

การเตรียมและสมบัตินำไฟฟ้าของผงถ่านกัมมันต์กราฟต์ด้วยพอลิเอนิลีน



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชาวัสดุศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION AND ELECTRICAL PROPERTIES OF ACTIVATED CARBON POWDER
GRAFTED WITH POLYANILINE



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Applied Polymer Science and Textile
Technology

Department of Materials Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

5972073923 : MAJOR APPLIED POLYMER SCIENCE AND TEXTILE TECHNOLOGY

KEYWORDS: ACTIVATED CARBON/POLYANILINE NANOFIBER COMPOSITE / ELECTRICAL CONDUCTIVITY / , ELECTRICAL DOUBLE LAYER CAPACITANCE

SIRINYA SOTTIUDOM: PREPARATION AND ELECTRICAL PROPERTIES OF ACTIVATED CARBON POWDER GRAFTED WITH POLYANILINE. ADVISOR: ASSOC. PROF. KAWEE SRIKULKIT, Ph.D., 81 pp.

Activated carbon (AC) grafted with polyaniline (PANI) was prepared. Firstly, surface modifications of AC were carried out using sulfuric acid/nitric acid (nitration) and followed by sodium hydrosulfite/ammonia (reduction), resulting in nitro group functionalized AC and free amine group functionalized AC, respectively. Functionalized groups were confirmed by FTIR analysis and ^1H NMR analysis. Then, PANi was deposited onto modified AC surface through oxidation polymerization of aniline using ammonium persulfate as an initiator. In this experiment, three types of products were prepared as follows: AC/PANi, AC-NO₂/PANi and AC-NH₂/PANi or AC-NH₂-g-PANi at AC : aniline wt ratios of 1:0.1, 1:0.2, 1:0.25, 1:0.3, 1:0.4 and 1:0.5. SEM images revealed that PANi was successfully deposited onto modified AC surface due to polar-polar interaction (in case of AC-NO₂) and grafting reaction (in case of AC-NH₂). Interestingly, at low aniline concentration, PANi nanofiber was produced, resulting in PANi having the highest surface area. As a result, the PANi nanofiber on porous activated carbon electrode exhibited highest capacitance value of 858.8 F/g. In contrast, PANi granular form exhibited significantly decreased in capacitance value of 425.4 F/g.

Department: Materials Science Student's Signature

Field of Study: Applied Polymer Science Advisor's Signature
and Textile Technology

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ อันเนื่องมาจากได้รับความอนุเคราะห์ การสนับสนุน และความช่วยเหลือทั้งในด้านวิชาการ วัสดุ อุปกรณ์ การดำเนินงาน สถานที่ทำการวิจัย และเงินทุนสนับสนุน ข้าพเจ้าจึงขอขอบคุณบุคคลและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องดังนามต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. กาวี ศรีกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาของโครงการ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ส่งเสริมในด้านวิชาการ ความช่วยเหลือ คำปรึกษาตลอดในการดำเนินงาน ให้แนวทางแก้ไขปัญหาต่างๆ และให้เงินทุนสนับสนุนในงานวิจัยของข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดชทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา

ขอขอบพระคุณเพื่อนนิสิตปริญญาโท สาขาพอลิเมอร์และสิ่งทอ และเพื่อนในห้องปฏิบัติการทุกคน ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และเป็นกำลังใจในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้คำปรึกษาและการสนับสนุนการวิจัยด้านวัสดุอุปกรณ์และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทดสอบต่างๆ ระหว่างการดำเนินงานวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและให้ความรู้ทุกสิ่งทุกอย่างแก่ข้าพเจ้า

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป	ญ
สารบัญตาราง.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 มุลเหตุจูงใจในการทำวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	4
2.2 รูปแบบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า [3]	4
2.3 โครงสร้างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า.....	8
2.4 พอลิแอนิซีน.....	10
2.4.1 การสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันทางเคมี	12
2.4.2 การสังเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า	12
2.4.3 การสังเคราะห์โดยใช้แสง	13
2.5 แกรไฟต์	13
2.6 ผงถ่านกัมมันต์	15
2.6.1 การผลิตผงถ่านกัมมันต์.....	15
2.6.2 ประเภทผงถ่านกัมมันต์.....	16

2.7 การนำไฟฟ้าของวัสดุ.....	17
2.8 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน.....	20
2.9 ตัวเก็บประจุ.....	20
2.10 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	22
2.10.1 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น.....	23
2.10.2 ซูโด้คาร์ปาซิเตอร์.....	24
2.10.3 ตัวเก็บประจุไฮบริด.....	25
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3.....	27
3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	27
3.3 เครื่องมือที่ใช้ในขั้นรูปขึ้นทดสอบ.....	28
3.4 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ.....	28
3.5 ขั้นตอนการทดลอง.....	28
3.5.1 การตัดแปรรผิวของผงถ่านกัมมันต์ด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน.....	28
3.5.2 การต่อกิ่งพอลิเอินิลีนลงบนผิวของผงถ่านกัมมันต์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีน.....	30
3.6 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ.....	32
3.6.1 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR).....	32
3.6.2 วิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer, NMR).....	33
3.6.3 วิเคราะห์ผลึกด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในผลึก (X-ray Diffraction, XRD).....	34
3.6.4 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM).....	34

3.6.5 วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ (Multimeter).....	35
3.6.6 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยวิธี Cyclic voltammetry (CV) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส (Potentiostat)	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	39
4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี	39
4.1.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)	39
4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer, NMR)	40
4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิควิเคราะห์ผลึกด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในผลึก (X-ray Diffraction, XRD)	43
4.1.4 สันฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)	46
4.2 ผลการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า	49
4.2.1 สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดมัลติมิเตอร์ (Multimeter)	49
4.2.2 สมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยวิธี cyclic voltammetry (CV) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส	53
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	59
5.1 สรุปผลการทดลอง	59
5.2 ข้อเสนอแนะ	60
รายการอ้างอิง	61
ภาคผนวก.....	65
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	81

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ π -Conjugated Linear polymer.....	5
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ π -Conjugated Linear oligomers	6
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ Nonconjugated polymer containing pendant π -electron.....	7
รูปที่ 2.4 ค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ผ่านกระบวนการโด๊ป	10
รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีแบบต่างๆ ของพอลิแอนิลีน.....	11
รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์พอลิแอนิลีนด้วยวิธีการทางเคมี	12
รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์	14
รูปที่ 2.8 แบบจำลองโครงสร้างและสัณฐานวิทยาของผงถ่านกัมมันต์	16
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของผงถ่านกัมมันต์	17
รูปที่ 2.10 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในแท่งโลหะ	18
รูปที่ 2.11 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแท่งโลหะ เมื่อมีความต่างศักย์	18
รูปที่ 2.12 ประเภทของตัวเก็บประจุ	22
รูปที่ 2.13 ลักษณะการกระจายตัวของตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น.....	24
รูปที่ 3.1 ปฏิกิริยาไนเตรชันกับผงถ่านกัมมันต์ เกิดเป็น nitro activated carbon	29
รูปที่ 3.2 ปฏิกิริยารีดิวซ์กับ nitro activated carbon เกิดเป็น amino activated carbon.....	29
รูปที่ 3.3 การต่อกิ่งพอลิแอนิลีนลงบนผิวของ amino activated carbon (AC- NH ₂) เกิดเป็น AC-NH ₂ /PANI.....	30
รูปที่ 3.4 เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR)	33
รูปที่ 3.5 เครื่อง Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer (NMR).....	33
รูปที่ 3.6 เครื่อง X-ray Diffraction (XRD).....	34
รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	35

รูปที่ 3.8 เครื่องมัลติมิเตอร์	36
รูปที่ 3.9 เครื่องโพเทนชิโอสแตส.....	37
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของผงถ่านกัมมันต์ (AC), nitro activated carbon (AC-NO ₂) และ amino activated carbon (AC-NH ₂).....	40
รูปที่ 4.2 ¹ H-NMR ของ amino activated carbon (AC-NH ₂).....	41
รูปที่ 4.3 การต่อกิ่งพอลิแอนิไลน์ลงบนผิวของ amino activated carbon เกิดเป็น AC-NH ₂ /PANi.....	42
รูปที่ 4.4 ¹ H-NMR ของ AC-NH ₂ /PANi.....	42
รูปที่ 4.5 ดิฟแฟกโตรแกรมของพอลิแอนิไลน์ (PANi) และผงถ่านกัมมันต์(AC).....	43
รูปที่ 4.6 ดิฟแฟกโตรแกรมของ AC/PANi 1:0.25, AC-NO ₂ /PANi 1:0.25 และ AC-NH ₂ /PANi 1:0.25.....	44
รูปที่ 4.7 ดิฟแฟกโตรแกรมของ AC-NH ₂ /PANi 1:0.25 และ AC-NH ₂ /PANi 1:0.5.....	45
รูปที่ 4.8 สันฐานวิทยาของ ผงถ่านกัมมันต์, nitro activated carbon และ amino activated carbon	46
รูปที่ 4.9 สันฐานวิทยาของผงถ่านกัมมันต์ที่ต่อกิ่งด้วยพอลิแอนิไลน์ที่อัตราส่วนต่างๆ	47
รูปที่ 4.10 ภาพชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดกระเบื้อง และชิ้นงานที่มีการเคลือบวัสดุตัวนำ	49
รูปที่ 4.11 ภาพค่าความต้านทานของผงถ่านกัมมันต์ (AC) และ AC-NH ₂ /PANi ตามลำดับโดยใช้ เครื่องมัลติมิเตอร์ (Multimeter).....	50
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงแนวโน้มภาพรวมของค่าความต้านทานจำเพาะ	51
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงแนวโน้มภาพรวมของค่าการนำไฟฟ้า.....	53
รูปที่ 4.14 รูปตัวอย่างในการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยวิธี cyclic voltammetry	54
รูปที่ 4.15 กราฟของ CV curves ของ AC/PANi, AC-NO ₂ /PANi และ AC-NH ₂ /PANi ที่ อัตราส่วนต่างๆ.....	55
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงแนวโน้มภาพรวมของความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุ	57
รูปที่ 4.17 กราฟของ CV curves ของ AC/PANi, AC-NO ₂ /PANi และ AC-NH ₂ /PANi ที่ อัตราส่วน 1:0.3	57

รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบ CV curves ของ AC-NH₂/PANI 1:0.3 ที่ค่าอัตราศักย์ไฟฟ้า 10 mv/s และ 50 mv/s ตามลำดับ58



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงโครงสร้างพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและสารกระตุ้น.....	9
ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารผงถ่านกัมมันต์ต่อแอนีลีน.....	31
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ nitro activated carbon ต่อพอลิแอนีลีน.....	31
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ amino activated carbon ต่อพอลิแอนีลีน.....	32
ตารางที่ 3.4 แผนงานวิจัย	38
ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานจำเพาะที่อัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์กับ พอลิแอนีลีน	51
ตารางที่ 4.2 ค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์กับพอลิแอนีลีน..	52
ตารางที่ 4.3 ค่าการเก็บประจุที่อัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์กับ พอลิแอนีลีน.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 มุมเหตุจูงใจในการทำวิจัย

ในระบบไพคอนจูเกต (pi conjugated system) ซึ่งโมเลกุลมีลักษณะพิเศษ คือ จะมีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยว (conjugated double bonds) เช่น โมเลกุลสารให้สีอินทรีย์ (organic colorants) ซึ่งในระบบนี้ อิเล็กตรอนในชั้นไพออร์บิทัล (pi orbital) จะมีความสามารถในการเคลื่อนที่ (delocalization หรือ overlapping) ผ่านพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ที่สลับกันไปมาในโครงสร้าง ทำให้โมเลกุลประเภทนี้สามารถดูดกลืนแสง ปรากฏสี และนำไฟฟ้าได้ (electrical conductivity) ความสามารถในการนำไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความต่อเนื่องของพันธะไพคอนจูเกต ซึ่งพบปรากฏการณ์นี้ได้ ใน กราไฟต์ (graphite) แกรฟีน (graphene) คาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon nanotubes) และ ไพคอนจูเกตพอลิเมอร์ (pi conjugated polymers)

พอลิเมอร์นำไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ 1 อะลิฟาติกพอลิเมอร์ (aliphatic polymer) เช่น พอลิอะเซทิลีน (polyacetylene) ที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงเทียบเท่าโลหะ ($10-10^4$ ซีเมน/เซนติเมตร) และ 2 แอโรแมติกพอลิเมอร์ (aromatic polymers) ที่มีอะตอมของธาตุไนโตรเจนและกำมะถันอยู่ภายในหรือนอกวงแหวน เพื่อทำหน้าที่เป็นหลุมอิเล็กตรอน (electron hole) ทำให้ไพคอนจูเกตพอลิเมอร์มีสมบัติการนำไฟฟ้าได้ โดยความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ วิธีการสังเคราะห์ และสารกระตุ้น (dopant) เนื่องจากอะตอมไนโตรเจนหรือกำมะถันมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง (EN) จึงนิยมได้ด้วยการเติมกรดหรือปฏิกิริยาการเติมโปรตอน เรียกว่า P-dopant พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีการศึกษากันมาก ได้แก่ พอลิแอนิลีน (polyaniline) พอลิไทโอเฟน (polythiophene, polyethylenedioxythiophene (PEDOT)) พอลิไพร์โรล (polypyrrole) ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีความสนใจในการพัฒนาสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิแอนิลีน

พอลิแอนิลีนเป็นคอนจูเกตพอลิเมอร์ มีโครงสร้างทางเคมีเป็นแบบแอโรแมติก ทำให้พอลิแอนิลีนมีความเป็นผลึกสูง ด้วยเหตุนี้พอลิแอนิลีนจึงมีสมบัติเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น เซนเซอร์ (sensor) ตัวตัดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic interference, EMI) ตัวกักเก็บประจุในแบตเตอรี่ (supercapacitor energy storage) โซลาร์เซลล์ (solar cell) และตัวเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า (thermoelectric materials) พอลิแอนิลีนสามารถสังเคราะห์ได้ด้วยกลไก 2 แบบ เช่น กลไกทางไฟฟ้าเคมี และ กลไกทางเคมี ซึ่งกลไกทางเคมีเกิดขึ้นได้ด้วยปฏิกิริยา oxidation polymerization โครงสร้างทางเคมีของพอลิแอนิลีนมี 6 แบบ ขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยโมลระหว่าง aniline monomer :

persulfate initiator ซึ่งจะเรียกว่า leucoemeraldine, emeraldine และ pernigraniline เนื่องจากพอลิแอนิไลน์มีความเป็นผลึกสูง จึงหาตัวละลายได้ยาก และฟิล์มยังนำไฟฟ้าได้ดีเมื่อเทียบกับกราไฟต์

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิแอนิไลน์ โดยเทคนิคการต่อกิ่งลงบนผิวของผงถ่านกัมมันต์ โดยตำแหน่งต่อกิ่ง (branch sites) จะทำหน้าที่เป็นหลุมอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเป็นสะพานเชื่อมการวิ่งของอิเล็กตรอนไปมาระหว่างกิ่งพอลิแอนิไลน์และเลเยอร์แอโรแมติกของผงถ่านกัมมันต์ (aromatic layers) จึงคาดว่าวัสดุเชิงประกอบของพอลิแอนิไลน์/ผงถ่านกัมมันต์จะมีสมบัติทางไฟฟ้าได้ดีขึ้น ด้วยสมบัติของผงถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงมากและปั่นวัสดุที่มีรูพรุนในระดับไมโครเมตร จึงมีความคาดหวังว่าวัสดุเชิงประกอบของพอลิแอนิไลน์/ผงถ่านกัมมันต์จะสามารถเก็บประจุบนพื้นผิวได้สูง (high capacitance) ขอบเขตของงานวิจัยนี้เริ่มต้นโดยการดัดแปรพื้นผิวของผงถ่านกัมมันต์ด้วยปฏิกิริยาไนเตรชัน (nitration) ตามด้วยปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) เพื่อเติมหมู่เอมีนลงบนพื้นผิวของผงถ่านกัมมันต์ นำผงถ่านกัมมันต์ดัดแปรไปต่อกิ่งด้วยพอลิแอนิไลน์ ปฏิกิริยาการต่อกิ่งนี้จะเรียกว่า oxidation polymerization โดยทำการพอลิเมอไรเซชันสารละลายแอนิไลน์ด้วยตัวเริ่มปฏิกิริยา คือ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่ภาวะอุณหภูมิ 0-5 องศาเซลเซียส ในระบบที่มีผงถ่านกัมมันต์ดัดแปรกระจายตัวอยู่ ปฏิกิริยา oxidation polymerization เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงต้องควบคุมปฏิกิริยาด้วยระบบหล่อเย็นหรือทำที่อุณหภูมิต่ำ ภายหลังปฏิกิริยาสิ้นสุดลงคาดว่าจะได้กิ่งของพอลิแอนิไลน์ที่ต่ออยู่บนพื้นผิวของผงถ่านกัมมันต์ (activated carbon-g-polyaniline) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการนำไฟฟ้า และความสามารถในการเก็บประจุของกิ่งพอลิแอนิไลน์ที่ต่ออยู่กับผงถ่านกัมมันต์ โดยใช้เครื่องมัลติมิเตอร์ เพื่อวัดค่าความต้านทาน (resistivity) และเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (cyclic voltammetry) เพื่อคำนวณหาค่าความสามารถในการนำไฟฟ้า และความสามารถในการเก็บประจุด้วยเครื่อง potentiometer ตามลำดับ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อต้องการต่อกิ่งพอลิแอนิไลน์ลงบนผิวของผงถ่านกัมมันต์
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพสมบัติทางไฟฟ้าของผงถ่านกัมมันต์ที่ต่อกิ่งพอลิแอนิไลน์

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาการต่อกิ่งพอลิเอทิลีนลงบนผิวของผงถ่านกัมมันต์
2. ศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของผงถ่านกัมมันต์ที่ต่อกิ่งพอลิเอทิลีน
3. ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าของผงถ่านกัมมันต์ที่ต่อกิ่งพอลิเอทิลีน



บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

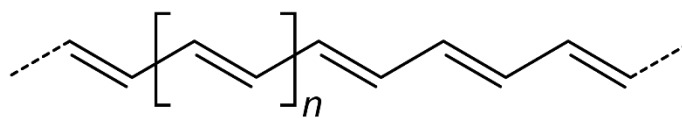
2.1 พอลิเมอร์นำไฟฟ้า

พอลิเมอร์มีมากมายหลากหลายชนิดและเป็นที่รู้จักของคนทั่วไปเป็นเวลานานหลายทศวรรษ ทั้งชนิดที่เป็นพลาสติกชนิดต่างๆ และยาง ที่มีสมบัติแตกต่างกัน แต่ในปี พ.ศ. 2520 ได้มีการค้นพบพอลิเมอร์ชนิดใหม่โดยนักวิทยาศาสตร์ที่มีชื่อว่า ฮิเดกิ ชิรากาวา (Hideki Shirakawa) ชาวญี่ปุ่น อลัน จี แมคไดอาร์มิด (Alen G. MacDiarmid) และ อลัน เจ ฮีเกอร์ (Alen J. Heeger) ชาวอเมริกา ที่ร่วมกันศึกษาและค้นพบพอลิเมอร์ที่เรียกว่า พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Intrinsically Conducting Polymer, ICPs) โดยพอลิเมอร์ที่ร่วมกันศึกษาและค้นพบวิธีการสังเคราะห์คือ ผลึกของพอลิอะเซทิลีน (crystalline polyacetylene) ที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงเทียบเท่าโลหะ จึงทำให้นักวิทยาศาสตร์ทั้งสามคนได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี พ.ศ. 2543 [1, 2] ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์จึงเกิดการตื่นตัวที่จะพยายามสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดใหม่ๆ ให้มีสมบัติที่ตีความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งาน

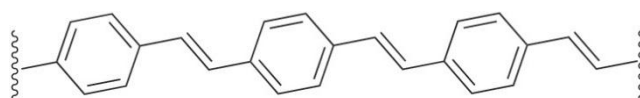
2.2 รูปแบบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า [3]

2.2.1 π -Conjugated Linear polymers

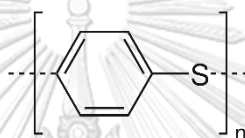
รูปแบบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าประเภทนี้ จะมีโครงสร้างแบบพันธะคอนจูเกต ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่มีความน่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง มีความสามารถในการนำไฟฟ้าสูงเนื่องจากพอลิเมอร์ได้ผ่านการกระตุ้นให้เกิดพาหะนำประจุ เช่น พอลิอะเซทิลีน (polyacetylene), พอลิพาราฟีนิลีน (poly(p-phenylene)) พอลิฟีนิลีนซัลไฟด์ (polyphenylene sulfide) พอลิไพร์โรล(polypyrrole) พอลิไทโอเฟน (polythiophene) และพอลิแอนิลีน (polyaniline) ตัวอย่างพอลิเมอร์แสดงในรูปที่ 2.1



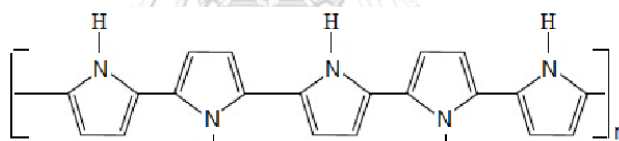
พอลิอะเซทิลีน (polyacetylene)



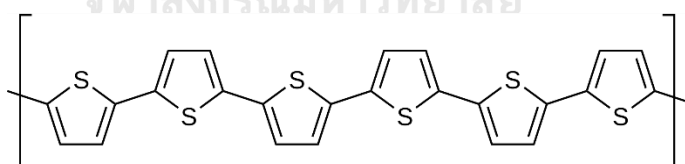
พอลิพาราฟีนิลีน (poly(*p*-phenylene))



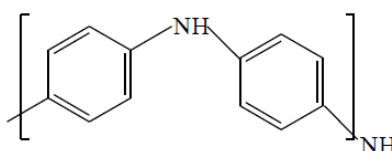
พอลิฟีนิลีนซัลไฟด์ (polyphenylene sulfide)



พอลิไพร์โรล (polypyrrole)



พอลิไทโอฟีน (polythiophene)



พอลิแอนิลีน (polyaniline)

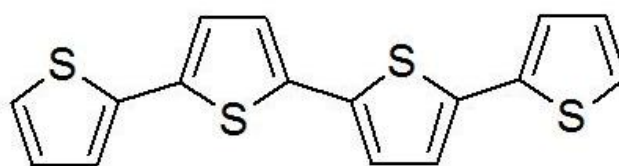
รูปที่ 2.1 โครงสร้างเคมีของ π -Conjugated Linear polymers

2.2.2 Narrow band-gap polymers

รูปแบบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าประเภทนี้คือ การออกแบบโดยการเพิ่มหมู่แทนที่หรือหมู่ให้อิเล็กตรอนสลับกั้กับหมู่ดึงอิเล็กตรอนบนสายโซ่ของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เพื่อให้พอลิเมอร์นำไฟฟ้ามีค่าแถบพลังงานไฟฟ้าที่ต่ำจนมีสมบัติเป็นสารประเภทกึ่งตัวนำไฟฟ้าเนื้อแท้ จึงทำให้นำไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการกระตุ้นให้เป็นพาหะนำไฟฟ้า ซึ่งแถบค่าการนำไฟฟ้าจะลดลงเมื่อเพิ่มหมู่ควินอยด์ (quinoid) หรือหมู่เฮตเทอโรไซคลิก (heterocyclic) เข้าไปในโครงสร้างสายโซ่หลัก

2.2.3 π - Conjugated Linear oligomers

รูปแบบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าประเภทนี้ คือ โอลิโกฟีนิลีน โอลิโกไธโอฟีนและโอลิโกไพร์โรล ตัวอย่างพอลิเมอร์แสดงในรูปที่ 2.2



โอลิโกไธโอฟีน (oligothiophene)

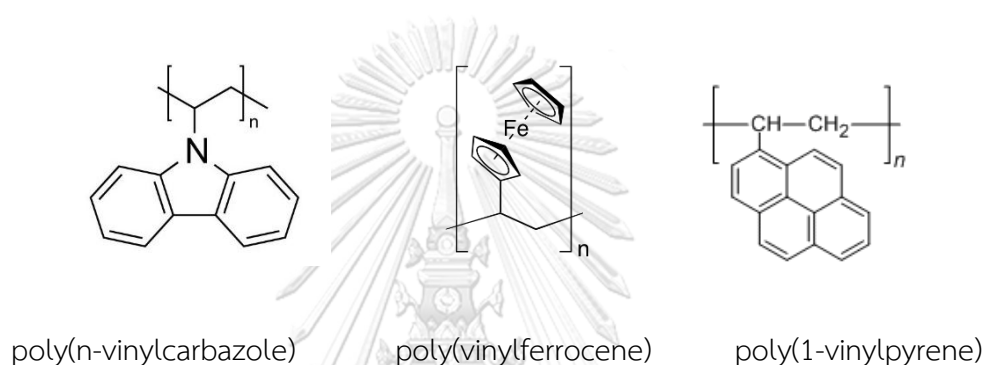
รูปที่ 2.2 พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ π -Conjugated Linear oligomers

2.2.4 Conducting polymer composites

พอลิเมอร์ประเภทนี้ เป็นพอลิเมอร์ทั่วไปที่ไม่ใช่พอลิเมอร์นำไฟฟ้าด้วยตัวของมันเอง หากเมื่อผสมกับวัสดุนำไฟฟ้า เช่น โลหะ ผงคาร์บอน ผงเขม่าดำ เส้นใยกราไฟต์ และเส้นใยแก้วเคลือบโลหะ โดยตัวนำไฟฟ้าจะกระจายตัวอยู่รอบๆ เนื้อพอลิเมอร์ การนำไฟฟ้าเหนี่ยวนำโดยการวิ่งของอิเล็กตรอนผ่านอนุภาคตัวนำไฟฟ้าที่กระจายตัวในเนื้อพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เกิดการนำไฟฟ้า ซึ่งในการกระจายตัวของอนุภาคต่างๆ เหล่านี้ขึ้นกับแรงกระทำระหว่างพอลิเมอร์และอนุภาค เวลาและอุณหภูมิในการผสม ดังนั้นจึงส่งผลให้พอลิเมอร์มีสมบัติในการนำไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งพอลิเมอร์ชนิดนี้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงถึง 10^{-1} ซีเมน/เซนติเมตร ที่สัดส่วนของ filler 10-40 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และค่าการนำไฟฟ้าจะต่ำลงหากมีการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่ต่อเนื่องหรือไม่สม่ำเสมอ

2.2.5 Nonconjugated Polymers containing pendant π -electron

รูปแบบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าประเภทนี้ คือ โครงสร้างหลักของพอลิเมอร์มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าโดยมีหมู่ข้างเคียงเป็นพันธะคอนจูเกต ซึ่งในสมบัติการนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับกระบวนการกระตุ้นให้เกิดพาหะนำประจุที่หมู่ข้างเคียงหรือพันธะคอนจูเกต โดยเมื่อวัสดุได้รับการกระตุ้นพาหะด้วยปฏิกิริยา Reduction หรือ Oxidation จะส่งผลให้มีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดยวัสดุชนิดนี้แตกต่างจากพอลิเมอร์ที่มีการเติมตัวนำไฟฟ้า เนื่องจากพอลิเมอร์จะนำไฟฟ้าเมื่ออนุภาคของสารตัวเติมเชื่อมต่อกันเท่านั้น ตัวอย่างพอลิเมอร์แสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ Nonconjugated polymers containing pendant

