

การเตรียมและสมบัติของพอลิอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจลที่มีเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิลีน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND PROPERTIES OF POLYELECTROLYTE HYDROGEL CONTAINING
POLYANILINE COATED CARBON FIBER



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Petrochemistry and Polymer Science
Field of Study of Petrochemistry and Polymer Science

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2020

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเตรียมและสมบัติของพอลิอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจลที่มีเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิเอนิลีน
โดย	น.ส.จุฑามาศ เกษรทอง
สาขาวิชา	ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.นพิตา วิทยุธีระนันท์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.กาวิ ศรีกุลกิจ)	
.....	กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญญาพร บุญมหิทธิสุทธิ์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์อรอุษา สรวารี)	

จุฑาภักดิ์ เกษรทอง : การเตรียมและสมบัติของพอลิอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจลที่มีเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์. (PREPARATION AND PROPERTIES OF POLYELECTROLYTE HYDROGEL CONTAINING POLYANILINE COATED CARBON FIBER) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ภาวิ ศรีกุลกิจ

ในการศึกษานี้ ได้ทำการเคลือบพอลิแอนิไลน์ (PANi) ลงบนพื้นผิวเส้นใยคาร์บอน (CF) ผ่านการสังเคราะห์ทางเคมี ประการแรกทำการปรับพื้นผิวของเส้นใยคาร์บอน ด้วยปฏิกิริยาไนเตรชันโดยใช้กรดซัลฟิวริก/กรดไนตริก คาดว่าได้เส้นใยคาร์บอนที่ประกอบไปด้วยหมู่ไนโตร ตามด้วยปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์/แอมโมเนีย คาดว่าได้เส้นใยคาร์บอนที่ประกอบไปด้วยหมู่เอมีน จากนั้นทำการวิเคราะห์เบื้องต้นด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FTIR) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กลับพบว่าไม่มีหมู่ฟังก์ชันตามที่คาด โดยคาดว่าน่าจะมีสาเหตุจากพื้นที่ผิวของ CF ที่น้อยเกินไป จึงทำการบดเส้นใยคาร์บอนด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล และนำมาปรับพื้นผิวด้วยปฏิกิริยาไนเตรชันและรีดักชัน จากนั้นทำการเคลือบพอลิแอนิไลน์ที่อัตราส่วน 1 , 2 และ 3 เท่าของน้ำหนักผงเส้นใยคาร์บอนบนหมู่เอมีนโดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันพอลิเมอไรเซชันของแอนิไลน์ โดยมีแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต เป็นตัวริเริ่ม ซึ่งหมู่ฟังก์ชัน (CF, CF-NO₂, CF-NH₂ และ CF-PANi) ได้รับการยืนยันโดยการวิเคราะห์ FTIR และ SEM นอกจากนี้เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ (TGA) หลังจากการเคลือบพอลิแอนิไลน์บนผงเส้นใยคาร์บอนพบว่าน้ำหนักเพิ่มขึ้นถึง 40% จากนั้นนำเส้นใยคาร์บอนเคลือบพอลิแอนิไลน์มาทำการศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้า โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทม (CV) และกัลวานอสแตติกชาร์จ/ดิสชาร์จ (GCD) พบว่าค่าการเก็บประจุ ที่อัตราส่วน 1: 1 ของเส้นใยคาร์บอนต่อพอลิแอนิไลน์มีค่า 15.50 และ 63.92 ฟารัดต่อกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าเส้นใยคาร์บอน (0.51 และ 5.0 ฟารัด/กรัม) โดยจากผลของการทดสอบดังกล่าวยืนยันว่าการสังเคราะห์โดยการเคลือบ PANi ลงบนพื้นผิวของผงเส้นใยคาร์บอนประสบความสำเร็จ นอกจากนี้การเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนเตรียมได้จากพอลิสไตรีนซัลโฟเนต/ พอลิไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PSS/PDADMAC) สามารถนำไปใช้เป็นแผ่นกั้นกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าได้อย่างดี

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิ ลายมือชื่อนิสิต

เมอร์

ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6172401623 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORD: carbon fiber, polyaniline, polyelectrolyte hydrogel

Jutapak Kesornthong : PREPARATION AND PROPERTIES OF
POLYELECTROLYTE HYDROGEL CONTAINING POLYANILINE COATED CARBON
FIBER. Advisor: Assoc. Prof. KAWEE SRIKULKIT

Firstly, an attempt to coat polyaniline (PANI) on carbon fiber (CF) substrate through chemical synthesis was studied. In the first step, surface modification of the carbon fiber using sulfuric acid / nitric acid (nitration reaction) was carried out. However, the results was not found as expected, proving by FTIR and SEM analyses. Thereafter, CF was ground into powder using a ball mill for 12 h followed by surface modification (nitration and reduction reaction) Then, PANi was coated at a ratios of 1:1, 2:1 and 3:1 (based on CF powder). Analysis of modified CF powder by FTIR and SEM showed that functional groups as expected was found which was assigned to CF, CF-NO₂, CF-NH₂ and CF-PANi). In addition, TGA technique provided an information that % PANi add-on of up to 40% was achievable. Then, PANi coated CF were studied for an electrode performance using CV and GCD techniques. It was found that the capacitance values at 1: 1 CF-NH₂/PANi ratio exhibited 63.92 F /g (compared to the control (CF/PANi) recorded at 15.50 F/g). The results confirmed that the coating of PANi onto the modified CF-powder was successful. In addition, hydrogels from polyelectrolyte complexes were obtained by PSS and PDADMAC complexation method. The prepared hydrogel was applied to be solid separator for battery application. Its performance as a separator on CF-NH₂/PANi electrode showed that it exhibited better separator than control (paper).

Field of Study: Petrochemistry and
Polymer Science

Student's Signature

Academic Year: 2020

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จด้วยดีเนื่องจากได้รับคำปรึกษาและคำแนะนำทางวิชาการ รวมทั้งแนวทางในการดำเนินการ ตลอดจนเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ จากผู้เกี่ยวข้องตั้งรายนามต่อไปนี้ กราบขอบพระคุณ

1. รศ.ดร.กาวี ศรีกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำแนะนำทางวิชาการ ให้ความรู้และความเข้าใจในงานวิจัยที่ทำ ตลอดจนให้ความเอื้อเฟื้อในเรื่องการทดสอบและแนวทางในการแก้ไขปัญหา จนทำให้งานวิจัยฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์
2. รศ.ดร.นพิตา หิญาธิระนนท์ ที่สละเวลามาเป็นประธานสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำในขั้นตอนต่างๆ ของการสอบ และช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์
3. ผศ.ดร.อัญญาพร บุญมหิตินิสุทธิ์ ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำและช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์
4. รศ.ดร.อรอุษา สรวารี ที่สละเวลามาเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำ และช่วยตรวจสอบการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณบิดา มารดา และเพื่อนที่คอยเป็นกำลังใจ ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ แก่ผู้วิจัยจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย	3
บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์	5
2.1 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน	5
2.1.2 ตัวเก็บประจุ	5
2.1.3 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	7
2.1.3.1 ชนิดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	8
ตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น.....	9
ซูโดคาร์ปาซิเตอร์เตอร์.....	9
ตัวเก็บประจุไฮบริด	10
2.1.3.2 องค์ประกอบของตัวเก็บประจุยิ่งยวด	11
2.2 เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า.....	12
2.2.2 ขั้วไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้าเคมี.....	14
2.3 เส้นใยคาร์บอน	14

2.4 โพลีเมอร์นำไฟฟ้า	17
2.4.1 รูปแบบของโพลีเมอร์นำไฟฟ้า	19
2.4.1.1 π -Conjugated Linear polymers.....	19
2.4.1.2 Narrow band-gap polymers.....	20
2.4.1.3 π - Conjugated Linear oligomers.....	20
2.4.1.4 Conducting polymer composites.....	21
2.4.1.5 Nonconjugated Polymers containing pendant π -electron	21
2.4.1.6 Ionically Conducting Polymers (polymer/salt electrolytes).....	22
2.5 โพลีแอนิไลน์	22
2.5.1 การสังเคราะห์โพลีแอนิไลน์และอนุพันธ์.....	23
2.5.1.1 การสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาโพลีเมอร์ไรเซชันทางเคมี.....	23
2.5.1.2 การสังเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า	24
2.5.1.3 การสังเคราะห์โดยใช้แสง	25
2.5.1.4 การสังเคราะห์โดยใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่ง	25
2.6 โพลีอิเล็กโทรไลต์	25
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	32
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ	32
3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ.....	33
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	33
3.4.1 การเตรียมเส้นใยคาร์บอน.....	33
3.4.2 การตัดแปรรูปร่างเส้นใยคาร์บอนด้วยหมูฟงก์ชันเอมีน	34
3.4.3 การวิเคราะห์ผลการเตรียมเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการตัดแปรรูปร่าง	35

3.4.3.1	วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	35
3.4.3.2	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี	36
3.4.4	การเตรียมผงเส้นใยคาร์บอน.....	37
3.4.5	การดัดแปรผิวผงเส้นใยคาร์บอนด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน	38
3.4.6	การเคลือบด้วยพอลิเอนิลีนลงบนผิวของผงเส้นใยคาร์บอนด้วยเทคนิคออกซิเดชันพอลิเมอร์	39
3.4.7	การวิเคราะห์ผลการเตรียมผงเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนและเคลือบด้วยพอลิเอนิลีน.....	40
3.4.7.1	วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	40
3.4.7.2	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี	40
3.4.7.3	การวิเคราะห์ผลการดัดแปรผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนและการเคลือบด้วยพอลิเอนิลีนโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โดยใช้คุณสมบัติทางความร้อนของผงเส้นใยคาร์บอน ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์	40
3.4.7.4	วิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส (Potentiostat).....	41
3.4.8	การเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิเอเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน.....	44
3.4.9	การวิเคราะห์สมบัติความเป็นไฮโดรเจลอิเล็กโทรไลต์จากพอลิเอเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส (Potentiostat)	45
บทที่ 4	ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	48
4.1	ผลของการเตรียมเส้นใยคาร์บอน.....	49
4.2	ผลของการดัดแปรผิวผงเส้นใยคาร์บอนด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน	50
4.3	ผลของการวิเคราะห์ผลการเตรียมผงเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการดัดแปรผิว	52

4.3.1	ผลของการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	52
4.3.2	ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี .	53
4.4	ผลของการเตรียมผงเส้นใยคาร์บอน.....	54
4.5	ผลของการดัดแปรผิวผงเส้นใยคาร์บอนด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน	56
4.6	ผลของการเคลือบพอลิแอนิไลน์ลงบนผิวของผงเส้นใยคาร์บอนด้วยเทคนิคออกซิเดชันพอลิเมอโรเซชัน	57
4.7	ผลของการวิเคราะห์ผลการเตรียมผงเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนและเคลือบพอลิแอนิไลน์.....	57
4.7.1	ผลของการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	57
4.7.2	การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี.....	60
4.8	ผลของการวิเคราะห์ผลการดัดแปรผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนและการเคลือบพอลิแอนิไลน์โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โดยใช้คุณสมบัติทางความร้อนของผงเส้นใยคาร์บอน ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์.....	64
4.9	ผลของการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส	65
4.10	ผลของการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน	68
4.11	ผลการวิเคราะห์สมบัติความเป็นไฮโดรเจลอิเล็กโทรไลต์จากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส	69
บทที่ 5	สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	73
5.1	สรุปผลการทดลอง.....	73
5.1.1	ผลของการเตรียมเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ และไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน	73
5.1.2	ผลการศึกษาเส้นใยคาร์บอนเคลือบพอลิแอนิไลน์ชั้นขั้วอิเล็กโทรด และศึกษาตัวคั่นกลางจากไฮโดรเจลพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน.....	74
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	75

บรรณานุกรม..... 76

ประวัติผู้เขียน..... 80



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 สมบัติความแข็งแรงต่อแรงดึงของเส้นใยคาร์บอนที่ผลิตจากสารตั้งต้นชนิดต่าง ๆ..... 15

ตารางที่ 2.2 แสดงพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการเตรียม PE-PE..... 27

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ amino carbon fiber ต่อพอลิแอนิไลน์ (CF-NH₂/PANi).... 40

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าน้ำหนักของขั้วที่เคลือบด้วยวัสดุต่าง ๆ..... 43

ตารางที่ 4.1 พิก FTIR ที่ปรากฏของเส้นใยคาร์บอนดัดแปร ได้แก่เส้นใยคาร์บอน (CF), Nitro Carbon fiber (CF-NO₂) และ Amino Carbon fiber (CF-NH₂)..... 62

ตารางที่ 4.2 พิก FTIR ที่ปรากฏของเส้นใยคาร์บอนดัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ (CF-PANi/1:1, 1:2, 1:3) 62

ตารางที่ 4.3แสดงค่าการเก็บประจุของผงเส้นใยคาร์บอน, Amino Carbon fiber (CF-NH₂) และ ผงเส้นใยคาร์บอนดัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ (CF-PANi/1:1, 1:2, 1:3) ด้วยเทคนิค cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge - discharge (GCD)..... 68

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการเก็บประจุของผงเส้นใยคาร์บอนดัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ที่อัตราส่วน 1:1 (CF-PANi/1:1) โดยใช้ไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนที่ความหนา 1, 2, 3, 4, และ 5 ชั้น และกระดาษกรองเป็นตัวคั่นกลาง (Separator) ด้วยเทคนิค cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge - discharge (GCD)..... 71

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1	ชนิดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	8
รูปที่ 2.2	ตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น (a) ลักษณะการกระจายตัวของประจุขณะกำลังอัดประจุ (b) เมื่อประจุเต็ม (c) เมื่อคายประจุ	9
รูปที่ 2.3	แสดงตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดซูโดคาปาร์ปาซิเตอร์เตอร์	10
รูปที่ 2.4	แผนภาพแสดงองค์ประกอบของตัวเก็บประจุยิ่งยวด	12
รูปที่ 2.5	แสดงรูปแบบการถักแบบ 2x2 (Twill Weave).....	17
รูปที่ 2.6	แสดงรูปแบบการถักแบบ 1x1 (Plain Weave).....	17
รูปที่ 2.7	ค่าการนำไฟฟ้าของโลหะบางชนิดและพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ผ่านกระบวนการได้ป	19
รูปที่ 2.8	ตัวอย่างโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ในรูปแบบ π -Conjugated Linear polymers	20
รูปที่ 2.9	ตัวอย่างโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ในรูปแบบ π - Conjugated Linear oligomers..	21
รูปที่ 2.10	ตัวอย่างโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ในรูปแบบ Nonconjugated Polymers containing pendant π -electron.....	22
รูปที่ 2.11	โครงสร้างทางเคมีของพอลิเอินลีนแบบต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์.....	23
รูปที่ 2.12	การสังเคราะห์พอลิเอินลีนและอนุพันธ์ โดยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน.....	24
รูปที่ 2.13	การผสมสารละลายที่มีประจุบวกและลบเข้าด้วยกันทำให้เกิดการตกตะกอน	26
รูปที่ 2.14	ลักษณะโครงสร้าง PE-PE มีลักษณะเป็นชั้นบันได และแบบscrambled-egg.....	27
รูปที่ 2.15	ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุลบ คือ พอลิไซเตียมสไตรีนซัลโฟเนต (PSS) (a) และประจุบวก คือ พอลิไดอัลลิลไธมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) (b).....	28
รูปที่ 2.16	กระบวนการเกิดพอลิอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจล.....	29
รูปที่ 3.1	ผ้าคาร์บอนลายขัด	33
รูปที่ 3.2	ผ้าคาร์บอน ที่นำมาตัดให้ได้ขนาด 1X1 เซนติเมตร	34
รูปที่ 3.3	แสดงปฏิกิริยาเคมีของการเกิด CF-NO ₂	34
รูปที่ 3.4	แสดงปฏิกิริยาเคมีของการเกิด CF-NH ₂	35

รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ..	36
รูปที่ 3.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์	37
รูปที่ 3.7 แสดงการบดเส้นใยคาร์บอนด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (Ball mill).....	37
รูปที่ 3.8 ผงเส้นใยคาร์บอนที่ปนอยู่ในน้ำ	38
รูปที่ 3.9 ผงเส้นใยคาร์บอน	38
รูปที่ 3.10 แสดงปฏิกิริยาเคมีของการเกิด CF-NH ₂ /PANi	40
รูปที่ 3.11 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์	41
รูปที่ 3.12 เครื่องอัดไฮดรอลิก	43
รูปที่ 3.13 ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากนิกเกิลโพลิม	43
รูปที่ 3.14 การทำไดอะไลซิส	45
รูปที่ 3.15 ไฮโดรเจลของพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน	45
รูปที่ 3.16 แสดงการเตรียมการทดสอบไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนมาใช้ในการเตรียมเป็นตัวคั่นกลาง (Separator) ในวงจรไฟฟ้า	46
รูปที่ 3.17 แสดงการประกบขั้วทั้งสองข้าง โดยมีกระดาษกรอง หรือ กระดาษกรองที่เคลือบไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนคั่นกลาง	47
รูปที่ 4.1 เตรียมเส้นใยคาร์บอนจากผ้าคาร์บอน	49
รูปที่ 4.2 เส้นใยคาร์บอนที่มีความยาว 1 เซนติเมตร	50
รูปที่ 4.3 เส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการตัดแปรผิวด้วยปฏิกิริยาไนเตรชัน	51
รูปที่ 4.4 เส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการตัดแปรผิวด้วยปฏิกิริยารีดักชัน	51
รูปที่ 4.5 เส้นใยคาร์บอน	52
รูปที่ 4.6 เส้นใยคาร์บอนที่ผ่านปฏิกิริยาไนเตรชัน	53
รูปที่ 4.7 เส้นใยคาร์บอนที่ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน	53
รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมของเส้นใยคาร์บอน (CF), Nitro Carbon fiber (CF-NO ₂) และ Amino Carbon fiber (CF-NH ₂).....	54

รูปที่ 4.9 แสดงผงเส้นใยคาร์บอน (a) ผงเส้นใยคาร์บอนขณะเปียก (b) ผงเส้นใยคาร์บอนหลังจาก อบ.....	55
รูปที่ 4.10 แสดงการรวมกลุ่มของผงเส้นใยคาร์บอนหลังจากบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล.....	56
รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะของผงเส้นใยคาร์บอนหลังจากทำปฏิกิริยารีดักชัน.....	56
รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะของผงเส้นใยคาร์บอนหลังการเคลือบด้วยพอลิแอนิลีน.....	57
รูปที่ 4.13 แสดงสัญญาณวิทยาของผงเส้นใยคาร์บอนที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	59
รูปที่ 4.14 แสดงสัญญาณวิทยาของผงเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์หลังจากทำปฏิกิริยารีดักชัน.....	59
รูปที่ 4.15 แสดงสัญญาณวิทยาของผงเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์เคลือบพอลิแอนิลีน CF.NH ₂ /PANI (1:1), (e) CF.NH ₂ /PANI (1:2), และ (f) CF.NH ₂ /PANI (1:3).....	60
รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมของผงเส้นใยคาร์บอน (CF), Nitro Carbon fiber (CF-NO ₂) และ Amino Carbon fiber (CF-NH ₂).....	61
รูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมของผงเส้นใยคาร์บอนดัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิลีน (CF-PANI/1:1, 1:2, 1:3).....	61
รูปที่ 4.18 แสดงโครงสร้างของ CF-NO ₂	63
รูปที่ 4.19 แสดงโครงสร้างของ CF-NH ₂	63
รูปที่ 4.20 แสดงโครงสร้างของพอลิแอนิลีน.....	63
รูปที่ 4.21 แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผงเส้นใยคาร์บอน (CF), Amino Carbon fiber (CF- NH ₂) และ ผงเส้นใยคาร์บอนดัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิลีน (CF-PANI/1:1, 1:2, 1:3).....	65
รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส โดยเทคนิค cyclic voltammetry (CV) ที่อัตราสแกน 10 mV/s.....	66
รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส โดยเทคนิค.....	66
รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตสโดยเทคนิค Galvanostatic charge - discharge (GCD).....	67
รูปที่ 4.25 ไฮโดรเจลจากพอลิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน (a) ไฮโดรเจลในรูปที่ไหลได้ และ (b) ไฮโดรเจล ที่มีความแข็งแรงสูง.....	69

รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของไฮโดรเจลด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตสโดยเทคนิค cyclic voltammetry (CV)..... 70

รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของไฮโดรเจลด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตสโดยเทคนิค Galvanostatic charge - discharge (GCD)..... 71



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในสภาวะปัจจุบัน โลกกำลังเผชิญปัญหาเกี่ยวกับสภาวะเศรษฐกิจ สภาวะโลกร้อน และการขาดแคลนพลังงาน ประกอบกับความต้องการใช้พลังงานของประชากรโลกมีอัตราสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นทุกภาคส่วนจึงให้ความสำคัญต่อพลังงานทางเลือกและพลังงานสะอาดมากขึ้น โดยพลังงานที่ได้รับความสนใจคือพลังงานหมุนเวียน โดยการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้จำเป็นต้องมีตัวเก็บพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุ ซึ่งปัจจุบันตัวเก็บพลังงานดังกล่าวยังมีราคาแพง ไม่คงทน ไม่เพียงพอต่อความต้องการ เก็บพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักของตัวเก็บพลังงานได้ต่ำ สร้างปัญหาเรื่องขยะที่ทำลายยาก เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม จึงเป็นที่มาของการพัฒนาวัสดุที่สามารถเก็บพลังงาน และนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านสมบัติทางไฟฟ้า ซึ่งจากแนวความคิดนี้วัสดุที่เป็นที่นิยมในการนำมาเพิ่มประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุ ได้แก่ กราฟีน ผงคาร์บอน คาร์บอนนาโนทิวป์ หรือวัสดุที่มีความสามารถนำไฟฟ้าได้ดี แต่หากมองในมุมมองของวงการอุตสาหกรรม และวัสดุดังกล่าวที่ยกตัวอย่างข้างต้นยังไม่ได้ถูกเลือกใช้งานอย่างแพร่หลาย จึงเป็นที่มาของการเลือกวัสดุที่สนใจ คือเส้นใยคาร์บอน ซึ่งเป็นวัสดุที่ถูกนำมาใช้และได้รับความนิยมอย่างมาก ในวงการอุตสาหกรรม เครื่องบิน ยานยนต์ จักรยาน หรือแม้กระทั่งอุปกรณ์กีฬา เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงสูง มีน้ำหนักเบา และทนทาน ทำให้เส้นใยคาร์บอนถูกนำมาใช้กับงานทั่วไป เช่น พลังงานแบบพกพา แบตเตอรี่แบบชาร์จไฟและขั้วไฟฟ้าเซลล์ฟอสซิล เชื้อเพลิง การผลิตพลังงาน ใบกังหันลม และอิเล็กทรอนิกส์คอมโพสิตสำหรับรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งเส้นใยคาร์บอนเป็นวัสดุทางวิทยาศาสตร์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอย่างน้อยร้อยละ 90 [1] โดยเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับสมบัติทางด้านเชิงกลกับเหล็กกล้าในน้ำหนักที่เท่ากัน พบว่าเส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงกว่าเหล็กกล้า นั่นคือ หากต้องการผลิตชิ้นส่วนที่มีความแข็งแรงระดับหนึ่ง การเลือกใช้เส้นใยคาร์บอนจะให้น้ำหนักของชิ้นงานที่เบากว่าโลหะหลายเท่า โดยเส้นใยคาร์บอนมีสมบัติเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี ทนต่อการกัดกร่อนจากสารเคมีต่าง ๆ ด้วยสมบัติดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการเลือกวัสดุเส้นใยคาร์บอนมาใช้ในงานวิจัยนี้ แต่ด้วยสมบัติของเส้นใยคาร์บอนที่มีสมบัติเสริมแรงที่ดีแต่ไม่นำไฟฟ้า จึงก่อให้เกิดแนวความคิดการนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามาใช้เป็นตัวเคลือบเส้นใยคาร์บอน ซึ่งใน

ปัจจุบันได้มีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ที่เป็นสารกึ่งตัวนำหรือนำไฟฟ้าได้ ซึ่งมีลักษณะสายโซ่หลักที่ประกอบไปด้วยพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ ทำให้เกิดการคอนจูเกตของไพออิเล็กทรอนิกส์ โดยพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีการศึกษากันมาก ได้แก่ พอลิแอเซทิลีน (polyacetylene, PAc), พอลิไทโอฟีน (Polythiophene, PTh), พอลิพาราฟีนิลีน (Poly(p-phenylene), PpP), พอลิไพร์โรล (Polypyrole, PPy), และพอลิแอนิลีน (Polyaniline, PAni) ซึ่งพอลิแอนิลีน ถูกเลือกมาใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ได้รับความสนใจอย่างมาก มีสมบัตินำไฟฟ้าที่ดี สังเคราะห์ง่าย มีความเสถียรต่อสภาพบรรยากาศ ราคาถูก โดยข้อจำกัดของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า [2] คือมีสมบัติเชิงกลต่ำ และมีความอ่อนนุ่มเมื่อเทียบกับโลหะ จึงทำให้เกิดความเสียหายจากการขีดข่วนและขัดสีได้ง่าย โดยนอกเหนือจากพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่เป็นที่นิยมแล้ว ไฮโดรเจลนำไฟฟ้าก็กำลังได้รับความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถนำไปประยุกต์สำหรับใช้เป็นวัสดุตัวแทนสำหรับการทำงานของอวัยวะอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถพันงอได้ ซึ่งรูปแบบไฮโดรเจลที่รู้จักกันทั่วไปมักเป็นรูปแบบของไฮโดรเจลเชื่อมขวางชนิดไฮโดรฟิลิก มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่ายสามมิติ แต่ไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ งานวิจัยนี้จึงสนใจเตรียมพอลิอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจล เนื่องจากสารอิเล็กโทรไลต์ชนิดน้ำที่ใช้โดยทั่วไปในปัจจุบันจะอยู่ในรูปสารละลายกรด และมีข้อเสียคือ สามารถเกิดการรั่วไหล สึกกร่อน จากอันตรายของกรดได้ โดยพอลิอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจลเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวกและพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุลบ ซึ่งพอลิอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจลมีสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากไฮโดรเจลทั่วไป คือมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ด้วยตัวเองจากสมบัติความเป็นอิเล็กโทรไลต์ และนำมาประยุกต์ใช้เป็นตัวคั่นกลาง (Separator) ในวงจรไฟฟ้า

