอะนิลีนหุ้มสังกะสีที่ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกต่าง ๆ คือ 20 ml 50 ml และ 100 ml ตามลำดับ โดยพบว่าความเข้มข้นที่ให้ประสิทธิภาพการลดการกัดกร่อนที่ดีที่สุดคือ การใช้กรดไฮโดรคลอริกปริมาตร 20 ml ในการสังเคราะห์พอลิอะนิลีนห่อหุ้มบนสังกะสี (20PANI@Zn) ดังแสดงในตารางที่ 2.1

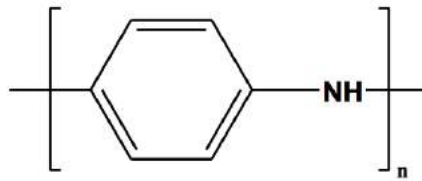
ตารางที่ 2.1 Corrosion parameters ^[5]

Materials	E_{corr} (V)	I_{corr} (mA/cm ²)	η (%)
Zn	-1.399	3.836	-
20PANI@Zn	-1.395	0.591	85
50PANI@Zn	-1.403	1.115	71
100PANI@Zn	-1.397	1.267	67

2.3 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Conductive polymer)

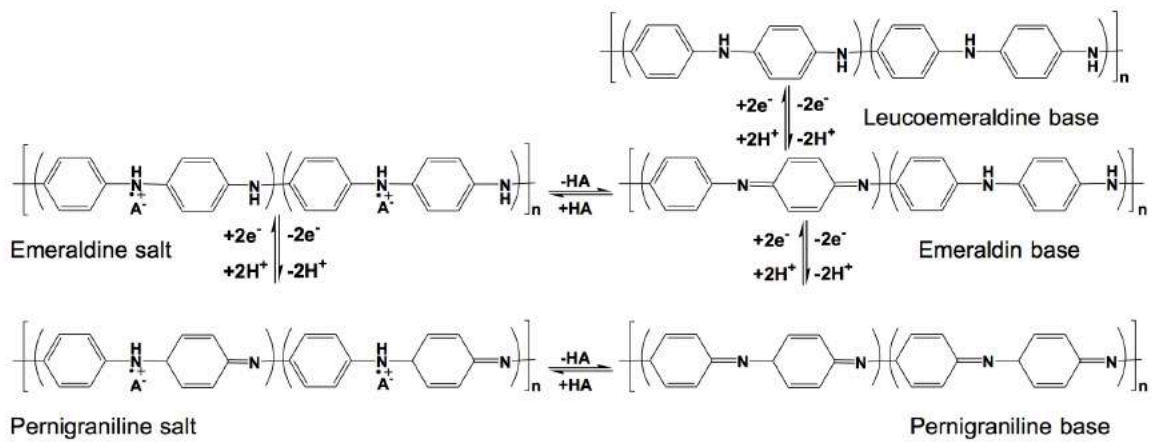
2.3.1 พอลิอะนิลีน (Polyaniline, PANI)

พอลิอะนิลีนเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีโครงสร้างที่สำคัญ คือ มีระบบแบบคอนจูเกตของพันธะคู่ (π -conjugated system) ซึ่งเป็นอะตอมของคาร์บอนต่อกันอยู่ด้วยพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยว หรือมีวงแหวนอะโรมาติก ทำให้มีคุณสมบัติในการกระจายอิเล็กตรอนได้ดี



รูปที่ 2.2 สูตรโครงสร้างทั่วไปของพอลิอะนิลีน^[6]

พอลิอะนิลีนมีคุณสมบัติเฉพาะที่พิเศษกว่าพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดอื่นๆ คือ มีความหลากหลายของโครงสร้างทางเคมีที่เปลี่ยนไปตามสภาวะกรด-เบส ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 แต่อย่างไรก็ตามพบว่า เกลือเอมเมอร์ลิติน (Emeraldine salt, ES) เป็นโครงสร้างทางเคมีของพอลิอะนิลีนเพียงแบบเดียวเท่านั้นที่นำไฟฟ้าได้ดี

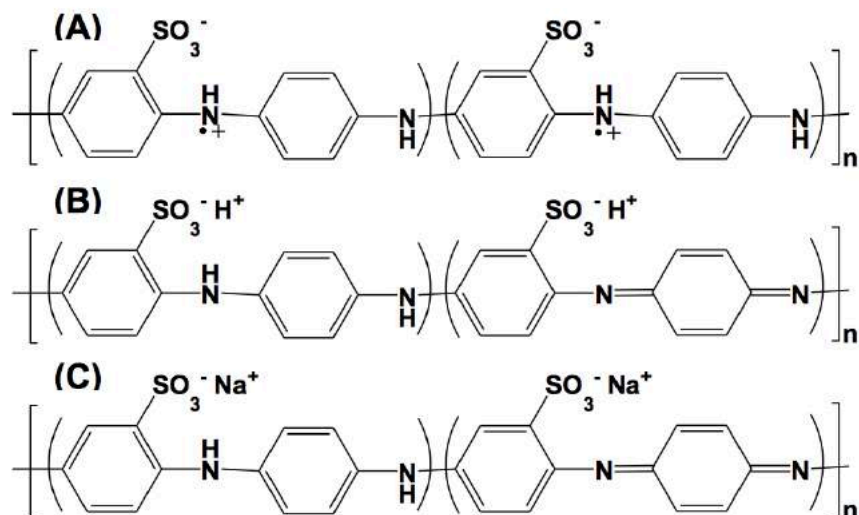


รูปที่ 2.3 โครงสร้างทางเคมีของพอลิอะนิลีนแบบต่างๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์^[6]

พอลิอะนิลีนเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากมีวิธีการสังเคราะห์ที่ง่าย มีความเสถียรต่อสภาพบรรยากาศและความชื้นสูง ราคาถูก ทำให้มีการนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย แต่ข้อจำกัดในการนำพอลิอะนิลีนไปใช้งาน คือ ความสามารถในการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป และการหลอมเหลวทำได้ยาก เนื่องจากเป็นระบบแบบไพคอนจูเกตที่มีแรงยึดเหนี่ยวไพ-ไพ (π - π interactions) ระหว่างโครงสร้างหลักของสายโซ่พอลิอะนิลีนที่แข็งแรงมาก ทำให้การนำไปขึ้นรูปได้ยาก ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการนำไปใช้ประโยชน์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้เหมาะสมต่อการใช้งาน ได้มีการแทนที่ด้วยหมู่แทนที่ (substituents) ต่าง ๆ บนสายโซ่หลักของพอลิอะนิลีน ตัวอย่างของหมู่แทนที่ที่นิยม ได้แก่ อัลคิล (Alkyl, -R) เอริล (Aryl, -Ar) อัลคอกซี (Alkoxy, -OR) ไฮดรอกซิล (Hydroxyl, -OH) หรือ ฮาโลเจน (Halogens, -X) เป็นต้น กระบวนการนี้สามารถช่วยให้พอลิอะนิลีนละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไปได้ดี แต่อาจทำให้พอลิอะนิลีนมีการนำไฟฟ้าต่ำ เนื่องจากผลของสเตอริก (steric effect) นอกจากการเติมหมู่แทนที่ต่างๆ จะทำให้พอลิอะนิลีนละลายในตัวทำละลายได้ดีขึ้น แต่ยังมีปัจจัยอื่น ๆ เช่น การไม่ละลายน้ำ การนำไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ความสามารถเชิงเคมีไฟฟ้า ที่เป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน

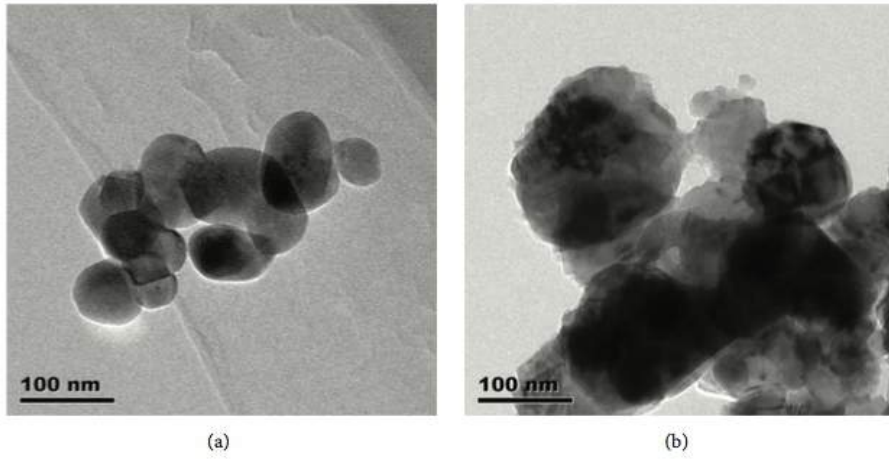
จากงานวิจัยของ Jiang Yue และคณะ^[7] ได้ศึกษาเกี่ยวกับการละลายน้ำของอนุพันธ์ของพอลิอะนิลีน โดยมีหมู่ซัลโฟเนต (sulfonate groups, $-SO_3^-$) ทำหน้าที่ตัวเป็นสารกระตุ้น (doping) ไอออนลบภายในโมเลกุลให้กับไอออนบวกของไนโตรเจนอะตอมที่ถูกโปรตอนบนสายโซ่ของพอลิเมอร์ กระบวนการนี้ เรียกว่า การกระตุ้นตัวเองของพอลิเมอร์ (self-doped polymer) ในสถานะที่เป็นกลาง อนุพันธ์พอลิอะนิลีนที่มีหมู่

ซัลโฟเนตเป็นหมู่แทนที่บนวงเบนซีน จะมีโครงสร้างดังที่แสดงในรูปที่ 2.4 โดยที่อนุพันธ์ดังกล่าวจะสามารถละลายได้ทั้งในสภาวะกรดและต่าง เมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 (B) และเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นด่างจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.4 (C) ตามลำดับ



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทั่วไปของอนุพันธ์พอลิอะนิลีนที่มีหมู่ซัลโฟเนตเป็นหมู่แทนที่บนวงเบนซีน ในสภาวะที่เป็น (A) กลาง (B) กรด และ (C) ต่าง^[6]

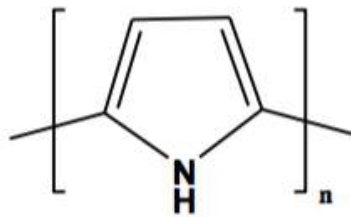
ในการศึกษาการใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าหุ้มอนุภาคโลหะนั้นโดยส่วนมากทำได้โดยวิธีการ อินซิทูพอลิเมอร์ไรเซชัน (*in-situ* polymerization) ดังเห็นได้จาก งานวิจัยของ Hongyan Xu และคณะ^[9] ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์พอลิอะนิลีนห่อหุ้มอนุภาคของโคบอลต์ออกไซด์ (cobalt oxide) เริ่มจากการสังเคราะห์อนุภาคของโคบอลต์ออกไซด์ โดยใช้วิธีการที่มีคาร์บอนเป็นตัวช่วยจากแบบใช้แม่แบบเป็นคอนตอนที่ไม่ใช่ไขมัน (C-assisted using degreasing cotton as a template) แล้วจึงสังเคราะห์พอลิอะนิลีนห่อหุ้มอนุภาคของโคบอลต์ออกไซด์ โดยใช้วิธีอินซิทูพอลิเมอร์ไรเซชัน ผลที่ได้จากการทดลอง เมื่อทำการวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) พบว่าอนุภาคของโคบอลต์ออกไซด์ ที่แสดงในรูปที่ 2.6 (a) มีขนาดเล็กและกลม ซึ่งแตกต่างจากอนุภาคของพอลิอะนิลีน-โคบอลต์ออกไซด์ ($\text{Co}_3\text{O}_4\text{-PANI}$) ที่แสดงในรูปที่ 2.6 (b) ที่ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น



รูปที่ 2.5 TEM ของ Co_3O_4 (a) และ $\text{Co}_3\text{O}_4\text{-PANI}$ (b)^[9]

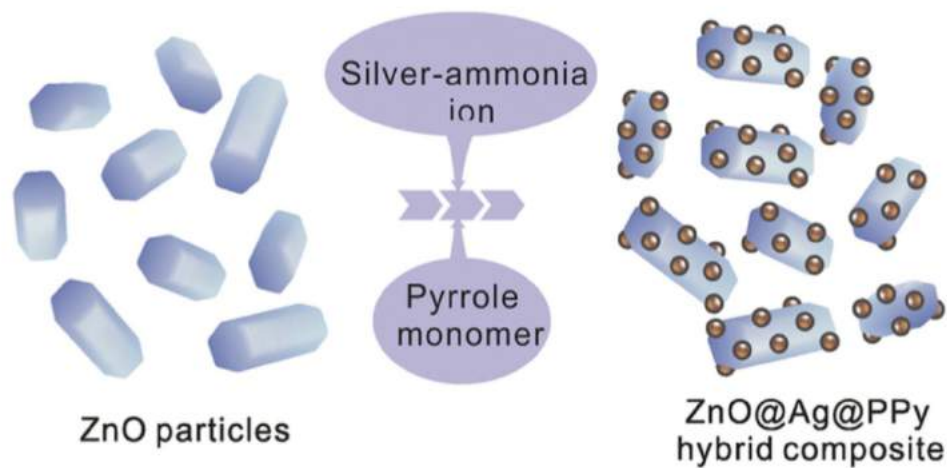
2.3.2 พอลิไพโรล (Polypyrrole, PPy)

พอลิไพโรล เป็นพอลิเมอร์อินทรีย์ที่มีโครงสร้างแบบพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยว (conjugated polymers) ซึ่งจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในโมเลกุลได้ ดังนั้นพอลิเมอร์จึงมีสมบัตินำไฟฟ้าได้ (electrically conducting polymers)^[8] โครงสร้างของพอลิไพโรลแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.6 สูตรโครงสร้างทั่วไปของพอลิไพโรล^[6]

จากงานวิจัยของ Jianhang Huang และคณะ^[10] ได้ทำการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบแบบนาโนไฮบริด (nano-hybrid composite) ของสังกะสีออกไซด์ โลหะเงิน และพอลิไพโรล ซึ่งถูกเตรียมจากปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นระหว่างไอออนของแอมโมเนีย-เงิน และไพโรล จากผลการวิจัยพบว่าอนุภาคระดับนาโนของโลหะเงินจะช่วยให้เกิดการนำอิเล็กตรอนที่ดีขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น พอลิไพโรลจะช่วยลดการละลายของชั้นระหว่างการจ่ายไฟฟ้า ผ่านการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรของสังกะสีกับหมู่อิมิน (imine functional group) ของพอลิไพโรลที่จะช่วยลดการเติบโตของเดนไดรต์ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ว่าวัสดุเชิงประกอบแบบนาโนไฮบริด มีจำนวนรอบของการใช้งานที่มากกว่า เมื่อเทียบกับโลหะออกไซด์ที่ไม่ถูกห่อหุ้ม



รูปที่ 2.7 แผนภาพของวัสดุเชิงประกอบของสังกะสีออกไซด์ โลหะเงิน และพอลิไพโรล (ZnO@Ag@PPy hybrid composite)^[10]

ดังนั้นจากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นโครงการวิจัยนี้จึงมีความสนใจในการพัฒนาขั้วแอโนดโดยการศึกษานิตของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า 2 ชนิดห่อหุ้มสังกะสีระดับนาโนเมตร เพื่อช่วยในการช่วยลดการกัดกร่อน การเติบโตของเดนไดรต์ และการเกิดแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแอโนด โดยทำการเปรียบเทียบชนิดของพอลิเมอร์ที่นำมาใช้คือพอลิอะนิลีน และพอลิไพโรล

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบและสารเคมี

- 1) สังกะสีออกไซด์ (zinc oxide, ZnO)
- 2) ไพโรลมอนอเมอร์ (pyrrole monomer)
- 3) อะนิลีนมอนอเมอร์ (aniline monomer)
- 4) กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric, HCl)
- 5) แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (ammonium persulfate, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$)
- 6) แผ่นคาร์บอนไฟเบอร์ (carbon fiber sheet)
- 7) แผ่นโฟมนิเกิล (Nickel foam)
- 8) คาร์บอนนำไฟฟ้า (conductive carbon)
- 9) สารยึดพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE binder)
- 10) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide, KOH)
- 11) เอทานอล (ethanol)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
- 2) เครื่องวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)
- 3) เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) สำหรับทดสอบด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติก ชาร์จ-ดิสชาร์จ (Galvanostatic charge-discharge curve, GCD) ไชคลิกโวลทามาเมตรี (Cyclic voltammetry, CV) ทาเฟลเอ็กซ์ทราโพลชัน (Tafel extrapolation)
- 4) เครื่องสั่นอัลตราโซนิค (Ultrasonic bath)
- 5) ตู้อบสุญญากาศ (Vacuum oven)
- 6) หลอดทดลอง (Test tube)
- 7) ปีกเกอร์ (Beaker)
- 8) บิวเรต (Burette)

- 9) ปิเปต (Pipette)
- 10) กระบอกตวง (Cylinder)
- 11) แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic Bar)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ด้วยวิธีโซโนเคมี

ทำการเตรียมสารละลาย A โดยนำสังกะสีออกไซด์จำนวน 3 กรัมกระจายตัวในน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร (ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก) จากนั้นหยดสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 5 มิลลิโมล และกระจายตัวด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเตรียมสารละลาย B โดยนำไพโรลมอนอเมอร์ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมล มาละลายในกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ที่ปริมาตรของกรดต่าง ๆ กัน เพื่อให้ได้อัตราส่วนโมลของไพโรลมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริก ดังนี้ 1:0.5, 1:0.75, 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:6 ตามลำดับ ทำการผสมสารละลาย A และ B เข้าด้วยกัน ภายใต้การกวนและการสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก จากนั้นดำเนินการปฏิกิริยาด้วยการสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกที่อุณหภูมิห้อง เป็นระยะเวลา 5 นาที พร้อมทั้งทำการกวนไปด้วย ในระหว่างการสังเคราะห์พอลิเมอร์ของผสมดังกล่าวจะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเทา ด้วยวิธีโซโนเคมี-อินซิทูพอลิเมอไรเซชัน โดยไพโรลมอนอเมอร์จะถูกเปลี่ยนให้เป็นพอลิไพโรล ทำการกรองและล้างผลิตภัณฑ์ที่ได้ด้วยน้ำกลั่นและเอทานอลเพื่อกำจัดแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตและไอโกลเมอร์ หลังจากนั้นนำไปอบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

3.3.2 การเตรียมวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ด้วยวิธีโซโนเคมี

ทำการเตรียมสารละลาย A โดยนำสังกะสีออกไซด์จำนวน 3 กรัมกระจายตัวในน้ำกลั่น 20 มิลลิลิตร (ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก) จากนั้นหยดสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตความเข้มข้น 5 มิลลิโมล และกระจายตัวด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเตรียมสารละลาย B โดยนำอะนิลีนมอนอเมอร์ที่มีความเข้มข้น 0.01 โมล มาละลายในกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ที่ปริมาตรของกรดต่าง ๆ กัน เพื่อให้ได้อัตราส่วนโมลของอะนิลีนมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริก ดังนี้ 1:0.25, 1:0.5, 1:0.75 และ 1:1 ตามลำดับ จากนั้นผสมสารละลาย A และ B เข้าด้วยกัน ภายใต้การกวนและการสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิก จากนั้นดำเนินการปฏิกิริยาด้วยการสั่นด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 5 นาทีที่อุณหภูมิห้อง พร้อมทั้งทำการกวนไปด้วย ในระหว่างการสังเคราะห์พอลิเมอร์ของผสมดังกล่าวจะเปลี่ยนสีจากสีขาวเป็นสีเหลือง ทำการกรอง

และล้างผลิตภัณฑ์ที่ได้ ด้วยน้ำกลั่นและเอทานอลเพื่อกำจัดแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตและโพลิโกลเมออร์ หลังจาก
นั้นนำไปอบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

3.3.3 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาและองค์ประกอบธาตุ

3.3.3.1 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนสังกะสีออกไซด์
และวัสดุเชิงประกอบพอลิไพโรลสังกะสีออกไซด์ด้วย เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.3.3.2 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของวัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนสังกะสีออกไซด์
และวัสดุเชิงประกอบพอลิไพโรลสังกะสีออกไซด์ ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด

3.3.4 การขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าแบตเตอรี่

สำหรับขั้วแอโนด นำวัสดุเชิงประกอบระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและสังกะสีออกไซด์ที่ได้ผสมกับ
คาร์บอนนำไฟฟ้า และสารยึดพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน (PTFE binder) ในอัตราส่วน 85 : 10 : 5 ตามลำดับ
หลังจากนั้นทำการปาดสารที่ผสมไว้ลงบนวัสดุรองรับแผ่นโพลีนิเกิล แล้วนำไปอบให้แห้งในตู้อบสูญญากาศที่
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเพื่อเตรียมเป็นขั้วแอโนด ทำการขึ้นขั้วตรงข้ามแคโทด ที่ทำจากนิเกิลไฮดรอกไซด์
ผสมกับคาร์บอนนำไฟฟ้า และสารยึดพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีน ในอัตราส่วน 85 : 10 : 5 ตามลำดับ หลังจาก
นั้นทำการปาดสารที่ผสมไว้ลงบนวัสดุรองรับแผ่นคาร์บอน แล้วนำไปอบให้แห้งในตู้อบสูญญากาศที่อุณหภูมิ
60 องศาเซลเซียส

3.3.5 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมี

3.3.5.1 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลทามาเมทรี

วิเคราะห์ความสามารถในการเก็บประจุ ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตทในช่วงความต่างศักย์
ตั้งแต่ 0.0 ถึง 0.6 โวลต์ โดยสามารถหาค่าความสามารถในการเก็บประจุได้จากสมการที่ 3.1

$$C_s = \int_{Va}^{Vc} \frac{idV}{vmV} \quad (3.1)$$

C_s = ค่าความเก็บประจุจำเพาะ (F/g)

i = กระแสไฟฟ้า (A)

V = ค่าความต่างศักย์ (v)

m = มวล (g)

v = ค่าอัตราศักย์ไฟฟ้า (mV/s)

3.3.5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคทาเฟลเอ็กซ์ทราโพเรชัน

วิเคราะห์ค่าการกัดกร่อนด้วยเทคนิคทาเฟลเอ็กซ์ทราโพเรชัน ผ่านเครื่องโพเทนชิโอสแตท ในช่วงความต่างศักย์ตั้งแต่ -0.65 ถึง -0.3 โวลต์ โดยสามารถหาประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนได้จากสมการที่ 3.2

$$\eta (\%) = \frac{I_{\text{corr}} - I'_{\text{corr}}}{I_{\text{corr}}} \times 100 \quad (3.2)$$

η = ประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อน

I_{corr} = ค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของสังกะสีออกไซด์เปล่า ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

I'_{corr} = ค่ากระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์นำไฟฟ้าสังกะสีออกไซด์ ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

3.3.5.3 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคกลวาโนสแตติก ชาร์จ-ดิสชาร์จ

นำขั้วไฟฟ้าแอโนดที่เตรียมได้จากวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์นำไฟฟ้าสังกะสีออกไซด์ และใช้ขั้วแคโทดเป็นนิเกิลไฮดรอกไซด์ และใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ของสังกะสีออกไซด์ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยหาค่าความสามารถในการเก็บประจุได้จากสมการ 3.3

$$C_s = \frac{I(\text{mA}) \times t(\text{h})}{m(\text{g})} \quad (3.3)$$

C_s = ค่าความเก็บประจุจำเพาะ (mAh/g)

I = กระแสไฟฟ้า (A)

m = มวล (g)

t = เวลาในการคายประจุ (h)

3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการทดลอง

3.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน

ระยะเวลาการดำเนินงานตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2561 ถึง พฤษภาคม 2562 ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขอบเขตระยะเวลาการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	เดือน									
	สิงหาคม	กันยายน	ตุลาคม	พฤศจิกายน	ธันวาคม	มกราคม	กุมภาพันธ์	มีนาคม	เมษายน	พฤษภาคม
1. รวบรวม จัดหาสารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้	←→									
2. ส่งเคราะห์วัสดุเชิงประกอบพอลิไพโรล ส่งกะสีออกไซด์		←→								
3. ส่งเคราะห์วัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีน ส่งกะสีออกไซด์				←→						
4. วิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม						←→				
5. นำไปขึ้นรูป วิเคราะห์และทดสอบสมบัติ							←→			
6. รายงานผลการทดลองและวิเคราะห์ผล									←→	

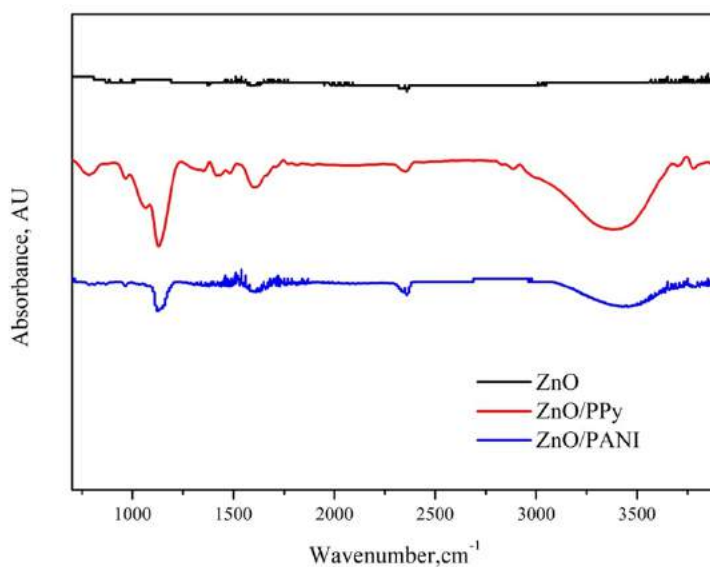
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและสังกะสีออกไซด์

4.1.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมี

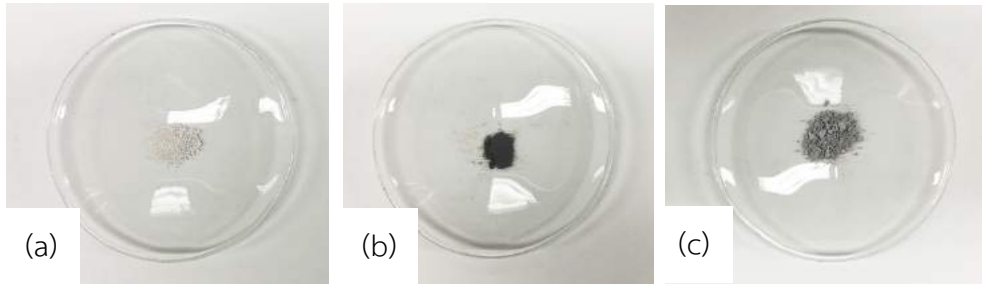
จากรูปที่ 4.1 ได้แสดงผลได้แสดงผลสเปกตรัมแสดงหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) ของอนุภาคสังกะสีออกไซด์ วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ และวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ ในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ $800-4000\text{ cm}^{-1}$ เพื่อดูค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความถี่ต่างๆ สำหรับวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์และวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ พบว่าที่เลขคลื่นประมาณ $3300-3500\text{ cm}^{-1}$ เกิดพีคที่มีลักษณะกว้าง (broad) เกิดขึ้น โดยบ่งบอกถึงการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน N-H และที่เลขคลื่น 1637 cm^{-1} บ่งบอกถึงการสั่นของหมู่ฟังก์ชัน C=C ในขณะที่เลขคลื่น $1400-1500\text{ cm}^{-1}$ พบพีคของหมู่ฟังก์ชัน C-N ภายในวงแหวนไพโรลของวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ ซึ่งจะไม่พบในวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ สำหรับพีคที่เลขคลื่น 1165 และ 1040 cm^{-1} เป็นการบ่งบอกถึงการสั่นของหมู่ C-H ภายในวงแหวนอะโรมาติก และการสั่นภายในระนาบ (In-plane deformation) ของหมู่ N-H ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของ (a) อนุภาคสังกะสีออกไซด์ (b) วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ และ (c) วัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์

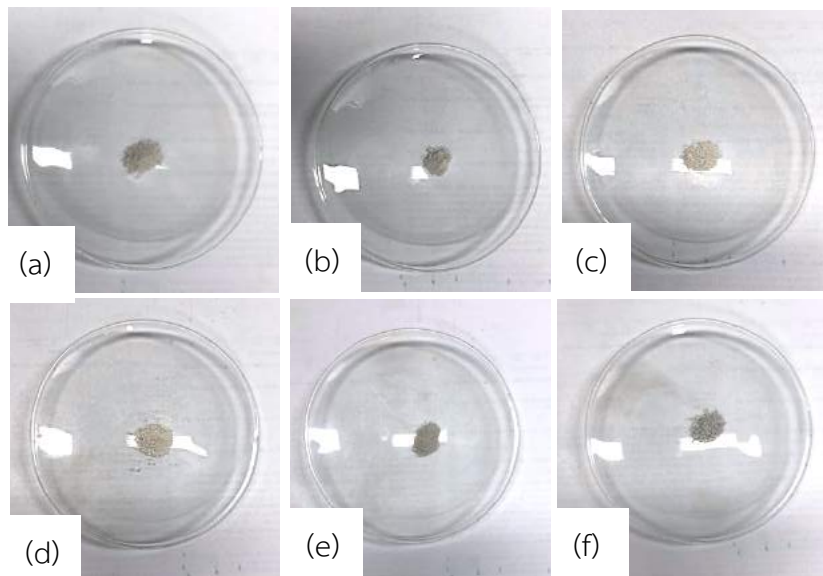
4.2 ผลการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์

จากการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ โดยใช้อัตราส่วนโมลของมอนอเมอร์: แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1:0.5, 1:1 และ 1:1.5 ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.2 มีลักษณะเป็นผงสีขาวเทา



รูปที่ 4.2 วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ โดยอัตราส่วนมอนอเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (a) 1:0.5 (b) 1:1 (c) 1:1.5

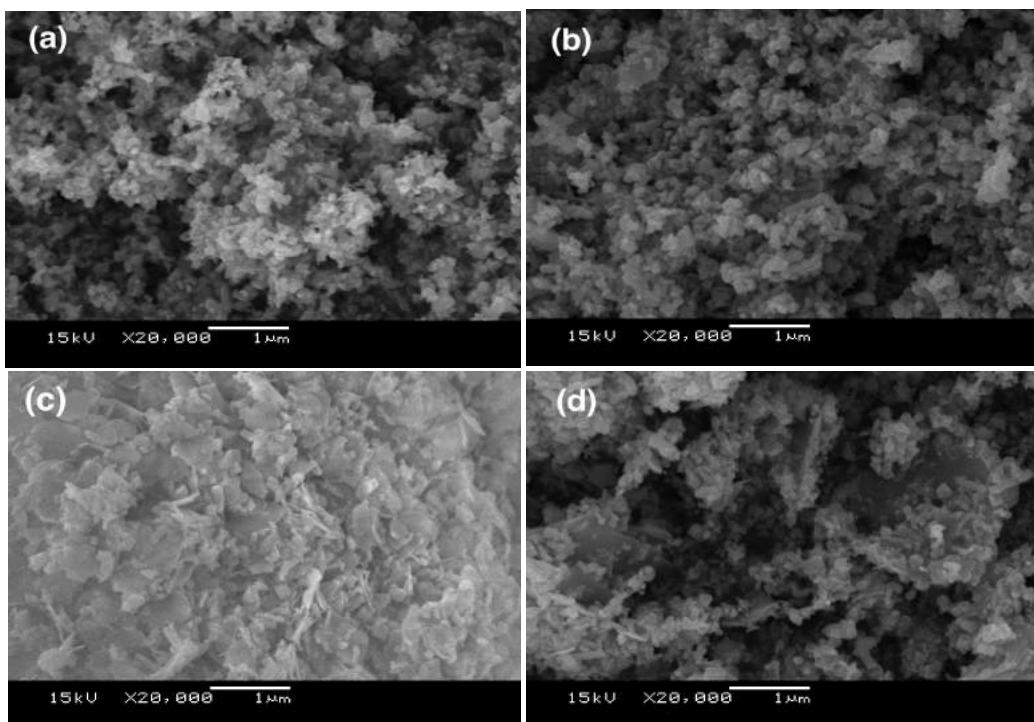
จากการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ โดยใช้อัตราส่วนโมลของมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:6 ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.3 มีลักษณะเป็นผงสีขาวเทา



รูปที่ 4.3 วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ โดยอัตราส่วนมอนอเมอร์:ไฮโดรคลอริก (a) 1:0.5 (b) 1:0.75 (c) 1:1 (d) 1:2 (e) 1:4 (f) 1:6

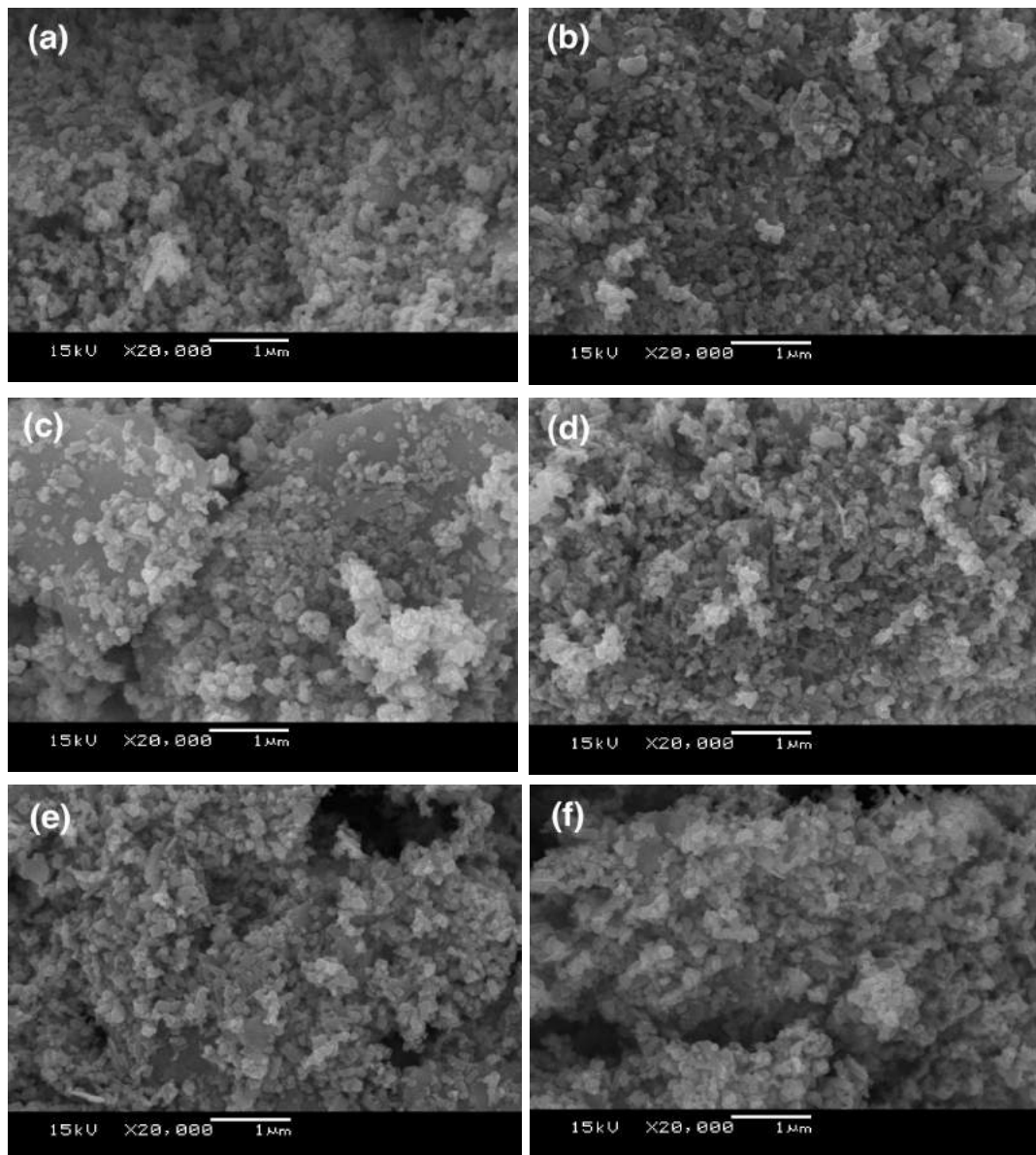
4.2.1 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 4.4 เป็นผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคขนาดนาโนของสังกะสีออกไซด์ และวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วนมอโนเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1:0.5, 1:1 และ 1:1.5 เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของพื้นผิวที่กำลังขยาย 20000 เท่า จากรูปที่ 4.4 (a) พบว่า อนุภาคสังกะสีออกไซด์มีลักษณะคล้ายแท่งทรงปริซึมหกเหลี่ยม โดยมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยประมาณ 50 นาโนเมตร และเมื่อทำการศึกษาวัดวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ พบว่า สัณฐานวิทยาของพอลิไพโรลมีลักษณะเป็นแผ่นบางขนาดประมาณ 250 นาโนเมตร โดยที่อัตราส่วนไพโรลมอโนเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่ 1:0.5 พบว่า ส่วนใหญ่มีแต่อนุภาคที่มีลักษณะเป็นแท่ง และแทบจะไม่พบอนุภาคที่เป็นแผ่นบาง เนื่องจากใส่แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตในปริมาณน้อย แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต จากรูปที่ 4.4 (c) และ (d) พบว่า มีอนุภาคที่เป็นแผ่นบางที่ซ้อนกันเป็นชั้นๆ ส่งผลให้อนุภาคของสังกะสีออกไซด์สามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างอนุภาคได้มาก ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของอนุภาคสังกะสีออกไซด์ เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตซึ่งทำหน้าที่เป็นสารริเริ่ม (initiator) ในการสังเคราะห์พอลิไพโรล ดังนั้น เมื่อทำการเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตจะทำให้การเติบโตของสายโซ่พอลิไพโรลเป็นไปอย่างรวดเร็วขึ้น ทำให้ได้อนุภาคที่เป็นแผ่นบางของพอลิไพโรลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อให้อนุภาคสังกะสีออกไซด์เกาะตัวได้มากขึ้น



รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของ (a) อนุภาคสังกะสีออกไซด์ และวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วนมอโนเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตแตกต่างกัน (b) 1:0.5 (c) 1:1 (d) 1:1.5

จากรูปที่ 4.5 เป็นผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วนไพโรลมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกันได้แก่ 1:0.5, 1:0.75, 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:6 เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของพื้นผิวที่กำลังขยาย 20000 เท่า จากรูปที่ 4.5 (a) และ (b) แสดงถึงวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนไพโรลมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกที่ 1:0.5 และ 1:0.75 ตามลำดับ พบว่า อนุภาคส่วนใหญ่ที่พบเป็นอนุภาคลักษณะแท่งทรงปริซึมหกเหลี่ยมซึ่งเป็นอนุภาคของสังกะสีออกไซด์ แต่ที่อัตราส่วนไพโรลมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกที่ 1:0.75 จะสังเกตเห็นสัณฐานวิทยาของพอลิไพโรลที่มีลักษณะเป็นแผ่นบางขนาดเล็กแทรกตัวอยู่กับอนุภาคที่เป็นแท่ง แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของกรดไฮโดรคลอริกมากขึ้นพบว่า จะพบอนุภาคแท่งเป็นจำนวนมากและมีการเกาะกลุ่มกันมากขึ้น และไม่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอบนพอลิไพโรล เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณของกรดไฮโดรคลอริกซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์พอลิไพโรล ทำให้บริเวณเริ่มต้นในการเกิดปฏิกิริยาของพอลิไพโรลเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเมื่อใส่ปริมาณของกรดไฮโดรคลอริกมากเกินไปจะทำให้อนุภาคพอลิไพโรลเกาะกลุ่มกันเอง

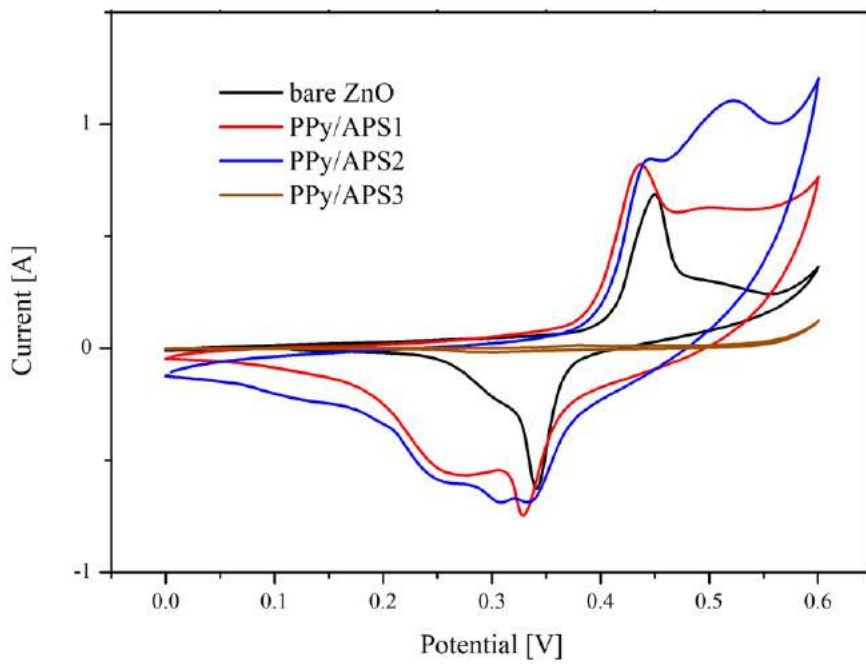


รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกแตกต่างกัน (a) 1:0.5 (b) 1:0.75 (c) 1:1 (d) 1:2 (e) 1:4 (f) 1:6

4.2.2 วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลทามาเมทรี

จากการวิเคราะห์ความสามารถในการเก็บประจุโดยใช้เทคนิค Cyclic voltammetry (CV) ซึ่งเป็นการพลอตกราฟระหว่างกระแสไฟฟ้า (แกนตั้ง) กับศักย์ไฟฟ้า (แกนนอน) โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และให้ศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 0.0 ถึง 0.6 โวลต์ ในการทดสอบความสามารถในการเก็บประจุของการให้อัตราส่วนไพโรลมอนอเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ โดยสามารถหาค่าความสามารถในการเก็บประจุได้จากพื้นที่ใต้กราฟ จากรูป 4.6 PPy/APS1 และ PPy/APS2 จะเห็นว่าเมื่อให้ความเข้มข้นของแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตเพิ่มขึ้น จะให้ค่าความสามารถในการเก็บประจุที่เพิ่มขึ้น จากการที่มีปริมาณของพอลิไพโรลที่สูงขึ้น แล้วเกิดการทำงานร่วมกันของพอลิไพโรลและอนุภาคสังกะสีในการเหนี่ยวนำให้เกิดการเก็บประจุไฟฟ้าที่มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตมากเกินไป จะทำให้ค่าความสามารถในการเก็บประจุลดลงอย่างมาก จากรูปที่ 4.6 PPy/APS3 ร่วมกับผลของสัณฐานวิทยาจะเห็นว่า ที่ปริมาณแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่มาก จะทำให้พอลิไพโรลเกิดขึ้น มีโครงสร้างที่ไม่เหมาะสม ทำให้การถ่ายเทของไอออนและความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุเชิงประกอบพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์มีค่าลดลง

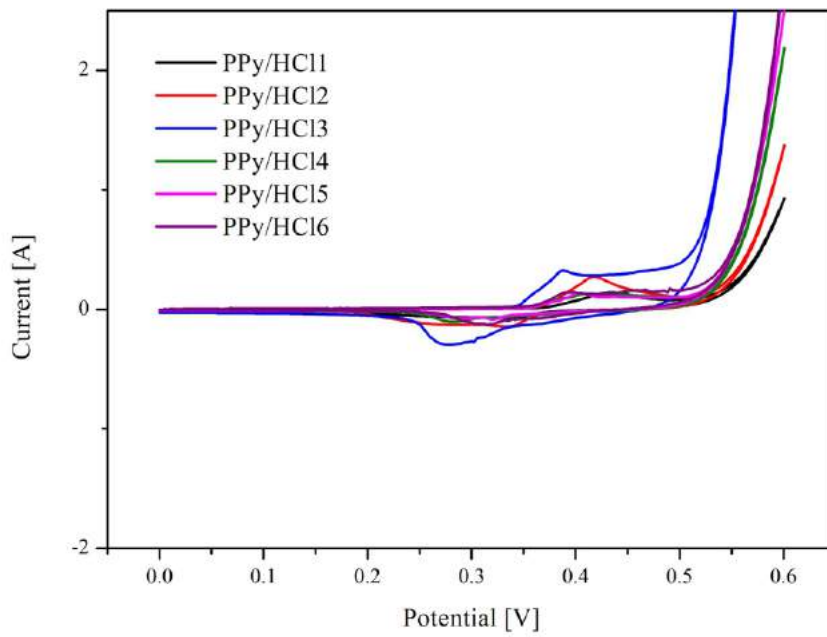
ในการทดสอบความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้า โดยการให้อัตราส่วนไพโรลมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ โดยสามารถดูได้จากพื้นที่ใต้กราฟ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยเมื่อสัดส่วนของกรดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้วัสดุเชิงประกอบมีค่าความสามารถในการเก็บประจุเพิ่มขึ้น จากกรดทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง ทำให้พอลิไพโรลเกิดเป็นแผ่น และที่อัตราส่วนของไพโรลมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริก 1:1 จะให้ค่าความสามารถในการเก็บประจุที่สูงที่สุด จากการที่อนุภาคของสังกะสีออกไซด์ เกาะอยู่ตามแผ่นของพอลิไพโรลที่มีพื้นผิวมาก เกิดโครงสร้างที่เหนี่ยวนำประจุไฟฟ้ามากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มกรดไปถึง PPy/HCl4 จะเห็นว่าค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้ามูลค่าลดลงอย่างฉับพลัน เกิดจากเมื่อมีกรดมากในระบบ ซึ่งกรดทำหน้าที่เป็นตัวเร่งทำให้เกิดบริเวณเริ่มต้นของปฏิกิริยา ทำให้พอลิไพโรลมีขนาดที่เล็กลง เป็นสายโซ่สั้นๆ ไม่สามารถเป็นที่รองรับให้สังกะสีออกไซด์ได้ ทำให้ค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าลดลง โดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดให้ค่าความเก็บประจุดีที่สุด จากตารางที่ 4.2 คือ PPy/HCl3 ซึ่งให้ค่าความสามารถในการเก็บประจุคือ 93.19 มิลลิฟารัดต่อกรัม



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบความสามารถในการเก็บประจุของสังกะสีออกไซด์และวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์ : แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.1 ค่าความเก็บประจุของสังกะสีออกไซด์และวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์ : แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่แตกต่างกัน

วัสดุ	ค่าความเก็บประจุ (mF/g)
bare ZnO	22.89
PPy/APS1	39.46
PPy/APS2	56.97
PPy/APS3	0.82



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนมอโนเมอร์ : กรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 ค่าความเก็บประจุของวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนมอโนเมอร์ : กรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกัน

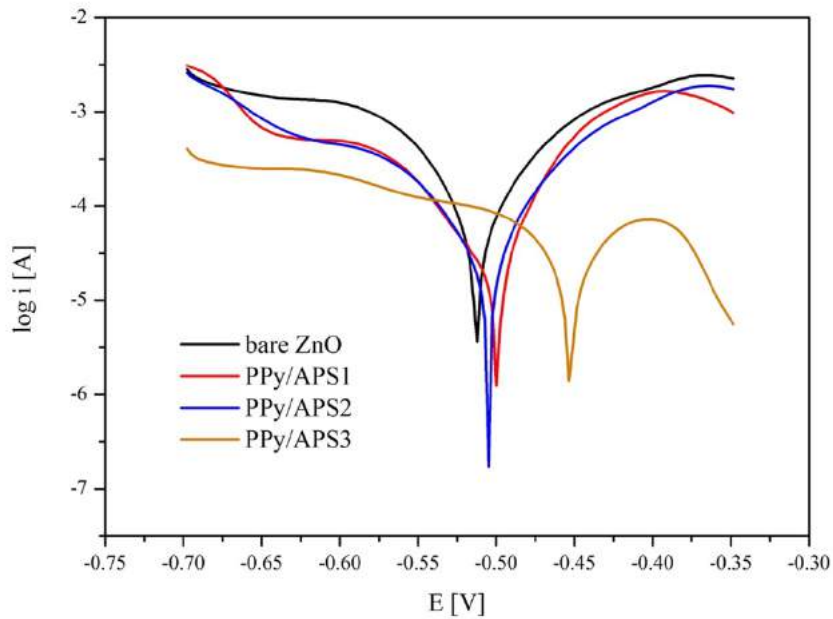
วัสดุ	ค่าความเก็บประจุ (mF/g)
PPy/HCl1	28.94
PPy/HCl2	50.73
PPy/HCl3	93.19
PPy/HCl4	29.17
PPy/HCl5	24.16
PPy/HCl6	33.90

4.2.3 วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคเอ็กทราโพลเรชัน

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Tafel extrapolation เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนบนขั้วสังกะสีออกไซด์หลังจากเติมพอลิไพโรลลงไป โดยสามารถศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนได้จากค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) พบว่า ขั้วสังกะสีออกไซด์มีค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน คือ -0.509 โวลต์ ในขณะที่เดียวกันกันเมื่อเติมแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน พบว่ามีค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเพิ่มขึ้นทางบวก นั่นคือวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ทำให้ต้องใช้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เพื่อให้เกิดการกัดกร่อนบนขั้ว จึงทำให้เกิดการกัดกร่อนได้น้อยลง

ในขณะเดียวกัน ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (I_{corr}) ของวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ พบว่ามีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยจากสังเกตได้จากสังกะสีออกไซด์ มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน คือ 52.412 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แต่เมื่อทำการเติมไพโรลมอนอเมอร์และแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตในอัตราส่วน 1 : 1 มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน คือ 13.888 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะพบว่า มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนแบบทั่วผิวน้ำน้อยกว่าสังกะสีออกไซด์ที่ไม่ถูกห่อหุ้มถึงประมาณ 4 เท่า

หลังจากนั้นเมื่อคำนวณหาประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนพบว่าค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต จนกระทั่งอัตราส่วนของมอนอเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตเป็น 1:1 มีค่าประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนเป็น 73.50% เนื่องจากพอลิไพโรลเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีพันธะคู่แบบคอนจูเกตแทรกตัวระหว่างสังกะสีออกไซด์อย่างทั่วทั้งผิวน้ำ เมื่อใส่แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตเพิ่มขึ้นทำให้เกิดอนุภาคของพอลิไพโรลเพิ่มขึ้น เมื่อไปแทรกตัวกับสังกะสีออกไซด์เป็นวัสดุเชิงประกอบ ทำให้เกิดการกัดกร่อนบนอนุภาคของสังกะสีออกไซด์ลดลง หลังแต่จากนั้นถึงแม้ว่าจะเติมแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตเพิ่มขึ้น แต่ค่าประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนจะลดลง



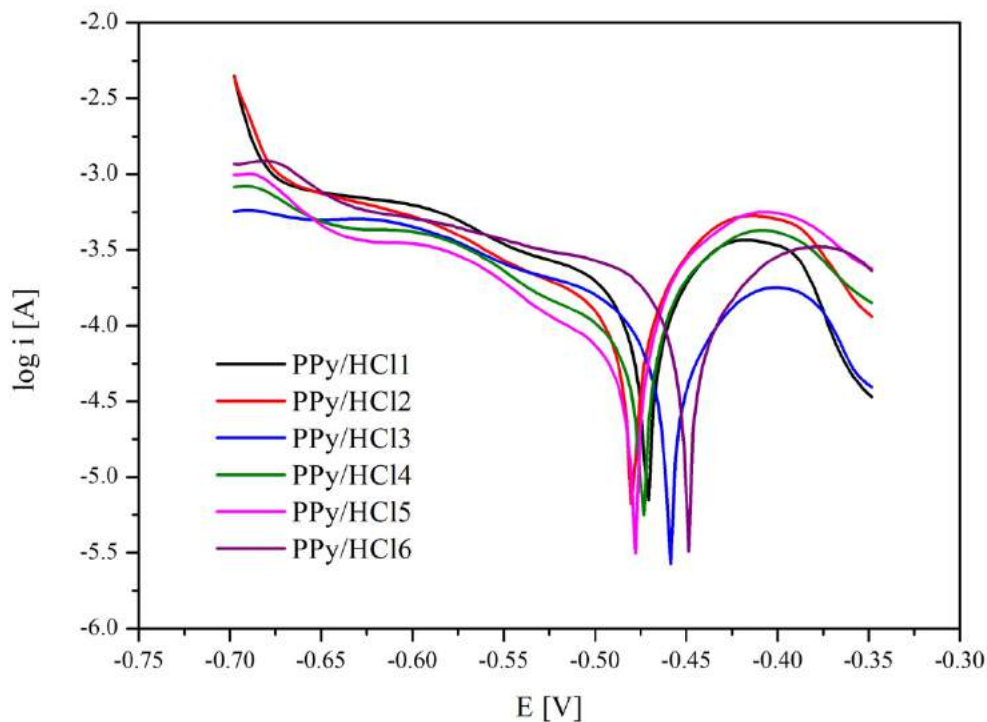
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบการกัดกร่อนของวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ ในสารละลายไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 โมลาร์

ตารางที่ 4.3 ค่าการกัดกร่อนของการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ ในการใช้อัตราส่วนไพโรลมอนอเมอร์และแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่ต่างกัน

อัตราส่วนไพโรลมอนอเมอร์ : แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต	E_{corr} (V)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	η (%)
สังกะสีออกไซด์	-0.50967	52.412	-
1 : 0.5	-0.49904	20.138	61.58
1 : 1	-0.50483	13.888	73.50
1 : 1.5	-0.45277	15.207	70.98

ในการทดสอบหาค่าการประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อน ของการให้อัตราส่วนที่ต่างกันระหว่างไพโรลมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริก พบว่ากราฟจะเป็นไปตามรูปที่ 4.9 และศึกษาค่าการกัดกร่อนได้จากตารางที่ 4.4 พบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ อัตราส่วนไพโรลมอนอเมอร์:ไฮโดรคลอริก 1:0.75 โดยจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่สูงถึง -0.47950 โวลต์ ให้ค่าความหนาแน่นไฟฟ้าการกัดกร่อน คือ 15.785 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และเมื่อนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพในการยับยั้งได้ผลดีที่สุดคือ 69.88 % จะเห็นว่าเมื่อทำเป็นวัสดุเชิงประกอบจะให้ค่า

การกัดกร่อนที่น้อยลง ทำให้เกิดการยับยั้งการกัดกร่อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากพอลิไพโรลจะช่วยลดการเกาะกลุ่มกันเองของสังกะสีออกไซด์



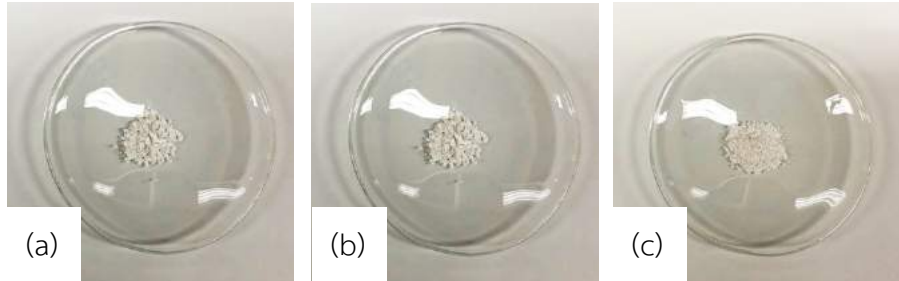
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบการกัดกร่อนของวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 โมลาร์

ตารางที่ 4.4 ค่าการกัดกร่อนของการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ ในการใช้อัตราส่วนไพโรลมอนอเมอร์และกรดไฮโดรคลอริกที่ต่างกัน

อัตราส่วนไพโรลมอนอเมอร์ : กรดไฮโดรคลอริก	E _{corr} (V)	I _{corr} (μ A/cm ²)	η (%)
1 : 0.5	-0.47142	33.372	36.33
1 : 0.75	-0.47950	15.785	69.88
1 : 1	-0.45897	38.810	25.95
1 : 2	-0.47390	67.542	-28.85
1 : 4	-0.47845	55.715	-6.30
1 : 6	-0.44905	104.720	-99.80

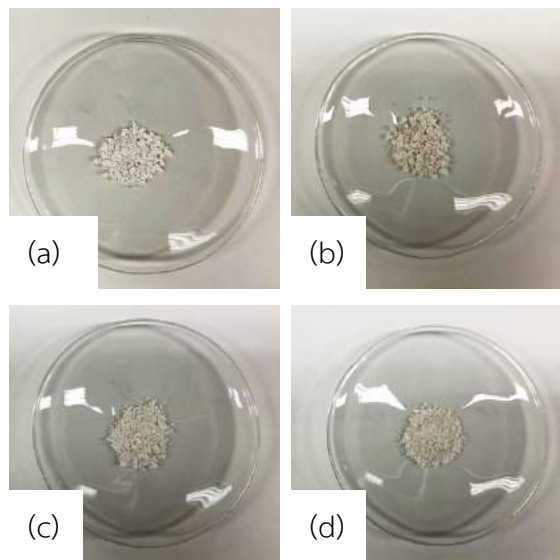
4.3 ผลการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์

จากการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ โดยใช้อัตราส่วนโมลของมอนอเมอร์: แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1:0.5, 1:1 และ 1:1.5 ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.10 มีลักษณะเป็นผงสีขาวเหลือง



รูปที่ 4.10 วัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ โดยอัตราส่วนมอนอเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (a) 1:0.5 (b) 1:1 (c) 1:1.5

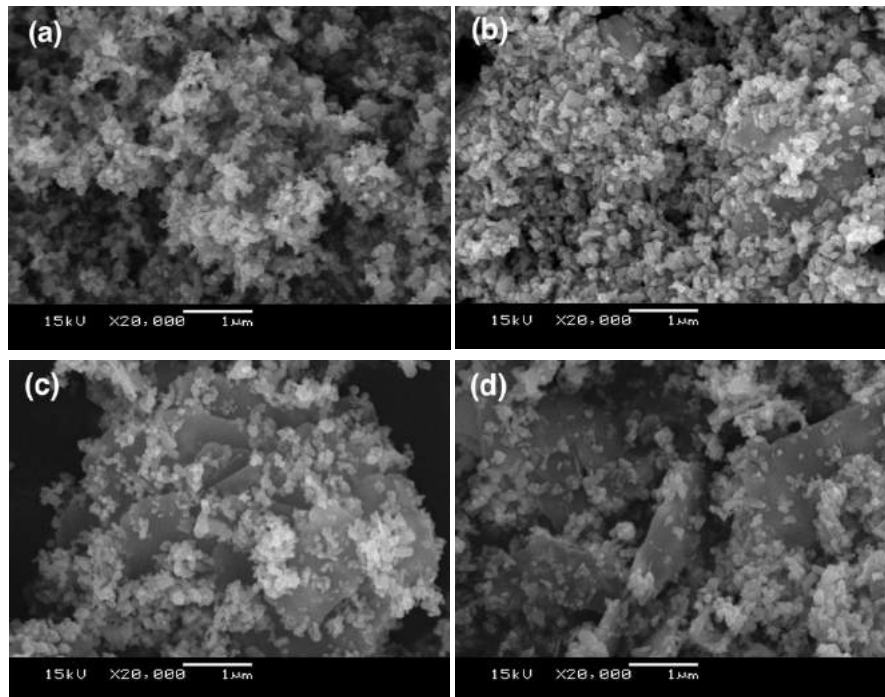
จากการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ โดยใช้อัตราส่วนโมลของมอนอเมอร์: กรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1:0.25, 1:0.5, 1:0.75 และ 1:1 ตามลำดับ แสดงดังรูป 4.11 มีลักษณะเป็นผงสีขาวเหลือง



รูปที่ 4.11 วัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ โดยอัตราส่วนมอนอเมอร์:ไฮโดรคลอริก (a) 1:0.25 (b) 1:0.5 (c) 1:0.75 (d) 1:1

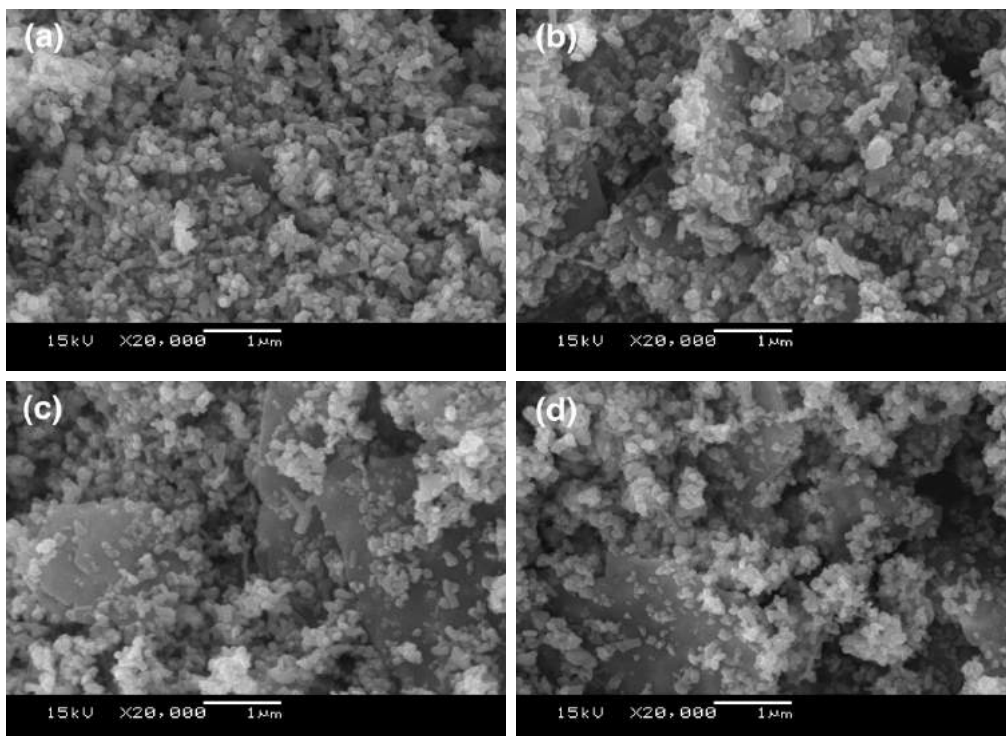
4.3.1 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 4.12 เป็นผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของอนุภาคขนาดนาโนของสังกะสีออกไซด์ และวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วนมอโนเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1:0.5, 1:1 และ 1:1.5 เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของพื้นผิวที่กำลังขยาย 20000 เท่า จากรูปที่ 4.12 (a) พบว่า อนุภาคสังกะสีออกไซด์มีลักษณะเป็นแท่งทรงปริซึมหกเหลี่ยมขนาดเล็ก โดยมีขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยประมาณ 50 นาโนเมตร และเมื่อทำการศึกษาวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนระหว่างอะนิลีนมอโนเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่ 1:0.5 พบว่า อนุภาคแท่งของสังกะสีออกไซด์เป็นจำนวนมากเกาะอยู่ที่แผ่นหนาของพอลิอะนิลีน แต่เมื่อเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ทำให้พบสัณฐานวิทยาของพอลิอะนิลีนมีลักษณะเป็นแผ่นที่ค่อนข้างหนาซ้อนกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งมีอนุภาคทรงกลมไปเกาะอยู่บริเวณด้านในของแผ่นดังกล่าว ซึ่งเมื่อเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตจะทำให้ลักษณะของแผ่นที่เป็นอนุภาคของพอลิอะนิลีนเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีปริมาณพื้นที่ผิวมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตซึ่งทำหน้าที่เป็นสารริเริ่ม (initiator) ในการสังเคราะห์พอลิอะนิลีน ดังนั้น เมื่อทำการเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ให้ได้สัณฐานที่เป็นแผ่นหนาของเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวเพื่อให้อนุภาคสังกะสีออกไซด์เกาะตัวได้มากขึ้น แต่จากรูปที่ 4.12 (d) เมื่อใส่แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตมากเกินไป อาจทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันเองระหว่างตัวพอลิอะนิลีน ส่งผลให้เกิดพื้นที่ผิวน้อยลง ทำให้สังกะสีออกไซด์เกาะตัวได้น้อยลง



รูปที่ 4.12 สัณฐานวิทยาของ (a) อนุภาคสังกะสีออกไซด์ และวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วนมอโนเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตแตกต่างกัน (b) 1:0.5 (c) 1:1 (d) 1:1.5

จากรูปที่ 4.13 เป็นผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วนอะนิลีนมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกที่ต่างกัน ได้แก่ 1:0.25, 1:0.5, 1:0.75 และ 1:1 เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของพื้นผิวที่กำลังขยาย 20000 เท่า จากรูปที่ 4.13 (a) และ (b) แสดงถึงวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนโพลีเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกที่ 1:0.25 และ 1:0.5 ตามลำดับ พบว่า อนุภาคส่วนใหญ่ที่พบเป็นอนุภาคแท่งปริซึมทรงหกเหลี่ยมขนาดเล็กซึ่งเป็นอนุภาคของสังกะสีออกไซด์ แต่ในขณะเดียวกันแทบจะไม่พบอนุภาคที่เป็นแผ่นของพอลิอะนิลีน สำหรับที่อัตราส่วนอะนิลีนมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกที่ 1:0.75 และ 1:1 จะสังเกตเห็นสัณฐานของอนุภาคของสังกะสีออกไซด์ที่เป็นแท่งขนาดเล็กเกาะอยู่กับสัณฐานที่เป็นแผ่นขนาดใหญ่ของพอลิอะนิลีนที่มีขนาดประมาณ 1500 ไมโครเมตร ซึ่งการที่อนุภาคของพอลิอะนิลีนมีขนาดใหญ่ จะทำให้มีพื้นที่ผิวให้อนุภาคสังกะสีออกไซด์ไปเกาะได้น้อยลง แต่ในขณะเดียวกันอนุภาคของสังกะสีออกไซด์จะเกิดการเกาะกลุ่มกันมากขึ้น ทำให้มีการกระจายตัวของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้การนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ลดลง

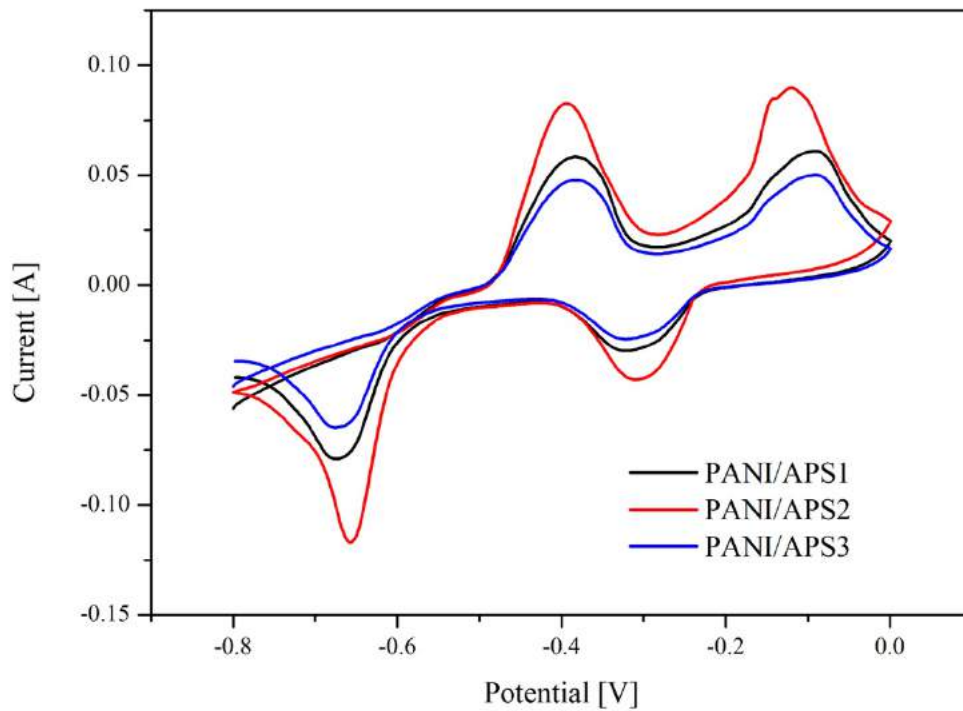


รูปที่ 4.13 สัณฐานวิทยาของพอลิอะนิลีนห่อหุ้มอนุภาคสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกแตกต่างกัน (a) 1:0.25 (b) 1:0.5 (c) 1:0.75 (d) 1:1

4.3.2 วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลทามาเมตรี

จากการวิเคราะห์ความสามารถในการเก็บประจุโดยใช้เทคนิค Cyclic voltammetry (CV) โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในการทดสอบความสามารถในการเก็บประจุของการให้อัตราส่วนอะนิลีนมอนอเมอร์และแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่แตกต่างกัน ในการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ จากรูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า อัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ PANI/APS2 ให้ค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าสูงสุด คือ 6.51 มิลลิฟารัดต่อกรัม แต่ยังมีค่าความสามารถในการเก็บประจุต่ำกว่าสังกะสีออกไซด์ ซึ่งมีค่าความสามารถในการเก็บประจุคือ 22.89 มิลลิฟารัดต่อกรัม ซึ่งสอดคล้องกับผลของเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือลักษณะสัญญาณของพอลิอะนิลีนที่เป็นแผ่นหนาขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นไปขัดขวางการเก็บประจุของสังกะสีออกไซด์ ทำให้มีค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าน้อยลง

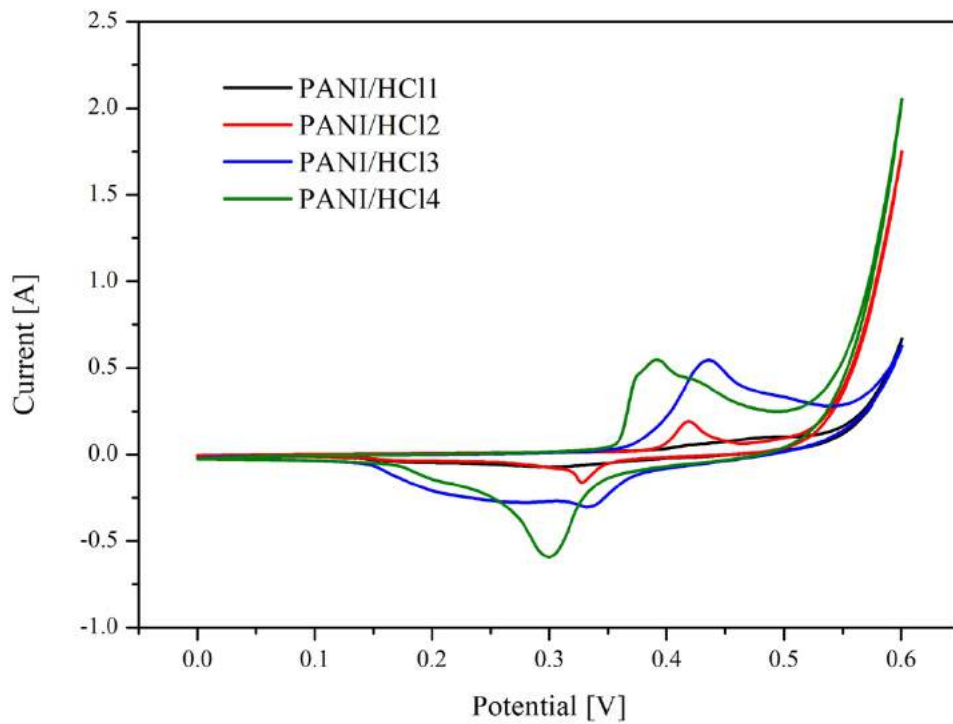
ในการทดสอบความสามารถในการเก็บประจุของการให้อัตราส่วนอะนิลีนมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ จากรูปที่ 4.15 และตารางที่ 4.6 จะเห็นว่า PANI/HCl1 และ PANI/HCl2 ให้ค่าความสามารถในการเก็บประจุน้อยเมื่อเทียบกับ PANI/HCl3 และ PANI/HCl4 เนื่องจากเมื่อความเข้มข้นของกรดต่ำ จะทำให้เกิดพอลิอะนิลีนที่ไม่เป็นแผ่น มีโครงสร้างที่ไม่เสริมสร้างในการเก็บประจุไฟฟ้า แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดให้มากขึ้น PANI/HCl3 และ PANI/HCl4 ให้ค่าความสามารถในการเก็บประจุ 23.30 mF/g และ 24.48 mF/g ตามลำดับ



รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.5 ค่าความเก็บประจุของวัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตแตกต่างกัน

วัสดุ	ค่าความเก็บประจุ (mF/g)
PANI/APS1	4.91
PANI/APS2	6.51
PANI/APS3	4.06



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกแตกต่างกัน

ตารางที่ 4.6 ค่าความเก็บประจุของวัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ที่อัตราส่วนมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกแตกต่างกัน

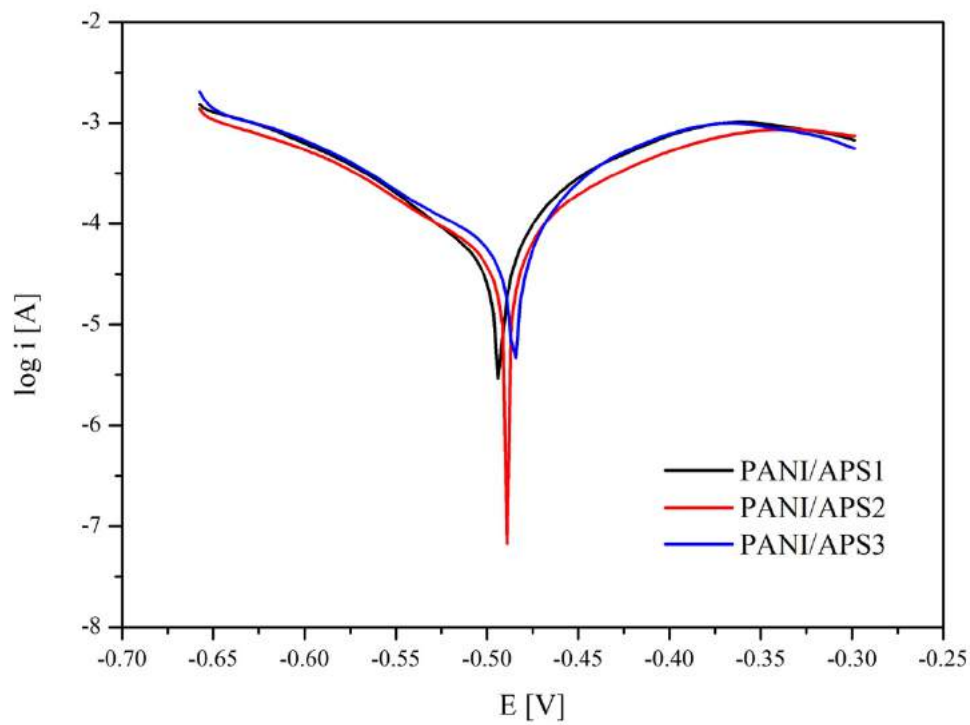
วัสดุ	ค่าความเก็บประจุ (mF/g)
PANI/HCl1	6.49
PANI/HCl2	6.44
PANI/HCl3	23.39
PANI/HCl4	24.48

4.3.3 วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีเทคนิคทาเฟลเอ็กซ์ทราโพลเรชัน

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Tafel extrapolation เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนบนขั้ววัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนและสังกะสีออกไซด์ โดยสามารถศึกษาพฤติกรรมการกัดกร่อนได้จากค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน (E_{corr}) พบว่า ขั้วสังกะสีออกไซด์มีค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน คือ -0.509 โวลต์ ในขณะที่เดียวกันกันเมื่อเติมแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ในอัตราส่วนต่าง ๆ พบว่ามีค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อนเพิ่มขึ้นทางบวก ซึ่งแสดงถึงการต้องใช้ความต่างศักย์เพิ่มขึ้นในการทำให้เกิดการกัดกร่อน หรือแสดงถึงการป้องกันการกัดกร่อนได้

ในขณะเดียวกัน ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน (i_{corr}) ซึ่งวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนและสังกะสีออกไซด์จะมีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าการกัดกร่อนที่ลดลง โดยจากสังเกตได้จากสังกะสีออกไซด์มีค่า 52.412 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แต่เมื่อทำการทำวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนและสังกะสีออกไซด์ และเติมอัตราส่วนของมอนอเมอร์ต่อแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตคือ 1:1 มีค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน คือ 48.131 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งจะพบว่า มีค่าการกัดกร่อนแบบทั่วผิวน้ำน้อยกว่าสังกะสีออกไซด์

หลังจากนั้นเมื่อคำนวณหาประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนพบว่าค่าประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เมื่อทำการเพิ่มปริมาณของแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต จนกระทั่งอัตราส่วนของมอนอเมอร์:แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตเป็น 1:1 มีค่าประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนเป็น 8.17% ซึ่งเกิดจากเมื่อเพิ่มแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตซึ่งเป็นตัวริเริ่มในการเกิดปฏิกิริยา จะทำให้พอลิเอทิลีนเพิ่มการพอลิเมอร์ไรเซชันทำให้เกิดพอลิเอทิลีนมาก และสังกะสีออกไซด์จะกระจายตัวอยู่บนพอลิเอทิลีน ทำให้การกัดกร่อนเป็นไปได้ยากขึ้น แต่หลังจากนั้นถึงแม้ว่าจะเติมแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต เพิ่มขึ้น แต่ค่าประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนจะลดลง จากพอลิเอทิลีนเกิดการเกาะเป็นกลุ่ม และสังกะสีออกไซด์ไม่สามารถกระจายตัวภายในพอลิเอทิลีนได้ ทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันเองของสังกะสีออกไซด์ ทำให้เกิดการกัดกร่อนทั้งบนสังกะสีออกไซด์และพอลิเอทิลีน

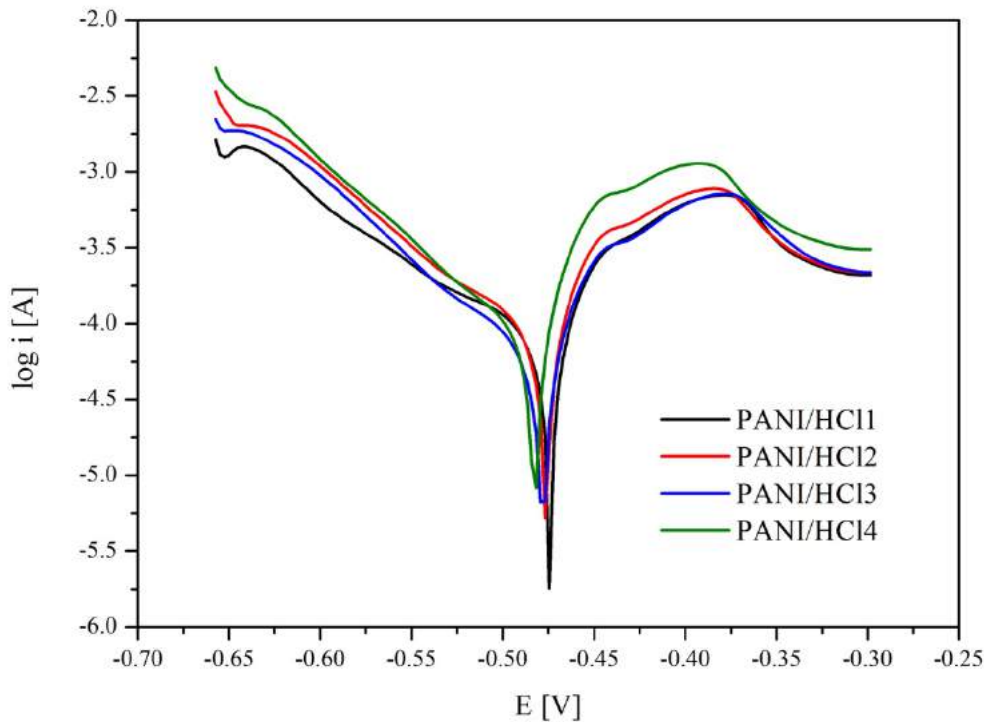


รูปที่ 4.16 กราฟการกัดกร่อนของพอลิไพโรลห่อหุ้มอนุภาคสังกะสีออกไซด์ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 6 โมลาร์ ที่อัตราส่วนมอดอเมอร์ : แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.7 ค่าการกัดกร่อนของการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนสังกะสีออกไซด์ ในการใช้อัตราส่วนอะนิลีนมอดอเมอร์และแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่ต่างกัน

อัตราส่วนอะนิลีนมอดอเมอร์ : แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต	E_{corr} (V)	I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	η (%)
สังกะสีออกไซด์	-0.50967	52.412	-
1:0.5	-0.49136	50.927	2.83
1:1	-0.48906	48.131	8.17
1:1.5	-0.48515	58.781	-12.15

ในการทดสอบหาค่าการประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนของการให้อัตราส่วนที่ต่างกันระหว่างอะนิลีนมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริก พบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ PANI/HCl3 โดยจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้ากัดกร่อน คือ -0.47807 โวลต์ ให้ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้ากัดกร่อน คือ 53.38 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร แต่อย่างไรก็ตาม การสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ โดยการให้อัตราส่วนที่ต่างกันระหว่างอะนิลีนมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริก จะให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งการกัดกร่อนมีค่าติดลบ ดังนั้นสรุปได้ว่า พอลิอะนิลีนไม่ช่วยในการป้องกันการกัดกร่อนของขั้วสังกะสีออกไซด์ ซึ่งสอดคล้องกับเทคนิคล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ การที่อนุภาคของพอลิอะนิลีนมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของสังกะสีออกไซด์ ในขณะที่อนุภาคของสังกะสีออกไซด์ จะเกิดการเกาะกลุ่มกันเองมากขึ้น ทำให้มีการกระจายตัวของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดการกัดกร่อนทั้งบนพื้นที่ผิวของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนต่ำกว่าเดิม



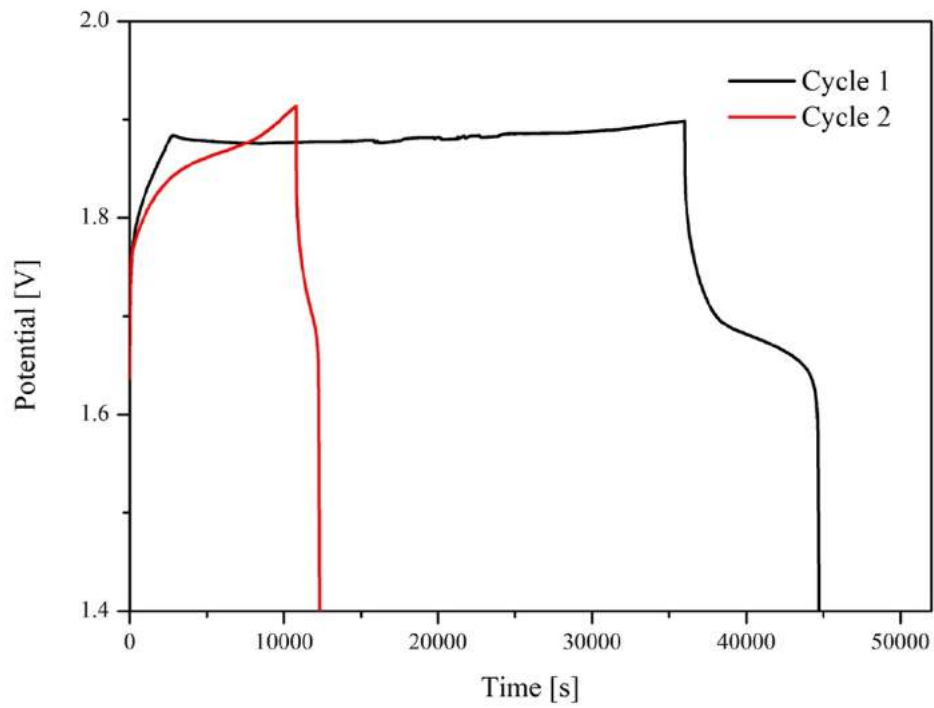
รูปที่ 4.17 กราฟการกัดกร่อนของพอลิอะนิลีนต่อหุ้มอนุภาคสังกะสีออกไซด์ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 6 โมลาร์

ตารางที่ 4.8 ค่าการกัดกร่อนของการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบพอลิอะนิลีนสังกะสีออกไซด์ ในการใช้อัตราส่วนอะนิลีนมอนอเมอร์และกรดไฮโดรคลอริกที่ต่างกัน

อัตราส่วนอะนิลีนมอนอเมอร์ : กรดไฮโดรคลอริก	E _{corr} (V)	I _{corr} (μ A/cm ²)	η (%)
1:0.25	-0.47415	83.701	-59.698161
1:0.5	-0.47622	68.24	-30.199191
1:0.75	-0.47807	53.384	-1.8545371
1:1	-0.48271	71.748	-36.892315

4.4 ผลการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์เป็นขั้วแอโนดของแบตเตอรี่ทุติยภูมิ

จากการวิเคราะห์เทคนิค Galvanostatic charge-discharge curve (GCD) เพื่อวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการอัดและจ่ายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ที่สามารถประจุไฟฟ้าใหม่ได้ โดยขั้วแอโนดที่ทำจากวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ ด้วยอัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ 1:0.75 ใช้ขั้วแคโทดเป็นนิกเกิลไฮดรอกไซด์ และใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ของสังกะสีออกไซด์ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยให้กระแสไฟฟ้าคงที่ 10 มิลลิแอมแปร์ จากรูปที่ 4.18 โดยเริ่มจากการทำการกระตุ้นขั้วสังกะสีออกไซด์โดยการอัดประจุไฟฟ้าเป็นเวลา 10 ชั่วโมง เพื่อกระตุ้นสังกะสีออกไซด์เบนผิวขั้วไฟฟ้าเป็นสังกะสีไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นทำการให้กระแสไฟฟ้า -10 มิลลิแอมแปร์ เพื่อให้เกิดโลหะสังกะสี และจากนั้นทำการให้กระแสไฟฟ้าต่อเป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดการอัดประจุไฟฟ้าอีกครั้ง และทำการจ่ายประจุไฟฟ้าเพื่อเปลี่ยนเป็นสังกะสีไฮดรอกไซด์ พบว่าสามารถให้ระยะเวลาการจ่ายประจุไฟฟ้าที่ 1518 วินาที เมื่อนำมาคำนวณค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ได้จากช่วงเวลาจ่ายประจุซึ่งพบว่า ความสามารถในการเก็บและจ่ายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่ใช้วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์เป็นขั้วแอโนด คือ 458 มิลลิแอมแปร์ชั่วโมง/กรัม



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบค่าความสามารถในการเก็บและจ่ายประจุไฟฟ้าของแบตเตอรี่ทุติยภูมิที่ใช้วัสดุเชิงประกอบของ
 พอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์เป็นขั้วแอโนด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและพอลิอะนิลีน/สังกะสีออกไซด์ ด้วยวิธีโซโนเคมีคัล เพื่อทำการเปรียบเทียบการยับยั้งการกัดกร่อนของที่ขั้วแอโนดในการนำไปใช้งานเป็นแบตเตอรี่ทุติยภูมิ โดยเมื่อทำการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบทั้งสองพบว่า วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรล/สังกะสีออกไซด์ให้ค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนที่สูงกว่าวัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีน/สังกะสีออกไซด์ เนื่องจากทำการวิเคราะห์ในสภาวะเบสทำให้พอลิอะนิลีนมีความสามารถในการนำไฟฟ้าไม่ดี และพอลิอะนิลีนมีสัณฐานที่ไม่เหมาะสมกับการยับยั้งการกัดกร่อน เมื่อทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์นำไฟฟ้า/สังกะสีออกไซด์ โดยใช้อัตราส่วนโมลของมอนอเมอร์ต่อแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1:0.5, 1:1 และ 1:1.5 ตามลำดับ และใช้อัตราส่วนโมลของมอนอเมอร์:กรดไฮโดรคลอริกที่แตกต่างกัน 1:0.5, 1:0.75, 1:1, 1:2, 1:4 และ 1:6 ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดของไพโรลมอนอเมอร์และแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต คือ 1:1 ซึ่งพบว่า เมื่อทำการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาพบว่า พื้นผิวของวัสดุเชิงประกอบมีการกระจายของพอลิไพโรลและอนุภาคของสังกะสีออกไซด์อย่างสม่ำเสมอ และทำการนำอัตราส่วนดังกล่าวไปหาค่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดระหว่างไพโรลมอนอเมอร์และกรดไฮโดรคลอริก พบว่า อัตราส่วนที่ดีที่สุดคือ 1:0.75 เมื่อใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์ เป็นอิเล็กโทรไลต์ โดยเมื่อทำการวิเคราะห์โดยเปรียบเทียบค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าจำเพาะด้วยเทคนิคไซคลิกโวลทามาเมทรีที่อัตราการเร็วความเร็วในการให้ศักย์ไฟฟ้า (scan rate) ที่ 1 มิลลิโวลต์ต่อวินาที พบว่ามีค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าที่สูงที่สุด เนื่องจากการที่มีปริมาณของพอลิไพโรลที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการทํางานร่วมกันของพอลิไพโรลและอนุภาคสังกะสีออกไซด์ในการเหนี่ยวนำให้เกิดการเก็บประจุไฟฟ้าที่มากขึ้น และเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนด้วยเทคนิคทาเฟล เอ็กซ์ทราโพเรชัน โดยที่อัตราส่วนของพอลิไพโรลและกรดไฮโดรคลอริกที่ 1:0.75 โดยจะให้ค่าศักย์ไฟฟ้าการกัดกร่อนที่สูงถึง -0.47950 โวลต์ ให้ค่าความหนาแน่นไฟฟ้าการกัดกร่อน คือ 15.785 ไมโครแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตร และให้ค่าประสิทธิภาพการยับยั้งการกัดกร่อนที่ดีที่สุดที่ร้อยละการยับยั้ง 69.88 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากพอลิไพโรลเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีพันธะคู่แบบคอนจูเกตแทรกตัวระหว่างสังกะสีออกไซด์อย่างทั่วทั้งผิวหน้า เมื่อใส่กรดไฮโดรคลอริกเพิ่มขึ้นจะทำให้โครงสร้างพอลิไพโรลที่เกิดการโปรโตเนตเพิ่มขึ้นส่งเสริมการถ่ายโอนประจุบนโครงสร้างของพอลิไพโรลมากขึ้น และชะลออัตราการกัดกร่อนบนอนุภาคของสังกะสีออกไซด์ทำให้เกิดการยับยั้งการกัดกร่อนที่มากที่สุด

เมื่อนำอัตราส่วนที่ดีที่สุดของวัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์นำไปขึ้นรูปเป็นแบตเตอรี่ที่มีขั้วแคโทดเป็นนิกเกิลไฮดรอกไซด์ และใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ของสังกะสีออกไซด์ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 6 โมลาร์เป็นอิเล็กโทรไลต์ เพื่อวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จดิสชาร์จ พบว่าสามารถให้ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าจำเพาะสูงถึง 458 มิลลิแอมแปร์ชั่วโมงต่อกรัม ที่กระแสไฟฟ้า 1 แอมแปร์ต่อกรัม

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการสังเคราะห์วัสดุเชิงประกอบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและสังกะสีออกไซด์ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ควรใช้เวลาในการสังเคราะห์ที่น้อยลง เพื่อทำให้เกิดพอลิเมอร์นำไฟฟ้าห่อหุ้มอนุภาคสังกะสีออกไซด์ช่วยในการลดการกัดกร่อน
2. ในการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบของพอลิอะนิลีนและสังกะสีออกไซด์ ควรทำการวิเคราะห์ในสภาวะกรดที่เหมาะสมต่อการโปรโตเนตของพอลิอะนิลีน คาดว่าจะทำให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น
3. ในการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์หลังจากทำการขึ้นรูปเป็นแบตเตอรี่ ควรนำมาวิเคราะห์ทุกอัตราส่วนเพื่อทำการเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุไฟฟ้าสำหรับการนำไปใช้งานเป็นแบตเตอรี่
4. ในการวิเคราะห์วัสดุเชิงประกอบของพอลิไพโรลและสังกะสีออกไซด์ขั้วไฟฟ้าแบตเตอรี่ ควรทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหลังจากการทดสอบอัดและคายประจุที่จำนวนรอบมากกว่า 50 รอบ เพื่อยืนยันว่าสามารถลดการเกิดเดนไดรต์บนขั้วแอโนด

เอกสารอ้างอิง

- [1] อรณิข ฝื่ออกคง. เซลล์เชื้อเพลิง[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7156-fuel-cells> [มีนาคม, 2018]
- [2] วรวิศ กอปรสิริพัฒน์. ตัวเก็บประจุยิ่งยวด[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.temcathai.com/download/magazine/volume_21_issue_2/75.pdf [มีนาคม, 2018]
- [3] ณปภัช พิมพ์ดี. เซลล์ไฟฟ้าเคมี[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.scimath.org/lesson-chemistry/item/7181-2017-06-05-14-40-23> [มีนาคม, 2018]
- [4] N. Zhang, F. Cheng, J. Li, L. Wan, X. Long, X. Liu, F. Li, and J. Chen. Rechargeable aqueous zinc-manganese dioxide batteries with high energy and power densities. *Nature Communications*, 2017, 1: 1-9
- [5] Y. Jo, S. Kang, K. Prasanna, S. Eom, and C. Lee. Shield effect of polyaniline between zinc active material and aqueous electrolyte in zinc-air batteries. *Applied Surface Science*, 2017, 422: 406-409
- [6] เสนอ ชัยรัมย์. พอลิอะนิลีนและอนุพันธ์นำไฟฟ้า: การสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้งาน. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2012.
- [7] J. Yue and A. Epstein. Synthesis of Self-Doped Conducting Polyaniline. *J. Am. Chem. SOC.*, 1990, 112: 2800.
- [8] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยใช้ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี[ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/Chapter%2011.pdf> [มีนาคม, 2018]
- [9] H. Xu, Z. Hai, J. Diwu, Q. Zhang, L. Gao, D. Cui, J. Zang, J. Liu, and C. Xue. Synthesis and Microwave Absorption Properties of Core-Shell Structured Co_3O_4 -PANI Nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*, 2015, 1: 1-3
- [10] J. Huang, Z. Yang, Z. Feng, X. Xie, and X. Wen. A novel $\text{ZnO}@\text{Ag}@\text{Polypyrrole}$ hybrid composite evaluated as anode material for zinc-based secondary cell. *Scientific Reports*, 2016, 6: 1-10.