π -electron

2.2.6 Ionically Conducting Polymers (polymer/salt electrolytes)

รูปแบบของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าประเภทนี้ จะแตกต่างจากการนำไฟฟ้าของโลหะและ conjugated conducting polymers โดยการนำไฟฟ้าโดยทั่วไปเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน แต่การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์ชนิดนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออน ในปัจจุบันพอลิเมอร์นำไฟฟ้าชนิดนี้มีแนวโน้มที่จะนำมาใช้แทนสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในแบตเตอรี่จำพวกลิเทียมไอออน มีข้อดีคือมีความคงทน ความปลอดภัยในการใช้งานสูง และมีความยืดหยุ่นจึงสามารถผลิตแบตเตอรี่ได้หลากหลายรูปร่าง อีกทั้งอิเล็กโทรไลต์ของแบตเตอรี่ชนิดนี้จะไม่เกิดการรั่วไหลจึงไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้งาน

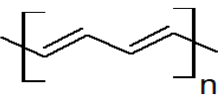
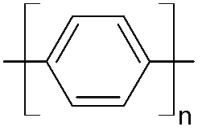
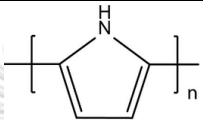
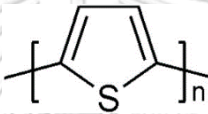
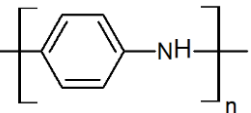
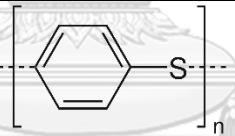
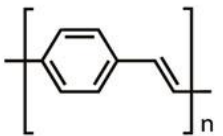
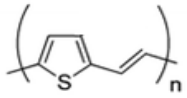
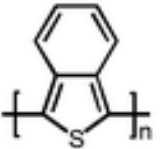
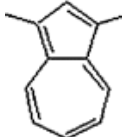
2.3 โครงสร้างของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า

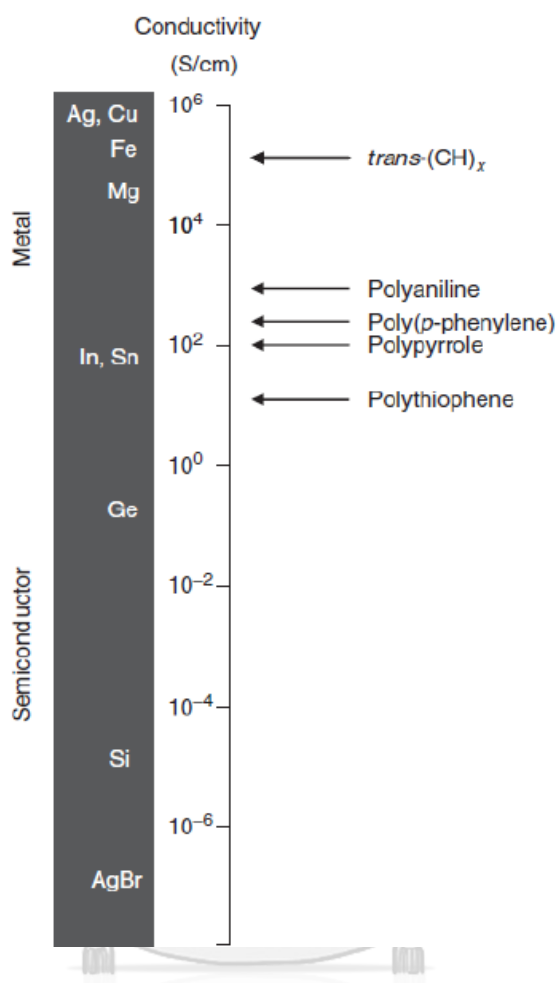
พอลิเมอร์นำไฟฟ้าจะมีโครงสร้างเป็นไพคอนจูเกต (pi conjugated system) ซึ่งโมเลกุลมีลักษณะพิเศษ คือ จะมีพันธะคู่สลับกับพันธะเดี่ยวต่อกันไป (conjugated double bonds) มีความต่อเนื่องของพันธะไพคอนจูเกตมากกว่าโมเลกุลสารให้สี ซึ่งพบปรากฏการณ์นี้ได้ใน กราไฟต์ (graphite) แกรฟีน (graphene) คาร์บอนนาโนทิวบ์ (carbon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

ในสภาวะปกติหรือสภาวะที่เป็นกลาง พอลิเมอร์จะไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ แต่เมื่อถูกกระตุ้นหรือ doping ทำให้โครงสร้างเปลี่ยนเป็นมีประจุเกิดขึ้น [4] เช่น การเปลี่ยนหมู่แอมินอิสระให้เป็นประจุบวกด้วยการเติมกรด ทำพอลิเอนิลีนมีสภาพเป็นประจุบวกจึงมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น ในกรณีทำการกระตุ้นด้วยปฏิกิริยารีดักชันหรือออกซิเดชัน จะขึ้นกับประเภทของสารกระตุ้น (dopant) โดยมีด้วยกัน 2 ชนิดคือ กระบวนการออกซิเดชันของพอลิเมอร์ แบบที่เติมอะตอมชนิดขาดอิเล็กตรอน ซึ่งเรียกว่า P-dopant เป็นตัวออกซิไดซ์ในทางเคมี และ กระบวนการรีดักชันแล้วทำให้อะตอมมีอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น ซึ่งเรียกว่า N-dopant หรือตัวรีดิวซ์ในทางเคมี

ความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับ ปัจจัยหลัก 2 ประการ [4] 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

ตารางที่ 2.1 โครงสร้างพอลิเมอร์นำไฟฟ้าและสารกระตุ้น [4]

พอลิเมอร์	โครงสร้าง	สารกระตุ้น
Polyacetylene		AsF ₅ , I ₂ , Li, K, Br ₂ , Na
Poly(p-phenylene)		AsF ₅ , I ₂ , Li, K
Polypyrrole		BF ₄ ⁻ , ClCO ₄ ⁻
Polythiophene		BF ₄ ⁻ , ClCO ₄ ⁻ , FeCl ₄ ⁻
Polyaniline		HCl
Polyphenylene sulfide		AsF ₅
polyphenylene vinylene		AsF ₅
polythienylene vinylene		AsF ₅
Polyisothianaphthene		BF ₄ ⁻ , ClCO ₄ ⁻
Polyazulene		BF ₄ ⁻ , ClCO ₄ ⁻



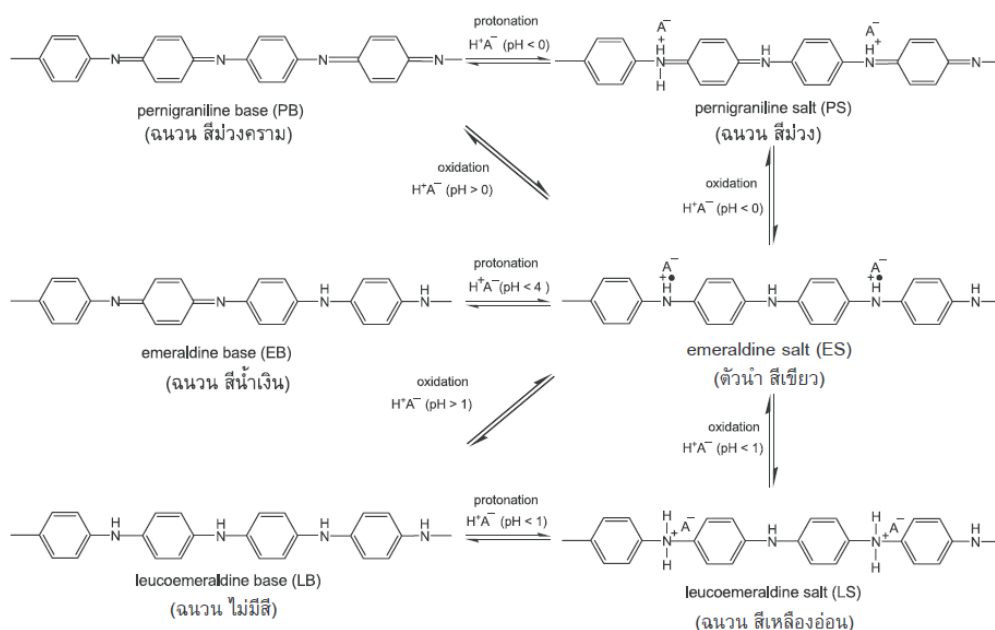
รูปที่ 2.4 ค่าการนำไฟฟ้าของโลหะบางชนิดและพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ผ่านกระบวนการได้ป [1]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4 พอลิแอนิลีน

พอลิแอนิลีน (polyaniline) เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่มีการศึกษาและนำไปใช้ประโยชน์มากที่สุดชนิดหนึ่ง [5-7] ทั้งนี้เนื่องจากมีสมบัติเด่นคือสังเคราะห์ได้ง่าย มีความเสถียรต่อสภาพบรรยากาศ และความชื้นสูง ราคาถูก และมีสมบัติที่พิเศษคือมีโครงสร้างทางเคมีที่หลากหลายถึง 6 แบบที่เกิดจากปฏิกิริยารีดอกซ์ และปฏิกิริยากรด-เบส ขึ้นอยู่กับสัดส่วนโดยโมลระหว่าง aniline monomer : persulfate initiator เรียกว่า leucoemeraldine base (LB), leucoemeraldine salt (LS), emeraldine base (EB), emeraldine salt (ES), pernigraniline base (PS) และ pernigraniline salt (PS) ดังแสดงในรูปที่ 2.5 แต่โครงสร้างที่นำไฟฟ้าได้ดีมีเพียงแบบเดียว คือ เกลือเอมเมอร์ลิติน

(emeraldine salt, ES) โดยการเติมโปรตอนในขั้นตอนการสังเคราะห์ลูโคเอมเมอร์ลิติน (leucoemeraldine) หรือทำการเติมโปรตอนให้กับเบสเอมเมอร์ลิติน (emeraldine base, EB) พอลิแอนิลินในรูปแบบต่างๆ จะปรากฏสีที่ต่างกันชัดเจน เช่น เกลือเอมเมอร์ลิตินได้สีเขียว เบสเอมเมอร์ลิตินให้สีน้ำเงิน ลูโคเอมเมอร์ลิตินให้สีเหลืองอ่อน และเพอร์นิกรานิลินให้สีม่วง เรียกว่าสมบัตินี้ว่าอิเล็กทรอนิกส์โครมิก (electrochromic properties) จากสมบัติของพอลิแอนิลินที่นำไฟฟ้าและเปลี่ยนสีได้จึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ มากมาย



รูปที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีแบบต่างๆ ของพอลิแอนิลิน [2]

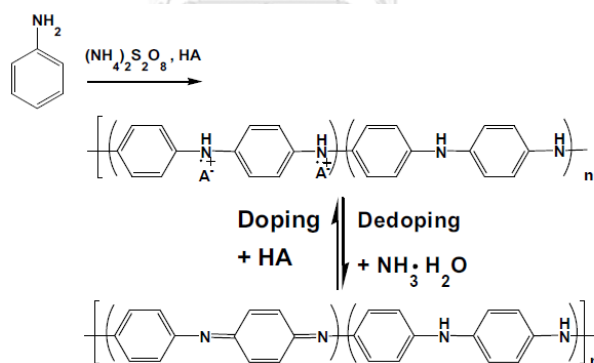
อย่างไรก็ตามพอลิแอนิลินมีข้อจำกัดเหมือนพอลิเมอร์นำไฟฟ้าทั่วไป คือ ความสามารถในการละลายในตัวทำละลายอินทรีย์ทั่วไป และไม่เกิดการหลอมเหลว อันเนื่องมาจากโครงสร้างหลักของสายโซ่พอลิเมอร์มีพันธะคู่หรือพันธะไพ (pi-bond) อยู่มาก ทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ที่แข็งแรง (pi-pi interaction) แต่ด้วยลักษณะเฉพาะของโมเลกุลพอลิแอนิลินจึงสามารถนำไปประยุกต์ได้อย่างหลากหลาย

การสังเคราะห์พอลิแอนิลีนและอนุพันธ์

วิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่สำคัญมีดังต่อไปนี้ [1]

2.4.1 การสังเคราะห์โดยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันทางเคมี

การสังเคราะห์ทางเคมี (chemical polymerization) เป็นวิธีที่นิยมเป็นอย่างมากในทางการค้า เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก โดยทั่วไปการสังเคราะห์ทางเคมีสามารถทำได้โดยใช้สารเคมีที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิแดนต์ (oxidants) ที่แรง เช่น แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต เพอร์ริกไอออน เปอร์แมงกาเนตไอออน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น โดยแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต เป็นตัวออกซิแดนต์ที่ได้รับความนิยมสูงสุด โดยทั่วไปพอลิแอนิลีนและอนุพันธ์ไม่ละลายน้ำ แต่จะสามารถละลายในกรด (HA) เช่น กรดไฮโดรคลอริก หรือ กรดซัลฟิวริก เพราะฉะนั้นในกระบวนการสังเคราะห์ ไอออนลบของ HSO_4^- หรือ SO_4^{2-} จะทำหน้าที่เป็น counter ion บนสายโซ่หลักของพอลิเมอร์ เนื่องจากเป็นปฏิกิริยาที่รุนแรงและคายความร้อน จึงนิยมทำการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่ำ ระหว่าง 1-5 องศาเซลเซียส จะได้พอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลอยู่ในช่วง 30,000 – 60,000 กรัม/โมล



รูปที่ 2.6 สมการเคมีการสังเคราะห์พอลิแอนิลีน [1]

2.4.2 การสังเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า

การสังเคราะห์พอลิแอนิลีนและอนุพันธ์ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical polymerization) เป็นวิธีที่มีประโยชน์ในการสร้างแผ่นฟิล์มที่ติดบนผิวของขั้วไฟฟ้า (electrode) โดยข้อดีของวิธีนี้คือเป็นการสังเคราะห์ที่ง่ายและรวดเร็วโดยสภาวะที่สังเคราะห์จะทำในน้ำหรือ ไม่มีน้ำเป็นตัวกลางก็ได้ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมในด้านเคมีวิเคราะห์ แต่ก็มีข้อเสียคือต้องทำใน

เครื่องมือทางเคมีไฟฟ้า ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าใช้งาน (working electrode, WE) ขั้วไฟฟ้าตรงข้าม (counter electrode, CE) และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode, RE) โดยปกติมอนอเมอร์แอนิลินจะไม่ละลายน้ำแต่จะละลายในสารละลายกรด (HA) โดยกรดจะเปลี่ยนหมู่อะมิโน ($-NH_2$) ของแอนิลินให้เป็นเกลือแอมโมเนียม ($-NH_3^+A^-$) เมื่อมีการให้ศักย์ไฟฟ้าที่ประมาณ 0.9 – 1.1 โวลต์ มอนอเมอร์แอนิลินและอนุพันธ์จะถูกออกซิไดซ์ และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน เนื่องจากสภาวะที่ในสารละลายกรด พอลิเมอร์ที่ได้จะอยู่ในสภาพที่ถูกโด้ปและอยู่ในรูปเกลือแอมเมอร์ลิติน ซึ่งมีความสามารถในการนำไฟฟ้า จึงพร้อมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ

2.4.3 การสังเคราะห์โดยใช้แสง

การสังเคราะห์พอลิแอนิลินและอนุพันธ์โดยใช้แสง (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 $[Ru(bipy)_3]^{3+}$ ซึ่งเป็นตัวออกซิไดซ์ที่แรงพอจะทำให้เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพอลิแอนิลินและอนุพันธ์ได้ นอกจากการใช้ $[Ru(bipy)_3]^{2+}$ แล้ว ยังมีการนำสารประกอบเชิงซ้อนของโลหะรูทีเนียมตัวอื่นๆ เช่น $[Ru(bipy)_3]^{2+}$ มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.5 แกรไฟต์

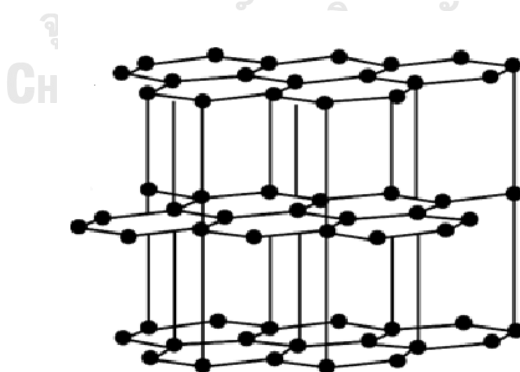
แร่แกรไฟต์ เป็นแร่ธรรมชาติที่เป็นอัญรูปของธาตุคาร์บอน หรือ เป็นการจัดเรียงตัวรูปแบบหนึ่งของธาตุคาร์บอน ซึ่งแกรไฟต์เป็นชื่อที่ตั้งโดย Abraham Gottlob Werner ในปี ค.ศ. 1789 โดยมาจากภาษากรีก หมายถึง "เพื่อवाद/เขียน" ซึ่งตั้งตามการใช้แกรไฟต์ที่ทำเป็นไส้ดินสอด่ ลักษณะจะมีสีเทาเข้มถึงดำสนิท เป็นของแข็ง มีผลึกเป็นแผ่นบางๆ ทึบแสง ไม่แข็ง และแตกหักได้ง่าย ซึ่งมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าหรือกึ่งตัวนำไฟฟ้าได้ และเป็นตัวนำความร้อนที่ดี แต่ไม่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพราะติดไฟยาก นิยมนำไปทำเป็นไส้ดินสอด่ ภาหาลอมโลหะผลิตเหล็กกล้า แกรฟีน สารหล่อลื่นบางชนิด ไส้ถ่านไฟฉาย ไส้ไฟอาร์ก อุปกรณ์ที่ลดการสูญเสียความร้อน เบรกรถยนต์ แบตเตอรี่ ใช้เป็นตัวลด

ความเร็ว ช่วยควบคุมจำนวนอนุภาคนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ นักวิทยาศาสตร์สามารถสร้างแกรไฟต์ที่คุณภาพสูงคือ เส้นใยแกรไฟต์ หรือ เส้นใยคาร์บอน เส้นใยคาร์บอนเสริมแรง [8, 9]

ประเภทของแร่แกรไฟต์

- ลักษณะเป็นแผ่นบาง มีรูปทรง 6 เหลี่ยม เมื่อแตกจะเป็นมุมที่ขอบหรือไม่สม่ำเสมอ
- ลักษณะเป็นเม็ดละเอียด หรืออสัณฐาน ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนสุดท้ายของการเกิดถ่านหินหรือขั้นตอนการแปรสภาพของหินแปรของถ่านโดยใช้ความร้อนที่สูงมาก เรียกว่า แอนทราไซต์ (meta-anthracite)
- ลักษณะเป็นก้อนๆ หรือสายแร่แกรไฟต์ ที่เกิดขึ้นในช่องหรือรอยแตกของสายแร่เป็นเนื้อเดียวกัน มีลักษณะกลุ่มผลึกเส้นใย มักเกิดในสายแร่ที่มีน้ำร้อน

การจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนในแร่แกรไฟต์จะมีการจัดเรียงตัวเป็นชั้นๆ แบบแอลฟา หรือ เป็นรูปผลึก 6 หน้า และการจัดเรียงตัวแบบเบตาหรือรูปผลึกขนมเปียกปูนที่มีลักษณะทางกายภาพเหมือนกัน โดยผลึกแบบแอลฟาจะมีลักษณะไม่แข็งหรือบาง เมื่อรับแรงกดดันสามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นแบบเบตาได้ และเมื่อรับความร้อนที่ 1,300 องศาเซลเซียส สามารถเปลี่ยนกลับไปเป็นผลึกแบบแอลฟาได้ ด้วยการจัดเรียงแบบนี้แร่แกรไฟต์จึงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้เนื่องจากอิเล็กตรอนมีการจัดเรียงแต่ละระนาบ โดยอิเล็กตรอนวงนอกสุดสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ แต่แร่แกรไฟต์มีข้อจำกัดที่สามารถนำไฟฟ้าได้เฉพาะในระนาบเดียวกันเท่านั้น



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของแกรไฟต์

2.6 ผงถ่านกัมมันต์

ผงถ่านกัมมันต์ (activated carbon) [10, 11] คือ กราไฟต์ที่ยังไม่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ จึงยังไม่มีสมบัติในการนำไฟฟ้า แต่มีลักษณะพิเศษคือ มีความเป็นรูพรุนสูงและมีขนาดที่หลากหลายตั้งแต่สามารถมองเห็นด้วยแว่นขยายไปจนถึงในระดับโมเลกุล จึงมีพื้นที่ผิวมหาศาล (1,500 ตารางเมตร/กรัม) รูพรุนเหล่านี้เกิดจากกระบวนการกระตุ้นด้วยสารเคมี หรือกระตุ้นด้วยวิธีทางกายภาพก่อน เพื่อให้โครงสร้างทางกายภาพของถ่านเกิดรอยแตกขนาดเล็กในระดับนาโนเมตรเป็นจำนวนมาก จึงมีความสามารถในการดูดซับของเหลวหรือก๊าซไว้บนพื้นผิว [12-14] ผงถ่านกัมมันต์มีหลากหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีการใช้งานที่แตกต่างกันออกไปตามความเหมาะสม และยังสามารถดัดแปรผิวให้มีหมู่ฟังก์ชันต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับให้ดียิ่งขึ้น [15]

2.6.1 การผลิตผงถ่านกัมมันต์

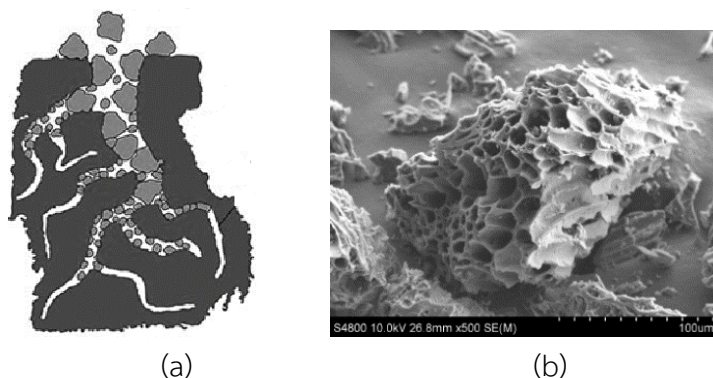
การผลิตผงถ่านกัมมันต์มีหลากหลายวิธี แต่วัตถุประสงค์หลักในการผลิตคือเพื่อต้องการกระตุ้นให้ถ่านมีพื้นที่ผิวที่มากขึ้น [10] ซึ่งในกระบวนการผลิตสามารถใช้วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก อาจเป็นอินทรีย์วัตถุหรือถ่านก็ได้ ซึ่งอินทรีย์วัตถุแบ่งเป็น 3 ชนิด คือ 1 สารเซลลูโลสที่ได้มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ชานอ้อย ชังข้าวโพด ชี้เลื่อย เป็นต้น 2 ถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ บิทูมินัส พิต เป็นต้น 3 วัสดุจากสัตว์ เช่น เลือด กระดุก เป็นต้น แต่ถ่านที่ใช้ผลิตผงถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป จะใช้ถ่านสังเคราะห์ที่ได้จากการเผาอินทรีย์วัตถุจากถ่านธรรมชาติ เช่น กราไฟต์ หรือ แอนทราไซต์ ซึ่งกระบวนการผลิตผงถ่านกัมมันต์มี 2 วิธีได้แก่

2.6.1.1. การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Reactivation)

ขั้นแรกจะเป็นการเปลี่ยนให้เป็นถ่านคาร์บอน ทำในสภาวะไม่มีออกซิเจน โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 700-800 องศาเซลเซียส เพื่อกำจัดสารอื่นๆ ออกและไม่ให้วัสดุเกิดการลุกไหม้ ขั้นที่สองนำถ่านคาร์บอนไปกระตุ้นด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 900-1,100 องศาเซลเซียส ในสภาวะที่มีไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และทำการบดเพื่อให้เป็นผงหรือเกล็ดตามต้องการ

2.6.1.2 การกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical Activation)

เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมมากกว่าแบบแรก เนื่องจากใช้ความร้อนและเวลาในการผลิตที่น้อยกว่า โดยวิธีการผลิตจะใช้ทั้งความร้อนและสารเคมี เช่น ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก โบตัสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำที่อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส แต่ในการผลิตผงถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีนี้อาจจะมีปัญหาเรื่องสารตกค้างได้



รูปที่ 2.8 (a) แบบจำลองโครงสร้างภายในของผงถ่านกัมมันต์
(b) สัณฐานวิทยาพื้นผิวของผงถ่านกัมมันต์ [15]

2.6.2 ประเภทผงถ่านกัมมันต์

2.6.2.1 ผงถ่านกัมมันต์แบบผง (powdered activated carbon, PAC)

ผงถ่านกัมมันต์แบบผงเป็นรูปแบบดั้งเดิมที่ยังนิยมจนถึงปัจจุบัน โดยมีจุดเด่นคือ ตัวถ่านมีสัดส่วนของพื้นที่ผิว (นอก) ต่อปริมาตรมาก โดยทั่วไปผงถ่านกัมมันต์จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.15–0.25 มิลลิเมตร

2.6.2.2 ผงถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (granular activated carbon, GAC)

ผงถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดนิยมใช้ในการดูดซับของเหลวหรือดูดซับก๊าซ เนื่องจากแบบเกล็ดจะมีขนาดใหญ่กว่าแบบผงดังนั้นจึงทำให้ก๊าซไหลผ่านได้ง่าย

2.6.2.3 ผงถ่านกัมมันต์อัดแท่ง (extruded activated carbon, EAC)

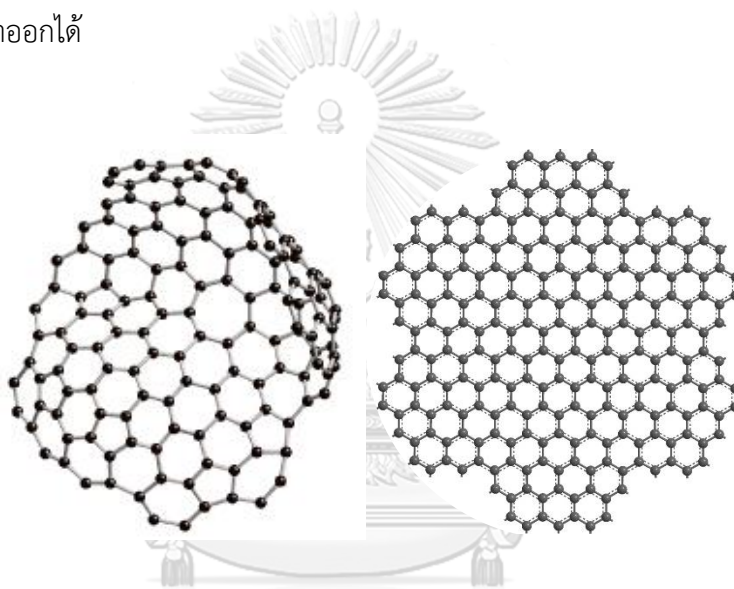
ผงถ่านกัมมันต์อัดแท่งนิยมนำไปใช้กับการดูดซับก๊าซหรือการกรอง เนื่องจากทำให้ความดันก๊าซตก (pressure drop) น้อยกว่าผงถ่านกัมมันต์ประเภทอื่น และยังมีความแข็งแรงเชิงกลสูง ทำให้เกิดละอองฝุ่นน้อย โดยมีวิธีการผลิตคือนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดรีด (extruder) จะได้ถ่านที่มีรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.8–4.5 มิลลิเมตร