งานวิจัยนี้ นำเส้นใยคาร์บอนมาดัดแปรผิวโดยการเติมหมู่ฟังก์ชันเอมีนด้วยปฏิกิริยาไนเตรชัน และรีดักชัน และทำการวิเคราะห์ผลของการดัดแปรผิวเบื้องต้นด้วยการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) จากนั้นทำการเตรียมผงเส้นใยคาร์บอนและนำมาเติมหมู่ฟังก์ชันเอมีนด้วยปฏิกิริยาไนเตรชัน และรีดักชัน และจากนั้นทำการเคลือบพอลิแอนิลีนลงบนผงเส้นใยคาร์บอนดัดแปรด้วยเทคนิคออกซิเดชันพอลิเมอร์ไรเซชัน เพื่อให้พอลิแอนิลีนเกาะติดเป็นแผ่นฟิล์มบนพื้นผิวเส้นใย

คาร์บอน โดยหลังจากขั้นตอนนี้จึงทำการวิเคราะห์ผงเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการตัดแปรรวมด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนและกราฟฟอลิแอนิซีน ด้วยเทคนิคต่าง ๆ คือ วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี วิเคราะห์ผลการตัดแปรรวมด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนและการกราฟฟอลิแอนิซีนโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โดยใช้สมบัติทางความร้อนของผงเส้นใยคาร์บอน ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ (Thermo Gravimetric Analyzer) และทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส (Potentiostat) จากนั้นจึงทำการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน และศึกษาสมบัติความเป็นไฮโดรเจลอิเล็กโทรไลต์ของพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส (Potentiostat)

1.2 วัตถุประสงค์

1. เตรียมเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิซีน และไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน
2. ศึกษาเส้นใยคาร์บอนเคลือบพอลิแอนิซีนชั้นขั้วอิเล็กโทรด และศึกษาตัวคั่นกลางจากไฮโดรเจลพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิซีน และไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนที่สามารถนำไปประยุกต์ทางด้านสมบัติทางไฟฟ้า

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

การทดลองแบ่งออกเป็น ดังนี้

1. การตัดแปรรวมของเส้นใยคาร์บอนด้วยการเติมหมู่ฟังก์ชันเอมีน
2. การวิเคราะห์เส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการตัดแปรรวมและเคลือบด้วยพอลิแอนิซีน
 - (1) วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

- (2) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)
3. การเตรียมผงเส้นใยคาร์บอน
4. การดัดแปรผิวของผงเส้นใยคาร์บอนด้วยการเติมหมู่ฟังก์ชันเอมีน
5. การกราฟต์พอลิแอนิลีนลงบนผิวของผงเส้นใยคาร์บอนด้วยเทคนิคออกซิเดชันพอลิเมอไรเซชัน
6. การวิเคราะห์ผงเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนและเคลือบด้วยพอลิแอนิลีน

- (1) วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)
- (2) การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)
- (3) การวิเคราะห์ผลการดัดแปรผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนและการเคลือบด้วยพอลิแอนิลีนโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โดยใช้คุณสมบัติทางความร้อนของผงเส้นใยคาร์บอน ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ (Thermo Gravimetric Analyzer)
- (4) วิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat)

7. การเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน

การวิเคราะห์สมบัติความเป็นไฮโดรเจลอิเล็กโทรไลต์จากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat)

บทที่ 2

วารสารปริทรรศน์

2.1 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (energy storage devices) คือ อุปกรณ์ที่มีความสามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานในรูปแบบอื่น โดยสามารถกักเก็บพลังงานไว้เพื่อการใช้งานในเวลาที่ต้องการได้ โดยสามารถแปลงพลังงานที่กักเก็บไว้เป็นพลังงานไฟฟ้า ทั้งนี้การกักเก็บพลังงานที่ดีจะต้องลดความสูญเสียในการแปลงรูปพลังงานให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์กักเก็บพลังงานและจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่นิยม และใช้อย่างแพร่หลายที่สุดคือ แบตเตอรี่ โดยแบตเตอรี่เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีความหลากหลายของระดับในการกักเก็บพลังงาน และมีประเภทการใช้งานที่ค่อนข้างหลากหลายเช่นกัน ยกตัวอย่างเช่น แบตเตอรี่สำรอง เพื่อใช้เป็นแหล่งให้พลังงานไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก ได้แก่ โทรศัพท์เคลื่อนที่ คอมพิวเตอร์แบบพกพา หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่สำคัญนอกจากแบตเตอรี่ เช่น ตัวเก็บประจุ (capacitor) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ขนาดเล็กที่สามารถเก็บประจุได้ไม่สูงมากนัก มีความต้านทานไฟฟ้าสูง ตัวเก็บประจุประเภทนี้ไม่สามารถกักเก็บพลังงานได้ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการเก็บประจุได้สูงมาก [2]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.1.2 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (capacitor) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เก็บประจุและคายประจุ สามารถเก็บพลังงานในรูปแบบไฟฟ้า [3] ซึ่งในวงจรประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว แต่ละขั้วจะเก็บประจุชนิดตรงข้ามกัน และได้อิเล็กตรอนที่เป็นฉนวนเป็นตัวแยกคั่นกลาง โดยในการเก็บประจุจะเป็นการเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่ขั้วไฟฟ้า เมื่อนำแบตเตอรี่ต่อกับตัวเก็บประจุจะทำให้อิเล็กตรอนจากขั้วลบของแบตเตอรี่เข้าไปรวมที่ขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดเป็นประจุลบ และผลักอิเล็กตรอนของขั้วไฟฟ้าตรงข้าม เมื่ออิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าถูกผลักจะทำให้เหลือประจุบวกมากกว่าประจุลบ ยิ่งอิเล็กตรอนถูกผลักออกไปมากเท่าไร ขั้วไฟฟ้านั้นก็จะยิ่งบวกมากขึ้น และเมื่อตัวเก็บประจุที่เก็บประจุไว้แล้วหากไม่มีการต่อขั้วตัวเก็บประจุอิเล็กตรอนจะคง

อยู่ที่ขั้วไฟฟ้า แต่เมื่อมีการต่อครบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ก็จะวิ่งจากขั้วไฟฟ้าทางด้านลบไปครบวงจรที่ขั้วไฟฟ้าบวกทันที เรียกว่า การคายประจุ

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการเก็บประจุ

1. พื้นที่หน้าตัดของสารตัวนำที่เป็นขั้วไฟฟ้า ถ้าสารตัวนำมีพื้นที่หน้าตัดมากจะสามารถเก็บประจุได้มากกว่า หากสารตัวนำมีพื้นที่หน้าตัดน้อยจะมีความสามารถในการเก็บประจุได้น้อย จะเห็นได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปตัวเก็บประจุมีหลายขนาด โดยตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะเก็บประจุได้มากเพราะมีพื้นที่หน้าตัดมาก
2. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยถ้าขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีระยะห่างน้อย จะสามารถเก็บประจุได้มากกว่าขั้วไฟฟ้าที่มีระยะห่างระหว่างกันมาก
3. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เป็นค่าแสดงถึงความสามารถการเกิดของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อนำวัสดุต่างชนิด โดยค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกแต่ละตัวจะแตกต่างกันออกไป ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ใช้ไดอิเล็กตริกต่างกัน ถึงแม้จะมีขนาดเท่ากันแต่ค่าความจุในการเก็บประจุจะแตกต่างกัน โดยไดอิเล็กตริกที่สูญญากาศจะมีประสิทธิภาพน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น และการจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้ามากเกินไปอาจทำให้ไดอิเล็กตริกเสียสภาพจากฉนวนกลายเป็นตัวนำได้โดยจากปัจจัยที่มีผลต่อค่าการเก็บประจุที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น สามารถคำนวณค่าการเก็บประจุในตัวเก็บประจุได้ จากสมการ 2.1

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d}$$

2.1

เมื่อ C = ค่าการเก็บประจุ

ϵ = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

A = พื้นที่หน้าตัดของสารตัวนำที่เป็นขั้วไฟฟ้า

d = ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

ในระยะแรก ตัวเก็บประจุมีความสามารถในการเก็บประจุที่น้อยมากระดับไมโครฟารัด และต่อมาได้มีการพัฒนาตัวเก็บประจุให้มีความสามารถในการเก็บประจุที่มากขึ้น [4] ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลติก (electrolytic capacitors) ตัวเก็บประจุชนิดนอนอิเล็กโทรไลติก (non-electrolytic capacitors) และตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor)

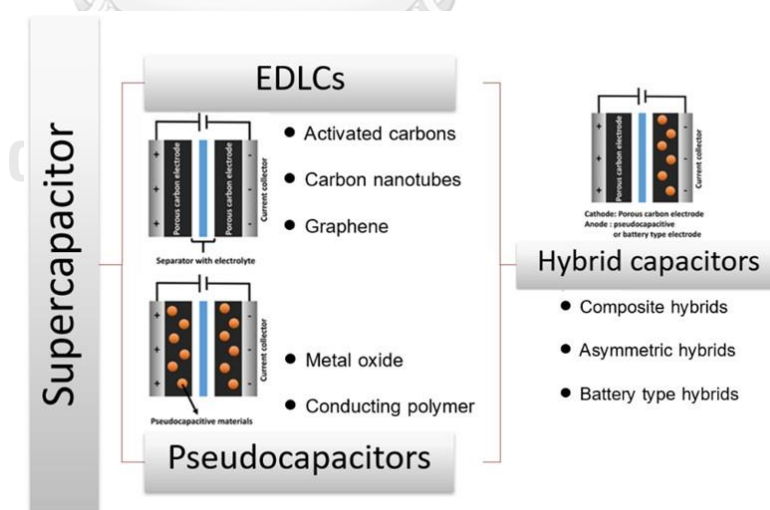
2.1.3 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor) หรือที่เรียกอีกชื่อว่าตัวเก็บประจุเคมีไฟฟ้า (electrochemical capacitor) เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุ อุปกรณ์ชนิดนี้มีสมบัติพิเศษตรงที่มีค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) สูงกว่าตัวเก็บประจุอื่น ๆ มากถึง 100-10,000 เท่า อีกทั้งยังสามารถอัดและคายประจุให้เต็มได้ภายในเวลาอันรวดเร็วเพียง 1-10 วินาที สามารถที่จะอัดและคายประจุได้มากกว่า 500,000 รอบ มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แรงกระแทก และการสั่นสะเทือน องค์ประกอบของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรดจากสารตัวนำไฟฟ้าที่มีพื้นที่ผิวมาก แผ่นกั้นระหว่างขั้ว (separator) ที่บางมากและไม่นำไฟฟ้าขนาบอยู่ในวงจร เพื่อให้ไอออนสามารถผ่านได้เช่นเดียวกับแบตเตอรี่ และสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) สารที่นิยมเช่น acetonitrile หรือ polycarbonate [5] หลักการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เมื่อให้ความต่างศักย์หรือกระแสไฟฟ้ากับขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้าง ประจุที่เป็นบวกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะถูกดึงดูดเข้าหาขั้วลบของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และประจุที่เป็นลบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ก็จะเคลื่อนที่ไปหาขั้วบวก โดยทั่วไปค่าการเก็บประจุจะขึ้นกับการเคลื่อนที่ การดูดซับทางกายภาพระหว่างไอออนกับพื้นที่ผิวของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า และจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ดังนั้นหากขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ผิวและมีปริมาตรรูพรุนสูงเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการเก็บประจุ เนื่องจากประจุของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถที่จะแทรกตัวเข้าไปในรูพรุนได้ จึงมีจุดดึงดูดกันระหว่างประจุบวกและประจุลบเพิ่มขึ้น โดยวัสดุที่นิยมนามาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า คือ ผงถ่านกัมมันต์ (activated carbon) คาร์บอนแบล็ค (carbon black) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) เส้นใยคาร์บอนแบบผืนผ้า (woven carbon fiber cloth) เป็นต้น และวัสดุที่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์จะสามารถลดเวลาในการเก็บและคายประจุลง ส่งผลให้สามารถให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้มีกำลังไฟฟ้าที่

สูง ปัจจุบันได้นำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ใช้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่าง ๆ ในบางสถานการณ์ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถนำมาใช้ทดแทน อุปกรณ์แบตเตอรี่เคมีไฟฟ้าแรงดันต่ำได้ ทั้งนี้เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่สูงกว่าแบตเตอรี่และมีความสามารถในการเก็บพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักที่สูงเมื่อเทียบกับตัวเก็บประจุทั่วไป [6] [7] ในปัจจุบันตัวเก็บประจุยิ่งยวดกำลังเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวาง จึงได้มีการวิจัยและพัฒนากันอย่างต่อเนื่อง

2.1.3.1 ชนิดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

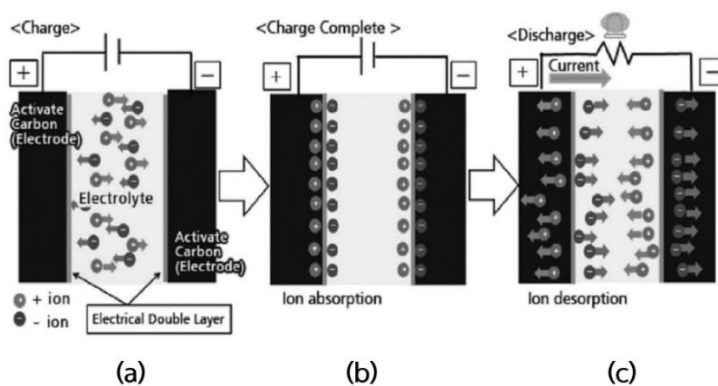
ตัวเก็บประจุแบ่งเป็นสองชนิด [8] ชนิดแรก อีดีแอลซี (EDLC, electrochemical double layer capacitor) หรือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีสองชั้น โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะถูกดูดซับสองชั้นบนขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ชนิดที่สอง คือ ซูโดคาร์ปาซิเตอร์ (Pseudocapacitors) จะเก็บประจุบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้าเช่นเดียวกับอีดีแอลซีและมีถ่ายเทอิเล็กตรอน หรือปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดขึ้นภายในวัสดุที่ถูกใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ส่งผลให้ซูโดคาร์ปาซิเตอร์สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้สูงกว่าอีดีแอลซี



รูปที่ 2.1 ชนิดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น

โดยหลักการทำงานคือ ประจุจะถูกเก็บโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์สู่ขั้วไฟฟ้าที่เกิดจากการให้ศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน และอาศัยการดูดซับทางกายภาพบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า หรือใช้แต่แรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic charge) ระหว่างประจุต่างขั้วกัน โดยไม่อาศัยปฏิกิริยาทางเคมีในการกักเก็บพลังงาน และตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นนิยมใช้วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบและเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวมาก และรูพรุนสูง เช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ ผงถ่านกัมมันต์ และแกรไฟิน เป็นต้น โดยการเก็บประจุไฟฟ้าเคมีทั้งสองชั้น ชั้นในเรียกว่า อินเนอร์เฮล์มโฮลทซ์ (inner Helmholtz) และชั้นนอกเรียกว่า เอาเตอร์เฮล์มโฮลทซ์ (outer Helmholtz)



รูปที่ 2.2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น (a) ลักษณะการกระจายตัวของประจุขณะกำลังอัดประจุ (b) เมื่อประจุเต็ม (c) เมื่อคายประจุ

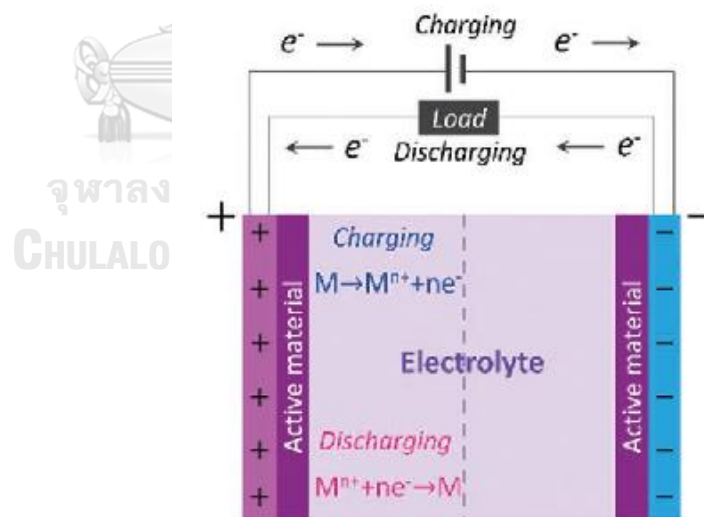
ซูโดคาปาซิเตอร์

ซูโดคาปาซิเตอร์ (pseudo capacitor) จะมีการเก็บประจุไฟฟ้าได้สูงกว่าแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบสองชั้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการเก็บประจุแบบซูโดคาปาซิเตอร์จะสามารถเก็บประจุได้ 2 แบบคือ การเก็บประจุไฟฟ้าที่ผิวแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบสองชั้น และการเก็บประจุไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยา

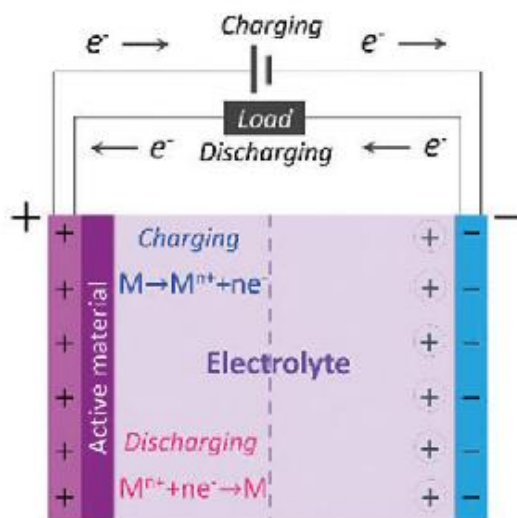
เคมี หรือปฏิกิริยารีดอกซ์อย่างรวดเร็วที่ผิวของโลหะออกไซด์ โดยจะเพิ่มความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (nominal voltage) ของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ส่งผลให้ซูโดคาปาซิเตอร์สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้สูงกว่าแบบตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น โดยวัสดุที่นำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือโลหะออกไซด์ เช่น ไททาเนียมออกไซด์ แมงกานีสออกไซด์ และโคบอลต์ออกไซด์ เป็นต้น และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เช่น พอลิอะเซทิลีน พอลิพาราฟินิลีน พอลิพีนิลีนซิลไฟด์ พอลิไพร์โรล พอลิไฮโอฟิน และพอลิแอนิลีน เป็นต้น

ตัวเก็บประจุไฮบริด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดไฮบริด (hybrid) เป็นตัวเก็บประจุที่มีการผสมผสานเทคโนโลยีตัวเก็บประจุแบบสองชั้นและซูโดคาปาซิเตอร์ทำงานร่วมกัน



รูปที่ 2.3 แสดงตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดซูโดคาปาซิเตอร์เตอร์

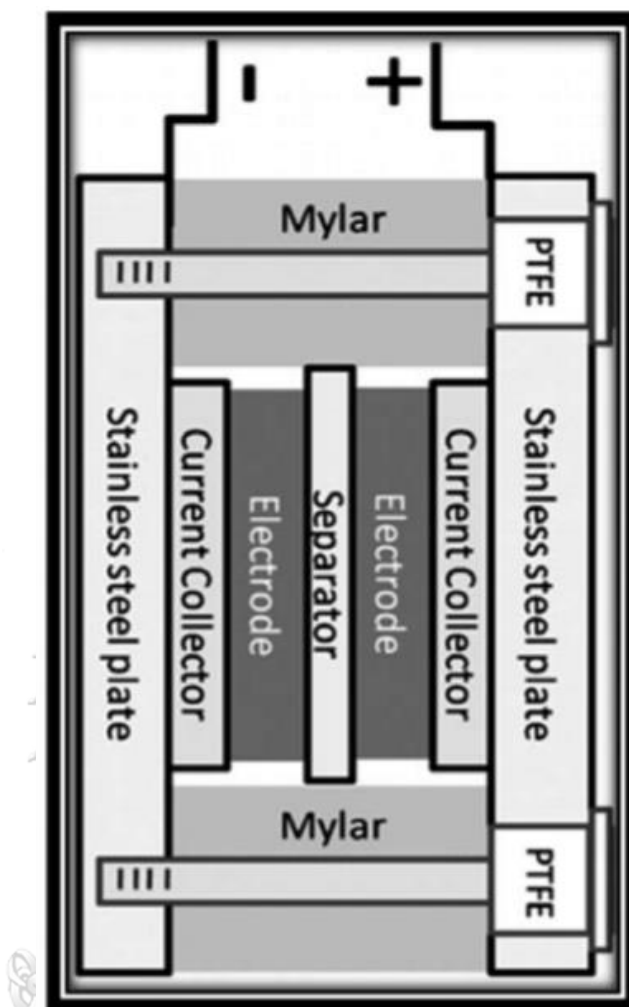


รูปที่ 2.4 แสดงตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดไฮบริด

2.1.3.2 องค์ประกอบของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดประกอบไปด้วยส่วนต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4

1. ขั้วไฟฟ้า (Electrodes) ที่ทำมาจากวัสดุ ที่สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้สูง เช่น กราฟีน แมงกานีสออกไซด์และ พอลิแอนิลีน เป็นต้น
2. ตัวแยกขั้วไฟฟ้า (Separators) ส่วนใหญ่ จะต้องดูดซับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้และไม่นำไฟฟ้า เช่น กระดาษใย และพอลิโพรพิลีน
3. ตัวเก็บกระแส (Current collectors) ต้องนำไฟฟ้าได้ดีราคาถูก เช่น กราไฟต์
4. ฉนวนป้องกันการรั่วซึมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น ไมลาร์ (Mylar)
5. แผ่นโลหะนำไฟฟ้า หุ้มส่วนประกอบต่าง ๆ ทั้งสาม เช่น เหล็กกล้าไม่เป็นสนิม



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงองค์ประกอบของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

2.2 เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า

พื้นฐานของเคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า [9] คือ ปฏิกิริยารีดอกซ์ หรือออกซิเดชัน-รีดักชัน ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นโดยมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากสารหนึ่งไปยังสารอีกหนึ่ง สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ โดยวัดสมบัติทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดอกซ์ ภายในเซลล์ไฟฟ้าเคมี (Electrochemical cell) ค่าทางไฟฟ้าที่วัดได้นั้นมีความสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ซึ่งเซลล์ไฟฟ้าเคมี คือ วงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า (Electrode) สองขั้ว จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่งทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอน เรียกว่า ขั้วแอโนด (anode) หรือครึ่งเซลล์แอโนดิก (Anodic half-cell) และอีกขั้วหนึ่งทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน เรียกว่า ขั้วแคโทด (Cathode) หรือครึ่งเซลล์แคโทดิก (Cathodic half-cell) ส่วนประกอบของเซลล์ไฟฟ้าเคมีทั่วไป ประกอบด้วย

1. สารละลายตัวอย่าง หรือสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ สารตัวอย่างจะต้องอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้
2. ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ทำหน้าที่เป็นขั้วที่ให้กระแสไฟฟ้าผ่านเข้าและออกจากเซลล์ไฟฟ้าเคมี โดยทั่วไปขั้วไฟฟ้าจะประกอบด้วยสองส่วน คือตัวนำไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic conductor) ได้แก่ ขั้วโลหะนำไฟฟ้า และตัวนำไฟฟ้าอิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic conductor) ได้แก่ สารละลายอิเล็กโทรไลต์
3. อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้า อาจเป็นการตรวจวัดศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า

เซลล์ไฟฟ้าเคมี มีด้วยกันสองชนิด ได้แก่ เซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) และเซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) โดยเซลล์กัลวานิก (Galvanic cell) คือ เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เปลี่ยนปฏิกิริยาเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้เอง กระแสที่เกิดขึ้นเป็นผลจากปฏิกิริยารีดอกซ์ และคงมีอยู่ตลอดเท่าที่องค์ประกอบทั้งหมดยังคงมีอยู่ เซลล์อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytic cell) คือ เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เกิดปฏิกิริยาทางเคมีได้ เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้าจากภายนอก

เคมีวิเคราะห์เชิงไฟฟ้า แบ่งเป็น 2 เทคนิคหลัก คือ

1. โพลแทนซีอเมตรี (Potentiometry) เป็นเทคนิคที่สารตัวอย่างสามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เองอย่างต่อเนื่องที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าโดยไม่ต้องอาศัยแหล่งพลังงานจากภายนอก ดังนั้น เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้จึงเป็นแบบกัลวานิก โดยสภาวะการทดลองเป็นสภาวะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์จากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสารละลายตัวอย่าง ทำให้ได้พลังงานในรูปศักย์ไฟฟ้าซึ่งสามารถวัดได้ และศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้จะมีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายตัวอย่าง
2. โวลแทมเมตรี (Voltammetry) เป็นเทคนิคที่ให้พลังงานไฟฟ้าในรูปศักย์แก่วงจร เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่าง ดังนั้น การจัดเซลล์ของวงจรเป็นแบบเซลล์อิเล็กโทรไลต์ และการไหลของกระแสอยู่ภายใต้สภาวะการเกิดโพลาริเซชันที่ขั้วไฟฟ้า โดยข้อมูลของการวิเคราะห์ที่ได้จากการวัดกระแส ณ ศักย์ไฟฟ้าต่าง ๆ ที่ให้กับวงจร

2.2.2 ขั้วไฟฟ้าในเซลล์ไฟฟ้าเคมี

ขั้วไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบหนึ่งในเครื่องเซลล์ไฟฟ้าเคมี ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปวงจรจำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ขั้ว คือขั้วแอโนด และขั้วแคโทด ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะมีหน้าที่แตกต่างกัน ขั้วไฟฟ้าหนึ่งใช้เป็นเพียงขั้วที่ต่อให้ครบวงจร เรียกขั้วไฟฟ้านี้ว่า ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode) ขั้วไฟฟ้านี้มักถูกต่อไว้เป็นแอโนด ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงต้องมีสมบัติเฉพาะตัวคือ มีค่าศักย์ไฟฟ้าที่แน่นอน ไม่แปรผันตามการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าในวงจร ไม่ขึ้นกับส่วนประกอบของสารตัวอย่าง ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงต้องมีส่วนประกอบคงตัวไม่เปลี่ยนแปลงง่ายเมื่อเก็บไว้และไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ในสารละลายอันเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่างจะไม่มีผลต่อศักย์ไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าอ้างอิง อีกขั้วไฟฟ้าหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นแคโทดของเซลล์ เรียกว่า ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode) หรือขั้วไฟฟ้าชี้บอก (Indicating electrode) ลักษณะเฉพาะตัวของขั้วไฟฟ้าใช้งานคือต้องสามารถตอบสนองอย่างรวดเร็วและสม่ำเสมอต่อการแปลงความเข้มข้นของไอออนหรือกลุ่มไอออนของสารที่วิเคราะห์ ในบางเทคนิคจำเป็นต้องมีขั้วไฟฟ้าต่อเข้ากับวงจร 3 ขั้ว เช่น เทคนิคการวิเคราะห์โวลแทมเมตรี โดยเรียกขั้วไฟฟ้าที่เพิ่มมานี้ว่า ขั้วไฟฟ้าช่วย (Auxiliary electrode) หรือขั้วไฟฟ้าวร่วม (Counter electrode) ขั้วไฟฟ้าช่วยนี้มีหน้าที่ช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอนหรือกระแสไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าใช้งานโดยไม่ต้องผ่านขั้วไฟฟ้าอ้างอิงของวงจร เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมีของสารตัวอย่างที่ขั้วไฟฟ้าจุ่มอยู่ โดยขั้วไฟฟ้าช่วยไม่มีส่วนเกี่ยวข้องหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงใด ๆ เกิดขึ้นในขณะเกิดปฏิกิริยาของสารตัวอย่างระหว่างวิเคราะห์ ขั้วไฟฟ้าช่วยจึงมักมีพื้นผิวมาก ๆ เพื่อให้นำไฟฟ้าได้ดี ขั้วทั้งสามคือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง ขั้วไฟฟ้าใช้งาน และขั้วไฟฟ้าช่วย ทำหน้าที่ในวงจรเซลล์ไฟฟ้าเคมีต่างกัน ทั้งนี้เพราะส่วนประกอบที่ใช้ในการทำขั้วไฟฟ้าไม่มีเหมือนกัน ขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน

2.3 เส้นใยคาร์บอน

เส้นใยคาร์บอนหรือเส้นใยกราไฟต์ ได้จากการเกิดปฏิกิริยากราไฟต์เซชัน (Graphitization) ทำให้โมเลกุลของคาร์บอนเกิดเป็นโครงสร้างผลึกหกเหลี่ยม (Hexagonal Crystalline Structure) ขึ้นบางส่วน และความแข็งแรงของเส้นใยคาร์บอนจะแปรผันตรงกับเปอร์เซ็นต์ของกราไฟต์ โดยค่าความแข็งแรงของเส้นใยคาร์บอนมากที่สุดที่น่าจะเป็นไปได้คือ

100 จิกะปาสคาล ซึ่งค่าความแข็งแรงทางทฤษฎีของผลึกเดี่ยวของแกรไฟต์คือ 150 จิกะปาสคาล ซึ่งมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงของวัสดุทั้งหมด โดยเส้นใยคาร์บอนทางการค้าจะมีความแข็งแรงสูงสุดที่ประมาณ 7 จิกะปาสคาล [9] ทั้งนี้เส้นใยคาร์บอนเป็นเส้นใยที่มีการใช้งานเป็นเส้นใยเสริมแรงในวัสดุอย่างแพร่หลาย เนื่องจากเส้นใยคาร์บอนมีความแข็งแรงจำเพาะสูง ในกระบวนการสังเคราะห์เส้นใยคาร์บอนนั้น สารตั้งต้นที่ใช้จะเป็นสารประเภทอินทรีย์สารที่มีเปอร์เซ็นต์ของคาร์บอนสูง โดยแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1. Polyacrylonitrile (PAN), 2. Pitch (isotropic, mesophase) 3. Rayon ซึ่งสารตั้งต้นที่ได้รับความนิยมสูงสุดคือ PAN เนื่องจากมีปริมาณคาร์บอนสูง มีความบริสุทธิ์สูง ทำให้ได้เส้นใยที่มีความแข็งแรงสูง และได้เส้นใยที่ยาว โดย ตารางที่ 2.1 แสดงค่าความแข็งแรงของเส้นใยคาร์บอนที่ได้จากสารตั้งต้นชนิดต่าง ๆ [10]

ตารางที่ 2.1 สมบัติความแข็งแรงต่อแรงดึงของเส้นใยคาร์บอนที่ผลิตจากสารตั้งต้นชนิดต่าง ๆ

Precursor	Tensile Strength (GPa)	Tensile Modulus (GPa)	Elongation at break (%)
PAN	2.5-7.0	250-400	0.6-2.5
Pitch	1.5-3.5	200-800	0.3-0.9
Rayon	~1	~50	~2.5

กระบวนการผลิตเส้นใยคาร์บอน ประกอบด้วยหลายวิธี โดยจะขอกกล่าวถึงวิธีที่นิยมใช้โดยทั่วไป มี 3 วิธี ดังต่อไปนี้

1. Orientation by stretching

กระบวนการผลิตแบบ Orientation by stretching ใช้ PAN เป็นวัสดุเริ่มต้น โดยการดึง bulk PAN ให้เป็นเส้นใยในลักษณะที่สายโซ่-โมเลกุลขนานกันกับแกนของเส้นใย และให้ความร้อนแก่เส้นที่ดึงในบรรยากาศออกซิเจน เพื่อให้หมู่นาไดรด์ทำปฏิกิริยา เกิดเป็นพอลิเมอร์แบบขั้นบันได ซึ่งประกอบด้วยแถวของวงแหวนคาร์บอน 6 ตัว จนกระทั่งเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลขั้นบันได และเมื่อ PAN ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วจะได้กราไฟต์ จากนั้นนำไปผ่านขั้นตอนการให้ความร้อนขั้นสุดท้าย ซึ่งจะมีผลต่อคุณสมบัติที่ได้ของเส้นใย โดยวิธีนี้สามารถใช้ Rayon เป็นสารตั้งต้นได้

2. Orientation by Spinning

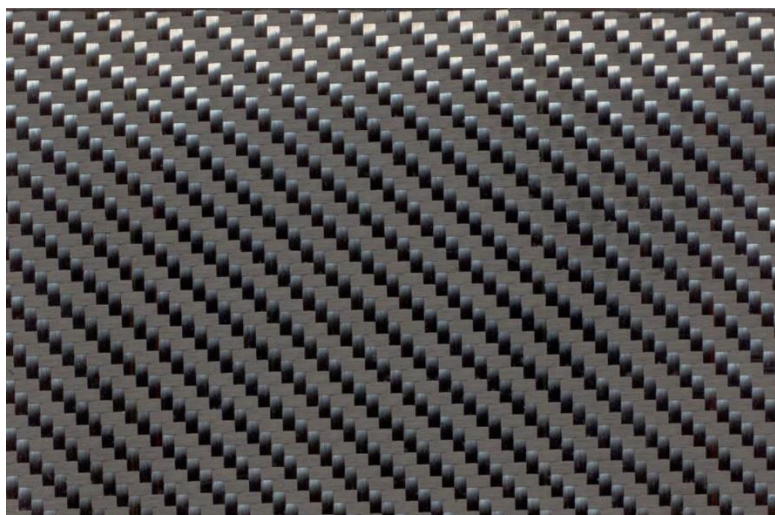
กระบวนการผลิตเส้นใยคาร์บอนแบบใช้ Pitch เริ่มค้นพบโดย Otani ในประเทศญี่ปุ่น โดยคาร์บอนที่มีลักษณะเส้นใยแบบวิสเกอร์ (Whisker) พบครั้งแรกขณะเตรียมคาร์บอน โดยให้ความร้อนแกผงลิกนินในอากาศที่อุณหภูมิ 500 °C เมื่อผงลิกนินหลอมตัว จะนำไปปั่นเป็นเส้นใยและทำให้คงตัวที่อุณหภูมิประมาณ 300 °C แล้วนำไปเผาต่อในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 1000 °C จะผ่านขั้นตอนคาร์บอนไนซ์ได้เส้นใยที่ต้องการ

3. Orientation During Graphitization

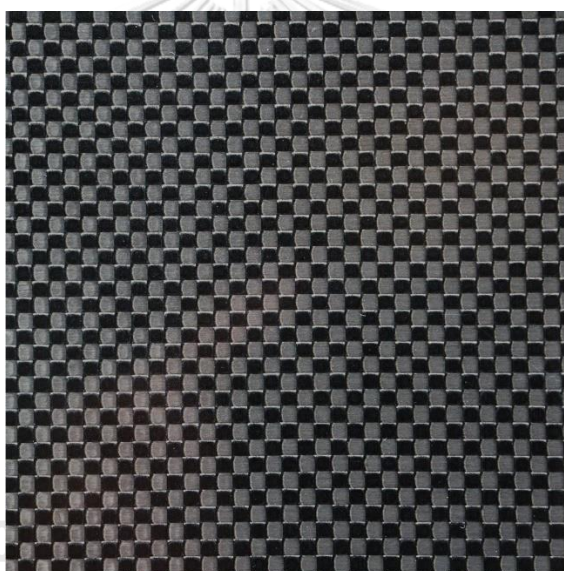
กระบวนการนี้เกี่ยวกับการยืดเส้นใยในระหว่างการเกิดปฏิกิริยากราฟไตเซชันที่อุณหภูมิสูงมาก ทำให้เกิดการเลื่อนตัวของชั้นกราฟไต เพื่อจะได้การจัดเรียงชั้นที่ขนานกันไปกับแนวแกนของเส้นใย โดยสารตั้งต้นทั้ง 3 ประเภท สามารถใช้วิธีเดียวกันได้

ค่ามอดูลัสของยัง และค่าความแข็งแรงต่อแรงดึง ของเส้นใยคาร์บอนสามารถเป็นไปได้หลายค่า เช่น ในถึงกวางเดียวกันค่าความแข็งแรงของเส้นใยคาร์บอนที่ใช้ PAN เป็นสารตั้งต้นสามารถมีค่าความแข็งแรงได้ตั้งแต่ 0.5 – 4.3 GN/m² ค่ามอดูลัสของยังมีค่าตั้งแต่ 270-580 GN/m² เนื่องจากการเกิดการไหลตัวของโมเลกุลในระหว่างการผลิต มีการกระจายตัวไปตามความยาวของเส้นใย ดังนั้นในการวิเคราะห์ข้อมูล จึงใช้หลักการทางสถิติมาช่วยในการประมาณค่าข้อมูลสมบัติเชิงกลของเส้นใยคาร์บอน ทำให้ค่าที่ได้เป็นค่าเฉลี่ยของทั้งเส้นใย

ใยของคาร์บอนเมื่อผ่านกระบวนการจัดการที่เหมาะสม จะถูกนำไปใช้ในรูปของเส้นใยถัก (Fiber) สานทับกันเหมือนกับการถักทอเสื้อผ้า โดยรูปแบบการถักเพื่อนำมาใช้งานมีหลากหลายขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การนำไปใช้งาน โดยรูปแบบการถักที่นิยม ยกตัวอย่างเช่น การถักแบบ 2x2 (Twill Weave) คือเส้นใยที่มีรูปแบบการถักขึ้นสองลงสอง ขึ้นไปทับและลดใต้เส้นใยที่ถักตั้งฉากกันทีละสองบล็อก โดยลายที่ออกมาจะเป็นรูปแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าเรียงกันไปตลอดผืน (Diagonal Pattern) สลับกันไปเรื่อย ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และอีกรูปแบบคือ การถักแบบ 1x1 (Plain Weave) เป็นการถักในรูปแบบขึ้นหนึ่งลงหนึ่ง โดยลายที่ออกมาจะเป็นรูปแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบการถักแบบ 2x2 (Twill Weave)

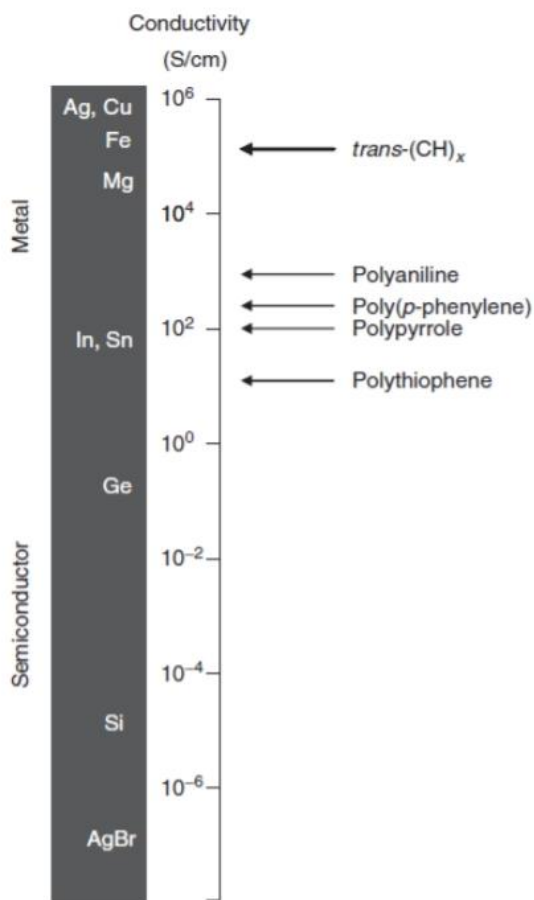


รูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบการถักแบบ 1x1 (Plain Weave)

2.4 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าจะมีโครงสร้างเป็นไพคอนจูเกต (pi conjugated system) ซึ่งโมเลกุลมีลักษณะพิเศษ คือ จะมีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวต่อกันไป (conjugated double bonds) มีความต่อเนื่องของพันธะไพคอนจูเกตมากกว่าโมเลกุลสารให้สี ซึ่งพบปรากฏการณ์นี้ได้ ใน กราไฟต์ (graphite) แกรฟีน (graphene) คาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon nanotubes) และ ไพคอนจูเกตพอลิเมอร์ (pi conjugated polymers) จะส่งผลให้สารดังกล่าวมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ ในสภาวะปกติหรือสภาวะที่เป็นกลาง พอลิเมอร์จะไม่

สามารถนำไฟฟ้าได้ แต่เมื่อถูกกระตุ้นหรือ doping ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นมีประจุเกิดขึ้น [11] เช่น การเปลี่ยนหมู่แอมินอิสระให้เป็นประจุบวกด้วยการเติมกรด ทำพอลิเอนิลีนมีสภาพเป็นประจุบวกจึงมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น ในกรณีทาการกระตุ้นด้วยปฏิกิริยารีดักชัน หรือออกซิเดชัน จะขึ้นกับประเภทของสารกระตุ้น (dopant) โดยมีด้วยกัน 2 ชนิดคือ กระบวนการออกซิเดชันของพอลิเมอร์ แบบที่เติมอะตอมชนิดขาดิเล็กตรอน ซึ่งเรียกว่า P-dopant เป็นตัวออกซิไดซ์ในทางเคมี และกระบวนการรีดักชันแล้วทำให้อะตอมมีอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกว่า N-dopant หรือตัวรีดิวซ์ในทางเคมี ความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในสายโซ่ (intra-molecular conductivity) ซึ่งโมเลกุลควรจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบในแนวระนาบ (planar) โดยปราศจากการบิดงอ และการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างสายโซ่โมเลกุล (inter-molecular conductivity) ซึ่งจะเกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนด้วยกลไกแบบ hopping โดยกลไกดังกล่าวต้องการให้โมเลกุลอยู่ใกล้กันมากหรือมีระยะห่างระหว่างโมเลกุลน้อยเพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถเกิด hopping ได้ ดังนั้นโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของพอลิเมอร์ที่เหมาะสมในการนำไฟฟ้าที่สุด คือ แบบ stacking หรือ planar conjugated chains

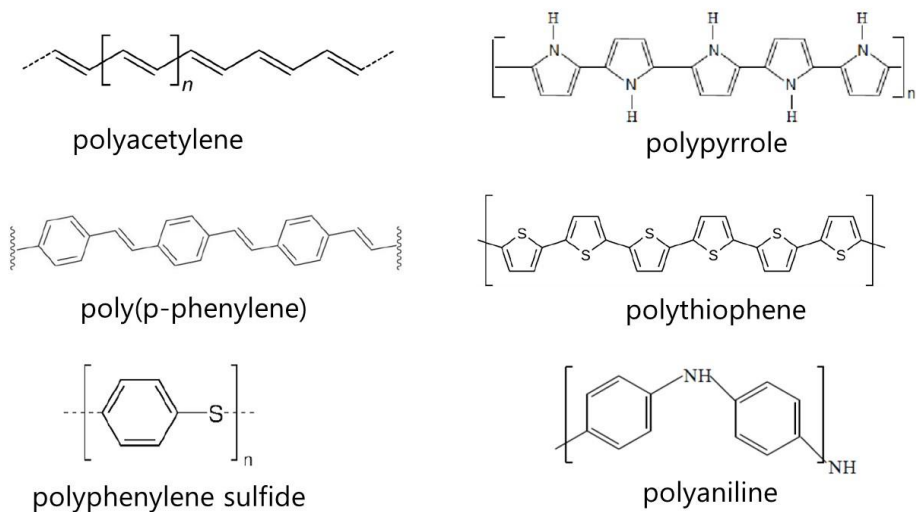


รูปที่ 2.8 ค่าการนำไฟฟ้าของโลหะบางชนิดและพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ผ่านกระบวนการโด๊ป

2.4.1 รูปแบบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

2.4.1.1 π -Conjugated Linear polymers

รูปแบบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าประเภทนี้ จะมีโครงสร้างแบบพันธะคอนจูเกต คือมีลักษณะพันธะคู่สลับเดี่ยว ซึ่งถือเป็นพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูง เนื่องจากพอลิเมอร์ได้ผ่านการกระตุ้นให้เกิดพาหะนำประจุ เช่น พอลิอะเซทิลีน (polyacetylene), พอลิพาราฟีนิลีน (poly(*p*-phenylene)) พอลิฟีนิลีนซัลไฟด์ (polyphenylene sulfide) พอลิไพร์โรล (polypyrrole) พอลิไทโอฟีน (polythiophene) และพอลิแอนิลีน (polyaniline) ตัวอย่างพอลิเมอร์ประเภทนี้ดังแสดงในรูปที่ 2.8



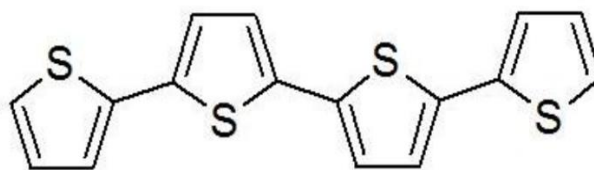
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ในรูปแบบ π -Conjugated Linear polymers

2.4.1.2 Narrow band-gap polymers

รูปแบบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าประเภทนี้คือ การออกแบบโดยการเพิ่มหมู่แทนที่หรือหมู่ให้อิเล็กตรอนสลับกับหมู่ดึงอิเล็กตรอนบนสายโซ่ของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เพื่อให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีค่าแถบพลังงานไฟฟ้าที่ต่ำจนมีสมบัติเป็นสารประเภทกึ่งตัวนำไฟฟ้าเนื้อแท้ จึงทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการกระตุ้นให้เป็นพาหะนำไฟฟ้า ซึ่งแถบค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเพิ่มหมู่ ควิโนอิด (quinoid) หรือหมู่เฮตเทอโรไซคลิก (heterocyclic) เข้าไปในโครงสร้างสายโซ่หลัก

2.4.1.3 π - Conjugated Linear oligomers

รูปแบบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าประเภทนี้ คือ โอลิโกฟินิลีน โอลิโกโรโอฟิน และโอลิโกไพร์โรล ตัวอย่างพอลิเมอร์แสดงในรูปที่ 2.9



oligothiophene

รูปที่ 2.10 ตัวอย่างโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ในรูปแบบ π - Conjugated Linear oligomers

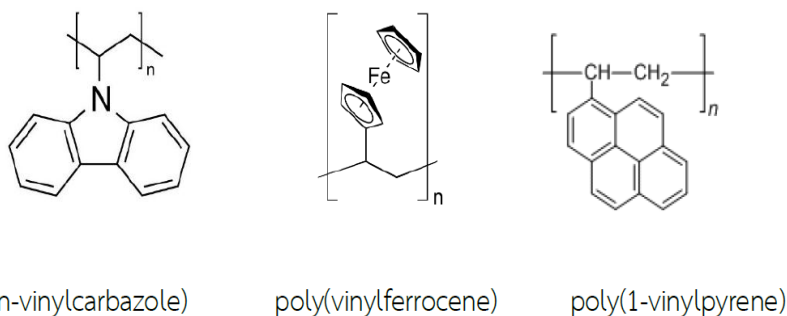
2.4.1.4 Conducting polymer composites

พอลิเมอร์ประเภทนี้ เป็นพอลิเมอร์ทั่วไปที่ไม่ใช่พอลิเมอร์นำไฟฟ้า ด้วยตัวของมันเอง แต่จะนำไฟฟ้าเมื่อผสมกับวัสดุนำไฟฟ้า ยกตัวอย่างเช่น โลหะ ผงคาร์บอน ผงเขม่าดำ เส้นใยกราไฟต์ และเส้นใยแก้วเคลือบโลหะ โดยตัวนำไฟฟ้าจะกระจายตัวอยู่รอบ ๆ เนื้อพอลิเมอร์ การนำไฟฟ้าโดยการวิ่งของอิเล็กตรอนผ่านอนุภาคตัวนำไฟฟ้าที่กระจายตัวในเนื้อพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เกิดการนำไฟฟ้า ซึ่งในการกระจายตัวของอนุภาคต่าง ๆ เหล่านี้ขึ้นกับแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์และอนุภาค เวลาและอุณหภูมิในการผสม ดังนั้นจึงส่งผลให้พอลิเมอร์มีสมบัติในการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งพอลิเมอร์ชนิดนี้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงถึง 10^{-1} ซีเมน/เซนติเมตร ที่สัดส่วนของ filler 10-40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และค่าการนำไฟฟ้าจะต่ำลงหากมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่ต่อเนื่องหรือไม่สม่ำเสมอ

2.4.1.5 Nonconjugated Polymers containing pendant π -electron

รูปแบบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าประเภทนี้ คือ โครงสร้างหลักของพอลิเมอร์มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าโดยมีหมู่ข้างเคียงเป็นพันธะคอนจูเกต ซึ่งในสมบัติการนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับการกระตุ้นให้เกิดพาหะประจุที่หมู่ข้างเคียงหรือพันธะคอนจูเกต โดยเมื่อวัสดุได้รับการกระตุ้นพาหะด้วยปฏิกิริยา Reduction หรือ Oxidation จะส่งผลให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดยวัสดุชนิดนี้แตกต่างจากพอลิเมอร์ที่มีการเติมตัวนำไฟฟ้า เนื่องจากพอลิ

เมอร์จะนำไฟฟ้าเมื่ออนุภาคของสารตัวเติมเชื่อมต่อกันเท่านั้น ตัวอย่างพอลิเมอร์แสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างโครงสร้างเคมีของพอลิเมอร์ในรูปแบบ Nonconjugated Polymers containing pendant π -electron

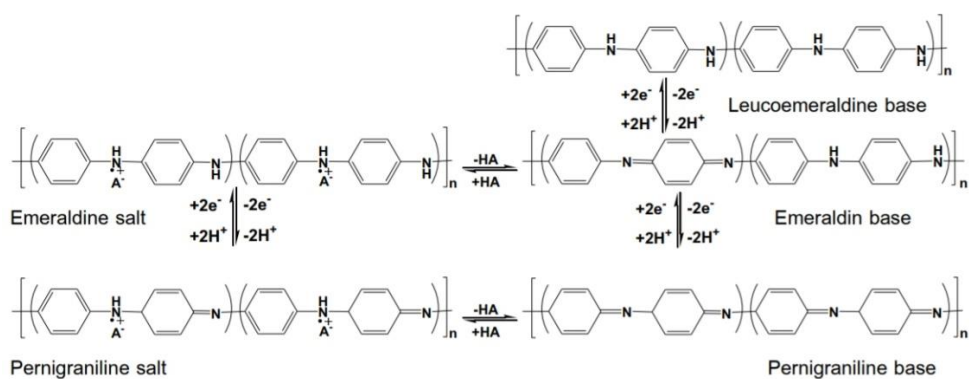
2.4.1.6 Ionically Conducting Polymers (polymer/salt electrolytes)

รูปแบบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าประเภทนี้ การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์เกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออน โดยในปัจจุบันพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดนี้มีแนวโน้มที่จะนำมาใช้แทนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่จากพวกลิเทียมไอออน ซึ่งมีข้อดีคือมีความคงทน ความปลอดภัยในการใช้งานสูง และมีความยืดหยุ่นจึงสามารถผลิตแบตเตอรี่ได้หลากหลายรูปร่าง อีกทั้งอิเล็กโทรไลต์ของแบตเตอรี่ชนิดนี้จะไม่เกิดการรั่วไหล จึงไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน

2.5 พอลิแอนิลีน

พอลิแอนิลีน (polyaniline, PANi) นับเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีการศึกษาและนิยมมนนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุดชนิดหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากมีสมบัติเด่น คือสังเคราะห์ได้ง่าย ความชื้นสูง และมีความเสถียรต่อสภาพบรรยากาศ โดยมีโครงสร้างทางเคมี 6 รูปแบบ ที่เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ และปฏิกิริยากรด-เบส ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แต่โครงสร้างที่นำไฟฟ้าได้ดีมีเพียงรูปแบบเดียว คือ เกลือเอมเมอร์ลิติน (Emeraldine Salt, ES) ดังนั้นการได้ปจึงเกิดได้ทั้งจากปฏิกิริยา

ออกซิเดชันของลูโคเอมเมอร์ลดีน (Leucoemeraldine) และการเติมโปรตอนให้กับเบส เอ็มเมอร์ลดีน (Emeraldine Base, EB) ด้วยการทำปฏิกิริยากับกรดประเภทโพรโทนิก (Protonic Acid) จึงกล่าวได้ว่า พอลิแอนิไลน์มีสมบัติทั้งรีดอกซ์สวิตชิง และพีเอชสวิตชิง (Redox Switching and pH Switching) นอกจากนี้โครงสร้างที่แตกต่างกันยังส่งผลทำให้เกิดสีที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนอีกด้วย เช่น เกลือเอมเมอร์ลดีน (ES) สีเขียว เบสเอมเมอร์ลดีน (EB) สีน้ำเงิน ลูโคเอมเมอร์ลดีนสีเหลืองอ่อน และเพอร์นิกรานิลีนสีม่วง โดยการเติมโปรตอนในส่วนของขั้นตอนการสังเคราะห์ลูโคเอมเมอร์ลดีน (leucoemeraldine) หรือทำการเติมโปรตอนให้กับเบสเอมเมอร์ลดีน (emeraldine base, EB) พอลิแอนิไลน์ในรูปแบบต่าง ๆ จะปรากฏสีที่ต่างกันชัดเจน เช่น เกลือเอมเมอร์ลดีนได้สีเขียว เบสเอมเมอร์ลดีนให้สีน้ำเงิน ลูโคเอมเมอร์ลดีนให้สีเหลืองอ่อน และเพอร์นิกรานิลีนให้สีม่วง ซึ่งเรียกว่าสมบัตินี้ว่าอิเล็กโทรโครมิก (electrochromic properties) โดยข้อจำกัดของพอลิแอนิไลน์มีเหมือนพอลิเมอร์นำไฟฟ้าทั่วไป คือ มีความสามารถในการละลายต่ำในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป และไม่เกิดการหลอมเหลว เนื่องมาจากระบบแบบไพคอนจูเกตที่มีแรงยึดเหนี่ยวไพ-ไพระหว่างโครงสร้างหลักของสายโซ่พอลิแอนิไลน์ที่แข็งแรงมากทำให้การน ำไปขึ้นรูปยาก ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญในการนำไปใช้ประโยชน์



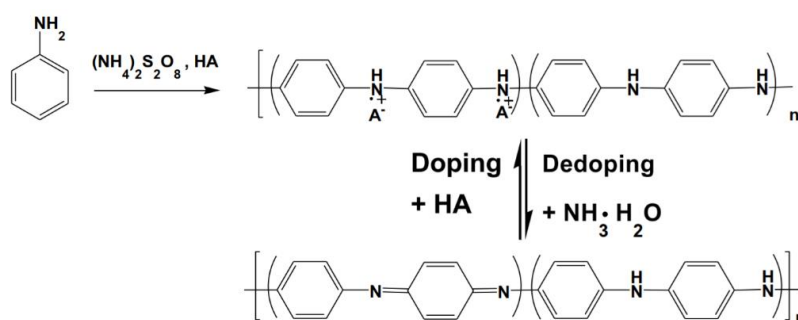
รูปที่ 2.12 โครงสร้างทางเคมีของพอลิแอนิไลน์แบบต่าง ๆ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์

2.5.1 การสังเคราะห์พอลิแอนิไลน์และอนุพันธ์

2.5.1.1 การสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันทางเคมี

การสังเคราะห์ทางเคมี [11] (chemical polymerization) เป็นวิธีที่นิยมเป็นอย่างมากในทางการค้า เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก โดยทั่วไปการสังเคราะห์ทางเคมีสามารถทำได้โดยใช้สารเคมีที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิเดนต์ (oxidants) ที่แรง เช่น แอมโมเนียมเปอร์

ซัลเฟต เพอร์ริกไอออน เปอร์แมงกาเนตไอออน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น โดยทั่วไปพอลิแอนิลินและอนุพันธ์ไม่ละลายน้ำ แต่จะสามารถละลายในกรด (HA) เช่น กรดไฮโดรคลอริก หรือ กรดซัลฟิวริก เพราะฉะนั้นในกระบวนการสังเคราะห์ ไอออนลบของ HSO_4^- หรือ SO_4^{2-} จะทำหน้าที่เป็น counter ion บนสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่รุนแรงและคายความร้อน จึงนิยมทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ ช่วงระหว่าง 1-5 องศาเซลเซียส จะได้พอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลอยู่ในช่วง 30,000 – 60,000 กรัม/ โมล



รูปที่ 2.13 การสังเคราะห์พอลิแอนิลินและอนุพันธ์ โดยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน

2.5.1.2 การสังเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

กระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical polymerization) เป็นวิธีที่มีประโยชน์ในการสร้างแผ่นฟิล์มที่ติดบนผิวของขั้วไฟฟ้า (electrode) โดยข้อดีของวิธีนี้คือเป็นการสังเคราะห์ที่ง่ายและรวดเร็วโดยสภาวะที่สังเคราะห์จะทำในน้ำหรือ ไม่มีน้ำเป็นตัวกลางก็ได้ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในด้านเคมีวิเคราะห์ แต่ก็มีข้อเสียคือต้องทำในเครื่องมือทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าใช้งาน (working electrode, WE) ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (counter electrode, CE) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode, RE) โดยปกติมอนอเมอร์แอนิลินจะไม่ละลายน้ำแต่จะละลายในสารละลายกรด (HA) โดยกรดจะเปลี่ยนหมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$) ของแอนิลินให้เป็นเกลือแอมโมเนียม ($-\text{NH}_3^+$) เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าที่ประมาณ 0.9 – 1.1 โวลต์ มอนอเมอร์แอนิลินและอนุพันธ์จะถูกออกซิไดซ์ และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน เนื่องจากสังเคราะห์ในสารละลายกรด พอลิเมอร์ที่ได้จะอยู่ในสภาพที่ถูกลดและอยู่ในรูปเกลือแอมเมอร์ลิติน ซึ่งมีความสามารถในการนำไฟฟ้า จึงพร้อมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่น ๆ

2.5.1.3 การสังเคราะห์โดยใช้แสง

การสังเคราะห์พอลิแอนิลีนและอนุพันธ์โดยใช้แสง (photochemical-initiated polymerization) เป็นอีกหนึ่งวิธีการ ที่การสังเคราะห์เป็นที่ได้รับความสนใจจากนักวิทยาศาสตร์ เนื่องจากการสังเคราะห์ด้วยแสงมีต้นทุนในการสังเคราะห์ที่ต่ำ เป็นกระบวนการที่ไม่เป็นพิษต่อสุขภาพและไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และการสังเคราะห์จะสามารถเตรียมแผ่นฟิล์มติดบนผิวของขั้วไฟฟ้า ซึ่งทำได้โดยการฉายแสงลงบนแผ่นฟิล์มที่มี $[Ru(bipy)_3]^{2+}$ และ เมทิลไวโอลोजีน (methylviologen, MV^{2+}) เมื่อ $[Ru(bipy)_3]^{2+}$ ดูดกลืนแสงที่ 452 นาโนเมตร จะทำให้เกิด $*[Ru(bipy)_3]^{2+}$ หลังจากนั้น การถ่ายโอนอิเล็กตรอนจาก $[Ru(bipy)_3]^{2+}$ ไปยัง MV^{2+} จะได้ $[Ru(bipy)_3]^{3+}$ ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงพอที่จะทำให้เกิดกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันของพอลิแอนิลีนและอนุพันธ์ได้ นอกจากการใช้ $[Ru(bipy)_3]^{2+}$ แล้ว ยังมีการนำสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมตัวอื่น ๆ เช่น $[Ru(bipy)_3]^{2+}$ มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์

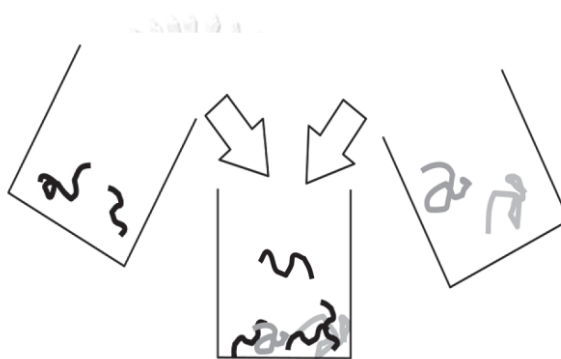
2.5.1.4 การสังเคราะห์โดยใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่ง

การสังเคราะห์พอลิแอนิลีนและอนุพันธ์โดยใช้เอนไซม์ เช่น ฮอร์สเรดิชเปอร์ออกซิเดส (Horseradish peroxidase, HRP) [4, 12] สามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งในกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแทนการใช้ตัวออกซิเดนต์ต่าง ๆ ถึงแม้ว่าวิธีการนี้จะมีประโยชน์ คือ เป็นกระบวนการที่ไม่เป็นภัยต่อสุขภาพของผู้ทดลอง สภาวะการทดลองไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม เช่นเดียวกันกับการสังเคราะห์โดยใช้แสง แต่พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้มักจะมีมวลโมเลกุลต่ำ และยังมีกิ่งก้านสาขาเป็นจำนวนมาก ดังนั้น การสังเคราะห์โดยใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งจึงไม่เป็นที่นิยมในกลุ่มนักวิทยาศาสตร์

2.6 พอลิอิเล็กโทรไลต์

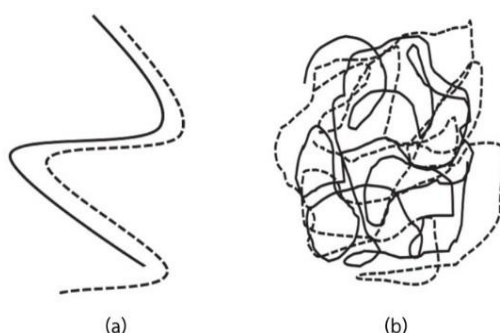
ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา พอลิเมอร์ มีการพัฒนาเพื่อให้ตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้อยู่เสมอ เช่น การพัฒนาพอลิเมอร์ให้ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ หรือความเป็นกรดต่าง เป็นต้น โดยหากพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวไม่สามารถตอบสนองความต้องการหรือไม่สามารถตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้ หรือมีข้อจำกัดในการนำพอลิเมอร์ไป

ใช้ประโยชน์ จึงเป็นที่มาของการพัฒนาและดัดแปรพอลิเมอร์ให้ตอบสนองความต้องการและข้อจำกัดต่าง ๆ โดยกระบวนการที่สามารถทำได้ง่าย สะดวก และเป็นที่ยอมรับคือการผสมพอลิเมอร์เข้าด้วยกัน รวมถึงกระบวนการทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยพอลิอิเล็กโทรไลต์ คือกลุ่มของสารโมเลกุลใหญ่ (macromolecules) ที่เมื่ออยู่ในของเหลวสามารถแตกตัวได้ เกิดเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ การศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์ เริ่มต้นโดย Fuoss [11] ที่นำสารที่มีประจุบวกและประจุลบมารวมกัน ทำให้เกิดการตกตะกอนได้ตะกอนที่ไม่ละลายน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 [13]



รูปที่ 2.14 การผสมสารละลายที่มีประจุบวกและลบเข้าด้วยกันทำให้เกิดการตกตะกอน

พบว่าพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเกิดจาก coulomb interaction ที่มีความแข็งแรง แต่พบว่าในบางกรณีการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์ก็สามารถเกิดได้จากพันธะไอออนิกที่ไม่แข็งแรง (weak ionic interaction) ได้เช่นกัน ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้สองกลุ่ม [14] คือ 1.สารประกอบเชิงซ้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกกับประจุลบ (PE-PE) และ 2.สารประกอบเชิงซ้อนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารพอลิอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุบวกกับสารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ หรือในทิศทางตรงกันข้าม (PE-Surfs) ซึ่งการเกิด PE-Surfs ส่วนมากจะเกิดกับสารลดแรงตึงผิว ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยไปจนถึงปานกลาง โดยความแตกต่างที่สำคัญระหว่างสารประกอบเชิงซ้อนทั้ง 2 ชนิด คือโครงสร้างในสถานะของแข็ง โดยที่ PE-Surfs มีลักษณะแบบ mesophase คือมีลักษณะเป็น liquid crystalline-like เช่นโครงสร้างเป็น flat lamellar หรือเป็น โครงสร้างแบบ discotic columnar ส่วน PE-PE มีลักษณะเป็น ชั้นบันได (ladderstructure) หรือ scrambled-egg [15] ดังแสดงในรูปที่ 2.14



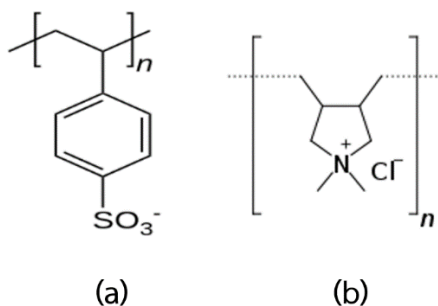
รูปที่ 2.15 ลักษณะโครงสร้าง PE-PE มีลักษณะเป็นชั้นบันได และแบบscrambled-egg

การเกิด PE-PE เป็นการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้โดยการผสมพอลิเมอร์ที่มีประจุตรงกันข้ามกัน และทำการละลายในตัวทำละลายที่เป็นน้ำเข้าด้วยกัน โดยการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน จะเกิดขึ้นด้วยตนเอง (spontaneous formation) ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการเตรียม PE-PE ดังแสดงในตารางที่ 2.2 [16]

ตารางที่ 2.2 แสดงพอลิเมอร์ที่นิยมใช้ในการเตรียม PE-PE

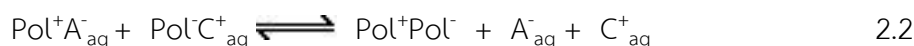
แหล่งที่มาของพอลิเมอร์	ชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการเตรียม PE-PE	ชนิดของประจุ
พอลิอิเล็กโทรไลต์จากธรรมชาติ	Poly (L-lysine)	polyanion
	Alginates	polyanion
	Hyaluronic acid	polyanion
ชีวพอลิเมอร์ที่ได้จากการตัดแปรรูปทางเคมี	Pectin	polyanion
	Chitosan	polycation
พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์	Poly (vinylbenzyl trialkyl ammonium)	polycation
	Poly (diallyldimethyl-ammonium)	polycation
	Poly (styrenesulfonic acid)	polyanion
	Poly (vinylsulfonic acid)	polyanion

ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุลบ เช่น พอลิโซเดียม สไตรีนซัลโฟเนต (poly (sodium styrenesulfonate)) (PSS) พอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวก เช่น พอลิไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (poly (diallyldimethylammonium chloride)) (PDADMAC) ดังแสดงในรูปที่ 2.3

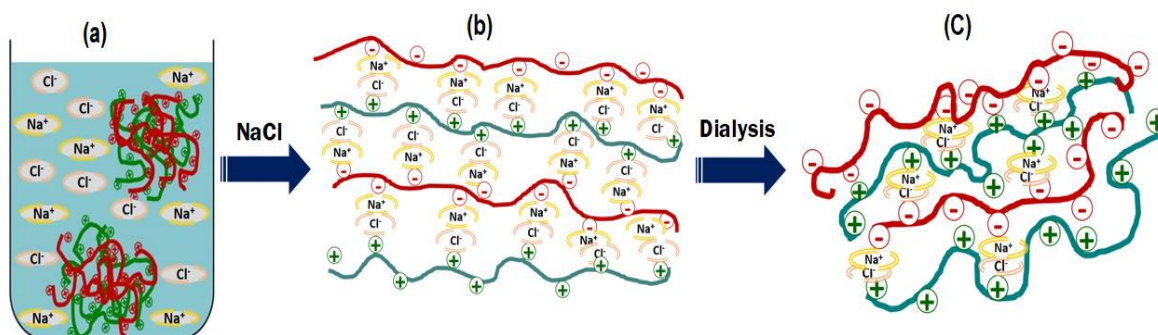


รูปที่ 2.16 ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุลบ คือ พอลิโซเดียมสไตรีนซัลโฟเนต (PSS) (a) และประจุบวก คือ พอลิไดอัลลิลไดเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (PDADMAC) (b)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์จำแนกออกเป็น 2 ปัจจัยหลัก ได้แก่ ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์ และปัจจัยแวดล้อม โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับพอลิเมอร์ เช่น การแตกตัวของประจุ ตำแหน่งของไอออน ความหนาแน่นของประจุ ความเข้มข้นของพอลิอิเล็กโทรไลต์ และน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งปัจจัยแวดล้อม ได้แก่ สัดส่วนในการผสม ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา ค่าพีเอช ความแรงไอออนิก ตัวทำละลาย และอุณหภูมิ โดยสำหรับการเปลี่ยนความแรงไอออนิกโดยการเติมเกลือ จะทำให้อันตรกิริยาไฟฟ้าสถิตในสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์อ่อนลง และทำให้ลดการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์เป็นการสร้างพันธะระหว่างพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์ แต่เมื่อเติมเกลือจะเป็นการสร้างพันธะระหว่างพอลิเมอร์และเกลือ [10] มากกว่า ตามสมการที่ 2.2 แสดงสมดุลของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์กับคู่อิออนตรงข้าม และนำมาสู่การพัฒนาไฮโดรเจลนำไฟฟ้าจากสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 โดยใช้เกลือเป็นตัวควบคุมลักษณะของสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์ จากรูปที่ 2.17 (a) เป็นการเติมเกลือลงในสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์โดยเกลือจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ และเข้าไปแทรกกลางระหว่างพอลิอิเล็กโทรไลต์บวกกับพอลิอิเล็กโทรไลต์ลบ โดยการสร้างพันธะระหว่างพอลิเมอร์และเกลือ ดังแสดงในรูป 2.17 (b) หลังจากนั้นทำการแยกเกลือบางส่วนออกเพื่อให้บางส่วนของพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวกกับลบเกิดอันตรกิริยาทางไฟฟ้า และเกิดการเชื่อมขวางจนเกิดเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจล ดังแสดงในรูป 2.17 (c)



สมดุลของการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์กับคู่ออนตรงข้าม โดย Pol^+ และ Pol^- คือ พอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวกและลบ, A^- และ C^+ คือ ไอออนลบและบวก ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 กระบวนการเกิดพอลิอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจล

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sowmya และ Selvakumar (2019) [17] เตรียมตัวอย่าง เส้นใยคาร์บอน และพอลิแอนิซีน เพื่อนำมาใช้เป็น Multilayered electrode materials ประกอบไปด้วย Sulfuric acid doped PA/CF เป็นชั้นที่ 1, Toluene-sulphonic acid doped PANi เป็นชั้นที่ 2 และ Camphor-10-sulphonic acid doped PANi เป็นชั้นที่ 3 จากผลการทดลองพบว่า Specific capacitance value สูงถึง 350 ฟารัดต่อกรัม

Cheng และคณะ (2011) [18] เตรียมคาร์บอนอิเล็กโทรด และซูเปอร์คาปาซิเตอร์ โดยผ้าคาร์บอนไฟเบอร์ถูกเตรียมพื้นผิวโดยวิธีอิเล็กโทร-เอตชิง (electro-etching) จากนั้นเคลือบโดยพอลิแอนิซีนด้วยวิธีอิเล็กโทรดีคอมโพสิชัน (Electrodecomposition) และพบว่าการเตรียมพื้นผิวโดยวิธีอิเล็กโทร-เอตชิง (electro-etching) สามารถเพิ่มพื้นที่ผิวของผ้าคาร์บอนไฟเบอร์ได้อย่างดี อีกทั้งยังเพิ่มความสามารถในการเคลือบพอลิแอนิซีน และลดความต้านทานของขั้วไฟฟ้าได้ นอกจากนี้มีการศึกษาเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์เดี่ยวภายใต้กระบวนการเดียวกัน พบว่าคาร์บอนไฟเบอร์เดี่ยวมีความจุจำเพาะใกล้เคียงกับผ้าคาร์บอนไฟเบอร์

Areebumrungsuk และคณะ (2019) [19] ทำการทดลองโดยเตรียม Graphene /poly (diallyldimethylammonium chloride)-poly (styrene sulfonate) (G/PDADMAC-PSS) พอลิอิ

เล็กโพลีไคโคมพอสิต โดยพอลิเล็กโพลีไคโคมเพล็กเกิดจากการผสมกันโดยตรงของ G/PDADMAC และ PSS และเติม NaCl ที่ 2, 4, 6, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ซึ่งพบว่า ความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์อออนมีบทบาทสำคัญในการควบคุมขนาดการก่อตัวของพอลิเล็กโพลีไคโคม และการเกิด Agglomeration

Murakawa และคณะ (2019) [20] ทำการศึกษาสารเชิงซ้อนพอลิเล็กโพลีไคโคมจากการเกิดโคเอเซอร์เวต (coacervates) ระหว่างพอลิเล็กโพลีไคโคมที่มีประจุตรงข้าม โดยใช้ poly(sodium 4-styrenesulfonate) (PNaSS) พอลิเล็กโพลีไคโคมประจุลบ และ poly(diallyldimethylammonium chloride) (PDADMAC) เป็นพอลิเล็กโพลีไคโคมประจุบวก โดยผสมกันในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 3.7 โมลาร์ ที่ 70 องศาเซลเซียส และทำการเทสารละลายลงในแม่พิมพ์ที่ประกอบด้วย เมมเบรนกึ่งซึมผ่าน (semi-permeable membranes) ที่ถูกดูดซับโดยแผ่นอลูมินาที่มีลักษณะแข็งและมีรูพรุน และใช้ซิลิโคนเป็นตัวกั้นระหว่างเมมเบรน ซึ่งพบว่าเกิดกระบวนการแยกเกลือ (dialysis) ของสารละลายพอลิเมอร์ผ่านเมมเบรนกึ่งซึมผ่านได้ในแม่พิมพ์ดังกล่าว และได้สารเชิงซ้อนพอลิเล็กโพลีไคโคมไฮโดรเจล

Pan และคณะ [21] ทำการสังเคราะห์ไฮโดรเจล โดยผสมสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต กับกรดฟิติก (Phitic acid) และแอนิซีน จากนั้นทำการกำจัดกรดที่มากเกินไปออกโดย Dialysis พบว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้ มีความสามารถในการเก็บรักษาประจุได้ถึงประมาณ 83% มากกว่า 10,000 รอบ ที่อัตรากระแสสูง 5 แอมแปร์ต่อกรัม

Mishra และ Nigam (2015) [22] ทำการเคลือบพอลิแอนิซีนบนผิวของเส้นใยคาร์บอน ด้วยกระบวนการสังเคราะห์ทางเคมีโดยวิธี in-situ emulsion polymerization และใช้สาร β -Naphthalene sulphonic acid (β -NSA) เป็น surfactant และ dopant ซึ่งได้ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10.73–23.5 S/cm.

Imre และคณะ (2008) [23] ทำการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าและสมบัติทางความร้อนของพอลิเล็กโพลีไคโคมเชิงซ้อนระหว่าง PSS และ PDADMAC แบบแห้ง โดยทำการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนระหว่างปริมาณ PSS และ PDADMAC พบว่าอุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature, Tg) ของสารประกอบเชิงซ้อนพอลิเล็กโพลีไคโคม ไม่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้า โดยค่าการนำอออนของตัวอย่างก่อนการทำให้แห้งมีค่าสูงกว่าตัวอย่างแห้งถึง 3 อันดับขนาด (orders of magnitude) และยังพบว่าตัวอย่างที่มีปริมาณ PSS มากกว่า PDADMAC ค่าการนำไฟฟ้ากระแสตรง

มีค่ามากกว่าตัวอย่างที่มี PDADMAC มากกว่า PSS เนื่องจากมีโซเดียมไอออนที่เป็นประจุตรงข้ามของ PSS มาก ซึ่งโซเดียมไอออนมีการเคลื่อนที่สูงกว่า คลอไรด์ไอออนซึ่งเป็นประจุตรงข้ามของ PDADMAC

Zhao และคณะ (2018) [24] ได้ทำการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน ด้วยไคโตซานและโซเดียมอัลจีเนต (sodium alginate) พบว่าไฮโดรเจลจากสารเชิงซ้อนของไคโตซานและโซเดียมอัลจีเนต ที่มีการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก ให้ค่าการนำไอออนสูงถึง $0.051 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ และมีสมบัติเชิงกลที่ยอมรับได้ ค่าความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ที่ 0.29 MPa และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) 109.5% โดยผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้ไฮโดรเจลที่ได้เป็นซูเปอร์คาปาซิเตอร์แบบโซลิตสแตท (solid-state supercapacitors) ที่ให้ประสิทธิภาพที่ดี ให้ค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) $234.6 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ ที่ $5 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ และมีความเสถียรในรอบการใช้งาน 95.3% และใช้งานได้สูงถึง 1,000 รอบ

Jia และคณะ (2018) [25] ได้ทำการสังเคราะห์พอลิแอนิลีนในไฮโดรเจลอิเล็กโทรไลต์ ที่เตรียมจากพอลิอะคริลิกแอซิด (polyacrylic acid) เพื่อใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ โดยวัสดุที่สังเคราะห์ได้มีความยืดหยุ่นที่ตีพบว่าวัสดุให้ค่าความจุไฟฟ้า $131 \text{ mF}/\text{cm}^2$ และมีความเสถียรในรอบการใช้งานถึง 83.7% และสามารถใช้งานได้ถึง 5,000 ครั้ง ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้งานกับเครื่องใช้ไฟฟ้าที่ติดตั้งได้

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและสารเคมี

1. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) บริษัท Ajex Finechem, ออสเตรเลีย
2. กรดไนตริก (Nitric acid, HNO_3) บริษัท Loba chemie, อินเดีย
3. โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ (Sodium hydrosulfite, $Na_2S_2O_4$) บริษัท KEMAVS, ออสเตรเลีย
4. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide, NH_4OH) บริษัท Mallinckrodt chemicals, สหรัฐอเมริกา
5. แอนิลีนมอนอเมอร์ (Aniline) บริษัท Panreac sintesis
6. แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium Persulphate, $(NH_4)_2S_2O_8$) บริษัท QREC, นิวซีแลนด์
7. ผ้าคาร์บอน (Carbon Fiber)
8. พอลิไดอัลลิลไธเมทิลแอมโมเนียมคลอไรด์ (Poly (diallyldimethylammonium chloride), PDADMAC, $(C_8H_{16}NCl)_n$)
9. พอลิสไตรีนซัลโฟเนต (Polystyrene sulfonate, PSS. $(C_8H_7SO_3^-)_n$)
10. โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride, NaCl)
11. ผงคาร์บอน (Vulcan XC-72)
12. สารละลายพอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีนเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (1 %wt, PTFE)

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. กระดาษทดสอบความเป็นกรดเบส (pH paper)
2. แผ่นนิกเกิลโฟม (Nickel Foam)
3. กระดาษกรองเบอร์ 1
4. น้ำแข็ง
5. น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water)
6. เครื่องอัดไฮดรอลิก (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
7. เครื่องบดแบบลูกบอล (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.3 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
2. เครื่องวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
3. เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer) (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)
4. เครื่องโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat) สำหรับทดสอบ Cyclic voltammetry (CV) (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

3.4.1 การเตรียมเส้นใยคาร์บอน

แยกเส้นใยคาร์บอนออกจากผ้าคาร์บอน ที่มีรูปแบบผ้าทอลายขัด ดังแสดงในรูปที่

- 3.1 นำมาตัดให้ได้ขนาด 1X1 เซนติเมตร ปริมาณ 30 กรัม ดังแสดงในรูปที่ 3.2



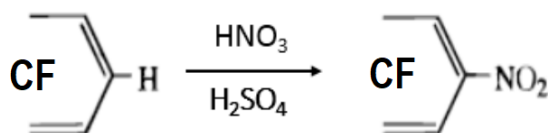
รูปที่ 3.1 ผ้าคาร์บอนลายขัด



รูปที่ 3.2 ผ้าคาร์บอน ที่นำมาตัดให้ได้ขนาด 1X1 เซนติเมตร

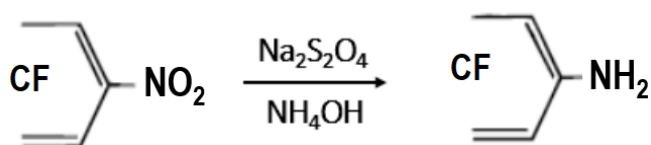
3.4.2 การตัดแปรรูปเส้นใยคาร์บอนด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน

ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไนเตรชัน [26] [27] กับเส้นใยคาร์บอน ขั้นตอนแรกทำการเตรียมกรดผสมระหว่างกรดไนตริกเข้มข้น 60% และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98% ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร บรรจุในขวดวัดปริมาตร 30 มิลลิลิตร นำไปแช่ตู้แช่แข็ง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำเส้นใยคาร์บอนที่เตรียมไว้ 30 กรัม ผสมกับกรดผสมที่อัตราส่วนวัสดุต่อสารละลาย 1 : 1 (ปริมาตรของกรดเทียบกับเส้นใยคาร์บอน 1 กรัม) โดยทำการเติมกรดที่เตรียมไว้อย่างช้า ๆ และควบคุมอุณหภูมิด้วยการการหล่อเย็นในอ่างน้ำแข็ง หลังจากการเติมกรดเสร็จสมบูรณ์ นำไปแช่ตู้เย็น และปล่อยให้ทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง เพื่อคาดว่าให้เกิดปฏิกิริยาไนเตรชันอย่างสมบูรณ์ จากนั้น กรองล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนกว่าค่า pH เป็นกลาง นำไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง คาดว่าจะได้เส้นใยคาร์บอนที่มีหมู่ไนโตร (CF-NO₂) ดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงปฏิกิริยาเคมีของการเกิด CF-NO₂

ขั้นตอนการทำปฏิกิริยารีดักชัน [27] โดยการนำเส้นใยคาร์บอนที่มีหมู่ไนโตร (CF-NO₂) จากขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไนเตรชันใส่ปิกเกอร์ แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ความเข้มข้น 5%/แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 1 มิลลิลิตร ที่อัตราส่วนวัสดุต่อสารละลาย 1: 5 หลังจากนั้นปล่อยให้ทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง จากนั้น กรองล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนกว่าค่า pH เป็นกลาง นำไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะได้เส้นใยคาร์บอนที่มีหมู่เอมีน (CF-NH₂) ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงปฏิกิริยาเคมีของการเกิด CF-NH₂

3.4.3 การวิเคราะห์ผลการเตรียมเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการตัดแปรรีด

3.4.3.1 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายประมาณ 10 เท่า จนถึงประมาณ 500,000 เท่า ในการสร้างภาพสามารถทำได้ โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ ตัวเครื่องจะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งกลุ่มอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า และจะผ่านเลนส์รวมรวมรังสีทำให้กลายเป็นลำอิเล็กตรอนลงบนผิวของชิ้นงาน เกิดเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิและถูกบันทึกแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และปรากฏเป็นภาพลักษณะ 3 มิติ เพื่อนำมาใช้ในการศึกษาสัณฐานและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง โดยมีการเคลือบวัสดุตัวนำ เช่น คาร์บอน กราไฟต์ และทอง บนพื้นผิวในระบบสุญญากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นงานในการนำอิเล็กตรอน ตัวอย่างรูปกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

3.4.3.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

Fourier transform infrared spectrometer หรือ FT-IR เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ตรวจสอบ พิสูจน์ เกี่ยวกับโครงสร้างทางเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันของสารประกอบอินทรีย์ โดยอาศัยหลักการของการดูดกลืนคลื่นรังสีช่วงประมาณ $400-4,000\text{ cm}^{-1}$ โดยเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานจากคลื่นรังสีอินฟราเรดที่มีความถี่ตรงกับความถี่ของการสั่น (Stretching) หรือการหมุน (Bending) ของพันธะโคเวเลนต์ในโมเลกุล จะทำให้โมเลกุลดังกล่าวเกิดการดูดกลืนแสงอินฟราเรด (IR) และมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของโมเลกุล จากนั้นเครื่องมือจะวัดค่าความเข้มแสงต่อความถี่หรือความยาวคลื่น (Wave number) ได้เป็นสเปกตรัมที่เรียกว่า “Interferogram” สามารถวิเคราะห์สารได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยในการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์จะต้องนำสารมาอัดขึ้นรูป pellet กับ KBr ในอัตราส่วนของสารตัวอย่าง : KBr คือ 1 : 100 ที่ number of sample scan คือ 64 และ resolution คือ 4 cm^{-1}



รูปที่ 3.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรมิเตอร์

3.4.4 การเตรียมผงเส้นใยคาร์บอน

แยกเส้นใยคาร์บอนออกจากผ้าคาร์บอน ที่มีรูปแบบผ้าทอหลายชนิด นำมาตัดให้ได้ขนาด 1X1 เซนติเมตร ปริมาณ 30 กรัม ขั้นตอนนี้เหมือนกับหัวข้อที่ 3.4.1 จากนั้นทำการเตรียมให้เป็นผงเส้นใยคาร์บอน โดยนำเส้นใยคาร์บอนที่เตรียมไว้ไปบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (Ball mill) โดยการบรรจุเส้นใยคาร์บอนในหม้อบด (shell liner) ดังแสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งภายในมีลูกบดเป็นบอลเซรามิก และใส่น้ำกลั่นปริมาณ 50 มิลลิลิตร โดยการบดจะหมุนอย่างช้า ๆ ในแนวนอน โดยเกิดจากการกระแทกของลูกบอลกับวัสดุเส้นใยคาร์บอนที่ต้องการบด เมื่อหม้อบดเริ่มหมุน ตัวลูกบดจะเคลื่อนที่ขึ้นไปตามผนังของหม้อบด จนถึงจุดจุดหนึ่งแล้วจะตกลงมา โดยแรงเหวี่ยงจะทำให้วัสดุเส้นใยคาร์บอนและลูกบดกึ่งตัวเกาะติดกับผนังหม้อบด รวมกับแรงดึงดูดของโลกจะทำให้ตกลงมาตรงส่วนล่างของหม้อบด ซึ่งจะทำให้เกิดแรงกระแทกของลูกบดภายในหม้อบด [28] ใช้เวลาในการบดประมาณ 8 ชั่วโมง จะได้ผงเส้นใยคาร์บอนที่ปนอยู่ในน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 นำผงเส้นใยคาร์บอนแยกออกจากน้ำ โดยการกรองสุญญากาศ และอบในตู้อบ 12 ชั่วโมง จะได้ผงเส้นใยคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.7 แสดงการบดเส้นใยคาร์บอนด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (Ball mill)



รูปที่ 3.8 ผงเส้นใยคาร์บอนที่ปนอยู่ในน้ำ



รูปที่ 3.9 ผงเส้นใยคาร์บอน

3.4.5 การดัดแปรผิวผงเส้นใยคาร์บอนด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน

ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไนเตรชันกับผงเส้นใยคาร์บอน โดยขั้นตอนนี้จะเป็นรูปแบบเดียวกับขั้นตอนตามข้อที่ 3.4.2 แตกต่างกันที่ระยะเวลาการเกิดปฏิกิริยาไนเตรชัน โดยเตรียมกรดผสมระหว่างกรดไนตริกเข้มข้น 60% และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98% ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร บรรจุในขวดวัดปริมาตร นำไปแช่ตู้แช่แข็ง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นนำผงเส้นใยคาร์บอนที่เตรียมไว้ผสมกับกรดผสมที่อัตราส่วนวัสดุต่อสารละลาย 1 : 1 (ปริมาตรของกรดเทียบกับผงเส้นใยคาร์บอน 1 กรัม) โดยทำการเติมกรดที่เตรียมไว้อย่างช้า ๆ และ

ควบคุมอุณหภูมิประมาณ 0 องศาเซลเซียส ด้วยการการหล่อเย็นในอ่างน้ำแข็ง หลังจากการเติมกรดเสรีจสมบูรณ์ นำไปแช่ตู้เย็น และปล่อยทิ้งไว้เป็นเวลาประมาณ 30 วัน เพื่อคาดว่าจะเกิดปฏิกิริยาในเตรชันอย่างสมบูรณ์ จากนั้นกรองล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนกว่าค่า pH เป็นกลาง นำไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะได้ผงเส้นใยคาร์บอนที่มีหมู่ไนโตร ($CF-NO_2$) ดังแสดงในรูปที่ 3.3

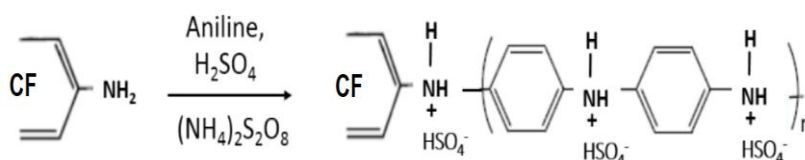
ขั้นตอนการทำปฏิกิริยารีดักชัน โดยการนำผงเส้นใยคาร์บอนที่มีหมู่ไนโตร ($CF-NO_2$) จากขั้นตอนการทำปฏิกิริยาในเตรชันใส่บีกเกอร์ แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ ความเข้มข้น 5%/แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 1 มิลลิลิตร ที่อัตราส่วนวัสดุต่อสารละลาย 1: 5 หลังจากนั้นปล่อยทิ้งไว้ 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนกว่าค่า pH เป็นกลาง นำไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะได้ผงเส้นใยคาร์บอนที่มีหมู่เอมีน ($CF-NH_2$) ดังแสดงในรูปที่ 3.4

3.4.6 การเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ลงบนผิวของผงเส้นใยคาร์บอนด้วยเทคนิคออกซิเดชันพอลิเมอไรเซชัน

เคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ลงบนผิวของผงเส้นใยคาร์บอนด้วยเทคนิคออกซิเดชันพอลิเมอไรเซชัน [29] [30] โดยนำผงเส้นใยคาร์บอนที่มีหมู่เอมีน $CF-NH_2$ ที่เตรียมได้จาก 3.4.5 มาใส่ลงไปในจานเพาะเชื้อที่มีน้ำเตรียมไว้ ที่อัตราส่วนวัสดุต่อน้ำที่ 1 : 10 (ปริมาตรของน้ำเทียบกับผงเส้นใยคาร์บอน 1 กรัม) จากนั้นเติมแอนิไลน์ ทั้งหมด 3 อัตราส่วน คืออัตราส่วน 1 , 2 และ 3 เท่าของน้ำหนักผงเส้นใยคาร์บอน ทำการหยดกรดซัลฟิวริก 1.5 เท่าโดยโมลของแอนิไลน์ เพื่อให้แอนิไลน์อยู่ในรูปสารละลาย และหยดสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต 1.25 เท่า โดยโมลของแอนิไลน์ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ amino carbon fiber ต่อพอลิแอนิไลน์ ($CF-NH_2/PANi$) แสดงในตารางที่ 3.1 จากนั้นนำจานเพาะเชื้อที่ทำการเตรียมเรียบร้อยแล้วไปแช่ตู้เย็นเป็นเวลา 12 ชั่วโมง โดยคาดว่าจะการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันพอลิเมอไรเซชันของแอนิไลน์จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 จากนั้น กรองล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนกว่าค่า pH เป็นกลาง นำไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ amino carbon fiber ต่อพอลิแอนิไลน์ (CF-NH₂/PANi)

สูตร	CF-NH ₂ : พอลิแอนิไลน์	ปริมาณ			
		CF-NH ₂ (g)	แอนิไลน์ (g)	กรดซัลฟิวริก (mL)	แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (g)
1	1:1	0.25	0.25	0.21	0.76
2	1:2	0.25	0.5	0.42	1.53
3	1:3	0.25	0.75	0.64	2.30



รูปที่ 3.10 แสดงปฏิกิริยาเคมีของการเกิด CF-NH₂/PANi

3.4.7 การวิเคราะห์ผลการเตรียมผงเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการตัดแปรผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน และเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์

3.4.7.1 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

รายละเอียดตามหัวข้อ 3.4.3.1

3.4.7.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

รายละเอียดตามหัวข้อ 3.4.3.2

3.4.7.3 การวิเคราะห์ผลการตัดแปรผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนและการเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โดยใช้คุณสมบัติทางความร้อนของผงเส้นใยคาร์บอน ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกอนาไลเซอร์

Thermo Gravimetric Analysis (TGA) เป็นเทคนิคที่วิเคราะห์โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเมื่อเทียบกับอุณหภูมิและเวลา มักใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน ในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็ก ซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถ

ควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือแก๊สที่มีความว่องไว เช่น อากาศ หรือ ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลง จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดมาจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ



รูปที่ 3.11 เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาลิเซอร์

3.4.7.4 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส (Potentiostat)

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส โดยวิธี Cyclic voltammetry (CV) เป็นการวิเคราะห์ความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุ ซึ่งได้เคลือบด้วยระหว่างกระแส (Current (A/g)) กับศักย์ไฟฟ้า (Potential (V)) จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้า โดยวิธี Galvanostatic charge and discharge (GCD) จะได้เคลือบด้วยระหว่างศักย์ไฟฟ้า (Potential (V)) กับเวลา (s) โดยให้ศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0 โวลต์ ในการทดสอบที่อัตราศักย์ไฟฟ้า 10 มิลลิโวลต์/วินาที โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) ใช้นิกเกิลโพลีเมอร์ที่เคลือบด้วยวัสดุตัวนำได้แก่ CF, CF-NH₂, CF-PANi (1:1), CF-PANi (1:2) และ CF-PANi (1:3) โดยทำการขึ้นขั้วไฟฟ้าด้วยการตัดนิกเกิลโพลีเมอร์ขนาด 1×2.5 เซนติเมตร (กว้าง \times ยาว) และนำไปอัดด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก ด้วยแรงไม่เกิน $1,000$ ปอนด์

ดังแสดงในรูปที่ 3.12 จากนั้นชั่งน้ำหนักนิกเกิลโพลีเมอร์เปล่าก่อนเคลือบวัสดุตัวนำ และทำการเตรียมผสมวัสดุตัวนำตัวที่ 1 ได้แก่ CF 0.014 กรัม กับผงคาร์บอน (Vulcan XC-72) 0.004 กรัม และสารละลายพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลีนเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก (1%Wt, PTFE) ปริมาณ 1 ไมโครลิตร ในโกรกบดสาร จากนั้นทำการบดให้เป็นเนื้อเดียวกัน ระวังอย่าให้แห้ง โดยการเติมสารละลายเอทานอลทีละ 1-2 หยด เมื่อเป็นเนื้อเดียวกันแล้วนำมาเคลือบบนนิกเกิลโพลีเมอร์ที่เตรียมไว้ โดยกำหนดปริมาณการเคลือบคือด้วยขนาด 1 x 1 เซนติเมตร (กว้าง x ยาว) อิเล็กโทรด ดังแสดงในรูปที่ 3.13 จากนั้นนำไปอบที่เตาอบอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อหาปริมาณน้ำหนักสารหลังเคลือบ จากนั้นขึ้นขั้วไฟฟ้าด้วยวัสดุตัวนำที่เหลืออื่น ๆ ได้แก่ CF-NH₂, CF-PANi (1:1), CF-PANi (1:2) และ CF-PANi (1:3) ด้วยวิธีเดียวกัน แสดงค่าน้ำหนักของขั้วที่เหลือด้วยวัสดุต่าง ๆ ดังตารางที่ 3.2 สามารถคำนวณค่าการเก็บประจุได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.2 แสดงสมการค่าความจุจำเพาะของเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ตามลำดับ

$$C_s = \frac{I \int V dt}{m(V_f - V_i)^2} \quad 3.1$$

$$C_s(F g^{-1}) = I \cdot \Delta t / \Delta V \cdot m \quad 3.2$$

โดย

I คือ charge-discharge current loaded (A),

Δt คือ เวลาในการ discharge (s),

ΔV คือ ค่าความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการ discharge

m คือ น้ำหนักของ active material (g)



รูปที่ 3.12 เครื่องอัลตราโซนิก



รูปที่ 3.13 ขั้วไฟฟ้าที่เตรียมจากนิกเกิลโพลีเมอร์

ตารางที่ 3.2 แสดงค่าน้ำหนักของขั้วที่เคลือบด้วยวัสดุต่าง ๆ

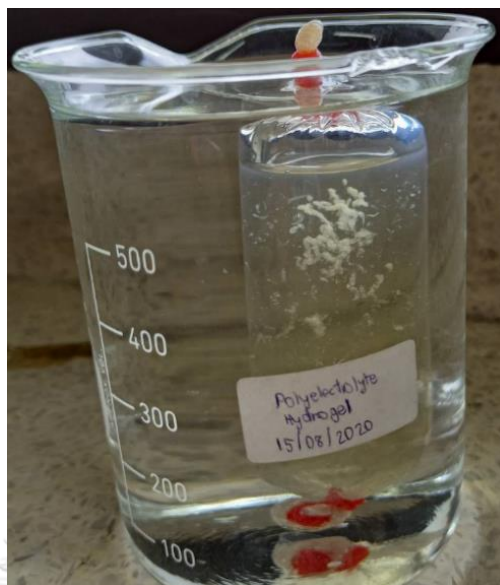
วัสดุตัวนำ	น้ำหนักขั้ว (กรัม)
CF	0.0084
CF-NH ₂	0.0079
CF-PANi (1:1)	0.0096

CF-PANi (1:2)	0.0125
CF-PANi (1:3)	0.0073

3.4.8 การเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน

ทำการเตรียมไฮโดรเจลด้วยวิธีการดังนี้ นำ polystyrene sulfonate (PSS) ปริมาณ 0.5 กรัม มาละลายในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 4 โมลาร์ จากนั้นเติมสารละลาย polydiallyldimethylammonium chloride (PDADMAC) ลงไปเพื่อตกตะกอน PSS ได้เป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน และทำการแยกก้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนออกแล้วนำมาละลายใหม่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ 4 โมลาร์ ทั้งนี้เพื่อให้เกิดการละลายอย่างสมบูรณ์ จะทำการค่อย ๆ เติมสารละลาย PDADMAC ลงไปอย่างช้า ๆ พร้อมทำการกวน และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส จนได้เป็นสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนลักษณะใสและหนืดจึงทำการหยุดเติม PDADMAC จากนั้นทำไดอะไลซิส เพื่อแยกเอาเกลือโซเดียมคลอไรด์และ PDADMAC ออกบางส่วน จะได้ไฮโดรเจลของพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน

ขั้นตอนการทำไดอะไลซิส ขั้นตอนแรกทำการเตรียมถุงไดอะไลซิส โดยการตัดถุงที่มีความยาว 10 เซนติเมตร จากนั้นนำไปแช่น้ำจืดจนนุ่ม และสามารถคลี่ปากถุงจนเปิดออกได้ นำเชือกมารัดที่ท้ายถุง ลำดับต่อมาใส่สารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนลักษณะใสที่เตรียมได้ มาบรรจุใส่ในถุงไดอะไลซิส และใช้เชือกมัดที่ปากถุง จากนั้นนำมาแช่น้ำปราศจากไอออนเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยทำการเปลี่ยนน้ำทุกๆ 2 ชั่วโมง เมื่อครบ 8 ชั่วโมง เทสารละลายพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนที่อยู่ในถุงออกมาใส่ในจานเพาะเชื้อ และปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 1 สัปดาห์ จะได้ไฮโดรเจลของพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนที่แห้งติดกับจานเพาะเชื้อ เพื่อง่ายต่อการนำมาเตรียมขึ้นรูปในขั้นตอนของการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.14 การทำไดอะไลซิส

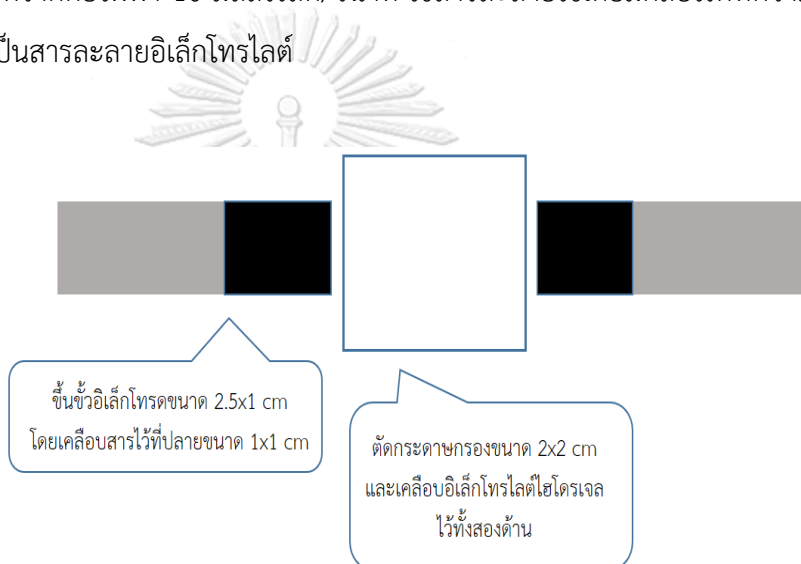


รูปที่ 3.15 ไฮโดรเจลของพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน

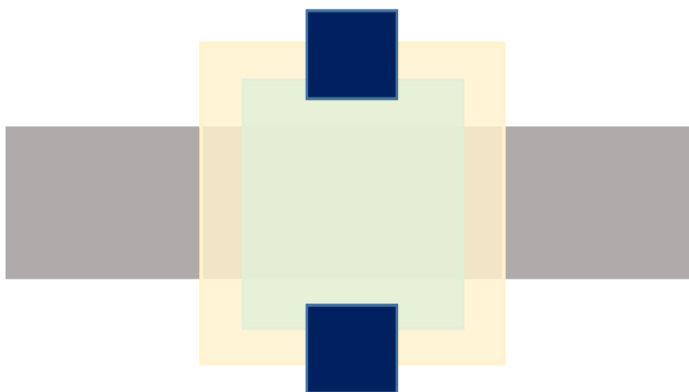
3.4.9 การวิเคราะห์สมบัติความเป็นไฮโดรเจลอิเล็กโทรไลต์จากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat)

นำไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนจากข้อ 3.4.8 มาใช้ในการเตรียมเป็นตัวคั่นกลาง (Separator) ในวงจรไฟฟ้า โดยการนำมาเคลือบลงบนกระดาษกรอง โดยตัดขนาด 2×2 เซนติเมตร (กว้าง \times ยาว) ทั้งสองด้าน โดยจำนวนชั้นในการเคลือบคือ 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั้น จากนั้นเลือกขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) ที่ให้ค่าการเก็บประจุสูงสุดจากข้อ

3.4.7.5 ทำการขึ้นขั้วไฟฟ้าจำนวน 6 คู่ ได้แก่ คู่สำหรับจำนวนชั้นการเคลือบ 1 , 2, 3, 4, 5 และ กระจกกรองเปล่า (Blank) ตามลำดับ รูปแสดงการเตรียม ดังแสดงในรูป 3.16 จากนั้นนำขั้วทั้งสองข้างมาประกบกันโดยหันหน้าที่เคลือบสารเข้าหากัน โดยมีกระจกกรองที่ทำการเคลือบอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจลเป็นตัวคั่นกลาง จากนั้นใช้ Glass Slide เป็นตัวครอบและใช้ตัวหนีบเพื่อยึดขั้วทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 3.17 จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat) โดยให้ศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ -0.3 ถึง 0.4 โวลต์ ในการทดสอบที่อัตราศักย์ไฟฟ้า 10 มิลลิโวลต์/วินาที ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์



รูปที่ 3.16 แสดงการเตรียมการทดสอบไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนมาใช้ในการเตรียมเป็นตัวคั่นกลาง (Separator) ในวงจรไฟฟ้า



รูปที่ 3.17 แสดงการประกบขั้วทั้งสองข้าง โดยมีกระดาศกรอง หรือ กระดาศกรองที่เคลือบไฮโดรเจลจากพอลิอิลิกโทโรไลต์เชิงซ้อนคั่นกลาง



บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้ทำการตัดแปรรูปผิวของเส้นใยคาร์บอนด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน โดยการตัดแปรรูปใช้ปฏิกิริยาไนเตรชันกรดซัลฟิวริก/กรดไนตริก เพื่อให้ได้เส้นใยคาร์บอนที่ประกอบไปด้วยหมู่ไนโตร ตามด้วยปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้โซเดียมไฮไดรซัลไฟด์/แอมโมเนีย เพื่อให้ได้เส้นใยคาร์บอนที่ประกอบไปด้วยหมู่เอมีน และวิเคราะห์ผลการเตรียมเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการตัดแปรรูป โดยการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (CF, CF-NO₂, CF-NH₂) ของเส้นใยคาร์บอนตัดแปรรูปด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น และทำการทดลองโดยเปลี่ยนจากเส้นใยคาร์บอนเป็นผงเส้นใยคาร์บอน โดยทำการเตรียมผงเส้นใยคาร์บอนโดยการแยกเส้นใยคาร์บอนออกจากผ้าคาร์บอน และนำเส้นใยคาร์บอนที่เตรียมไว้ไปบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (Ball mill) ตามหัวข้อที่ 3.4.4 จะได้เป็นผงเส้นใยคาร์บอน จากนั้นทำการตัดแปรรูปผิวผงเส้นใยคาร์บอนด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน เพื่อเตรียมเคลือบด้วยพอลิแอนิลิน ด้วยปฏิกิริยาไนเตรชันโดยใช้กรดซัลฟิวริก/กรดไนตริก เพื่อให้ได้ผงเส้นใยคาร์บอนที่ประกอบไปด้วยหมู่ไนโตร ตามด้วยปฏิกิริยารีดักชันโดยใช้โซเดียมไฮไดรซัลไฟด์/แอมโมเนีย เพื่อให้ได้ผงเส้นใยคาร์บอนที่ประกอบไปด้วยหมู่เอมีน ตามหัวข้อที่ 3.4.5 จากนั้นทำการเคลือบพอลิแอนิลินบนหมู่เอมีนโดยใช้ปฏิกิริยาออกซิเดชันพอลิเมอร์ไรเซชันของแอนิลิน โดยมีแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต เป็นตัวริเริ่ม ตามหัวข้อที่ 3.4.6 และวิเคราะห์ผลการเตรียมผงเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการตัดแปรรูปผิวและเคลือบพอลิแอนิลิน โดยการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (CF, CF-NO₂, CF-NH₂ และ CF-PANI) ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) นอกจากนี้ทำการวิเคราะห์การเคลือบติดโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โดยใช้สมบัติทางความร้อนของเส้นใยคาร์บอน ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ (Thermo Gravimetric Analyzer) จากนั้นนำ PANi-g-CF มาทำการทดสอบความเป็นอิเล็กโทรด เพื่อศึกษาประสิทธิภาพทางไฟฟ้า ด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์ (Multimeter) และทำการเตรียมพอลิอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจล วิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้า และวิเคราะห์สมบัติความเป็นไฮโดร

เจลอิเล็กโทรไลต์จากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส (Potentiostat)

4.1 ผลของการเตรียมเส้นใยคาร์บอน

การแยกเส้นใยคาร์บอนออกจากผ้าคาร์บอน นำมาตัดให้ได้ขนาด 1X1 เซนติเมตร (กว้าง x ยาว) เนื่องจากการตัดขนาด 1X1 เซนติเมตร เป็นขนาดที่สามารถตัดได้ค่อนข้างง่าย ตามรูปแบบของผ้าคาร์บอนที่มีลักษณะเป็นผ้าทอลายขัด โดยสามารถตัดตามแนวยาว และแนวขวางได้ตามลายของผ้า จะได้เส้นใยคาร์บอนแยกออกจากผ้าคาร์บอนที่มีความยาว 1 เซนติเมตร



รูปที่ 4.1 เตรียมเส้นใยคาร์บอนจากผ้าคาร์บอน



รูปที่ 4.2 เส้นใยคาร์บอนที่มีความยาว 1 เซนติเมตร

4.2 ผลของการตัดแปรมีวเส้นใยคาร์บอนด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน

จากขั้นตอนการตัดแปรมีวเส้นใยคาร์บอนด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน ตามหัวข้อที่ 3.4.2 ผ่านการทำปฏิกิริยาทั้งสองขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไนเตรชัน และขั้นตอนการทำปฏิกิริยารีดักชัน โดยลักษณะภายนอกที่สังเกตได้แสดงดังรูปที่ 4.3 จะได้เส้นใยคาร์บอนหลังจากทำปฏิกิริยาไนเตรชันลักษณะคล้ายเส้นผม จากนั้นนำมาทำปฏิกิริยาต่อโดยขั้นตอนรีดักชัน โดยลักษณะภายนอกที่สังเกตได้แสดงดังรูปที่ 4.4 ทั้งนี้ทำการวิเคราะห์ผลการตัดแปรมีวของเส้นใยคาร์บอนด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน โดยใช้การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) ดังจะกล่าวในลำดับถัดไปในหัวข้อที่ 4.3



รูปที่ 4.3 เส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยปฏิกิริยาไนเตรชัน

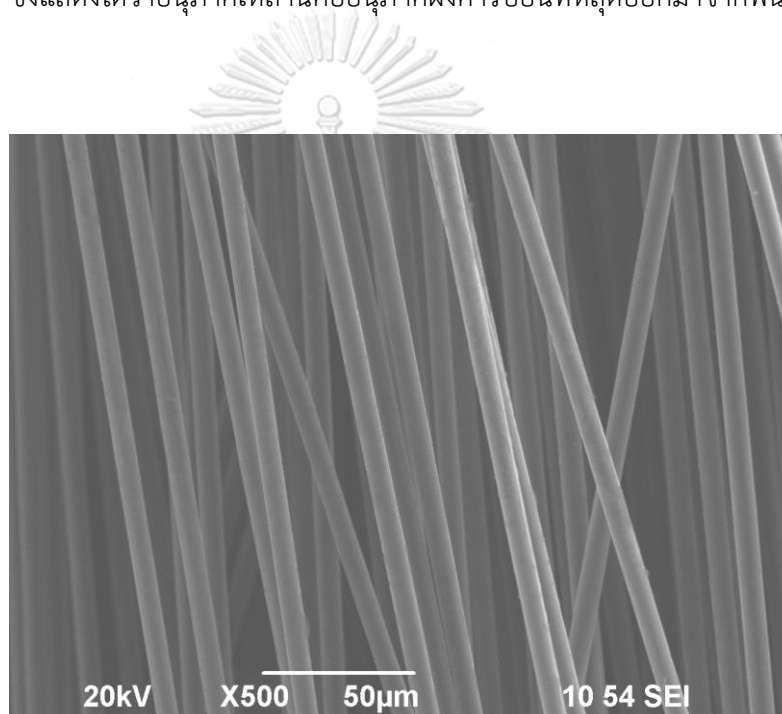


รูปที่ 4.4 เส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการดัดแปรผิวด้วยปฏิกิริยารีดักชัน

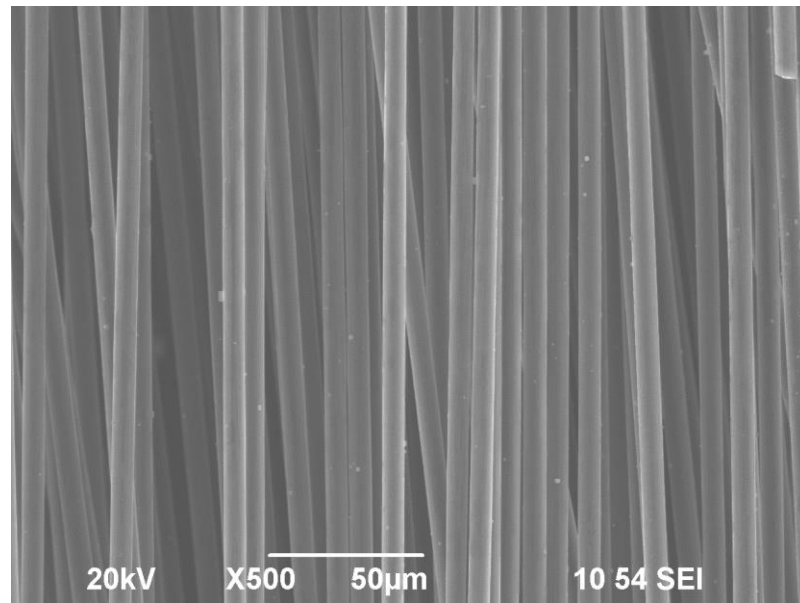
4.3 ผลของการวิเคราะห์ผลการเตรียมเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการตัดแปรรูป

4.3.1 ผลของการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

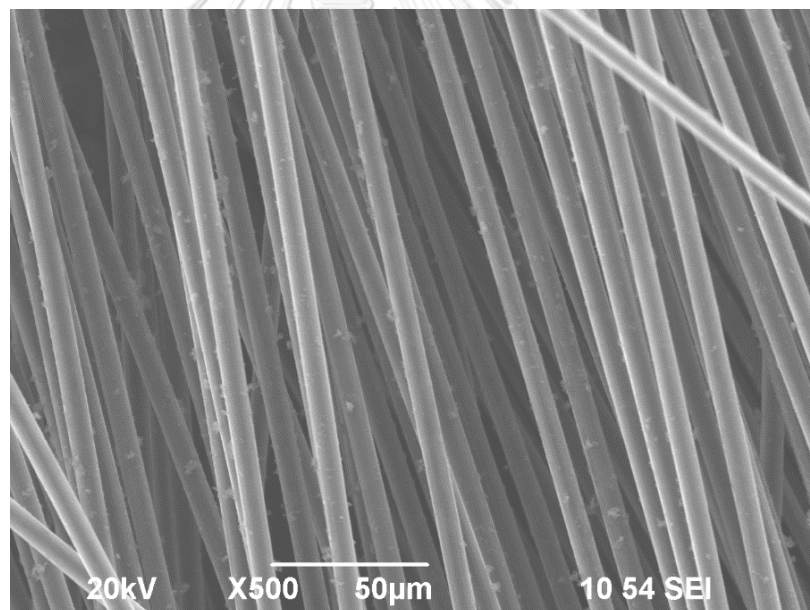
รูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเส้นใยคาร์บอน เส้นใยคาร์บอนที่ผ่านปฏิกิริยาไนเตรชัน และเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน ตามลำดับที่กำลังขยาย 500 เท่า โดยพบว่าเส้นใยคาร์บอนมีลักษณะพื้นผิวเรียบสม่ำเสมอ เมื่อนำเส้นใยคาร์บอนมาทำการตัดแปรรูปพบว่าเส้นใยคาร์บอนยังคงมีลักษณะคล้ายเดิม แต่พบว่ามีอนุภาคมาเกาะบนพื้นผิวมากขึ้น และอนุภาคเหล่านี้ยังคงพบอยู่เมื่อผ่านขั้นตอนปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งแสดงได้ว่าอนุภาคเหล่านี้คืออนุภาคผงคาร์บอนที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของเส้นใย



รูปที่ 4.5 เส้นใยคาร์บอน



รูปที่ 4.6 เส้นใยคาร์บอนที่ผ่านปฏิกิริยาไนเตรชัน

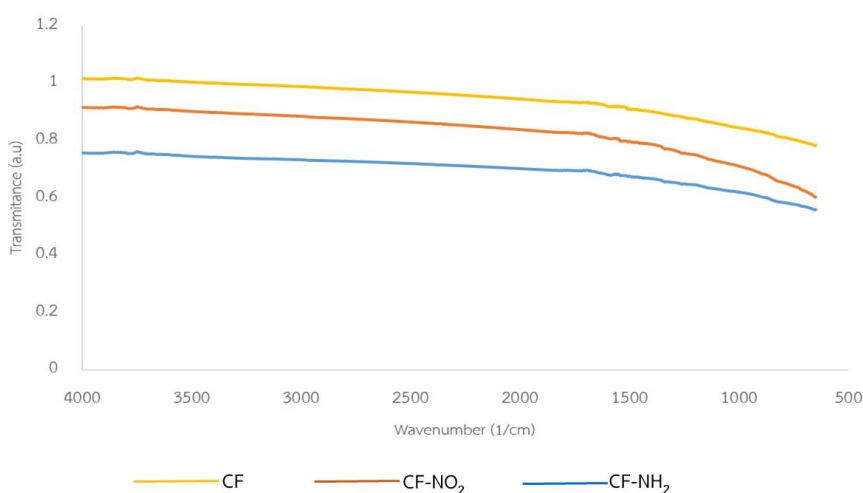


รูปที่ 4.7 เส้นใยคาร์บอนที่ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน

4.3.2 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

ทำการวิเคราะห์ผลของการดัดแปรผิวเส้นใยคาร์บอนด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี โดยจากรูปที่ 4.8 แสดง 3 เส้นสเปคตรัมของเส้นใยคาร์บอน และเส้นใยคาร์บอนดัดแปร ได้แก่ เส้นใย

คาร์บอนที่ผ่านปฏิกิริยาไนเตรชัน (Nitro Carbon fiber (CF-NO₂)) และเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน (Amino Carbon fiber (CF-NH₂)) ซึ่งปกติแล้วการทดสอบด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี จะได้ค่าการดูดซับรังสีที่แสดงออกมาเป็นพิกเลขคลื่นต่าง ๆ (wave number) แต่จากการสังเกตเห็นเส้นสเปกตรัมตามรูปที่ 4.8 แทบจะไม่พบหมู่ฟังก์ชันไนโตรและหมู่เอมีนตามที่คาดหวังไว้ ทั้งนี้อาจจะเป็นผลมาจากพื้นที่ผิวของเส้นใยคาร์บอนน้อยเกินไป จึงทำให้ไม่สามารถสังเกตเห็นหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้บนพื้นผิวของเส้นใยตัดแปร ทั้งนี้พบพิกที่ตำแหน่งประมาณ 1,600-1,500 cm⁻¹ ซึ่งเป็นพิกที่แสดงถึงพันธะ C=C stretching ซึ่งพบทั้ง 3 เส้นสเปกตรัม โดยคาดว่าพันธะ C=C stretching ควรจะเกิดขึ้นอยู่แล้วในโครงสร้างของเส้นใยคาร์บอน จึงทำให้เป็นที่มาของการเตรียมตัวอย่างเส้นใยคาร์บอนใหม่ โดยเตรียมเป็นผงเส้นใยคาร์บอน ซึ่งได้กล่าวถึงวิธีการเตรียมไว้ในหัวข้อที่ 3.4.4 โดยผลของการเตรียมผงเส้นใยคาร์บอนจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

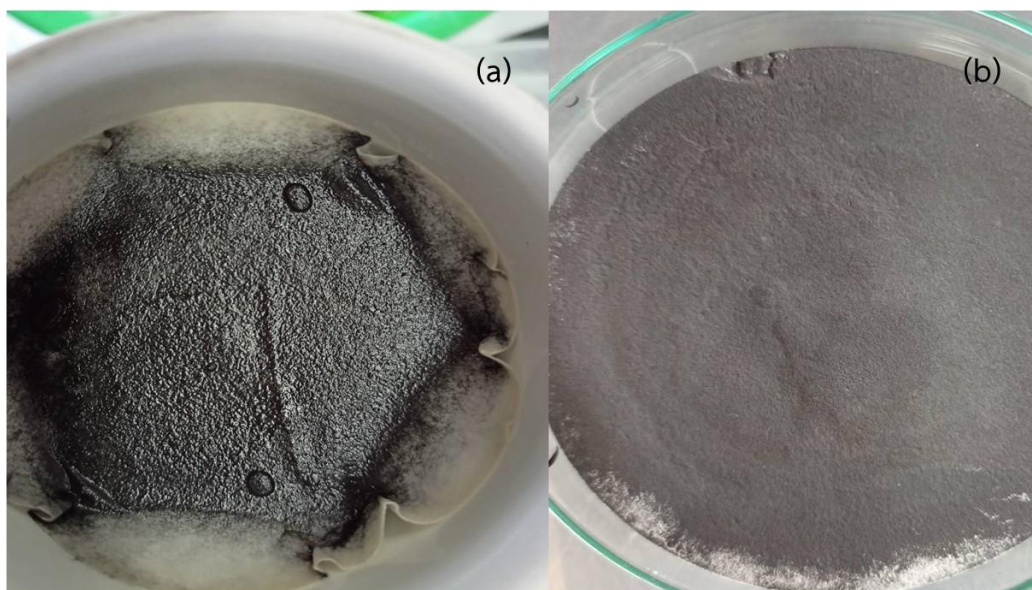


รูปที่ 4.8 แสดงสเปกตรัมของเส้นใยคาร์บอน (CF), Nitro Carbon fiber (CF-NO₂) และ Amino Carbon fiber (CF-NH₂)

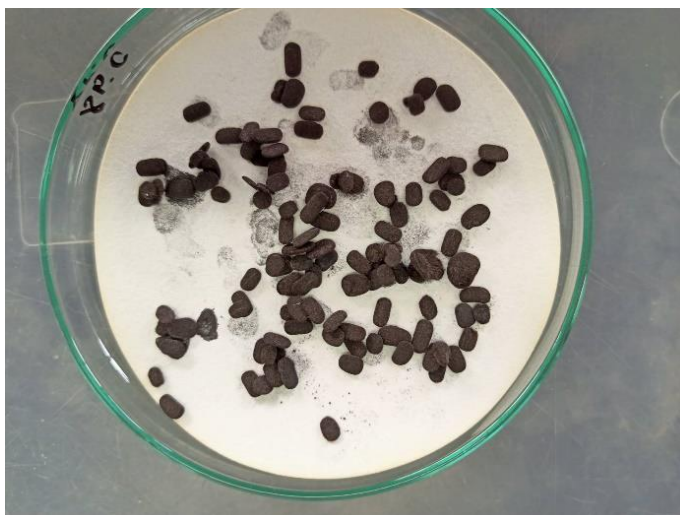
4.4 ผลของการเตรียมผงเส้นใยคาร์บอน

ในที่นี้ต้องการนำเส้นใยคาร์บอนมาบดให้เป็นผง เนื่องจากรูปแบบของเส้นใยไม่อาจทำให้มีพื้นที่ผิวที่มากพอ เมื่อเทียบกับรูปแบบของผง และประกอบกับผลของการวิเคราะห์ผลการเตรียมเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการตัดแปรผิว อันได้แก่ ผลของการวิเคราะห์สัณฐาน

วิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) และผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) ที่กล่าวในหัวข้อ 4.3 จึงเป็นที่มาของการนำเส้นใยคาร์บอนที่เตรียมไว้ไปบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (Ball mill) ดังแสดงในหัวข้อ 3.4.4 ได้ผงเส้นใยคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยจากรูป 4.9 (a) แสดงผงเส้นใยคาร์บอนขณะเปียก จะเห็นว่ามีเส้นใยคาร์บอนบางส่วนที่เกิดการรวมกลุ่มเป็นเม็ด ซึ่งไม่ได้เป็นลักษณะของผงทั้งหมด เนื่องจากผลของการบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล โดยเกิดแรงกระแทกของลูกบดภายในหม้อบด และช่องว่างระหว่างลูกบด จึงต้องทำการแยกเม็ดของเส้นใยคาร์บอนออก ดังรูปที่ 4.10 และจึงนำเฉพาะผงเส้นใยคาร์บอนที่ได้ไปอบในตู้อบเป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะได้ผงของเส้นใยคาร์บอนหลังอบแล้ว เพื่อนำไปทำการตัดแปรรูปต่อ ดังรูปที่ 4.9 (b)



รูปที่ 4.9 แสดงผงเส้นใยคาร์บอน (a) ผงเส้นใยคาร์บอนขณะเปียก (b) ผงเส้นใยคาร์บอนหลังจากอบ



รูปที่ 4.10 แสดงการรวมกลุ่มของผนังใยคาร์บอนหลังจากบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล

4.5 ผลของการตัดแปรผนังใยคาร์บอนด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน

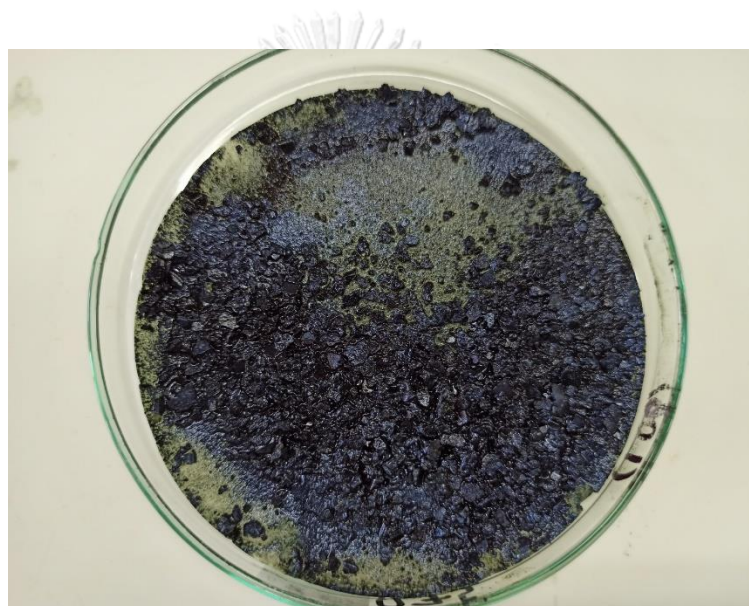
จากการเตรียมผนังใยคาร์บอนที่ผ่านการตัดแปรผนังใยด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4.5 โดยลักษณะของผนังใยคาร์บอนหลังจากทำปฏิกิริยารีดักชัน แสดงดังรูปที่ 4.11 เมื่อสังเกตลักษณะผนังใยคาร์บอนด้วยตาเปล่า จะสังเกตเห็นได้ว่าผนังใยคาร์บอนมีลักษณะแตกต่างจากเดิม คือไม่เป็นเนื้อผงละเอียดเหมือนกับรูปที่ 4.9 (b) ซึ่งเป็นผลจากการตัดแปรพื้นผิวของผนังใยคาร์บอน



รูปที่ 4.11 แสดงลักษณะของผนังใยคาร์บอนหลังจากทำปฏิกิริยารีดักชัน

4.6 ผลของการเคลือบพอลิแอนิซีนลงบนผิวของผงเส้นใยคาร์บอนด้วยเทคนิคออกซิเดชันพอลิเมอไรเซชัน

จากการเตรียมผงเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการตัดแปรผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนและเคลือบพอลิแอนิซีนลงบนผิวของผงเส้นใยคาร์บอนด้วยเทคนิคออกซิเดชันพอลิเมอไรเซชันตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 3.4.6 จะได้ลักษณะของผงเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการเคลือบด้วยพอลิแอนิซีน ดังแสดงในรูปที่ 4.12 จะสังเกตเห็นได้ว่าการเคลือบด้วยพอลิแอนิซีนค่อนข้างครอบคลุมตัวอย่างผงเส้นใยคาร์บอนตัดแปร เมื่อดูด้วยตาเปล่า



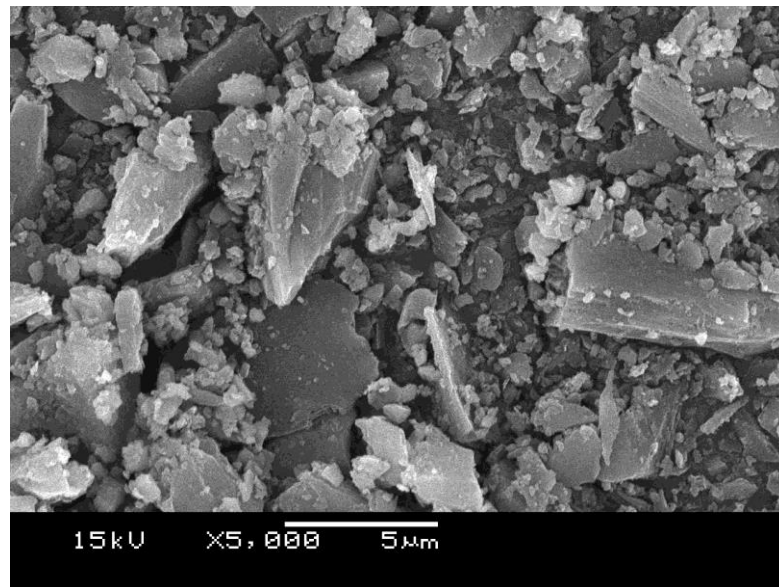
รูปที่ 4.12 แสดงลักษณะของผงเส้นใยคาร์บอนหลังการเคลือบด้วยพอลิแอนิซีน

4.7 ผลของการวิเคราะห์ผลการเตรียมผงเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการตัดแปรผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนและเคลือบพอลิแอนิซีน

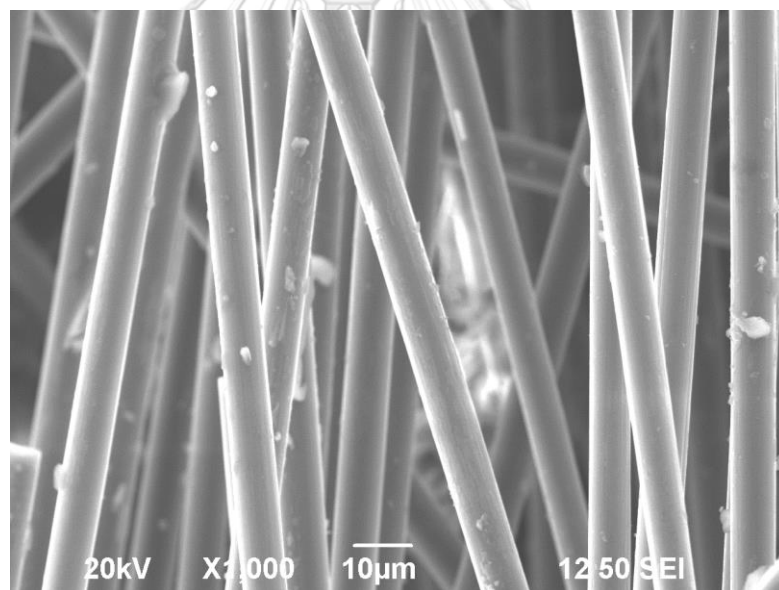
4.7.1 ผลของการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

วิเคราะห์สัณฐานวิทยาของเส้นใยคาร์บอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.13, 4.14 และ 4.15 โดยรูปที่ 4.13 แสดงลักษณะภายนอกของผงเส้นใยคาร์บอน แสดงสัณฐานวิทยาของผงเส้นใยคาร์บอนที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่าจากขั้นตอนการเตรียมผงเส้นใยคาร์บอน ด้วยการนำเส้นใยคาร์บอนที่ตัดจากผ้าคาร์บอนไปบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล เป็นผลทำให้เส้นใย

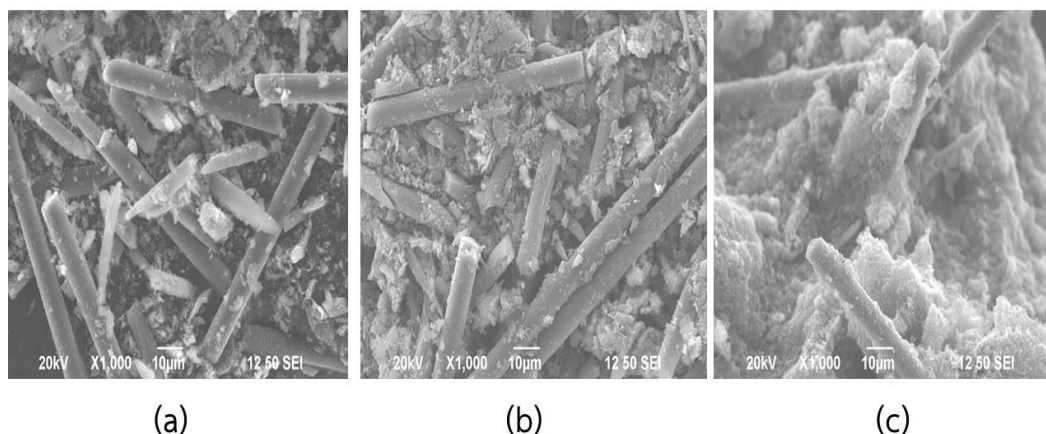
คาร์บอนมีลักษณะแตกออกเพียงบางส่วน โดยบางส่วนยังคงมีรูปทรงเป็นทรงกระบอกพื้นผิวเรียบ และบางส่วนที่มีการแตกหัก อันเนื่องมาจากผลของแรงกระแทกขณะนำไปบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล จากนั้นเมื่อมีการตัดแปรพื้นผิวของผงเส้นใยคาร์บอน โดยการทำปฏิกิริยาไนเตรชัน และปฏิกิริยารีดักชัน ส่งผลให้พื้นผิวของผงเส้นใยคาร์บอนไม่เรียบดังเดิม พบว่ามีสารที่ทำปฏิกิริยาดังกล่าวอยู่บนพื้นผิวของผงเส้นใยคาร์บอน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 โดยสารดังกล่าวอยู่บนพื้นผิวเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เป็นเพราะตัวพื้นผิวของผงเส้นใยคาร์บอนไม่ชอบน้ำ ในขณะที่หมู่ไนโตรเป็นสารที่มีขั้วทำให้สารทั้งสองไม่มีแรงยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกันอาศัยเพียงแค่แรงยึดเหนี่ยวแบบแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลระหว่างวงแหวนแอโรมาติก จึงทำให้มีเอมีนบนพื้นผิวของผงเส้นใยคาร์บอนน้อยมาก จากนั้นทำการเคลือบพอลิแอนิ ลินลงบนผิวของผงเส้นใยคาร์บอนด้วยเทคนิคออกซิเดชันพอลิเมอไรเซชัน โดยทำการเติมแอนิ ลิน ทั้งหมด 3 อัตราส่วน คืออัตราส่วน 1 , 2 และ 3 เท่าของน้ำหนักผงเส้นใยคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 4.15 (a), (b) และ (c) ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าที่อัตราส่วน 1 : 1 และ 1:2 ดังรูปที่ 4.15 (a) และ (b) มีปริมาณแอนิ ลินเกาะบนผิวของผงเส้นใยคาร์บอนไม่ทั่วเส้นใย แต่ที่อัตราส่วน 1:3 พบว่ามีปริมาณแอนิ ลินเกาะบนผิวของผงเส้นใยคาร์บอนอย่างหนาแน่น ดังรูปที่ 4.15 (c) จึงนำมาสู่สมมติฐานที่ว่าปริมาณพอลิแอนิ ลินที่อัตราส่วน 3 เท่าของน้ำหนักผงเส้นใยคาร์บอนจะทำให้ได้ค่าทางเคมีไฟฟ้าได้มากที่สุด เมื่อเทียบกับปริมาณแอนิ ลินที่อัตราส่วน 1 และ 2 เท่าของน้ำหนักผงเส้นใยคาร์บอน



รูปที่ 4.13 แสดงสัณฐานวิทยาของผงเส้นใยคาร์บอนที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



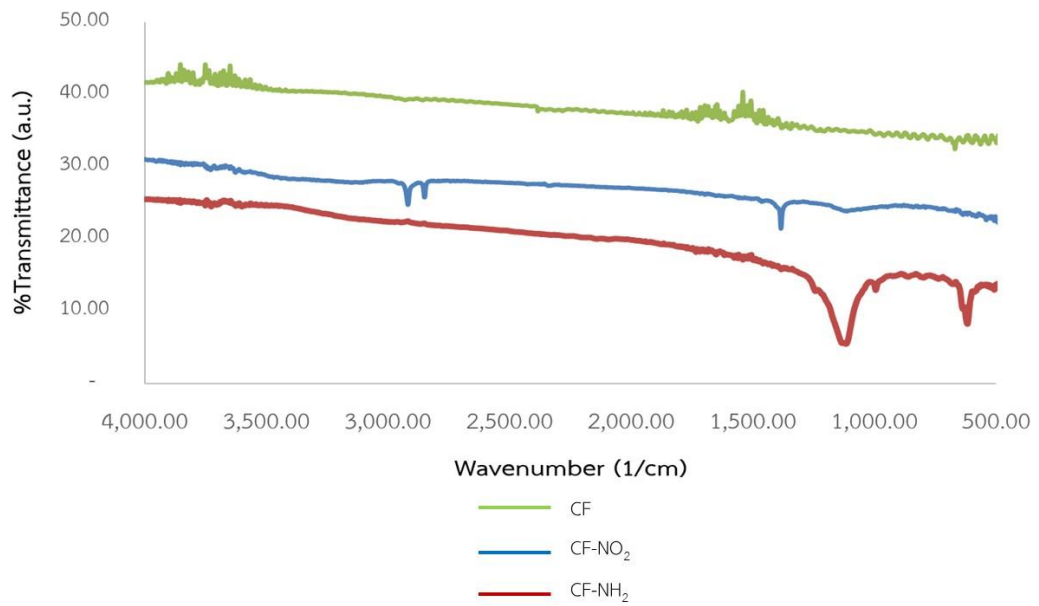
รูปที่ 4.14 แสดงสัณฐานวิทยาของผงเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์หลังจากทำปฏิกิริยารีดักชัน



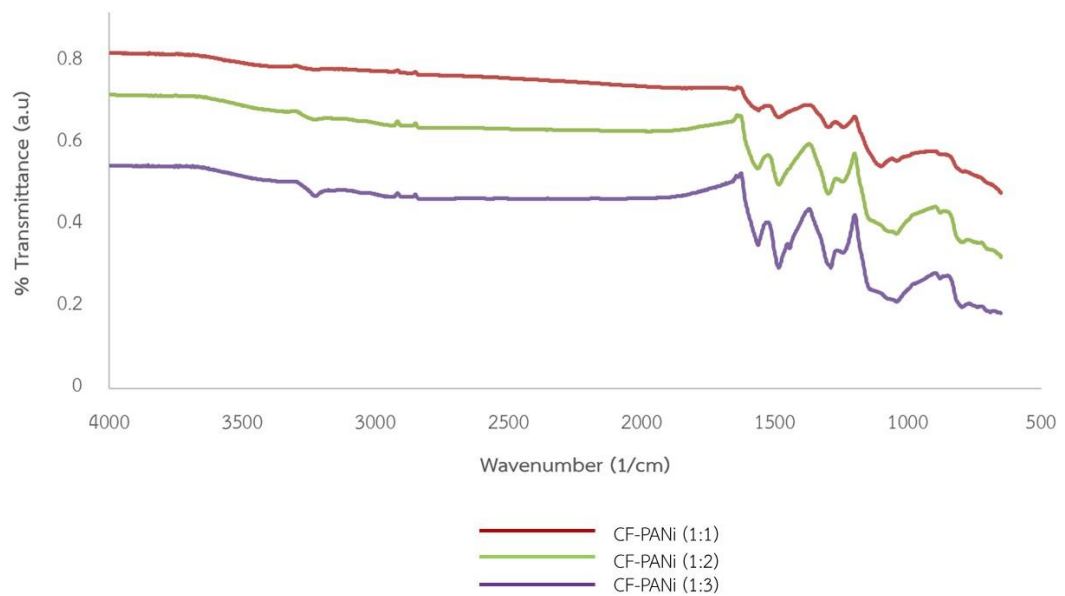
รูปที่ 4.15 แสดงสัณฐานวิทยาของผงเส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์เคลือบพอลิแอนิซีน $CF.NH_2/PANi$ (1:1), (e) $CF.NH_2/PANi$ (1:2), และ (f) $CF.NH_2/PANi$ (1:3)

4.7.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี

เมื่อนำผงเส้นใยคาร์บอนที่เตรียมได้มาทำการดัดแปรผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน โดยผ่านขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไนเตรชัน รีดักชัน และเคลือบพอลิแอนิซีนลงบนผิวของผงเส้นใยคาร์บอนด้วยเทคนิคออกซิเดชันพอลิเมอไรเซชัน โดยเติมแอนิซีน 3 อัตราส่วน คืออัตราส่วน 1, 2 และ 3 เท่าของน้ำหนักผงเส้นใยคาร์บอน ($CF-PANi/1:1, 1:2, 1:3$) โดยสันนิษฐานว่าจะเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เป็นผงเส้นใยคาร์บอนไนเตรชัน ($CF-NO_2$), ผงเส้นใยคาร์บอนที่มีหมู่เอมีน หรืออะมิโนคาร์บอนไฟเบอร์ ($CF-NH_2$) และ อะมิโนคาร์บอนไฟเบอร์ต่อพอลิแอนิซีน ($CF-NH_2/PANi$) ตามลำดับ จึงทำการยืนยันผลการดัดแปรผิวของผงเส้นใยคาร์บอนด้วยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของผงเส้นใยคาร์บอนดัดแปร โดยใช้เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) ในการศึกษาเอกลักษณ์การดูดกลืนพลังงานเพื่อใช้ในการสันของพันธะระหว่างอะตอมในหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.16 และ 4.17 โดยตารางที่ 4.1 และ 4.2 แสดงข้อมูลของพิก FTIR ที่ปรากฏผงเส้นใยคาร์บอน เส้นใยคาร์บอนดัดแปร และผงเส้นใยคาร์บอนดัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิซีน



รูปที่ 4.16 แสดงสเปกตรัมของผงเส้นใยคาร์บอน (CF), Nitro Carbon fiber (CF-NO₂) และ Amino Carbon fiber (CF-NH₂)



รูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมของผงเส้นใยคาร์บอนตัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิซีน (CF-PANI/1:1, 1:2, 1:3)

ตารางที่ 4.1 พีค FTIR ที่ปรากฏวงเส้นใยคาร์บอนดัดแปร ได้แก่เส้นใยคาร์บอน (CF), Nitro Carbon fiber (CF-NO₂) และ Amino Carbon fiber (CF-NH₂)

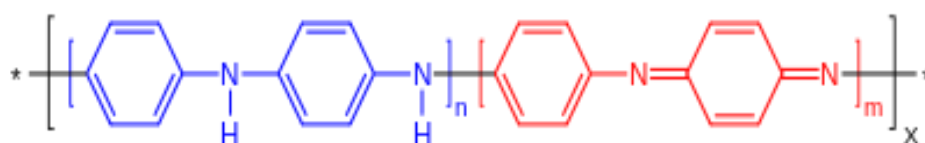
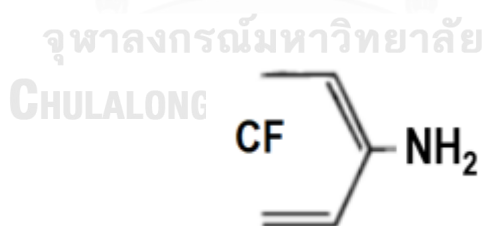
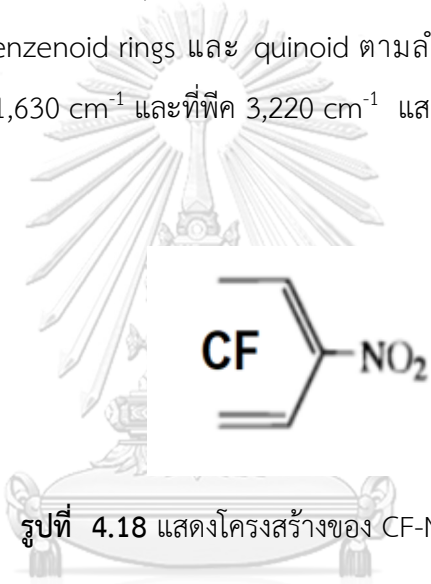
เลขคลื่น (cm ⁻¹)	ชนิดของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	รายการอ้างอิง
665	Wag	N-H (primary and secondary amines only)	[31]
1,115	stretches	C-N (aliphatic amines)	[31]
1,382	stretches	C-NO ₂	[31]
1,500- 1600	stretches	C-C stretch (in-ring)	[31]
2,848	stretches	C-H - stretches	[31]
2,917	stretches	C-H - stretches	[31]

ตารางที่ 4.2 พีค FTIR ที่ปรากฏวงเส้นใยคาร์บอนดัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ (CF-PANi/1:1, 1:2, 1:3)

เลขคลื่น (cm ⁻¹)	ชนิดของการสั่น	หมู่ฟังก์ชัน	รายการอ้างอิง
1,190	stretches	C-N stretch (aliphatic amines)	[31]
1,374	stretches	C-N stretching	[31]
1,475	stretches	C=C stretching vibration for benzenoid rings	[31]
1,530	stretches	C=C stretching vibration for quinoid	[31]
1,630	stretches	C=N stretching mode for imine.	[31]
3,220	stretches	N- H stretching mode	[31]

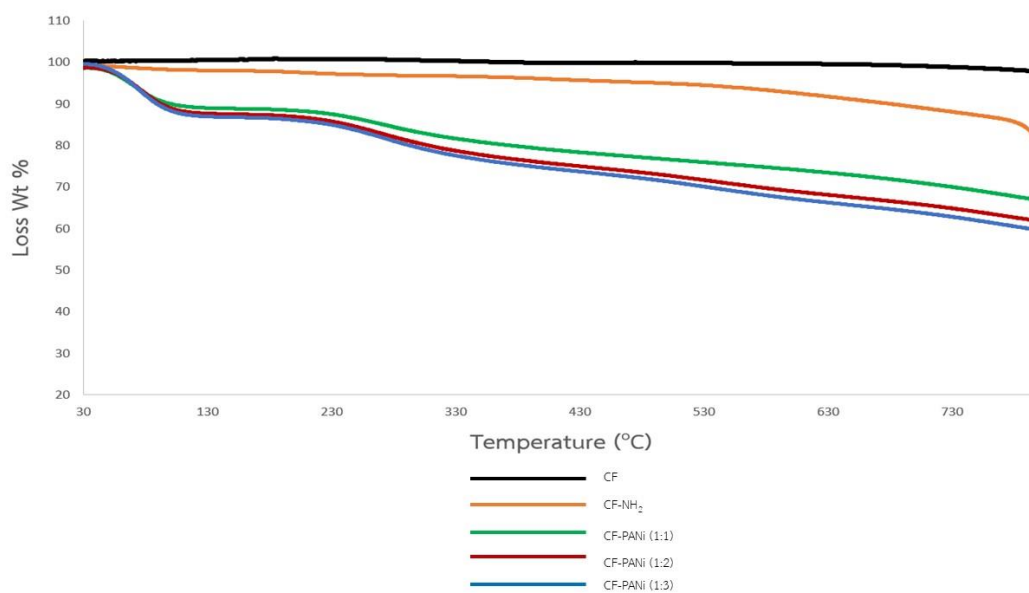
สังเกตเห็นว่าค่าการดูดซับรังสีจะแสดงออกมาเป็นพีคเลขคลื่นต่างๆ (wave number) โดยวงเส้นใยคาร์บอน (CF) พบที่ตำแหน่ง 1,500- 1600 cm⁻¹ เป็นเอกลักษณ์ของ C-C stretch (in-ring) เมื่อพิจารณาเส้นสเปคตรัมของ Nitro Carbon fiber (CF-NO₂)

พบที่ตำแหน่ง $1,382\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของหมู่ C-NO_2 stretches และตำแหน่ง $2,848\text{ cm}^{-1}$ และ $2,917\text{ cm}^{-1}$ เป็นเอกลักษณ์ของหมู่ C-H stretches บนวงแหวนแอโรเมติก และเมื่อพิจารณาสเปกตรัมของ Amino Carbon fiber (CF-NH_2) พบพีกที่ 665 cm^{-1} เป็นเอกลักษณ์ของหมู่ secondary amines และพบพีกที่ลักษณะเฉพาะของพันธะ C-N ที่ตำแหน่งประมาณ $1,115\text{ cm}^{-1}$ อย่างชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.16 จากนั้นวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยคาร์บอนดัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิลีน ($\text{CF-PANI}/1:1, 1:2, 1:3$) ดังแสดงในรูปที่ 4.17 ซึ่งพบที่พีก $1,190$ และ $1,374\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของ C-N stretching และพีกที่ตำแหน่ง $1,475$ และ 1530 cm^{-1} เป็นเอกลักษณ์ของ C=C stretching vibration ของ benzenoid rings และ quinoid ตามลำดับ พบ C=N stretching ของ imine ที่ตำแหน่ง $1,630\text{ cm}^{-1}$ และที่พีก $3,220\text{ cm}^{-1}$ แสดง N-H stretching ของหมู่เอมีน



4.8 ผลของการวิเคราะห์ผลการตัดแปรมีวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนและการเคลือบพอลิแอนิไลน์ โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โดยใช้คุณสมบัติทางความร้อนของผงเส้นใยคาร์บอน ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกอนาไลเซอร์

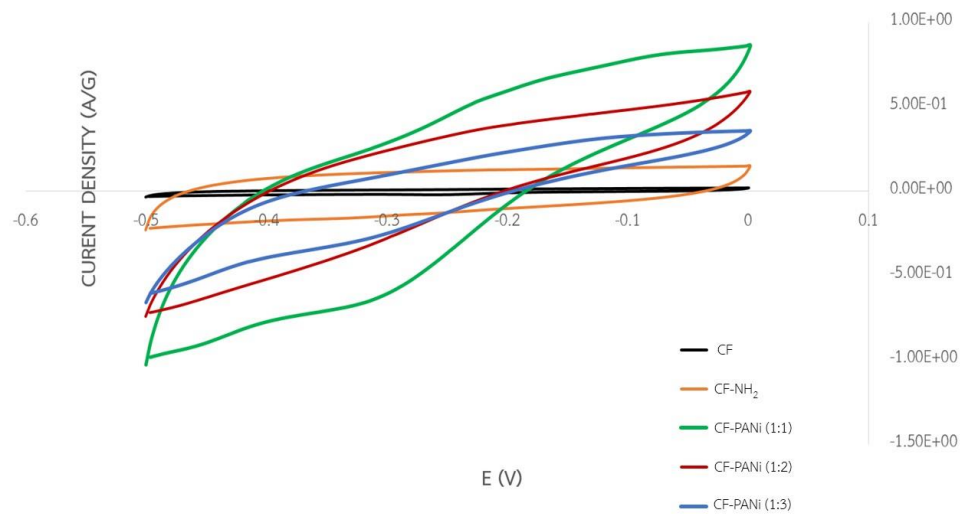
ทำการวิเคราะห์ผลการตัดแปรมีวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนและการเคลือบพอลิแอนิไลน์โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โดยใช้คุณสมบัติทางความร้อนของผงเส้นใยคาร์บอน ผงเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านปฏิกิริยารีดักชัน หรือ Amino Carbon fiber (CF-NH₂) และผงเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ด้วยเทคนิคออกซิเดชันพอลิเมอไรเซชันที่อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 ตามลำดับ ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมทริกอนาไลเซอร์ (Thermo Gravimetric Analyzer) ที่อุณหภูมิ 30-800 องศาเซลเซียส อัตราความร้อน 30 องศาต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนพบว่าเส้นใยคาร์บอนมี เสถียรภาพความร้อนสูงถึง 800 °C และไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 18% แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของหมู่เอมีน และเมื่อทำการทดสอบการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของผงเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 พบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักที่สอดคล้องกัน โดยมีการสลายตัว 2 ช่วงอุณหภูมิ ช่วงแรกคือช่วงอุณหภูมิประมาณ 106 °C แสดงถึงการสูญเสียน้ำ และ volatiles species มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 10.38%, 11.83% และ 13.22% ตามลำดับ และช่วงที่สองคือช่วงอุณหภูมิประมาณ 255 °C แสดงถึงการสูญเสีย phosphate ions และ polyaniline backbone โดยมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 19.32%, 22.15% และ 23.62% ตามลำดับ โดยหลังจากการเคลือบพอลิแอนิไลน์บนผงเส้นใยคาร์บอน พบว่ามีน้ำหนักเพิ่มขึ้นถึง 40% ดังแสดงในรูปที่ 4.18



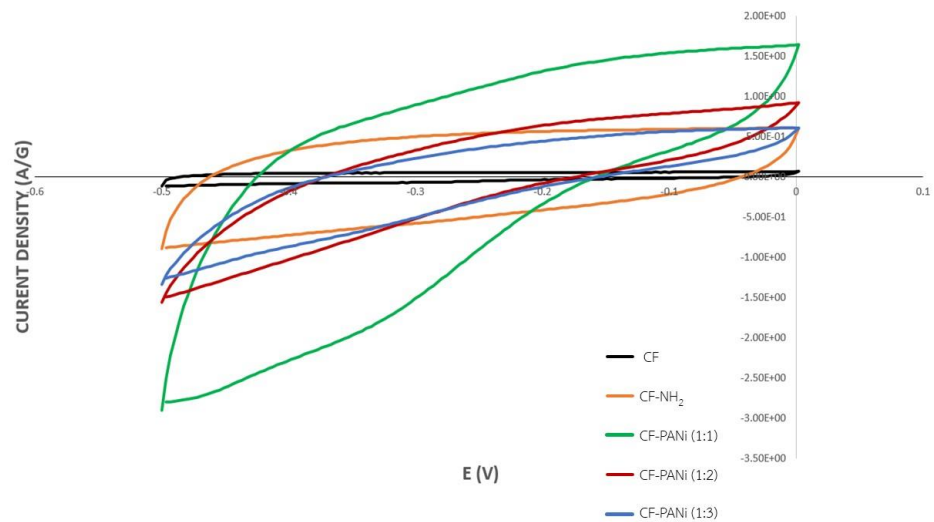
รูปที่ 4.21 แสดงการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของผงเส้นใยคาร์บอน (CF), Amino Carbon fiber (CF-NH₂) และ ผงเส้นใยคาร์บอนดัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิซีน (CF-PANi/1:1, 1:2, 1:3)

4.9 ผลของการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส

การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส โดย cyclic voltammetry (CV) เป็นการวิเคราะห์ความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุ ซึ่งได้เคลือบระหว่างกระแส (Current (A/g)) กับศักย์ไฟฟ้า (Potential (v vs. Ag/AgCl)) โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 3 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) ใช้กิกเกลโฟมที่เคลือบด้วยวัสดุตัวนำได้แก่ CF, CF-NH₂, CF-PANi (1:1), CF-PANi (1:2) และ CF-PANi (1:3) โดยให้ศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0 โวลต์ ในการทดสอบที่อัตราศักย์ไฟฟ้า 10 มิลลิโวลต์/วินาที โดยได้ค่าความสามารถในการเก็บประจุของ CF, CF-NH₂, CF-PANi (1:1), CF-PANi (1:2) และ CF-PANi (1:3) คือ 0.51, 5.36, 15.50, 9.30 และ 5.93 ฟารัด/กรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และเมื่อทดสอบที่อัตราศักย์ไฟฟ้า 50 มิลลิโวลต์/วินาที ได้ค่าความสามารถในการเก็บประจุของ CF, CF-NH₂, CF-PANi (1:1), CF-PANi (1:2) และ CF-PANi (1:3) คือ 0.49, 4.4, 8.75, 4.26 และ 2.55 ฟารัด/กรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.23



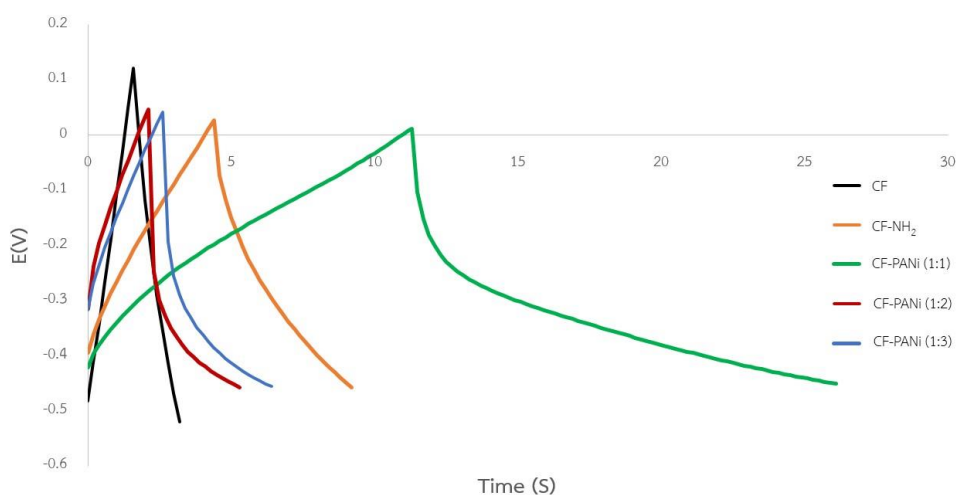
รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส โดยเทคนิค cyclic voltammetry (CV) ที่อัตราสแกน 10 mV/s



รูปที่ 4.23 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส โดยเทคนิค cyclic voltammetry (CV) ที่อัตราสแกน 50 mV/s

จากนั้นวิเคราะห์ยืนยันความสามารถในการเก็บประจุด้วย Galvanostatic charge - discharge (GCD) พบว่า CF, CF-NH₂, CF-PANi (1:1), CF-PANi (1:2) และ CF-PANi (1:3) คือ 5.0, 19.82, 63.92, 13.24 และ 15.28 ฟารัด/กรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่

4.24 โดยค่าความสามารถในการเก็บประจุของทั้งสองเทคนิคสามารถสรุปได้ตามตารางที่ 4.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความสามารถในการเก็บประจุที่คำนวณได้จากเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) มีความสอดคล้องกัน และพบว่าผงเส้นใยคาร์บอนมีความสามารถในการเก็บประจุได้น้อยที่สุด เมื่อเทียบกับ Amino Carbon fiber (CF-NH₂) และ ผงเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิ ลีนที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยเมื่อพิจารณาความสามารถในการเก็บประจุของผงเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิ ลีน (CF-PANI) ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 พบว่าที่อัตราส่วน 1:1 ให้ค่าความสามารถในการเก็บประจุสูงสุด ที่ค่า 15.50 และ 63.92 ฟารัด/กรัม จากเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้ ผงเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิ ลีน (CF-PANI) ที่อัตราส่วน 1:1 เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มค่าความสามารถในการเก็บประจุของผงเส้นใยคาร์บอน โดยสันนิษฐานว่า ผงเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิ ลีน (CF-PANI) ที่อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 เป็นปริมาณที่มากเกินไปที่ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มค่าความสามารถในการเก็บประจุ [30]



รูปที่ 4.24 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตสโดยเทคนิค Galvanostatic charge - discharge (GCD)

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการเก็บประจุของผงเส้นใยคาร์บอน, Amino Carbon fiber (CF-NH₂) และ ผงเส้นใยคาร์บอนดัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ (CF-PANI/1:1, 1:2, 1:3) ด้วยเทคนิค cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge - discharge (GCD)

ชนิดของสาร	ค่าการเก็บประจุ (ฟารัด/กรัม)		
	Cyclic voltammetry (CV) 10 mv/s	Cyclic voltammetry (CV) 50 mv/s	Galvanostatic charge - discharge (GCD)
ผงเส้นใยคาร์บอน (CF)	0.51	0.49	5.0
Amino Carbon fiber (CF-NH ₂)	5.36	4.4	19.82
ผงเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ (CF-PANI/1:1)	15.50	8.75	63.92
ผงเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ (CF-PANI/1:2)	9.30	4.26	13.24
ผงเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ (CF-PANI/1:3)	5.93	2.55	15.28

4.10 ผลของการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน

จากขั้นตอนการเตรียมไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน โดยสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวก และพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุลบ ซึ่งทั้งนี้ในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนจะสามารถเกิดขึ้นด้วยตนเอง [32] โดย ในที่นี้ได้ทำการผสมสารสองชนิดได้แก่ polystyrene sulfonate (PSS) และ polydiallyldimethylammonium chloride (PDADMAC) เข้าด้วยกัน ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์เป็นตัวควบคุมลักษณะของสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์ โดยจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ และเข้าไปแทรกกลางระหว่างพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวกกับประจุลบของ polystyrene sulfonate (PSS) และ polydiallyldimethylammonium chloride (PDADMAC)) โดยการสร้างพันธะระหว่างพอลิเมอร์และเกลือ หลังจากนั้นทำการแยกเกลือบางส่วนออกโดยการทำให้ละลาย เพื่อให้บางส่วนของพอลิอิเล็กโทรไลต์ประจุบวกกับลบเกิดอันตรกิริยาทางไฟฟ้า และเกิดการเชื่อมขวางจนเกิดเป็นพอลิอิเล็กโทรไลต์

ไฮโดรเจล ดังแสดงในรูปที่ 4.25 (a) โดยหลังจากการทำไดอะไลซิสและปล่อยให้แห้งเป็นเวลา 1 สัปดาห์ จะได้ไฮโดรเจลของพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนที่แห้งติดกับจานเพาะเชื้อ เพื่อง่ายต่อการนำมาเตรียมขึ้นรูปในขั้นตอนของการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.25 (b)



(a)

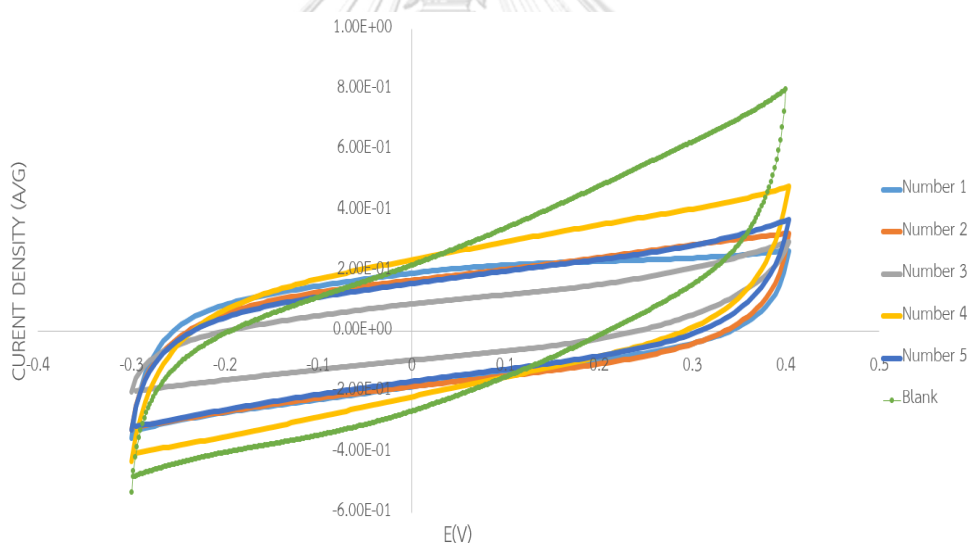
(b)

รูปที่ 4.25 ไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน (a) ไฮโดรเจลในรูปที่ไหลได้ และ (b) ไฮโดรเจลที่มีความแข็งแรงสูง

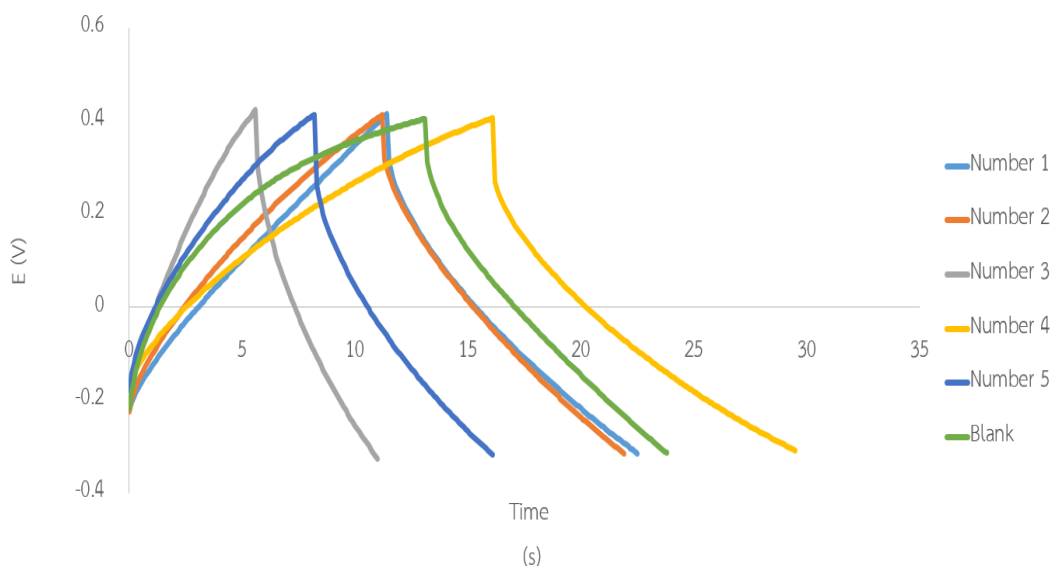
4.11 ผลการวิเคราะห์สมบัติความเป็นไฮโดรเจลอิเล็กโทรไลต์จากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน ด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส

วิเคราะห์ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส (Potentiostat) โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) ใช้ฉีกกิลโฟมที่เคลือบด้วยวัสดุตัวนำโดยเลือกจากข้อ 4.7.4 ได้แก่ CF-PANi (1:1) ทำการขึ้นขั้วไฟฟ้าจำนวน 6 คู่ ได้แก่ คู่สำหรับจำนวนชั้นการเคลือบไฮโดรเจล 1, 2, 3, 4, 5 ชั้น และกระดาษกรองเปล่า (Blank) ตามลำดับ โดยให้ศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ -0.3 ถึง 0.4 โวลต์ ในการทดสอบที่อัตราศักย์ไฟฟ้า 10 มิลลิโวลต์/วินาที ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของไฮโดรเจลด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตสโดยเทคนิค cyclic voltammetry (CV) ได้ค่าความสามารถในการเก็บประจุ ของ

จำนวนชั้นการเคลือบไฮโดรเจล 1 , 2, 3, 4, 5 ชั้น และกระดาษกรองเปล่า (Blank) คือ 15.78, 15.73, 16.18, 40.13, 14.43 และ 21.20 ฟาร์ด/กรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 4.26 จากนั้นวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของไฮโดรเจลด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตสโดยเทคนิค Galvanostatic charge - discharge (GCD) ได้ค่าความสามารถในการเก็บประจุ ของจำนวนชั้นการเคลือบไฮโดรเจล 1 , 2, 3, 4, 5 และ กระดาษกรองเปล่า (Blank) คือ 30.45, 29.86, 14.43, 37.51, 21.63 และ 29.80 ฟาร์ด/กรัม ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 4.27 โดยตารางที่ 4.4 แสดงค่าการเก็บประจุของผงเส้นใยคาร์บอนดัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิลินที่อัตราส่วน 1:1 (CF-PANI/1:1) โดยใช้ไฮโดรเจลจากพอลิอิลีกโพรไลต์เชิงซ้อนที่ความหนา 1, 2, 3, 4, และ 5 ชั้น และกระดาษกรองเป็นตัวคั่นกลาง (Separator) ด้วยเทคนิค cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge - discharge (GCD)



รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของไฮโดรเจลด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตสโดยเทคนิค cyclic voltammetry (CV)



รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของไฮโดรเจลด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตสโดยเทคนิค Galvanostatic charge - discharge (GCD)

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าการเก็บประจุของผงเส้นใยคาร์บอนดัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิซีนที่อัตราส่วน 1:1 (CF-PANi/1:1) โดยใช้ไฮโดรเจลจากพอลิอิลิกโทรไลต์เชิงซ้อนที่ความหนา 1, 2, 3, 4, และ 5 ชั้น และกระดาษกรองเป็นตัวคั่นกลาง (Separator) ด้วยเทคนิค cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge - discharge (GCD)

ชนิดตัวคั่นกลาง (Separator)/จำนวนชั้นของไฮโดรเจลจากพอลิอิลิกโทรไลต์เชิงซ้อน	ค่าการเก็บประจุ (ฟารัด/กรัม)	
	Cyclic voltammetry (CV)	Galvanostatic charge - discharge (GCD)
ไฮโดรเจลจากพอลิอิลิกโทรไลต์เชิงซ้อน 1 ชั้น	15.78	30.45
ไฮโดรเจลจากพอลิอิลิกโทรไลต์เชิงซ้อน 2 ชั้น	15.73	29.86
ไฮโดรเจลจากพอลิอิลิกโทรไลต์เชิงซ้อน 3 ชั้น	16.18	14.43
ไฮโดรเจลจากพอลิอิลิกโทรไลต์เชิงซ้อน 4 ชั้น	40.13	37.51
ไฮโดรเจลจากพอลิอิลิกโทรไลต์เชิงซ้อน 5 ชั้น	14.43	21.63
กระดาษกรองเปล่า	21.20	29.80

จากผลของค่าการเก็บประจุของผงเส้นใยคาร์บอนดัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิลีนที่อัตราส่วน 1:1 (CF-PANi/1:1) โดยใช้ไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนที่ความหนา 1, 2, 3, 4, และ 5 ชั้น เป็นตัวคั่นกลาง พบว่า ผงเส้นใยคาร์บอนดัดแปรเคลือบด้วยพอลิแอนิลีนที่อัตราส่วน 1:1 (CF-PANi/1:1) ที่ถูกเลือกนำมาขึ้นขั้วเป็นอิเล็กโทรด ยังคงมีความสามารถในการเก็บประจุได้ถึงแม้จะมีไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนที่ความหนาต่าง ๆ เป็นตัวแปร และเมื่อพิจารณาจำนวนชั้นของไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนที่นำมาใช้เป็นตัวคั่นกลางพบว่า การเคลือบจำนวน 1 ชั้น, 2 ชั้น และ 3 ชั้น ให้ค่าการเก็บประจุไม่แตกต่างกัน แต่เมื่อเคลือบพอลิอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจลจำนวน 4 ชั้น ให้ค่าการเก็บประจุสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเพิ่มจำนวนชั้นการเคลือบเป็น 5 ชั้น พบว่าค่าการเก็บประจุต่ำลง และเมื่อเปรียบเทียบค่าการเก็บประจุเมื่อใช้กระดาษกรองเปล่าเป็นตัวคั่นกลางแสดงให้เห็นว่าการใช้พอลิอิเล็กโทรไลต์ไฮโดรเจลจำนวน 4 ชั้น เป็นตัวคั่นกลางให้ค่าการเก็บประจุสูงสุด

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ เตรียมเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิลีนและไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน ศึกษาเส้นใยคาร์บอนเคลือบพอลิแอนิลีนชั้นขั้วอิเล็กโทรด และศึกษาตัวคั่นกลางจากไฮโดรเจลพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน โดยสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลของการเตรียมเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิลีน และไฮโดรเจลจากพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน

การเตรียมเส้นใยคาร์บอนจากผ้าคาร์บอน และนำไปตัดแปรรูปผิวหุ้มฟังก์ชันเอมีน โดยเริ่มจากการทำปฏิกิริยาไนเตรชัน จากนั้นทำปฏิกิริยารีดักชัน และนำไปวิเคราะห์ผลการตัดแปรรูปผิวเบื้องต้น ได้แก่ วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบเส้นใยคาร์บอนมีลักษณะพื้นผิวเรียบ โดยหลังจากการตัดแปรรูปผิวโดยปฏิกิริยาไนเตรชันพบว่า มีอนุภาคมาเกาะบนพื้นผิว และอนุภาคเหล่านี้ยังคงพบอยู่เมื่อผ่านขั้นตอนปฏิกิริยารีดักชัน ซึ่งแสดงได้ว่าอนุภาคเหล่านี้คืออนุภาคผงคาร์บอนที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของเส้นใย และทำการวิเคราะห์หุ้มฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี โดยไม่พบหุ้มฟังก์ชันไนโตรและหมู่เอมีนตามที่คาดหวังไว้ จากนั้นเตรียมผงเส้นใยคาร์บอนจากผ้าคาร์บอนโดยนำไปบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล จากนั้นตัดแปรรูปผิวหุ้มฟังก์ชันเอมีน โดยเริ่มจากการทำปฏิกิริยาไนเตรชัน ปฏิกิริยารีดักชัน ตามด้วยการเคลือบด้วยพอลิแอนิลีนด้วยเทคนิคออกซิเดชันพอลิเมอร์ไรเซชัน โดยทำการเติมแอนิลีน ทั้งหมด 3 อัตราส่วน คือ อัตราส่วน 1 , 2 และ 3 เท่าของน้ำหนักผงเส้นใยคาร์บอน และนำไปวิเคราะห์ผลการตัดแปรรูปผิว วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นผลทำให้เส้นใยคาร์บอนมีลักษณะแตกออกเพียงบางส่วน โดยบางส่วนยังคงมีรูปทรงเป็นทรงกระบอกพื้นผิวเรียบ โดยหลังจากการตัดแปรรูปผิวโดยปฏิกิริยาไนเตรชันและรีดักชันพบว่า มีอนุภาคมาเกาะบนพื้นผิว และพบว่าการเคลือบด้วยพอลิแอนิลีนด้วยเทคนิคออกซิเดชันพอลิเมอร์ไรเซชันประสบความสำเร็จ ทำการวิเคราะห์หุ้มฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี พบหมู่ไนโตร หมู่เอมีน และอนุพันธ์ของพอลิแอนิลีนตามที่คาดหวังไว้

จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการดัดแปรผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีนและการเคลือบพอลิแอนิไลน์ โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก พบว่าเมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก 18% โดยหลังจากการเคลือบพอลิแอนิไลน์บนผงเส้นใยคาร์บอน พบว่ามีน้ำหนักเพิ่มขึ้นถึง 40% เมื่อวิเคราะห์ค่าการเก็บประจุจากเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ของผงเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ (CF-PANI) ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2 และ 1:3 พบว่าที่อัตราส่วน 1:1 ให้ค่าความสามารถในการเก็บประจุสูงสุด ที่ค่า 15.50 และ 63.92 ฟารัด/กรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้ ผงเส้นใยคาร์บอนเคลือบด้วยพอลิแอนิไลน์ (CF-PANI) ที่อัตราส่วน 1:1 เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มค่าความสามารถในการเก็บประจุของผงเส้นใยคาร์บอน การเตรียมไฮโดรเจลอิเล็กโทรไลต์สามารถเตรียมได้ โดยการผสม (PSS) และ (PDADMAC) เข้าด้วยกัน โดยใช้สารละลาย NaCl เป็นตัวควบคุมลักษณะของสารประกอบเชิงซ้อนพอลิอิเล็กโทรไลต์

5.1.2 ผลการศึกษาเส้นใยคาร์บอนเคลือบพอลิแอนิไลน์ชั้นขั้วอิเล็กโทรด และศึกษาตัวคั่นกลางจากไฮโดรเจลพอลิอิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อน

ใช้ CF-PANI (1:1) ในการขึ้นขั้วไฟฟ้า โดยไฮโดรเจลอิเล็กโทรไลต์ใช้ในการเตรียมเป็นตัวคั่นกลาง (Separator) ในวงจรไฟฟ้า ที่จำนวนชั้นในการเคลือบคือ 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั้น CF-g-PANI อิเล็กโทรดให้ค่าการเก็บประจุ โดยการเคลือบไฮโดรเจลอิเล็กโทรไลต์ลงบนกระดาษกรองเพื่อนำไปทดสอบเป็นตัวคั่นขั้วให้ค่าการเก็บประจุ โดยไฮโดรเจลนำไปใช้เป็นตัวคั่นระหว่างขั้วได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้แทนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ได้ พบว่าจำนวนชั้นการเคลือบไฮโดรเจลอิเล็กโทรไลต์ที่ 4 ชั้น ให้ค่าการเก็บประจุสูงสุดที่ 40.13 และ 37.51 ฟารัด/กรัม ตามลำดับ โดยไฮโดรเจลดังกล่าวนำไปใช้เป็นแผ่นกั้นกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าได้อย่างดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไนเตรชัน จากเส้นใยคาร์บอน ควรทดลองปรับเปลี่ยนเวลาในการปล่อยทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา หรือทดลองหาเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากการทดลองนี้ใช้เวลาในการปล่อยทิ้งไว้หลังจากทำการผสมกรดเพียงช่วงเวลาเดียวคือ 12 ชั่วโมง
2. ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไนเตรชัน จากผงเส้นใยคาร์บอน ควรทดลองปรับเปลี่ยนเวลาในการปล่อยทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา หรือทดลองหาเวลาที่เหมาะสม เนื่องจากการทดลองนี้ใช้เวลาในการปล่อยทิ้งไว้หลังจากทำการผสมกรดเพียงช่วงเวลาเดียวคือ 30 วัน
3. หลังจากขั้นตอนการบดด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล การทดลองนี้ทำการแยกเฉพาะผงเส้นใยคาร์บอนที่รวมตัวเป็นกลุ่มก้อนที่มีลักษณะเป็นเม็ดและสามารถมองเห็นด้วยตาเปล่าออก และนำเฉพาะที่มีลักษณะเป็นผงมาใช้ ซึ่งควรทำการแยกขนาดก่อนนำมาใช้งานด้วย Sieve เนื่องจากจะมีผลต่อการวิเคราะห์ผล ยกตัวอย่างเช่น ผลการเตรียมผงเส้นใยคาร์บอนที่ผ่านการคัดแปรผิวด้วยหมูฟังก์ชั้นเอมีนและเคลือบพอลิแอนิซีน หรือผลการวิเคราะห์สมบัติความเป็นไฮโดรเจลอิเล็กโทรไลต์จากพอลิเล็กโทรไลต์เชิงซ้อนในส่วนของการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และ Galvanostatic charge and discharge (GCD) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส ที่จะมีการขึ้นขั้วอิเล็กโทรด โดยการไม่แยกขนาดก่อนนำมาวิเคราะห์ผล ทำให้ค่าในการวิเคราะห์ที่ได้ไม่สามารถบ่งบอกถึงค่าการเก็บประจุที่ได้มีการควบคุมปริมาณพอลิแอนิซีนที่อัตราส่วนต่าง ๆ อย่างแท้จริง เนื่องจากพื้นที่ผิวของขั้วอิเล็กโทรดที่เตรียมแต่ละอันไม่เท่ากัน ย่อมส่งผลให้ค่าการเก็บประจุที่แปรผันตามพื้นที่ผิวไปด้วย
4. ในขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการคัดแปรผิวด้วยหมูฟังก์ชั้นเอมีนและการเคลือบพอลิแอนิซีนโดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก โดยใช้สมบัติทางความร้อนของผงเส้นใยคาร์บอน ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลเซอร์ จะเห็นว่าผลที่ได้จากกราฟของ CF-PANi มีช่วงการสลายตัวของน้ำเกิดขึ้น คาดว่ามาจากความชื้น ซึ่งอาจมาจาก 2 สาเหตุหลัก ได้แก่ การอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งสันนิษฐานว่าเป็นช่วงอุณหภูมิที่ต่ำและเวลาที่น้อยเกินไป ควรใช้อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้สารตัวอย่างแห้ง และอีกหนึ่งสาเหตุคือ ระยะเวลาการเก็บตัวอย่างในการนำไปวิเคราะห์ผล ควรเก็บตัวอย่างที่ได้หลังจากการอบแห้งแล้ว ไปวิเคราะห์ผลทันที เนื่องจากอาจเกิดความชื้นในระหว่างการเก็บตัวอย่าง

บรรณานุกรม

1. Johnson, D.J., *Structure property relationships in carbon fibers*. Phys. D: Appl. Phys, 1987. **374**: p. 163-181.
2. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์, การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยใช้ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี. คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 2554.
3. Chand S, *Review carbon fiber for composites*. J. of materials science, 2000. **35**: p. 1303-1212.
4. ชัยรัมย์, เ., พอลิอะนิลีนและอนุพันธ์นำไฟฟ้า: การสังเคราะห์และประยุกต์ใช้. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2555. **14**.
5. Pandolfo, A.G. and A.F. Hollenkamp, *Carbon properties and their role in supercapacitors*. Journal of Power Sources 2006. **157**(1): p. 11-27.
6. Sayah, A., *Electrochemical synthesis of polyaniline-exfoliated graphene composite films and their capacitance properties*. Journal of Electroanalytical Chemistry 2018. **818**: p. 26-34.
7. Su, C.-I. and e. al, *Evaluation of activated carbon fiber applied in supercapacitor electrodes*. Fibers and Polymers, 2014. **15**(8): p. 1708-1714.
8. สว่างพฤกษ์, ม., นาโนเทคโนโลยีนวัตกรรมของตัวเก็บ พลังงาน: ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด. . ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง, 2556. **85**(26): p. 9-25.
9. แต่งกวารรัมย์, ธ. and ม. ถนอมวงศ์, การพัฒนาเคมีคอลเซนเซอร์สำหรับวัดตะกั่วในน้ำฝิ่งด้วยขั้วไฟฟ้าบิสมัทอะมัลกัม-ท่อคาร์บอนนาโนปรับแต่งด้วยไคโตซานแบบเชื่อมไขว้. มหาวิทยาลัยแม่โจ้, 2556: p. 1-133.
10. Berger, J. and e. al, *Structure and interactions in chitosan hydrogels formed by complexation or aggregation for biomedical applications*. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2004. **57**(1): p. 35-52.
11. RM, F. and S. H, *Mutual interaction of polyelectrolytes*. Science, 1949. **110**(2865): p. 552-554.
12. Nabid, M.R. and et al., *Polyaniline/TiO₂ nanocomposite: enzymatic synthesis and electrochemical properties*. Int. J. Electrochem. Sci, 2008. **3**(117).

13. Jvd, G. and e. al, *Polyelectrolyte complexes: Bulk phases and colloidal systems*. J Colloid Interf Sci 2011. **361**(2): p. 407-422.
14. AF, T., *Polyelectrolyte complexes*. Adv Polym Sci 2004. **166**: p. 16-33.
15. AS, M. and e. al, *Polycation-polyanion complexes: Preparation and properties of poly (vinylbenzyltrimethylammonium) poly- (styrenesulfonate)*. J Phys Chem 1961. **65**(10): p. 1765-1773.
16. S, L. and K. VRM, *Polyelectrolyte complexes: A review of their applicability in drug delivery technology*. Indian J Pharm Sci 2009. **71**(5): p. 481-487.
17. Sowmya, H.a.S., M, *Carbon Fiber/Polyaniline as a High Performance Electrode for a Symmetrical Supercapacitor*. Journal of Electronic Materials, 2019. **48**(2): p. 1054–1065.
18. Cheng, Q., Tang, J., Ma, J., Zhang, H., Shinya, N., and Qin, L, *Polyaniline-Coated Electro-Etched Carbon Fiber Cloth Electrodes for Supercapacitors*. Journal of Electronic Materials, 2011. **115**(47): p. 23584-23590.
19. Areebumrungsuk, P., Sukhsuwan, P., and Pattananuwat, P, *Preparation of graphene /poly (diallyldimethylammoniumchloride)–poly (styrene sulfonate) polyelectrolyte composites and their electrochemical performance*. Materials Science and Engineering, 2019. **600**(1): p. 012010.
20. Murakawa, K., King, D., Sun, T., Guo, H., Kurokaw, T., and Gong, J, *Polyelectrolyte complexation via viscoelastic phase separation results in tough and self-recovering porous hydrogels*. Journal of Materials Chemistry B, 2019. **7**(35): p. 5279-5424.
21. Pan, L., Yu, G., Zhai, D., Lee, H., Zhao, W., Liu, N., Wang, H., Tee, B., Shi, Y., Cui, Y., and Bao, Z, *Hierarchical nanostructured conducting polymer hydrogel with high electrochemical activity*. Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2012. **109**(24): p. 9287-9292.
22. Mishra, S. and A.C. Nigam, *Synthesis and Characterization of Polyaniline Coated Carbon Fiber Composites* International Journal of Scientific Research, 2015. **4**(8): p. 227-8179.
23. Imre, A.W., M. Schonhoff, and C. Cramer, *A conductivity study and calorimetric analysis of dried poly(sodium 4-styrene sulfonate)/poly (dially*

- (dimethylammonium chloride) polyelectrolyte complexes. The Journal of Chemical Physics 2008. **128**(13).
24. Zhao, J. and e. al, *Preparation of the polyelectrolyte complex hydrogel of biopolymers via a semi dissolution acidification sol-gel transition method and its application in solid-state supercapacitors*. Journal of Power Sources, 2018. **378**: p. 603-609.
 25. Jia, R. and a. et, *Stretchable and compressible supercapacitor with polyaniline on hydrogel electrolyte*. Journal of The Electrochemical Society 2018. **165**(16): p. A3792-A3798.
 26. Abe, M., Kawashima, K., Kozawa, K., Sakai, H., Kaneko, K, *Amination of Activated Carbon and Adsorption Characteristics of Its Aminated Surface*. Langmuir, 2000. **16**(11): p. 5059-5063.
 27. Mazarji, M., Aminzadeh, B., Baghdadi, M., Bhatnaga, A, *Removal of nitrate from aqueous solution using modified granular activated carbon*. Journal of Molecular Liquids, 2017. **233**: p. 139-148.
 28. สายอินทวงศ์, ค., *Grinding or Milling*. Retrieve on 26 Octobal, from http://www.thaiceramicsociety.com/pc_pre_grindmore.php.
 29. Stejskal, J.a.G., R.G, *Polyaniline. Preparation of a conducting polymer(IUPAC Technical Report)*. 2002. **74**.
 30. Wang, G., et al. , *The electrocapacitive properties of polyaniline/VXC-72 composite electrodes*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 2018. **540**: p. 98-105.
 31. Chaplin, M., *Infrared Spectroscopy*. Creative Commons Attribution Noncommercial-No Derivative Works 2.0 UK: England & Wales License, 2013.
 32. J. Berger, M.R., J.M. Mayer, O. Felt, R. Gurny, *Structure and interactions in chitosan hydrogels formed by complexation or aggregation for biomedical applications*. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2004. **57**(1): p. 35-52.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	น.ส.จุฑาภักดิ์ เกษรทอง
วัน เดือน ปี เกิด	12 กันยายน 2534
สถานที่เกิด	ราชบุรี
วุฒิการศึกษา	วท.บ. (เคมี) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ที่อยู่ปัจจุบัน	9/89 สลีนพรีอเพอร์ตี้ ถ.หลวงแผ่นดินหมายเลข 363 ต.เนินพระ อ. เมืองระยอง จ.ระยอง 21150
ผลงานตีพิมพ์	"Preparation and Properties of Carbon Fiber Grafted with Polyaniline" SIIMC 2020



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY