



โครงการ
การเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์

ชื่อโครงการ ชั่วไฟฟ้าเก็บประจุพลังงานยิ่งยวดเชิงแสงฐานพอลิอะนิลีน

Photo supercapacitor electrode based polyaniline

ชื่อนิสิต นางสาวณัฐสิมา คงสืบชาติ
นางสาวอภิสสร่า สกกุลพิทักษ์

เลขประจำตัว 6033226723
6033284023

ภาควิชา วัสดุศาสตร์
แขนงวิชาพอลิเมอร์และสิ่งทอ

ปีการศึกษา 2563

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โครงการวิจัยระดับปริญญาตรี

เรื่อง

ชีวไฟฟ้าเก็บประจุพลังงานยิ่งยวดเชิงแสงฐานพอลิอะนิลีน

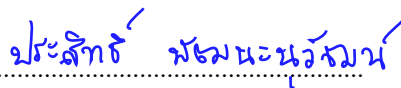
เสนอ

ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ตามระเบียบการศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวัสดุศาสตร์

นางสาวณัฐสิมา คงสืบชาติ 6033226723

นางสาวอภิสรรา สกุลพิทักษ์ 6033284023

อนุมัติโดย



(ผศ.ดร.ประสิทธิ์ พัฒนะนุวัฒน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ



(ศ.ดร.ประณัฐ โพธิยะราช)

อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการร่วม

ปีการศึกษา 2563

หัวข้องานวิจัย	ขั้วไฟฟ้าเก็บประจุพลังงานยิ่งยวดเชิงแสงฐานพอลิอะนิลีน
ชื่อผู้วิจัย	ณัฐสิมา คงสืบชาติ อภิสรรา สกุลพิทักษ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ พัฒนะนุวัฒน์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช

บทคัดย่อ

เพื่อลดปัญหาภาวะโลกร้อนในปัจจุบันแนวทางการใช้พลังงานทดแทนที่มาจากธรรมชาติเพื่อทดแทนแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิลมีแนวโน้มที่สูงขึ้น ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการเหล่านี้ต้องการแหล่งกักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง โดยเทคโนโลยีตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นหนึ่งในอุปกรณ์กักเก็บประจุไฟฟ้าที่สามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าได้อย่างรวดเร็ว ให้กำลังพลังงานไฟฟ้าและประสิทธิภาพต่อรอบอายุการใช้งานที่ยาวนาน ซึ่งแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของการเก็บประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้นพื้นฐานอยู่บนการพัฒนาวัสดุที่มีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ดี และมีพื้นที่ผิวที่สูงเพื่อใช้ในการแพร่ผ่านของประจุไฟฟ้า นอกจากนี้การเพิ่มประสิทธิภาพโดยอาศัยสมบัติโพโตวอลเทอิกส์เป็นอีกหนึ่งคุณสมบัติที่น่าสนใจโดยใช้หลักการการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยงานวิจัยนี้คณะผู้วิจัยมีความสนใจในการพัฒนาพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีสมบัติโพโตวอลเทอิกส์ เช่น พอลิอะนิลีนร่วมกับวัสดุแกรฟีน เพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนแสง มาเสริมประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า และพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวดเชิงแสง โดยในการศึกษาขั้นแรกเป็นการหาภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าด้วยวิธีการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้าของพอลิอะนิลีนโดยใช้วิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี ที่จำนวนรอบการฝังตัวที่ 2, 5, 7, 10 และ 12 รอบ พบว่า จำนวนรอบที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดเชิงแสง คือ 5 รอบ มีลักษณะสัณฐานวิทยาแบบนาโนรอด ให้ค่าการเก็บประจุไฟฟ้า 109.20 และ 208.70 ไมโครฟารัดต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสงยูวี ตามลำดับ ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการเก็บประจุเชิงแสงที่สูงขึ้นถึงร้อยละ 91.12 จากนั้นทำขึ้นรูปขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนคอมพอสิตที่จำนวน 5 รอบ โดยใช้ความเข้มข้นแกรฟีนออกไซด์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ 0.01 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และโครงสร้างหมู่ฟังก์ชันทางเคมีของขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน ถูกยืนยันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี จากการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี และเทคนิคกลวาโนสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ พบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดเชิงแสง คือ 0.01 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ให้ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าสูงถึง 181.50 และ 225.50 ไมโครฟารัดต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสงยูวี ตามลำดับ และมีค่าประสิทธิภาพการเก็บประจุเชิงแสงร้อยละ 24.24 แสดงให้เห็นว่ามีความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น แต่มีค่าประสิทธิภาพการเก็บประจุเชิงแสงลดลง เนื่องจากการฝังตัวร่วมกันของพอลิอะนิลีนและแกรฟีนมีผลต่อการบดบังพื้นที่ผิวในการดูดกลืนแสงของพอลิอะนิลีนโดยตรง

คำสำคัญ : ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเชิงแสง, โพโตวอลเทอิกส์, พอลิอะนิลีน, แกรฟีนออกไซด์, การฝังตัวทางเคมีไฟฟ้า

Research title	Photo supercapacitor electrode based polyaniline
Researchers	Natsima Kongsuebchart Apisara Sakulpitak
Advisor	Asst. Prof. Dr. Prasit Pattanauwat
Co-advisor	Prof. Pranut Potiyaraj

Abstract

Nowadays, energy source from fossil fuels was replaced by renewable energy for generating electricity to reduce global warming problem. However, to store a large amount of electrical energy, it requires high efficiency energy storage technology such as supercapacitors (SCs) owing to the capability of electrical storage in terms of high-power energy output, fast charge-discharge feature and long-life cycles. Thus, the purpose of this research is to increase the capability of electric energy storage under UV light by using polyaniline-based materials with graphene as photo-assisted charging supercapacitor electrode. Polyaniline is pseudocapacitance materials with photovoltaic properties but it is lack of long-term stability during reversible redox reaction. Graphene is EDLC materials with stability in electro-absorption for SCs. In this work, Polyaniline was in-situ electropolymerized with graphene onto fluorine-doped tin oxide glass. The different cycles of electropolymerization from 2, 5, 7, 10 and 12 were studied. The surface morphology and chemical functional group of samples were examined by Scanning Electron Microscopy (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR). The electrochemical properties of samples were characterized by Cyclic Voltammetry (CV) and Galvanostatic Charge-Discharge (GCD). The synthesized polyaniline electrode at 5 cycles can reach the highest photo efficiency of 91.12% with specific capacitance of 109.20 and 208.70 mF/cm² under dark and UV condition, respectively. The concentration of graphene oxide of 0.01 and 0.03 mg/mL was determined to optimize the ratio of reduced graphene oxide to polyaniline. The optimum GO concentration was 0.01 mg/mL with specific capacitance of 181.50 and 225.50 under dark and UV condition, respectively, and the photo efficiency was 24.24%. The increase in specific capacitance of electrode composites resulted from the synergistic effect between reduced graphene oxide and polyaniline. While, the decrease in photo efficiency was caused from the obscuring of reduced graphene oxide over the polyaniline surface, affecting to decrease in light-absorption of polyaniline.

Keywords: photo-assisted charging supercapacitor, photovoltaic, polyaniline, graphene oxide, electropolymerization

กิตติกรรมประกาศ

รายงานโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ การสนับสนุน และความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ การดำเนินงาน และเงินทุนสนับสนุน จากคณาจารย์ ท่านทั้งหลายและหน่วยงานต่าง ๆ ตั้งแต่เริ่มต้นจนงานวิจัยเสร็จสมบูรณ์ ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ พัฒนะนุวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ที่กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา แนะนำ ส่งเสริม ในด้านวิชาการและความช่วยเหลือตลอดการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร. ประณัฐ โพธิยะราช ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ส่งเสริม ในด้านวิชาการและความช่วยเหลือในการดำเนินงาน

ขอขอบคุณพินិតปริญาเอก ปริญาโท สาขาวิชาพอลิเมอร์และสิ่งทอ ที่ให้ความรู้ และคำแนะนำต่าง ๆ ในขั้นตอนการทดลอง การเขียนรูปเล่ม รวมถึงเป็นกำลังใจในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนนิสิตปริญาตรีชั้นปีที่ 4 ที่ช่วยเหลือและให้คำแนะนำในด้านต่าง ๆ

ขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ที่เป็นแบบอย่างที่ดี ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจอย่างดี ทำให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นางสาวณัฏฐ์สิมา คงสืบชาติ

นางสาวอภิสรรา สกุลพิทักษ์

สารบัญ

บทคัดย่อ.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 มูลเหตุจูงใจ และที่มาของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์.....	3
2.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	3
2.1.1 ลักษณะและคุณสมบัติทั่วไปของตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	3
2.1.2 กลไกการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	4
2.1.2.1 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีอีดีแอลซี.....	4
2.1.2.2 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีซูโดคาปาซิเตอร์.....	5
2.1.3 องค์ประกอบของตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	6
2.2 แกรฟีน.....	7
2.2.1 การสังเคราะห์แกรฟีน.....	7
2.3 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	9
2.4 พอลิอะนิลีน.....	10
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	22
3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	22

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์	22
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	22
3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย	23
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	23
3.3.1 สังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์	23
3.3.1.1 การเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์.....	23
3.3.1.2 การเตรียมแกรไฟีนออกไซด์.....	23
3.3.2 การขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าตัวเก็บประจุพอลิอะนิลีนด้วยวิธีการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้า.....	23
3.3.3 การขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าตัวเก็บประจุรีดิวซ์แกรไฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนด้วยวิธีการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้า.....	24
3.3.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	24
3.3.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี.....	24
3.3.6 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมี	25
3.3.6.1 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี	25
3.3.6.2 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคควาโนสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ	25
3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง.....	27
3.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน.....	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง	29
4.1 ผลการเตรียมขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน	29
4.1.1 การสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน	29
4.1.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	30
4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	31
4.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	32
4.1.4.1 การวิเคราะห์ในสภาวะที่ไม่มีแสง	32

4.1.4.2 การวิเคราะห์ในสภาวะที่มีแสง UV.....	33
4.1.4.3 การวิเคราะห์ผลของแสงต่อสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน	35
4.1.5 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ.....	36
4.1.5.1 การวิเคราะห์ในสภาวะที่ไม่มีแสง	36
4.1.5.2 การวิเคราะห์ในสภาวะที่มีแสง UV.....	38
4.1.5.3 การวิเคราะห์ผลของแสงต่อสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน	40
4.2 ผลการเตรียมขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน.....	41
4.2.1 การสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน	41
4.2.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	42
4.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี	43
4.2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	43
4.2.4.1 การวิเคราะห์ในสภาวะที่ไม่มีแสง	43
4.2.4.2 การวิเคราะห์ในสภาวะที่มีแสง UV.....	45
4.2.4.3 การวิเคราะห์ผลของแสงต่อสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน.....	47
4.2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ.....	47
4.2.5.1 การวิเคราะห์ในสภาวะที่ไม่มีแสง	47
4.2.5.2 การวิเคราะห์ในสภาวะที่มีแสง UV.....	49
4.2.5.3 การวิเคราะห์ผลของแสงต่อสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน.....	51
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	53
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	53
5.2 ข้อเสนอแนะ	53
เอกสารอ้างอิง.....	55

สารบัญตาราง

บทที่ 2

ตารางที่ 2.1 ค่าการเก็บประจุ (specific capacitances) ของ RGO-PEDOT, RGO-PPy, และ RGO-PANi ที่ความหนาแน่นกระแส (current density) แตกต่างกัน ^[5]..... 13

บทที่ 3

ตารางที่ 3.1 ขอบเขตระยะเวลาการดำเนินงาน28

บทที่ 4

ตารางที่ 4.1 ค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi จากเทคนิค GCD ที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร.....41

ตารางที่ 4.2 ค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP จากเทคนิค GCD ที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร.....52

สารบัญรูป

บทที่ 2

รูปที่ 2.1 ตารางเรโกเน (Ragone chart)แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการจ่ายพลังงานและการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้า ^[1]	3
รูปที่ 2.2 แผนภาพการเก็บประจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด ^[2]	4
รูปที่ 2.3 แผนภาพการเก็บประจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีสองชั้นของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดชนิดฮีตีสแอลซี ^[2]	5
รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดชนิด ซูโดคา์ปาซิเตอร์ ^[2]	5
รูปที่ 2.5 ประเภทของตัวเก็บประจุ ^[1]	6
รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด ^[2]	6
รูปที่ 2.7 ความเชื่อมโยงโครงสร้างของอัญรูปต่างๆ ของคาร์บอนผ่านโครงสร้าง 2 มิติของแกรฟีน ^[3]	7
รูปที่ 2.8 แผนภาพจำลองการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยเทคนิค CVD และขั้นตอนการเคลื่อนย้ายแกรฟีนที่สังเคราะห์ได้ ^[3]	8
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งแสดงจำนวนหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่ลดลง ^[3]	9
รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าบางชนิด (ในรูปที่ยังไม่ได้ป) ^[4]	9
รูปที่ 2.11 การผันกลับได้ของกระบวนการโด๊ปพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ตัวอย่างคือพอลิไพโรล (PPy) (A ⁻ คือแอนไอออนของสารโด๊ป X ⁺ คือแคทไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์) ^[4]	10
รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของพอลิอะนิลีนแบบต่างๆ สมบัติทางไฟฟ้า สี การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์และปฏิกิริยากรด-เบส ^[4]	11
รูปที่ 2.13 กราฟแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ของ (a) RGO-PEDOT, (b) RGO-PPy และ (c) RGO-PANi ^[5]	12
รูปที่ 2.14 กราฟแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ ของ (a) RGO-PEDOT, (b) RGO-PPy และ (c) RGO-PANi ที่ current densities แตกต่างกัน ^[5]	12
รูปที่ 2.15 สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของ PANi fibers, RGO-PANi, RGO-PEDOT, และ RGO-PPy ^[5]	13
รูปที่ 2.16 (a) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ pure PANI, (b) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของ GNS, (c) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ GNS และ (d) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของวัสดุคอมโพสิต GNS/PANI ^[6]	14

รูปที่ 2.17 กราฟแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ของแกรฟีน (GNS), พอลิอะนิลีน (pure PANI) และวัสดุคอมโพสิตของ GNS/PANI ^[6] 14

รูปที่ 2.18 กราฟแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ของแกรฟีน (GNS), พอลิอะนิลีน (pure PANI) และวัสดุคอมโพสิตของ GNS/PANI ^[6] 15

รูปที่ 2.19 กระบวนการเตรียมวัสดุคอมโพสิตแกรฟีน/พอลิอะนิลีน ^[7] 16

รูปที่ 2.20 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ PANI-F, GO, GR, PAGO10, PAGO50, PAGO80, PAG10, PAG50, PAG80 ^[7] 16

รูปที่ 2.21 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของ PANI-F, GO, GR, PAGO10, PAGO50, PAGO80, PAG10, PAG50, PAG80 ^[7] 17

รูปที่ 2.22 Cyclic voltammograms ใน 2M H₂SO₄ โดยใช้คอมโพสิตอิเล็กโทรดแบบคาร์บอนชนิดเคลือบแก้ว ที่ต่างกัน, แผ่น Pt เป็นแคโทดอิเล็กโทรด และ AgCl/Ag เป็นอิเล็กโทรดอ้างอิง อัตราการสแกนคือ 100 mV/s ^[7] 17

รูปที่ 2.23 กราฟการอัดและคายประจุของอิเล็กโทรดคอมโพสิตที่แตกต่างกัน ที่ความหนาแน่นกระแส 0.1 A/g ^[7] 18

รูปที่ 2.24 (a) กราฟ CV ของกระดาษแกรฟีน, ฟิล์มพอลิอะนิลีน บนอิเล็กโทรด Pt และกระดาษแกรฟีน/พอลิอะนิลีนที่ 10 mV/s ใน 1M H₂SO₄ ในช่วง potential จาก 0.2 ถึง 0.8 V (b) กราฟ CV ของกระดาษแกรฟีน/พอลิอะนิลีนที่อัตราการสแกนต่าง ๆ ^[8] 18

รูปที่ 2.25 กราฟแสดงค่าที่แตกต่างกันของค่าความจุไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแส bR/PANI-electrode ภายใต้สภาวะมีแสงและไม่มีแสง ^[9] 19

รูปที่ 2.26 กระบวนการเตรียมอิเล็กโทรดและโครงสร้างของอิเล็กโทรด ^[10] 20

รูปที่ 2.27 กราฟแสดงการชาร์จด้วยแสงของอุปกรณ์โดยไม่มีแรงดันไบอัสจากภายนอกของ (a) ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อลัดวงจร (b) ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดวงจร ที่ AM 1.5 solar กำลังความหนาแน่น 1000 W m⁻² ภายใต้การปิดและเปิดไฟส่องสว่าง ^[10] 20

บทที่ 4

รูปที่ 4.1 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของ (a) PANi2, (b) PANi5, (c) PANi7, (d) PANi10 และ (e) PANi12 30

รูปที่ 4.2 ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน (a) PANi5 และ (b) PANi10 ^[11] 31

รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของขั้วไฟฟ้า PANi ที่ได้จากเทคนิค FT-IR 31

รูปที่ 4.4 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตริกของขั้วไฟฟ้า (a) PANi2, (b) PANi5, (c) PANi7, (d) PANi10 และ (e) PANi12 ที่ 10 ถึง 100 mV/s และ (f) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ PANi ที่จำนวนรอบต่างๆ ที่ 10 mV/s ในสถานะที่ไม่มีแสง.....	33
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบและอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ต่าง ๆ จากเทคนิค CV ในสถานะที่ไม่มีแสง	33
รูปที่ 4.6 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตริกของขั้วไฟฟ้า (a) PANi2, (b) PANi5, (c) PANi7, (d) PANi10 และ (e) PANi12 ที่ 10 ถึง 100 mV/s และ (f) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ PANi ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่ 10 mV/s ในสถานะที่มีแสง UV	35
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบและอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ต่าง ๆ จากเทคนิค CV ในสถานะที่มีแสง UV	35
รูปที่ 4.8 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่ 10 mV/s จากเทคนิค CV ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน	36
รูปที่ 4.9 ลักษณะการอัดและการคายประจุของขั้วไฟฟ้า (a) PANi2, (b) PANi5, (c) PANi7, (d) PANi10 และ (e) PANi12 ที่ 1 ถึง 10 A/cm ² และ (f) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ PANi ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่ 1 A/cm ² ในสถานะที่ไม่มีแสง.....	37
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบและความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ จากเทคนิค GCD ในสถานะที่ไม่มีแสง.....	38
รูปที่ 4.11 ลักษณะการอัดและการคายประจุของขั้วไฟฟ้า (a) PANi2, (b) PANi5, (c) PANi7, (d) PANi10 และ (e) PANi12 ที่ 1 ถึง 10 A/cm ² และ (f) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ PANi ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่ 1 A/cm ² ในสถานะที่มีแสง UV	39
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบและความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ จากเทคนิค GCD ในสถานะที่มีแสง UV	40
รูปที่ 4.13 แผนภูมิเปรียบเทียบ (a) ค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi และ (b) ประสิทธิภาพต่อการให้กระแสของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบต่าง ๆ จากเทคนิค GCD ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน.....	40
รูปที่ 4.14 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดอิเล็กโตรพอลิเมอร์โรเซชันของ (a) GOP1 และ (b) GOP3 ...	42
รูปที่ 4.15 ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของขั้วไฟฟารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน (a) GOP1 และ (b) GOP3 ^[11]	42
รูปที่ 4.16 สเปกตรัมของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ได้จากเทคนิค FT-IR.....	43
รูปที่ 4.17 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตริกของขั้วไฟฟ้า (a) GOP1 และ (b) GOP3 ที่ 10 ถึง 100 mV/s และ (c) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ GOP ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ 10 mV/s ในสถานะที่ไม่มีแสง	44

รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นและอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่าง ศักย์ต่าง ๆ จากเทคนิค CV ในสภาวะที่ไม่มีแสง45

รูปที่ 4.19 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตริกของขั้วไฟฟ้า (a) GOP1 และ (b) GOP3 ที่ 10 ถึง 100 mV/s และ (c) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ GOP ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ 10 mV/s ในสภาวะที่มีแสง UV46

รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นและอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่าง ศักย์ต่าง ๆ จากเทคนิค CV ในสภาวะที่มีแสง UV.....46

รูปที่ 4.21 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ 10 mV/s จาก เทคนิค CV ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน47

รูปที่ 4.22 ลักษณะการอัดและการคายประจุของขั้วไฟฟ้า (a) GOP1 และ (b) GOP3 ที่ 1 ถึง 10 A/cm² และ (c) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ GOP ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ 1 A/cm² ในสภาวะที่ไม่มีแสง48

รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นและความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ จากเทคนิค GCD ในสภาวะที่ไม่มีแสง49

รูปที่ 4.24 ลักษณะการอัดและการคายประจุของขั้วไฟฟ้า (a) GOP1 และ (b) GOP3 ที่ 1 ถึง 10 A/cm² และ (c) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ GOP1 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ 1 A/cm² ในสภาวะที่มีแสง UV50

รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นและความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ จากเทคนิค GCD ในสภาวะที่มีแสง UV51

รูปที่ 4.26 แผนภูมิเปรียบเทียบ (a) ค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP และ (b) ประสิทธิภาพต่อการให้ กระแสของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จากเทคนิค GCD ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน51

บทที่ 1

บทนำ

1.1 มลเหตุจูงใจ และที่มาของโครงการวิจัย

ตั้งแต่อดีตพลังงานจากถ่านหินเป็นแหล่งพลังงานที่ได้จากฟอสซิลถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงที่สำคัญในการผลิตกระแสไฟฟ้าซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่ากระบวนการเผาไหม้ที่เกิดขึ้นนั้นก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการพัฒนาและหันมาใช้แหล่งพลังงานทดแทนที่สะอาดมากขึ้น เช่น พลังงานน้ำ, พลังงานลม และพลังงานแสงอาทิตย์ เป็นต้น ซึ่งพลังงานไฟฟ้าที่ได้จากกระบวนการเหล่านี้ต้องการแหล่งกักเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง โดยสามารถกักเก็บปริมาณประจุไฟฟ้าได้ปริมาณสูงและมีความสามารถในการจ่ายไฟได้รวดเร็ว เช่น เซลล์เชื้อเพลิง, แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่า แบตเตอรี่เพียงอย่างเดียวไม่สามารถรองรับการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากข้อจำกัดในด้านกำลังไฟฟ้าที่สามารถจ่ายได้ ระยะเวลาในการอัดประจุ และประสิทธิภาพต่อรอบในการใช้งาน ดังนั้นการพัฒนาเทคโนโลยีตัวเก็บประจุยิ่งยวด ที่สามารถให้กำลังไฟฟ้าที่สูง และใช้ระยะเวลาในการอัดประจุที่สั้น จึงเป็นอีกทางเลือกสำหรับอุปกรณ์ไฟฟ้าบางประเภท เช่น สมาร์ทโฟน, ทีวีจอโค้ง, เครื่องมือแพทย์ที่ฝังในร่างกาย และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบสวมใส่ที่ทำงานร่วมกับระบบคอมพิวเตอร์เพื่อการเข้าถึงข้อมูล เป็นต้น เนื่องจากอุปกรณ์เหล่านี้ต้องการน้ำหนักที่เบา ความทนทานต่อการใช้งานสามารถอัดประจุได้ในระยะเวลาที่สั้น และต้นทุนต่ำ

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์สำหรับกักเก็บประจุไฟฟ้าที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีอัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่รวดเร็ว สามารถกักเก็บพลังงานได้สูง และมีอายุการใช้งานยาวนาน ซึ่งเหล่านี้เป็นข้อจำกัดในแบตเตอรี่ที่อาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ตัวเก็บประจุยิ่งยวดประกอบไปด้วย 2 กลไกหลักที่ขึ้นกับวัสดุที่ใช้ กล่าวคือ แบบที่ 1. ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีสองชั้น (Electrochemical double layer capacitors, EDLC) ซึ่งอาศัยหลักการเกิดไฟฟ้าสถิตที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า การนำวัสดุนาโนที่พื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงจะทำให้สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามพบว่าวัสดุแบบ EDLC ยังมีข้อจำกัดในด้านประสิทธิภาพพลังงานเนื่องจากความสามารถในการกักเก็บพลังงานขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิววัสดุเพียงอย่างเดียว แบบที่ 2. ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบซูโดคาปาซิเตอร์ (Pseudocapacitor) โดยเก็บประจุที่บริเวณพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า เช่นเดียวกับตัวเก็บประจุแบบ EDLC แต่ต่างกันว่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบซูโดคาปาซิเตอร์มีการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอนเมื่อได้รับความต่างศักย์จากภายนอก โดยเกิดผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันบนวัสดุหรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาฟาราเดิก (Faradaic reaction)

โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการนำพอลิอะนิลีนซึ่งเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ ส่งเคราะห์ได้ง่าย มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้า มาทำขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดเชิงแสง และได้มีการใช้แกรฟีนซึ่งเป็นวัสดุที่น่าสนใจ เนื่องจาก

แกรฟีนมีอนุภาคขนาดเล็ก มีความสามารถในการนำไฟฟ้า มีพื้นที่ผิวในการกักเก็บประจุ มาทำการเสริมประสิทธิภาพในการกักเก็บประจุ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการยึดเกาะ

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้าของพอลิอะนิลีน และสารเชิงประกอบรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน เพื่อให้มีสมบัติการเก็บประจุเชิงแสงที่ดีที่สุด

1.2.2 เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการกักเก็บประจุเชิงแสงของพอลิอะนิลีนโดยใช้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ศึกษาผลของปริมาณการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้าของพอลิอะนิลีนที่เหมาะสมในการให้ค่าการเก็บประจุเชิงแสงสูงสุดโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (2, 5, 7, 10 และ 12 รอบ)

1.3.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นของแกรฟีนออกไซด์ที่เหมาะสมในการให้ค่าการเก็บประจุเชิงแสงสูงสุดโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (0.01 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร)

1.3.3 ศึกษาค่าการกักเก็บประจุเชิงแสงของขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน สารเชิงประกอบรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสง UV

1.3.4 ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (FT-IR), ลักษณะทางสัณฐานวิทยา Scanning Electron Microscopy (SEM) และสมบัติทางเคมีไฟฟ้า Potentiostat/Galvanostat (CV/GCD) ของตัวอย่างที่เตรียมได้

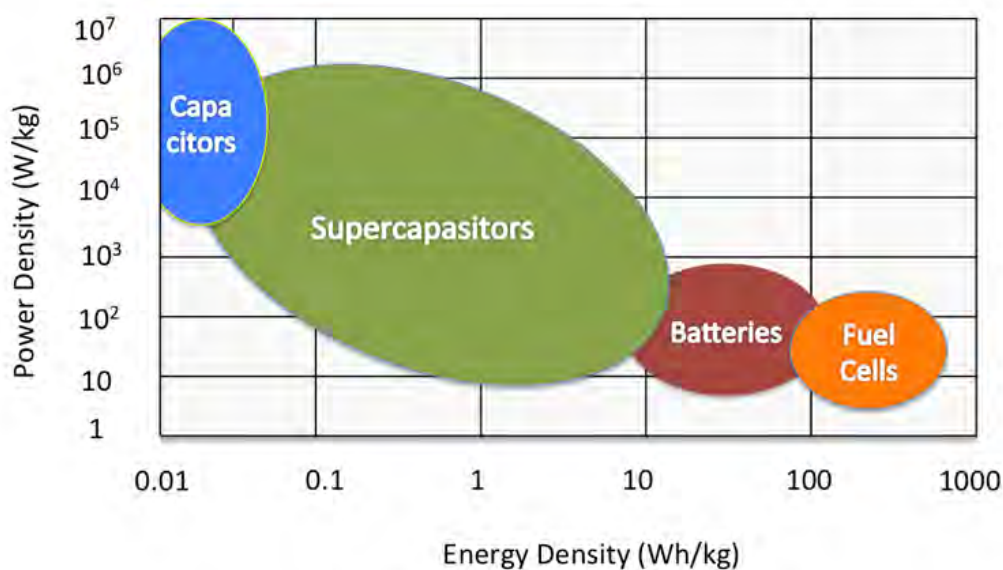
บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

2.1.1 ลักษณะและคุณสมบัติทั่วไปของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

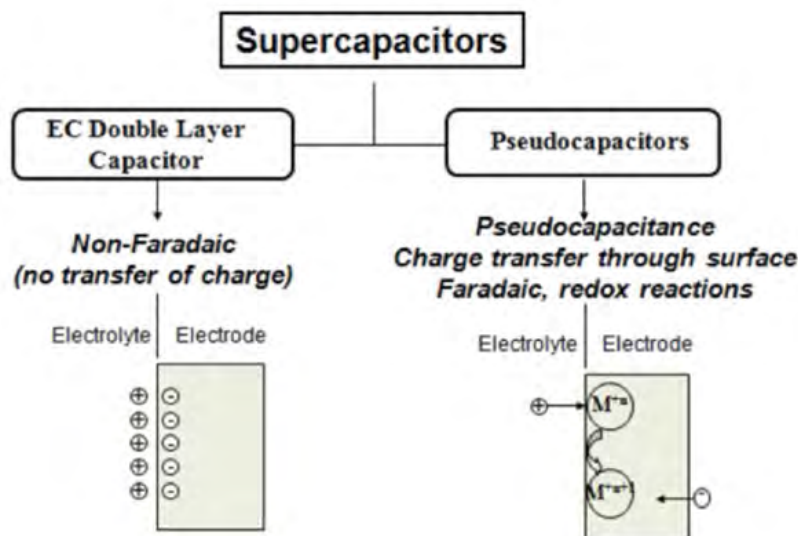
ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor หรือ ultracapacitor) เป็นอุปกรณ์สำหรับกักเก็บประจุไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ซึ่งถูกพัฒนามาจากตัวเก็บประจุและแบตเตอรี่ โดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดทนต่อการชาร์จและดิสชาร์จได้มากถึง 100,000 รอบ มีอัตราการจ่ายพลังงานไฟฟ้า (Power density) ได้เร็วกว่าแบตเตอรี่ และสามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้า (Energy density) ได้สูงกว่าตัวเก็บประจุดั้งเดิมถึง 1,000 เท่า ดังรูปที่ 2.1 แต่อย่างไรก็ตาม ความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้ายังคงต่ำกว่าแบตเตอรี่อยู่มาก โดยแบตเตอรี่ชนิดลิเทียมไอออนสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ 150 วัตต์ต่อกิโลกรัม และตัวเก็บประจุยิ่งยวดเก็บพลังงานไฟฟ้าได้ต่ำกว่า 10 วัตต์ต่อกิโลกรัม ซึ่งการเก็บพลังงานไฟฟ้าของแบตเตอรี่คิดเป็น 15 เท่าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด ทำให้มีนักวิจัยได้พยายามพัฒนาประสิทธิภาพตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้มีความสามารถในการเก็บพลังงานไฟฟ้าให้มากยิ่งขึ้น เพื่อใช้ทดแทนแบตเตอรี่ในอนาคต ^[1]



รูปที่ 2.1 ตารางเรโกเน (Ragone chart) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการจ่ายพลังงานและการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าของอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้า ^[1]

2.1.2 กลไกการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

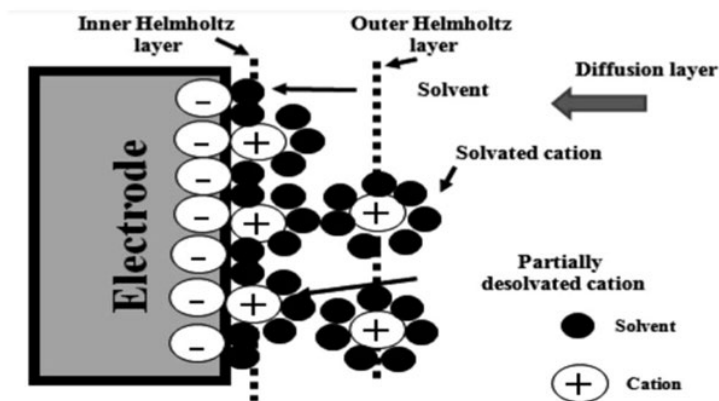
ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีแบ่งออกเป็นสองชนิด ชนิดแรก คือ อีดีแอลซี (EDLC, electrochemical double layer capacitor) หรือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีสองชั้นโดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะถูกดูดซับสองชั้นบนขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ชนิดที่สองคือซูโดคาปาซิเตอร์ (Pseudocapacitors) จะเก็บประจุบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับอีดีแอลซี และมีถ่ายเทอิเล็กตรอน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้นภายในวัสดุที่ถูกใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.2 ส่งผลให้ซูโดคาปาซิเตอร์สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้สูงกว่าอีดีแอลซี [2]



รูปที่ 2.2 แผนภาพการเก็บประจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด [2]

2.1.2.1 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีอีดีแอลซี

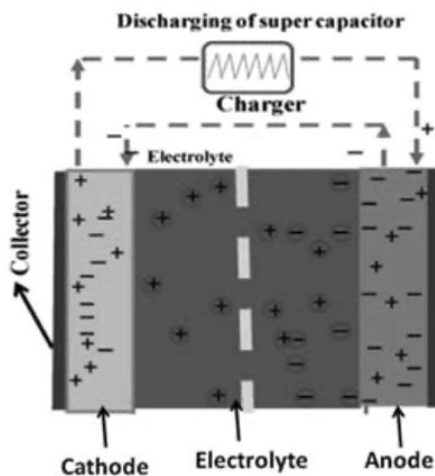
ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีถูกคิดค้นโดย H. I. Becker นักวิจัยของบริษัท General Electric Co. ในปี ค.ศ. 1957 ADDIN EN. CITE แผนภาพแสดงการเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบที่อีดีแอลซีดังรูปที่ 2.3 ที่มีการเก็บประจุไฟฟ้าเคมีสองชั้นโดยชั้นในถูกเรียกว่า อินเนอร์ เฮล์มโฮลทซ์ และชั้นนอกถูกเรียกว่า เอาเตอร์ เฮล์มโฮลทซ์ โดยในชั้นอินเนอร์ เฮล์มโฮลทซ์จะประกอบด้วยประจุบวกของอิเล็กโทรไลต์ที่ถูกล้อมรอบด้วยตัวทำละลายลักษณะครึ่งทรงกลมเกาะที่ผิวของขั้วไฟฟ้าอีดีแอลซี ที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดประจุลบด้วยการให้ศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก ในขณะที่ชั้นที่สอง หรือ เอาเตอร์ เฮล์มโฮลทซ์ ประกอบด้วยประจุบวกที่ถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลตัวทำละลายมีลักษณะเป็นทรงกลม ถัดจากนั้นก็จะเป็นชั้นการแพร่ของสารละลาย การเก็บประจุไฟฟ้าเคมีของอีดีแอลซี เก็บประจุไฟฟ้าเคมีได้สูงกว่าตัวเก็บประจุโดยทั่วไปหลายร้อยเท่า บริษัท Maxwell Technologies ได้ผลิตอีดีแอลซีเชิงพาณิชย์ที่สามารถเก็บประจุสูงถึง 3 กิโลฟารัดทำให้ราคาของอีดีแอลซีลดลงจาก 5,000 เหรียญสหรัฐในปี ค.ศ. 2000 เหลือเพียง 50 เหรียญสหรัฐในปี ค.ศ. 2011 [2]



รูปที่ 2.3 แผนภาพการเก็บประจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีสองชั้นของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดชนิดอีดีแอลซี [2]

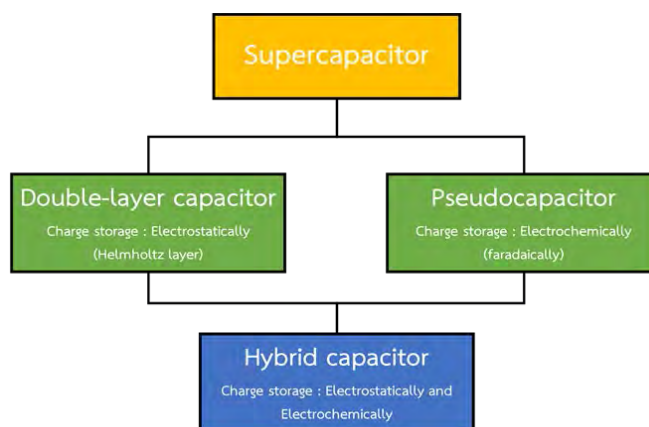
2.1.2.2 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีซูโดคาปาซิเตอร์

การเก็บประจุไฟฟ้าของซูโดคาปาซิเตอร์จะมีค่าการเก็บประจุสูงกว่าอีดีแอลซี เนื่องจากซูโดคาปาซิเตอร์เก็บประจุไฟฟ้าเช่น Na^+ และ H^+ ที่พื้นผิวเหมือนกับอีดีแอลซี แล้วยังมีการเก็บประจุ (อิเล็กตรอน) ผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์ภายในวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า โดยกระบวนการนี้คล้ายกับปฏิกิริยารีดอกซ์ของแบตเตอรี่ ดังรูปที่ 2.4 ทำให้มีค่าการเก็บประจุไฟฟ้าสูง [2]



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดชนิด ซูโดคาปาซิเตอร์ [2]

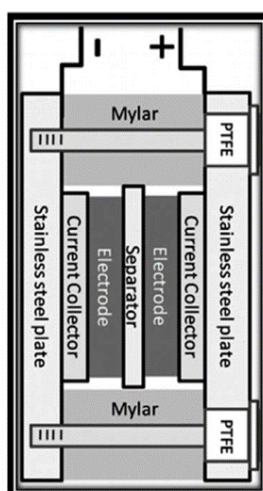
แต่อย่างไรก็ตามตัวเก็บประจุแบบอีดีแอลซี ยังคงมีข้อจำกัดในเรื่องของความสามารถในการกักเก็บพลังงานที่ยังไม่มากพอ แม้ว่าจะมีอายุการใช้งานยาวนาน ในขณะเดียวกันตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบซูโดคาปาซิเตอร์มีอายุงานใช้งานที่สั้น แต่มีความสามารถในการกักเก็บพลังงานได้ดี อัตราและคายประจุได้รวดเร็ว นักวิจัยจึงพยายามที่จะพัฒนาความสามารถในการกักเก็บประจุแบบอีดีแอลซี โดยการนำมาผสมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบซูโดคาปาซิเตอร์ เกิดเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบไฮบริด (Hybrid capacitors) ดังรูปที่ 2.5 [1]



รูปที่ 2.5 ประเภทของตัวเก็บประจุ^[1]

2.1.3 องค์ประกอบของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังรูปที่ 2.6



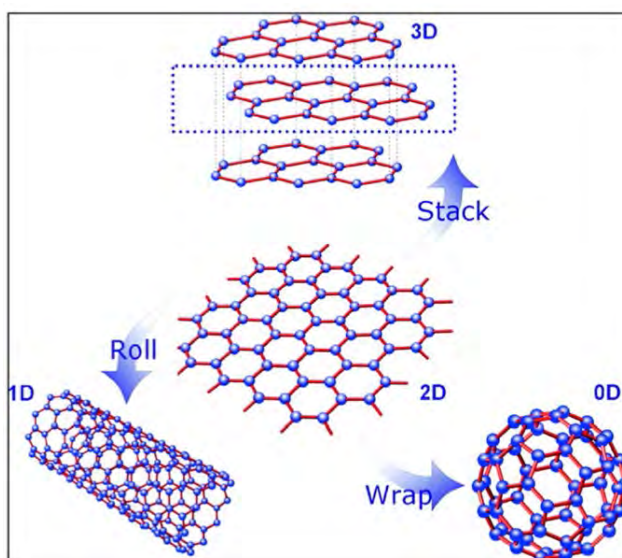
รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด^[2]

1. ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) ที่ทำมาจากวัสดุที่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้สูง เช่น แกรฟีน แมงกานีสออกไซด์ และ พอลิอะนิลีน เป็นต้น
2. ตัวแยกขั้วไฟฟ้า (Separators) ส่วนใหญ่จะต้องดูดซับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ ไม่นำไฟฟ้า เช่น กระดาษใย และพอลิโพรพิลีน เป็นต้น
3. ตัวเก็บกระแส (Current collectors) ต้องนำไฟฟ้าได้ดี ราคาถูก เช่น กราไฟต์ เป็นต้น
4. ฉนวนป้องกันการรั่วซึมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น ไมลาร์ (Mylar) เป็นต้น
5. แผ่นโลหะนำไฟฟ้า หุ้มส่วนประกอบต่าง ๆ ทั้งสาม เช่น เหล็กกล้าไม่เป็นสนิม (Stainless steel) เป็นต้น^[2]

2.2 แกร์ฟีน

แกร์ฟีนประกอบด้วยธาตุคาร์บอนเรียงตัวต่อกันเป็นวงหกเหลี่ยม (hexagonal) ด้วยพันธะโคเวเลนต์ที่มีความแข็งแรงและเชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างลักษณะเหมือนกับรังผึ้ง ทำให้แกร์ฟีนมีความแข็งแรงกว่าเพชรและแข็งแรงกว่าเหล็กกล้า ถึง 200 เท่า โดยแผ่นแกร์ฟีนสามารถรองรับน้ำหนักของข้างหนึ่งตัวที่กดลงบนพื้นที่เท่ากับหัวดินสอขนาดเล็กได้ [3]

ขณะเดียวกันแกร์ฟีนยังนำไฟฟ้าได้ดีกว่าโลหะทองแดงเพราะการส่งผ่านอิเล็กตรอนเป็นไปอย่างรวดเร็วและในทางทฤษฎีแกร์ฟีนที่มีน้ำหนักเพียงแค่ 1 กรัม จะมีพื้นที่ผิวมากถึง 2,360 ตารางเมตร หากนำวัสดุสองมิติอย่างแกร์ฟีนมาต่อกันเป็นชั้น ๆ ก็จะได้วัสดุสามมิติ คือ แกร์ไฟต์ แต่ถ้านำมาม้วนเป็นทรงกระบอกจะได้วัสดุหนึ่งมิติอย่างท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) และถ้าถูกห่อให้เป็นทรงกลม จะได้ฟูลเลอร์ีนหรือที่คุ้นหูกันในชื่อ Buckyball ดังรูปที่ 2.7 [3]

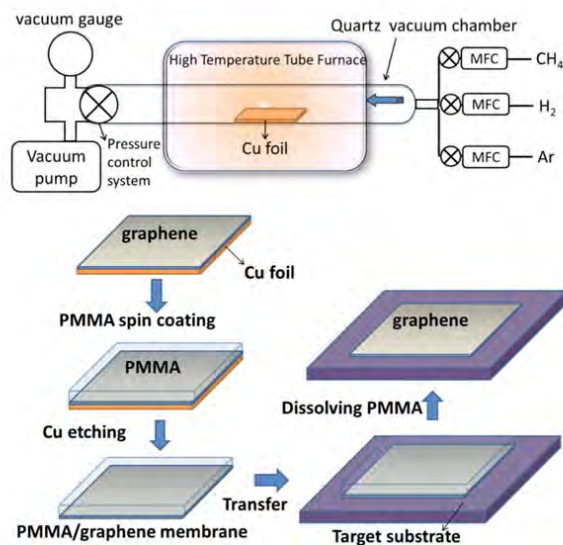


รูปที่ 2.7 ความเชื่อมโยงโครงสร้างของอัญรูปต่าง ๆ ของคาร์บอนผ่านโครงสร้าง 2 มิติของแกร์ฟีน [3]

2.2.1 การสังเคราะห์แกร์ฟีน

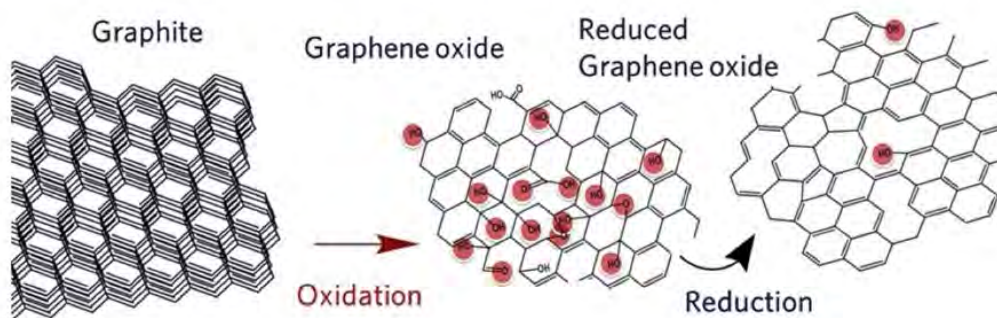
แกร์ฟีนที่ได้จากวิธีการลอกด้วยสก็อตเทปนั้นมีขนาดเล็กและรูปร่างไม่สม่ำเสมอ นักวิทยาศาสตร์จึงพยายามคิดค้นวิธีการผลิตแกร์ฟีนให้มีขนาดใหญ่ขึ้น และมีสมบัติที่ควบคุมได้จากการควบคุมโครงสร้าง การสังเคราะห์ที่นิยมและเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมมี 2 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 การผลิตแกร์ฟีนโดย Chemical Vapor Deposition หรือ CVD เป็นการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนบนแผ่นโลหะ โดยเริ่มต้นจากการปล่อยก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิห้องเข้าไปในเตาเผาที่มีก๊าซไฮโดรเจนอยู่ด้วยเล็กน้อย เมื่อก๊าซมีเทนสัมผัสกับโลหะ เช่น ทองแดงหรือนิกเกิลที่อุณหภูมิสูงระดับ 1000 °C จะเกิดการสลายตัวเหลือเพียงอะตอมของคาร์บอนเกาะอยู่บนแผ่นโลหะ และจัดเรียงโครงสร้างเป็นแกร์ฟีนได้ในภาวะที่เหมาะสม ดังรูปที่ 2.8 ตามหลักการแล้วการกระจายตัวของก๊าซมีเทนและการเกิดโครงสร้างแบบแกร์ฟีนต้องใช้ความร้อนสูงถึง 2500 °C

แต่โลหะทองแดง หรือนิกเกิล มีสมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงทำให้อุณหภูมิที่ใช้ลดลงเป็นอย่างมาก จากนั้นแกรฟีนที่อยู่บนโลหะจะถูกเคลือบผิวด้านบนด้วยโพลิเมอร์ PMMA (Poly(methyl methacrylate)) แล้วกำจัดเอาแผ่นโลหะออกโดยกระบวนการกัดกรด (etching) และทำการเคลื่อนย้ายแผ่นแกรฟีนที่เคลือบด้วย PMMA ไปวางบนวัสดุหรืองานที่ต้องการตามด้วยการละลายเอา PMMA ออกในที่สุด แกรฟีนที่ผลิตขึ้นโดยเทคนิค CVD นี้ เป็นแกรฟีนที่มีคุณภาพสูง สามารถควบคุมจำนวนชั้นของแกรฟีนได้และมีการนำไฟฟ้าที่ดีจึงเหมาะสมอย่างยิ่งกับการนำไปใช้ในงานด้านอิเล็กทรอนิกส์ [3]



รูปที่ 2.8 แผนภาพจำลองการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยเทคนิค CVD และขั้นตอนการเคลื่อนย้ายแกรฟีนที่สังเคราะห์ได้ [3]

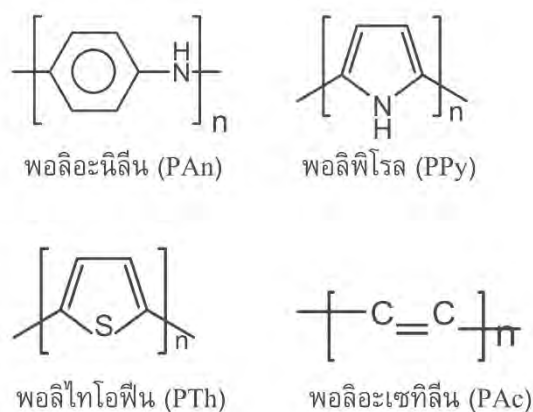
วิธีที่ 2 การผลิตแกรฟีนโดยกระบวนการทางเคมี เริ่มจากการออกไซด์แกรไฟต์เพื่อให้เกิดหมู่ฟังก์ชันที่ไปกั้นระหว่างชั้นของแกรไฟต์ให้ห่างออกจากกัน (exfoliation) และเรียกผลผลิตที่ได้ว่า แกรไฟต์ออกไซด์ หรือ แกรฟีนออกไซด์ขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ (แกรฟีนออกไซด์ 1 ชั้นมีความหนาประมาณ 0.9 นาโนเมตรเท่านั้น) จากนั้นทำปฏิกิริยารีดักชันเพื่อลดจำนวนหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนลง ดังรูปที่ 2.9 และเพิ่มประสิทธิภาพการนำไปวางบนวัสดุไฟฟ้าให้มากขึ้นด้วย ซึ่งวิธีการนี้มีข้อดีคือ สามารถผลิตแกรฟีนได้ในจำนวนมาก ๆ และต้นทุนต่ำกว่าวิธีแรกมาก แม้แกรฟีนที่ได้จะมีสมบัติหรือคุณภาพที่ด้อยกว่าก็ตาม แต่ก็ยังมีประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี เช่น การนำไปใช้ในวัสดุคอมโพสิตเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับวัสดุ [3]



รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์ และแกรฟีนออกไซด์ก่อนและหลังปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งแสดงจำนวนหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนที่ลดลง^[3]

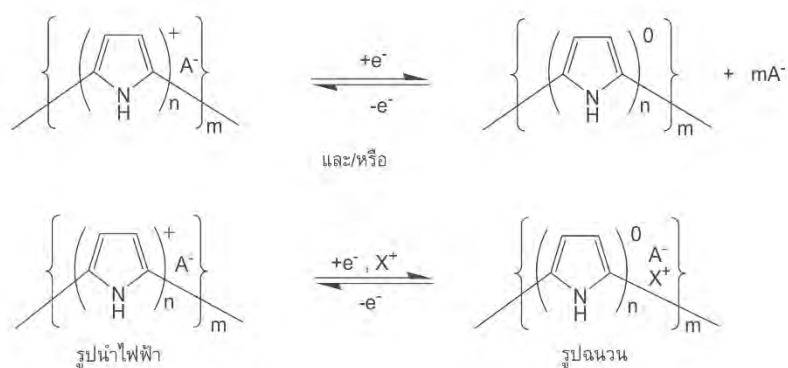
2.3 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า

พอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีโครงสร้างทางเคมีแบบไพ-คอนจูเกต (π -conjugated Polymer) ที่สายโซ่ประกอบด้วยพันธะเดี่ยวสลับกับพันธะคู่ การทำให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าได้หรือที่เรียกว่า “การโด๊ป” (Doping Process) อาศัยปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation - Reduction Reaction) หรือปฏิกิริยาการเติมโปรตอน (Protonation) ขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีการศึกษากันมาก ได้แก่ พอลิอะนิลีน (Polyaniline, PAn) พอลิพิโรล (Polypyrrole, PPy) พอลิไทโอเฟน (Polythiophene, PTh) และพอลิอะเซทิลีน (Polyacetylene, PAc) ซึ่งมีโครงสร้างทางเคมี ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าบางชนิด (ในรูปที่ยังไม่ได้โด๊ป)^[4]

การโด๊ปทำให้พอลิเมอร์เหล่านี้ซึ่งเดิมเป็นฉนวนไฟฟ้าหรือกึ่งตัวนำที่มีค่าการนำไฟฟ้าในช่วง 10^{-10} ถึง $10^{-5} \text{ S.cm}^{-1}$ เปลี่ยนเป็นวัสดุเหมือนโลหะที่มีค่าการนำไฟฟ้าในช่วง $1-10^4 \text{ S.cm}^{-1}$ ได้ ทั้งนี้ค่าการนำไฟฟ้าขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์ วิธีการสังเคราะห์ และชนิดของสารโด๊ป (เช่น พอลิอะเซทิลีนจะมีค่าการนำไฟฟ้าเทียบเท่ากับทองแดงได้ คือ $>10^5 \text{ S.cm}^{-1}$ เมื่อโด๊ปด้วยไอโอดีน (I_2) หรืออะซีนิกโทรฟลูออไรด์ (AsF_3)) นอกจากนี้ ระดับหรือองศาของการโด๊ป (Degree of Doping) ซึ่งสัมพันธ์กับค่าการนำไฟฟ้ายังสามารถควบคุมได้อีกด้วย และที่สำคัญคือสภาพตัวนำและฉนวนไฟฟ้าของพอลิเมอร์สามารถผันกลับได้ ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การผันกลับได้ของกระบวนการโด๊ปพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ตัวอย่างคือพอลิไพโรล (PPy)

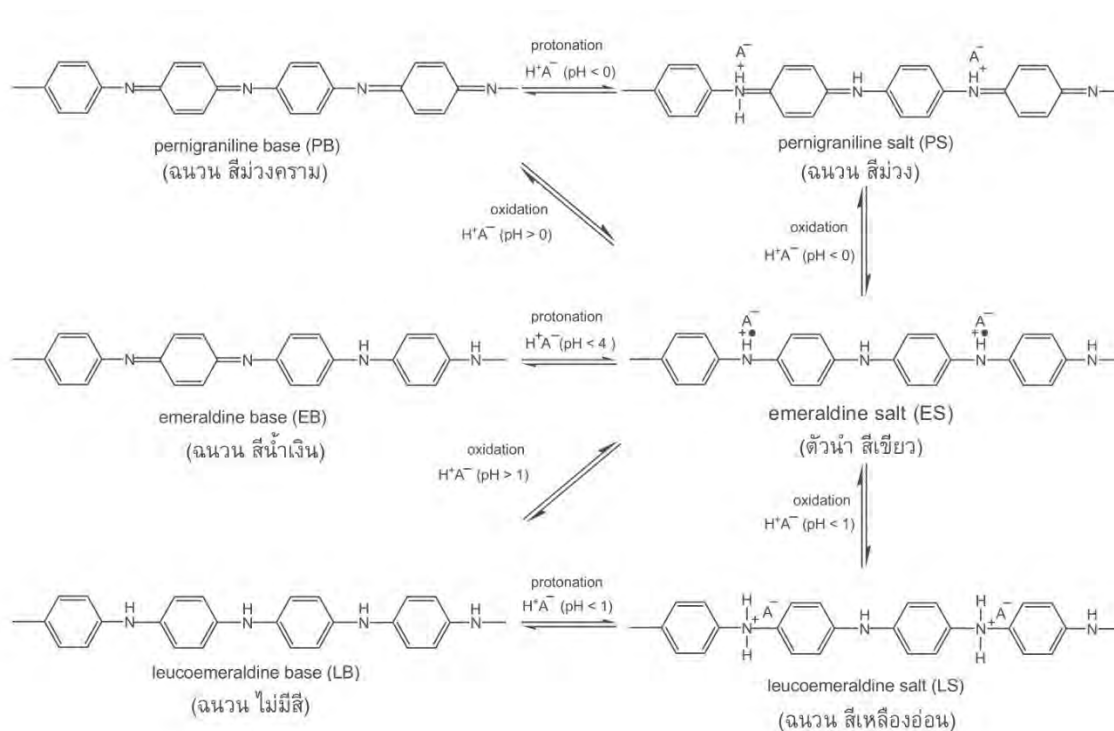
(A⁻ คือแอนไอออนของสารโด๊ป X⁺ คือแคทไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์)^[4]

กล่าวคือการโด๊ปและการดีโด๊ป (Doping-dedoping) สามารถเกิดขึ้นได้ไม่จำกัด จึงมีสมบัติเป็นสวิตช์ (Switching Property) นอกจากนี้ในกระบวนการโด๊ปและดีโด๊ป ซึ่งมีการเข้าออกของสารโด๊ปในโครงสร้างของพอลิเมอร์ นอกจากจะเกิดสภาพตัวนำและฉนวนแล้ว ยังมักทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติอื่นด้วย เช่น สี และปริมาตร ทำให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าจัดเป็นวัสดุแอคทีฟ (Active Materials) ด้วยเหตุผลต่าง ๆ เหล่านี้ทำให้พอลิเมอร์ นำไฟฟ้าเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจมากทั้งในด้านเคมี ฟิสิกส์ วัสดุศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ และมีการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง อาทิเช่น ด้านการแพทย์ (เช่น การนำพายาเข้าสู่เป้าหมาย (Drug Delivery) และอวัยวะเทียม) ด้านเคมี (เช่น การตรวจวัดสารเคมีหรือเซนเซอร์ การแยกสาร อิแนนซีโอเมอร์ การแยกธาตุ และการวิเคราะห์สาร) ด้านสิ่งแวดล้อม (เช่น ตรวจวัดสารมลพิษ) ด้านพลังงาน (เช่น แบตเตอรี่เซลล์เชื้อเพลิง) และด้านอุตสาหกรรม (เช่น การป้องกันการกัดกร่อน การป้องกันรังสีรบกวน การป้องกันไฟฟ้าสถิต) เป็นต้น พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ถูกนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุด ได้แก่ PAn, PPy และ PTh เนื่องจากมีค่าการนำไฟฟ้าในช่วงที่ใช้ประโยชน์ได้ และมีความเสถียร^[4]

2.4 พอลิอะนิลีน

พอลิอะนิลีน (PANi) นับเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีการศึกษาและการนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุดชนิดหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากมีคุณสมบัติเด่นคือสังเคราะห์ได้ง่ายทั้งวิธีทางเคมีและเคมีไฟฟ้า ราคาถูก ทนต่อสภาพแวดล้อมได้ดี และมีลักษณะเฉพาะที่พิเศษ คือ มีโครงสร้างทางเคมีที่หลากหลายถึง 6 แบบ ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์และปฏิกิริยากรด-เบส ดังรูปที่ 2.12 แต่โครงสร้างที่นำไฟฟ้าได้มีเพียงแบบเดียวเท่านั้น คือเกลือเอมเมอร์ลดีน (Emeraldine Salt, ES) ดังนั้นการโด๊ปจึงเกิดได้ทั้งจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของลูโคเอมเมอร์ลดีน (Leucoemeraldine) และการเติมโปรตอนให้กับเบสเอมเมอร์ลดีน (Emeraldine Base, EB) ด้วยการทำปฏิกิริยากับกรดประเภทโปรโทนิค (Protonic Acid) จึงกล่าวได้ว่า พอลิอะนิลีนมีสมบัติทั้งรีดอกซ์สวิตช์และพีเอชสวิตช์ (Redox Switching and pH Switching) นอกจากนี้โครงสร้างที่แตกต่างกันยังส่งผลทำให้เกิดสีที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนอีกด้วย เช่น เกลือเอมเมอร์ลดีน (ES) สีเขียว เบสเอมเมอร์ลดีน (EB) สีนํ้าเงิน

ลูโคเอมเมอร์ลิตินสีเหลืองอ่อน และเพอร์นิกรานิลินสีม่วง ทำให้มีการนำพอลิอะนิลีนไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มากมาย [4]

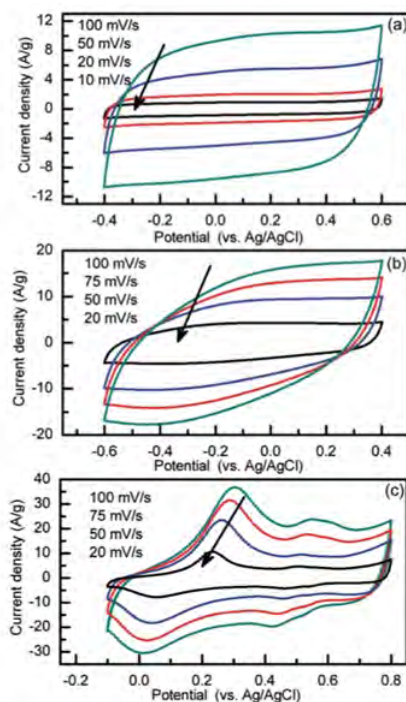


รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของพอลิอะนิลีนแบบต่าง ๆ สมบัติทางไฟฟ้า สี การเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์และปฏิกิริยากรด-เบส [4]

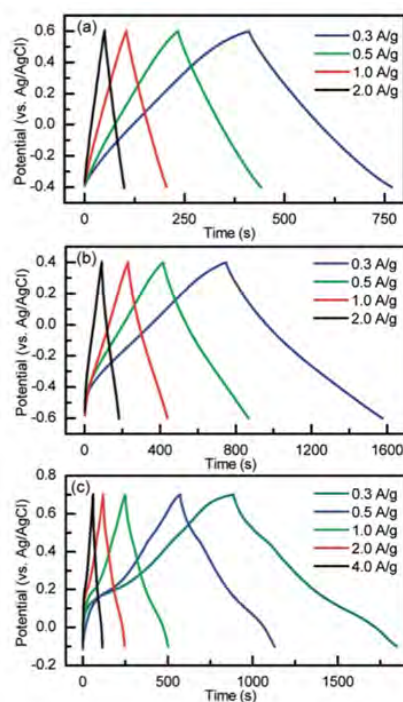
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของ J. Zhang และ X. Zhao [5] ได้ศึกษาการเคลือบพอลิเมอร์นำไฟฟ้า โดยตรงลงบนแผ่นแกรฟีนออกไซด์ (Reduce graphene oxide sheets) ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดที่มีประสิทธิภาพสูง โดยในงานการวิจัยนี้ได้มีการใช้พอลิเมอร์ poly(3,4- ethylenedioxythiophene) (PEDOT), polyaniline (PANi) และ polypyrrole (PPy) นำมาเคลือบโดยตรงบนพื้นผิวของแผ่นแกรฟีนออกไซด์ (RGO) ด้วยกระบวนการ in-situ polymerization ซึ่งเป็นกระบวนการที่เตรียมวัสดุนาโนคอมโพสิตของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า และ RGO ด้วยการใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาการเคลือบพอลิเมอร์นำไฟฟ้า PEDOT, PANi และ PPy โดยตรงบนแผ่น RGO พบว่ากระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ง่ายและมีประสิทธิภาพในการเตรียมนาโนคอมโพสิตของ RGO และพบว่าเอทานอลมีความสำคัญในการเคลือบผิวลงบนแผ่น RGO คุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ สามารถตรวจสอบโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ดังรูปที่ 2.13 และเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ ดังรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการเก็บประจุ ที่ดีกว่าของวัสดุนาโนคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า และ RGO พบว่าค่าการเก็บประจุ (specific capacitance) ของ RGO-PANi นั้นวัดค่าได้สูงถึง 361 F/g ที่ความหนาแน่น

กระแส (current density) 0.3 A/g ซึ่งมีความมากกว่าเมื่อเทียบกับ RGO-PPy และ RGO-PEDOT ที่วัดค่าการเก็บประจุได้ 248 และ 108 F/g ตามลำดับ ที่ความหนาแน่นกระแสเดียวกัน ดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.13 กราฟแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตริกซ์ของ (a) RGO-PEDOT, (b) RGO-PPy และ (c) RGO-PANi [5]

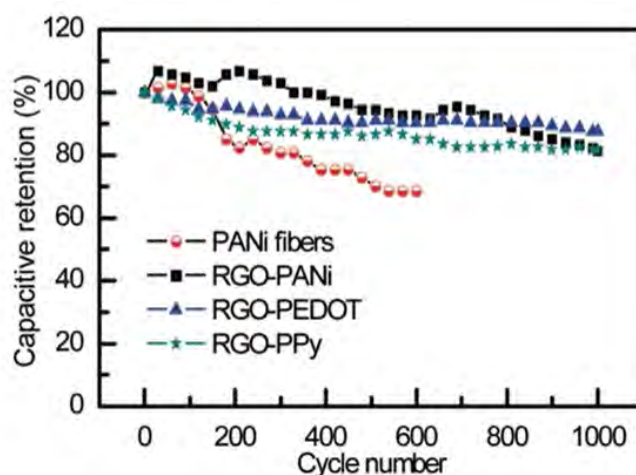


รูปที่ 2.14 กราฟแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ ของ (a) RGO-PEDOT, (b) RGO-PPy และ (c) RGO-PANi ที่ความหนาแน่นกระแสแตกต่างกัน [5]

ตารางที่ 2.1 ค่าการเก็บประจุ (specific capacitances) ของ RGO-PEDOT, RGO-PPy, และ RGO-PANi ที่ความหนาแน่นกระแส (current density) แตกต่างกัน ^[5]

samples	specific capacitance (F/g)			
	0.3 A/g	0.5 A/g	1.0 A/g	2.0 A/g
RGO-PEDOT	108	104	102	99
RGO-PPy	249	229	204	189
RGO-PANi	361	349	323	305

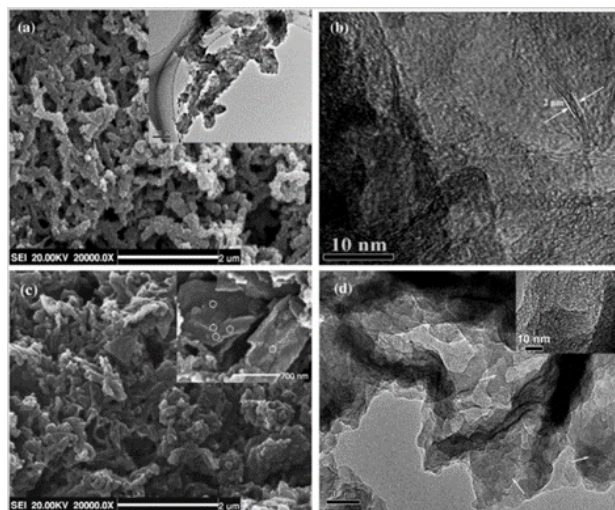
และจะเห็นได้ว่ามากกว่า 80% ของความจุเริ่มต้นที่เก็บรักษาไว้หลังจาก 1,000 รอบ ดังรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นถึงสมบัติทางเคมีไฟฟ้าที่ดีของอิเล็กโทรดคอมโพสิต และค่าความจุไฟฟ้า (capacitive) ที่มีประสิทธิภาพที่ดีของวัสดุคอมโพสิตระหว่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า และ RGO นั้นมีส่วนช่วยในการทำงานร่วมกันของทั้งสององค์ประกอบ



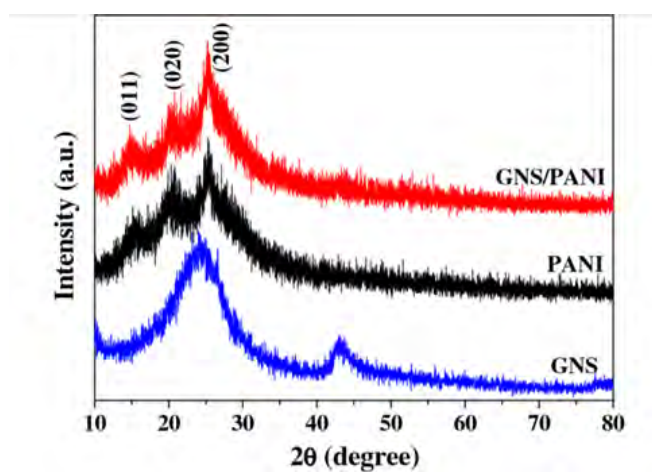
รูปที่ 2.15 สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของ PANi fibers, RGO-PANi, RGO-PEDOT, และ RGO-PPy ^[5]

จากงานวิจัยของ J. Yan และคณะ ^[6] ได้ศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตของแผ่นนาโนแกรฟีน (GNS) กับพอลิอะนิลีน (PANI) ที่ถูกสังเคราะห์โดยใช้กระบวนการ in-situ polymerization โดยลักษณะทางสัณฐานวิทยา และโครงสร้างระดับจุลภาคของตัวอย่างถูกตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ดังรูปที่ 2.16 เครื่อง X-ray diffraction (XRD) ดังรูปที่ 2.17 และเทคนิค Raman spectroscopy ดังรูปที่ 2.18 สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของวัสดุคอมโพสิตนี้ถูกบ่งบอกด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี และเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ โดย GNS เป็นวัสดุช่วยให้การก่อตัวของ พอลิอะนิลีน (PANI) ได้ดีขึ้น รวมถึงจะเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนกันอย่างหนาแน่น แผ่นนาโนแกรฟีนจะถูกเคลือบบนพื้นผิวทั้งสองด้วยอนุภาคนาโนของพอลิอะนิลีน ทำให้วัสดุนี้มีค่าการเก็บประจุ (specific capacitance) สูงถึง 1046 F/g ซึ่งมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับ pure PANI ที่มีค่าการเก็บประจุ 115

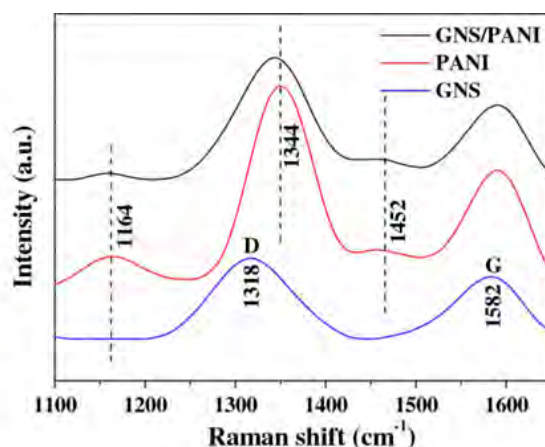
F/g และนอกจากนี้ยังพบว่าความหนาแน่นของพลังงาน (energy density) ของ GNS/PANI composite มีค่าเท่ากับ 39 Wh/kg โดยที่ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (power density) มีค่าเท่ากับ 70 kW/kg ^[6]



รูปที่ 2.16 (a) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ pure PANI, (b) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของ GNS, (c) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ GNS และ (d) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของวัสดุคอมโพสิต GNS/PANI ^[6]

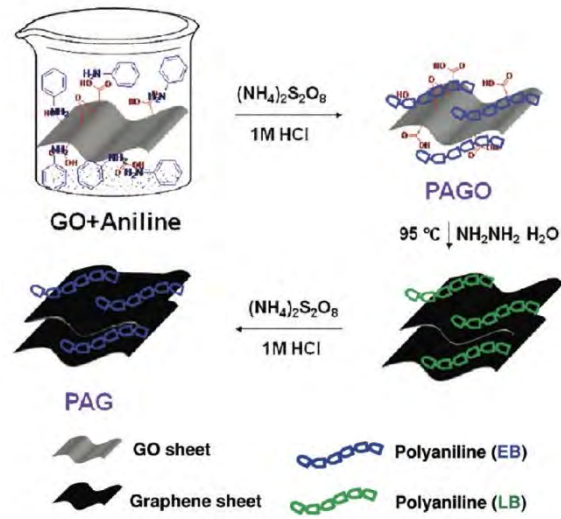


รูปที่ 2.17 กราฟแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) ของแกรฟีน (GNS), พอลิอะนิลีน (pure PANI) และวัสดุคอมโพสิตของ GNS/PANI ^[6]

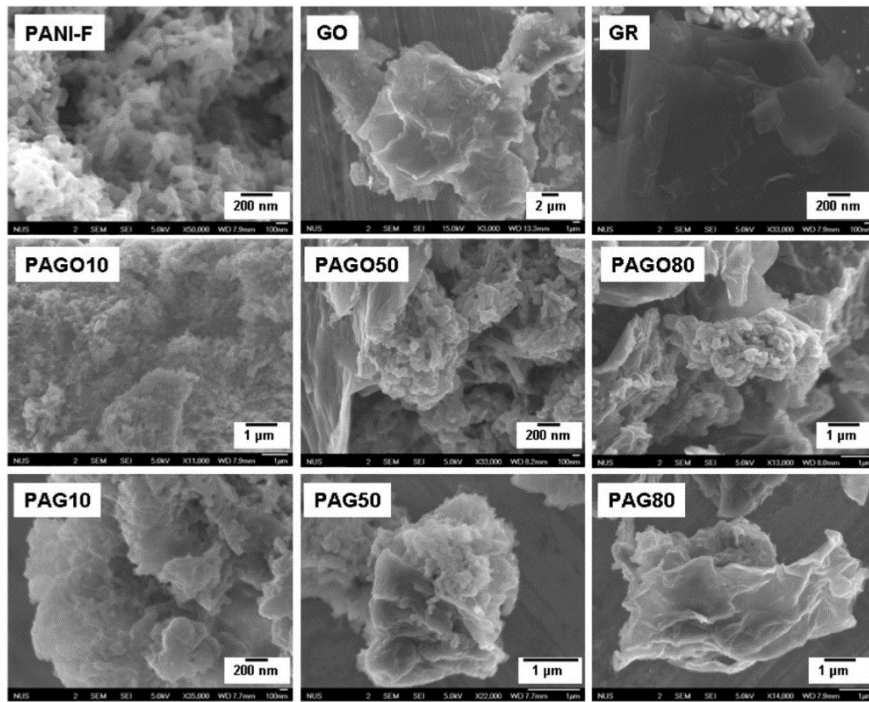


รูปที่ 2.18 กราฟแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Raman spectroscopy ของแกรฟีน (GNS), พอลิอะนิลีน (pure PANI) และวัสดุคอมโพสิตของ GNS/PANI [6]

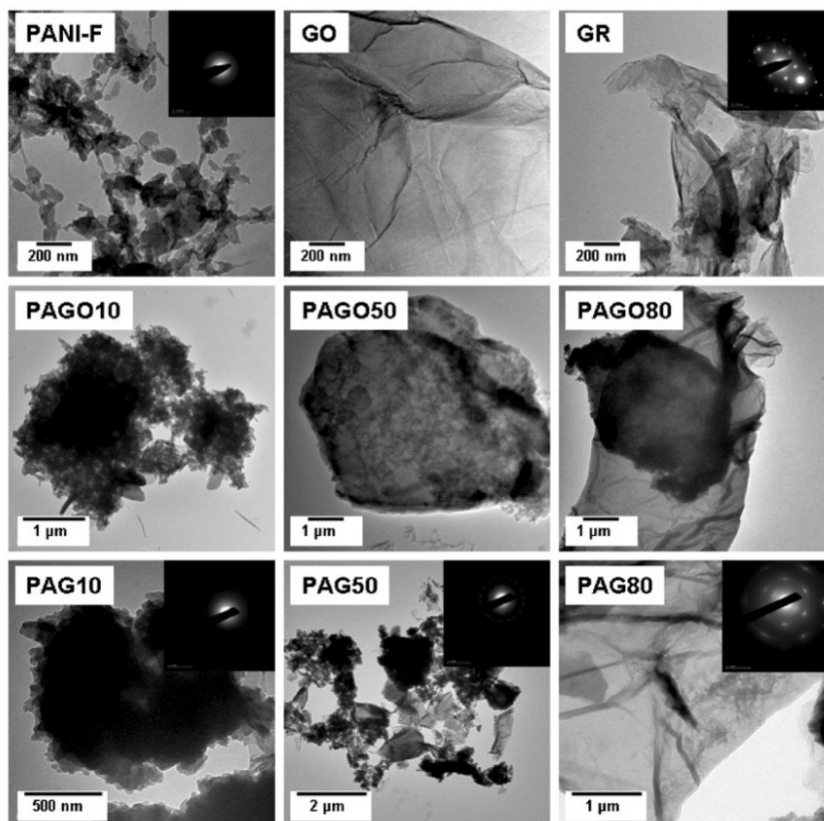
จากงานวิจัยของ K. Zhang และคณะ [7] ศึกษาการเตรียมวัสดุคอมโพสิตของแกรฟีนที่ได้รับการดัดแปลงทางเคมีกับเส้นใยนาโนพอลิอะนิลีน (PANI) โดยสังเคราะห์ด้วยกระบวนการ in-situ polymerization จากอะนิลีนมอนอเมอร์ในแกรฟีนออกไซด์ ภายใต้สภาวะกรด ได้วัสดุคอมโพสิตแกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนที่อัตราส่วนมวลต่างกัน โดยนำแกรฟีนออกไซด์มารีดิซ์ด้วยไฮดราซีน และนำมาทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและโปรโตเนชันอีกครั้งร่วมกับการรีดิซ์ PANI ได้วัสดุคอมโพสิตแกรฟีน/พอลิอะนิลีน ดังรูปที่ 2.19 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา องค์ประกอบ และโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุคอมโพสิตที่ร่วมกับ pure polyaniline fibers (PANI-F), graphene oxide (GO), และ graphene (GR) ถูกศึกษาด้วย X-ray diffraction (XRD), solid-state ^{13}C NMR, Fourier Transform Infrared Spectrometry (FT-IR), Scanning Electron Microscope (SEM) ดังรูปที่ 2.20, Transmission Electron Microscope (TEM) ดังรูปที่ 2.21, Thermogravimetric analysis (TGA), และ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) พบว่า แกรฟีนที่ได้รับการดัดแปลงทางเคมีกับเส้นใยนาโนพอลิอะนิลีน (PANI) เกิดเป็นวัสดุนาโนคอมโพสิตกับเส้นใยพอลิอะนิลีน (PANI) ที่ดูดซับไอน้ำ บนพื้นผิวของแกรฟีนและ/หรือเติมเต็มระหว่างแผ่นแกรฟีน โครงสร้างที่ได้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูง ส่งผลให้มีค่าความจุไฟฟ้า (specific capacitance) ที่สูง และมีเสถียรภาพทางสมบัติทางเคมีไฟฟ้าที่ดีระหว่างการอัดและคายประจุเมื่อใช้งานเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากการวิจัยที่วัดด้วยโดยด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี และเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ คือ 480 F/g ที่ 0.1 A/g จากอัตราส่วนพอลิอะนิลีน/แกรฟีน คือ 20:80 (PAG80) ดังรูปที่ 2.22 และรูปที่ 2.23 งานวิจัยนี้พิสูจน์ว่าค่าความจุไฟฟ้าสูง และการมีเสถียรภาพทางสมบัติทางเคมีไฟฟ้าที่ดี สามารถเกิดได้จากการผสมระหว่างแกรฟีนที่ได้รับการดัดแปลงทางเคมีกับพอลิอะนิลีน (PANI)



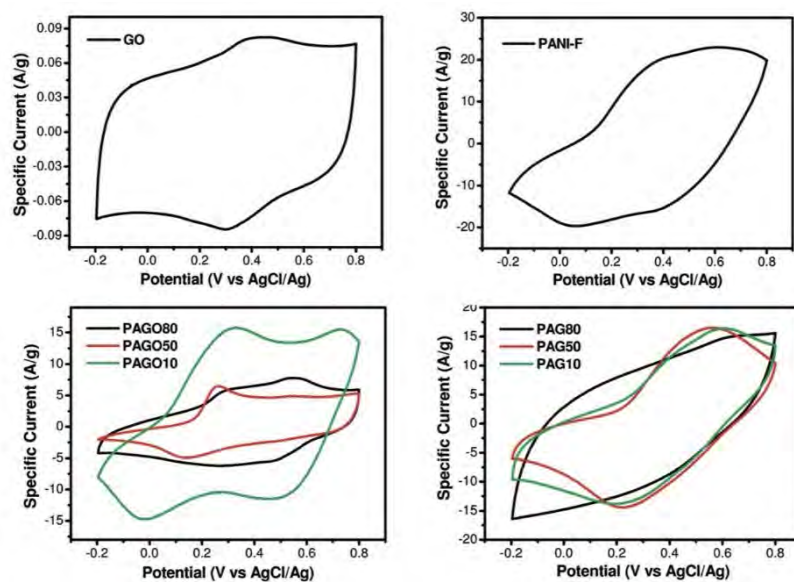
รูปที่ 2.19 กระบวนการเตรียมวัสดุคอมโพสิตแกรฟีน/พอลิอะนิลีน [7]



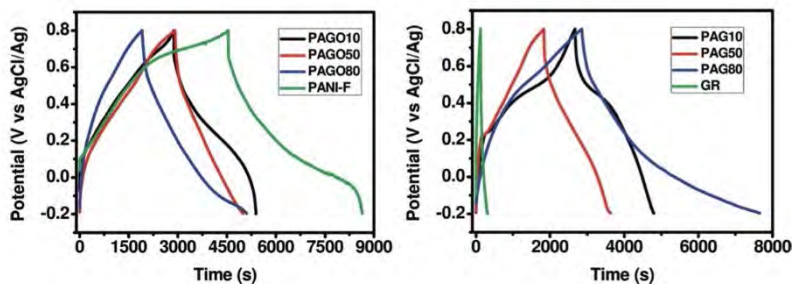
รูปที่ 2.20 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ PANI-F, GO, GR, PAGO10, PAGO50, PAGO80, PAG10, PAG50, PAG80 [7]



รูปที่ 2.21 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM) ของ PANI-F, GO, GR, PAGO10, PAGO50, PAGO80, PAG10, PAG50, PAG80 [7]

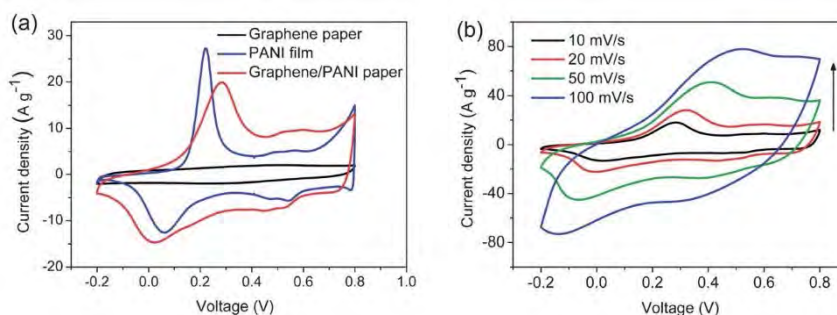


รูปที่ 2.22 Cyclic voltammograms ใน 2M H_2SO_4 โดยใช้คอมโพสิตอิเล็กโทรดแบบคาร์บอนชนิดเคลือบแก้วที่ต่างกัน, แผ่น Pt เป็นแคโทดอิเล็กโทรด และ AgCl/Ag เป็นอิเล็กโทรดอ้างอิง อัตราการสแกนคือ 100 mV/s [7]



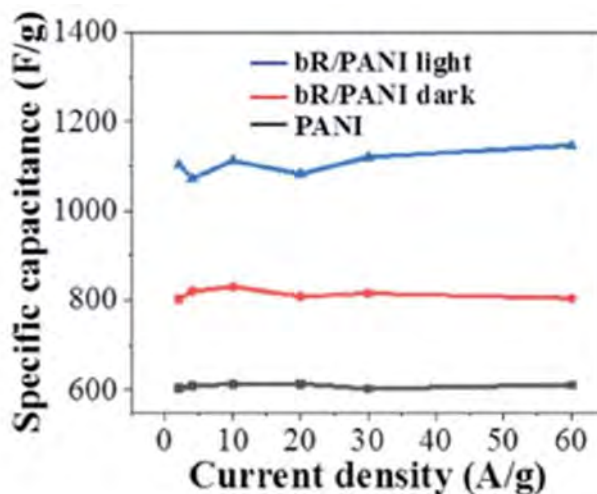
รูปที่ 2.23 กราฟการอัดและคายประจุของอิเล็กโทรดคอมโพสิตที่แตกต่างกัน ที่ความหนาแน่นกระแส 0.1 A/g ^[7]

จากงานวิจัยของ H. Cong และคณะ ^[8] ได้ศึกษาเกี่ยวกับกระดาษคอมโพสิตระหว่างกระดาษแกรฟีนและฟิล์มพอลิอะนิลีน (PANI) ที่สังเคราะห์ด้วยกระบวนการ in-situ polymerization กระดาษแกรฟีน/พอลิอะนิลีนเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดที่ให้ค่าความจุไฟฟ้าสูงกว่า และมีเสถียรภาพทางสมบัติทางเคมีไฟฟ้าที่ดีกว่ากระดาษแกรฟีนหรือฟิล์มพอลิอะนิลีนเพียงอย่างเดียว ดังรูปที่ 2.24 กระดาษแกรฟีน/พอลิอะนิลีนที่ยัดหยุ่นนี้ มีข้อดี คือ ราคาไม่สูง ง่ายต่อการใช้งานในอุปกรณ์ทั้งขนาดใหญ่และเล็ก สามารถเตรียมได้ง่าย และมีความจุที่ดี



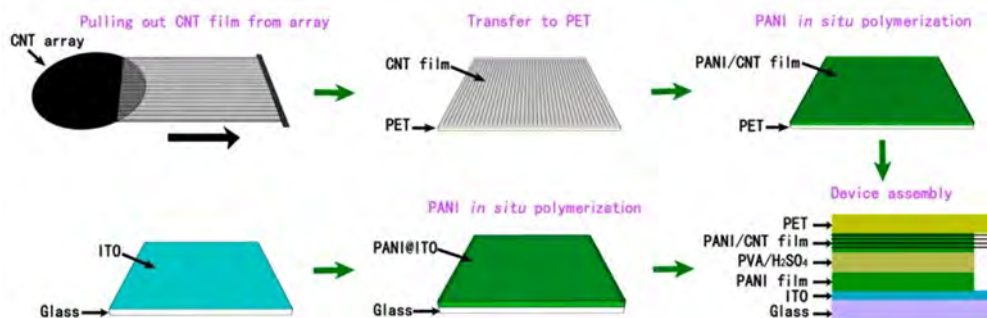
รูปที่ 2.24 (a) กราฟ CV ของกระดาษแกรฟีน, ฟิล์มพอลิอะนิลีน บนอิเล็กโทรด Pt และกระดาษแกรฟีน/พอลิอะนิลีนที่ 10 mV/s ใน 1M H₂SO₄ ในช่วง potential จาก 0.2 ถึง 0.8 V (b) กราฟ CV ของกระดาษแกรฟีน/พอลิอะนิลีน ที่อัตราการสแกนต่าง ๆ ^[8]

จากงานวิจัยของ H. Li และคณะ ^[9] ได้ศึกษาเกี่ยวกับ Bacteriorhodopsin (bR) ซึ่งเป็นโปรตีนที่สามารถขนส่งโปรตอนเพื่อเปลี่ยนแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าเคมี สำหรับใช้ในตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด โดยการนำ bR-monolayers เคลือบบน (PANI)-nanofilm ที่ได้จากการสังเคราะห์ทางไฟฟ้าเคมี บนขั้วอิเล็กโทรด Au (PANI)-nanofilm ที่เตรียมได้แสดงคุณสมบัติและประสิทธิภาพที่ดีจากการถูกกระตุ้นของโปรตอน เนื่องจากการทำงานร่วมกันระหว่างโปรตอนที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ bR เมื่อนำ bR/PANI/Au-electrode มาทดสอบค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ ที่ความหนาแน่นกระแส 60 A g⁻¹ พบได้ค่าความจุจำเพาะสูงถึง 1146 F g⁻¹ หลังจากการฉายรังสีด้วยแสง 550 nm แต่เมื่อทดสอบภายใต้สภาวะที่ไม่มีการฉายรังสีด้วยแสงได้ค่าความจุจำเพาะเท่ากับ 804 F g⁻¹ ดังรูปที่ 2.25

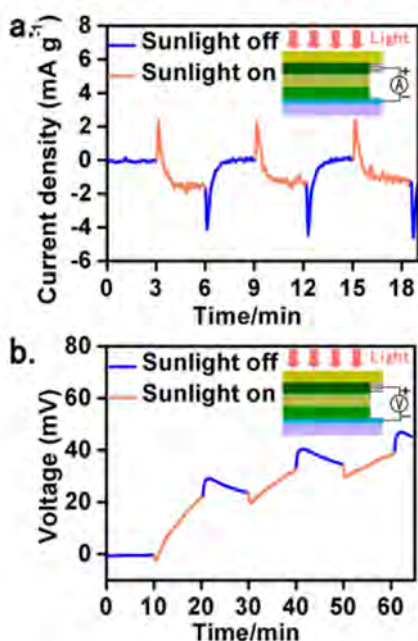


รูปที่ 2.25 กราฟแสดงค่าที่แตกต่างกันของค่าความจุไฟฟ้าและความหนาแน่นกระแส bR/PANI-electrode ภายใต้สภาวะมีแสงและไม่มีแสง^[9]

จากงานวิจัยของ Y. Yin และคณะ^[10] ได้ศึกษาการเตรียมตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดแบบโปร่งใส (Transparent supercapacitor) ที่มีชั้นโพลีเอทิลีนและโครงสร้างแบบคาปาซิทีฟรวมอยู่ในอุปกรณ์เดียว อุปกรณ์นี้มีความสามารถในการชาร์จไฟภายใต้สภาวะมีแสง และยังสามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าที่สร้างขึ้นได้ภายในตัวมันเอง โดยอิเล็กโทรดเหล่านี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วนที่แยกออกจากกันดังรูปที่ 2.26 และสามารถทำให้แข็งตัวด้วยสารละลายเจลอิเล็กโทรไลต์พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ในกรดซัลฟูริก (PVA/H₂SO₄) ซึ่งส่วนแรกประกอบไปด้วยชั้นของพอลิอะนิลีน (PANI) ที่มีลักษณะเป็นฟิล์มบางบน ITO glass และส่วนที่สองประกอบไปด้วยชั้นคอมโพสิตระหว่างพอลิอะนิลีนและท่อคาร์บอน (PANI/CNT) ด้วยกระบวนการ in-situ polymerization บนของพื้นผิว Polyethylene terephthalate (PET) และเมื่อนำไปทดสอบสมบัติการชาร์จไฟภายใต้สภาวะที่มีแสง ที่กำลังความหนาแน่น (Power density) 1000 W m⁻² วัดค่ากระแสไฟฟ้าเมื่อลัดวงจร และค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดวงจร ดังรูปที่ 2.27 (a) ค่าความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อลัดวงจร จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสง มีความสามารถในการย้อนกลับได้ดีในรอบที่ทดสอบ ซึ่งบ่งบอกถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่คงที่สำหรับรอบที่ยาวนาน และดังรูปที่ 2.27 (b) ค่าแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นในสภาวะที่มีแสงและคงที่เมื่อไม่มีแสง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์นี้สามารถชาร์จกระแสไฟที่สร้างขึ้นภายใต้การส่องสว่าง และสามารถเก็บแรงดันไฟฟ้าที่ได้เมื่อทำการปิดไฟส่องสว่าง



รูปที่ 2.26 กระบวนการเตรียมอิเล็กโทรดและโครงสร้างของอิเล็กโทรด [10]



รูปที่ 2.27 กราฟแสดงการชาร์จด้วยแสงของอุปกรณ์โดยไม่มีแรงดันไบอัสจากภายนอกของ (a) ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้เมื่อลัดวงจร (b) ค่าแรงดันไฟฟ้าเมื่อเปิดวงจร ที่ AM 1.5 solar กำลังความหนาแน่น 1000 W m^{-2} ภายใต้การปิดและเปิดไฟส่องสว่าง [10]

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าพอลิอะนิลีนเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ ซึ่งพบว่าการใช้พอลิอะนิลีนเพียงอย่างเดียวไม่สามารถให้ค่าความจุไฟฟ้าที่สูงเพียงพอต่อความต้องการ จึงได้มีการนำรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้จากการส่งผ่านของอิเล็กตรอนมาคอมโพสิตกับพอลิอะนิลีนช่วยทำให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดมีค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้น มีเสถียรภาพทางเคมีไฟฟ้าที่ดีขึ้น และเพิ่มคุณสมบัติการกักเก็บประจุ นอกจากนี้งานวิจัยได้กล่าวไว้ว่าภายใต้สภาวะที่มีแสง ส่งผลให้ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะที่ไม่มีแสง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจที่จะศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้าของพอลิอะนิลีนและสารเชิงประกอบรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน ด้วยวิธีอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้วิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี รวมถึงหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของแกรฟีนออกไซด์ในการขึ้นรูปสารเชิงประกอบรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงานของขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน สารเชิงประกอบ

รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสง UV เพื่อใช้งานเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด
เชิงแสงที่มีสมบัติทางไฟฟ้าเคมีที่ดีขึ้น

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 1) แกรไฟต์ (Graphite)
- 2) กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4)
- 3) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate, $KMnO_4$)
- 4) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2)
- 5) โซเดียมไนเตรต (Sodium nitrate, $NaNO_3$)
- 6) ไทโอยูเรีย (Thiourea, $SC(NH_2)_2$)
- 7) อะนิลีนมอนอเมอร์ (Aniline monomer, $C_6H_5NH_2$)
- 8) กระจก FTO (Fluorine-doped tin oxide glass, FTO glass)
- 9) โพแทสเซียมโบรไมด์ (Potassium Bromide, KBr)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องกวนสารแบบให้ความร้อน (Hot plate stirrer)
- 2) เครื่องชั่งดิจิทัล (Digital balance)
- 3) เครื่องอัลตราโซนิก (Ultrasonic bath)
- 4) เครื่องปั่นเหวี่ยง (Centrifuged machine)
- 5) ตู้อบความร้อน (Oven)
- 6) ขวดก้นกลม (Round bottom)
- 7) ปีกเกอร์ (Beaker)
- 8) บิวเรต (Burette)
- 9) ปิเปต (Pipette)
- 10) กระจกตวง (Cylinder)
- 11) หลอดยูวี (UV light bulb)

3.2.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- 1) เครื่องวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)
- 2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
- 3) เครื่องโพเทนชิโอสแตท (Potentiostat) สำหรับทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้า ได้แก่ galvanostatic charge-discharge curve (GCD) และ cyclic voltammetry (CV)

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 สังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์

3.3.1.1 การเตรียมแกรไฟต์ออกไซด์

แกรไฟต์ออกไซด์ถูกเตรียมด้วยวิธีของฮัมเมอร์ (Hummers' method) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาออกซิเดชันโดยการนำผงแกรไฟต์ 10 กรัม โซเดียมไนเตรท 5 กรัม และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 250 มิลลิลิตร ผสมรวมกันภายใต้แรงกวน โดยควบคุมอุณหภูมิให้ต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียสในอ่างน้ำแข็ง จากนั้นค่อย ๆ เติมน้ำโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตจำนวน 30 กรัมอย่างช้า ๆ กวนต่อเป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วจึงนำออกจากอ่างน้ำแข็ง เพิ่มอุณหภูมิจนถึง 30 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไปอีก 30 นาที จากนั้นหยุดปฏิกิริยาโดยเติมน้ำปราศจากไอออนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาตร 1500 และ 10 มิลลิลิตร ตามลำดับ ทิ้งให้ตกตะกอน 1 คืน ล้างและปรับ pH ให้เป็นกลางด้วยน้ำปราศจากไอออน บั่นเหียงเพื่อแยกตะกอนและทำให้แห้งด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จนกระทั่งได้แกรไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide)

3.3.1.2 การเตรียมแกรฟีนออกไซด์

นำแกรไฟต์ออกไซด์ ที่ได้จากขั้น 3.3.1.1 จำนวน 1 กรัม มากระจายในน้ำปราศจากไอออน 500 มิลลิลิตร ด้วยคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic) ที่ความถี่ 50 เฮอร์ตซ์ด้วยเครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนกระทั่งได้แกรฟีนออกไซด์ (Graphene oxide)

3.3.2 การขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าตัวเก็บประจุพอลิอะนิลีนด้วยวิธีการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้า

- 1) เตรียมสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ที่มีสารละลายอะนิลีนมอนอเมอร์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์
- 2) ขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าตัวเก็บประจุพอลิอะนิลีน ด้วยวิธีการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้าโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรีด้วยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat พร้อมทั้งใช้โปรแกรม GPES โดยใช้ FTO glass เป็นขั้วทำงาน แพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าตรงข้าม และซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง กำหนดพารามิเตอร์ของเทคนิค CV ดังต่อไปนี้

- Start potential (V)	: -0.5
- First vertex potential (V)	: -0.5
- Second vertex potential (V)	: 1.5
- Scan rate (mV/s)	: 50
- Number of scans	: 2, 5, 7, 10, 12

3.3.3 การขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าตัวเก็บประจุรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนด้วยวิธีการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้า

1) กระจายตัวแกรฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 0.01 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 1.0 โมลาร์ ด้วยเครื่องอัลตราโซนิก เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2) เตรียมสารละลายอะนิลีนมอนอเมอร์ 0.1 โมลาร์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกที่มีแกรฟีนออกไซด์ความเข้มข้นต่าง ๆ

3) ขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าตัวเก็บประจุรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน ด้วยวิธีการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้าโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีด้วยเครื่อง Potentiostat/Galvanostat พร้อมทั้งใช้โปรแกรม GPES โดยใช้ FTO glass เป็นขั้วทำงาน แพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าตรงข้าม และซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

4) กำหนดพารามิเตอร์ของเทคนิค CV ดังต่อไปนี้

- Start potential (V)	: -0.5
- First vertex potential (V)	: -0.5
- Second vertex potential (V)	: 1.5
- Scan rate (mV/s)	: 50
- Number of scans	: 5

3.3.4 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) โดยนำสารตัวอย่างที่ต้องการทดสอบไปติดกับเทปคาร์บอนและนำไปเคลือบด้วยทองด้วยเครื่อง sputter-coater เพื่อให้สารตัวอย่างสามารถนำไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้นจากนั้นนำเข้าเครื่องวิเคราะห์เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของสารตัวอย่าง

3.3.5 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometry, FT-IR) ทำได้โดยการวิเคราะห์และเปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของแกรไฟต์ แกรไฟต์ออกไซด์และแกรฟีนเจือไนโตรเจนและซัลเฟอร์ด้วยเครื่องฟูเรียรทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์

ในช่วงเลขคลื่น $4000-400\text{ cm}^{-1}$ โดยขึ้นรูปชิ้นงานด้วยการผสมเข้ากับโพแทสเซียมโบรไมด์ อัดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องอัดแรงดันสูง

3.3.6 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมี

3.3.6.1 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

1) นำตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีที่ยวดยุติเตรียมได้มาวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติไฟฟ้าเคมี Potentiostat/Galvanostat พร้อมทั้งใช้โปรแกรม GPES ผ่านระบบ 3 ขั้วไฟฟ้า โดยใช้ FTO glass เป็นขั้วทำงาน แพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าช่วย และซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

2) กำหนดพารามิเตอร์ของเทคนิค CV ดังต่อไปนี้

- Start potential (V) : -0.2
- First vertex potential (V) : -0.2
- Second vertex potential (V) : 0.8
- Scan rate (mV/s) : 10, 20, 40, 60, 80, 100
- Number of scans : 2

3) ค่าความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุตัวอย่างโดยเทคนิค cyclic voltammetry จะถูกคำนวณจากสูตรตามสมการที่ 3.1

$$C_s = Q/(VA) \quad (3.1)$$

เมื่อ	C_s	คือ ค่าความเก็บประจุจำเพาะ (A/cm^2)
	Q	คือ ปริมาณประจุ
	V	คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้ (V)
	A	คือ พื้นที่ที่ได้รับกระแส

3.3.6.2 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ

1) นำตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีที่ยวดยุติเตรียมได้มาวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ ด้วยเครื่องทดสอบสมบัติไฟฟ้าเคมี Potentiostat/Galvanostat พร้อมทั้งใช้โปรแกรม GPES ผ่านระบบ 3 ขั้วไฟฟ้า โดยใช้ FTO glass เป็นขั้วทำงาน แพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าช่วย และซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

2) กำหนดพารามิเตอร์ของเทคนิค GCD ดังต่อไปนี้

- Cutoff value for E > (V) : 0.8

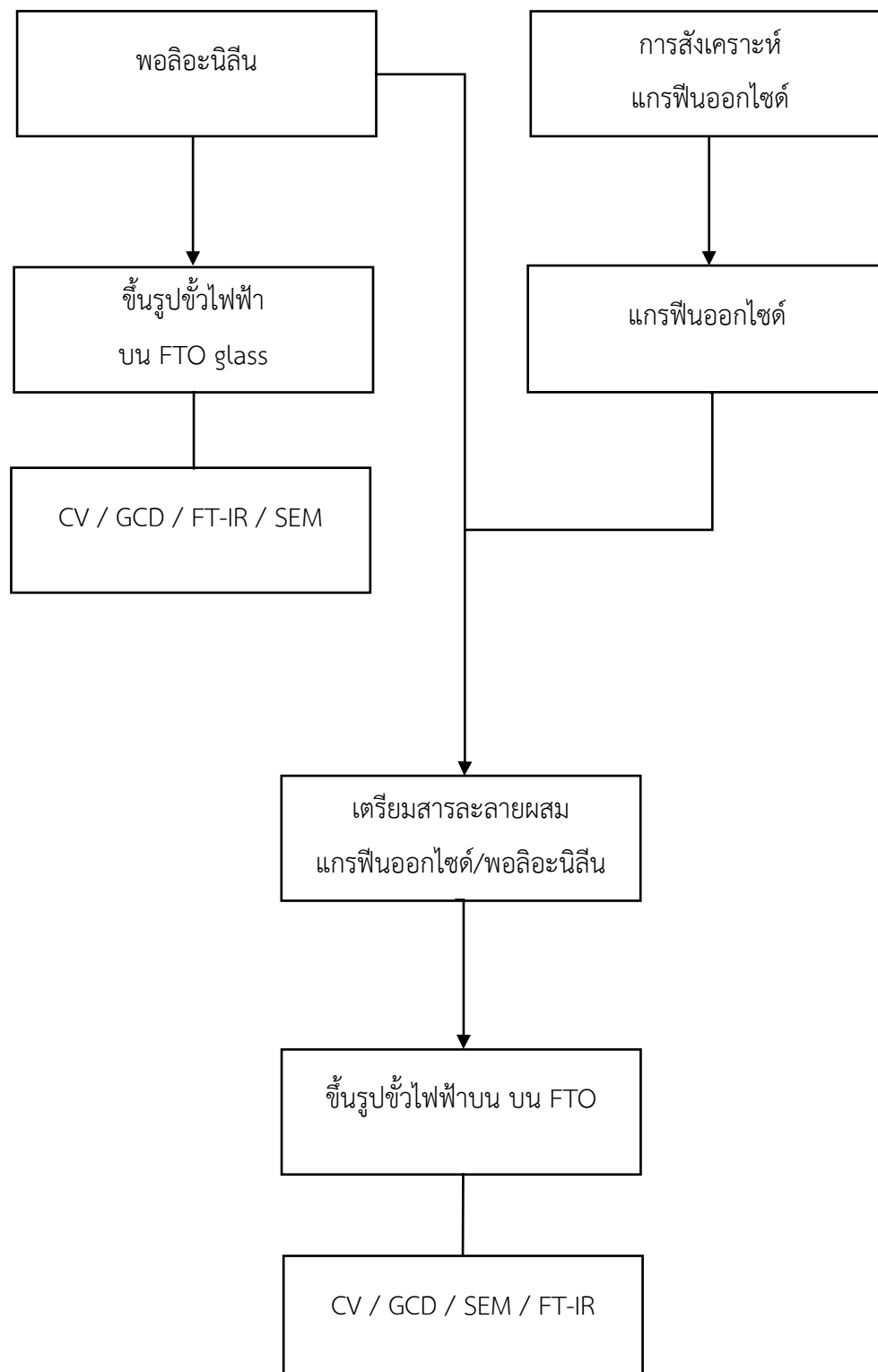
- Cutoff value for E < (V) : -0.2
- Number of cycle : 2
- Current (A/cm²) : 1, 2, 3, 5, 7, 10
- Duration (s) : 1000

3) ค่าความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุตัวอย่างโดยเทคนิค galvanostatic charge-discharge จะถูกคำนวณจากสูตรตามสมการที่ 3.2

$$C_s = \frac{I\Delta t}{\Delta V} \quad (3.2)$$

- เมื่อ C_s คือ ค่าความเก็บประจุจำเพาะ (A/cm²)
- I คือ ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ที่ให้ต่อพื้นที่ (A/cm²)
- Δt คือ เวลาในการคายประจุ (s)
- ΔV คือ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้ (V)

3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดลอง



3.5 ระยะเวลาการดำเนินงาน

ตารางที่ 3.1 ขอบเขตระยะเวลาการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	เดือนที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการทดลอง										
2. รวบรวมและจัดหาเครื่องมือ, อุปกรณ์, สารเคมีที่ใช้										
3. ขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน ทดสอบและวิเคราะห์สมบัติการนำไฟฟ้า										
4. สังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์										
5. เตรียมสารละลายผสมและขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าวีดิชแกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน										
6. วิเคราะห์และทดสอบสมบัติการเก็บประจุทางเคมีไฟฟ้าและลักษณะทางสัณฐานวิทยา										
7. รายงานผลการทดลอง, สรุปและวิเคราะห์ผล										

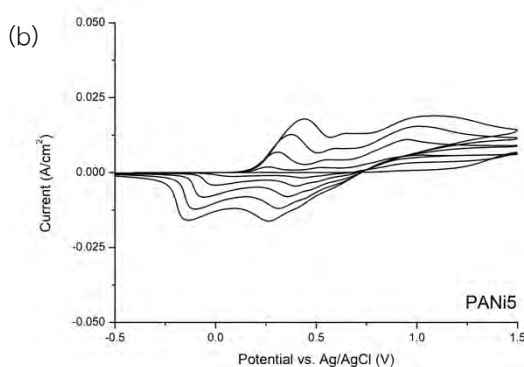
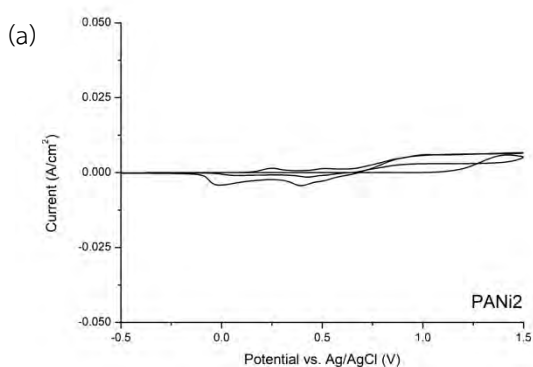
บทที่ 4

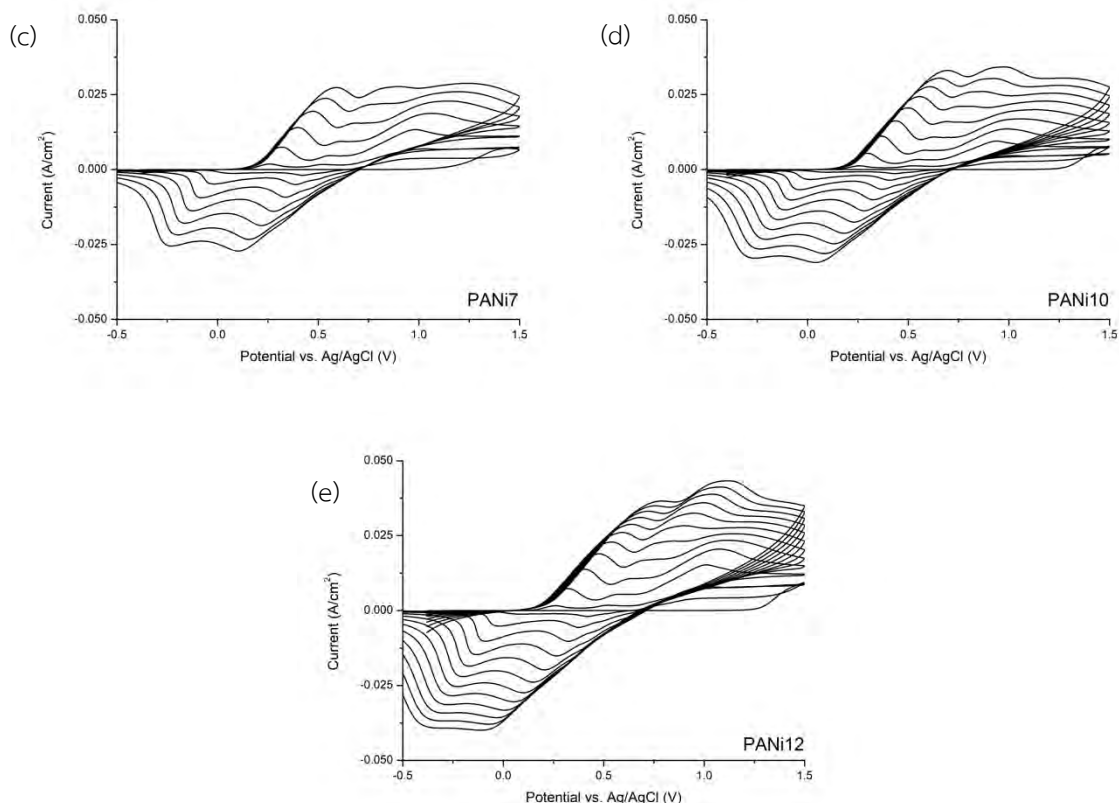
ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 ผลการเตรียมขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน

4.1.1 การสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน

การศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนด้วยวิธีการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้วิธีไซคลิกโวลแทมเมตริก หรือเทคนิค CV ทำโดยการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบเป็นจำนวนรอบต่าง ๆ ดังนี้ 2, 5, 7, 10 และ 12 รอบ (PANi2, PANi5, PANi7, PANi10 และ PANi12 ตามลำดับ) ศึกษาภายใต้การใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือ 0.1M aniline/ 1.0M H₂SO₄ ขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าที่อัตราการให้ศักย์ไฟฟ้า 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.5 โวลต์ ผลการทดลองการขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.1 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชันของพอลิอะนิลีนในจำนวนรอบต่าง ๆ พบว่ามีพีคการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันปรากฏขึ้นอย่างชัดเจน โดยพีคออกซิเดชันเกิดที่ตำแหน่ง 0.25, 0.55 และ 0.85 โวลต์ ในขณะที่พีครีดักชันเกิดที่ตำแหน่ง -0.05 และ 0.35 โวลต์ ซึ่งเป็นการยืนยันการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของพอลิอะนิลีน และหลังจากการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบ มีการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ใต้กราฟ ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของอะนิลีนมอนอเมอร์ หรือการเติบโตของสายโซ่พอลิเมอร์ของพวกมอนอเมอร์และโอลิโกเมอร์ของพอลิอะนิลีนบนพื้นผิวของวัสดุ นอกจากนี้ยังพบว่า พีคครึ่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน (anodic peaks) มีการเลื่อน (shifted) หรือเปลี่ยนแปลงไปทางศักย์ไฟฟ้าบวกเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนรอบการให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ส่วนพีคครึ่งปฏิกิริยารีดักชัน (cathodic peak) มีการเลื่อน (shifted) หรือเปลี่ยนแปลงไปทางศักย์ไฟฟ้าลบเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนรอบการให้ศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ซึ่งลักษณะการเกิดขึ้นจะเกิดขึ้นพร้อมกัน โดยการเลื่อนของพีคปฏิกิริยาเกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานจากพอลิอะนิลีนที่มีปริมาณมากขึ้น

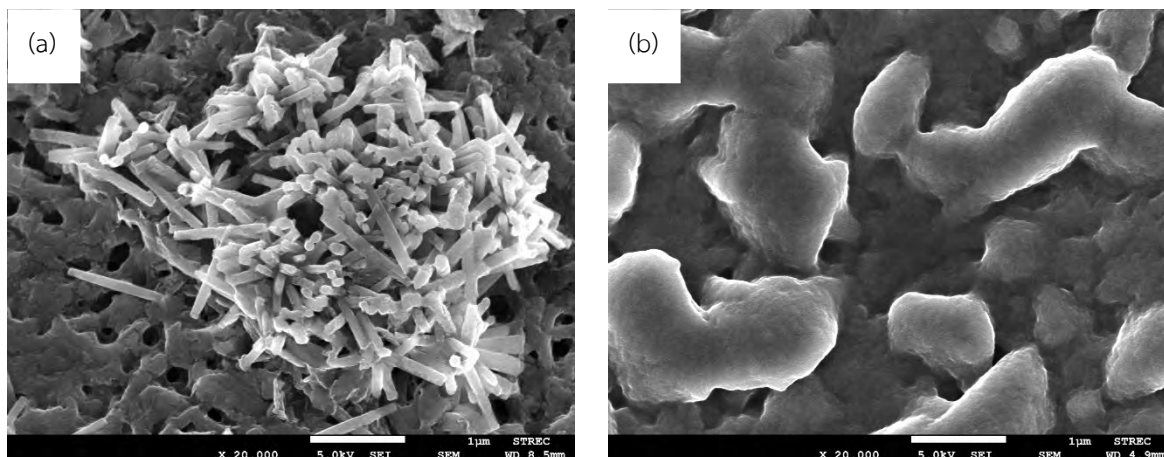




รูปที่ 4.1 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของ (a) PANi2, (b) PANi5, (c) PANi7, (d) PANi10 และ (e) PANi12

4.1.2 การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

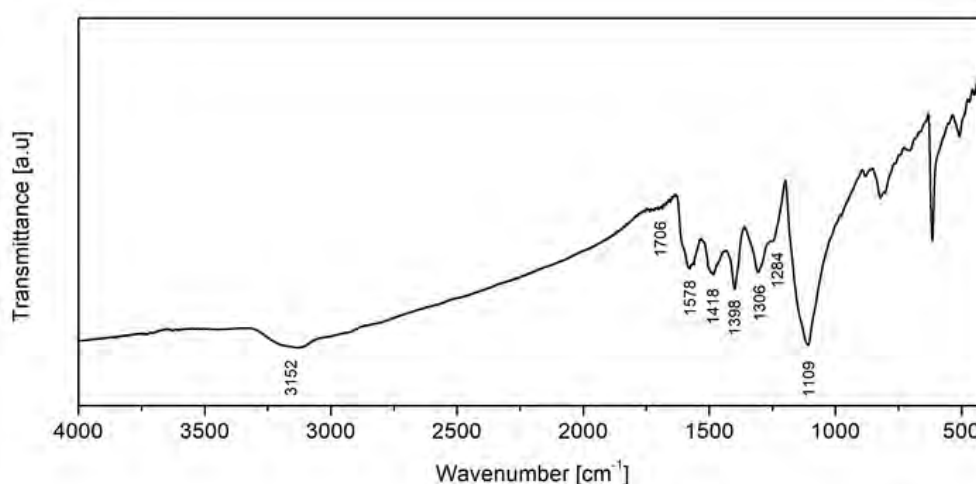
จากการศึกษาผลของจำนวนรอบในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนบนวัสดุ FTO glass ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของพอลิอะนิลีนที่เกิดขึ้นบนวัสดุรองรับ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนที่จำนวนรอบ 5 และ 10 รอบ แสดงดังรูปที่ 4.2 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.2 (a) PANi5 พบว่าพอลิอะนิลีนที่เกิดขึ้นมีลักษณะโครงสร้างเป็นแท่งเข็มขนาดนาโนเรียกว่า nanorod กระจายตัวอยู่อย่างชัดเจนบริเวณตรงกลาง และมีบางส่วนเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.2 (b) PANi10 พบว่าโครงสร้างแท่งเข็มของพอลิอะนิลีนเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อนอย่างชัดเจน ทำให้พื้นผิวมีความหยาบและขรุขระไม่สม่ำเสมอ เรียกว่า bulky surface



รูปที่ 4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน (a) PANI5 และ (b) PANI10 ^[11]

4.1.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

จากรูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี หรือเทคนิค FT-IR ในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ $400\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ ของพอลิอะนิลีน เกิดพีกที่มีลักษณะกว้าง (broad) ดังนี้ พีกที่ตำแหน่ง 3152 cm^{-1} แสดงถึง N-H stretching ของโครงสร้าง secondary amine พีกที่ตำแหน่ง 1706 cm^{-1} แสดงถึง N-H bending พีกที่ตำแหน่ง 1578 cm^{-1} และ 1418 cm^{-1} แสดงถึง C=C stretching ของโครงสร้าง quinonoid ring และ benzenoid ring ของพอลิอะนิลีน พีกที่ตำแหน่ง 1398 cm^{-1} แสดงถึง C-N stretching และ 1306 cm^{-1} แสดงถึง C-N bending ของโครงสร้าง quinonoid ring และ benzenoid ring ของพอลิอะนิลีน และพีกที่ตำแหน่ง 1284 cm^{-1} และ 1109 cm^{-1} แสดงถึง C-H bending ของโครงสร้าง quinonoid ring และ benzenoid ring ของพอลิอะนิลีน

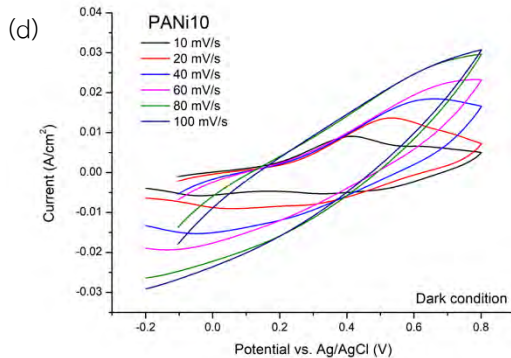
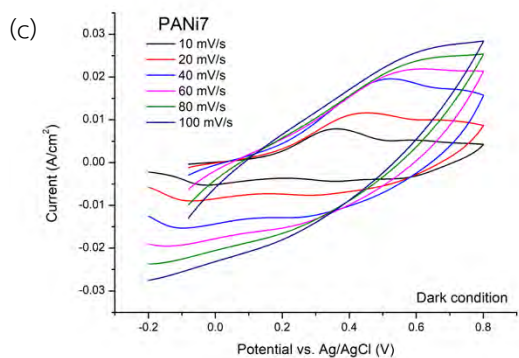
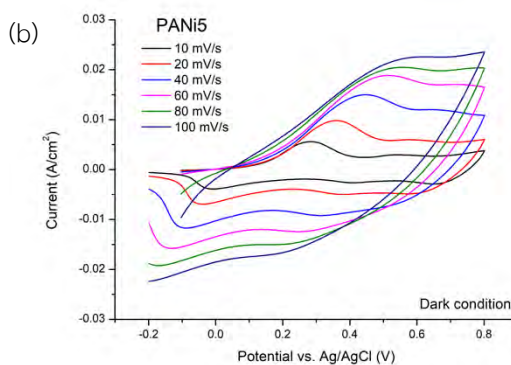
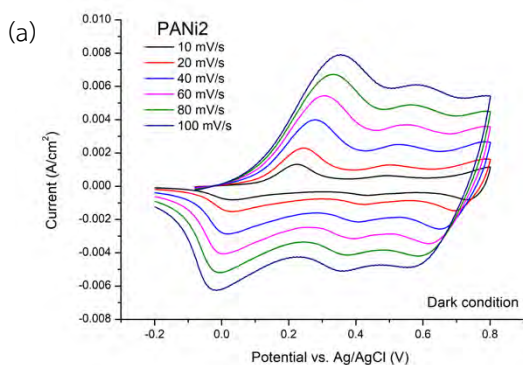


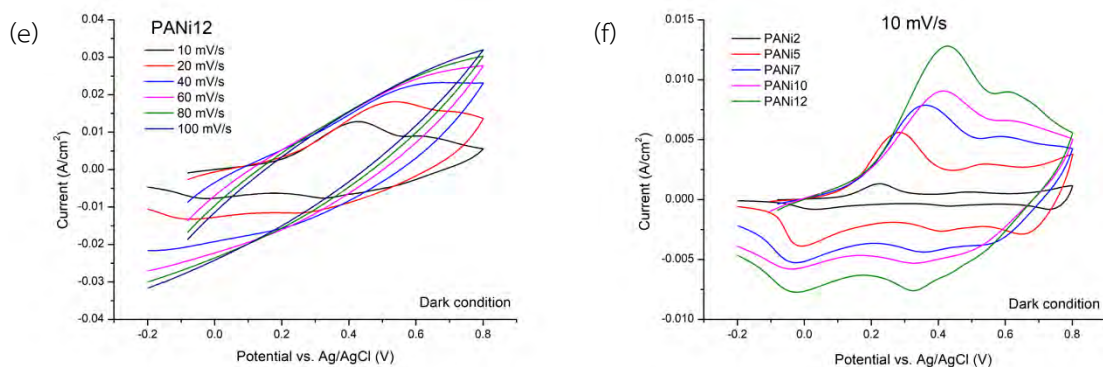
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของขั้วไฟฟ้า PANI ที่ได้จากเทคนิค FT-IR

4.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

4.1.4.1 การวิเคราะห์ในสภาวะที่ไม่มีแสง

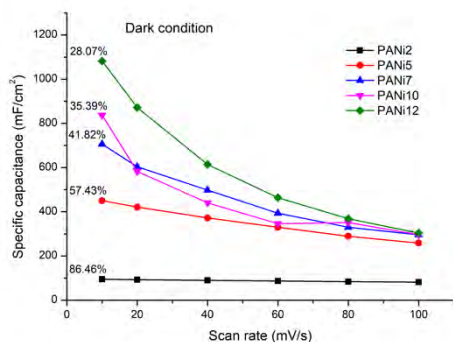
การศึกษาผลของจำนวนรอบในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนบนวัสดุ FTO glass ที่ส่งผลต่อค่าการเก็บประจุ โดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบเป็นจำนวนรอบต่าง ๆ ดังนี้ 2, 5, 7, 10 และ 12 รอบ เมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการเก็บประจุโดยใช้วิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี หรือเทคนิค CV ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสง จากรูปที่ 4.4 (a), (b), (c), (d) และ (e) แสดงกราฟไซคลิกโวลแทมเมตรีของขั้วไฟฟ้า PANi2, PANi5, PANi7, PANi10 และ PANi12 ตามลำดับ ในช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.2 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 10 ถึง 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในสภาวะที่ไม่มีแสง พบพิกที่แสดงการผันกลับได้ของปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าพอลิอะนิลีนมีพฤติกรรมการกักเก็บประจุแบบซูโดคาปาซิเตอร์ (Pseudocapacitor) และพบว่า การให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบในจำนวนรอบที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน จะส่งผลให้ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนมีค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากพื้นที่ใต้กราฟที่แตกต่างกัน และจากรูปที่ 4.4 (f) แสดงกราฟของไซคลิกโวลแทมเมตรีเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ PANi ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 10 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในสภาวะที่ไม่มีแสง พบว่า เมื่อจำนวนรอบในการสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น พื้นที่ใต้กราฟมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยที่ PANi12 มีพื้นที่ใต้กราฟใหญ่ที่สุด แสดงถึงค่าในการเก็บประจุสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอื่น ๆ





รูปที่ 4.4 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตริกของขั้วไฟฟ้า (a) PANi2, (b) PANi5, (c) PANi7, (d) PANi10 และ (e) PANi12 ที่ 10 ถึง 100 mV/s และ (f) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ PANi ที่จำนวนรอบต่างๆ ที่ 10 mV/s ในสภาวะที่ไม่มีแสง

จากรูปที่ 4.5 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบและอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ต่าง ๆ ที่ได้จากการคำนวณโดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตริก ในสภาวะที่ไม่มีแสง พบว่า เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้า PANi2, PANi5, PANi7, PANi10 และ PANi12 โดยคำนวณเปรียบเทียบจากค่าการเก็บประจุจากพื้นที่ใต้กราฟที่ 10 และ 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ได้เป็นร้อยละ 86.46, 57.43, 41.82, 35.39 และ 28.07 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดในการเก็บประจุอันเนื่องมาจากการแพร่ของไอออนเมื่อให้ความเร็วในการให้ความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้น โดย PANi2 แสดงถึง rate capacitance ที่สูงที่สุดแต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีค่าเก็บประจุที่ต่ำที่สุด

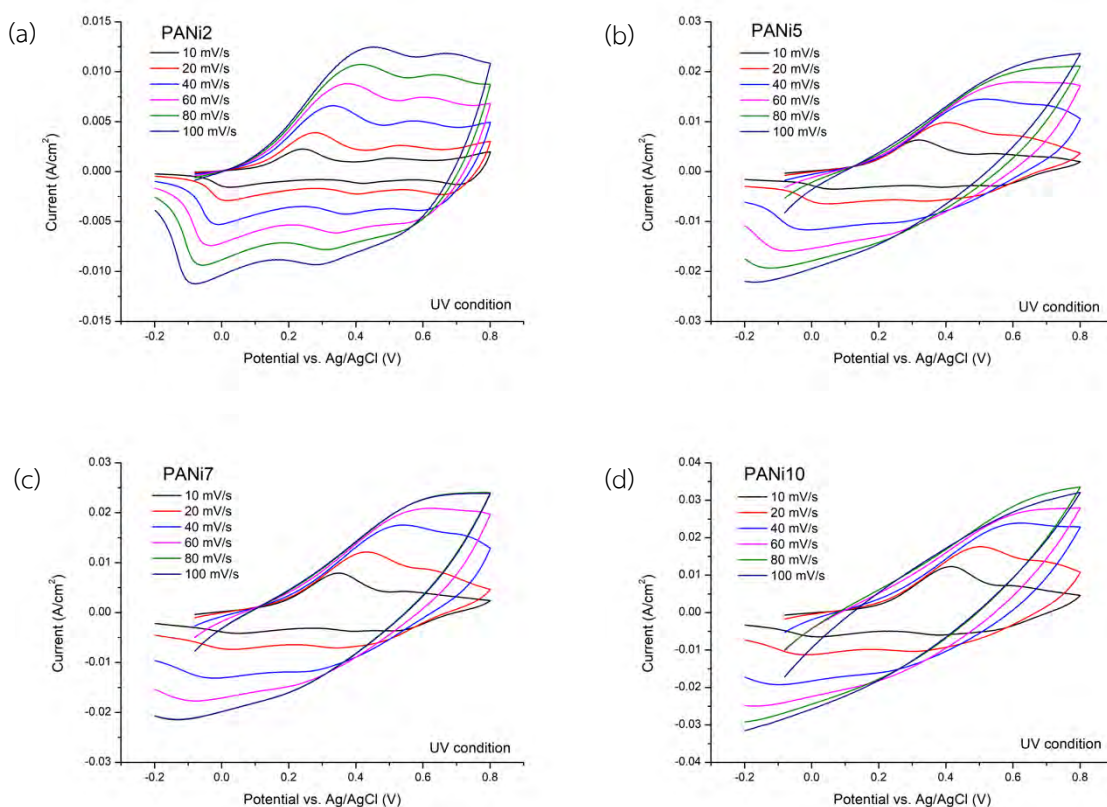


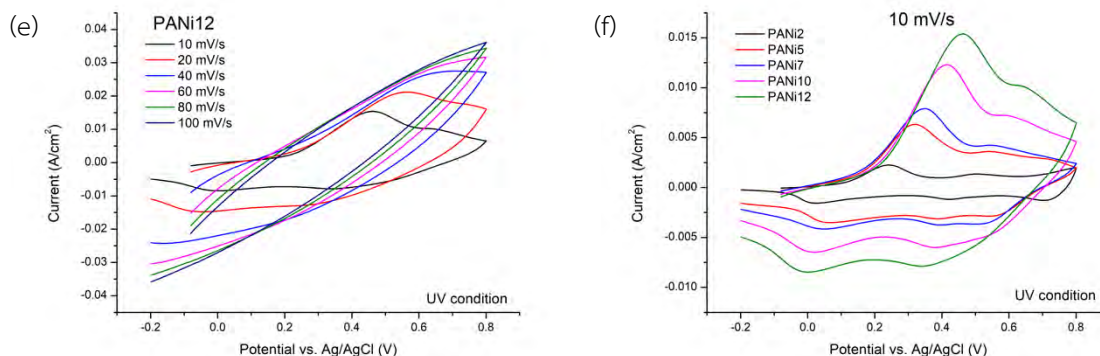
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบและอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ต่าง ๆ จากเทคนิค CV ในสภาวะที่ไม่มีแสง

4.1.4.2 การวิเคราะห์ในสภาวะที่มีแสง UV

การศึกษาผลของจำนวนรอบในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนบนวัสดุ FTO glass ที่ส่งผลต่อค่าการเก็บประจุ โดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบเป็นจำนวนรอบต่าง ๆ ดังนี้ 2, 5, 7, 10 และ 12 รอบ เมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการเก็บประจุโดยใช้วิธีไซคลิกโวลแทมเมตริก หรือเทคนิค CV ภายใต้สภาวะที่มีแสง UV จากรูปที่ 4.6 (a), (b), (c), (d) และ (e) แสดงกราฟไซคลิกโวลแทมเมตริกของขั้วไฟฟ้า PANi2, PANi5,

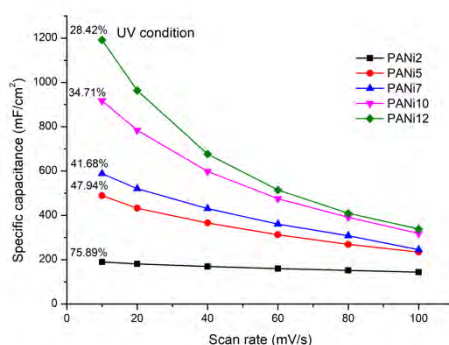
PANi7, PANi10 และ PANi12 ตามลำดับ ในช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.2 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 10 ถึง 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในสถานะที่มีแสง UV พบพิกที่แสดงการผันกลับได้ของปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน ซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าพอลิอะนิลีนมีพฤติกรรมการกักเก็บประจุแบบซูโดคาปาซิเตอร์ (Pseudocapacitor) และพบว่า การให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบในจำนวนรอบที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน จะส่งผลให้ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนมีค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากพื้นที่ใต้กราฟที่แตกต่างกัน และจากรูปที่ 4.6 (f) แสดงกราฟของไซคลิกโวลแทมเมตริกเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ PANi ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 10 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในสถานะที่มีแสง UV พบว่า เมื่อจำนวนรอบในการสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น พื้นที่ใต้กราฟมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยที่ PANi12 มีพื้นที่ใต้กราฟใหญ่ที่สุด แสดงถึงค่าในการเก็บประจุสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอื่น ๆ





รูปที่ 4.6 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตริกของขั้วไฟฟ้า (a) PANi2, (b) PANi5, (c) PANi7, (d) PANi10 และ (e) PANi12 ที่ 10 ถึง 100 mV/s และ (f) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ PANi ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่ 10 mV/s ในสภาวะที่มีแสง UV

จากรูปที่ 4.7 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบและอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ต่าง ๆ จากเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตริก ในสภาวะที่มีแสง UV พบว่า ค่าการเก็บประจุที่คำนวณได้มีค่าสูงกว่าที่ไม่มีแสงชัดเจน ยกเว้น PANi7 และเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้า PANi2, PANi5, PANi7, PANi10 และ PANi12 ค่าความจุจากการเก็บประจุจากพื้นที่ใต้กราฟที่ 10 และ 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ได้เป็นร้อยละ 75.89, 47.94, 41.68, 34.71 และ 28.42 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดในการเก็บประจุอันเนื่องมาจากการแพร่ของไอออน เมื่อให้ความเร็วในการให้ความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้น โดย PANi2 แสดงถึง rate capacitance ที่สูงที่สุดแต่อย่างไรก็ตามพบว่าค่าการเก็บประจุที่ต่ำที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบผลของการใช้แสง UV ที่มีต่อ rate capacitance พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับที่ไม่มีแสง

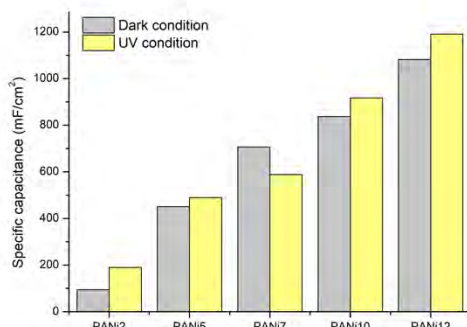


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบและอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ต่าง ๆ จากเทคนิค CV ในสภาวะที่มีแสง UV

4.1.4.3 การวิเคราะห์ผลของแสงต่อสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน

จากรูปที่ 4.8 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi2, PANi5, PANi7, PANi10 และ PANi12 ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 10 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จากเทคนิคไซคลิก

โวลแทมเมตรี ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสง UV พบว่า ภายใต้สภาวะที่มีแสง UV มีค่าการเก็บประจุเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสง ยกเว้น PANi7

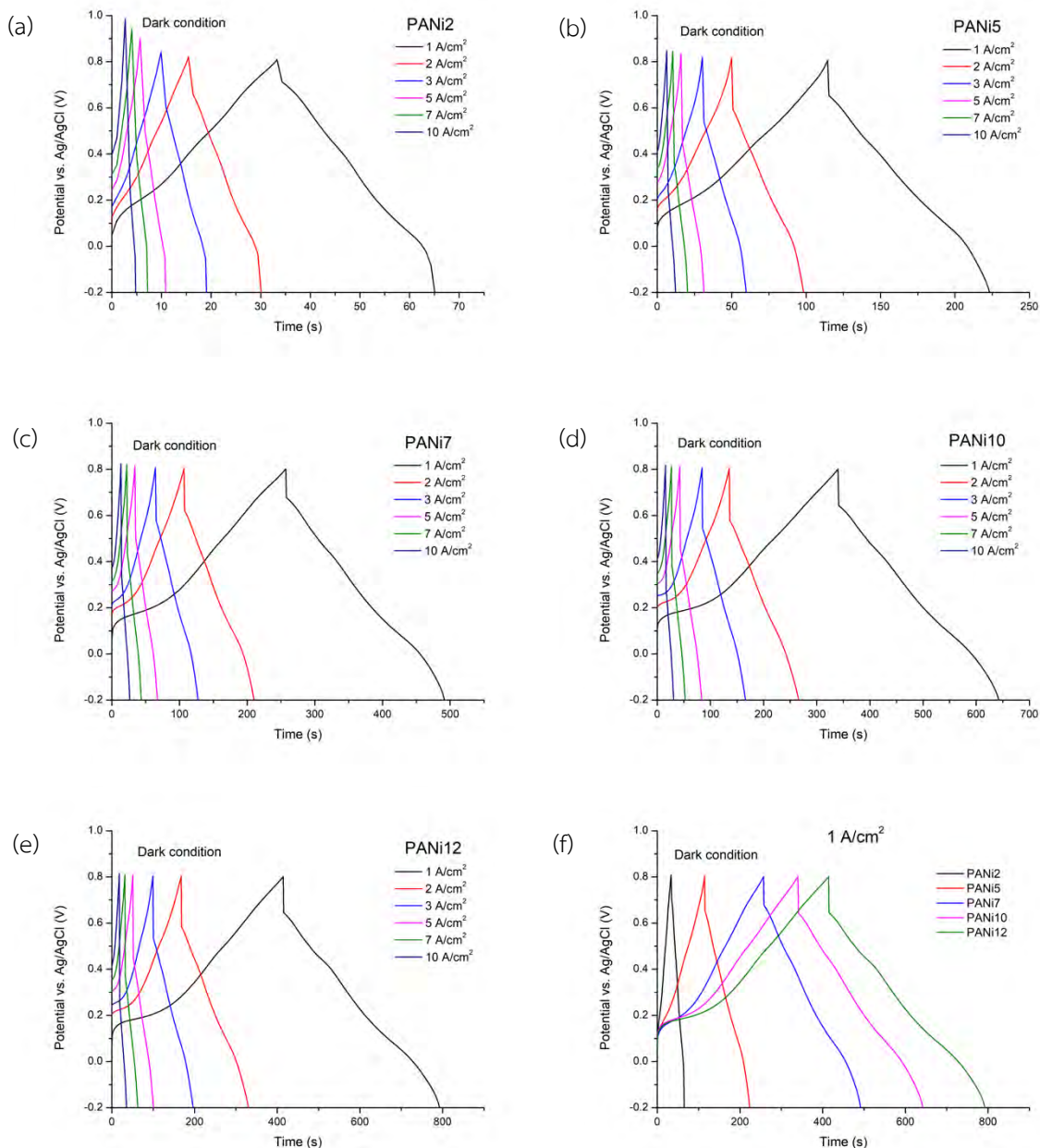


รูปที่ 4.8 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่ 10 mV/s จากเทคนิค CV ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

4.1.5 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ

4.1.5.1 การวิเคราะห์ในสภาวะที่ไม่มีแสง

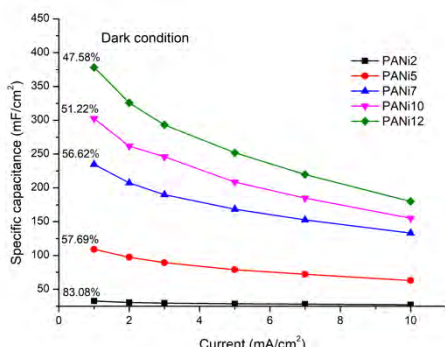
การศึกษาผลของจำนวนรอบในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนบนวัสดุ FTO glass ที่ส่งผลต่อค่าการเก็บประจุ โดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบเป็นจำนวนรอบต่าง ๆ ดังนี้ 2, 5, 7, 10 และ 12 รอบ เมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการเก็บประจุโดยใช้เทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ หรือเทคนิค GCD ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสง จากรูปที่ 4.9 (a), (b), (c), (d) และ (e) แสดงการอัดและคายประจุของขั้วไฟฟ้า PANi2, PANi5, PANi7, PANi10 และ PANi12 ตามลำดับ ที่อัตราความหนาแน่นกระแส 1, 2, 3, 5, 7 และ 10 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในช่วงความต่างศักย์ตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.8 โวลต์ ในสภาวะที่ไม่มีแสง พบว่า เมื่อให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบในจำนวนรอบที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน ส่งผลให้ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนมีค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากระยะเวลาในการอัดและคายประจุของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน และจากกราฟแสดงให้เห็นว่าลักษณะของเส้นกราฟการอัดและคายประจุมีลักษณะความชันที่ไม่เป็นเส้นตรง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นในระหว่างการอัดและคายประจุในขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นการยืนยันว่าพอลิอะนิลีนแสดงพฤติกรรมการกักเก็บประจุแบบซูโดคาปาซิเตอร์ (Pseudo capacitors) ส่วนกราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงจะแสดงพฤติกรรมแบบ EDLC (Electrochemical double layer capacitor) ซึ่งไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น และจากรูปที่ 4.9 (f) แสดงลักษณะการอัดและคายประจุเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ PANi ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในสภาวะที่ไม่มีแสง พบว่า เมื่อจำนวนรอบในการสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น ระยะเวลาในการคายประจุของขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยที่ PANi12 มีระยะเวลาการคายประจุนานที่สุด แสดงถึงค่าในการเก็บประจุสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอื่น ๆ



รูปที่ 4.9 ลักษณะการอัดและการคายประจุของขั้วไฟฟ้า (a) PANi2, (b) PANi5, (c) PANi7, (d) PANi10 และ (e) PANi12 ที่ 1 ถึง 10 A/cm² และ (f) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ PANi ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่ 1 A/cm² ในสภาวะที่ไม่มีแสง

จากรูปที่ 4.10 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบและความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ จากเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ ในสภาวะที่ไม่มีแสง พบว่า เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพต่อการให้กระแสของขั้วไฟฟ้า PANi2, PANi5, PANi7, PANi10 และ PANi12 คำนวนจากค่าการเก็บประจุจากรยะเวลาในการคายประจุที่ 1 และ 10 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ได้เป็นร้อยละ 83.08, 57.69, 56.62, 51.22 และ 47.58 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดในการเก็บประจุนี้อาจมาจากการ

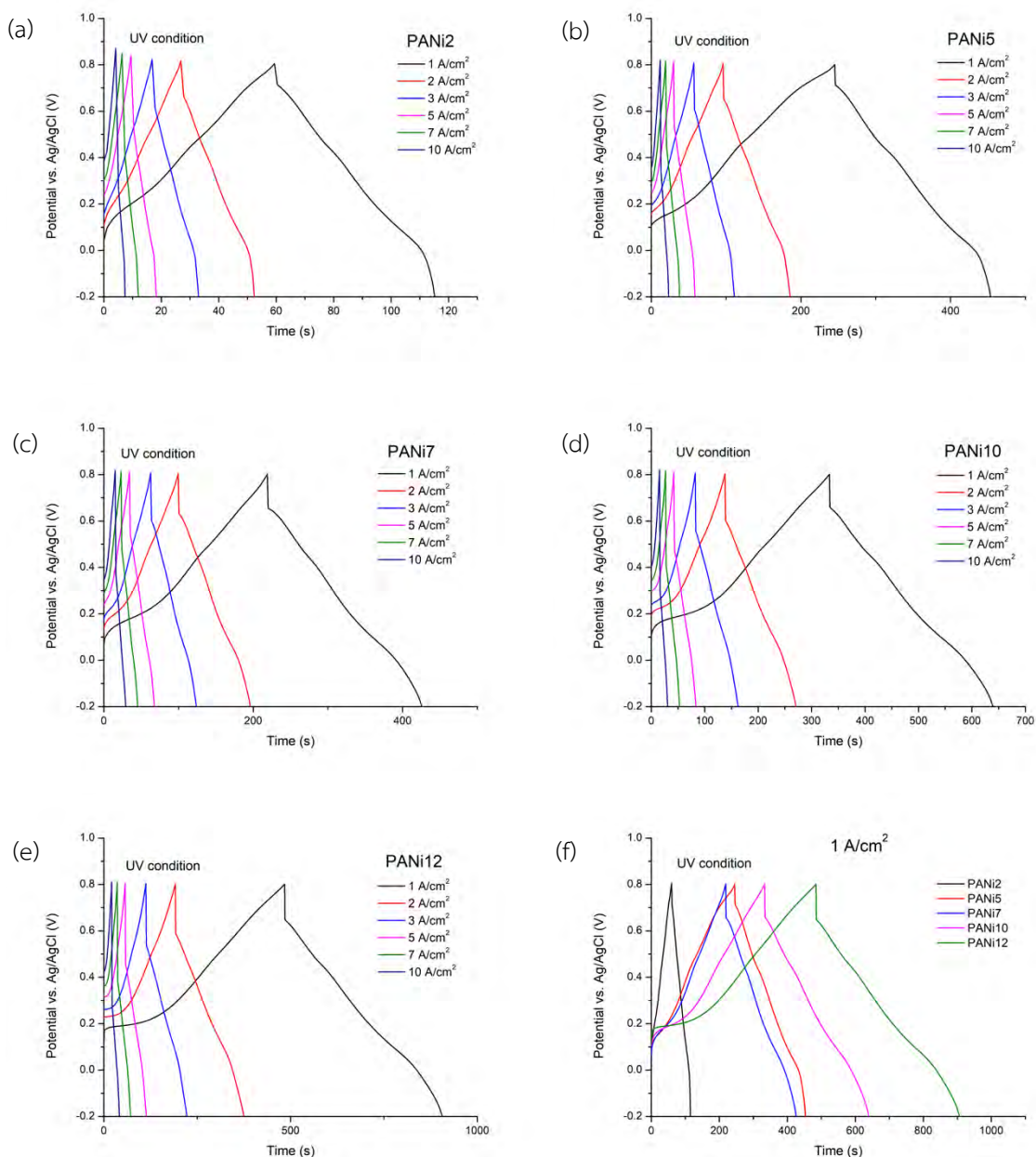
แพร์ของไอออนเมื่อให้ความเร็วในการให้กระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดย PANi2 แสดงถึง rate capacitance ที่สูงที่สุดแต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีความเก็บประจุที่ต่ำที่สุด



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบและความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ จากเทคนิค GCD ในสภาวะที่ไม่มีแสง

4.1.5.2 การวิเคราะห์ในสภาวะที่มีแสง UV

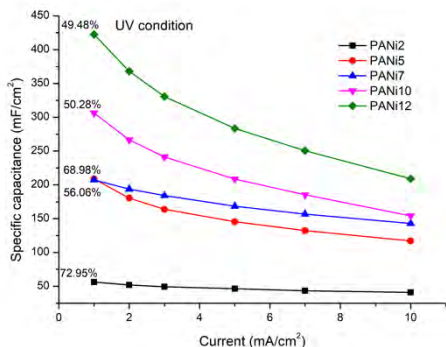
การศึกษาผลของจำนวนรอบในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนบนวัสดุ FTO glass ที่ส่งผลต่อค่าการเก็บประจุ โดยให้ค่าศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบเป็นจำนวนรอบต่าง ๆ ดังนี้ 2, 5, 7, 10 และ 12 รอบ เมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการเก็บประจุโดยใช้เทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ หรือเทคนิค GCD ภายใต้สภาวะที่มีแสง UV จากรูปที่ 4.11 (a), (b), (c), (d) และ (e) แสดงการอัดและคายประจุของขั้วไฟฟ้า PANi2, PANi5, PANi7, PANi10 และ PANi12 ตามลำดับ ที่อัตราความหนาแน่นกระแส 1, 2, 3, 5, 7 และ 10 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในช่วงความต่างศักย์ตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.8 โวลต์ ในสภาวะที่มีแสง UV พบว่า เมื่อการให้ศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบในจำนวนรอบที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน จะส่งผลให้ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนมีค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากระยะเวลาในการอัดและคายประจุของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน จากกราฟแสดงให้เห็นว่าลักษณะของเส้นกราฟการอัดและคายประจุมีลักษณะความชันที่ไม่เป็นเส้นตรง เนื่องจากมีการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ขึ้นในระหว่างการอัดและคายประจุในขั้วไฟฟ้า ซึ่งเป็นการยืนยันว่าพอลิอะนิลีนแสดงพฤติกรรมการกักเก็บประจุแบบซูโดคาปาซิเตอร์ (Pseudo capacitance) ส่วนกราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงจะแสดงพฤติกรรมแบบ EDLC (Electrochemical double layer capacitor) ซึ่งไม่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้น และจากรูปที่ 4.11 (f) แสดงลักษณะการอัดและคายประจุเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ PANi ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในสภาวะที่มีแสง UV พบว่า เมื่อให้จำนวนรอบในการสังเคราะห์เพิ่มมากขึ้น ระยะเวลาในการคายประจุของขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยที่ PANi12 มีระยะเวลาการคายประจุนานที่สุด แสดงถึงค่าในการเก็บประจุสูงที่สุดเมื่อเทียบกับตัวอื่น ๆ



รูปที่ 4.11 ลักษณะการอัดและการคายประจุของขั้วไฟฟ้า (a) PANi2, (b) PANi5, (c) PANi7, (d) PANi10 และ (e) PANi12 ที่ 1 ถึง 10 A/cm² และ (f) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ PANi ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่ 1 A/cm² ในสภาวะที่มีแสง UV

จากรูปที่ 4.12 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบและความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ จากเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ ในสภาวะที่มีแสง UV พบว่า เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพต่อการให้กระแสของขั้วไฟฟ้า PANi2, PANi5, PANi7, PANi10 และ PANi12 คำนวณจากค่าการเก็บประจุจากระยะเวลาในการคายประจุที่ 1 และ 10 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ได้เป็นร้อยละ 72.95, 56.06, 68.98, 50.28 และ 49.48 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดในการเก็บประจุอันเนื่องมาจากการแพร่ของไอออนเมื่อให้ความเร็วในการให้กระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดย PANi2 แสดงถึง rate

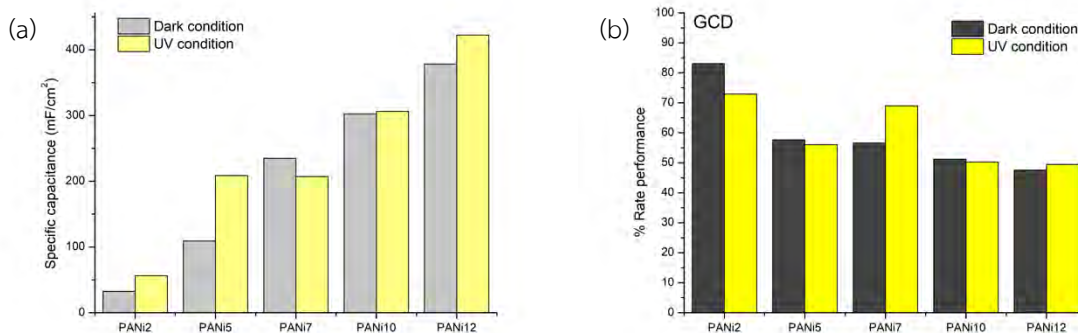
capacitance ที่สูงที่สุดแต่อย่างไรก็ตามพบว่ามีความเก็บประจุที่ต่ำที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบผลของการใช้แสง UV ที่มีต่อ rate capacitance พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับที่ไม่มีแสง



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบและความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ จากเทคนิค GCD ในสภาวะที่มีแสง UV

4.1.5.3 การวิเคราะห์ผลของแสงต่อสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน

จากรูปที่ 4.13 (a) แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi2, PANi5, PANi7, PANi10 และ PANi12 ที่อัตราความหนาแน่นกระแส 1 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร จากเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสง UV พบว่าภายใต้สภาวะที่มีแสง UV มีค่าการเก็บประจุเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสง ยกเว้น PANi7 และจากรูปที่ 4.13 (b) แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพต่อการให้กระแสของขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนที่จำนวนรอบต่าง ๆ พบว่าค่าประสิทธิภาพต่อการให้กระแส rate capacitance ของขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสง UV ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.13 แผนภูมิเปรียบเทียบ (a) ค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi และ (b) ประสิทธิภาพต่อการให้กระแสของขั้วไฟฟ้า PANi ที่จำนวนรอบต่าง ๆ จากเทคนิค GCD ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.1 แสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน จากเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi2, PANi5, PANi7, PANi10 และ PANi12 จากค่าการเก็บประจุที่ความหนาแน่นกระแสเดียวกัน ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสง UV คำนวณค่าประสิทธิภาพการเก็บประจุ ได้เป็นร้อยละ 72.92, 91.12, -11.75, 1.22 และ 11.66 ตามลำดับ โดยที่ PANi5 มีประสิทธิภาพการเก็บประจุเชิงแสงสูงที่สุด ส่งผลให้เป็นสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดเชิงแสง

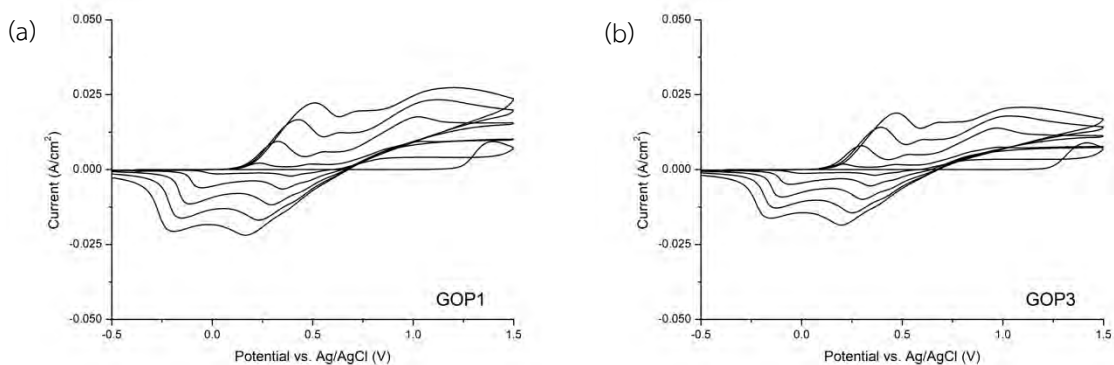
ตารางที่ 4.1 ค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า PANi จากเทคนิค GCD ที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร

วัสดุ	ค่าการเก็บประจุ (mF/cm ²)		% Photo efficiency
	ไม่มีแสง	มีแสง UV	
PANi2	32.50	56.20	72.92
PANi5	109.20	208.70	91.12
PANi7	234.90	207.30	-11.75
PANi10	302.60	306.30	1.22
PANi12	378.30	422.40	11.66

4.2 ผลการเตรียมขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน

4.2.1 การสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน

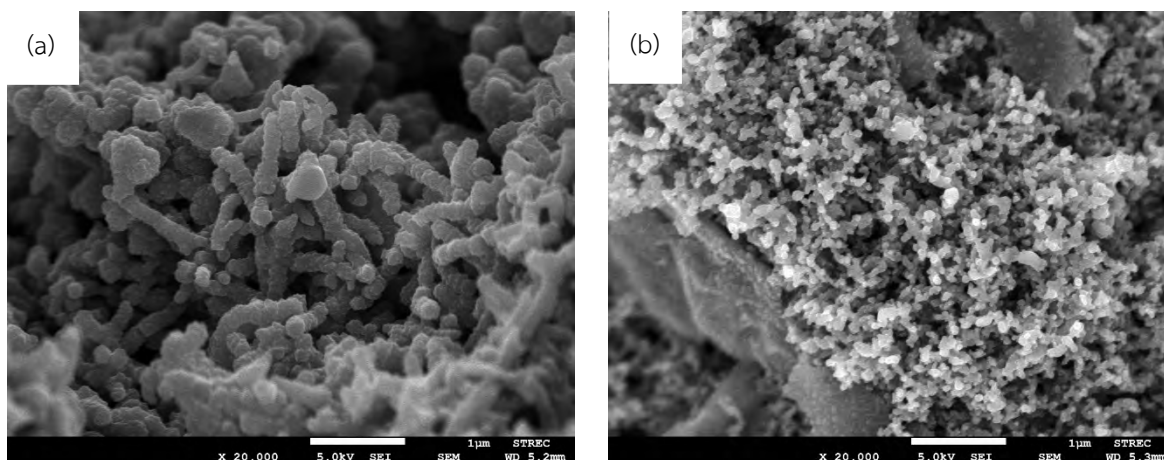
การศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนด้วยวิธีการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้วิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี หรือเทคนิค CV ทำโดยการให้ค่าศักย์ไฟฟ้าแก่ระบบเป็นจำนวน 5 รอบ ที่ความเข้มข้นแกรฟีนออกไซด์ 0.01 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (GOP1 และ GOP3 ตามลำดับ) ศึกษาภายใต้การใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือ 0.1M aniline/ 1.0M H₂SO₄ ขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าที่อัตราการให้ศักย์ไฟฟ้า 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.5 โวลต์ ผลการทดลองการขึ้นรูปขั้วไฟฟ้าแสดงดังรูปที่ 4.14 แสดงไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดอิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชันของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่ามีพีคการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันปรากฏขึ้นอย่างชัดเจน โดยพีคออกซิเดชันเกิดที่ตำแหน่ง 0.25, 0.55 และ 0.85 โวลต์ ในขณะที่พีครีดักชันเกิดที่ตำแหน่ง -0.05 และ 0.35 โวลต์ เช่นเดียวกับผลการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนดังรูปที่ 4.1 เป็นการยืนยันว่า การเติมแกรฟีนออกไซด์ไม่รบกวนการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของพอลิอะนิลีน



รูปที่ 4.14 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของการเกิดอิเล็กโทรพอลิเมอร์ไรเซชันของ (a) GOP1 และ (b) GOP3

4.2.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

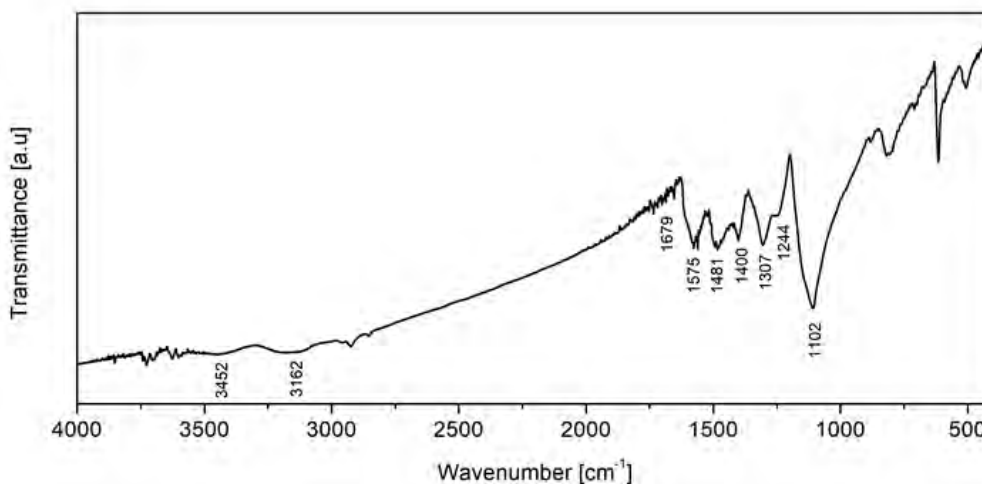
จากการศึกษาผลของความเข้มข้นของแกรฟีนออกไซด์ในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน บนวัสดุ FTO glass ที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวและการกระจายตัวของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนที่เกิดขึ้นบนวัสดุรองรับ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนที่ความเข้มข้น 0.01 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แสดงดังรูปที่ 4.15 เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.15 (a) GOP1 พบว่าไม่ปรากฏโครงสร้างแผ่นของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ เนื่องจากอนุภาค nanorod ของพอลิอะนิลีนเติบโตปกคลุมพื้นผิวของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของแกรฟีนออกไซด์มากขึ้นพิจารณาจากรูปที่ 4.15 (b) GOP3 พบว่าปรากฏลักษณะโครงสร้างแผ่นของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์อย่างชัดเจนร่วมกับโครงสร้างแท่งเข็มของพอลิอะนิลีนที่มีขนาดเล็กลง คาดว่าขนาดของพอลิอะนิลีนที่เล็กลง เกิดจากการที่รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ช่วยการดูดซับและกระจายตัวของอะนิลีนมอนอเมอร์บนผิวทำให้การเติบโตของพอลิอะนิลีนที่ต้องการจะเติบโตเกิดบนผิวแกรฟีนอย่างสม่ำเสมอ ส่งผลให้พอลิอะนิลีนมีการเติบโตเล็ก ๆ ประสานกันในลักษณะร่างแห



รูปที่ 4.15 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน (a) GOP1 และ (b) GOP3 ^[11]

4.2.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี

จากรูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมของหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี หรือเทคนิค FT-IR ในช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ $400-4000\text{ cm}^{-1}$ ของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน พบว่าพีกของ GOP มีความคล้ายคลึงกับพีกของ PANi ในรูปที่ 4.3 เนื่องจากพีกบางส่วนเกิดการซ้อนทับกัน และ GOP ปรากฏพีกที่ตำแหน่ง 3152 cm^{-1} แสดงถึง O-H stretching ของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ที่เกิดการรีดิวซ์ไม่สมบูรณ์ ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่า พอลิอะนิลีนสามารถปกคลุมพื้นผิวของแกรฟีนได้

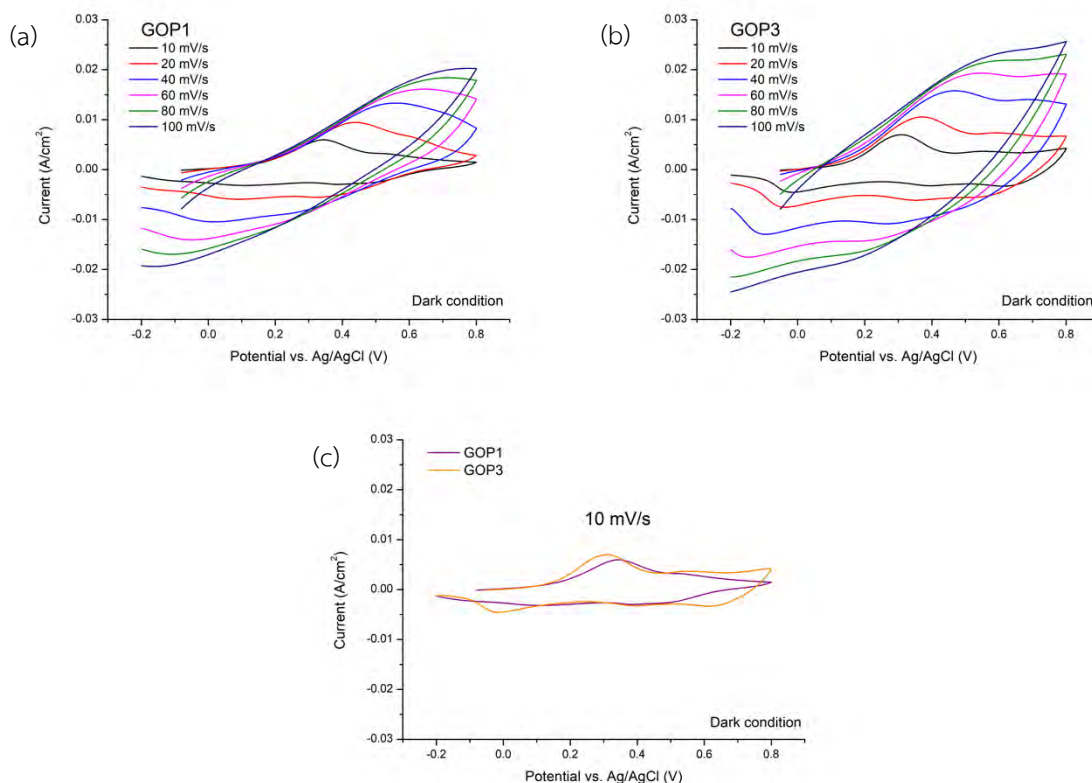


รูปที่ 4.16 สเปกตรัมของซัฟไฟฟ้ GOP ที่ได้จากเทคนิค FT-IR

4.2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

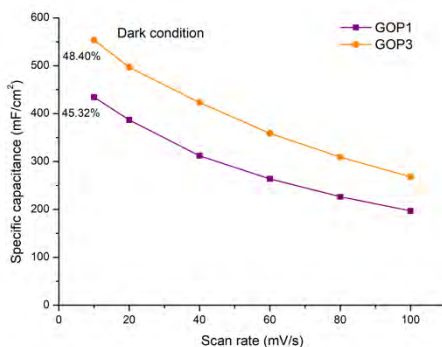
4.2.4.1 การวิเคราะห์ในสถานะที่ไม่มีแสง

การศึกษาผลของความเข้มข้นในการสังเคราะห์ซัฟไฟฟ้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน บนวัสดุ FTO glass ที่ส่งผลต่อค่าการเก็บประจุ โดยกำหนดค่าความเข้มข้นแกรฟีนออกไซด์ต่าง ๆ ดังนี้ 0.01 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการเก็บประจุโดยใช้วิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี หรือเทคนิค CV ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสง จากรูปที่ 4.17 (a) และ (b) แสดงกราฟไซคลิกโวลแทมเมตรีของซัฟไฟฟ้ GOP1 และ GOP3 ตามลำดับ ในช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.2 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 10 ถึง 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในสภาวะที่ไม่มีแสง พบพีกที่แสดงการผันกลับได้ของปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันที่คล้ายคลึงกับตัวอย่างซัฟไฟฟ้พอลิอะนิลีนดังรูปที่ 4.4 และพบว่า การกำหนดค่าความเข้มข้นที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์ซัฟไฟฟ้แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน จะส่งผลให้ซัฟไฟฟ้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนมีค่าการเก็บประจุของซัฟไฟฟ้ที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากพื้นที่ใต้กราฟที่แตกต่างกัน และจากรูปที่ 4.17 (c) แสดงกราฟของไซคลิกโวลแทมเมตรีเปรียบเทียบซัฟไฟฟ้ของ GOP ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 10 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในสภาวะที่ไม่มีแสงพบว่า เมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น พื้นที่ใต้กราฟมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้มีค่าการเก็บประจุมากขึ้น



รูปที่ 4.17 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรีของขั้วไฟฟ้า (a) GOP1 และ (b) GOP3 ที่ 10 ถึง 100 mV/s และ (c) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ GOP ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ 10 mV/s ในสภาวะที่ไม่มีแสง

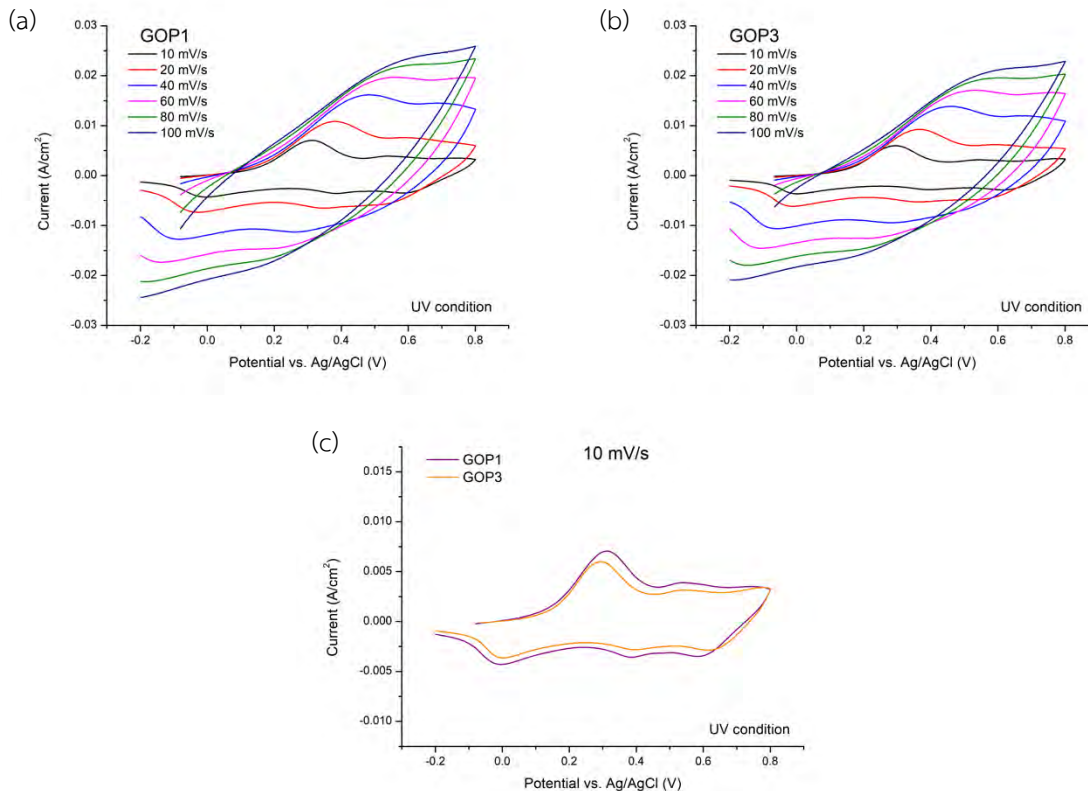
จากรูปที่ 4.18 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นและอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ต่าง ๆ จากเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสภาวะที่ไม่มีแสง พบว่า เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้า GOP1 และ GOP3 คำนวณจากค่าการเก็บประจุจากพื้นที่ใต้กราฟที่ 10 และ 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ได้เป็นร้อยละ 45.32 และ 48.40 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดในการเก็บประจุอันเนื่องมาจากการแพร่ของไอออนเมื่อให้ความเร็วของความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้น โดย GOP3 แสดงถึง rate capacitance ที่สูงที่สุด



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นและอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ต่าง ๆ จากเทคนิค CV ในสภาวะที่ไม่มีแสง

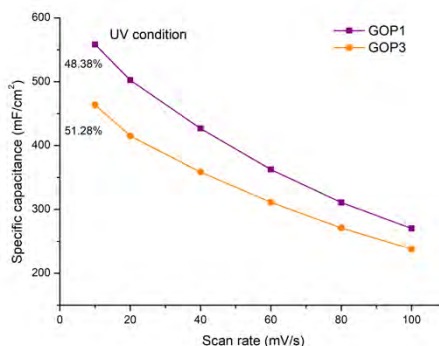
4.2.4.2 การวิเคราะห์ในสภาวะที่มีแสง UV

การศึกษาผลของความเข้มข้นในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนบนวัสดุ FTO glass ที่ส่งผลต่อค่าการเก็บประจุ โดยกำหนดค่าความเข้มข้นแกรฟีนออกไซด์ต่าง ๆ ดังนี้ 0.01 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการเก็บประจุโดยใช้วิธีไซคลิกโวลแทมเมตริก หรือเทคนิค CV ภายใต้สภาวะที่มีแสง UV จากรูปที่ 4.19 (a) และ (b) แสดงกราฟไซคลิกโวลแทมเมตริกของ ขั้วไฟฟ้า GOP1 และ GOP3 ตามลำดับ ในช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.2 ถึง 0.8 โวลต์ ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 10 ถึง 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในสภาวะที่มีแสง UV พบพิกที่แสดงการผันกลับได้ของปฏิกิริยา ออกซิเดชันและรีดักชันที่คล้ายคลึงกับตัวอย่างขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนดังรูปที่ 4.6 และพบว่า การกำหนดค่าความเข้มข้นที่แตกต่างกันในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน จะส่งผลให้ขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนมีค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากพื้นที่ใต้กราฟที่แตกต่างกัน และจากรูปที่ 4.19 (c) แสดงกราฟของไซคลิกโวลแทมเมตริกเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ GOP ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 10 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในสภาวะที่ไม่มีแสง พบว่า เมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น พื้นที่ใต้กราฟมีขนาดลดลง ส่งผลให้มีค่าการเก็บประจุลดลง



รูปที่ 4.19 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรีของขั้วไฟฟ้า (a) GOP1 และ (b) GOP3 ที่ 10 ถึง 100 mV/s และ (c) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ GOP ที่จำนวนรอบต่าง ๆ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ 10 mV/s ในสภาวะที่มีแสง UV

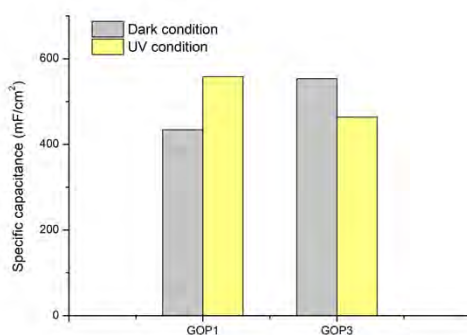
จากรูปที่ 4.20 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นและอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ต่าง ๆ จากเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ในสภาวะที่มีแสง UV พบว่าเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้า GOP1 และ GOP3 คำนวณจากค่าการเก็บประจุจากพื้นที่ใต้กราฟที่ 10 และ 100 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ได้เป็นร้อยละ 48.38 และ 51.28 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการแพร่ของไอออนเมื่อให้ความเร็วของความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้น โดย GOP3 แสดงถึง rate capacitance ที่สูงที่สุด



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นและอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ต่าง ๆ จากเทคนิค CV ในสภาวะที่มีแสง UV

4.2.4.3 การวิเคราะห์ผลของแสงต่อสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน

จากรูปที่ 4.21 แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP1 และ GOP3 ที่อัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ 10 มิลลิโวลต์ต่อวินาที จากเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสง UV พบว่า ค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP1 ภายใต้สภาวะที่มีแสง UV มีค่าการเก็บประจุเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสง และค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP3 ภายใต้สภาวะที่มีแสง UV มีค่าการเก็บประจุลดลง เมื่อเทียบกับภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงซึ่งอาจจะเกิดจากปริมาณของแกรฟีนที่เพิ่มขึ้นทำให้บดบังประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงของ PANi



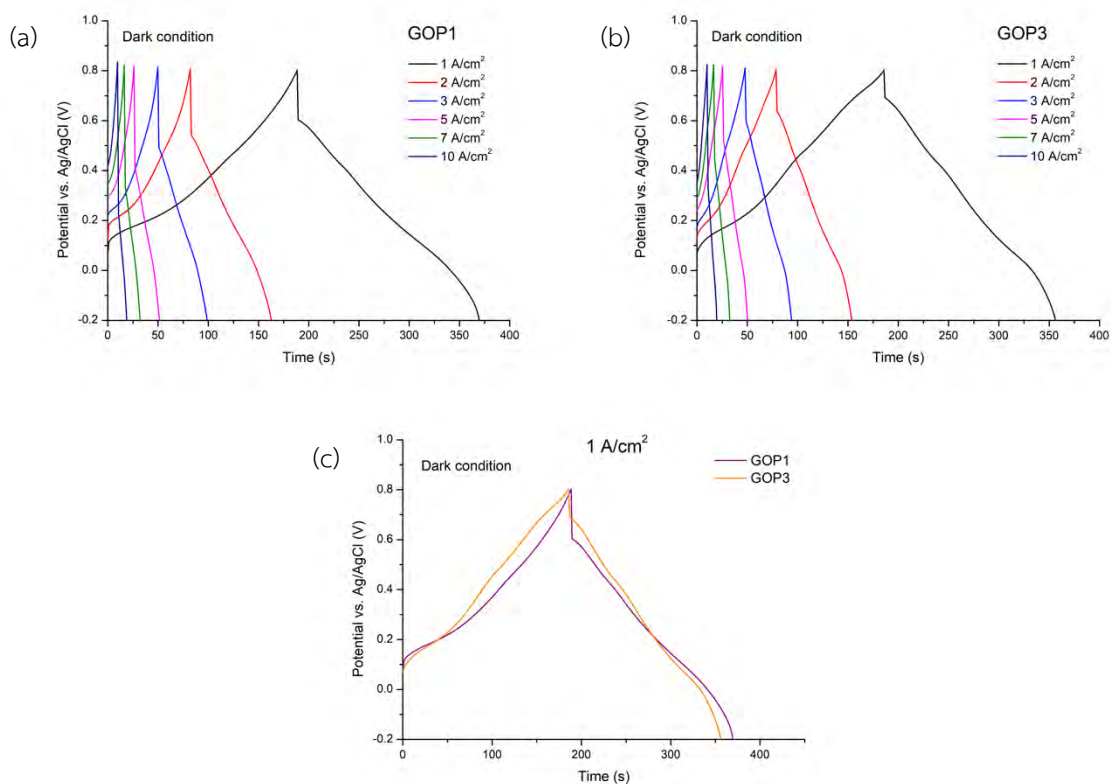
รูปที่ 4.21 แผนภูมิเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ 10 mV/s จากเทคนิค CV ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

4.2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ

4.2.5.1 การวิเคราะห์ในสภาวะที่ไม่มีแสง

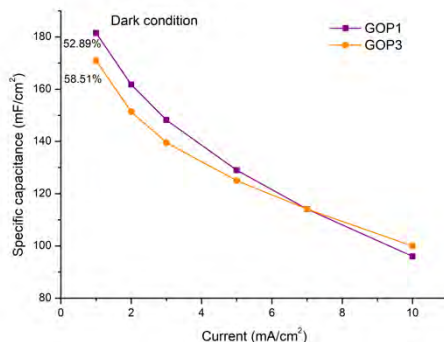
การศึกษาผลของความเข้มข้นในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนบนวัสดุ FTO glass ที่ส่งผลต่อค่าการเก็บประจุ โดยกำหนดค่าความเข้มข้นแกรฟีนออกไซด์ต่าง ๆ ดังนี้ 0.01 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการเก็บประจุโดยใช้เทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ หรือเทคนิค GCD ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสง จากรูปที่ 4.22 (a) และ (b) แสดงการอัดและคายประจุของขั้วไฟฟ้า GOP1 และ GOP3 ตามลำดับ ที่อัตราการความหนาแน่นกระแส 1, 2, 3, 5, 7 และ 10 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในช่วงความต่างศักย์ตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.8 โวลต์ ในสภาวะที่ไม่มีแสง พบว่า เมื่อความเข้มข้นแกรฟีนออกไซด์แตกต่างกันในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน ส่งผลให้ขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนมีค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากระยะเวลาในการอัดและคายประจุของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน และจากรูปที่ 4.22 (c) แสดงลักษณะการอัดและคายประจุเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ GOP ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมป์แปร์ต่อ

ตารางเซนติเมตร ในสถานะที่ไม่มีแสง พบว่า เมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น ระยะเวลาในการคายประจุของ
 ชั่วไฟฟ้าลดลง ส่งผลให้มีค่าการเก็บประจุลดลง



รูปที่ 4.22 ลักษณะการอัดและการคายประจุของชั่วคราวไฟฟ้า (a) GOP1 และ (b) GOP3 ที่ 1 ถึง 10 A/cm² และ
 (c) เปรียบเทียบชั่วคราวไฟฟ้าของ GOP ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ 1 A/cm² ในสถานะที่ไม่มีแสง

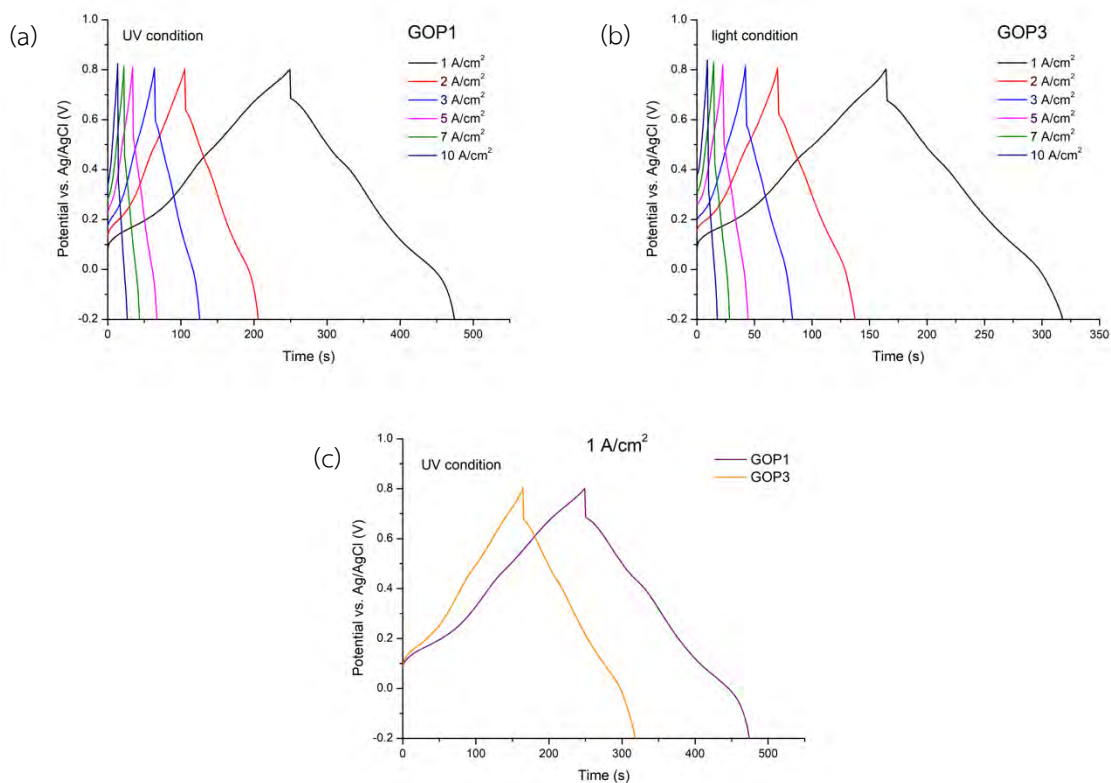
จากรูปที่ 4.23 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของชั่วคราวไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นและความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ จากเทคนิคัลวาโนสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ ในสถานะที่ไม่มีแสง พบว่า เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพต่อการให้กระแสของชั่วคราวไฟฟ้า GOP1 และ GOP3 คำนวณจากค่าการเก็บประจุจากระยะเวลาในการคายประจุที่ 1 และ 10 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ได้เป็นร้อยละ 52.89 และ 58.51 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการแพร่ของไอออนเมื่อให้ความเร็วของความต่างศักย์ที่เพิ่มขึ้น โดย GOP3 แสดงถึง rate capacitance ที่สูงที่สุด



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นและความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ จากเทคนิค GCD ในสถานะที่ไม่มีแสง

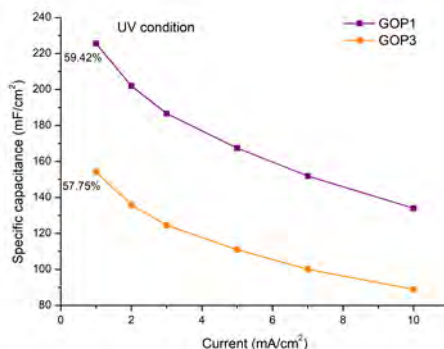
4.2.5.2 การวิเคราะห์ในสถานะที่มีแสง UV

การศึกษาผลของความเข้มข้นในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนบนวัสดุ FTO glass ที่ส่งผลต่อค่าการเก็บประจุ โดยกำหนดค่าความเข้มข้นแกรฟีนออกไซด์ต่าง ๆ ดังนี้ 0.01 และ 0.03 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการเก็บประจุโดยใช้เทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ หรือเทคนิค GCD ภายใต้สถานะที่มีแสง UV จากรูปที่ 4.24 (a) และ (b) แสดงการอัดและคายประจุของขั้วไฟฟ้า GOP1 และ GOP3 ตามลำดับ ที่อัตราความหนาแน่นกระแส 1, 2, 3, 5, 7 และ 10 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในช่วงความต่างศักย์ตั้งแต่ -0.2 ถึง 0.8 โวลต์ ในสถานะที่มีแสง UV พบว่า เมื่อความเข้มข้นแกรฟีนออกไซด์แตกต่างกันในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน ส่งผลให้ขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนมีค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากระยะเวลาในการอัดและคายประจุของขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน และจากรูปที่ 4.24 (c) แสดงลักษณะการอัดและคายประจุเปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ GOP ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ในสถานะที่มีแสง UV พบว่า เมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น ระยะเวลาในการคายประจุของขั้วไฟฟาลดลง ส่งผลให้มีค่าการเก็บประจุลดลง เนื่องจากรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ปรากฏเด่นชัดขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้นดังรูปที่ 4.15 ส่งผลให้รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์บดบังการการปฏิกิริยาของพอลิอะนิลีน



รูปที่ 4.24 ลักษณะการอัดและการคายประจุของขั้วไฟฟ้า (a) GOP1 และ (b) GOP3 ที่ 1 ถึง 10 A/cm² และ (c) เปรียบเทียบขั้วไฟฟ้าของ GOP1 ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ 1 A/cm² ในสภาวะที่มีแสง UV

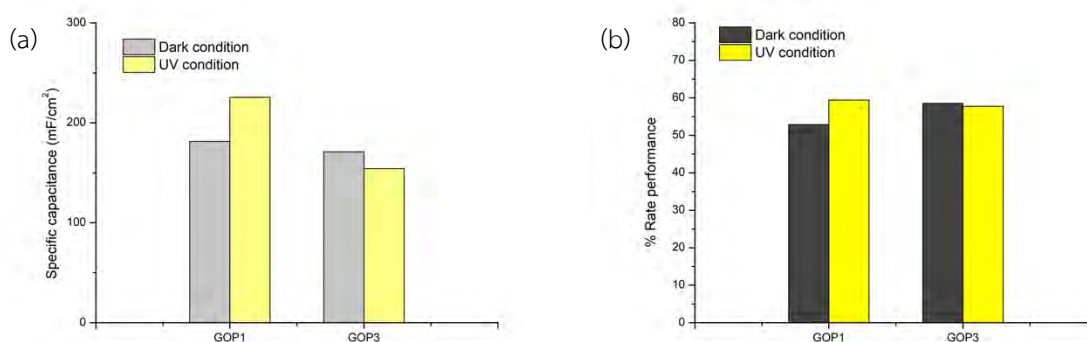
จากรูปที่ 4.25 แสดงกราฟเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นและความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ จากเทคนิคกลวาโนสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ ในสภาวะที่มีแสง UV พบว่า เมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพต่อการให้กระแสของขั้วไฟฟ้า GOP1 และ GOP3 คำนวณจากค่าการเก็บประจุจากระยะเวลาในการคายประจุที่ 1 และ 10 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร ได้เป็นร้อยละ 59.42 และ 57.75 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากข้อจำกัดการแพร่ของไอออนเมื่อให้กระแสที่เพิ่มขึ้น โดย GOP1 แสดงถึง rate capacitance ที่สูงที่สุด



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นและความหนาแน่นกระแสต่าง ๆ จากเทคนิค GCD ในสภาวะที่มีแสง UV

4.2.5.3 การวิเคราะห์ผลของแสงต่อสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน

จากรูปที่ 4.26 (a) แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP1 และ GOP3 ที่อัตราความหนาแน่นกระแส 1 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร จากเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสง UV พบว่า ค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP1 ภายใต้สภาวะที่มีแสง UV มีค่าการเก็บประจุเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสง และค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP3 ภายใต้สภาวะที่มีแสง UV มีค่าการเก็บประจุลดลง เมื่อเทียบกับภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสง และจากรูปที่ 4.26 (b) แสดงแผนภูมิเปรียบเทียบประสิทธิภาพต่อการให้กระแสของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ค่าประสิทธิภาพต่อการให้กระแสของขั้วไฟฟ้า GOP1 ภายใต้สภาวะที่มีแสง UV มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสง และค่าประสิทธิภาพต่อการให้กระแสของขั้วไฟฟ้า GOP3 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.26 แผนภูมิเปรียบเทียบ (a) ค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP และ (b) ประสิทธิภาพต่อการให้กระแสของขั้วไฟฟ้า GOP ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จากเทคนิค GCD ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้าวีดิวิตซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน จากเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่าเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP1 และ GOP3 จากค่าการเก็บประจุที่ความหนาแน่นกระแสเดียวกัน ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสง UV คำนวณค่าประสิทธิภาพการเก็บประจุ ได้เป็นร้อยละ 24.24 และ 16.19 ตามลำดับ โดยที่ GOP1 มีประสิทธิภาพการเก็บประจุเชิงแสงสูงกว่า GOP3 เนื่องมาจาก GOP1 ปรากฏโครงสร้าง nanorod ของพอลิอะนิลีนขนาดเล็กกว่าปกคลุมแผ่นวีดิวิตซ์แกรฟีนออกไซด์ ขณะที่ GOP3 ปรากฏแผ่นวีดิวิตซ์แกรฟีนออกไซด์เพิ่มขึ้นบนพื้นผิวและขนาดโครงสร้างพอลิอะนิลีนใหญ่ขึ้น ดังแสดงจากผลการทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.15 ดังนั้น GOP1 มีพื้นที่ผิวของพอลิอะนิลีนมากกว่า ส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพการเก็บประจุเชิงแสงสูงกว่า GOP3 และเมื่อเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุและ % Photo efficiency ของ GOP1 กับ PANi5 ในตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า GOP1 ให้ค่าการเก็บประจุสูงกว่า PANi5 เนื่องมาจากการทำงานร่วมกันของสองกลไกระหว่างพอลิอะนิลีนและแกรฟีนที่เรียกว่า synergistic effect รวมถึงพื้นที่ผิวที่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์มีมากขึ้น ส่งผลให้มีค่าการเก็บประจุสูงขึ้น แต่ GOP1 มีค่า % Photo efficiency น้อยกว่า PANi5 เนื่องจากการฝังตัวร่วมกันของพอลิอะนิลีนและแกรฟีนมีผลต่อการบดบังพื้นที่ผิวในการดูดกลืนแสงของพอลิอะนิลีนโดยตรง

ตารางที่ 4.2 ค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า GOP จากเทคนิค GCD ที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร

วัสดุ	ค่าการเก็บประจุ (mF/cm ²)		% Photo efficiency
	ไม่มีแสง	มีแสง UV	
GOP1	181.50	225.50	24.24
GOP3	151.30	175.80	16.19

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาหาภาวะที่เหมาะสมในการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้าของพอลิอะนิลีน และสารเชิงประกอบรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน และความเข้มข้นของแกรฟีนออกไซด์ที่เหมาะสม เพื่อให้มีสมบัติการเก็บประจุเชิงแสงที่ดีที่สุด โดยมีลำดับขั้นตอนดังนี้

1. ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนด้วยวิธีการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้วิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี บนวัสดุรองรับ FTO glass ภายใต้การใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือ 0.1M aniline/ 1.0M H₂SO₄ ที่อัตราการให้ศักย์ไฟฟ้า 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.5 โวลต์ เมื่อทำการทดสอบด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ ที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่า จำนวนรอบที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีนเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดเชิงแสง คือ 5 รอบ มีค่าการเก็บประจุไฟฟ้า 109.20 และ 208.70 ไมโครฟารัดต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสง UV ตามลำดับ และมีค่าประสิทธิภาพการเก็บประจุสูงถึงร้อยละ 91.12

2. ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าแกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนด้วยวิธีการฝังตัวทางเคมีไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรพอลิเมอไรเซชัน โดยใช้วิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี บนวัสดุรองรับ FTO glass ภายใต้การใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ คือ 0.1M aniline/ 1.0M H₂SO₄ ที่อัตราการให้ศักย์ไฟฟ้า 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ในช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า -0.5 ถึง 1.5 โวลต์ จำนวนรอบในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้า 5 รอบ เมื่อทำการทดสอบด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมป์แปร์ต่อตารางเซนติเมตร พบว่า ความเข้มข้นของแกรฟีนออกไซด์ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีนเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดเชิงแสง คือ 0.01 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าการเก็บประจุไฟฟ้าสูงถึง 181.50 และ 225.50 ไมโครฟารัดต่อตารางเซนติเมตร ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและมีแสง UV ตามลำดับ และมีค่าประสิทธิภาพการเก็บประจุเชิงแสงร้อยละ 24.24

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค Ultra violet -Visible Spectrophotometer (UV-VIS) เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy band gap) ระหว่างขั้วไฟฟ้าพอลิอะนิลีน และขั้วไฟฟ้ารีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/พอลิอะนิลีน

2. ศึกษาเสถียรภาพต่อรอบการใช้งานขั้วไฟฟ้า เพื่อเปรียบเทียบอายุการใช้งานว่ามีปริมาณมากน้อยเพียงใด

3. ในขั้นตอนการกระจายตัวแกรไฟีนออกไซด์ในสารละลายกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ด้วยเครื่องอัลตราโซนิค ควรทำที่อุณหภูมิต่ำเพื่อป้องกันการเกิดรีติวซ์แกรไฟีนออกไซด์
4. ในการขึ้นรูปขั้วไฟฟ้า ขั้นตอนการจุ่มวัสดุรองรับลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต้องควบคุมพื้นที่ให้คงที่เพื่อให้การคำนวณประสิทธิภาพการเก็บประจุไฟฟ้าไม่ผิดพลาดและเที่ยงตรง

เอกสารอ้างอิง

- [1] ภัสริฐรา แก้วพิจิตร, การเตรียมแมงกานีสไดออกไซด์บนผิวแมกซีน/แกรฟีนเจือไนโตรเจนและซัลเฟอร์ของข้าวแคโทดแบบเตอรีสังกะสีไอออน, 2019, 3-6.
- [2] มนตรี สว่างพุกฤษ, นาโนเทคโนโลยีนวัตกรรมของตัวเก็บพลังงานตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด, วิศวกรรมสารมก, 26 (85), 9-26.
- [3] ดร.ศิริกาญจน์ วิเศษสุวรรณภูมิ, แกรฟีนวัสดุ 2 มิติเพื่อนาคต, M.T.E.C. 2017, ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 65-70.
- [4] ยิ่งพิศ พรพัฒน์กุล, พอลิเมอร์นำไฟฟ้าพอลิอะนิลีนที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีดิสเพอร์ชันพอลิเมอร์โรเซชัน, J. KMUTNB, 21 (2011), 220-229.
- [5] J. Zhang, X. Zhao, Conducting polymers directly coated on reduced graphene oxide sheets as high-performance supercapacitor electrodes, The Journal Of Physical Chemistry C, 116 (2012), 5420–5426.
- [6] J. Yan, T. Wei, B. Shao, Z. Fan, W. Qian, M. Zhang, F. Wei, Preparation of a graphene nanosheet/polyaniline composite with high specific capacitance, Carbon 48 (2010), 487-493.
- [7] K. Zhang, L. Zhang, X. Zhao, J. Wu, Graphene/polyaniline nanofiber composites as supercapacitor electrodes, Chemistry of Materials Article, 22 (2010), 1392-1401.
- [8] H. Cong, X. Ren, P. Wang, S. Yu, Flexible graphene-polyaniline composite paper for high-performance supercapacitor, Energy & Environmental Science, 6 (2013), 1185-1191.
- [9] H. Li, M. Wang, G. Qi, Y. Xia, C. Li, P. Wang, M. Sheves, Y. Jin, Oriented bacteriorhodopsin/polyaniline hybrid bio-nanofilms as photo-assisted electrodes for high performance supercapacitors, Journal of Materials Chemistry A, 8(2020), 8268-8272.
- [10] Y. Yin, K. Feng, C. Liu, S. Fan, A Polymer Supercapacitor Capable of Self-Charging under Light Illumination, The Journal Of Physical Chemistry C, 119 (2015), 8488–8491.
- [11] กัณจน์ชญาณ์ พุงส์วย, พอลิอะนิลีน/เหล็กออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เจือไนโตรเจนคอมพอสิตเพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าตัวเก็บประจุยิ่งยวด, 2019, 92-102.