2.6.2.4 ผงถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค (impregnated carbon)

ผงถ่านกัมมันต์เคลือบอนุภาค จะเป็นการเติมโมเลกุลสารอินทรีย์ลงไปโครงสร้างของผงถ่านกัมมันต์ เช่น อนุภาคโลหะเงิน ช่วยในการกรองสารและช่วยเพิ่มสมบัติของถ่านได้มากยิ่งขึ้น คือสามารถฆ่าเชื้อโรคได้ ดังนั้นจึงมีการนำเอาถ่านชนิดนี้มาใช้ในเครื่องกรองน้ำอีกด้วย

2.6.2.5 ผงถ่านกัมมันต์เคลือบโพลิเมอร์ (polymers coated carbon)

ผงถ่านกัมมันต์เคลือบโพลิเมอร์ จะเป็นผงถ่านกัมมันต์ชนิดพิเศษที่เคลือบด้วยโพลิเมอร์ที่สามารถเข้ากันได้ทั้งทางเคมีและชีวภาพ โดยใช้เทคนิคพิเศษ ซึ่งชั้นเคลือบโพลิเมอร์จะยอมให้สารบางชนิดผ่านเข้าออกได้



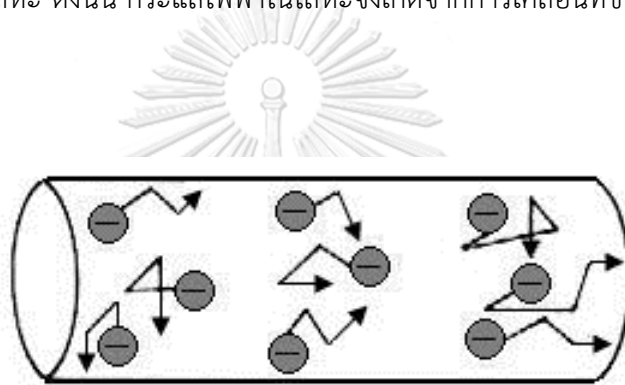
รูปที่ 2.9 โครงสร้างทางเคมีของผงถ่านกัมมันต์ [16]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

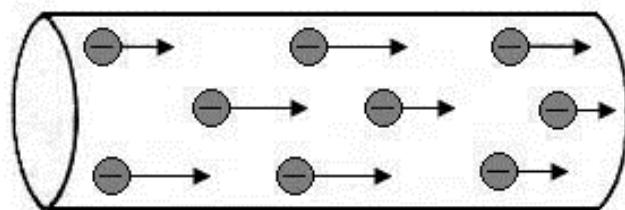
2.7 การนำไฟฟ้าของวัสดุ

วัสดุที่มีสมบัตินำไฟฟ้าได้ คือ วัสดุที่ยอมให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายภายในเนื้อวัสดุ หรือวัสดุที่ให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปมาในเนื้อวัสดุได้อย่างเป็นอิสระ [3] โดยจะเคลื่อนที่ในทิศทางหนึ่งหรือหลายทิศทางก็ได้ จึงมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้า (electrical conduction) หรือ ตัวนำ (conductor) ขณะที่มิกระแสไฟฟ้าในตัวนำแสดงว่า “มีการนำไฟฟ้า” ซึ่งสมบัตินี้จะมีตรงข้ามกับฉนวน (insulation) ซึ่งจะยอมให้อิเล็กตรอนหรือประจุไฟฟ้าไหลผ่านได้ (electrical insulation) ซึ่งตัวนำไฟฟ้า ได้แก่ เงิน ทองแดง ทองคำ อะลูมิเนียม และทังสเตน

วัสดุนำไฟฟ้าส่วนมากจะเป็นสารจำพวกโลหะ ซึ่งจะมีการเคลื่อนที่แบบ Brownian เนื่องจากมีอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ทำให้อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่แบบอิสระหรือไม่เป็นระเบียบ ทิศทางการเคลื่อนที่ไม่แน่นอนและสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่วทั้งก้อนโลหะ ทำให้โลหะเป็นตัวนำความร้อนและตัวนำไฟฟ้าที่ดี ทั้งนี้เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาไม่สามารถบอกตำแหน่งของอิเล็กตรอนได้ ดังนั้นความเร็วเฉลี่ยของอิเล็กตรอนอิสระทุกตัวจึงเป็นศูนย์ แต่เมื่อมีการให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าแก่ปลายทั้งสองของแท่งโลหะ เช่น ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในแท่งโลหะ แรงจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะทำให้อิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบ โดยมีความเร็วเฉลี่ยไม่เป็นศูนย์ เรียกว่า “ความเร็วลอยเลื่อน” (drift velocity) จึงมีกระแสไฟฟ้าในแท่งโลหะ ดังนั้น กระแสไฟฟ้าในโลหะจึงเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ



รูปที่ 2.10 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในแท่งโลหะ



รูปที่ 2.11 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระในแท่งโลหะ เมื่อปลายทั้งสองมีความต่างศักย์

การนำไฟฟ้าของตัวนำ จากกฎของโอมท์ที่กล่าวไว้ว่า กระแสไฟฟ้า (I) แปรผันโดยตรงกับความต่างศักย์ (V) และแปรผกผันกับความต้านทาน (R) ของตัวนำ ดังสมการที่ 2.1 [17]

$$I = \frac{V}{R} \quad 2.1$$

ความต้านทานไฟฟ้า (resistance) คือ สมบัติของตัวนำไฟฟ้า เป็นปริมาณที่ต้านการเคลื่อนที่ของไฟฟ้า หรือตัวที่ยอมให้กระแสสามารถไหลผ่านได้มากหรือน้อย ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของตัวนำนั้นๆ ซึ่งจะแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของตัวนำ โดยความต้านทานมีหน่วยเป็น โอห์ม (ohm)

ปัจจัยที่มีผลต่อความต้านทานของตัวนำไฟฟ้า

1. ชนิดของตัวนำไฟฟ้า โดยตัวนำไฟฟ้าแต่ละชนิดจะมีค่าการนำไฟฟ้าที่ไม่เท่ากัน ทั้งนี้เป็นเพราะว่าตัวนำไฟฟ้าแต่ละชนิดจะมีความต้านทานไม่เท่ากัน
2. ความยาวของตัวนำ โดยความยาวจะแปรผันโดยตรงกับความต้านทาน วัสดุที่มีความยาวมากจะมีค่าความต้านทานมาก เพราะจะยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้น้อย แต่วัสดุที่มีความยาวน้อยจะมีค่าความต้านทานที่น้อย เพราะจะยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านได้มากกว่า
3. พื้นที่หน้าตัดของตัวนำ โดยพื้นที่หน้าตัดจะแปรผกผันกับความต้านทาน ที่ลวดตัวนำชนิดเดียวกันและยาวเท่ากัน ลวดตัวนำที่พื้นที่หน้าตัดมากกว่าจะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าน้อยกว่าลวดตัวนำที่พื้นที่หน้าตัดน้อยกว่า
4. อุณหภูมิของตัวนำไฟฟ้า โดยอุณหภูมิจะแปรผันโดยตรงกับค่าความต้านทาน ที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าความต้านทานมากและที่อุณหภูมิต่ำจะมีค่าความต้านทานน้อย

จากกฎของโอมท์พบว่า เมื่อให้ความต่างศักย์ (V) คงที่ วัสดุจะมีความต้านทาน (R) ที่ต่ำลง แต่จะมีความนำไฟฟ้า (G) ที่สูงขึ้น ซึ่งความนำไฟฟ้าหาได้จากสมการที่ 2.2

$$G = \frac{1}{R} \quad 2.2$$

ความนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็น S หรือ Siemens (S, Ω^{-1}) และวัสดุแต่ละชนิดจะมีสภาพต้านทาน (ρ) ไม่เท่ากัน โดยวัสดุที่มีสภาพต้านทานต่ำจะนำไฟฟ้าได้ดี หรือ สภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity, σ) ดังนั้นสภาพการนำไฟฟ้าจะแปรผกผันกับสภาพต้านทาน ตามสมการที่ 2.3

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad 2.3$$

2.8 อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน

อุปกรณ์กักเก็บพลังงาน (energy storage devices) คือ อุปกรณ์ต่างๆ ที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานในรูปแบบอื่น ซึ่งสามารถกักเก็บไว้เพื่อการใช้งานในเวลาอื่นที่จำเป็นได้ โดยสามารถแปลงพลังงานที่กักเก็บไว้น่ากลับมาเป็นพลังงานไฟฟ้าอีกครั้งเมื่อมีความต้องการใช้ไฟฟ้า ทั้งนี้การกักเก็บพลังงานที่ดีจะต้องลดความสูญเสียในการแปลงรูปพลังงานให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งในปัจจุบันอุปกรณ์กักเก็บและจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่นิยมใช้มากที่สุดคือ แบตเตอรี่ เป็นที่รู้จักอย่างกว้างขวางเนื่องจากมีความหลากหลายของระดับในการเก็บพลังงาน และมีประเภทการใช้งานที่หลากหลายเช่นกัน เช่น แบตเตอรี่สำรอง เพื่อใช้เป็นแหล่งให้พลังงานไฟฟ้าแก่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ และคอมพิวเตอร์พกพา นอกจากนี้ยังมีอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่สำคัญชนิดอื่น คือ ตัวเก็บประจุ (capacitor) เป็นอุปกรณ์เล็กที่สามารถเก็บประจุได้ต่ำมีความต้านทานไฟฟ้าสูง ตัวเก็บประจุประเภทนี้ไม่สามารถกักเก็บพลังงานได้ และตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสามารถในการเก็บประจุได้สูงมาก จึงเหมาะสำหรับนำไปทำเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงาน [18, 19]

2.9 ตัวเก็บประจุ

ตัวเก็บประจุ (capacitor) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เก็บประจุและคายประจุ สามารถเก็บพลังงานในรูปแบบไฟฟ้า [18] ซึ่งในวงจรประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว แต่ละขั้วจะเก็บประจุชนิดตรงข้ามกัน และไดอิเล็กตริกที่เป็นฉนวนเป็นตัวแยกคั่นกลาง โดยในการเก็บประจุจะเป็นการเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่ขั้วไฟฟ้า เมื่อนำแบตเตอรี่ต่อกับตัวเก็บประจุจะทำให้อิเล็กตรอนจากขั้วลบของแบตเตอรี่จะเข้าไปรวมที่ขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดเป็นประจุลบ และผลักอิเล็กตรอนของขั้วไฟฟ้าตรงข้ามเมื่ออิเล็กตรอนจากขั้วไฟฟ้าถูกผลักจะทำให้เหลือประจุบวกมากกว่าประจุลบ ยิ่งอิเล็กตรอนถูกผลักออกไปมากเท่าไร ขั้วไฟฟ้านั้นก็จะเป็นบวกมากขึ้น และเมื่อตัวเก็บประจุที่เก็บประจุไว้แล้วหากไม่มี

การต่อขั้วตัวเก็บประจุอิเล็กทรอนิกส์จะคงอยู่ที่ขั้วไฟฟ้า แต่เมื่อมีการต่อครบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ก็จะวิ่งจากขั้วไฟฟ้าทางด้านลบไปครบวงจรที่ขั้วไฟฟ้าบวกทันที เรียกว่า การคายประจุ

ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการเก็บประจุ

1. พื้นที่หน้าตัดของสารตัวนำที่เป็นขั้วไฟฟ้า ถ้าสารตัวนำมีพื้นที่หน้าตัดมากจะสามารถเก็บประจุได้ หากสารตัวนำมีพื้นที่หน้าตัดน้อยจะมีความสามารถในการเก็บประจุน้อย จะเห็นได้จากวงจรอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไปตัวเก็บประจุมีหลายขนาด โดยตัวเก็บประจุที่มีขนาดใหญ่จะเก็บประจุได้มากเพราะมีพื้นที่หน้าตัดมาก
2. ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยถ้าขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีระยะห่างน้อย จะสามารถเก็บประจุได้มากกว่าขั้วไฟฟ้าที่มีระยะห่างระหว่างกันมาก
3. ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เป็นค่าแสดงถึงความสามารถการเกิดของเส้นแรงแม่เหล็กเมื่อนำวัสดุต่างชนิด โดยค่าคงที่ของไดอิเล็กตริกแต่ละตัวจะแตกต่างกันออกไป ดังนั้นตัวเก็บประจุที่ใช้ไดอิเล็กตริกต่างกัน ถึงแม้จะมีขนาดเท่ากันแต่ค่าความจุในการเก็บประจุจะแตกต่างกัน โดยไดอิเล็กตริกที่สูญญากาศจะมีประสิทธิภาพน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุชนิดอื่น และการจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้ามากเกินไปก็อาจทำให้ไดอิเล็กตริกเสียสภาพจากฉนวนกลายเป็นตัวนำได้

จากปัจจัยต่างๆ ข้างต้น สามารถนำมาคำนวณเพื่อค่าการเก็บประจุในตัวเก็บประจุได้ จากสมการที่ 2.4

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} \quad 2.4$$

เมื่อ C = ค่าการเก็บประจุ

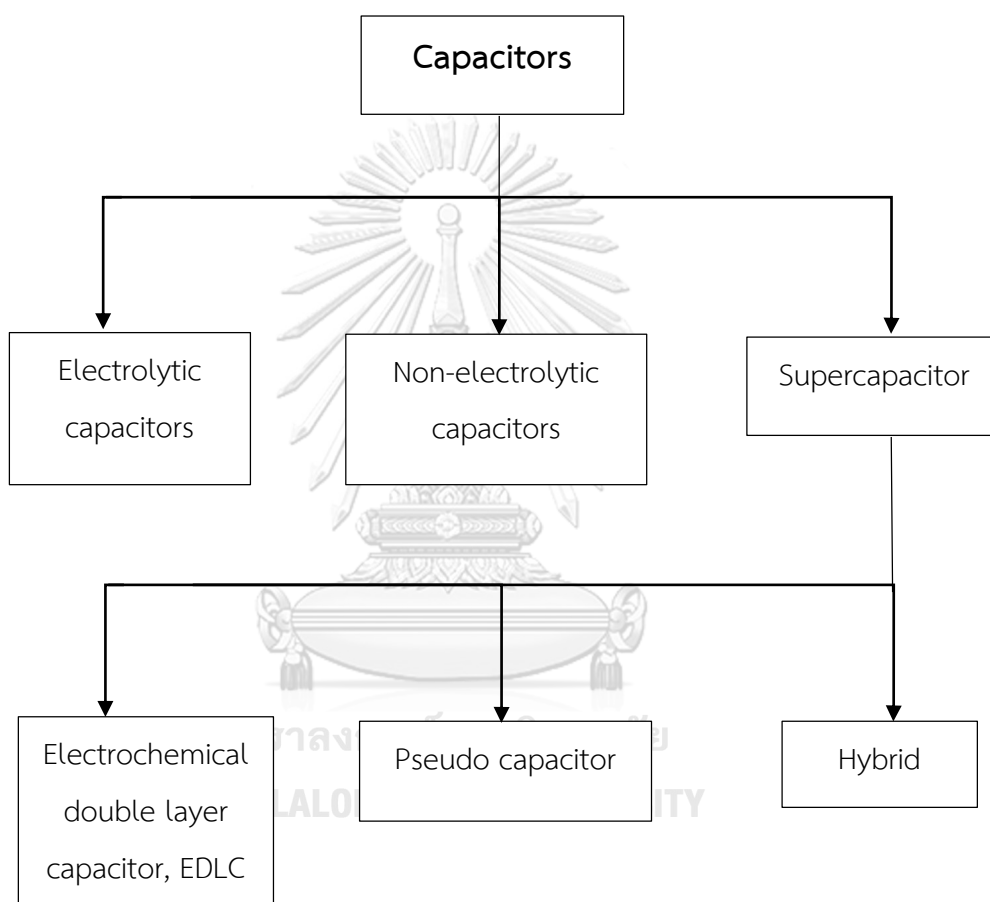
ϵ = ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

A = พื้นที่หน้าตัดของสารตัวนำที่เป็นขั้วไฟฟ้า

d = ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง

ในระยะแรกตัวเก็บประจุมีความสามารถในการเก็บประจุน้อยมากในระดับ ไมโครฟารัด และต่อมาได้มีการพัฒนาตัวเก็บประจุให้มีความสามารถในการเก็บประจุที่มากขึ้น [20] ซึ่งสามารถ

แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ได้แก่ ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลติก (electrolytic capacitors) ตัวเก็บประจุชนิดนอนอิเล็กโทรไลติก (non-electrolytic capacitors) และตัวเก็บประจุยิ่งยวด (supercapacitor) ซึ่งตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถแบ่งตามกลไกการทำงานออกเป็น 3 แบบ คือ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบสองชั้น (Electrochemical double layer capacitor, EDLC) ซูโดคาปาซิเตอร์ (pseudo capacitor) และแบบไฮบริด (hybrid) [19]



รูปที่ 2.12 ประเภทของตัวเก็บประจุ

2.10 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด supercapacitor หรือตัวเก็บประจุเคมีไฟฟ้า electrochemical capacitor [11, 19-21] เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่อยู่ระหว่างแบตเตอรี่และตัวเก็บประจุ อุปกรณ์ชนิดนี้มีสมบัติพิเศษตรงที่มีค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) สูงกว่าตัวเก็บประจุอื่นๆ มากถึง

100-10,000 เท่า อีกทั้งยังสามารถอัดและคายประจุให้เต็มได้ภายในเวลาอันรวดเร็วเพียง 1-10 วินาที สามารถที่จะอัดและคายประจุได้มากกว่า 500,000 รอบ มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิ แรงกระแทก และการสั่นสะเทือน องค์ประกอบของตัวเก็บประจุยิ่งยวดจะประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรดจากสารตัวนำไฟฟ้าที่มีพื้นที่ผิวมาก แผ่นกั้นระหว่างขั้ว (separator) ที่บางมากและไม่นำไฟฟ้าขนาบอยู่ในวงจร เพื่อให้ไอออนสามารถผ่านได้เช่นเดียวกับแบตเตอรี่ และ สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) สารที่นิยมเช่น acetonitrile หรือ polycarbonate

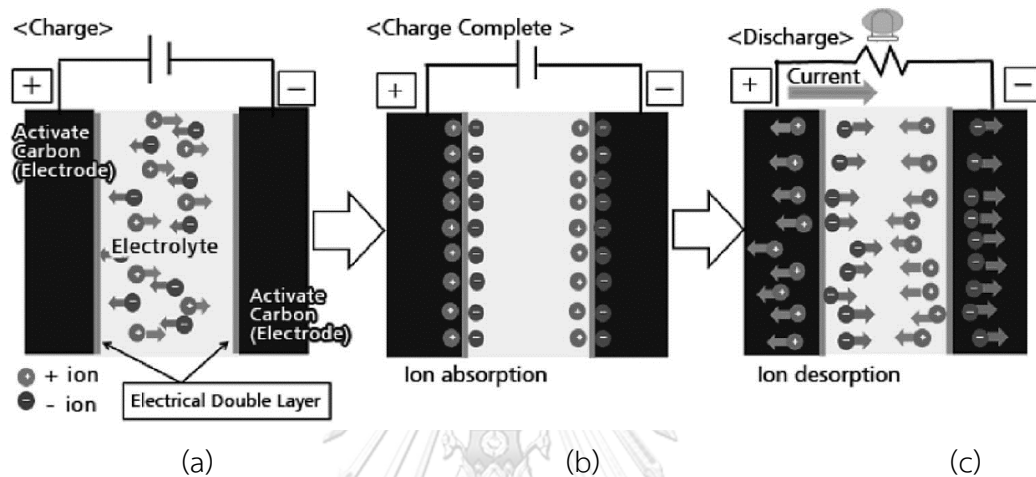
หลักการการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด เมื่อให้ความต่างศักย์หรือกระแสไฟฟ้ากับขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้าง ประจุที่เป็นบวกในสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะถูกดึงดูดเข้าหาขั้วลบของตัวเก็บประจุยิ่งยวด และประจุที่เป็นลบในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ก็จะเคลื่อนที่ไปหาขั้วบวก โดยทั่วไปค่าการเก็บประจุจะขึ้นกับการเคลื่อนที่ การดูดซับทางกายภาพระหว่างไอออนกับพื้นที่ผิวของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า และจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้า ดังนั้นหากขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ผิวและมีปริมาตรรูพรุนสูงเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการเก็บประจุ เนื่องจากประจุของสารละลายอิเล็กโทรไลต์สามารถที่จะแทรกตัวเข้าไปในรูพรุนได้ จึงมีจุดดึงดูดกันระหว่างประจุบวกและประจุลบเพิ่มขึ้น โดยวัสดุที่นิยมนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้า คือ ผงถ่านกัมมันต์ (activated carbon) คาร์บอนแบล็ค (carbon black) ท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) เส้นใยคาร์บอนแบบผืนผ้า (woven carbon fiber cloth) เป็นต้น และวัสดุที่สามารถเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์จะสามารถลดเวลาในการเก็บและคายประจุลง ส่งผลให้สามารถให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้มีความกำลังไฟฟ้าที่สูง ปัจจุบันได้นำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กที่ใช้แรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าต่ำ ในบางสถานการณ์ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถนำมาใช้ทดแทน อุปกรณ์แบตเตอรี่เคมีไฟฟ้าแรงดันต่ำได้ ทั้งนี้เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีความสามารถในการจ่ายพลังงานไฟฟ้าที่สูงกว่าแบตเตอรี่และมีความสามารถในการเก็บพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักที่สูงเมื่อเทียบกับตัวเก็บประจุทั่วไป [22-25] ในปัจจุบันตัวเก็บประจุยิ่งยวดกำลังเป็นที่สนใจอย่างกว้างขวาง จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

ชนิดของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

2.10.1 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น (Electrochemical double layer capacitor, EDLC) หลักการทำงานคือ ประจุจะถูกเก็บโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์สู่ขั้วไฟฟ้าที่เกิดจากการให้ศักย์ไฟฟ้าที่แตกต่างกัน และอาศัยการดูดซับทางกายภาพบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า หรือใช้แต่แรงไฟฟ้าสถิต (electrostatic charge) ระหว่างประจุต่างขั้วกัน โดยไม่อาศัยปฏิกิริยาทางเคมี

ในการกักเก็บพลังงาน และตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้นนิยมใช้วัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบและเป็นวัสดุที่มีพื้นที่ผิวมาก และรูพรุนสูง เช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ พง่ากันกัมมันต์ และแกรไฟีน เป็นต้น โดยการเก็บประจุไฟฟ้าเคมีทั้งสองชั้น ชั้นในเรียกว่า อินเนอร์เฮล์มโฮลทซ์ (inner Helmholtz) และชั้นนอกเรียกว่า เอาเตอร์เฮล์มโฮลทซ์ (outer Helmholtz)



รูปที่ 2.13 ลักษณะการกระจายตัวของประจุขณะกำลังอัดประจุ (a) เมื่อประจุเต็ม (b) เมื่อคายประจุ (c) ของตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น [20]

2.10.2 ซูโดคาปาซิเตอร์

ซูโดคาปาซิเตอร์เตอร์ (pseudo capacitor) จะมีการเก็บประจุไฟฟ้าได้สูงกว่าแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบสองชั้น ทั้งนี้เป็นเพราะว่าการเก็บประจุแบบซูโดคาปาซิเตอร์เตอร์จะสามารถเก็บประจุได้ 2 แบบคือ การเก็บประจุไฟฟ้าที่ผิวแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบสองชั้น และการเก็บประจุไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี หรือปฏิกิริยารีดอกซ์อย่างรวดเร็วที่ผิวของโลหะออกไซด์ โดยจะเพิ่มความจุไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย (nominal voltage) ของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ส่งผลให้ซูโดคาปาซิเตอร์สามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้สูงกว่าแบบตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น โดยวัสดุที่นำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือโลหะออกไซด์ (metal oxide) เช่น ไททาเนียมออกไซด์ (titanium oxide) แมงกานีสออกไซด์ (manganese oxide) และโคบอลต์ออกไซด์ (cobalt oxide) เป็นต้น และพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (conductive polymer) เช่น พอลิอะเซทิลีน (polyacetylene) พอลิพาราฟีนิลีน (poly(p-phenylene)) พอลิฟีนิลีนซิลไฟด์

(polyphenylene sulfide) พอลิไพร์โรล(polypyrrole) พอลิไธโอฟิน(polythiophene) และพอลิ-แอนิไลน์ (polyaniline) เป็นต้น

2.10.3 ตัวเก็บประจุไฮบริด

ตัวเก็บประจุยวดยวตชนิดไฮบริด (hybrid) เป็นตัวเก็บประจุที่มีการผสมผสานเทคโนโลยีตัวเก็บประจุแบบสองชั้นและซูโดคาปาซิเตอร์ทำงานร่วมกัน

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Stejska และคณะ [26] ได้ทำการเตรียมพอลิแอนิไลน์ โดยนำแอนิไลน์มอนอเมอร์ละลายในกรดไฮโดรคลอริกและเติมสารออกซิไดซ์ คือ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต เพื่อก่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ได้เป็นพอลิแอนิไลน์ในรูปของเกลือเอ็มเมอรัลตินที่มีสีเขียวเข้ม และได้ทำการศึกษาค่าการนำไฟฟ้าเทียบกับภาวะต่างๆ ของปฏิกิริยา ผลของการทดลองพบว่า ค่าการนำไฟฟ้าเฉลี่ยของพอลิแอนิไลน์ คือ 4.37 ซีเมน/เซนติเมตร (จาก 59 ตัวอย่าง) ภาวะที่เหมาะสมคือที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จะมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นคือ 7.58 ซีเมน/เซนติเมตร ที่ความเป็นกรดเพิ่มขึ้นจะมีค่าการนำไฟฟ้าคือ 11.9 ซีเมน/เซนติเมตร สำหรับรูปแบบการเก็บของสารตัวอย่าง ในรูปของสารแขวนลอยเมื่อเวลาผ่านไปสามเดือน พบว่าค่าการนำไฟฟ้าไม่เปลี่ยนแปลง ในรูปของผงเมื่อเวลาผ่านไปสิบหกเดือน พบว่าค่าการนำไฟฟ้าลดลงร้อยละ 48 และรูปเม็ดในระยะเวลาหกเดือนแรกมีค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และหลังจากนั้นมีการลดลงอย่างต่อเนื่อง

Wang และคณะ [27] ได้มีความสนใจพัฒนาพอลิแอนิไลน์เป็นวัสดุอิเล็กโทรดเพื่อใช้สำหรับเก็บและแปลงพลังงาน โดยสนใจตัววัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนที่เตรียมในรูปคอมพอสิตกับพอลิแอนิไลน์ ด้วยวิธีทางเคมี ผลที่ได้พบว่าวัสดุเชิงประกอบของพอลิแอนิไลน์/คาร์บอนที่มีรูพรุน มีความสามารถในการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับพอลิแอนิไลน์บริสุทธิ์ อันเป็นผลมาจากพอลิแอนิไลน์เคลือบอยู่บนผิวของวัสดุรูพรุนทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นตามไปด้วย จึงสามารถเก็บประจุและพลังงานเพิ่มขึ้น

Abe และคณะ [28] ได้ทำการศึกษาคัดแปรผิวของผงถ่านกัมมันต์ด้วยหมู่เอมีน โดยมีขั้นตอนของปฏิกิริยา 2 ขั้น ขั้นแรกจะเป็นปฏิกิริยาไนเตรชัน (nitration) ด้วยการเติมกรดไนตริก/กรดซัลฟิวริก แล้วขั้นที่สองคือปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) เพื่อเปลี่ยนหมู่ไนโตรให้เป็นหมู่เอมีน และได้มีการศึกษาวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรของรูพรุนหลังจากการทำปฏิกิริยา พบว่ามีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของผงถ่านกัมมันต์เท่าเดิม แสดงให้เห็นว่าหมู่เอมีนไม่ได้ทำให้เกิดการ

เปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรูพรุน และได้ทำการวิเคราะห์เชิงเคมีโดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FTIR) และเทคนิคสเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอกซ์ (XPS) พบว่า หลังปฏิกิริยาไนเตรชันมีหมู่ไนโตรเกิดขึ้นและหลังปฏิกิริยารีดักชันมีหมู่เอมีนในโครงสร้างจริง

Su และคณะ [23] ได้ทำการศึกษาและประเมินค่าของเส้นใยคาร์บอนที่นำมาทำขั้วไฟฟ้า โดยการนำผ้าทอเรยอน เคลือบสารทรวงไฟและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส เพื่อให้เกิดเป็นกราฟไฟต์ แล้วกระตุ้นให้เกิดเป็นรูพรุนด้วยไอน้ำ จะได้เป็นเส้นใยผงถ่านกัมมันต์ (ACFs) โดยมีการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมี และวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรของรูพรุน โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ อัตราการผลิตและอัตราการไหลของไอน้ำ จากการทดลองพบว่าที่อัตราการผลิตที่ต่ำที่สุด คือ 5 เซนติเมตร/นาทีก และอัตราการไหลของไอน้ำที่ 160 มิลลิลิตร/นาทีก ได้พื้นที่ผิวสูงที่สุดคือ 2,332.1 ตารางเมตร/กรัม และมีค่าความจุเก็บประจุสูงถึง 430.4 ฟารัด/กรัม ที่อัตราการสแกนต่ำคือ 5 มิลลิโวลต์/วินาที

Qin และคณะ [17] ได้ทำการนำพอลิเอนิลีนเคลือบลงบนผิวของผงถ่านกัมมันต์ที่เป็นอิเล็กโทรดเพื่อเป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด โดยฟิล์มพอลิเอนิลีนทำหน้าที่เชื่อมต่อกับเครือข่ายของรูพรุนบนผิวของผงถ่านกัมมันต์ ที่ความเข้มข้น 0.5 เท่าโดยโมลของกรดซัลฟิวริก ผงถ่านกัมมันต์อิเล็กโทรดที่เคลือบด้วยพอลิเอนิลีน มีค่าความสามารถในการเก็บประจุสูงถึง 587 ฟารัด/กรัม ซึ่งสูงกว่าผงถ่านกัมมันต์อิเล็กโทรดที่มีค่าความสามารถในการเก็บประจุเพียง 140 ฟารัด/กรัม ดังนั้นการเคลือบของพอลิเอนิลีนลงบนพื้นผิวของผงถ่านกัมมันต์ จึงสามารถปรับปรุงคุณภาพของอิเล็กโทรดได้ดียิ่งขึ้น

จากงานวิจัยดังที่ได้กล่าวมา จึงทำให้เกิดความสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าและการเก็บประจุไฟฟ้าของพอลิเอนิลีน โดยการเตรียมวัสดุเชิงประกอบของพอลิเอนิลีน/ผงถ่านกัมมันต์คอมพอสิต [25] และศึกษาค่าความต้านทานจำเพาะ การนำไฟฟ้า และความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

3.1 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

1. ผงถ่านกัมมันต์ (activated carbon)
2. น้ำแข็ง
3. สีเงิน (silver paint)
4. กระดาษทดสอบความเป็นกรดเบส (pH paper)
5. กระดาษกรองเบอร์ 1
6. ผ้ากรองอย่างหยาบ
7. แผ่นนิกเกิลโฟม (nickel foam)
8. น้ำปราศจากไอออน (deionized water)
9. ตู้อบ
10. ตู้แช่แข็ง

3.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid, H_2SO_4) M.W. = 98.08, บริษัท Ajex Finechem, ออสเตรเลีย
2. กรดไนตริก (Nitric acid, HNO_3) M.W. = 63.01, บริษัท Loba chemie, อินเดีย
3. โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ (Sodium hydrosulfite, $Na_2S_2O_4$) M.W. = 174.11, บริษัท KEMAVS, ออสเตรเลีย
4. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide, NH_4OH) M.W. = 35.05, บริษัท Mallinckrodt chemicals, สหรัฐอเมริกา
5. แอนิลีนมอนอเมอร์ (Aniline) M.W. = 93.13, บริษัท Panreac sintesis
6. แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium Persulphate, $(NH_4)_2S_2O_8$) M.W. = 228.20, บริษัท QREC, นิวซีแลนด์

3.3 เครื่องมือที่ใช้ในขั้นรูปขั้นทดสอบ

1. เครื่องอัดกระเบื้อง (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.4 เครื่องวิเคราะห์และทดสอบ

1. เครื่องวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR) (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

2. เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในผลึก (X-ray Diffraction, XRD) (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3. เครื่องวิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Fourier Transform Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer, NMR) (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) (ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

5. เครื่องโพเทนชิโอสแตต (Potentiostat) สำหรับทดสอบ Cyclic voltammetry (CV) (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

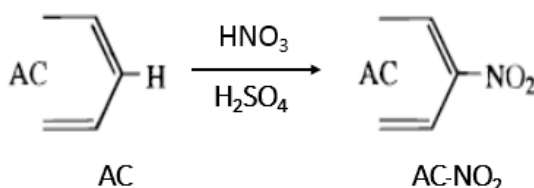
6. เครื่องมัลติมิเตอร์ (Multimeter) (ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 การตัดแปรรูปร่างของผงถ่านกัมมันต์ด้วยหมุ่ฟังก์ชันเอมีน

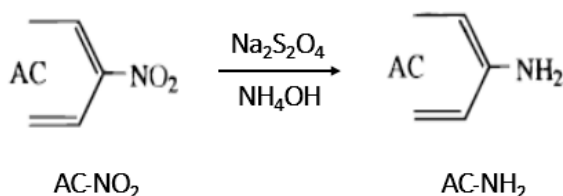
ขั้นตอนการทำปฏิกิริยาไนเตรชันกับผงถ่านกัมมันต์ [28, 29] โดยเตรียมกรดผสมระหว่างกรดไนตริกความเข้มข้น 60% และกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98% ในอัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร บรรจุในขวดวัดปริมาตร นำไปแช่เย็นในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำผงถ่านกัมมันต์ (50 กรัม) ผสมกับกรดไนตริก/กรดซัลฟิวริกที่เตรียมไว้ข้างต้น (50 มิลลิลิตร) โดยทำการเติมกรดที่เตรียมไว้ลงไปอย่างช้าๆ (เนื่องจากจะเกิดปฏิกิริยาไนเตรชันอย่างรุนแรง จึงควรทำการทดลองนี้ในตู้ดูดควันที่มีระบบการไหลเวียนของอากาศอย่างดี) ในขณะที่ทำปฏิกิริยาต้องควบคุม

อุณหภูมิไว้ที่ 0 องศาเซลเซียส ด้วยการหล่อเย็นในอ่างน้ำแข็งและภาชนะต้องมีขนาดที่พอเหมาะ หลังจากเติมกรดจนสมบูรณ์ นำปีกเกอร์ของปฏิกิริยาที่มีผงถ่านกัมมันต์และกรดไปเก็บไว้ในตู้แช่แข็งที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไนเตรชันอย่างสมบูรณ์ได้เป็น nitro activated carbon (AC-NO₂, ดังปฏิกิริยาเคมีรูปที่ 3.1) หลังจากนั้นนำออกมากรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนจนวัดค่าพีเอชเป็นกลาง



รูปที่ 3.1 ปฏิกิริยาไนเตรชันผงถ่านกัมมันต์ (AC) เกิดเป็น nitro activated carbon (AC-NO₂)

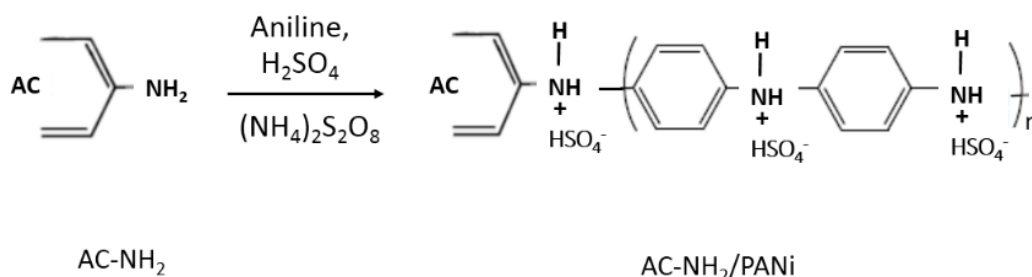
ขั้นตอนการทำปฏิกิริยารีดักชัน nitro activated carbon [28] โดยการตั้งปีกเกอร์ nitro activated carbon ลงบน hot plate แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ (10กรัม)/แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (10 มิลลิลิตร)/น้ำ (30 มิลลิลิตร) ปิดปากปีกเกอร์ด้วยแผ่นพาราฟิน ทำการกวนทิ้งไว้ข้ามคืน หรือ 12 ชั่วโมง เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันอย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นนำออกมากรองและล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและล้างจนค่าวัดค่าพีเอชเป็นกลาง อบผงถ่านกัมมันต์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีนในตู้อบตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 60 องศาเซลเซียส จะได้เป็น amino activated carbon (AC-NH₂, ดังปฏิกิริยาเคมีรูปที่ 3.2)



รูปที่ 3.2 ปฏิกิริยารีดักชัน nitro activated carbon (AC-NO₂) เกิดเป็น amino activated carbon (AC-NH₂)

3.5.2 การต่อกิ่งพอลิแอนิซีนลงบนผิวของผงถ่านกัมมันต์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีน

นำผงถ่านกัมมันต์ผสมแอนิซีนในอัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนัก (wt ratio) ดังนี้ ผงถ่านกัมมันต์ : พอลิแอนิซีน คือ 1:0.1, 1:0.2, 1:0.25, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 (ตารางที่ 3.1) เติมน้ำ 20 เท่าของ น้ำหนักรวม ค่อยๆ หยดกรดซัลฟิวริก 1.5 เท่าโดยโมลของแอนิซีน กวนของผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ในอ่างน้ำแข็ง วัตถุประสงค์ให้ได้ 0-5 องศาเซลเซียส เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการจึงค่อยๆ หยดสารละลาย แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต 1.25 เท่าโดยโมลของแอนิซีนที่ละลายน้ำแล้ว และวัตถุประสงค์ให้ได้ 0-5 องศาเซลเซียส กวนของผสมตลอดเวลาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจน สมบูรณ์ [24, 26] ผงถ่านกัมมันต์ที่ผสมกับแอนิซีนจะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีเขียว จากนั้นนำมากรองด้วยน้ำ ปราศจากไอออนจนกระทั่งวัดค่าของน้ำล้างจนมีค่าพีเอชเป็นกลาง และอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะได้ AC/PANi ทำการทดลองเช่นเดียวกันโดยใช้ nitro activated carbon และ amino activated carbon (ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.5.1) ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์ต่อพอลิแอนิซีน (ตารางที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ) จะได้ AC-NO₂/PANi และ AC-NH₂/PANi (ดั่งสมการเคมีรูปที่ 3.3) ตามลำดับ



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.3 การต่อกิ่งพอลิแอนิซีนลงบนผิวของ amino activated carbon (AC- NH₂)

เกิดเป็น AC-NH₂/PANi

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์ต่อพอลิแอนิซีน (AC/PANi)

สูตร	ผงถ่านกัมมันต์ : พอลิแอนิซีน	ปริมาณ			
		ผงถ่านกัมมันต์ (g)	แอนิซีน (ml)	กรดซัลฟิวริก(ml) (1.5 เท่าโดยโมลของแอนิซีน)	แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต(g) (1.25 เท่าโดยโมลของแอนิซีน)
1	1: 0.1	50	5	7.89	15.28
2	1: 0.2	50	10	15.78	30.56
3	1: 0.25	50	12.5	19.73	38.2
4	1: 0.3	50	15	23.67	45.92
5	1: 0.4	50	20	31.59	61.32
6	1: 0.5	50	25	39.45	76.4

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ nitro activated carbon ต่อพอลิแอนิซีน (AC-NO₂/PANi)

สูตร	AC-NO ₂ : พอลิแอนิซีน	ปริมาณ			
		AC-NO ₂ (g)	แอนิซีน (ml)	กรดซัลฟิวริก(ml) (1.5 เท่าโดยโมลของแอนิซีน)	แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต(g) (1.25 เท่าโดยโมลของแอนิซีน)
1	1: 0.1	50	5	7.89	15.28
2	1: 0.2	50	10	15.78	30.56
3	1: 0.25	50	12.5	19.73	38.2
4	1: 0.3	50	15	23.67	45.92
5	1: 0.4	50	20	31.59	61.32
6	1: 0.5	50	25	39.45	76.4

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนโดยน้ำหนักของ amino activated carbon ต่อพอลิแอนิซีน (AC-NH₂/PANi)

สูตร	AC-NH ₂ : พอลิแอนิซีน	ปริมาณ			
		AC-NH ₂ (g)	แอนิซีน (ml)	กรดซัลฟิวริก(ml) (1.5 เท่าโดยโมลของแอนิซีน)	แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต(g) (1.25 เท่าโดยโมลของแอนิซีน)
1	1: 0.1	50	5	7.89	15.28
2	1: 0.2	50	10	15.78	30.56
3	1: 0.25	50	12.5	19.73	38.2
4	1: 0.3	50	15	23.67	45.92
5	1: 0.4	50	20	31.59	61.32
6	1: 0.5	50	25	39.45	76.4

3.6 การวิเคราะห์และทดสอบสมบัติ

3.6.1 วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)

Fourier transform infrared spectrometer หรือ FT-IR เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ ตรวจสอบ พิสูจน์ เกี่ยวกับโครงสร้างทางเคมีของสาร เพื่อศึกษาหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล ซึ่งสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้ง ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ เป็นเทคนิคการกระตุ้นสารด้วยพลังงานแสง โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอินฟราเรด (IR) มีเลขคลื่น (wave number) อยู่ในช่วงประมาณ 12,800 ถึง 10 cm⁻¹ เมื่อแสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ส่งผ่านไปยังสารอินทรีย์ โมเลกุลของสารจะดูดกลืนที่ความยาวคลื่นคลื่นหนึ่ง ข้อมูลจะถูกคำนวณโดยคอมพิวเตอร์ซึ่งจะแปลผลความยาวแต่ละคลื่นออกมาเป็นสเปกตรัม เนื่องจากสารแต่ละชนิดจะมีค่าสเปกตรัมที่จำเพาะ จึงสามารถนำมาเทียบกับฐานข้อมูลเพื่อบ่งชี้สารดังกล่าวได้ โดยในการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์จะต้องนำสารมาอัดขึ้นรูป pellet กับ KBr ในอัตราส่วนของสารตัวอย่าง : KBr คือ 1 : 100 ที่ number of sample scan คือ 64 และ resolution คือ 4 cm⁻¹



รูปที่ 3.4 เครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR)

3.6.2 วิเคราะห์โครงสร้างสารประกอบด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer, NMR)

เทคนิค Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer หรือ NMR เป็นเทคนิควิเคราะห์ที่วัดการดูดกลืนรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงคลื่นวิทยุ คือประมาณ 4-600 mHz แต่แตกต่างจาก IR คือการดูดกลืนรังสีเกิดจากการเปลี่ยนระดับของพลังงานนิวเคลียส ที่เกิดระดับพลังงานแตกต่างกัน ต้องให้สนามแม่เหล็กพลังงานสูงแก่นิวเคลียส แต่เทคนิค NMR เมื่อให้สนามแม่เหล็กแก่นิวเคลียส ซึ่งมีควอนตัมสปินของการหมุน (spin quantum number) = $\frac{1}{2}$ จะเกิดการแยกของระดับพลังงานออกเป็นสองระดับ คือ ระดับพลังงานที่นิวเคลียสแม่เหล็กหมุนทิศเดียวกับสนามแม่เหล็ก และระดับพลังงานที่นิวเคลียสแม่เหล็กหมุนทิศตรงข้ามกับสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.5 เครื่อง Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer (NMR)

3.6.3 วิเคราะห์ผลึกด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในผลึก (X-ray Diffraction, XRD)

เครื่อง X-ray Diffraction หรือ XRD เป็นการวิเคราะห์ที่ใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เมื่อมีรังสีมาตกกระทบวัตถุจะทำให้เกิดการหักเหสะท้อนทำกับมุมระนาบ ที่เรียกว่า มุมรังสีตกกระทบ เท่ากับมุมรังสีสะท้อน เป็นการศึกษารูปแบบโครงสร้างของผลึกของสาร เพื่อวิเคราะห์วัสดุที่มีโครงสร้างทางเคมีของผลึก จากเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกสามารถแยกประเภทของสารที่พบ โดยทำการวัดค่าความเข้มของรังสีที่สะท้อนเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน เพราะธาตุแต่ละชนิดมีโครงสร้างผลึกที่ต่างกัน ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมต่างกันขึ้นอยู่กับขนาดและประจุของอะตอม ดังนั้นสารแต่ละชนิดจะมี XRD เฉพาะตัวเปรียบเสมือนลายนิ้วมือ และนำค่าที่ได้มาคำนวณหาปริมาณความเป็นผลึก



รูปที่ 3.6 เครื่อง X-ray Diffraction (XRD)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.6.4 วิเคราะห์สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

เทคนิค Scanning Electron Microscopy หรือ SEM เครื่องจะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี ทำให้กลายเป็นลำอิเล็กตรอนลงบนผิวของชิ้นงาน จะเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิและถูกบันทึกแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และปรากฏเป็นภาพ เพื่อนำไปใช้งาน และมีการเคลือบวัสดุตัวนำ เช่น คาร์บอน การไฟต์ และทอง บนพื้นผิวในระบบสุญญากาศ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นงานในการนำอิเล็กตรอน



รูปที่ 3.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.6.5 วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมัลติมิเตอร์ (Multimeter)

เครื่องมัลติมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า โดยนำสารตัวอย่างไปอัดขึ้นรูปเพื่อเป็นชิ้นงาน แล้วทำการต่อกับเครื่องมัลติมิเตอร์ โดยจะต้องปรับเลือกย่านวัดให้เหมาะสมกับค่าปริมาณไฟฟ้าที่จะวัด เพื่อวัดหาค่าความต้านทานจำเพาะไฟฟ้าของวัสดุที่ต้องการ และจากค่าความต้านทานที่ได้สามารถนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานของวัสดุ (resitivity) และค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) ได้ตามสมการที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ [30, 31]

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l}$$

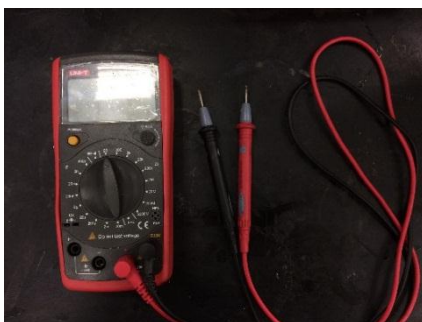
3.1

เมื่อ ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะ มีหน่วยเป็น โอห์มเมตร (Ωm)
 R คือ ค่าความต้านทาน มีหน่วยเป็น โอห์ม (Ω)
 A คือ พื้นที่ของวัสดุ มีหน่วยเป็น ตารางเซนติเมตร (cm^2)
 l คือ ความหนา มีหน่วยเป็น เซนติเมตร (cm)

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

3.2

เมื่อ σ คือ ค่าการนำไฟฟ้า มีหน่วยเป็น ซีเมน/เซนติเมตร (S/cm)



รูปที่ 3.8 เครื่องมัลติมิเตอร์

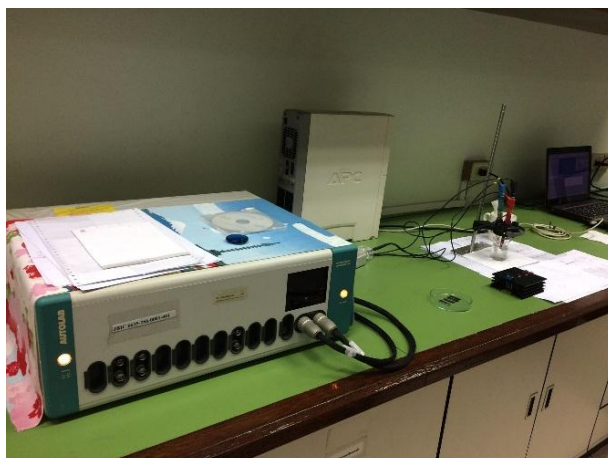
3.6.6 วิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยวิธี Cyclic voltammetry (CV) ด้วยเครื่องโพเทนซิโอสแตต (Potentiostat)

เทคนิค cyclic voltammetry หรือ CV มีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่สามส่วน คือ โพเทนซิโอสแตต เป็นตัวควบคุมการจ่ายความต่างศักย์และวัดกระแสไฟฟ้าที่มีความละเอียด คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานและแสดงผลการวิเคราะห์ และเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบสามขั้ว ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทำงาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และขั้วไฟฟ้าช่วย โดยในการวิเคราะห์จะทำในช่วง 0-1 ที่อัตราการสแกน 10, 50 และ 100 มิลลิโวลต์/วินาที ที่ทำการสแกน 3 รอบในสารละลายกรด และคำนวณค่าความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุโดยเทคนิค cyclic voltammetry จากสมการ 3.1 [23]

$$C = \int \frac{I}{v} dV / \Delta V$$

3.3

เมื่อ	C	คือ	ค่าความสามารถในการเก็บประจุ	มีหน่วยเป็น	ฟารัด/กรัม (F/g)
	I	คือ	ค่ากระแสไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น	แอมแปร์ (A)
	m	คือ	มวลของสารตัวอย่าง	มีหน่วยเป็น	กรัม (g)
	ΔV	คือ	ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้ตั้งแต่ v_a ถึง v_c	มีหน่วยเป็น	โวลต์ (V)
	v	คือ	อัตราศักย์ไฟฟ้า	มีหน่วยเป็น	มิลลิโวลต์/วินาที (mV/s)



รูปที่ 3.9 เครื่องโพเทนชิโอสแตส (Potentiostat)



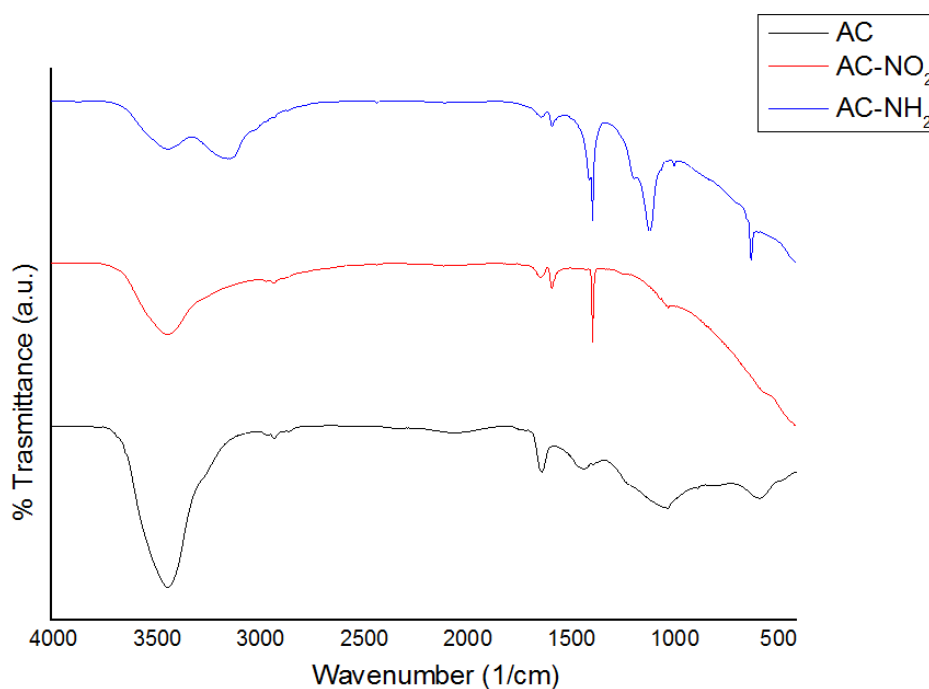
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

4.1.1 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (Fourier transform infrared spectrometer, FT-IR)

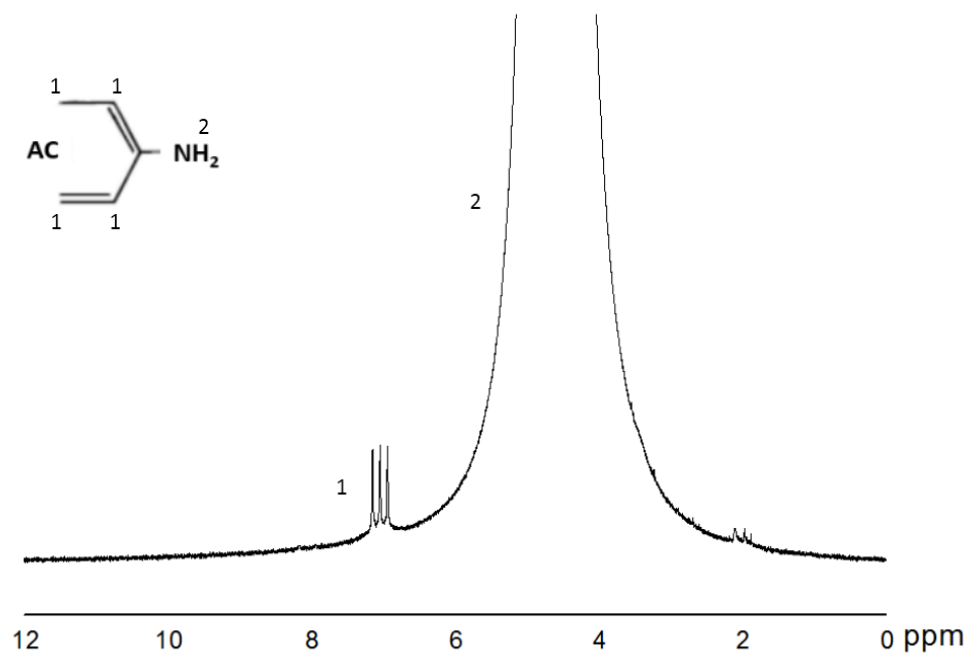
จากรูป 4.1 แสดงสเปกตรัมของผงถ่านกัมมันต์และผงถ่านกัมมันต์ดัดแปร คือ nitro activated carbon และ amino activated carbon ซึ่งสังเกตเห็นว่าค่าการดูดซับรังสีจะแสดงออกมาเป็นพีกละเอียดต่าง ๆ (wave number) ผงถ่านกัมมันต์พบพีคที่ตำแหน่งประมาณ $1,600-1,500\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีคที่แสดงถึงพันธะ C=C stretching และตำแหน่งพีคประมาณ $3,500-3,250\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นพีคที่แสดงถึงพันธะ O-H stretching หรือของน้ำในโครงสร้าง ในกรณี nitro activated carbon จะพบการเปลี่ยนแปลงของพีคอย่างชัดเจน โดยพบความเข้มของพีคของหมู่ c=c ลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาไนเตรชัน และพบพีคใหม่ปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งประมาณ $1,380\text{ cm}^{-1}$ และ $1,580\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของหมู่ C-NO₂ และ หมู่ NO₂ บนโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกตามลำดับ สเปกตรัมของ amino activated carbon พบพีคที่ลักษณะเฉพาะของพันธะ C-N ที่ตำแหน่งประมาณ $1,100\text{ cm}^{-1}$ อย่างชัดเจน และพีค N-H ของหมู่เอมีนที่ $3,300-3,200\text{ cm}^{-1}$ [24, 32] จึงสรุปได้ว่าการดัดแปรผงถ่านกัมมันต์ประสบผลสำเร็จตามที่คาดไว้



รูปที่ 4.1 สเปกตรัมของผงถ่านกัมมันต์ (AC), nitro activated carbon (AC-NO₂) และ amino activated carbon (AC-NH₂)

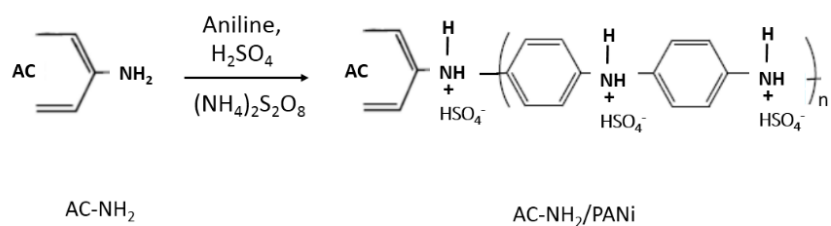
4.1.2 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer, NMR)

เมื่อพิจารณาผลสเปกตรัม ¹H-NMR ของ amino activated carbon (AC-NH₂) ในรูปที่ 4.2 พบสัญญาณของโปรตอนทั้งหมด 2 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งแรกจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง chemical shift ประมาณ 7.1 ppm, 7.0 ppm และ 6.9 ppm ซึ่งเป็นโปรตอนที่อยู่บนวงแหวนเอมีน และตำแหน่งที่ 2 จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง chemical shift ประมาณ 4.5 ppm ซึ่งเป็นตำแหน่งของโปรตอนที่ต่อกับไนโตรเจน [5, 7] แต่ในการทดลองใช้ D₂O เป็นตัวกลาง พบว่า D₂O จะเกิดการแลกเปลี่ยนโปรตอนกันระหว่างตัวกลางและตัวอย่างที่ตำแหน่ง N-H ทำให้พีกของโปรตอนของหมู่ N-H ที่เคยปรากฏจะหายไปและจะเกิดพีกใหม่ของ H-O-D ขึ้นมาแทนตรงบริเวณตำแหน่งประมาณ 5 ppm และมีค่า intensity สูงมาก ทำให้ไปบดบังความเข้มของพีกอื่นๆ ให้มีค่า intensity ต่ำลง

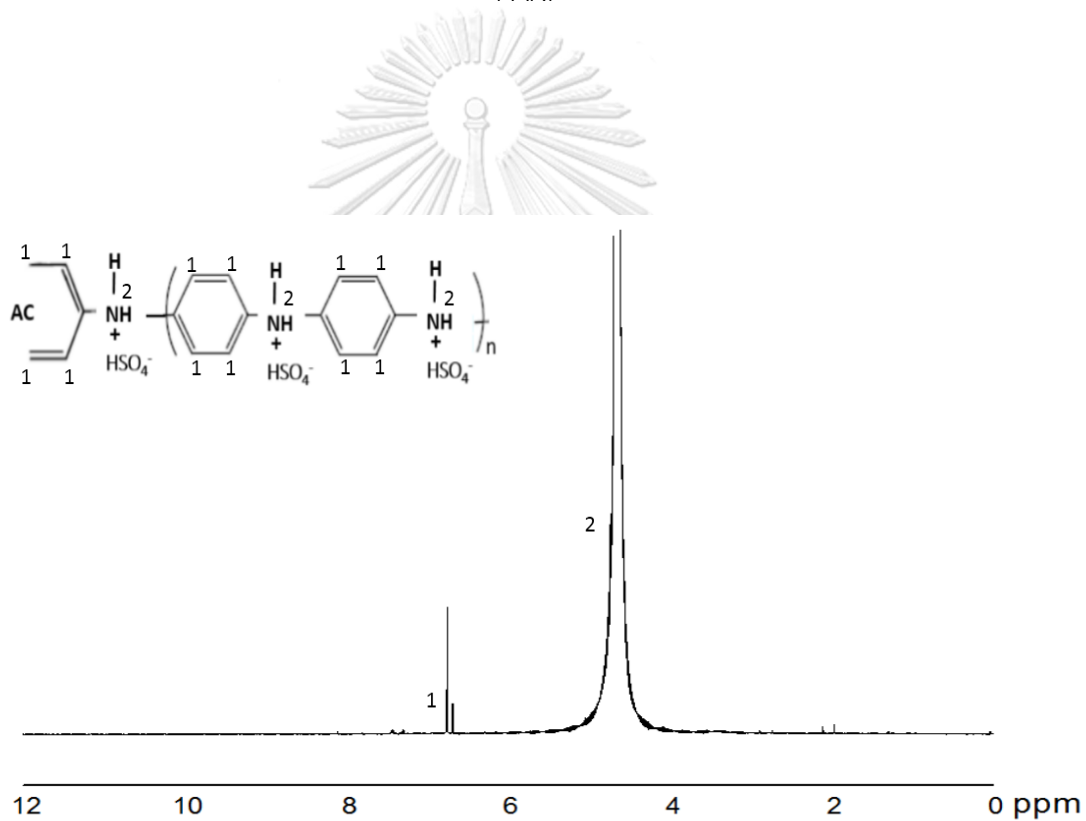


รูปที่ 4.2 $^1\text{H-NMR}$ ของ amino activated carbon (AC-NH_2)

AC-NH-PANI ที่ได้จากการต่อกิ่งพอลิแอนิไลน์ลงบนผิวของ amino activated carbon แสดงดังสมการเคมีรูปที่ 4.3 ได้นำไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิค $^1\text{H-NMR}$ ได้สเปกตรัมของ $\text{AC-NH}_2/\text{PANI}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าลักษณะเฉพาะของโปรตอนบนวงแหวนเอมีนที่ chemical shift ประมาณ 6.7 ppm และ 6.6 ppm ที่มีค่าความเข้มของ chemical shift สูงกว่าโปรตอนในตำแหน่งเดียวกันบนวงแหวนเอมีนของ amino activated carbon (AC-NH_2) เป็นเพราะว่ามีปริมาณของจำนวนโปรตอนมากกว่าในหมู่โครงสร้าง $\text{AC-NH}_2/\text{PANI}$ และ การเลื่อนตำแหน่งที่ต่ำลงของ chemical shift นี้สามารถอธิบายได้จากผลของความสามารถในการดึงอิเล็กตรอนของวงแหวน ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนรอบๆ นิวเคลียสมากขึ้น จึงทำให้ความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กเกิด spin flipping ของโปรตอนเพิ่มขึ้น และตำแหน่ง chemical shift ประมาณ 4.5 ppm โดยจะมียอดฟีกของโปรตอนที่แหลมขึ้นกว่าแบบ amino activated carbon (AC-NH_2) ซึ่งเป็นตำแหน่งของโปรตอนที่ต่อกับไนโตรเจน สอดคล้องกับตำแหน่งโครงสร้างของพอลิแอนิไลน์ ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าสามารถทำการต่อกิ่ง PANi บนผิวนำกัมมันต์ (AC-NH-PANI) ตามที่คาดการณ์ไว้



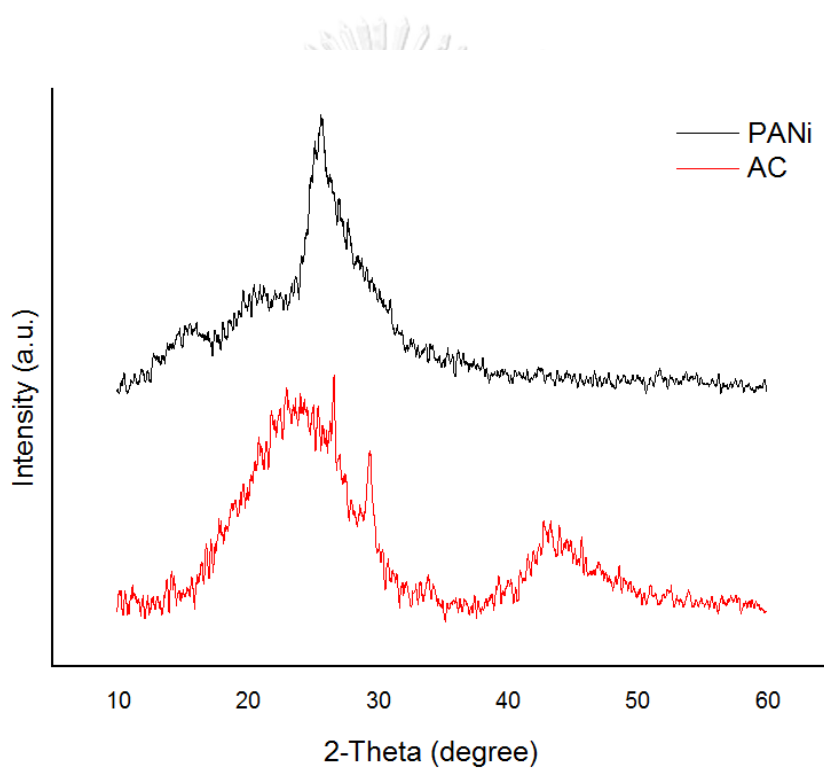
รูปที่ 4.3 ปฏิกริยาการต่อกิ่งพอลิแอนิไลน์ลงบนผิวของ amino activated carbon เกิดเป็น AC-NH-PANI



รูปที่ 4.4 ¹H-NMR ของ AC-NH-PANI

4.1.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ผลึกด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในผลึก (X-ray Diffraction, XRD)

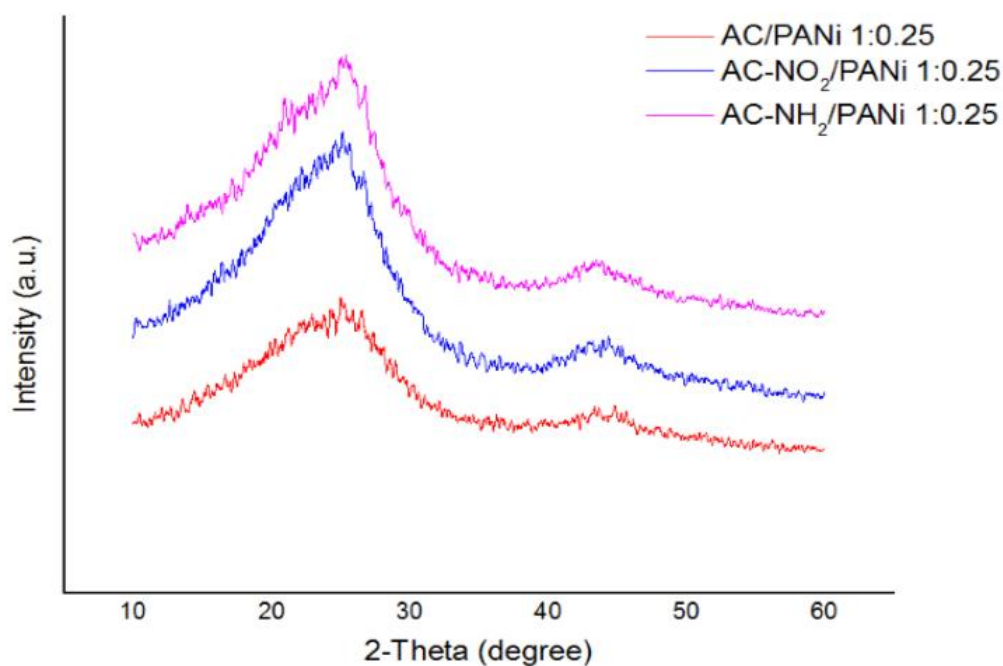
ลักษณะโครงสร้างผลึกสามารถวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction) ดังแสดงในรูปที่ 4.5 โดยพีก 2θ ของพอลิแอนิไลน์บริสุทธิ์จะปรากฏที่ 15° , 20.3° และ 25.4° [6] และผงถ่านกัมมันต์จะแสดงพีก 2θ ปรากฏที่ตำแหน่ง 20° - 25° และ 43° ซึ่งเป็นพีกแบบกึ่งอสุณฐาน [33, 34] เนื่องจากถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุอสุณฐานจึงพบพีกที่มีฐานกว้างดังภาพ



รูปที่ 4.5 XRD ดิฟแฟคโตรแกรมของพอลิแอนิไลน์ (PANi) และผงถ่านกัมมันต์ (AC) ด้วยเทคนิค XRD

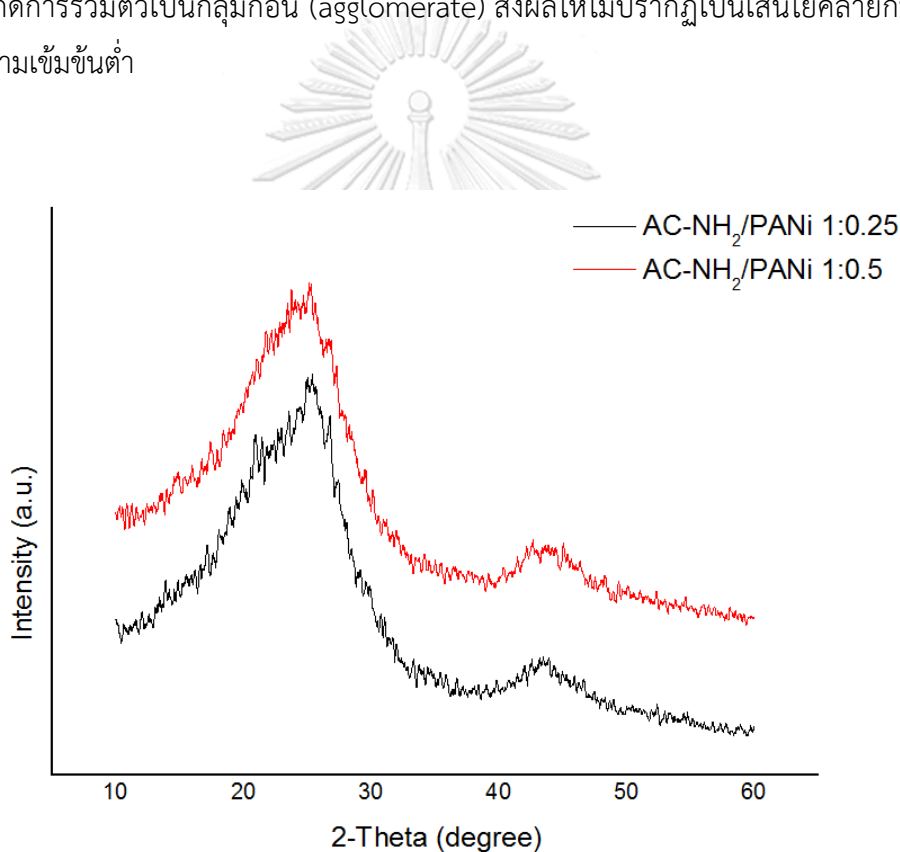
จากการสังเคราะห์ AC/PANi 1:0.25, AC-NO₂/PANi 1:0.25 และ AC-NH₂/PANi 1:0.25 ที่มีการเติมพอลิแอนิไลน์ลงในโครงสร้าง ผลการวิเคราะห์ยอดพีกการเลี้ยวเบนของรังสีแสดงในรูปที่ 4.6 จะไม่ปรากฏพีกใหม่เกิดขึ้น แสดงถึงไม่มีผลึกใหม่เกิดขึ้น ลักษณะพีกเป็นการผสมผสานระหว่างผลึก

ของผงถ่านและผลึกของพอลิแอนิลินโดยจะปรากฏพีกที่ตำแหน่งเดิมคือ 25° และ 43° เท่านั้น โดยพีกตำแหน่งที่ 20° - 25° จะแสดงเอกลักษณ์ของผงถ่านกัมมันต์และพอลิแอนิลิน เพราะว่าพอลิแอนิลินเป็นพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการเรียงตัวเป็นผลึกได้ง่าย เนื่องจากการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบของวงแหวนอะโรมาติกของพอลิแอนิลิน และพีกตำแหน่งที่ 43° จะแสดงถึงค่าความสัมพันธ์ในการนำไฟฟ้าของผงถ่านกัมมันต์ [35] จากรูปจะเห็นว่า AC-NH₂/PANi 1:0.25 จะมียอดพีกที่มีฐานแคบกว่าพีกของ AC/PANi เนื่องจากมีปริมาณของพอลิแอนิลินมากกว่า ในขณะที่พีกของ AC/PANi มีลักษณะฐานกว้างเนื่องจากมีสัดส่วนของผงถ่านกัมมันต์มากกว่า แสดงให้เห็นว่า PANi จะไม่สามารถเกาะบนผิวผงถ่านกัมมันต์ได้ดีถ้าไม่ผ่านการตัดแปรเสียก่อน และสืบเนื่องจากการดอ์กทำให้พอลิแอนิลินสามารถเรียงตัวซ้อนกันเป็นผลึกได้สูงกว่าการสังเคราะห์แบบอื่น ในกรณีนี้ของ AC-NO₂/PANi พบลักษณะของพีกคล้ายกับ AC-NH₂/PANi แสดงว่า PANi สามารถเกาะบนผิวของผงถ่านได้ดีเนื่องจากมีแรงทางกายภาพระหว่างกัน



รูปที่ 4.6 XRD ดิฟแฟคโตรแกรมของ AC/PANi 1:0.25, AC-NO₂/PANi 1:0.25 และ AC-NH₂/PANi 1:0.25

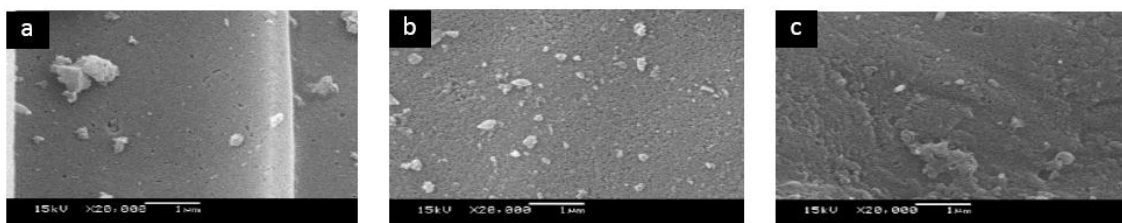
รูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของโครงสร้างของ AC-NH₂/PANi 1:0.25 และ AC-NH₂/PANi 1:0.5 โดย AC-NH₂/PANi 1:0.25 ในโครงสร้างจะมีปริมาณผลึก 33.94 % และจะมีพีกตำแหน่งที่ 25° จะสูงกว่า AC-NH₂/PANi 1:0.5 ที่ในโครงสร้างจะมีปริมาณผลึกเพียง 29.30 % โดยคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟ ทั้งนี้เป็นเพราะว่าที่ AC-NH₂/PANi 1:0.25 มีประสิทธิภาพในการจัดเรียงตัวของผลึกในโครงสร้างได้ดีกว่า AC-NH₂/PANi 1:0.5 เพราะที่ความเข้มข้นของพอลิแอนิซีนต่ำ ปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชันสามารถควบคุมได้ หรือมีการกำหนดการเติบโตของสายโซ่พอลิเมอร์ได้ตามแนวยาวเป็นนาโนไฟเบอร์ ในขณะที่พอลิแอนิซีนที่ความเข้มข้นสูง นาโนไฟเบอร์ของพอลิแอนิซีนจะเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในระยะเวลาที่รวดเร็ว ไม่สามารถควบคุมปฏิกริยาพอลิเมอร์ไรเซชันได้ จึงเกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) ส่งผลให้ไม่ปรากฏเป็นเส้นใยคล้ายกับพอลิแอนิซีนที่ความเข้มข้นต่ำ



รูปที่ 4.7 XRD ดิฟแฟคโตรแกรมของ AC-NH₂/PANi 1:0.25 และ AC-NH₂/PANi 1:0.5

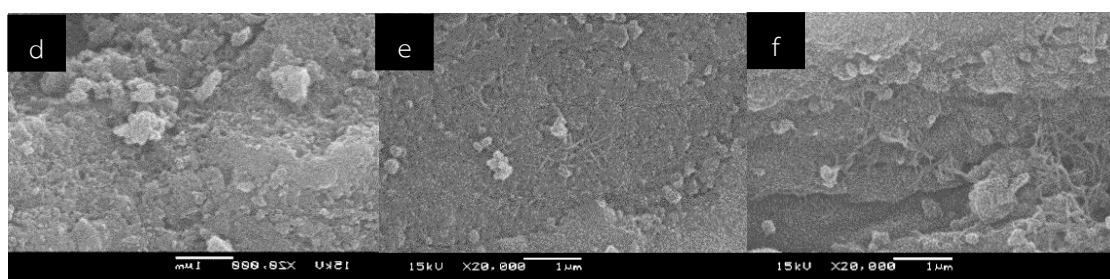
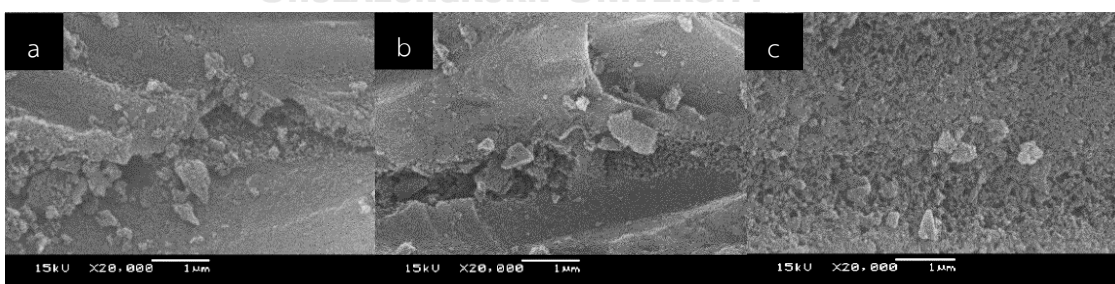
4.1.4 สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

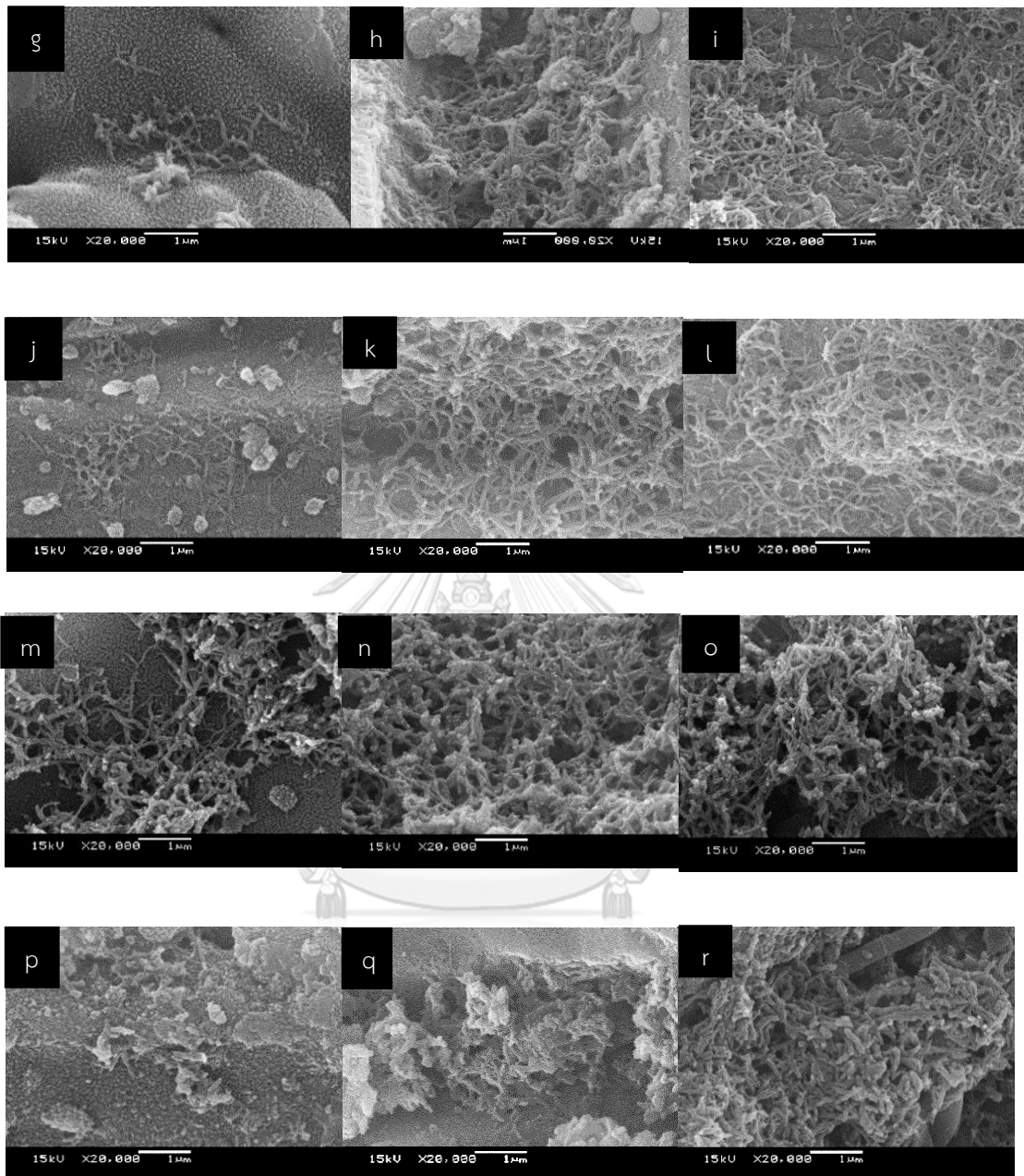
รูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงผลการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของผงถ่านกัมมันต์, ผงถ่านกัมมันต์ที่มีการปรับผิวด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน (AC-NO₂, AC-NH₂) และ ผงถ่านกัมมันต์ที่ต่อกิ่งด้วยพอลิแอนิลิน (AC/PANi, AC-NO₂/PANi, AC-NH₂/PANi) ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างผงถ่านกัมมันต์ต่อพอลิแอนิลินคือ 1:0.1, 1:0.2, 1:0.25, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 และศึกษาที่กำลังขยาย 20,000 เท่า



รูปที่ 4.8 สัณฐานวิทยาของ (a) ผงถ่านกัมมันต์, (b) nitro activated carbon (AC-NO₂) และ (c) amino activated carbon (AC-NH₂)

จากรูปที่ 4.8 (a) เป็นรูปสัณฐานวิทยาของผงถ่านกัมมันต์จะเห็นว่าที่กำลังขยาย 20,000 เท่า จะมีลักษณะผิวเรียบและมีรูพรุนเล็กน้อย รูปที่ 4.8 (b และ c) จะเป็นผงถ่านกัมมันต์ที่มีการเติมหมู่ฟังก์ชันเอมีนลงบนผิว จะเห็นได้ว่าที่ผิวของผงถ่านกัมมันต์จะมีสารเคลือบเกาะอยู่ที่ผิวและทำให้ผิวไม่เรียบสม่ำเสมอเช่นเดิม





รูปที่ 4.9 สัณฐานวิทยาของผงถ่านกัมมันต์ที่ต่อกิ่งด้วยพอลิแอนิไลน์ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนัก (a) AC/PANi 1:0.1 (b) AC-NO₂/PANi 1:0.1, (c) AC-NH₂/PANi 1:0.1, (d) AC/PANi 1:0.2, (e) AC-NO₂/PANi 1:0.2, (f) AC-NH₂/PANi 1:0.2, (g) AC/PANi 1:0.25, (h) AC-NO₂/PANi 1:0.25, (i) AC-NH₂/PANi 1:0.25, (j) AC/PANi 1:0.3, (k) AC-NO₂/PANi 1:0.3, (l) AC-NH₂/PANi 1:0.3, (m) AC/PANi 1:0.4, (n) AC-NO₂/PANi 1:0.4, (o) AC-NH₂/PANi 1:0.4, (p) AC/PANi 1:0.5, (q) AC-NO₂/PANi 1:0.5 และ (r) AC-NH₂/PANi 1:0.5

จากรูปที่ 4.9 (a, d, g, j, m และ p) เป็นรูปแสดงสัณฐานวิทยาของผงถ่านกัมมันต์ที่มีการผสมทางกายภาพกับพอลิแอนิลิน หรือ AC/PANi จะสังเกตเห็นได้ว่าการเกาะของพอลิแอนิลินบนผิวของผงถ่านกัมมันต์จะน้อยมากที่ในอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์ต่อพอลิแอนิลิน 1:0.1, 1:0.2, 1:0.25, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ทั้งนี้เป็นผลมาจากตัวพื้นผิวของผงถ่านกัมมันต์ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ในขณะที่พอลิแอนิลินเป็นพอลิเมอร์แบบมีขั้วทำให้สารทั้งสองไม่มีแรงยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกัน อาศัยเพียงแค่แรงยึดเหนี่ยวแบบ van der waals ระหว่างวงแหวนอะโรมาติกจึงทำให้มีพอลิแอนิลินเกาะบนลงบนพื้นผิวของผงถ่านกัมมันต์น้อยมาก รูปที่ 4.9 (b, e, h, k, n และ g) เป็นรูปแสดงสัณฐานวิทยาของ AC-NO₂/PANi จะเห็นได้ว่าโครงสร้างเต็มไปด้วยเส้นใยของพอลิแอนิลินบนผิวของผงถ่านกัมมันต์ สะท้อนให้เห็นถึงปฏิกิริยาระหว่างขั้ว (dipole-dipole) ที่ยึดระหว่างโมเลกุลของ nitro activated carbon กับพอลิแอนิลิน และในรูปที่ 4.9 (c, f, i, l, o และ r) ที่แสดงถึงสัณฐานวิทยาของ AC-NH₂/PANi เป็นการต่อกิ่งของพอลิแอนิลินลงบนผิวของ amino activated carbon ที่ตำแหน่งวงแหวนเอมีน จะเห็นได้ว่าพอลิแอนิลิน (PANi nanofiber) ที่สังเคราะห์มีขนาดเล็กในระดับนาโน ทั้งนี้เนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันที่สามารถควบคุมได้และทำให้มีพื้นที่ผิวที่สูงขึ้น ซึ่งหากวัสดุมีปริมาณของพอลิแอนิลินจำนวนมากจะทำให้พื้นที่ผิวของวัสดุเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้เพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานทางไฟฟ้าของวัสดุได้ดียิ่งขึ้น โดยจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของอิเล็กโทรดกับอิเล็กโทรไลต์ให้เพิ่มมากยิ่งขึ้น

ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์ต่อพอลิแอนิลินที่ 1:0.3 (j, k และ l) คือ อัตราส่วนที่ดีที่สุด โดยเฉพาะ AC-NH₂/PANi หรือรูป l จะเป็นสูตรที่ดีที่สุด เพราะจะเห็นได้ว่าเส้นใยของพอลิแอนิลินจะมีขนาดเล็กและมีปริมาณของพอลิแอนิลินบนพื้นผิวที่เยอะที่สุด ซึ่งจะมีมากกว่าที่อัตราส่วน 1:0.5 เป็นเพราะว่าที่ความเข้มข้นของพอลิแอนิลินต่ำ คืออัตราส่วน 1:0.3 จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันช้ากว่าหรือค่อยๆ เกิด ทำให้ไม่เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) พอลิแอนิลินที่ได้จะเห็นเป็นรูปเส้นใย แต่ที่ความเข้มข้นสูงจะทำให้เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) จะได้พอลิแอนิลินที่มีขนาดใหญ่กว่าเห็นได้จากรูปที่ 4.9 (n, o, q และ r) โดยสามารถสรุปได้ว่าความเข้มข้นของพอลิแอนิลินมีผลต่อสัณฐานวิทยาอย่างชัดเจน

4.2 ผลการวิเคราะห์และทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า

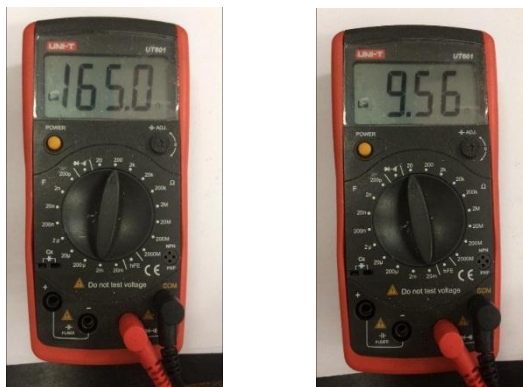
4.2.1 สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัด (Multimeter)

4.2.1.1 ค่าความต้านทานจำเพาะ (Resistivity)

การวัดค่าความต้านทานจำเพาะ วัดได้จากการนำสารที่สังเคราะห์ไปอัดด้วยเครื่องอัดกระเบื้อง จะได้ชิ้นงานที่มีขนาดความกว้าง 5 เซนติเมตร และยาว 10 เซนติเมตร จากนั้นทำการตัดชิ้นงานให้มีขนาดความกว้าง 3.5 เซนติเมตร และยาว 5 เซนติเมตร จะได้ชิ้นงานที่มีขนาดพื้นที่ 17.5 ตารางเซนติเมตร จากนั้นทำการเคลือบด้วยวัสดุตัวนำ (silver) ทั้งสองด้านตามด้านกว้างแสดงในรูปที่ 4.10 มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นตัวกลางทางไฟฟ้าระหว่างชิ้นงานที่ทดสอบและขั้วไฟฟ้าของเครื่องมือวัด (Multimeter) ทำให้ค่าความต้านทานที่วัดด้วยเครื่องมือวัดมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยตัวอย่างของผลการทดลองจะเป็นไปตามรูปที่ 4.11 ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะและค่าการนำไฟฟ้าต่อไป



รูปที่ 4.10 ภาพของชิ้นงานที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดกระเบื้อง และชิ้นงานที่มีการเคลือบด้วยวัสดุตัวนำ



รูปที่ 4.11 ค่าความต้านทานของผงถ่านกัมมันต์ (AC) และ AC-NH₂/PANi ตามลำดับโดยใช้ เครื่องมัลติมิเตอร์ (Multimeter)

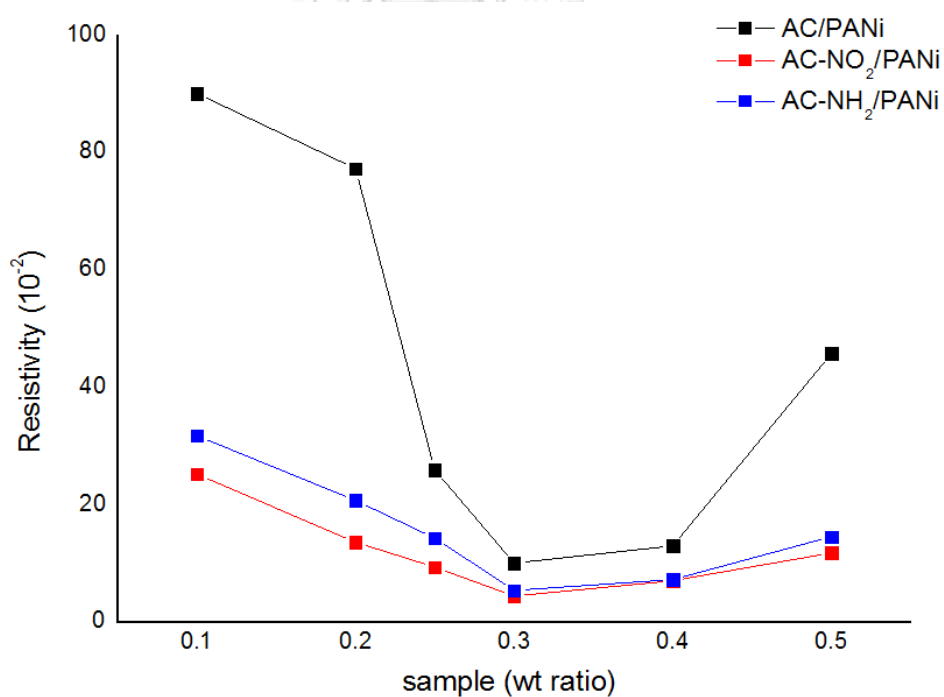
จากการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4.1 พบว่าผงถ่านกัมมันต์ จะมีค่าความต้านทานจำเพาะสูงถึง 459×10^{-2} โอห์มเมตร แต่เมื่อมีการผสมพอลิแอนิไลน์ลงไปซึ่งมีสมบัติเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้า จะทำให้ได้ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุทั้งหมดต่ำลง โดยที่อัตราส่วนต่างๆ ของผงถ่านกัมมันต์ต่อพอลิแอนิไลน์ จะได้ค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ต่างกัน โดยที่อัตราส่วน 1:0.3 ของผงถ่านกัมมันต์ต่อพอลิแอนิไลน์ ของ (AC/PANi), AC-NO₂/PANi และ AC-NH₂/PANi จะมีค่าความต้านทานจำเพาะที่ 10.15×10^{-2} โอห์มเมตร, 4.55×10^{-2} โอห์มเมตร และ 5.53×10^{-2} โอห์มเมตร ตามลำดับ ซึ่งถือว่าเป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด โดย AC/PANi จะมีค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุของวัสดุสูงที่สุด ทั้งนี้เป็นเพราะว่ามีการผสมระหว่างผงถ่านกัมมันต์กับพอลิแอนิไลน์แบบกายภาพเท่านั้น แต่ใน AC-NH₂/PANi มีการการต่อกิ่งของพอลิแอนิไลน์ลงบนผิวของผงถ่านกัมมันต์ โดยตำแหน่งต่อกิ่ง (branch sites) จะทำหน้าที่เป็นหลุมอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเป็นสะพานเชื่อมการวิ่งของอิเล็กทรอนิกส์ไปมาระหว่างกิ่งพอลิแอนิไลน์และเลเยอร์แอโรแมติกของผงถ่านกัมมันต์ (aromatic layers) จึงทำให้มีค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุที่ต่ำลง ดังนั้นจึงพบว่าพอลิแอนิไลน์มีความสามารถในการลดค่าความต้านทานจำเพาะของวัสดุให้ต่ำลงได้ตามตารางที่ 4.1

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l}$$

4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความต้านทานจำเพาะที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์กับพอลิแอนิลิน

ผงถ่านกัมมันต์ : พอลิแอนิลิน	AC/PANi (Ωm)	AC-NO ₂ /PANi (Ωm)	AC-NH ₂ /PANi (Ωm)
1 : 0.1	90.16×10^{-2}	25.31×10^{-2}	31.88×10^{-2}
1 : 0.2	77.35×10^{-2}	13.72×10^{-2}	20.85×10^{-2}
1 : 0.25	26×10^{-2}	9.48×10^{-2}	14.43×10^{-2}
1 : 0.3	10.15×10^{-2}	4.55×10^{-2}	5.53×10^{-2}
1 : 0.4	13.13×10^{-2}	7.17×10^{-2}	7.38×10^{-2}
1 : 0.5	45.85×10^{-2}	11.94×10^{-2}	14.7×10^{-2}



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงแนวโน้มภาพรวมของค่าความต้านทานจำเพาะ

4.2.1.1 ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)

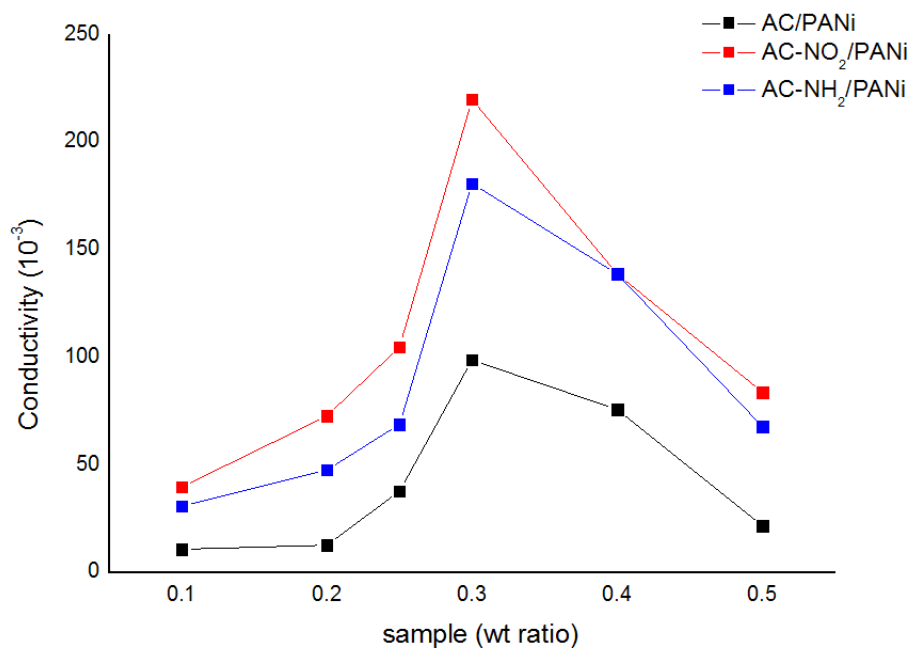
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุที่อัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์กับพอลิแอนิลินที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.2 พบว่าวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดคือ AC-NO₂/PANi และ AC-NH₂/PANi ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างผงถ่านกัมมันต์ต่อพอลิแอนิลิน 1:0.3 คือ 220 × 10⁻³ ซีเมน/เซนติเมตร และ 181 × 10⁻³ ซีเมน/เซนติเมตร ตามลำดับ และเมื่อเทียบที่อัตราส่วนเดียวกันจะพบว่าค่าการนำไฟฟ้าของ และ AC/PANi จะมีค่าเพียง 99 × 10⁻³ ซีเมน/เซนติเมตร และค่าการนำไฟฟ้าของผงถ่านกัมมันต์คือ 2 × 10⁻³ ซีเมน/เซนติเมตรเท่านั้น ซึ่งถือว่ามีค่าน้อยมาก เพราะว่าผงถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเป็นรูพรุนแต่ไม่มีความสามารถในการนำไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อทำการเติมพอลิแอนิลินที่มีสมบัติเป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้าลงไปคลุมบนผิวของผงถ่านกัมมันต์ จะทำให้วัสดุมีค่าการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น แต่ก็ขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างผงถ่านกัมมันต์กับพอลิแอนิลินเพราะจะส่งผลโดยตรงต่อปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ตามรูปที่ 4.13 เป็นการแสดงแนวโน้มภาพรวมของค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราส่วนระหว่างผงถ่านกัมมันต์ต่อพอลิแอนิลินที่อัตราส่วนต่างๆ และสรุปได้ว่าพอลิแอนิลินมีความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าของวัสดุ

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าการนำไฟฟ้าที่อัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์กับพอลิแอนิลิน

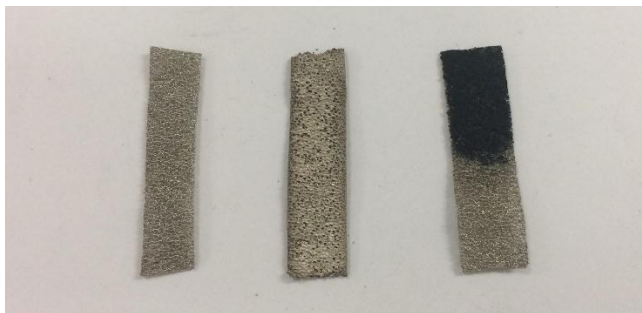
ผงถ่านกัมมันต์ : พอลิแอนิลิน	AC/PANi (S/cm)	AC-NO ₂ /PANi (S/cm)	AC-NH ₂ /PANi (S/cm)
1 : 0.1	11 × 10 ⁻³	40 × 10 ⁻³	31 × 10 ⁻³
1 : 0.2	13 × 10 ⁻³	73 × 10 ⁻³	48 × 10 ⁻³
1 : 0.25	38 × 10 ⁻³	105 × 10 ⁻³	69 × 10 ⁻³
1 : 0.3	99 × 10 ⁻³	220 × 10 ⁻³	181 × 10 ⁻³
1 : 0.4	76 × 10 ⁻³	139 × 10 ⁻³	139 × 10 ⁻³
1 : 0.5	22 × 10 ⁻³	84 × 10 ⁻³	68 × 10 ⁻³



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงแนวโน้มภาพรวมของค่าการนำไฟฟ้า

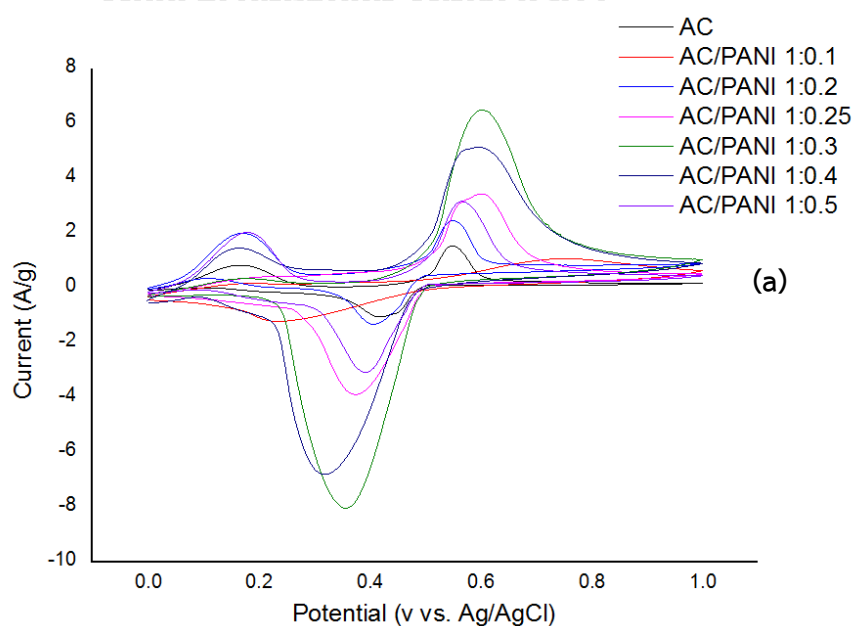
4.2.2 สมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยวิธี cyclic voltammetry (CV) ด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส

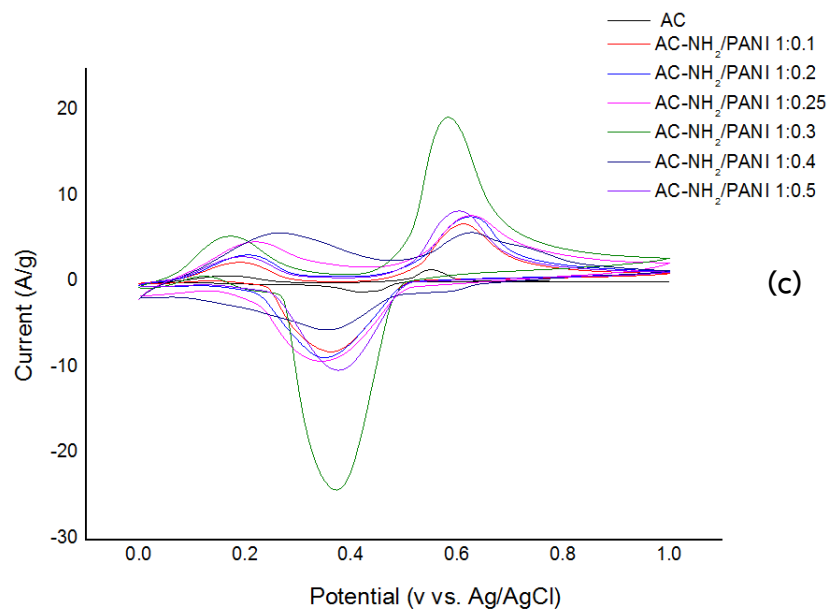
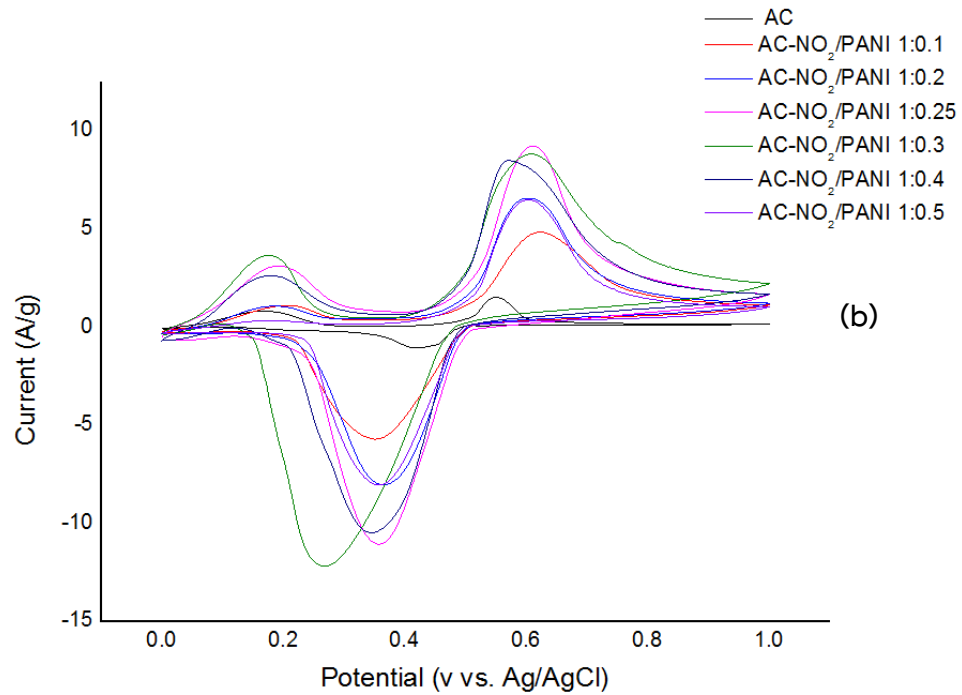
การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าด้วยเครื่องโพเทนชิโอสแตส โดยวิธี cyclic voltammetry (CV) เป็นการวิเคราะห์ความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุ ซึ่งได้กราฟระหว่างกระแส (Current (A/g)) กับศักย์ไฟฟ้า (Potential (v vs. Ag/AgCl) [36] โดยใช้สารละลายกรดซัลฟูริก ที่ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ และใช้นิกเกิลโพลีเมอร์ที่เคลือบด้วยวัสดุตัวนำ (silver) เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) ตามรูปที่ 4.14 ให้ศักย์ไฟฟ้าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โวลต์ ในการทดสอบ ที่อัตราการสแกนไฟฟ้า 10 มิลลิโวลต์/วินาที



รูปที่ 4.14 แสดงรูปของนิกเกิลโฟม นิกเกิลโฟมที่เคลือบด้วยวัสดุตัวนำ และนิกเกิลโฟมที่เคลือบสารที่ต้องการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยวิธี cyclic voltammetry ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.15 ในการทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้าพบว่าของ ผงถ่านกัมมันต์, nitro activated carbon และ amino activated carbon เมื่อมีการเติมพอลิแอนิซีนลงไปผสม (AC/PANi, AC-NO₂/PANi และ AC-NH₂/PANi) จะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์เพิ่มขึ้นภายในโครงสร้าง และจะเกิดพีคของปฏิกิริยารีดอกซ์ทั้งหมด 3 คู่ โดยคู่แรกจะเกิดที่ตำแหน่งพีค 0.2 โวลต์ ซึ่งคือยอดของการเปลี่ยนจากสารกึ่งตัวนำ (leucoemeraldine) เป็นสารสื่อกระแสไฟฟ้า (emeraldine) และที่ตำแหน่งพีค 0.6 โวลต์ จะมีการเปลี่ยนจากสารสื่อกระแสไฟฟ้า (emeraldine) เป็น pernigraniline โดยเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอย่างเต็มรูปแบบ และที่ตำแหน่งพีค 0.4 โวลต์ เป็นผลมาจากการต่อของสารแบบหัวต่อหาง (head-to-tail) และยังพบว่า การใส่พอลิแอนิซีนลงไปทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของผงถ่านกัมมันต์





รูปที่ 4.15 CV curves ของ (a) AC/PANi, (b) AC-NO₂/PANi และ (c) AC-NH₂/PANi ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนัก

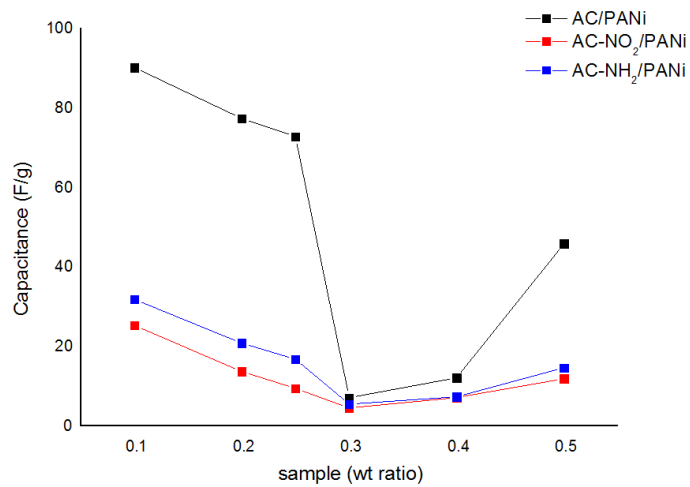
จากตารางที่ 4.3 แสดงอัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์กับพอลิแอนิไลน์ และค่าการเก็บประจุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.3 โดยค่าความสามารถในการเก็บประจุของผงถ่านกัมมันต์ คือ 50.22 ฟารัด/กรัม ซึ่งจะมีค่าน้อยที่กว่าผงถ่านกัมมันต์ที่มีการผสมพอลิแอนิไลน์ โดยพอลิแอนิไลน์บริสุทธิ์มีค่าความสามารถในการเก็บประจุสูงถึง 395 ฟารัด/กรัม จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมพอลิแอนิไลน์ลงไปในความเข้มข้นต่างๆ ตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์กับพอลิแอนิไลน์ จะมีค่าความสามารถในการเก็บประจุที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงแรก คือ ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์ต่อพอลิแอนิไลน์ 1:0.1, 1:0.2, 1:0.25 และ 1:0.3 และความสามารถค่าการเก็บประจุจะลดลง ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:0.4 และ 1:0.5 ในทุกๆ สัปดาห์ โดยที่ความเข้มข้น 1:0.3 ของพอลิแอนิไลน์ทั้งสามสูตรจะมีค่าความสามารถในการเก็บประจุสูงที่สุด เพราะว่าเป็นความเข้มข้นที่พอเหมาะ ทำให้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดอย่างสมบูรณ์ ซึ่งสามารถควบคุมขนาดของพอลิแอนิไลน์ได้ จึงทำให้มีพื้นที่ผิวที่สูงขึ้น เพิ่มความสามารถในการเก็บประจุ และที่ความเข้มข้นของพอลิแอนิไลน์เพิ่มขึ้นที่ 1:0.4 และ 1:0.5 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจะเกิดอย่างรวดเร็ว เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน (agglomerate) ทำให้ได้ผลึกของพอลิแอนิไลน์ที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้พื้นที่ผิวของวัสดุน้อยลง ความสามารถในการเก็บประจุก็จะลดลงเช่นกัน และพบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์ต่อพอลิแอนิไลน์ ที่ 1:0.3 เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุดในการนำมาต่อกิ่งพอลิแอนิไลน์ลงบนผิวผงถ่านกัมมันต์ เพื่อเพิ่มความสามารถในการเก็บประจุ

$$C = \int \frac{I}{m} dV / v \Delta V \quad 4.3$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

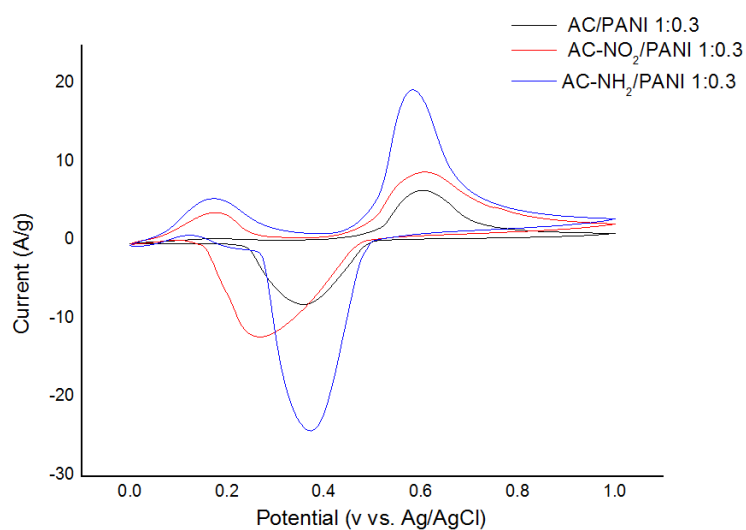
ตารางที่ 4.3 ค่าการเก็บประจุที่อัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์กับพอลิแอนิไลน์

ผงถ่านกัมมันต์ : พอลิแอนิไลน์	AC/PANi (F/g)	AC-NO ₂ /PANi (F/g)	AC-NH ₂ /PANi (F/g)
1 : 0.1	90.3	278.2	320.3
1 : 0.2	114.2	342	425.8
1 : 0.25	164.7	489.9	558.8
1 : 0.3	317.4	592.7	858.8
1 : 0.4	303.5	463	514.1
1 : 0.5	142.8	303.9	425.4



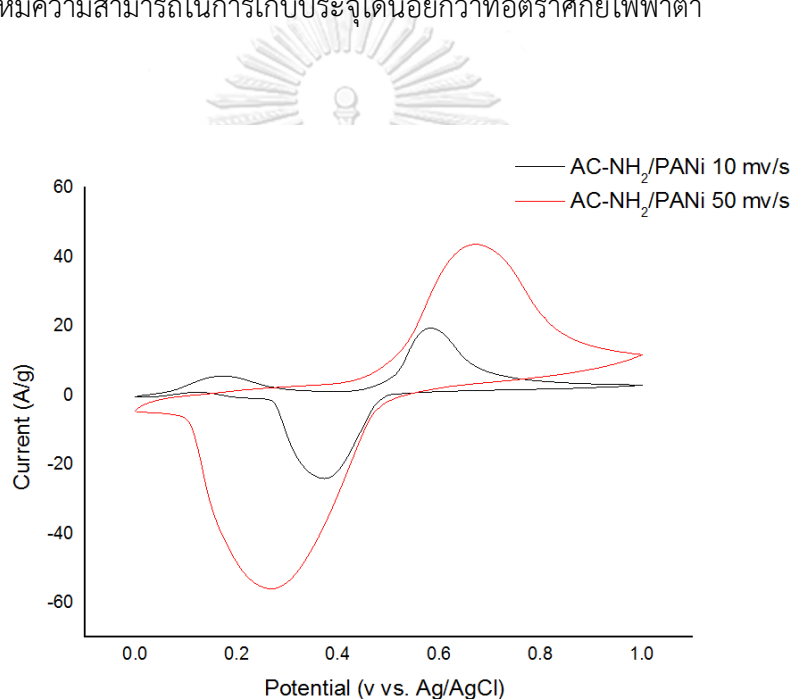
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงแนวโน้มภาพรวมของความสามารถในการเก็บประจุของวัสดุ

รูปที่ 4.17 แสดงค่าความสามารถในการเก็บประจุของ AC/PANi, AC-NO₂/PANi และ AC-NH₂/PANi ที่อัตราส่วน 1:0.3 คือ 317.4 ฟารัด/กรัม, 592.7 ฟารัด/กรัม และ 858.8 ฟารัด/กรัม ตามลำดับ โดยที่ AC-NH₂/PANi ที่อัตราส่วน 1:0.3 จะมีการตอกกิ่งพอลิแอนิไลน์ลงบนผิวของผงถ่านกัมมันต์ อีกทั้งสมบัติที่มีรูพรุนของของผงถ่านกัมมันต์ และพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นจากพอลิแอนิไลน์ จึงทำให้วัสดุที่อัตราส่วนดังกล่าวมีค่าความสามารถในการเก็บประจุที่สูงที่สุด โดยสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.3



รูปที่ 4.17 CV curves ของ AC/PANi 1:0.3, AC-NO₂/PANi 1:0.3 และ AC-NH₂/PANi 1:0.3

เมื่อนำ AC-NH₂/PANi ที่อัตราส่วน 1:0.3 มาทดสอบเทียบประสิทธิภาพการเก็บประจุโดยเพิ่มค่าอัตราศักย์ไฟฟ้าจาก 10 มิลลิโวลต์/วินาที เป็น 50 มิลลิโวลต์/วินาที ดังรูปที่ 4.18 พบว่า AC-NH₂/PANi ที่อัตราศักย์ไฟฟ้า 50 มิลลิโวลต์/วินาที ค่าความสามารถในการเก็บประจุลดลง 32.03 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 585.6 ฟารัด/กรัม ทั้งนี้เป็นเพราะว่าที่อัตราศักย์ไฟฟ้าต่ำจะทำให้การเก็บหรือปล่อยประจุเกิดแบบช้าๆ สามารถทำให้ประจุมีเวลาแพร่เข้าไปด้านในรูพรุนของขั้วไฟฟ้า เพื่อเรียงตัวและสร้างตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบสองชั้น (double layer) จึงทำให้สามารถเก็บประจุได้มากกว่าที่อัตราศักย์ไฟฟ้าสูง เพราะที่อัตราศักย์ไฟฟ้าสูงมีการเก็บหรือปล่อยประจุอย่างรวดเร็ว ทำให้ประจุไม่มีเวลาแพร่เข้าไปด้านในรูพรุนของขั้วไฟฟ้า [19, 20] โดยจะแพร่เข้าไปที่ผิวด้านนอกของขั้วไฟฟ้าเท่านั้น จึงทำให้มีความสามารถในการเก็บประจุได้น้อยกว่าที่อัตราศักย์ไฟฟ้าต่ำ



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบ CV curves ของ AC-NH₂/PANi 1:0.3 ที่ค่าอัตราศักย์ไฟฟ้า 10 mV/s และ 50 mV/s ตามลำดับ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการวัสดุเชิงประกอบของพอลิเอนิลีน/ผงถ่านกัมมันต์ โดยการต่อกิ่งของพอลิเอนิลีนลงบนผิวของผงถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนต่างๆ โดยน้ำหนัก และศึกษา สัณฐานวิทยาและศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ คือ ค่าการนำไฟฟ้าและการเก็บประจุที่เตรียมได้ โดยการเตรียมจะมีขั้นตอนจากการตัดแปรรูปผิวของผงถ่านกัมมันต์ด้วยหมู่ฟังก์ชันเอมีน (ปฏิกิริยาไนเตรชันและปฏิกิริยารีดิวซ์) และตามด้วยขั้นตอนการต่อกิ่งพอลิเอนิลีนลงบนผิวของผง ถ่านกัมมันต์ที่มีหมู่ฟังก์ชันเอมีน ที่อัตราส่วนของผงถ่านกัมมันต์ต่อพอลิเอนิลีนในอัตราส่วนต่างๆ โดย น้ำหนัก (wt ratio) คือ 1:0.1, 1:0.2, 1:0.25, 1:0.3, 1:0.4 และ 1:0.5 ตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบ สมบัติทางไฟฟ้าพบว่าวัสดุเชิงประกอบของพอลิเอนิลีน/ผงถ่านกัมมันต์ ที่อัตราส่วนของผงถ่านกัม มันต์ต่อพอลิเอนิลีนในอัตราส่วน 1:0.3 มีความสามารถในการนำไฟฟ้าและเก็บประจุไฟฟ้าของวัสดุ เชิงประกอบได้ดีที่สุด จึงสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การตัดแปรรูปผิวของผงถ่านกัมมันต์ ด้วยปฏิกิริยาไนเตรชันและปฏิกิริยารีดิวซ์ และต่อกิ่ง พอลิเอนิลีนลงบนผิวของผงถ่านกัมมันต์จะได้ผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 3 แบบ คือ AC/PANI, AC-NO₂/PANI และ AC-NH₂/PANI ซึ่ง AC-NH₂/PANI จะมีสมบัติทางไฟฟ้าได้ดีกว่าแบบ AC/PANI และ AC- NO₂/PANI เพราะว่า AC/PANI เป็นการผสมทางกายภาพระหว่างโมเลกุลพอลิเอนิลีนและผงถ่านกัม มันต์เท่านั้น และ AC-NO₂/PANI โครงสร้างภายในจะมีแรงดึงดูดระหว่างขั้ว (dipole-dipole) ยึด ระหว่างโมเลกุลของพอลิเอนิลีนกับพื้นผิวของผงถ่านกัมมันต์ แต่โครงสร้างของ AC-NH₂/PANI (AC- NH₂-g-PANI) โมเลกุลพอลิเอนิลีนสามารถต่อกิ่งลงบนพื้นผิวของผงถ่านกัมมันต์ที่ตำแหน่งวงแหวน เอมีน (aromatic-NH₂) เพื่อบรรจุสายโซ่ของพอลิเอนิลีนได้จึงทำให้มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี ที่สุด

5.2.1 อัตราส่วนของผงถ่านกัมมันต์ต่อพอลิเอนิลีนมีความสำคัญอย่างมากต่อคุณสมบัติทาง ไฟฟ้า โดยอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสมที่สุดคือ 1:0.3 หรือที่ความเข้มข้นของพอลิเอนิลีนที่สมดุล เพราะจะส่งผลให้พอลิเอนิลีนมีพื้นที่ผิวที่มากที่สุดจากขั้นตอนของปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชัน และจาก คุณสมบัติเฉพาะของผงถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนในโครงสร้างจะส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบมีคุณสมบัติทาง ไฟฟ้าที่ดีที่สุด อัตราส่วนโดยน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์ต่อพอลิเอนิลีนที่ 1:0.3 จะมีค่าความสามารถ ในการเก็บประจุสูงถึง 858.8 ฟารัด/กรัม และมีค่าการนำไฟฟ้าสูงถึง 0.22 ซีเมน/เซนติเมตร ซึ่งเดิม

ผงถ่านกัมมันต์มีค่าความสามารถในการเก็บประจุและค่าการนำไฟฟ้า 50.22 ฟารัด/กรัม และ 2×10^{-3} ซีเมน/เซนติเมตรตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในขั้นตอนปฏิกิริยาไนเตรชันกับผงถ่านกัมมันต์ ไม่ควรสังเคราะห์สารในปริมาณที่มากเกินไป เพราะเป็นปฏิกิริยาที่รุนแรงและอาจจะไม่สามารถควบคุมได้ และควรทำการทดลองนี้ในตู้ดูดควันที่มีระบบการไหลเวียนของอากาศอย่างดี

2. ในขั้นตอนการวัดค่าการนำไฟฟ้าหรือค่าความต้านทานของวัสดุ ควรให้อบชิ้นงานหรือบรรจุในซิลิกาเจลก่อนทำการทดสอบ เพื่อกำจัดความชื้นที่สะสมในชิ้นงาน เพื่อให้ผลการทดสอบมีประสิทธิภาพสูงสุดและไม่เกิดความคลาดเคลื่อน

3. ในการวัดค่าความสามารถในการเก็บประจุโดยใช้นิกเกิลโพลีเมอร์เคลือบด้วยวัสดุตัวนำเป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode, WE) ไม่ควรเก็บนิกเกิลโพลีเมอร์ในสถานะที่มีกรดมากเกินไป เพราะไฮดรอกไซด์จากสารละลายกรดจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของนิกเกิลโพลีเมอร์ในการวัดค่าความสามารถในการเก็บประจุลดลงได้

รายการอ้างอิง

- [1] ชัยรัมย์, เ. พอลิแอนิลีนและอนุพันธ์นำไฟฟ้า: การสังเคราะห์ และการประยุกต์ใช้งาน. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 14 (2555).
- [2] พรพัฒน์กุล, ย. พอลิเมอร์นำไฟฟ้าพอลิแอนิลีนที่สังเคราะห์ได้ด้วยวิธีดิสเพอร์ชันพอลิเมอร์ไรเซชัน. ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2554).
- [3] บุญคง, ท. การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของพอลิโธโอฟินเพื่อประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบก๊าซ. ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูงภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2555): 5-18.
- [4] วุฒิกนกกาญจน์, จ. การสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยใช้ปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี. คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (2554).
- [5] Karthika, J.S., Vishalakshi, B., and Naik, J. Gellan gum-graft-polyaniline—An electrical conducting biopolymer. International Journal of Biological Macromolecules 82 (2016): 61-67.
- [6] Park, C.H., Jang, S.K., and Kim, F.S. Conductivity enhancement of surface-polymerized polyaniline films via control of processing conditions. Applied Surface Science 429 (2018): 121-127.
- [7] Srisuwan, S., Thongyai, S., Sotzing, G.A., and Praserttham, P. Preparation and characterization of conductive polyimide-graft-polyaniline. Microelectronic Engineering 104 (2013): 22-28.
- [8] Bannov, A.G., Manakhov, A., Shibaev, A.A., Ukhina, A.V., Polčák, J., and Maksimovskii, E.A. Synthesis dynamics of graphite oxide. Thermochimica Acta 663 (2018): 165-175.
- [9] Liu, Z.-Q., et al. Catalytic ozonation of diethyl phthalate in aqueous solution using graphite supported zinc oxide. Separation and Purification Technology 200 (2018): 51-58.
- [10] อยู่มี, พ. การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงจากผงถ่านไม้โดยการก่อกัมมันต์ทางเคมีแบบแห้ง. สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก (2558).

- [11] Pandolfo, A.G. and Hollenkamp, A.F. Carbon properties and their role in supercapacitors. Journal of Power Sources 157(1) (2006): 11-27.
- [12] LÜ, G., et al. The Adsorption of Phenol by Lignite Activated Carbon. Chinese Journal of Chemical Engineering 19(3) (2011): 380-385.
- [13] Ma, Y., Gao, N.-Y., Chu, W., and Li, C. Removal of phenol by powdered activated carbon adsorption. Vol. 7, 2013.
- [14] Qadeer, R. and Rehan, A.H. A Study of the Adsorption of Phenol by Activated Carbon from Aqueous Solutions. Vol. 26, 2002.
- [15] กาญจนวรรณชี, บ.ช. สารระนำรู้ : ถ่านปลุกฤทธิ. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ.
- [16] Satayeva, A.R., et al. Investigation of rice husk derived activated carbon for removal of nitrate contamination from water. Science of The Total Environment 630 (2018): 1237-1245.
- [17] Wang, Q., Li, J.-l., Gao, F., Li, W.-s., Wu, K.-z., and Wang, X.-d. Activated carbon coated with polyaniline as an electrode material in supercapacitors. New Carbon Materials 23(3) (2008): 275-280.
- [18] Fic, K., Platek, A., Piwek, J., and Frackowiak, E. Sustainable materials for electrochemical capacitors. Materials Today 21(4) (2018): 437-454.
- [19] สว่างพุกษ์, ม. นานโนเทคโนโลยีนวัตกรรมของตัวเก็บพลังงาน: ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด. ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านปิโตรเลียม ปิโตรเคมี และวัสดุขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 26(85) (2556): 9-26.
- [20] กอปรสิริพัฒน์, ด.ว. ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitors): อุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่กำลังมาแรง. อินไซด์ไฟฟ้า 21(2) (2014): 75-78.
- [21] Zhang, H., et al. Wrinkled porous carbon nanosheets from methylnaphthalene oil for high-performance supercapacitors. Fuel Processing Technology 175 (2018): 10-16.
- [22] Sayah, A., et al. Electrochemical synthesis of polyaniline-exfoliated graphene composite films and their capacitance properties. Journal of Electroanalytical Chemistry 818 (2018): 26-34.
- [23] Su, C.-I., Wang, C.-M., Lu, K.-W., and Shih, W.-C. Evaluation of activated carbon fiber applied in supercapacitor electrodes. Fibers and Polymers 15(8) (2014): 1708-1714.

- [24] Wang, G., et al. The electrocapacitive properties of polyaniline/VXC-72 composite electrodes. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 540 (2018): 98-105.
- [25] Wang, H., Lin, J., and Shen, Z.X. Polyaniline (PANI) based electrode materials for energy storage and conversion. Journal of Science: Advanced Materials and Devices 1(3) (2016): 225-255.
- [26] Stejskal, J. and Gilbert, R.G. Polyaniline. Preparation of a conducting polymer(IUPAC Technical Report). Vol. 74, 2002.
- [27] Wang, G., Yan, C., and Zhang, W. Prickly polyaniline nano/microstructures as the efficient counter electrode materials for dye-sensitized solar cells. Journal of Nanoparticle Research 19(12) (2017): 395.
- [28] Abe, M., Kawashima, K., Kozawa, K., Sakai, H., and Kaneko, K. Amination of Activated Carbon and Adsorption Characteristics of Its Aminated Surface. Langmuir 16(11) (2000): 5059-5063.
- [29] Mazarji, M., Aminzadeh, B., Baghdadi, M., and Bhatnagar, A. Removal of nitrate from aqueous solution using modified granular activated carbon. Journal of Molecular Liquids 233 (2017): 139-148.
- [30] Barroso-Bogeat, A., Alexandre-Franco, M., Fernández-González, C., Macías-García, A., and Gómez-Serrano, V. Temperature dependence of the electrical conductivity of activated carbons prepared from vine shoots by physical and chemical activation methods. Vol. 209, 2015.
- [31] Huang, Y. 7 - Electrical and thermal properties of activated carbon fibers A2 - Chen, Jonathan Y. in Activated Carbon Fiber and Textiles, pp. 181-192. Oxford: Woodhead Publishing, 2017.
- [32] Iannicelli-Zubiani, E.M., Gallo Stampino, P., Cristiani, C., and Dotelli, G. Enhanced lanthanum adsorption by amine modified activated carbon. Chemical Engineering Journal 341 (2018): 75-82.
- [33] Bai, L., et al. Nanoporous carbons prepared with ZIF-8 as a template and activation agent for supercapacitors. Materials Letters 223 (2018): 150-153.

- [34] Zhang, G., Chen, Y., Chen, Y., and Guo, H. Activated biomass carbon made from bamboo as electrode material for supercapacitors. Materials Research Bulletin 102 (2018): 391-398.
- [35] Wenhui, H. and Lu, L. Revisiting the Structure of Graphene Oxide for Preparing New-Style Graphene-Based Ultraviolet Absorbers. Vol. 22, 2012.
- [36] สุขศรีเมือง, ด.ธ. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยวิธีไซคลิกโวลแทมเมตรี ศูนย์เทคโนโลยีและวัสดุแห่งชาติ (2548): 76-79.

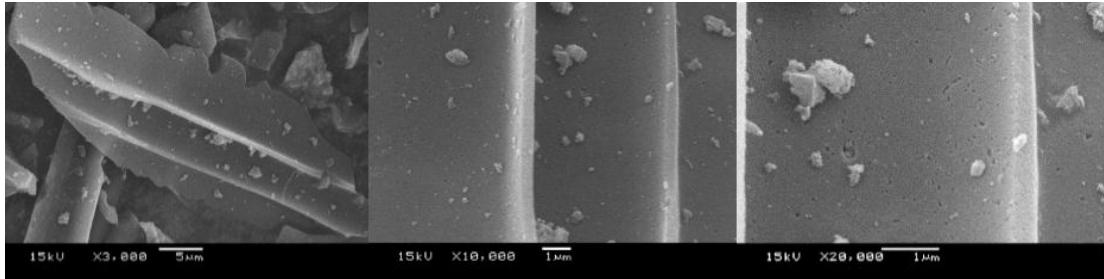




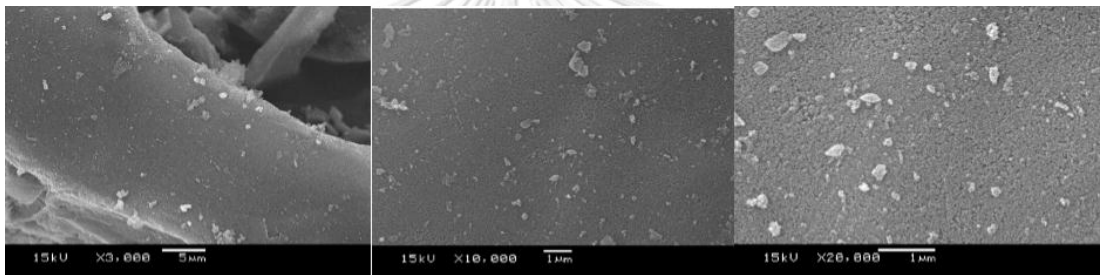
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

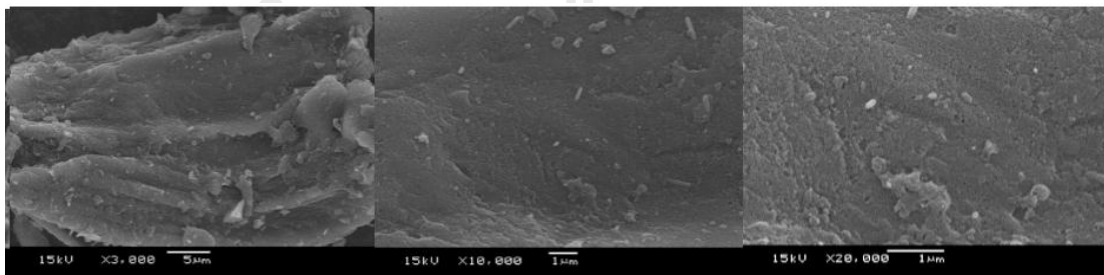
รูปที่ 1 แสดงสัณฐานวิทยาของ ผงถ่านกัมมันต์ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



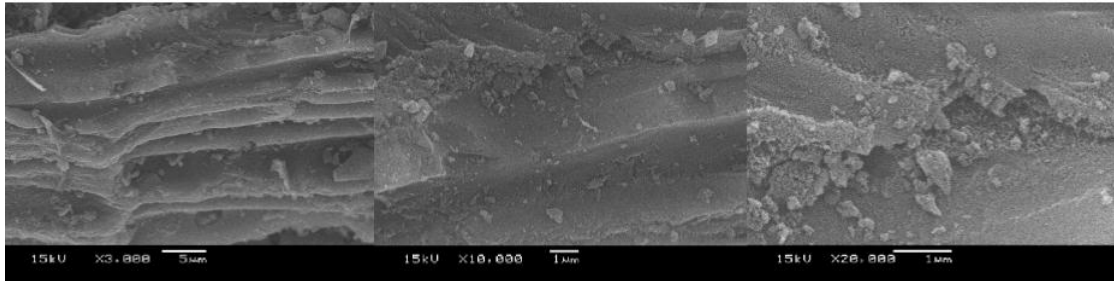
รูปที่ 2 แสดงสัณฐานวิทยาของ nitro activated carbon (AC-NO₂) ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



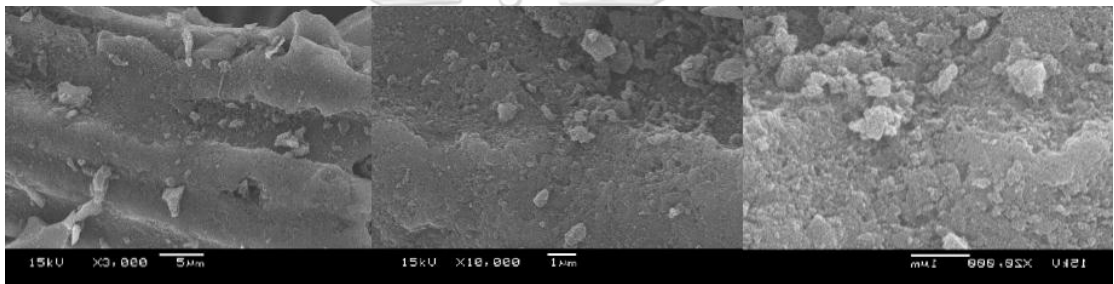
รูปที่ 3 แสดงสัณฐานวิทยาของ amino activated carbon (AC-NH₂) ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



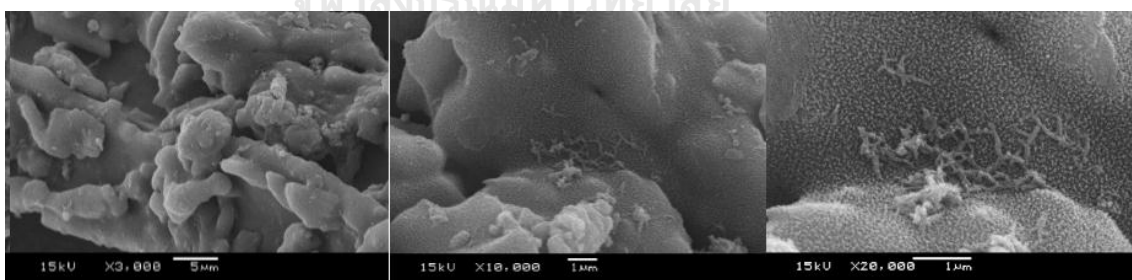
รูปที่ 4 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC/PANi 1:0.1 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



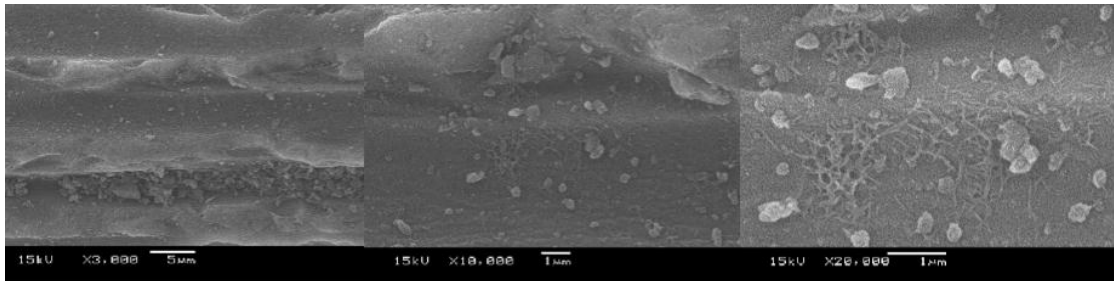
รูปที่ 5 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC/PANi 1:0.2 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



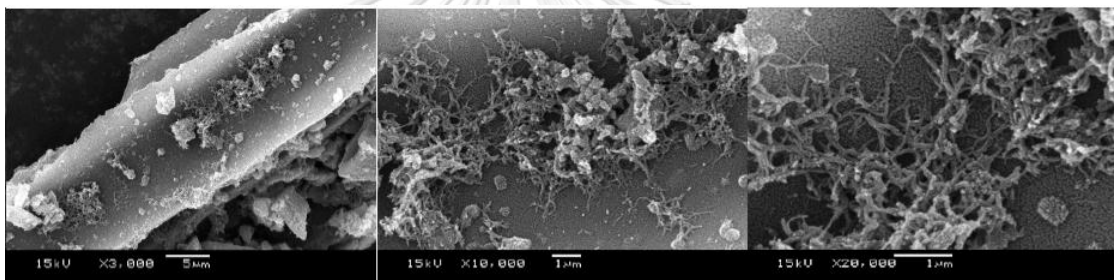
รูปที่ 6 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC/PANi 1:0.25 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



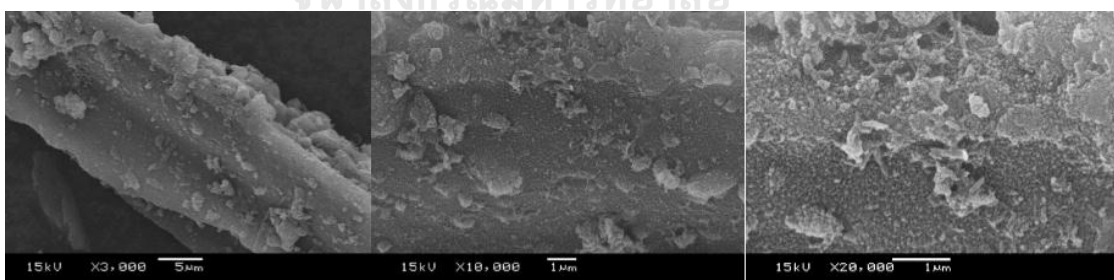
รูปที่ 7 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC/PANi 1:0.3 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



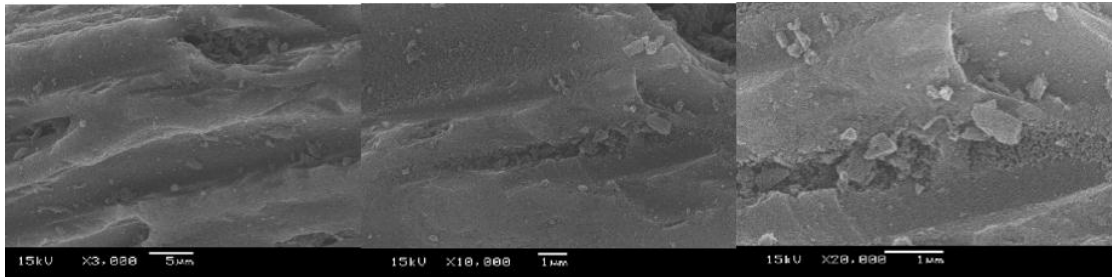
รูปที่ 8 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC/PANi 1:0.4 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



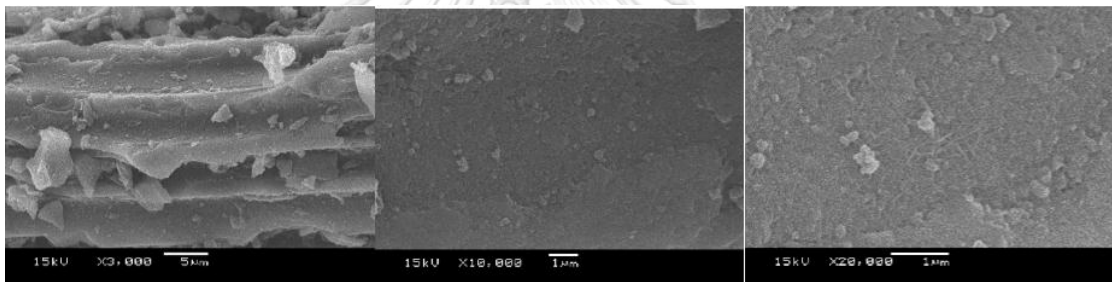
รูปที่ 9 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC/PANi 1:0.5 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



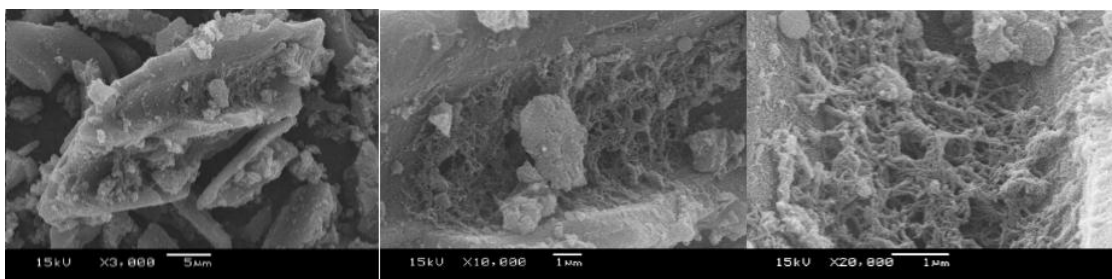
รูปที่ 10 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC-NO₂/PANi 1:0.1 ที่กำลังขยาย 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



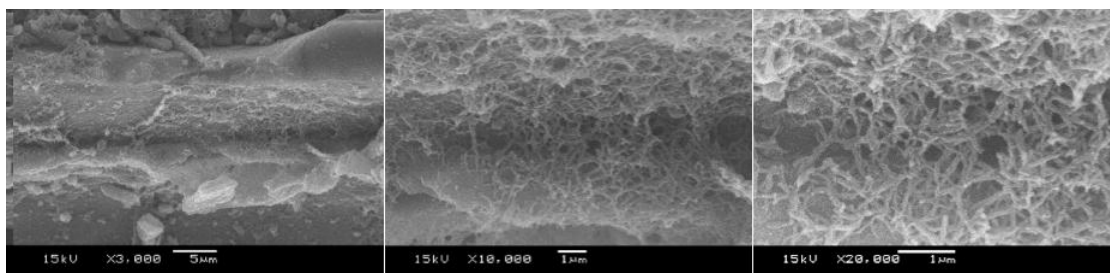
รูปที่ 11 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC-NO₂/PANi 1:0.2 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



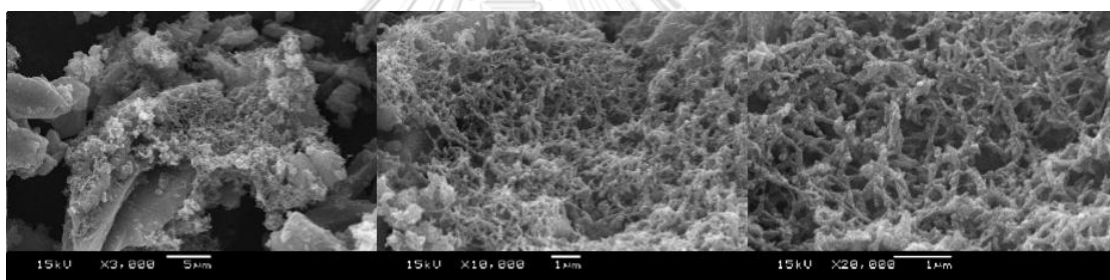
รูปที่ 12 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC-NO₂/PANi 1:0.25 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



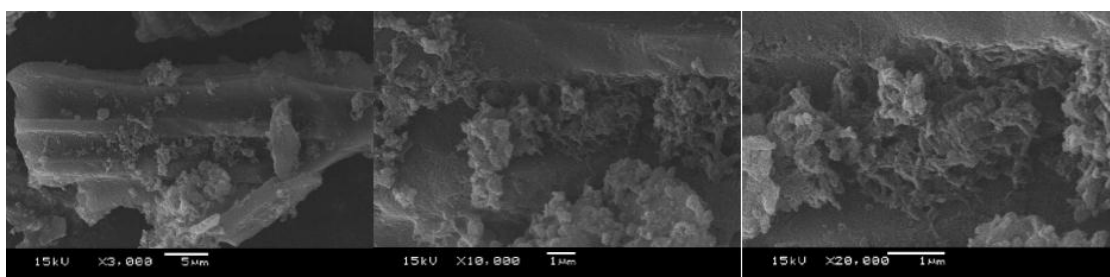
รูปที่ 13 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC-NO₂/PANi 1:0.3 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



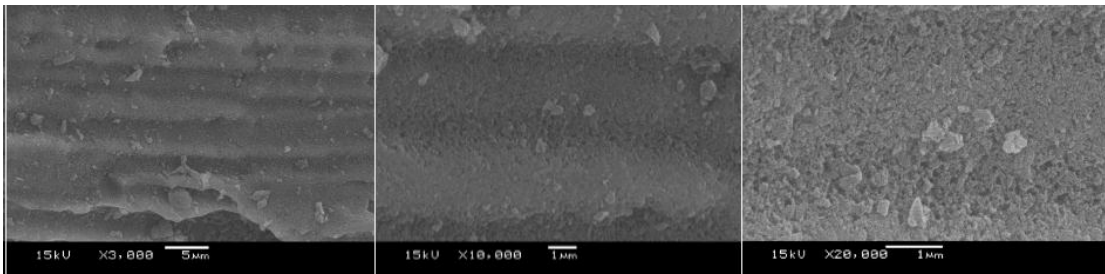
รูปที่ 14 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC-NO₂/PANi 1:0.4 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



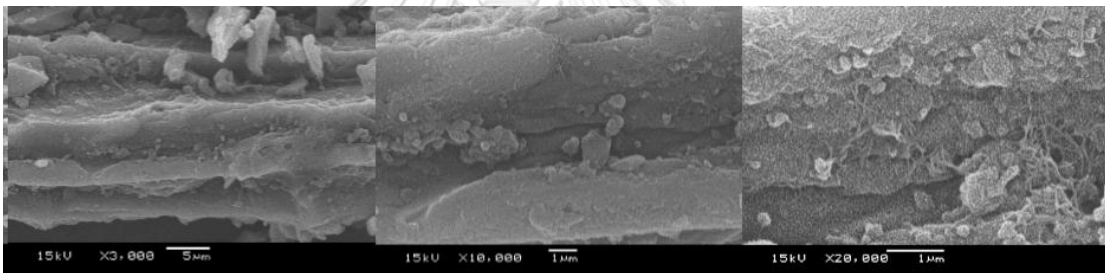
รูปที่ 15 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC-NO₂/PANi 1:0.5 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



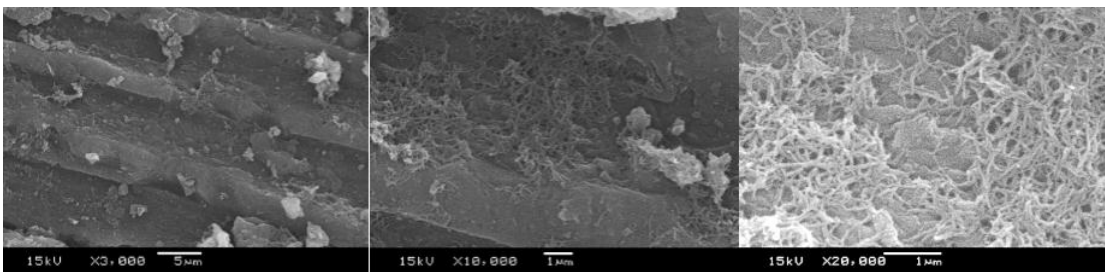
รูปที่ 16 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC-NH₂/PANi 1:0.1 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



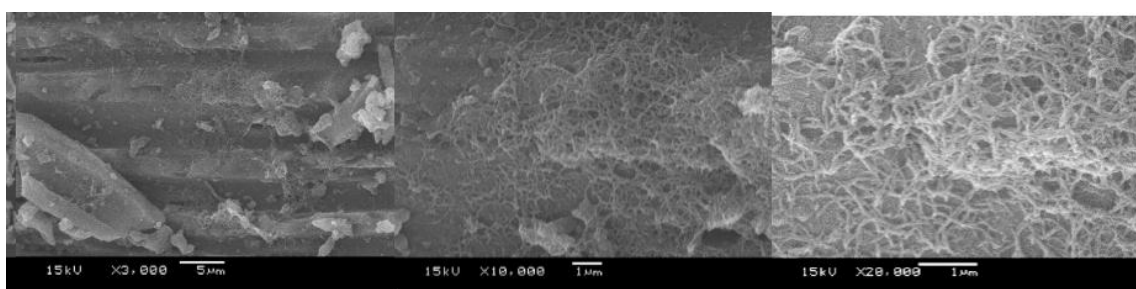
รูปที่ 17 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC-NH₂/PANi 1:0.2 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



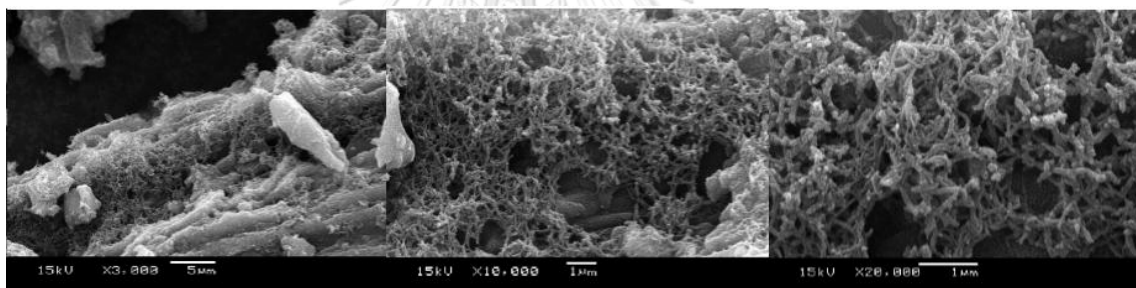
รูปที่ 18 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC-NH₂/PANi 1:0.25 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



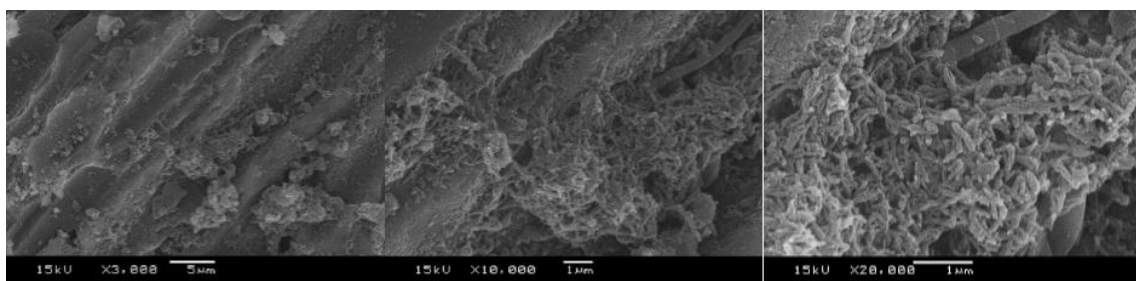
รูปที่ 19 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC-NH₂/PANi 1:0.3 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



รูปที่ 20 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC-NH₂/PANi 1:0.4 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



รูปที่ 21 แสดงสัณฐานวิทยาของ AC-NH₂/PANi 1:0.5 ที่กำลังขยาย 3,000 10,000 และ 20,000 ตามลำดับ



ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของผงถ่านกัมมันต์

Sample Name	Left Angle 2-Theta °	Right Angle 2-Theta °	Left Int. Cps	Right Int. Cps	Obs. Max 2-Theta °	d (Obs. Max) Angstrom	Max Int. Cps	Net Height Cps	FWHM 2-Theta °	Chord Mid. 2-Theta °	l. Breadth 2-Theta °	Gravity C. 2-Theta °	d (Gravity C.) Angstrom	Raw Area Cps x 2-Theta °	Net Area Cps x 2-Theta °
AC	10.66	36.92	0.49	0.28	23.74	3.74492	113	113	10.395	23.838	10.969	23.748	3.74375	1236.9	1234.2
AC	20.38	25.24	92	126	23.058	3.85409	163	52	2.473	22.963	2.307	22.924	3.87633	650	119.9
AC	25.2	27.72	120	83.5	26.667	3.34013	171	71.9	0.333	26.617	0.724	26.431	3.36946	307.9	52.06
AC	28.48	30.14	64.4	46.1	29.48	3.02751	115	61.6	0.467	29.427	0.58	29.346	3.04102	127.4	35.71
AC	38.02	50.66	1.26	8.84	42.882	2.1073	64.5	60.3	3.853	43.639	4.935	44.179	2.04837	361.6	297.8
														Total area	1739.67
														Amor%	70.9444895
														Cyst%	29.0555105

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของพอลิแอนิลีน

Sample	Left Angle 2-Theta °	Right Angle 2-Theta °	Left Int. Cps	Right Int. Cps	Obs. Max d 2-Theta °	Max d (Obs. Max) Angstrom	Max Int. Cps	Net Height Cps	FWHM 2-Theta °	Chord Mid. 2-Theta °	l. Breadth 2-Theta °	Gravity C. 2-Theta °	d (Gravity C.) Angstrom	Raw Area Cps x 2-Theta °	Net Area Cps x 2-Theta °
PANI	10.48	42.68	1.09	-0.02	24.04	3.69886	64.7	64	13.839	25.417	14.439	25.137	3.53986	941.8	924.5
PANI	12.44	17.46	8.59	27.1	15.601	5.67561	49.6	29.4	3.28	15.2	2.88	15.09	5.86631	174	84.65
PANI	18.42	21.78	39.8	62.5	19.685	4.50624	73.9	25.5	1.186	19.873	1.386	20.157	4.40178	207.2	35.37
PANI	23.94	31.42	68	42.1	25.7	3.46359	189	127	2.992	26.244	3.25	26.796	3.32432	824.9	413
PANI	36.72	38.68	15.8	8.8	38.132	2.35812	24.1	13.3	n.a.	n.a.	0.79	37.649	2.38724	34.62	10.54
														Total area	1468.06
														Amor%	62.9742654
														Cyst%	37.0257346

ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของ AC/PANI

Sample Name	Left Angle 2-Theta °	Right Angle 2-Theta °	Left Int. Cps	Right Int. Cps	Obs. Max 2-Theta °	d (Obs. Max) Angstrom	Max Int. Cps	Net Height Cps	FWHM 2-Theta °	Chord Mid. 2-Theta °	I. Breadth 2-Theta °	Gravity C. 2-Theta °	d (Gravity C.) Angstrom	Raw Area Cps x 2-Theta °	Net Area Cps x 2-Theta °
AC/PANI 1:025	10.5	37.84	0.6	0	23.607	3.76566	104	104	13.498	23.683	13.578	23.73	3.74643	1420.2	1412.1
AC/PANI 1:025	20.62	24.4	98.7	117	22.923	3.87656	145	34.9	n.a.	n.a.	1.966	22.738	3.90762	475.7	68.63
AC/PANI 1:025	24.6	28	119	85.4	26.52	3.35833	138	38.2	2.807	26.218	2.464	26.155	3.40431	441.4	94.15
AC/PANI 1:025	37.76	48.5	9.87	7.55	44.815	2.02075	46.5	38.1	3.562	44.032	4.747	43.449	2.08107	274.3	180.9
														Total area	1755.78
														Amor%	80.4257937
														Cyst%	19.5742063

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของ AC-NO₂/PANI 1:0.25

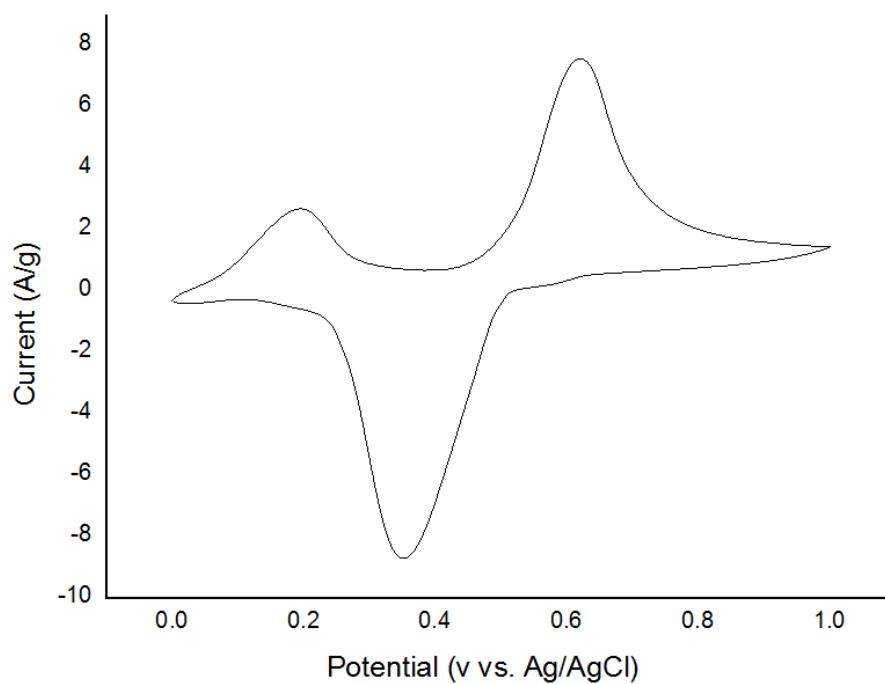
Sample Name	Left Angle 2-Theta °	Right Angle 2-Theta °	Left Int. Cps	Right Int. Cps	Obs. Max 2-Theta °	d (Obs. Max) Angstrom	Max Int. Cps	Net Height Cps	FWHM 2-Theta °	Chord Mid. 2-Theta °	I. Breadth 2-Theta °	Gravity C. 2-Theta °	d (Gravity C.) Angstrom	Raw Area Cps x 2-Theta °	Net Area Cps x 2-Theta °
AC-NO ₂ /PANI 1:0.25	10.5	38.98	3.01	-0.17	23.22	3.8276	143	142	14.222	22.727	14.176	22.912	3.87837	2047.5	2007.1
AC-NO ₂ /PANI 1:0.25	18.64	27.72	129	155	25.132	3.54052	269	121	4.624	24.198	4.501	23.78	3.73878	1837.4	546.7
AC-NO ₂ /PANI 1:0.25	39.26	49.8	10.2	11.2	44.379	2.03962	55.2	44.6	3.178	44.014	3.892	44.273	2.04423	285.9	173.5
														Total area	2727.3
														Amor%	73.5929307
														Cyst%	26.4070693

ตารางที่ 5 แสดงข้อมูลแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของ AC-NH₂/PANI 1:0.25

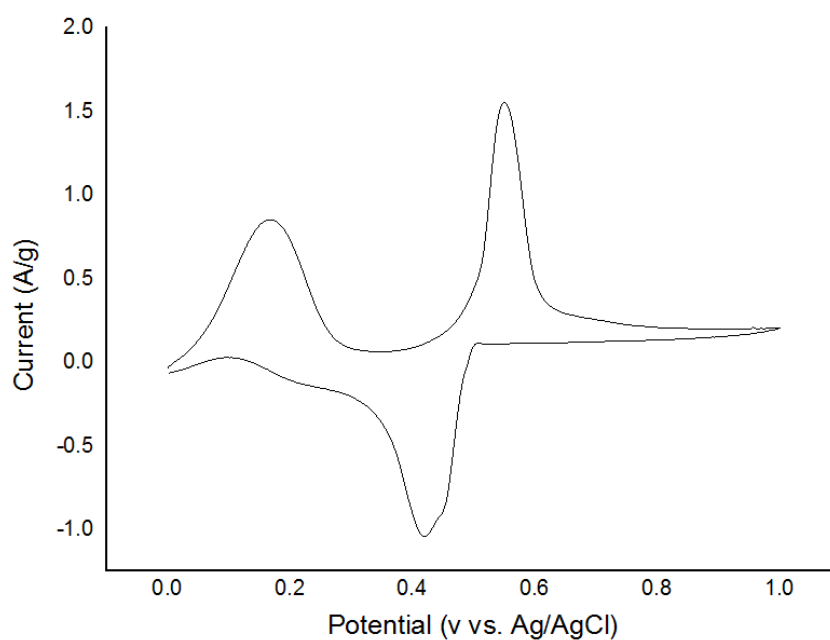
Sample Name	Left Angle	Right Angle	Left Int.	Right Int.	Obs. Max	d (Obs. Max)	Max Int.	Net Height	FWHM	Chord Mid.	I. Breadth	Gravity C.	d (Gravity C.)	Raw Area	Net Area
	2-Theta °	2-Theta °	Cps	Cps	2-Theta °	Angstrom	Cps	Cps	2-Theta °	2-Theta °	2-Theta °	2-Theta °	Angstrom	Cps x 2-Theta °	Cps x 2-Theta °
AC-NH ₂ /PANI 1:0.25	10.34	38.04	0.96	0.01	24.52	3.62753	119	118	13.607	23.254	13.559	23.159	3.83747	1614.5	1601.3
AC-NH ₂ /PANI 1:0.25	17.74	27.72	85.5	142	25.38	3.50653	256	127	5.807	23.987	5.383	23.427	3.79428	1821.2	685.4
AC-NH ₂ /PANI 1:0.25	39.18	49.08	5.72	10.4	43.473	2.07999	42.8	35.1	3.864	43.764	3.924	43.794	2.06546	217.6	137.6
														Total area	2424.3
														Amor%	66.0520563
														Cyst%	33.9479437

ตารางที่ 6 แสดงข้อมูลแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างของ AC-NH₂/PANI 1:0.5

Sample Name	Left Angle 2-Theta °	Right Angle 2-Theta °	Left Int. Cps	Right Int. Cps	Obs. Max 2-Theta °	d (Obs. Max) Angstrom	Max Int. Cps	Net Height Cps	FWHM 2-Theta °	Chord Mid. 2-Theta °	I. Breadth 2-Theta °	Gravity C. 2-Theta °	d (Gravity C.) Angstrom	Raw Area Cps x 2-Theta °	Net Area Cps x 2-Theta °
AC-NH ₂ /PANI 1:0.5	10.34	36.5	3.33	1.21	24.32	3.65691	134	132	11.988	23.674	12.167	23.611	3.76516	1667.3	1608
AC-NH ₂ /PANI 1:0.5	19	27.24	95.2	157	23.768	3.74064	235	105	4.773	23.561	4.437	23.533	3.77735	1500.8	463.7
AC-NH ₂ /PANI 1:0.5	39.66	49.08	4.71	6.29	42.68	2.11678	46.8	41.6	3.796	43.49	4.88	44.198	2.04755	254.7	202.9
														Total area	2274.6
														Amor%	70.6937484
														Cyst%	29.3062516



รูปที่ 22 CV curves ของพอลิแอนิไลน์บริสุทธิ์ มีความสามารถในการเก็บประจุ 395 ฟารัด/กรัม



รูปที่ 23 CV curves ของพวง่านกัมมันต์ มีความสามารถในการเก็บประจุ 50.22 ฟารัด/กรัม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสิริัญญา โสตถิอุดม เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤศจิกายน พ.ศ. 2536 สำเร็จการศึกษา
ระดับปริญญาตรี จากหลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งทอ
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2558 หลังจากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ประยุกต์และเทคโนโลยีสิ่งทอ ภาควิชา
วัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2559 และสำเร็จ
การศึกษาในภาคปลายปีการศึกษา 2560

การเสนอผลงานวิจัย จากงานวิทยานิพนธ์ มีดังนี้

S. Sirinya and S. Kawee. Preparation and Electrical Properties of
Activated Carbon Grafted with Polyaniline Nanofiber. The Third International
Conference on Applied Engineering, Materials and Mechanics (ICAEMM), Okinawa
Japan, 20-22 April, 2018.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY