

การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่คอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สำหรับ
อุปกรณ์ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ACTIVATED CARBON SYNTHESIZED FROM BAMBOO COMPOSITE
REDUCED GRAPHENE OXIDE FOR SUPERCAPACITOR DEVICE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2568

KMITL-2025-SC-M-030-037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACTIVATED CARBON SYNTHESIZED FROM BAMBOO COMPOSITE
REDUCED GRAPHENE OXIDE FOR SUPERCAPACITOR DEVICE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2025
KMITL-2025-SC-M-030-037

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2025

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABAN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่คอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ สำหรับอุปกรณ์ตัวเก็บประจุยิ่งยวด
ชื่อนักศึกษา	นางสาวกิติมา ศรีไชยปภา
รหัสประจำตัว	65056009
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2568
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ศาสตราจารย์ ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์

บทคัดย่อ

ถ่านกัมมันต์จากไม้ (AC-BBC) ได้รับการปรับปรุงสมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยการผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) ที่สัดส่วน 1, 3, 5 และ 7% โดยน้ำหนัก (wt%) ตัวอย่าง AC-BBC ถูกเตรียมการโดยการเผาถ่านกัมมันต์จากไม้ (BBC) ร่วมกับ (KOH) ภายในกระแสอาร์กอนที่อุณหภูมิ 900 °C จากนั้นถูกบดและผสมด้วยเทคนิคการบดเชิงกลสามมิติ (3-D ball milling) ที่ความเร็วสูง ตัวอย่าง rGOx%/3D-AC-BBC (x = 1, 3, 5 และ 7 wt%) ซึ่งหมายถึงคอมโพสิตของ AC-BBC ที่มี rGO x% และถูกบดโดย 3-D ball milling ได้รับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค (XRD), (FT-IR) และรามานสเปกโทรสโกปี (Raman) การวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) และพื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA) พบว่าตัวอย่าง rGO5%/3D-AC-BBC มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงสุดที่ 2239.80 m²/g และมีส่วนของพื้นที่รูพรุนเฉลี่ย 2.22 nm อิเล็กโทรดแบบครึ่งเซลล์มีค่าความจุจำเพาะสูงสุดที่ 301.80 F/g ที่กระแส 0.5 A/g อุปกรณ์ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบสมมาตร (symmetric supercapacitor coil cell) ให้ค่าความจุ 85.93 F/g ความหนาแน่นพลังงาน 11.93 Wh/kg และความหนาแน่นกำลัง 49.56 W/kg โดยมีค่าการคงประสิทธิภาพลดลงเหลือ 96.76% หลังจากผ่านการชาร์จ-คายประจุ 10,000 รอบ งานวิจัยนี้นำเสนอวัสดุ rGO5%/3D-AC-BBC ที่มีสมรรถนะสูง ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นอิเล็กโทรดที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงสมบัติทางเคมีไฟฟ้าทำให้เหมาะสมสำหรับการใช้งานในตัวเก็บประจุสองชั้นไฟฟ้า (EDLC)

คำสำคัญ : คอมโพสิตถ่านกัมมันต์-รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ ถ่านกัมมันต์จากไม้ นาโนคอมโพสิต รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) สมบัติทางเคมีไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Activated Carbon Synthesized from Bamboo Composite Reduced Graphene Oxide for Supercapacitor Device
Student Name	Kitima Srichaiprapha
Student ID	65056009
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2025
Thesis Advisor	Prof. Dr.Chesta Ruttanapun

Abstract

Reduced graphene oxide (rGO) was incorporated into bamboo-derived activated carbon (AC-BBC) at varying weight percentages (1, 3, 5, and 7 wt%) to enhance its electrochemical performance. The AC-BBC material was obtained by annealing bamboo carbon (BBC) powder with potassium hydroxide (KOH) under an argon atmosphere at 900 °C, followed by high-speed three-dimensional (3-D) ball milling to achieve uniform mixing. The resulting composites, denoted as rGOx%/3D-AC-BBC (x = 1, 3, 5, 7 wt%), were systematically characterized using X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and Raman spectroscopy. Scanning electron microscopy (SEM) and Brunauer–Emmett–Teller (BET) analysis revealed that the sample with 5 wt% rGO (rGO5%/3D-AC-BBC) exhibited the highest specific surface area of 2239.80 m²/g and an average pore size of 2.22 nm. Electrochemical evaluations of half-cell configurations showed that this sample achieved the highest specific capacitance of 301.80 F/g at a current density of 0.5 A/g. Furthermore, a symmetric supercapacitor assembled using this material demonstrated a specific capacitance of 85.93 F/g, an energy density of 11.93 Wh/kg, and a power density of 49.56 W/kg. After 10,000 charge–discharge cycles, the device retained 96.76% of its initial capacitance. These results highlight rGO5%/3D-AC-BBC as a promising electrode material for electric double-layer capacitors (EDLCs), offering excellent electrochemical characteristics and cycling stability.

Keywords: Activated bamboo carbon, Bamboo carbon-reduced graphene oxide composite, Electrochemical properties, Nano-composite, Reduced graphene oxide (rGO)

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความร่วมมือและการสนับสนุนอย่างดียิ่งจากหลายภาคส่วน ข้าพเจ้าขอแสดงความขอบคุณอย่างจริงใจต่อทุกท่านที่มีบทบาทสำคัญในการให้คำปรึกษา ส่งเสริมทรัพยากร ตลอดจนเป็นกำลังใจในระหว่างการทำเนิงานวิจัยครั้งนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. เพรชฐา รัตนพันธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักจากภาควิชาเคมี ที่ได้มอบแนวทางทางวิชาการ ข้อเสนอแนะอันมีคุณค่า รวมถึงสนับสนุนด้านเครื่องมือและทรัพยากรในการดำเนินการทดลอง พร้อมทั้งปลูกฝังจริยธรรมและกระบวนทัศน์ทางวิทยาศาสตร์ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมัคร์ พิमानแพง จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ซึ่งดำรงตำแหน่งประธานกรรมการสอบ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เมตยา กิติวรรณ จากสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้เกียรติร่วมเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งให้คำแนะนำอันมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการพัฒนาเนื้อหาและคุณภาพของงานวิจัย

ขอแสดงความขอบคุณ ดร. ชัตติยะ สระแก้ว นักวิจัยหลังปริญญาเอก และนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านวิจัยและนวัตกรรมวัสดุอัจฉริยะ สำหรับคำปรึกษาเชิงวิชาการ การสนับสนุนในการเตรียมบทความวิจัยเพื่อการตีพิมพ์ ตลอดจนการช่วยเหลือในขั้นตอนต่าง ๆ ของการวิจัย

ขอขอบคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่จากสาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ข้อมูลและการให้ข้อเสนอแนะตลอดระยะเวลาการศึกษาวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่าน ที่ได้มอบความรู้ ความเมตตา และแรงสนับสนุนในทุกด้าน รวมถึง คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่เป็นกำลังใจสำคัญ ทั้งในด้านทุนทรัพย์และจิตใจ ตลอดการดำเนินงานวิจัยและการเรียนในระดับบัณฑิตศึกษาความสำเร็จในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขออุทิศเป็นสิ่งแทนคุณและเครื่องหมายแสดงความกตัญญูต่อทุกท่านที่มีส่วนเกี่ยวข้องมา ณ ที่นี้

ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจในสาขาที่เกี่ยวข้อง และสามารถนำไปต่อยอดองค์ความรู้ในแวดวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีต่อไปในอนาคต

นางสาวกิติมา ศรีไชยปภา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	4
2.1.1 Electrical Double-Layer Capacitors (EDLCs).....	4
2.1.2 Pseudocapacitors.....	4
2.1.3 Hybrid Supercapacitors.....	5
2.2 ชีวมวล.....	5
2.3 ไม้.....	5
2.3.1 ไม้ในประเทศไทย.....	5
2.3.2 องค์ประกอบของป่าไม้.....	6
2.3.3 ลักษณะของไม้.....	6
2.3.4 การจำแนกพันธุ์ไม้.....	6
2.3.5 ประโยชน์ของไม้.....	7
2.3.6 อุตสาหกรรมไม้.....	7
2.3.7 การขยายพันธุ์ไม้.....	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.8	ขั้นตอนในการปักชำกิ่งแขนง.....	8
2.4	กราฟีน	8
2.4.1	การศึกษากราฟีนครั้งแรก.....	9
2.4.2	กราฟีนเป็นวัสดุสองมิติ.....	9
2.4.3	การสังเคราะห์กราฟีน	10
2.4.4	โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของกราฟีน.....	11
2.5	การคาร์บอนเซชัน (Carbonization).....	12
2.6	ถ่านกัมมันต์.....	13
2.6.1	วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์.....	13
2.6.2	ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	13
2.6.3	กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	13
2.6.4	ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	15
2.6.5	โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์.....	16
2.6.6	ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์.....	16
2.7	การดูดซับ.....	17
2.7.1	กลไกการดูดซับ.....	17
2.7.2	ไอโซเทอมการดูดซับ.....	18
2.8	การอัดประจุและการคายประจุ (Charge-Discharge).....	18
2.8.1	การเก็บประจุ.....	18
2.8.2	การคายประจุ.....	19
2.9	สมบัติเคมีเชิงไฟฟ้า.....	19
2.9.1	เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry : CV).....	19
2.9.2	เทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ (Galvanostatic charge/ discharge : GCD).....	21
2.9.3	เทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปี (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS).....	22
2.10	เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์.....	22
2.10.1	เครื่องวิเคราะห์ของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer).....	22
2.10.2	รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy).....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)	23
2.10.4 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy).....	24
2.10.5 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง (Surface area and porosity analyzer).....	25
2.10.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรไมโครสโคป (FTIR Micro-Spectrometer)	26
2.10.7 เครื่องวัดทางเคมีไฟฟ้า.....	26
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	31
3.1 เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์.....	31
3.1.3 สารเคมี.....	32
3.2 วิธีการทดลอง.....	32
3.2.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO).....	32
3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมถ่านเพื่อให้ได้ถ่านไม่เฝือกจากธรรมชาติ.....	33
3.2.3 ขั้นตอนการทำถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ (Bamboo activated carbon).....	34
3.2.4 การลดขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์โดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (3D ball milling).....	35
3.2.5 การเตรียมคอมโพสิตถ่านกัมมันต์ไม่เฝือกโดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (3D ball milling) กับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO/3D-AC-BBC).....	35
3.2.6 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	36
3.2.7 เตรียมตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	37
3.3 เทคนิคการวัดสมบัติทางเคมีไฟฟ้า.....	38
3.3.1 เทคนิคการวัดสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Workstation).....	38
3.3.2 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry : CV).....	39
3.3.3 เทคนิคการอัดและการคายประจุไฟฟ้า (Galvanostatic charge-discharge : GCD) ...	40
3.4 การวิเคราะห์.....	41
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล.....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การวิเคราะห์ด้วย XRD และ Raman Spectroscopy	59
4.2 การวิเคราะห์ SEM และ EDX.....	59
4.3 การวิเคราะห์ BET	62
4.4 การวิเคราะห์ FT-IR.....	63
4.5 ความสามารถในการนำไฟฟ้า.....	64
4.6 สมบัติทางเคมีไฟฟ้า.....	65
4.7 อุปกรณ์ Coin Cell	70
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	74
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	74
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	74
5.2.1 ทดลองประยุกต์วัสดุคอมโพสิตในระบบซูเปอร์คาปาซิเตอร์ชนิดต่าง ๆ	74
5.2.2 พิจารณาความเป็นไปได้ในการผลิตในระดับอุตสาหกรรม.....	74
เอกสารอ้างอิง	75
ประวัติผู้เขียน.....	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงเงื่อนไขของการเตรียมตัวอย่าง.....	37
4.1 แสดงผลการศึกษาสมบัติเชิงเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ของการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสและ ACTIVATED CARBON ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	44
4.2 แสดงผลการศึกษาสมบัติเชิงเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ของการเผาที่อุณหภูมิ 700 . องศาเซลเซียสและ ACTIVATED CARBON ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	46
4.3 แสดงผลการศึกษาสมบัติเชิงเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ของการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสและ ACTIVATED CARBON ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	48
4.4 แสดงผลการศึกษาสมบัติเชิงเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ของการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสและ ACTIVATED CARBON ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส	50
4.5 แสดงผลการศึกษาสมบัติเชิงเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ของการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสและ ACTIVATED CARBON ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	52
4.6 แสดงผลการศึกษาสมบัติเชิงเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ของการเผาที่อุณหภูมิ 800 .. องศาเซลเซียสและ ACTIVATED CARBON ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	54
4.7 แสดงผลการศึกษาสมบัติเชิงเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ของการเผาที่อุณหภูมิ 900 . องศาเซลเซียสและ ACTIVATED CARBON ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส	56
4.8 ผลการการลดอนุภาคคาร์บอนกัมมันต์ไม้ไผ่โดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (3D BALL MILLING) โดยจะใช้เวลา 1, 3, 5, 10, 15 และ 30 นาทีตามลำดับ	58
4.9 การวิเคราะห์ธาตุในหน่วย wt.% และอัตราส่วน C/O	62
4.10 รายงานจากรรณกรรมเกี่ยวกับอุปกรณ์ SUPERCAPACITOR ที่ใช้กราฟีนคาร์บอน	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างกราฟีน[25]	9
2.2 การสังเคราะห์แกรไฟีน[26]	10
2.3 การลอกด้วยวิธีเชิงกล[27].....	11
2.4 การสังเคราะห์แกรไฟีนด้วยปฏิกิริยาเคมีรีดักชันจากแกรไฟต์ออกไซด์[28]	11
2.5 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของกราฟีน[30].....	12
2.6 วิธีการของการผลิตถ่านกัมมันต์	13
2.7 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์[32].....	15
2.8 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ่านกัมมันต์[33].....	17
2.9 แสดงถึงโพรงหรือช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์[33]	18
2.10 ไอโซเทอมการดูดซับ[34]	18
2.11 ส่วนประกอบเซลล์เคมีไฟฟ้า	19
2.12 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรี[36]	20
2.13 กราฟการอัดและการคายประจุไฟฟ้า[37].....	21
2.14 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์[38]	22
2.15 เครื่องรามานสเปกโทรสโคปี[39].....	23
2.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SCANNING ELECTRON MICROSCOPY, SEM)[40]	24
2.17 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ MAPPING ANALYSIS[41].....	24
2.18 สเปกตรัมด้วยเทคนิคจากการวิเคราะห์ EDS[42]	25
2.19 เครื่องวิเคราะห์คุณสมบัติพื้นผิว (SURFACE AREA ANALYZER) [43].....	25
2.20 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรมิโครสโคปี (FTIR MICRO-SPECTROMETER)[44].....	26
2.21 เครื่องวัดทางเคมีไฟฟ้า[45].....	27
3.1 กระบวนการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์.....	32
3.2 การเตรียมผงถ่านไม้ไผ่	34
3.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่	34
3.4 การลดขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล	35
3.5 การเตรียมคอมโพสิตถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่กับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	36
3.6 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้า	37
3.7 กระบวนการเตรียมตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	38
3.8 ส่วนประกอบของเครื่อง ELECTROCHEMICAL WORKSTATION	39
3.9 ส่วนประกอบเซลล์เคมีไฟฟ้า	39
3.10 กราฟ CV ของสาร RGO ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KOH 3 M ที่อัตราการสแกน 10 mV/s... 40	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์อื่นใดเป็นการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11 กราฟ GCD ของสาร RGO ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KOH 3 M ที่ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 0.5 A/G..... 41

3.12 การวิเคราะห์และตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ 42

4.1 เส้นโค้ง CV ที่ SCAN RATE 10, 20, 50 และ 100 mV/s ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส 43

4.2 เส้นโค้ง GCD ที่ CURRENT DENSITY 0.5, 1, 2 และ 5 A/G ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส 44

4.3 เส้นโค้ง CV ที่ SCAN RATE 10, 20, 50 และ 100 mV/s ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 700_800 ก) 1-1_700_800 ข) 1-2_700_800 ค) 1-3_700_800 ง) 1-4_700_800 45

4.4 เส้นโค้ง GCD ที่ CURRENT DENSITY 0.5, 1, 2 และ 5 A/G ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 700_800 ก) 1-1_700_800 ข) 1-2_700_800 ค) 1-3_700_800 ง) 1-4_700_800 46

4.5 เส้นโค้ง CV ที่ SCAN RATE 10, 20, 50 และ 100 mV/s ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 800_800 ก) 1-1_800_800 ข) 1-2_800_800 ค) 1-3_800_800 ง) 1-4_800_800 47

4.6 เส้นโค้ง GCD ที่ CURRENT DENSITY 0.5, 1, 2 และ 5 A/G ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 800_800 ก) 1-1_800_800 ข) 1-2_800_800 ค) 1-3_800_800 ง) 1-4_800_800 48

4.7 เส้นโค้ง CV ที่ SCAN RATE 10, 20, 50 และ 100 mV/s ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 900_800 ก) 1-1_900_800 ข) 1-2_900_800 ค) 1-3_900_800 ง) 1-4_900_800 49

4.8 เส้นโค้ง GCD ที่ CURRENT DENSITY 0.5, 1, 2 และ 5 A/G ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 900_800 ก) 1-1_900_800 ข) 1-2_900_800 ค) 1-3_900_800 ง) 1-4_900_800 50

4.9 เส้นโค้ง CV ที่ SCAN RATE 10, 20, 50 และ 100 mV/s ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 700_900 ก) 1-1_700_900 ข) 1-2_700_900 ค) 1-3_700_900 ง) 1-4_700_900 51

เส้นโค้ง GCD ที่ CURRENT DENSITY 0.5, 1, 2 และ 5 Ag⁻¹ ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 700_900 ก) 1-1_700_900 ข) 1-2_700_900 ค) 1-3_700_900 ง) 1-4_700_900 52

4.11 เส้นโค้ง CV ที่ SCAN RATE 10, 20, 50 และ 100 mV/s ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 800_900 ก) 1-1_800_900 ข) 1-2_800_900 ค) 1-3_800_900 ง) 1-4_800_900 53

4.12 เส้นโค้ง GCD ที่ CURRENT DENSITY 0.5, 1, 2 และ 5 Ag⁻¹ ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 800_900 ก) 1-1_800_800 ข) 1-2_800_900 ค) 1-3_800_900 ง) 1-4_800_900 54

4.13 เส้นโค้ง CV ที่ SCAN RATE 10, 20, 50 และ 100 mV/s ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 900_900 ก) 1-1_900_900 ข) 1-2_900_900 ค) 1-3_900_900 ง) 1-4_900_900 55

4.14 เส้นโค้ง GCD ที่ CURRENT DENSITY 0.5, 1, 2 และ 5 Ag⁻¹ ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 900_900 ก) 1-1_900_900 ข) 1-2_900_900 ค) 1-3_900_900 ง) 1-4_900_900 56

4.15 เส้นโค้ง CV ที่ SCAN RATE 10, 20, 50 และ 100 mV/s ของการลดอนุภาคคาร์บอน กัมมันต์ไม้ไฟโดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (3D BALL MILLING) ก) AC-BBC3D1M ข) AC-BBC3D3M ค) AC-BBC3D5M ง) AC-BBC3D10M จ) AC-BBC3D15M ฉ) AC-BBC3D30M 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.16 เส้นโค้ง GCD ที่ CURRENT DENSITY 0.5, 1, 2 และ 5 A/g⁻¹ ของการลดอนุภาคคาร์บอน กัมมันต์
 ไม้ไฟโดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอลล (3D BALL MILLING) ก) AC-BBC3D1M ข) AC-BBC3D3M
 ค) AC-BBC3D5M ง) AC-BBC3D10M จ) AC-BBC3D15M ฉ) AC-BBC3D30M 57

4.17 (A) การวิเคราะห์ XRD และ (B) สเปกตรัม RAMAN สำหรับ RGO, BBC, RGO1%/3D-AC-BBC,
 RGO3%/3D-AC-BBC, RGO5%/3D-AC-BBC และ RGO7%/3D-AC-BBC 59

4.18 (A-H) ภาพ SEM และสเปกตรัม EDX สำหรับการแจกแจงธาตุของตัวอย่าง RGO, BBC, AC-BBC,
 3D-AC-BBC, RGO1%/3D-AC-BBC, RGO3%/3D-AC-BBC, RGO5%/3D-AC-BBC และ RGO7%/3D-AC-
 BBC ตามลำดับ..... 62

4.19 (A) การดูดซับและการปล่อยไนโตรเจน, และ (B) การแจกแจงปริมาตรรูพรุน BJH สำหรับ
 ตัวอย่าง RGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, RGO1%/3D-AC-BBC, RGO3%/3D-AC-BBC,
 RGO5%/3D-AC-BBC และ RGO7%/3D-AC-BBC 63

4.20 สเปกตรัม FT-IR ของ RGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, RGO1%/3D-AC-BBC, RGO3%/3D-
 AC-BBC, RGO5%/3D-AC-BBC และ RGO7%/3D-AC-BBC..... 64

4.21 ความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มี RGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC,
 RGO1%/3D-AC-BBC, RGO3%/3D-AC-BBC, RGO5%/3D-AC-BBC และ RGO7%/3D-AC-
 BBC ในอิเล็กโทรดทำงานที่อุณหภูมิห้อง 65

4.22 การวิเคราะห์ EIS จากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KOH 3.0 M 66

4.23 กราฟ CV ที่อัตราสแกนต่างๆ สำหรับขั้วไฟฟ้า RGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, RGO1%/3D-
 AC-BBC, RGO3%/3D-AC-BBC, RGO5%/3D-AC-BBC และ RGO7%/3D-AC-BBC, อัตราสแกน
 10 mV/s (A), 20 mV/s (B), 50 mV/s (C) และ 100 mV/s (D) 67

4.24 กราฟ GCD กับความหนาแน่นกระแสจากขั้วไฟฟ้า RGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC,
 RGO1%/3D-AC-BBC, RGO3%/3D-AC-BBC, RGO5%/3D-AC-BBC และ RGO7%/3D-AC-
 BBC ที่ (A) 0.5 A/g, (B) 1.0 A/g, (C) 2.0 A/g และ (D) 5.0 A/g..... 68

4.25 (A) ค่า Cs จากพล็อต GCD ที่ความหนาแน่นกระแสที่ 0.5 ถึง 5 A/g, (B) กราฟ NYQUIST ในช่วง
 ความถี่ 100 kHz ถึง 0.01 Hz สำหรับอิเล็กโทรด RGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC,
 RGO1%/3D-AC-BBC, RGO3%/3D-AC-BBC, RGO5%/3D-AC-BBC และ RGO7%/3D-AC-
 BBC 69

4.26 แผนภาพเชิงสัญลักษณ์ของ SUPERCAPACITOR แบบสมมาตรของอุปกรณ์ COIN CELL ที่ใช้
 RGO5%/3D-AC-BBC 70

4.27 (A) กราฟ CV ที่อัตราการสแกนจาก 5 ถึง 200 mV/s, (B) กราฟ GCD ที่ความหนาแน่นกระแส
 จาก 0.1 ถึง 20 A/g, (C) กราฟ NYQUIST, (D) ค่าของ Cs สำหรับความหนาแน่นกระแสต่างๆ, (E)
 การเก็บพลังงานในรอบการใช้งานที่ 5 A/g และกราฟ GCD หลังจาก 10,000 รอบ พร้อมกับ
 ตัวอย่างแสดงการจ่ายพลังงานให้กับหลอดไฟ LED สีเขียวสามดวงโดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์
 RGO5%/3D-AC-BBC // RGO5%/3D-AC-BBC COIN CELL ในวงจรอนุกรม, (F) การเก็บพลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรอบการใช้งานที่ 5 A/G และ (g) กราฟ RAGONE ของ RGO1%/3D-AC-BBC, RGO3%/3D-AC-BBC, RGO5%/3D-AC-BBC และ RGO7%/3D-AC-BBC COIN CELL DEVICES..... 72



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (SCs) เป็นอุปกรณ์สำหรับการกักเก็บพลังงานไฟฟ้า อุปกรณ์ SC ที่มีประสิทธิภาพสูงสามารถให้พลังงานเคมีไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม โดยมีค่าความจุจำเพาะสูง สามารถชาร์จและมีการคายประจุได้อย่างไว และมีอายุไซเคิลไลฟ์ที่ยาวนาน [1,2,3] องค์ประกอบพื้นฐานของ SCs ประกอบไปด้วยอิเล็กโทรดสองขั้ว ตัวคั่น (เพื่อป้องกันการลัดวงจรระหว่างสารของอิเล็กโทรด) และสารอิเล็กโทรไลต์ SCs สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ 1) พิเซโดคาปาซิเตอร์ (pseudo-capacitors) และ 2) ตัวเก็บประจุแบบสองชั้นไฟฟ้า (electrochemical double layer capacitors, EDLCs) [3,4] ประสิทธิภาพของ SCs ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของอิเล็กโทรด ค่าความจุที่สูงมักได้จากวัสดุที่มีพื้นที่ผิวที่มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุน สเปซิฟิกเอเรียและค่าความจุจำเพาะที่สูง [4,5]

สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของ SCs ขึ้นอยู่กับสารอิเล็กโทรดที่ใช้ในการผลิต [1,2,3] สำหรับพิเซโดคาปาซิเตอร์ กลไกทางเคมีไฟฟ้าจะถูกควบคุมโดยปฏิกิริยารีดอกซ์ของวัสดุจะทำหน้าที่เป็นสารออกฤทธิ์ ในขณะที่ EDLCs จะใช้สารอิเล็กโทรดที่มีพื้นฐานจากคาร์บอน [6,7,8] มีรายงานว่าอิเล็กโทรดของ EDLCs ที่ใช้เส้นใยคาร์บอนสามารถให้ค่าความจุจำเพาะ 6 F/g Lekakou และคณะ [9] ได้เสนอคาร์บอนจากกราฟีนที่สังเคราะห์จากชีวมวลที่มีรูพรุนสูง โดยมีสเปซิฟิกเอเรียสูงถึง 3,657 m²/g และค่าความจุจำเพาะ 175 F/g Jung และคณะ [10] ใช้คาร์บอนธรรมชาติเป็นวัสดุอิเล็กโทรดสำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวดทางเคมีไฟฟ้า โดยให้ค่าความจุจำเพาะ 479 F/g Ghosh และคณะ [11] ได้เพิ่มสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของแอคทิเวเทดคาร์บอนจากกะลามะพร้าวโดยกระบวนการกระตุ้นด้วย KOH ทำให้ได้ค่าความจุจำเพาะ 449 F/g ที่กระแส 1 A/g Lee และคณะ [12] ได้ปรับปรุงสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของแอคทิเวเทดคาร์บอนจากเปลือกทุเรียนโดยการผสมกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) พร้อมทั้งปรับปรุงโครงสร้างของคอมโพสิตโดยใช้วิธีhydrothermal และ 3-D ball milling ส่งผลให้วัสดุที่มีพื้นที่สเปซิฟิกเอเรีย 2311 m²/g และค่าความจุจำเพาะ 545 F/g นอกจากนี้ Ngamjumrus และคณะ [5] รายงานว่าวัสดุ rGO ที่จะมีโครงสร้างสองมิติ (2D) สามารถทำการปรับปรุงสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของอิเล็กโทรดได้ เนื่องจากวัสดุนาโนสองมิติมีพื้นที่ผิวที่สูง [13,14] วัสดุชีวมวล เช่น ถ่านไม้ ได้เกิดความสนใจค่อนข้างที่จะมากในการที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งผลิตถ่านกัมมันต์สำหรับอิเล็กโทรด เนื่องจากมีต้นทุนต่ำ มีจำนวนปริมาณมาก และโครงสร้างเดิมมีความพรุนสูง [15-19] อย่างไรก็ตาม ค่าความจุจำเพาะของ EDLCs ที่ผลิตจากแอคทิเวเทดคาร์บอนกระตุ้นด้วย KOH อยู่ที่ 24 F/g ตามรายงานของ Khuong et al. [20] และคาร์บอนกัมมันต์นาโนจากไม้ที่ค่าความจุจำเพาะ 134 F/g ซึ่งยังถือว่าต่ำมากเมื่อลองเปรียบเทียบกับตัววัสดุอื่น ๆ Ajay และคณะ [21]

ในงานการวิจัยฉบับนี้ ได้ทำการพัฒนาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์จากไม้สำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวดโดยการผสมกับ rGO ที่มีโครงสร้างสองมิติ (2D) ในสัดส่วน 1, 3, 5 และ 7% โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนัก (wt%) คาร์บอนกัมมันต์จากไม้ถูกเตรียมโดยการเผาไหม้ภายใต้กระแสอาร์กอน จากนั้นบดและผสมโดยใช้เทคนิค 3-D ball milling ที่ความเร็วสูง การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวอย่างดำเนินการโดยใช้เทคนิค (XRD), Raman spectroscopy, (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) และส่วนการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะ สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของตัวอย่างจากถ่านกัมมันต์จากไม้ได้รับการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิควัฏจักรวอลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry, CV), การชาร์จ-คายประจุแบบกระแสคงที่ (Galvanostatic Charge-Discharge, GCD) และสเปกโทรสโกปีอิมพีแดนซ์ทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS) โดยใช้อิเล็กโทรดแบบครึ่งเซลล์ จากนั้นเมทที่เรียลอิเล็กโทรดที่มีสมรรถนะดีที่สุดได้รับการเลือกเพื่อนำไปผลิตอุปกรณ์ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบสมมาตร (symmetric SC coin cell) และรายงานสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของอุปกรณ์ดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) สามารถนำวัสดุชีวมวลที่มาจากภายในประเทศมาพัฒนาให้เกิดประโยชน์ให้ได้มากที่สุด
- 2) เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้าง และลักษณะสัญญาณ และผลสมบัติทางเคมีเชิงไฟฟ้าของคาร์บอนกัมมันต์จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและถ่านไม้ไผ่กัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยวิธีการทางเคมี
- 3) เพื่อที่จะสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าจากวัสดุนาโนคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) กับถ่านไม้ไผ่กัมมันต์สำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวด
- 4) สามารถพิสูจน์ความเสถียรของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ใช้ไผ่รวกดำ (*Thyrsostachys siamensis* Gamble) เพื่อมาสังเคราะห์เป็นคาร์บอนและคาร์บอนกัมมันต์
- 2) ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาถ่านไม้ไผ่ ณ อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3) ศึกษากระบวนการการทำถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ด้วยการกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation) โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในอัตราส่วน 1:3 เพื่อเพิ่มรูพรุนให้กับถ่านไม้ไผ่
- 4) นำถ่านไม้ไผ่ที่ได้ที่ลดขนาดอนุภาคโดยใช้เครื่องบดทรงกลม (3D ball-milling)
- 5) นำถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ที่ลดขนาดอนุภาคแล้วมาคอมโพสิตกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)
- 6) ทดสอบคุณสมบัติทางเคมีเชิงไฟฟ้าลักษณะโครงสร้างและลักษณะสัญญาณของถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) สามารถสังเคราะห์ถ่านและถ่านกัมมันต์ที่มีอยู่จากแหล่งธรรมชาติได้
- 2) สามารถเพิ่มรูพรุนในถ่าน เพื่อเป็นแหล่งกักพลังงานสำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) เป็นแนวทางในการศึกษาวัสดุนาโนคอมโพสิต งานวิจัยนี้อาจช่วยเพิ่มองค์ความรู้เกี่ยวกับวัสดุนาโนคอมโพสิตที่มีโครงสร้างสองมิติ เช่น rGO และการประยุกต์ใช้ร่วมกับถ่านกัมมันต์จากชีวมวลในการปรับปรุงสมบัติทางเคมีไฟฟ้า
- 4) พัฒนาวัสดุอิเล็กโทรดที่มีประสิทธิภาพสูง การสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ร่วมกับบริดจ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) อาจช่วยเพิ่มสมบัติทางเคมีไฟฟ้า เช่น ค่าความจุจำเพาะ พื้นที่ผิวจำเพาะ และเสถียรภาพของอิเล็กโทรด ทำให้อุปกรณ์ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น
- 5) เพิ่มศักยภาพในการกักเก็บพลังงาน วัสดุคอมโพสิตที่พัฒนาขึ้นอาจช่วยให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถเก็บพลังงานได้มากขึ้น ปลดปล่อยพลังงานได้อย่างรวดเร็ว และมีอายุการใช้งานยาวนานขึ้น ซึ่งเหมาะสมกับการใช้งานด้านพลังงานสะอาดและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor หรือ Ultracapacitor) คือ อุปกรณ์ที่มักจะทำสำหรับการเก็บพลังงานไฟฟ้าโดยสามารถเก็บพลังงานได้มากกว่าคาปาซิเตอร์ทั่วไปและสามารถจ่ายพลังงานในระดับสูงได้อย่างรวดเร็ว ตัวเก็บประจุยิ่งยวดทำงานโดยมักจะใช้หลักการในการสะสมพลังงานในรูปแบบของสนามไฟฟ้า ซึ่งต่างจากแบตเตอรี่ที่เก็บพลังงานในรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงเคมี

คุณสมบัติที่สำคัญของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ได้แก่

- 1) ความจุสูง สามารถเก็บพลังงานได้มากกว่าคาปาซิเตอร์ทั่วไป โดยสามารถเก็บพลังงานได้มากกว่าหลายร้อยเท่า
- 2) การชาร์จและคายประจุเร็ว: สามารถชาร์จและคายพลังงานได้เร็วมาก ซึ่งแตกต่างจากแบตเตอรี่ที่ชาร์จช้าและคายพลังงานช้า
- 3) อายุการใช้งานยาว ตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่จะมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน โดยไม่เสื่อมสภาพตามการใช้งานเหมือนแบตเตอรี่
- 4) ความหนาแน่นพลังงานต่ำ แม้วามันจะเก็บพลังงานได้มาก แต่ในแง่ของความหนาแน่นพลังงานมันยังต่ำกว่าแบตเตอรี่

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมักใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการการชาร์จหรือคายพลังงานอย่างรวดเร็ว เช่น ระบบกักเก็บพลังงานในยานยนต์ไฟฟ้า, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, หรือระบบที่ต้องการพลังงานแบบช่วงขณะ (pulse power) ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) สามารถแยกออกเป็น 3 ชนิดหลักๆ ตามหลักการทำงานและวัสดุที่ใช้ในการผลิต

2.1.1 Electrical Double-Layer Capacitors (EDLCs)

หลักการทำงานคือ ใช้วัสดุคาร์บอนหรือถ่านที่มีพื้นผิวขนาดใหญ่ เพื่อสร้างชั้นไฟฟ้าคู่ (Electric Double Layer) ที่ช่วยในการเก็บพลังงานในสนามไฟฟ้าโดยตรง มีคุณสมบัติ สามารถเก็บพลังงานได้จำนวนค่อนข้างมากและปล่อยพลังงานได้เร็วมาก แต่มีความหนาแน่นของพลังงานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่ ในส่วนของการใช้งาน: ใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการการชาร์จและคายพลังงานอย่างรวดเร็ว เช่น ยานยนต์ไฟฟ้า, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, หรือระบบที่ต้องการพลังงานทันที

2.1.2 Pseudocapacitors

หลักการทำงานคือ ใช้การสะสมพลังงานผ่านกระบวนการเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วไฟฟ้า เช่น การเกิดปฏิกิริยาที่ผิวขั้วของวัสดุ (เช่น การใช้วัสดุที่มีโครงสร้างโครงสร้างโลหะออกไซด์หรือพอลิเมอร์คาร์บอน) โดยมีคุณสมบัติคือมีความหนาแน่นของพลังงานที่สูงกว่าตัวเก็บประจุแบบ EDLC แต่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยังคงรักษาความสามารถในการชาร์จและคายพลังงานเร็ว การใช้งานมักใช้ในอุปกรณ์ที่ต้องการความหนาแน่นพลังงานสูงขึ้น เช่น ระบบพลังงานหมุนเวียน หรือแหล่งพลังงานสำรองในกรณีฉุกเฉิน

2.1.3 Hybrid Supercapacitors

หลักการทำงาน ผสมผสานเทคโนโลยีระหว่าง EDLC และ Pseudocapacitors โดยจะใช้วัสดุที่สามารถเก็บพลังงานจากทั้งไฟฟ้าและปฏิกิริยาเคมีในตัวเดียว คุณสมบัติ มีความสมดุลระหว่างความหนาแน่นพลังงานและความสามารถในการคายพลังงานเร็ว รวมถึงมีอายุการใช้งานยาวนาน การใช้งานสามารถใช้ในแอปพลิเคชันที่ต้องการทั้งความจุพลังงานที่สูงและการคายพลังงานเร็ว เช่น ระบบขับเคลื่อนที่ต้องการการเร่งเร็วหรือระบบกักเก็บพลังงานในระดับอุตสาหกรรม[22]

2.2 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่ได้จากสารอินทรีย์ ซึ่งสะสมพลังงานจากแสงอาทิตย์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช โดยชีวมวลสามารถนำมาใช้ผลิตเป็นพลังงานรูปแบบต่าง ๆ เช่น ความร้อน ไอน้ำ และไฟฟ้า วัสดุชีวมวลที่พบได้ทั่วไปมักเป็นของเหลือใช้จากภาคเกษตรและอุตสาหกรรม เช่น แกลบจากโรงสีข้าว ชานอ้อยจากการผลิตน้ำตาล เศษไม้จากอุตสาหกรรมแปรรูปไม้ วัสดุอื่น ๆ เช่น ชังข้าวโพด กาบและกะลามะพร้าว รวมถึงสาเหล้มที่เกิดจากกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์

พลังงานจากชีวมวลเกิดขึ้นได้เนื่องจากพืชสะสมพลังงานในรูปของแป้งและน้ำตาล เมื่อนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิง พลังงานเหล่านี้จะถูกปลดปล่อยออกมา กระบวนการเผาไหม้ชีวมวลสามารถดำเนินการเดี่ยวหรือใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงประเภทอื่นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ

ชีวมวลแบ่งออกเป็นสามส่วน ได้แก่:

- 1) ความชื้น (Moisture)
- 2) ส่วนที่สามารถเผาไหม้ได้ (Combustible Substance)
- 3) ส่วนที่ไม่สามารถเผาไหม้ได้ (Ash)

พลังงานชีวมวลจึงเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพสำหรับการผลิตพลังงานสะอาดและยั่งยืน หากมีการพัฒนาเทคโนโลยีอย่างเหมาะสมก็สามารถช่วยสร้างความมั่นคงทางพลังงานและส่งเสริมในกระบวนการผลิตพลังงานทางเลือกนี้ได้[23]

2.3 ไม้

2.3.1 ไม้ในประเทศไทย

ไม้เป็นพืชที่มีบทบาทที่ค่อนข้างสำคัญในชีวิตของมนุษย์มาอย่างยาวนาน โดยสามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย เช่น อาหาร วัสดุก่อสร้าง และสมุนไพร ในระดับโลกมีไม้ประมาณ 75 สกุล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1,250 ชนิด ขณะที่ประเทศไทยมีไม้ประมาณ 13 สกุล 55-60 ชนิด ชนิดที่พบมากและมีการนำไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ ไม้ตง ไม้รวก ไม้สีสุก ไม้เลื้อย ไม้ซาง ไม้บงหวาน ไม้ข้าวหลาม และไม้ไร่ เป็นต้น

จากการสำรวจโดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมในปี 2535 พบว่าไม้เป็นพืชหลักที่กระจายตัวอยู่ในป่าเบญจพรรณ โดยเฉพาะในภาคเหนือ เช่น จังหวัดเชียงใหม่และลำพูน มีพื้นที่ป่าไม้รวมกว่า 5.7 ล้านไร่ ไม้ในภาคเหนือมีความหลากหลายสูง โดยมี 28 ชนิดที่พบมาก เช่น ไม้บง ไม้ป่า ไม้ล้ามะลอก ไม้เหลือง ไม้หก ไม้เปี๊ยะ และไม้ซางดำ เป็นต้น

2.3.2 องค์ประกอบของป่าไม้

ปัจจัยที่มีผลต่อการเติบโตของไม้ ได้แก่:

- 1) ภูมิประเทศและสภาพอากาศ – ไม้แต่ละชนิดมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมตั้งแต่ 8.8-36 องศาเซลเซียส ต้องการปริมาณน้ำฝนขั้นต่ำประมาณ 1,020 มิลลิเมตรต่อปี ไม้ที่มีลำใหญ่ต้องการความชื้นสูงกว่าไม้ลำเล็ก
- 2) ลักษณะดิน – ไม้มักพบในดินร่วนปนทรายหรือดินเหนียว ไม้ที่มีลำใหญ่ต้องการดินอุดมสมบูรณ์มากกว่า ไม้สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพดินได้
- 3) องค์ประกอบในป่า – ไม้ส่วนใหญ่มีลำขึ้นเป็นไม้ชั้นล่างของป่า บางแห่งพบเป็นป่าไผ่ล้วน หรือขึ้นปะปนกับต้นไม้อื่น
- 4) ความลาดชัน – ไม้ที่ขึ้นบนพื้นที่ลาดทางทิศตะวันออกมักเติบโตดีกว่า เช่น ในจังหวัดกาญจนบุรีและภาคเหนือ

2.3.3 ลักษณะของไม้

ไม้เป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยว มีลำต้นแบ่งเป็นข้อและปล้อง ความสูงแตกต่างกันตั้งแต่ไม่กี่เซนติเมตรจนถึง 40 เมตร ไม้บางชนิดออกดอกทุก 10-100 ปีและตายหลังจากนั้น ไม้สามารถขยายพันธุ์ได้ทั้งจากเหง้าและเมล็ด ระบบรากและเหง้าเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโต มี 2 ระบบหลักคือ:

- 1) ระบบกอ (Sympodial) – แขนงหน่อรวมกันเป็นกอแน่น เช่น ไม้รวกและไม้ซาง
- 2) ระบบลำเดี่ยว (Monopodial) – แขนงหน่อกระจาย เช่น ไม้เลื้อย

ไม้เติบโตเร็ว บางชนิดสามารถสูงขึ้น 1 เมตรต่อวัน หน่อไม้สามารถนำมาบริโภค ส่วนลำต้นใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ เครื่องเรือน และเครื่องดนตรี

2.3.4 การจำแนกพันธุ์ไม้

การจำแนกไม้ทำได้โดยพิจารณาลักษณะของเหง้า กาบหุ้มลำ และดอก โดยระบบเหง้ามี 3 ประเภท:

- 1) Sympodial (เหง้ากอ) – แขนงหน่อเบียดกันเป็นกอ เช่น ไม้ซาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) Monopodial (เหง้าลำเดี่ยว) – แขนงหน่อกระจาย เช่น ไม้เลื้อย
- 3) Intermediate (เหง้าผสม) – มีทั้ง 2 ลักษณะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม

2.3.5 ประโยชน์ของไม้

- 1) เพื่อใช้เป็นอาหารพื้นบ้าน
- 2) เพื่อประโยชน์การใช้สอยสำหรับครัวเรือนในชีวิตประจำวัน
- 3) เพื่อเพิ่มรายได้ให้แก่ครอบครัว

ไม้มีความสำคัญรวมทั้งทางด้านเศรษฐกิจและวัฒนธรรม โดยมีบทบาทในความเชื่อและวิถีชีวิตของผู้คนในหลายประเทศ อาทิ จีน อินเดีย และญี่ปุ่น ไม้ยังถูกนำมาใช้ในงานศิลปะและพิธีกรรมทางศาสนา เช่นเดียวกับการใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ

2.3.6 อุตสาหกรรมไม้

เยื่อกระดาษจากไม้ ด้วยเส้นใยที่ยาว ไม้จึงเป็นวัตถุดิบที่ค่อนข้างที่จะเหมาะสมสำหรับการผลิตกระดาษ เพราะให้ผลผลิตเยื่อกระดาษสูงและคุณภาพดี อุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษจากไม้มีอยู่ในหลายจังหวัด เช่น จังหวัดขอนแก่นและกาญจนบุรี ซึ่งรับซื้อไม้จากเกษตรกรเพื่อใช้ในกระบวนการผลิต นอกจากไม้แล้ว วัตถุดิบอื่นที่เข้าร่วมกันในอุตสาหกรรมนี้ ได้แก่ ปอและไม้ยูคาลิปตัส

ไม้รวกตัดเพื่อการส่งออก ไม้รวกที่ส่งออกไม่ได้ผ่านการแปรรูปซับซ้อน แต่มีการคัดเกรดและผ่านกระบวนการถนอมเนื้อไม้เพื่อป้องกันแมลง ประเทศปลายทางหลัก ได้แก่ ประเทศในยุโรป เช่น อิตาลีและเยอรมนี ซึ่งใช้ไม้ในภาคเกษตรกรรม ส่วนในแถบตะวันออกกลางและปากีสถาน ไม้ถูกนำไปใช้ในงานก่อสร้าง เช่น ทำที่พักอาศัยและเต็นท์ทหาร

ผลิตภัณฑ์จากไม้ในอุตสาหกรรมหัตถกรรม

- 1) แข่งไม้ ผลิตจากไม้รวกและไม้นวล โดยนำมาจักเป็นเส้นแล้วสานขึ้นรูป เป็นอุตสาหกรรมครัวเรือนที่แพร่หลายในหลายพื้นที่
- 2) ตะเกียบไม้ ใช้ไม้ซางและไม้นวลที่มีอายุ 2-3 ปีขึ้นไป โรงงานผลิตหลักตั้งอยู่ที่จังหวัดลำปาง ซึ่งมีการพัฒนาเครื่องจักรผลิตตะเกียบเพื่อลดการนำเข้าเครื่องจักรจากต่างประเทศ
- 3) ไม้จิ้มฟัน ใช้ไม้ซางเป็นวัตถุดิบ ผลิตในหลายจังหวัด เช่น เชียงใหม่ ลำพูน และชัยนาท ซึ่งไม้ไม่มีความเหนียวและไม่เปราะง่ายเหมือนไม้ปอหรือยางพารา
- 4) ไม้ซีก เป็นการนำไม้มาผ่าเป็นซีก ใช้ในงานก่อสร้าง เช่น ทำคอกสัตว์ หรือส่งต่อไปผลิตเป็นตะเกียบ ไม้เสียบอาหาร และอุปกรณ์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.7 การขยายพันธุ์ไม้

ไม้อัดเป็นวัสดุที่เกิดมาจากการผสมกันระหว่างไม้กับกาว เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความสวยงาม ใช้ผลิตเฟอร์นิเจอร์และตกแต่งภายใน นอกเหนือจากนี้ ยังใช้แทนไม้แบบก่อสร้างได้หลายครั้ง เนื่องจากมีคุณสมบัติไม่ดูดซึมน้ำหลังจากแห้ง เยื่อกระดาษไม้ผลิตจากเส้นใยไม้ซึ่งมีความยาว ทำให้ได้กระดาษคุณภาพดีและให้ผลผลิตสูง อุตสาหกรรมกระดาษไม้มีอยู่ในหลายจังหวัด เช่น ขอนแก่น และกาญจนบุรี โดยมีการเพิ่มส่งเสริมการปลูกไม้เพื่อรองรับความต้องการของโรงงาน ไม้รวกตัดเป็นไม้ที่ผ่านกรรมวิธีเพื่อรักษาคุณภาพก่อนส่งออก โดยมีอัตราภาษีต่ำกว่าการส่งออกไม้ชนิดอื่น ปัจจัยสำคัญคือขนาดและอายุของไม้ ซึ่งต้องไม่น้อยกว่า 1 ปีเพื่อให้ที่จะสามารถป้องกันมอดและแมลงได้ดี ตลาดส่งออกหลัก ได้แก่ ยุโรป ตะวันออกกลาง และปากีสถาน ซึ่งนำไปใช้ในภาคเกษตรกรรมและการก่อสร้าง

ผลิตภัณฑ์จากไม้อื่น ๆ ที่มีความสำคัญ ได้แก่

- 1) แข่งไม้ ผลิตจากไม้รวกและไม้นวล โดยนำมาจักตอกเป็นเส้นแล้วจักสานขึ้นรูป เป็นอุตสาหกรรมครัวเรือน
- 2) ตะเกียบไม้ ใช้ไม้ซางในการผลิต มีโรงงานในจังหวัดกาญจนบุรีและลำปาง เครื่องจักรผลิตตะเกียบได้รับการพัฒนาเพื่อทดแทนการนำเข้า
- 3) ไม้จิ้มฟัน ใช้ไม้ซางในการผลิต เช่น เชียงใหม่ ลำพูน และชัยนาท
- 4) ไม้ซีก ผลิตโดยการผ่าไม้เป็นซีก ใช้ทำคอกสัตว์หรือเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตภัณฑ์อื่น เช่น ไม้เสียบลูกชิ้น ไม้เสียบไก่ย่าง
- 5) หัตถกรรมจักสาน ใช้ไม้หลายชนิดในการผลิตเครื่องใช้ เช่น กระจัง กระจุง และ ตะกร้า โดยเฉพาะไม้สีสุกที่มีความเหนียวและทนทาน

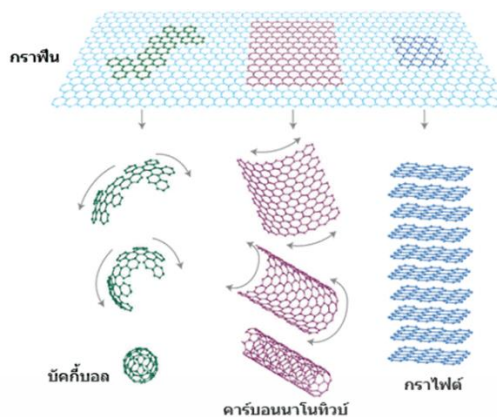
2.3.8 ขั้นตอนในการปักชำกิ่งแขนง

เมื่อได้คัดเลือกกิ่งแขนงแล้วทำการตัดแยกกิ่งแขนงออกจากลำไม้ จากนั้นตัดปลายกิ่งออกให้เหลือยาว 80-100 เซนติเมตร การปักชำควรจะทำในปลายฤดูฝนหรือในราวเดือนกันยายน-ตุลาคม ซึ่งเป็นช่วงที่มีกิ่งแขนงมาก[24]

2.4 กราฟีน

กราฟีนรูปแบบสองมิติของคาร์บอนผลึก ซึ่งอาจเป็นชั้นเดียวของอะตอม คาร์บอน ที่ก่อตัวเป็นโครงตาข่ายรังผึ้ง (หกเหลี่ยม) หรือชั้นที่เชื่อมต่อกันหลายชั้นของโครงสร้างรังผึ้งนี้ คำว่ากราฟีนเมื่อใช้โดยไม่ได้ระบุรูปแบบ (เช่น กราฟีนสองชั้น กราฟีนหลายชั้น) มักหมายถึงกราฟีนชั้นเดียว กราฟีนเป็นรูปแบบหลักของโครงสร้างกราฟิตทั้งหมดของคาร์บอน: กราไฟต์ ซึ่งเป็น ผลึกสามมิติที่ประกอบด้วยชั้นกราฟีนที่เชื่อมต่อกันอย่างอ่อนแรงนาโนทิวบ์ซึ่งอาจแสดงเป็นม้วนของกราฟีน และบัคกีบอลโมเลกุลทรงกลม ที่สร้างจากกราฟีนโดยมีวงแหวนหกเหลี่ยมบางส่วนถูกแทนที่ด้วยวงแหวนห้าเหลี่ยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างกราไฟน[25]

2.4.1 การศึกษากราไฟนครั้งแรก

การศึกษาทางทฤษฎีเกี่ยวกับกราไฟน แนวคิดที่เกี่ยวกับกราไฟนมีมาตั้งแต่ปี 1947 โดย Philip R. Wallace ซึ่งศึกษาคุณสมบัติของอิเล็กตรอนิกส์ของกราไฟต์ งานของเขาเป็นรากฐานสำหรับการทำความเข้าใจโครงสร้างของกราไฟน ต่อมาในปี 1986 นักเคมี Hanns-Peter Boehm, Ralph Setton และ Eberhard Stumpp ได้นำเสนอชื่อ "กราไฟน" ซึ่งเป็นการรวมคำว่า "กราไฟต์" กับ "-ene" ที่ใช้เรียกโครงสร้างไฮโดรคาร์บอนอะโรมาติกที่มีวงแหวนหกเหลี่ยม

การค้นพบกราไฟนชั้นเดียว ในปี 2004 คอนสแตนติน โนโวเชลอฟ และ Andre Geim แห่งมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ สามารถแยกกราไฟนชั้นเดียวจากกราไฟต์ได้โดยใช้ "เทคนิคเทปกาว" ซึ่งเป็นวิธีง่าย ๆ ที่ใช้เทปกาวชั้นบาง ๆ ของกราไฟต์ออกและนำไปติดบนพื้นผิว เมื่อเทปกาวลอกออกบางส่วนของกราไฟนจะคงอยู่ในรูปแบบชั้นเดียว ความสำเร็จนี้ไม่ได้ขึ้นอยู่กับแค่การแยกกราไฟนออกมาเท่านั้น แต่ยังการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่สูงมาก การสังเกตกราไฟนผ่านกล้องจุลทรรศน์ ในการทดลองแรก ๆ กราไฟนถูกติดลงบนพื้นผิวซิลิกอนที่เคลือบด้วยชั้นบาง ๆ ของซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งช่วยให้กราไฟนสามารถมองเห็นได้ภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบออปติคัล เนื่องจากสองปัจจัยสำคัญ คือ (1) อิเล็กตรอนในกราไฟนมีปฏิสัมพันธ์กับแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ โดยดูดซับแสงประมาณ 2.3% ต่อชั้นอะตอม และ (2) ปฏิกิริยาการรบกวนของแสงในชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นกลไกเดียวกับที่ทำให้เกิดสีรุ้งในฟิล์มน้ำมันหรือฟองสบู่

2.4.2 กราไฟนเป็นวัสดุสองมิติ

กราไฟน: วัสดุสองมิติที่ปฏิวัติวงการกราไฟนเป็นตัวอย่างสำคัญของผลึกสองมิติ ซึ่งเป็นโครงสร้างของอะตอมที่เรียงตัวเป็นระเบียบในชั้นบางระดับอะตอม วัสดุประเภทนี้มีบทบาทสำคัญ ไม่เพียงแต่ฟิสิกส์และเคมี แต่ยังรวมถึงชีววิทยาและวัสดุศาสตร์อีกด้วย ตัวอย่างเช่น เมมเบรนของเซลล์ในสิ่งมีชีวิตก็ถือเป็นระบบสองมิติที่สำคัญ โดยธรรมชาติแล้ว โครงสร้างสองมิติแตกต่างจากระบบสามมิติอย่างมาก เนื่องจากอะตอมในชั้นบางสามารถเกิดความผันผวนทางความร้อนและการบิดงอในระดับจุลภาค ทำให้วัสดุเหล่านี้ไม่ได้คงรูปแบบแบนราบเสมอไป แต่มีลักษณะเป็นริ้วคลื่นเล็ก ๆ อย่างไรก็ตาม กราไฟนถือเป็นต้นแบบของวัสดุสองมิติที่มีเสถียรภาพสูง เช่น โบรอนไนไตรด์หกเหลี่ยม

โมลลิบดีเนียมไดซัลไฟด์ และทังสเตนไดซัลไฟด์ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

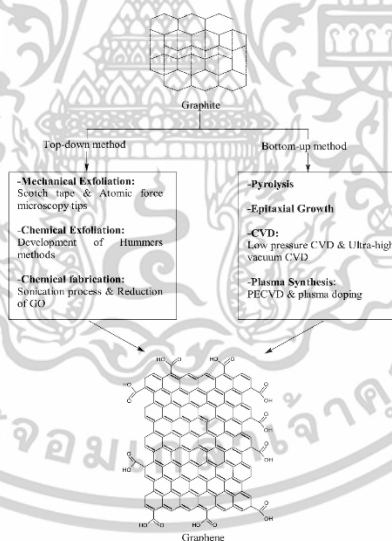
ศักยภาพของกราฟีนในอุตสาหกรรมด้วยคุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้าสูง ความโปร่งใส และความแข็งแรง กราฟีนถูกมองว่าเป็นวัสดุที่มีศักยภาพในการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ เช่น ทรานซิสเตอร์ที่บางลง หน้าจอสัมผัสที่มีความทนทาน และระบบระบายความร้อนสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ นอกจากนี้ ความแข็งแรงเชิงกลของกราฟีนยังช่วยให้สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุโครงสร้างสำหรับการศึกษาทางชีววิทยาและนาโนเทคโนโลยีได้อีกด้วย

ความท้าทายและแนวทางการผลิต แม้กราฟีนจะมีคุณสมบัติที่โดดเด่น แต่การผลิตในระดับอุตสาหกรรมยังคงเป็นความท้าทาย เนื่องจากวิธีการแยกกราฟีนโดยการลอกชั้นด้วยเทปกาวนั้นไม่สามารถปรับใช้ในเชิงพาณิชย์ได้ ปัจจุบันมีการพัฒนาเทคนิคใหม่ ๆ เช่น การเผาซิลิกอนคาร์ไบด์ หรือ การสะสมไอเคมีของคาร์บอนบนพื้นผิวโลหะบางชนิดอย่างทองแดงและนิกเกิล ซึ่งช่วยให้สามารถผลิตกราฟีนขนาดใหญ่ได้ในระดับมหภาค

2.4.3 การสังเคราะห์กราฟีน

การสังเคราะห์แกรฟีนสามารถทำได้สรุปใน รูปที่ 2.2 โดยการสังเคราะห์แกรฟีนนั้น จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (top down) และการสังเคราะห์จากล่างขึ้นบน (bottom up)

1) กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (top down)



รูปที่ 2.2 การสังเคราะห์แกรฟีน[26]

การแยกชั้นแกรฟีนด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical Exfoliation) การแยกแกรฟีนออกจากแกรไฟต์ด้วยวิธีการทางเคมีเป็นเทคนิคที่สามารถทำให้ได้แกรฟีนในรูปของสารละลาย กระบวนการนี้อาศัยโลหะอัลคาไลน์เป็นตัวแทรกซึมเข้าไประหว่างชั้นของแกรไฟต์ ทำให้โครงสร้างแกรไฟต์อ่อนตัวลงและส่งผลให้ชั้นแกรฟีนสามารถแยกตัวออกมาเป็นแผ่นบางได้ โลหะอัลคาไลน์ถูกเลือกใช้ในกระบวนการนี้เนื่องจากมีขนาดรัศมีเล็กพอที่จะซึมผ่านช่องว่างระหว่างชั้นของแกรไฟต์ได้

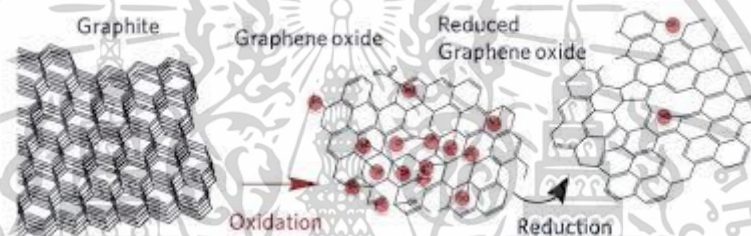
อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ โลหะอัลคาไลน์ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับแกรไฟต์ได้ง่าย ส่งผลให้ออกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไวสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดสารประกอบแทรกชั้นที่มีอัตราส่วนระหว่างแกรไฟต์กับโลหะอัลคาไลน์ที่แตกต่างกันไปตามเงื่อนไขของกระบวนการการสังเคราะห์แกรไฟีนด้วยปฏิกิริยาเคมีรีดักชันจากแกรไฟต์ออกไซด์ (Chemical Reduction of Graphite Oxide)



รูปที่ 2.3 การลอกด้วยวิธีเชิงกล[27]

2) กระบวนการสังเคราะห์แกรไฟีนแบบล่างสู่บน (Bottom up)



รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์แกรไฟีนด้วยปฏิกิริยาเคมีรีดักชันจากแกรไฟต์ออกไซด์[28]

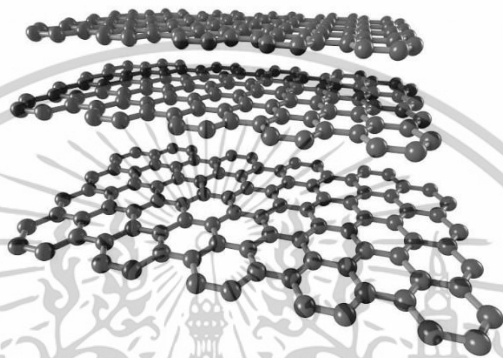
- เทคนิคการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีการฉีดพ่นไอสารเคมี (Chemical Vapour Deposition: CVD) ถือเป็นแนวทางที่สามารถผลิตกราฟีนคุณภาพสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถควบคุมจำนวนชั้นของแผ่นกราฟีนที่เกิดขึ้นได้ อีกทั้งยังได้วัสดุที่มีสมบัติการนำไฟฟ้าดี จึงเหมาะสำหรับประยุกต์ใช้ในวงการอิเล็กทรอนิกส์ขั้นสูง
- อีกวิธีหนึ่งในการผลิตกราฟีนคือ การปลูกผลึกบนแผ่นซิลิคอนคาร์ไบด์ (Epitaxial growth on silicon carbide) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเนื่องจากสามารถผลิตกราฟีนที่มีคุณภาพสูงในปริมาณมาก และสามารถถ่ายโอนฟิล์มกราฟีนไปยังวัสดุรองรับอื่นได้ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของวิธีนี้คือจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิสูงและวัสดุต้นแบบที่มีต้นทุนค่อนข้างสูง[29]

2.4.4 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์ของกราฟีน

โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐานของกราฟีนและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของมันจึงมีลักษณะเฉพาะมาก โดยการใช้แรงดันเกตหรือใช้การเจือปนทางเคมีโดยอะตอมและโมเลกุลที่ดูดซับไว้ เราสามารถสร้างอิเล็คตรอนหรือรู (บริเวณที่ขาดอิเล็คตรอนซึ่งทำหน้าที่เป็นประจุไฟฟ้าบวก) การนำไฟฟ้าในกราฟีนนั้นคล้ายกับการนำไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในสารกึ่งตัวนำอย่างไรก็ตาม ในสารกึ่งตัวนำส่วน

ใหญ่มิ่ระดับพลังงานบางระดับที่อิเล็คตรอนและรูไม่สามารถเข้าครอบครอง สถานะ ควอนตัมได้และไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากอิเล็กตรอนและรูไม่สามารถครอบครองระดับเหล่านี้ได้ สำหรับแรงดันเกตบางประเภทและการเจือปนสารเคมีบางประเภท สารกึ่งตัวนำจึงทำหน้าที่เป็นฉนวน ในทางกลับกัน กราฟีนไม่มีสถานะฉนวน และการนำไฟฟ้าจะยังคงจำกัดเมื่อมีการเจือปนใดๆ รวมถึงการเจือปนเป็นศูนย์ การมีอยู่ของการนำไฟฟ้าขั้นต่ำนี้สำหรับกรณีที่ไม่ได้เจือปนเป็นความแตกต่างที่ชัดเจนระหว่างกราฟีนและสารกึ่งตัวนำทั่วไป สถานะของอิเล็กตรอนและรูในกราฟีนที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งประจุนี้คล้ายคลึงกับสถานะของอนุภาคควอนตัมที่สัมพันธ์กับสัมพัทธภาพสูง นั่นคือ อนุภาคควอนตัมที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วแสง (ความเร็วสูงสุดในธรรมชาติ ตามทฤษฎีสัมพัทธภาพ)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างอิเล็กตรอนิกส์ของกราฟีน[30]

โครงตาข่ายรังผึ้งของกราฟีนประกอบด้วยโครงตาข่ายย่อยสองโครงที่เรียกว่า A และ B โดยที่อะตอมในโครงตาข่ายย่อย A แต่ละอะตอมจะถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของโครงตาข่ายย่อย B สามอะตอม การจัดเรียงทางเรขาคณิตที่เรียบง่ายนี้ทำให้ดูเหมือนว่าอิเล็กตรอนและโฮลในกราฟีนมีระดับอิสระภายในที่ไม่ปกติ ซึ่งมักเรียกว่า ซูโดสปิน ในความเป็นจริง เพื่อให้การเปรียบเทียบสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ซูโดสปินเลียนแบบสปินหรือโมเมนตัมเชิงมุม ภายใน ของอนุภาคย่อยอะตอมในการเปรียบเทียบนี้ อิเล็กตรอนและโฮลในกราฟีนมีบทบาทเช่นเดียวกับอนุภาคและแอนติอนุภาค (เช่น อิเล็กตรอนและโพสิตรอน) อย่างไรก็ตาม ในเวลาเดียวกัน ความเร็วของอิเล็กตรอนและโฮลอยู่ที่ประมาณ $1/300$ ของความเร็วแสงเท่านั้น สิ่งนี้ทำให้กราฟีนเป็นแหล่งทดสอบสำหรับฟิสิกส์พลังงานสูง: ผลสัมพัทธภาพควอนตัมบางอย่างที่แทบจะเข้าถึงไม่ได้ในการทดลองกับอนุภาคย่อยอะตอมโดยใช้เครื่องเร่งอนุภาคมีแอนะล็อก ที่ชัดเจน ในฟิสิกส์ของอิเล็กตรอนและโฮลในกราฟีน ซึ่งสามารถวัดและศึกษาได้ง่ายกว่า เนื่องจากมีความเร็วต่ำกว่า ตัวอย่างเช่นปรากฏการณ์โคลน์ ซึ่งอนุภาคควอนตัมที่มีความสัมพันธ์เชิงสัมพัทธภาพสูงสามารถทะลุผ่านกำแพงพลังงานที่สูงและกว้างได้อย่างง่ายดาย ตรงกันข้ามกับสัญชาตญาณ ดังนั้น กราฟีนจึงทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่าง ศาสตร์วัสดุกับสาขาฟิสิกส์พื้นฐานบางสาขา [31]

2.5 การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

สามารถแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่:

- 1) การกำจัดน้ำ – เกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิ 27-197°C ซึ่งเป็นการระเหยน้ำออกจากวัตถุดิบ เอกสารนี้เป็นเอกสารทบทวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) การไพโรไลซิส – ที่ช่วงอุณหภูมิ 197-497°C มีการปลดปล่อยก๊าซและน้ำมันทาร์ออกจากโครงสร้างของวัสดุ
- 3) การพัฒนาารูพรุนของโครงสร้างถ่าน – ในช่วง 497-847°C โครงสร้างถ่านคาร์บอนจะเริ่มเกาะตัวเป็นระเบียบมากขึ้น ในขณะที่น้ำหนักของวัสดุดิบลดลงอย่างมาก

2.6 ถ่านกัมมันต์

2.6.1 วิวัฒนาการของถ่านกัมมันต์

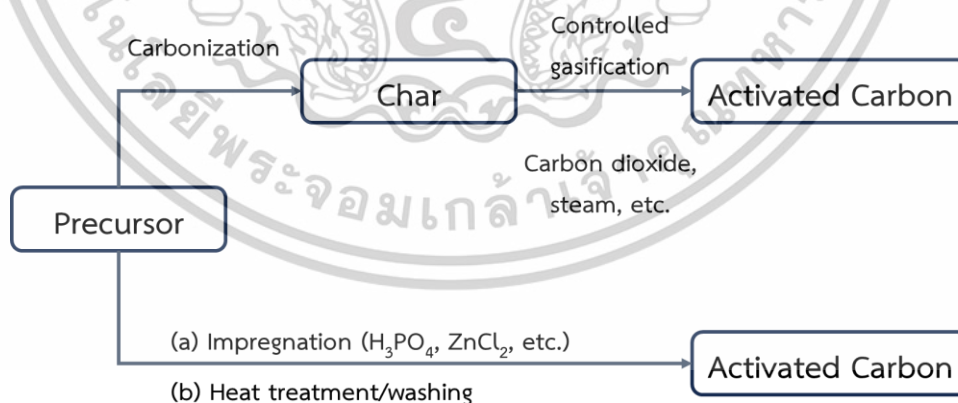
ถ่านกัมมันต์เริ่มมีการใช้งานตั้งแต่ปลายศตวรรษที่ 15 โดยถูกนำมาใช้ในการดูดซับสีและกลิ่นจากน้ำธรรมชาติในประเทศสหรัฐอเมริกา ต่อมาในปี 1811 เริ่มใช้ถ่านจากกระดูกสัตว์ในการดูดซับสี ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพมากกว่าถ่านไม้ สำหรับการฟอกสีของน้ำตาลทราย ในปี 1822 ถ่านผสมกับเลือดและซีเถ้าได้รับการพัฒนามีคุณสมบัติในการดูดสีที่สูงขึ้น

2.6.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งประเภทได้ตามหลายหลักเกณฑ์ ดังนี้:

- 1) การแบ่งตามขนาดอนุภาค
- 2) การแบ่งตามขนาดรูพรุน
- 3) การแบ่งตามความหนาแน่น
- 4) การแบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

2.6.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์



รูปที่ 2.6 วิธีการของการผลิตถ่านกัมมันต์

- 1) การเตรียมวัตถุดิบ เริ่มต้นจากวัสดุหลากหลายประเภทที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก เช่น ไม้ ซีลื้อย และถ่านประเภทต่างๆ

ค่าคาร์บอนคงตัวสูง (Fixed carbon)
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความชื้นต่ำ (Low moisture)
- ปริมาณสารระเหย (Volatile matter)
- ปริมาณขี้เถ้าต่ำ (Low ash content)
- ทนทานต่อการเสื่อมสภาพเมื่อเก็บ

การเลือกใช้วัตถุดิบจะพิจารณาจากคุณสมบัติที่เหมาะสมตามลักษณะการใช้งาน รวมถึงราคาของวัตถุดิบและกระบวนการผลิต โดยอาจจะต้องมีการคัดขนาด หรือบดวัสดุก่อนนำไปสู่กระบวนการเผา

- 2) การคาร์บอนไนซ์ (Carbonization) กระบวนการคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนสำคัญในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยเป็นการเผาวัตถุดิบในที่อับอากาศที่อุณหภูมิไม่เกิน 800 องศาเซลเซียส ขึ้นอยู่กับลักษณะของวัตถุดิบ โดยในระหว่างกระบวนการจะเกิดการกำจัดสารต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอนออกจากวัสดุ เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์ (char) ซึ่งมีโครงสร้างรูพรุนที่ไม่เป็นระเบียบ และสามารถใช้ในการกระตุ้นได้ในขั้นตอนถัดไป

ปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการคาร์บอนไนซ์ ได้แก่:

- อุณหภูมิ: การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณถ่านชาร์ลดลง ขณะที่น้ำมันทาร์และแก๊สจะเพิ่มมากขึ้น
- อัตราความร้อน: การให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจะทำให้ได้ถ่านที่มีรูพรุนขนาดใหญ่
- ตัวกลางของปฏิกิริยา: การใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวกลางสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ได้

- 3) การกระตุ้น (Activation) กระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์คือการเพิ่มพื้นที่ผิวและความสามารถในการดูดซับของถ่านผ่านกระบวนการเคมีและกายภาพ โดยการกระตุ้นนี้มีผลทำให้:

- พื้นที่ผิวของถ่านเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และส่วนที่มีอำนาจในการดูดซับจะถูกเปิดขึ้นมาแทน
- ความว่องไวในการดูดซับเพิ่มขึ้น โดยทำให้โครงสร้างของอะตอมคาร์บอนมีความสมดุลที่สูงขึ้น

การกระตุ้นสามารถทำได้โดยวิธีทางเคมีหรือกายภาพ ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานของถ่านกัมมันต์ที่ผลิต การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งตามกลไกวิธีการกระตุ้นที่ใช้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี คือ

- 1) การกระตุ้นทางกายภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

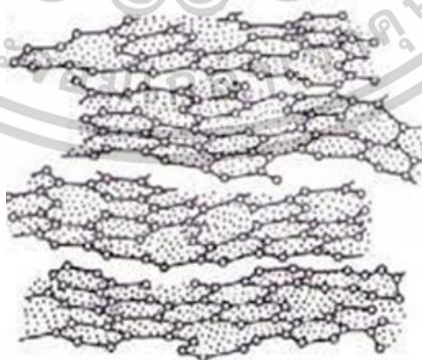
การกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่ส่งผลให้โครงสร้างพื้นผิวของคาร์บอนเปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะการเกิดรูพรุนหลากหลายขนาด ส่งผลให้พื้นที่ผิวเฉพาะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของวัสดุ

2) การกระตุ้นทางเคมี

การกระตุ้นด้วยสารเคมีเป็นกระบวนการที่วัตถุประสงค์โดยรวมกับสารกระตุ้นทางเคมีก่อนเข้าสู่ขั้นตอนคาร์บอนไนซ์ โดยเทคนิคนี้มีข้อได้เปรียบคือสามารถดำเนินการได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าวิธีอื่น อย่างไรก็ตาม อาจมีสารตกค้างในผลิตภัณฑ์สุดท้าย ซึ่งจำเป็นต้องผ่านกระบวนการล้างเพิ่มเติม ส่งผลให้ต้นทุนและระยะเวลาในการผลิตเพิ่มขึ้น

2.6.4 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกับแกรไฟต์ แต่การจัดเรียงของอะตอมในถ่านกัมมันต์มีความเป็นระเบียบที่น้อยกว่า โดยผลึกแกรไฟต์ประกอบด้วยชั้นคาร์บอนที่เรียงตัวเป็นวงกลมเบนซีน (benzene rings) หรือกลุ่มอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายหกเหลี่ยม ในแต่ละชั้นของแกรไฟต์ อะตอมคาร์บอนจะเชื่อมโยงกับอะตอมอื่นๆ โดยพันธะเดี่ยวในแผ่นราบ ซึ่งมีระยะห่างระหว่างอะตอมประมาณ 1.442 อังสตรอม อิเล็กตรอนที่ใช้ในการสร้างพันธะเหล่านี้เป็นอิเล็กตรอนซิกมา ในขณะที่อิเล็กตรอนที่เหลือจะเป็นอิเล็กตรอนไพ (pi) ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปทั่วโครงสร้างได้ ทำให้เกิดการเรโซแนนซ์ (resonance) เพื่อเพิ่มความเสถียรของโครงสร้าง ในระหว่างชั้นคาร์บอนจะมีแรงแวนเดอร์วาลส์ทำหน้าที่ยึดเหนี่ยว โดยระยะห่างระหว่างแต่ละแผ่นคาร์บอนจะประมาณ 3.354 อังสตรอม ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่ในทิศทางขนานกับแผ่นคาร์บอนเกิดขึ้นได้ง่าย และส่งผลให้โครงสร้างมีข้อบกพร่องได้ง่าย



รูปที่ 2.7 โครงสร้างผลึกของถ่านกัมมันต์[32]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.5 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

กระบวนการกระตุ้นทำให้เกิดถ่านที่ได้จากการเผามีลักษณะรูพรุนมากขึ้น โดยเกิดการสูญเสียสารประกอบระหว่างช่องของผลึกคาร์บอน ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและส่งผลต่อการดูดซับ การกระตุ้นที่ดีจะเพิ่มจำนวนรูพรุนในขณะที่ขนาดของรูไม่น่าจะมีผลมากนัก การศึกษาโครงสร้างของผิวพบว่า มีรูพรุนจำนวนมากและขนาดแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้ลึกเข้าไปในเนื้อถ่านอย่างไม่สม่ำเสมอ และมีลักษณะที่ไม่สามารถระบุได้ชัดเจน บางรูมีลักษณะเปิดข้างหนึ่ง ปิดข้างหนึ่งหรืออาจมีรูปร่างคล้ายตัววี

การจำแนกประเภทของรูพรุนตามขนาดรัศมีมีดังนี้:

- 1) แมโครพอร์ (Macropores): รูพรุนที่มีรัศมีตั้งแต่ 1,000-2,000 Å ปริมาตรระหว่าง 0.2-0.8 cm³/g และพื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 cm²/g แมโครพอร์มีบทบาทในกระบวนการส่งผ่านอนุภาคไปยังรูที่เล็กกว่า แต่ไม่สำคัญในกระบวนการดูดซับ
- 2) มีโซพอร์ (Mesopores): รูพรุนที่มีรัศมีระหว่าง 15-2,000 Å ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1-0.5 cm³/g และพื้นที่ผิว 20-100 cm²/g ตัวอย่างของสารดูดซับที่มีรูพรุนแบบนี้ ได้แก่ ซิลิกาเจล และ อะลูมินาเจล
- 3) ไมโครพอร์ (Micropores): รูพรุนที่มีรัศมีน้อยกว่า 12-15 Å ปริมาตร 0.2-0.6 cm³/g และพื้นที่ผิวสูงมาก โดยบางครั้งอาจสูงถึง 1,500 cm²/g ไมโครพอร์มีความสำคัญสูงสุดในการดูดซับเพราะมีพื้นที่ผิวและพลังงานการดูดซับมากที่สุด

ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ยังขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวถ่านด้วย หากผิวถ่านประกอบด้วยเพียงแคระนาบพื้นฐานที่ไม่มีหมู่ฟังก์ชันนัล การดูดซับจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ ซึ่งแรงนี้มีความอ่อนแอและทำให้โมเลกุลที่ดูดซับหลุดออกได้ง่าย แต่ถ้าผิวมีหมู่ฟังก์ชัน การดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแรงกว่า ซึ่งทำให้โอกาสที่สารจะหลุดออกจากถ่านกัมมันต์ลดลง

2.6.6 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

- 1) ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับแก๊สหรือไอ
 - ใช้ในการแยกส่วนของแก๊สโซลีนออกจากองค์ประกอบอื่นในแก๊สธรรมชาติ
 - ประยุกต์ในการแยกเบนซีนออกจากแก๊สที่เกิดขึ้นในกระบวนการอุตสาหกรรม
 - ถ่านกัมมันต์มีความสามารถในการดูดซับไอของตัวทำละลายที่อุณหภูมิห้อง และสามารถปลดปล่อยออกได้เมื่ออยู่ในสภาวะความดันต่ำ จึงนิยมนำมาใช้ในกระบวนการฟื้นตัวทำละลายที่ใช้แล้วในอุตสาหกรรม เช่น การสกัดสารการหมัก ตลอดจนการผลิตพลาสติกและยาง
- 2) ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการฟอกสีและทำให้ของเหลวบริสุทธิ์
 - ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาลเพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบมีความบริสุทธิ์มากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

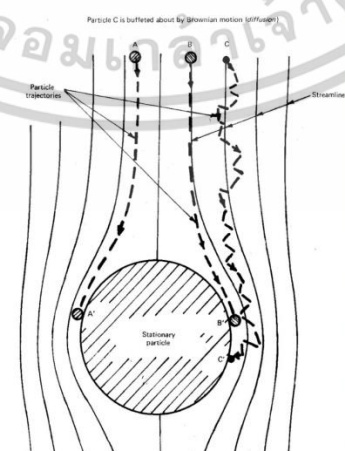
- ใช้ในการผลิตน้ำดื่มที่บริสุทธิ์โดยกำจัดสี รส และกลิ่น รวมทั้งใช้ในการบำบัดน้ำเสีย
- ใช้ในทางการแพทย์ เช่น ใช้ในการดูดซับยาเพื่อให้ปล่อยออกอย่างช้าๆ และสม่ำเสมอ ตัวอย่างเช่น

2.7 การดูดซับ

การดูดซับ(adsorption)เป็นคุณสมบัติของบางสารที่สามารถดึงดูดโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อาจอยู่ในสถานะของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะติดบนพื้นผิวของมัน ซึ่งถือเป็นการย้ายสารจากสถานะหนึ่งไปยังอีกสถานะหนึ่ง เช่น จากของเหลวไปยังของเหลว แก๊สไปยังของเหลว หรือของเหลวไปยังของแข็ง

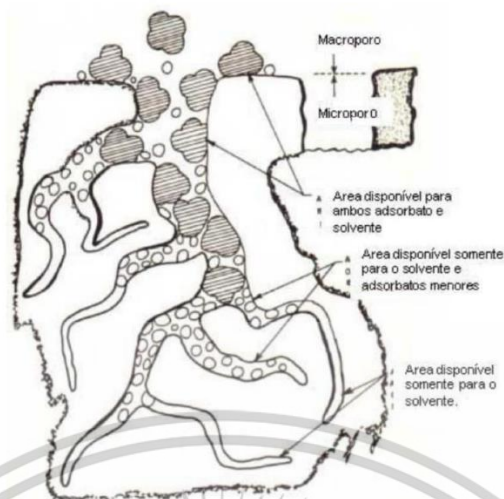
2.7.1 กลไกการดูดซับ

- 1) การดูดซับทางกายภาพการดูดซับในประเภทนี้เกิดได้จากแรงยึดเหนี่ยวในระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ที่ไม่แข็งแรงและไม่มีการเกิดพันธะเคมี ปฏิกิริยาการนี้สามารถเกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติและสามารถเกิดขึ้นได้ทันทีที่โมเลกุลเดินทางมาถึงพื้นผิวของตัวดูดซับ การดูดซับจะเกิดได้รวดเร็วและอัตราการดูดซับจะช้าลงเมื่อมีความพรุนสูง
- 2) การดูดซับทางเคมีการดูดซับประเภทนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง โดยจะมีปฏิกิริยาเคมีระหว่างตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ สารที่เกิดจากปฏิกิริยานี้จะมีการสร้างสารประกอบระหว่างตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับที่ผิว ซึ่งทำให้ปริมาณของสารที่ถูกดูดซับลดลง การดูดซับทางเคมีจะปล่อยความร้อนออกมามากกว่าและการดูดซับจะเกิดได้ในปริมาณน้อยต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เพราะปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นได้เฉพาะบางพื้นที่บนผิวของตัวดูดซับ การดูดซับทางเคมีไม่สามารถเกิดการ desorption



รูปที่ 2.8 กลไกการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยในน้ำเข้าหาถ่านกัมมันต์[33]

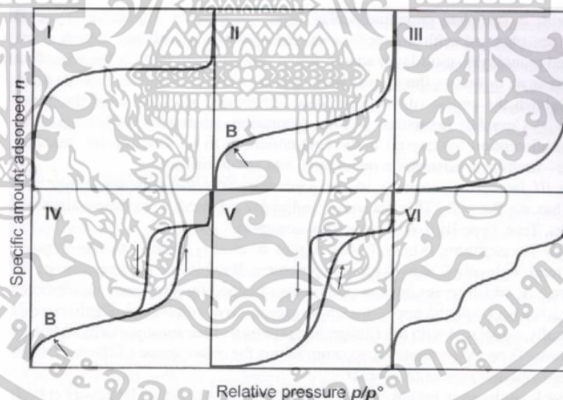
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แสดงถึงโพรงหรือช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์[33]

2.7.2 ไอโซเทอมการดูดซับ

การศึกษากระบวนการดูดซับจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น อุณหภูมิ ความดัน ชนิดของสาร และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้เป็นสารดูดซับ ไอโซเทอมของการดูดซับช่วยให้เข้าใจลักษณะและกลไกของกระบวนการดูดซับในวัสดุต่าง ๆ โดย IUPAC ได้จำแนกไอโซเทอมออกเป็น 6 ประเภท ซึ่งแต่ละประเภทสะท้อนถึงพฤติกรรมของการดูดซับที่แตกต่างกันในวัสดุประเภทต่าง ๆ



รูปที่ 2.10 ไอโซเทอมการดูดซับ[34]

2.8 การอัดประจุและการคายประจุ (Charge-Discharge)

2.8.1 การเก็บประจุ

การเก็บประจุในตัวเก็บประจุ (capacitor) หมายถึงกระบวนการที่อิเล็กตรอนถูกสะสมไว้บนแผ่นเพลตหนึ่งของตัวเก็บประจุ เมื่อเชื่อมต่อวงจรกับแหล่งพลังงาน เช่น แบตเตอรี่ อิเล็กตรอนจากขั้วลบของแบตเตอรี่จะเคลื่อนที่เข้าสู่แผ่นเพลตด้านหนึ่ง ทำให้แผ่นเพลตดังกล่าวมีศักย์ไฟฟ้าลบเพิ่มขึ้น การสะสมของประจุลบนี้จะสร้างสนามไฟฟ้าซึ่งเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแผ่นเพลตฝั่งตรงข้ามออกไป ส่งผลให้แผ่นเพลตอีกด้านมีประจุบวกสุทธิเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ยังมีการผลึกเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนออกจากแผ่นเพลตฝั่งตรงข้ามมากเท่าใด ปริมาณประจุบวกที่เหลืออยู่บนแผ่นเพลตก็จะยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย

2.8.2 การคายประจุ

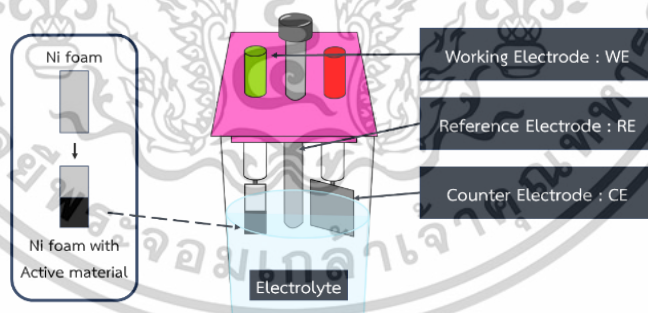
เมื่อมีการชาร์จประจุให้กับตัวเก็บประจุแล้ว อิเล็กตรอนจะยังคงสะสมอยู่ที่แผ่นเพลตด้านลบ ทรายใดที่วงจรยังไม่ปิด กล่าวคือ ยังไม่มีการเชื่อมต่อระหว่างแผ่นเพลตทั้งสอง อย่างไรก็ตาม เมื่อมีการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้าระหว่างเพลตทั้งสอง อิเล็กตรอนจะไหลจากแผ่นเพลตที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำ (ด้านลบ) ไปยังแผ่นเพลตที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่า (ด้านบวก) ผ่านทางวงจรภายนอก ซึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า "การคายประจุ" (discharging) [35]

2.9 สมบัติเคมีเชิงไฟฟ้า

การตรวจสอบสมบัติเคมีเชิงไฟฟ้าของตัวซูเปอร์คาปาซิเตอร์ มี 3 เทคนิค คือ เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry : CV) เทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ (GCD) และเทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอลอิมพีแดนซ์ (EIS)

2.9.1 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry : CV)

เทคนิคนี้ใช้ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยให้ความต่างศักย์จากภายนอกเข้าสู่ภายในเซลล์ ซึ่งในเซลล์ประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า (electrode) และ อิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) เพื่อที่จะวัดกระแสที่ได้ จากการเกิดปฏิกิริยา สำหรับข้อมูลที่จะได้จากการใช้เทคนิคนี้ เกิดจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจาก ปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันของสารเคมีที่จะนำมาศึกษา สำหรับการศึกษานั้น จะศึกษาบน ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode : WE)



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบเซลล์เคมีไฟฟ้า

เซลล์เคมีไฟฟ้าประกอบด้วย

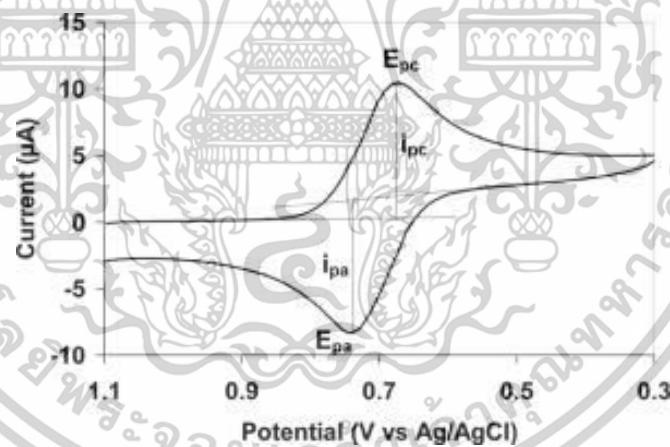
- 1) ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode : WE) ใช้ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของวัสดุที่อยู่บนขั้ว ทำมาจากวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ มีความเสถียรสูง
- 2) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode : RE) ทำหน้าที่อ้างอิงศักย์ไฟฟ้าของระบบเป็นตัวควบคุมความต่างศักย์ของระบบและควบคุม ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง มีความต่างศักย์ที่แน่นอนไม่แปรผัน หรืออาจจะขึ้นอยู่กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเปลี่ยนแปลงของกระแสในวงจร นิยมใช้ saturated calomel (SCE) และ silver-silver chloride (Ag/AgCl)

- 3) เคาน์เตอร์อิเล็กโทรด (Counter Electrode : CE) ต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าทำงานเพื่อส่ง และรับอิเล็กตรอนที่ เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้าทำงาน ดังนั้นการวัดกระแสของระบบทดสอบจะวัด กระแสที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานและเคาเตอร์อิเล็กโทรด
- 4) อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) สารละลายที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการถ่ายโอนไอออนระหว่างกระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน เพื่อสนับสนุนให้กระบวนการเคลื่อนย้ายประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ โดยอิเล็กโทรไลต์ที่มีคุณภาพดีควรมีคุณสมบัติที่สำคัญ เช่น ความต้านทานไฟฟ้าต่ำ ความสามารถในการแตกตัวเป็นไอออนสูง ความหนาแน่นของไอออนในระบบมากพอ และต้องคงตัวภายใต้สภาวะการทำงานทั้งทางเคมีและไฟฟ้าได้อย่างเหมาะสม

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (แกน x) กับความหนาแน่นของกระแสที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า ต่อ เวลา (scan rate) เกิดบนขั้วไฟฟ้าทำงาน (แกน y) ความหนาแน่นของกระแสคือความต่างศักย์ไฟฟ้าขั้วไฟฟ้า ทำงาน และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และความหนาแน่น สำหรับการวัดจะต้องกำหนดอัตราการเพิ่ม



รูปที่ 2.12 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรี[36]

การคำนวณค่า C_{sc} จากกราฟ จากสมการ

$$C_{sc} = \frac{\int IdV}{mv\Delta V}$$

$\int IdV$ = พื้นที่ใต้กราฟ CV เฉลี่ย (Amp Volt)

C_{sc} = ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (F/g)

m = Active material เคลือบบนนิกเกิลโพลิม (g)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

v = อัตราการแสดกน (Volt/s)

ΔV = ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volt)

2.9.2 เทคนิคัลป์วานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ (Galvanostatic charge/ discharge : GCD)

สำหรับเทคนิคนี้ นิยมวัดค่า C_{sc} จากขั้วไฟฟ้าทำงาน ใช้ศึกษาความเสถียรของขั้วไฟฟ้าทำงานโดยการอัดและคายประจุ หลายรอบ (มากกว่า 1000 รอบ) เทคนิคและหลักการ คือ ให้กระแสคงที่ไหลเข้าระบบและออกจากระบบและวัดค่าความต่างศักย์เทียบกับเวลา กราฟ แสดงความสัมพันธ์เวลา (แกนx) กับความต่างศักย์ (แกนy)

การคำนวณค่า C_{sc} จากสมการ

ค่าความจุไฟฟ้า (C)

$$C_{sc} = \frac{Q}{V}$$

เมื่อ Q คือค่าประจุไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ

$$Q = i(\Delta t)$$

จะได้

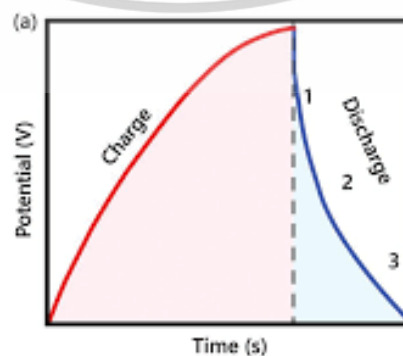
$$C_{sc} = \frac{i(\Delta t)}{v}$$

กรณีคายประจุไฟฟ้า

$$C_{sc} = \frac{i(\Delta t)}{m(\Delta v)}$$

i = กระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ออกจากระบบ (Amp)

Δt = ช่วงเวลาของการคายประจุไฟฟ้า (s)



รูปที่ 2.13 กราฟการอัดและการคายประจุไฟฟ้า[37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9.3 เทคนิคอิเล็กโทรเคมีคอลอิมพีแดนซ์ (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)

คือเทคนิคทางอิเล็กโทรเคมีที่ใช้วัดความต้านทานและคุณสมบัติการถ่ายเทประจุของวัสดุหรืออิเล็กโทรด โดยทำการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบต่อ แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC voltage) ขนาดเล็กที่ถูกป้อนเข้าไปในช่วงความถี่ต่าง ๆ

หลักการทำงาน

- 1) ป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC signal) ขนาดเล็ก (เช่น 5-10 mV) ไปยัง เซลล์ไฟฟ้าเคมี
- 2) เปลี่ยนความถี่ของสัญญาณ AC ในช่วงกว้าง (มักอยู่ในช่วง mHz ถึง MHz)
- 3) วัด กระแสไฟฟ้าที่ตอบสนอง แล้วคำนวณเป็น Impedance (Z) ซึ่งเป็นการรวมกันของความต้านทาน (Resistance) และ ความจุไฟฟ้า (Capacitance)

2.10 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์

2.10.1 เครื่องวิเคราะห์ของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Diffractometer)

เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffractometer: XRD) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งช่วยให้สามารถระบุชนิดของสารประกอบและศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของวัสดุได้ เนื่องจากวัสดุแต่ละชนิดมีโครงสร้างผลึกที่เป็นเอกลักษณ์ รูปแบบของสัญญาณการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นจึงแตกต่างกันไป ทำให้สามารถใช้ XRD ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารและศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างผลึกกับคุณสมบัติของวัสดุได้



รูปที่ 2.14 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์[38]

2.10.2 รามานสเปกโตรสโกปี (Raman spectroscopy)

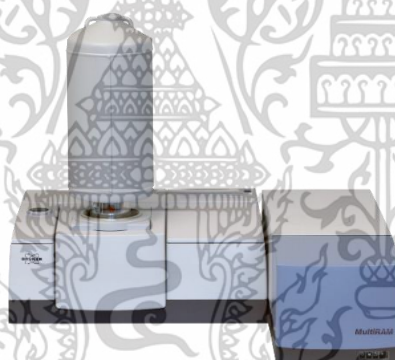
รามานสเปกโตรสโกปี (Raman Spectroscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาลักษณะทางโครงสร้างของโมเลกุล โดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสงเมื่อมีการส่งลำแสงเลเซอร์ไปยังตัวอย่าง การเอกซเรย์เป็นเอกสิทธิ์หลังวันเจสสำหรับนักเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนักเรียนได้เห็นและใช้ประโยชน์จากการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระเจิงแสงที่เกิดขึ้นจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการสั่นของพันธะภายในโมเลกุล ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการระบุองค์ประกอบและคุณสมบัติของสารได้

ปัจจุบันเทคนิคนี้ถูกนำมาใช้ในหลายสาขา เช่น

- 1) การวิเคราะห์ทางเคมีและพอลิเมอร์
- 2) การตรวจสอบสารในด้านสิ่งแวดล้อม
- 3) การใช้งานในนิติวิทยาศาสตร์
- 4) การศึกษาเกี่ยวกับวัสดุชีวภาพและไม้
- 5) การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์
- 6) การวิเคราะห์วัสดุในสาขาวิทยาศาสตร์อื่นๆ

รามานสเปกโทรสโกปีสามารถใช้ในการวิเคราะห์ได้ทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยสเปกตรัมที่ได้จะบ่งบอกถึงตำแหน่งของพีคที่สัมพันธ์กับหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล ซึ่งเกิดจากการกระเจิงแสง เทคนิคนี้ยังช่วยให้สามารถศึกษาความเปลี่ยนแปลงของความถี่การกระเจิงแสง รวมถึงความเข้มและรูปร่างของพีคในสเปกตรัม ซึ่งมีความสำคัญในการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของตัวอย่าง



รูปที่ 2.15 เครื่องรามานสเปกโทรสโกปี[39]

2.10.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscope: SEM) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาพื้นผิวของตัวอย่างในระดับไมโครเมตรถึงนาโนเมตร แม้ว่ากำลังขยายของ SEM จะไม่สูงเท่ากับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM) แต่ SEM มีข้อดีในการสร้างภาพที่ให้ความคมชัดและรายละเอียดของพื้นผิวได้ดี หนึ่งในจุดเด่นของ SEM คือ ไม่จำเป็นต้องเตรียมตัวอย่างให้บางเหมือนใน TEM เนื่องจากการสร้างภาพไม่ได้อาศัยอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านตัวอย่าง แต่เกิดจากการวิเคราะห์อิเล็กตรอนที่สะท้อนกลับมาจากพื้นผิวของตัวอย่าง ซึ่งช่วยให้สามารถศึกษารายละเอียดของพื้นผิวได้ในเชิงสามมิติ ทำให้เทคนิคนี้ถูกนำมาใช้ในหลายสาขา เช่น การศึกษาสัณฐานของเนื้อเยื่อและเซลล์ การวิเคราะห์หน้าตัดของวัสดุโลหะ และการตรวจสอบโครงสร้างของวัสดุที่มีความซับซ้อน

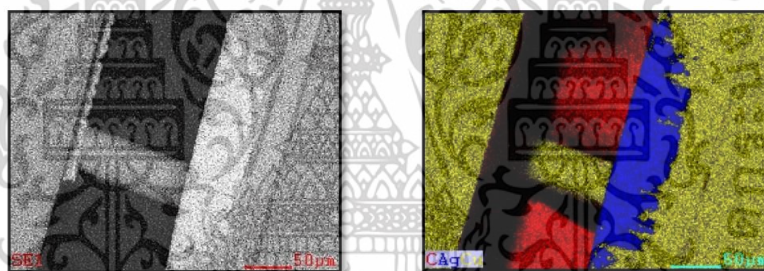
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)[40]

2.10.4 การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)

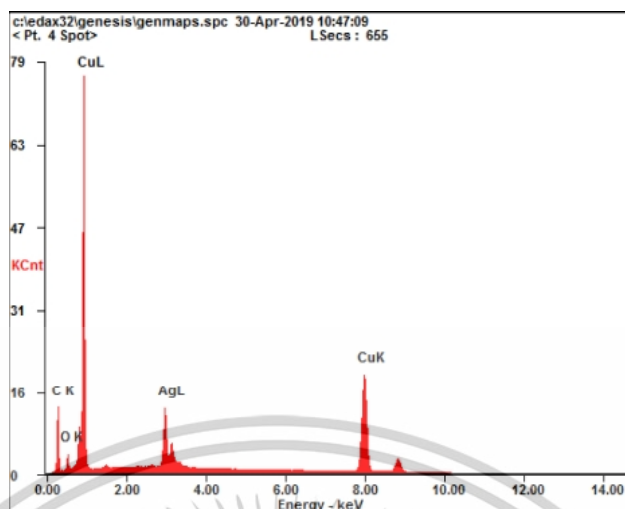


รูปที่ 2.17 การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุแบบ mapping analysis[41]

ตามหลักการของเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) เมื่อพลังงานจากลำอิเล็กตรอนตกกระทบบนพื้นผิวของตัวอย่าง อาจทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) โดยการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นในของอะตอมหลุดออกไป เพื่อรักษาสสมดุลของสถานะพลังงาน อิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นพลังงานที่สูงกว่าจะเคลื่อนที่ลงมาแทนที่ตำแหน่งที่ว่าง ซึ่งกระบวนการนี้จะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่เรียกว่า รังสีเอกซ์แบบแคแวกเทอริสติก (Characteristic X-ray) ซึ่งมีพลังงานจำเพาะของแต่ละธาตุ เมื่อรังสีเอกซ์นี้ถูกตรวจจับด้วยหัววัดชนิด Silicon Drift Detector (SDD) หัววัดจะเปลี่ยนพลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบบให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมีขนาดแปรผันตามพลังงานของรังสีดังกล่าว สัญญาณที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังระบบประมวลผลเพื่อสร้างสเปกตรัมรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์

เทคนิค EDS สามารถใช้ในการวิเคราะห์ธาตุได้ทั้งในเชิงคุณภาพ (Qualitative Elemental Analysis) เพื่อระบุชนิดของธาตุที่ปรากฏในตัวอย่าง และในเชิงปริมาณ (Quantitative Elemental Analysis) เพื่อประมาณปริมาณหรือเปอร์เซ็นต์ของแต่ละธาตุในตัวอย่างอย่างแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 สเปกตรัมด้วยเทคนิคจากการวิเคราะห์ EDS[42]

2.10.5 เครื่องวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง (Surface area and porosity analyzer)

เครื่องมือวิเคราะห์คุณลักษณะของพื้นที่ผิวถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุ โดยสามารถวิเคราะห์ขนาดของรูพรุน (Pore size diameter) พื้นที่ผิวของวัสดุ (Surface area) และปริมาตรของรูพรุน (Pore volume) ซึ่งครอบคลุมช่วงขนาดต่าง ๆ ได้แก่ ไมโครพอร์ (Micropore), เมโซพอร์ (Mesopore) และมาโครพอร์ (Macropore) นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ประเมินพฤติกรรมการดูดซับและคายก๊าซ (Adsorption/Desorption Isotherm) ตลอดจนการดูดซับทางเคมี (Chemisorption) ได้ โดยอาศัยเทคนิค Vacuum Volumetric

ด้วยหลักการเหล่านี้ เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของพื้นที่ผิวจึงเป็นเครื่องมือที่มีบทบาทสำคัญในการศึกษาสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดซับและปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยและอุตสาหกรรมได้หลากหลาย[34]



รูปที่ 2.19 เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะพื้นที่ผิว (Surface Area Analyzer) [43]

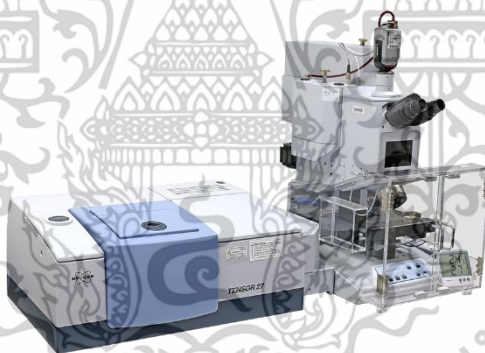
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.6 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรไมโครสโคป (FTIR Micro-Spectrometer)

Fourier Transform Infrared Spectroscopy: FTIR เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่ใช้สำหรับตรวจสอบชนิดของสารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ รวมถึงลักษณะของพันธะเคมีหรือหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุล โดยสามารถใช้งานได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ หลักการทำงานอาศัยการวัดการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงกลางของสเปกตรัม (mid-infrared region) ซึ่งครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นประมาณ 2.5–50 ไมโครเมตร หรือช่วงเลขคลื่น 4000–400 cm^{-1}

FTIR เป็นเทคนิคที่ไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive) กล่าวคือ ไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางเคมีต่อสารที่วิเคราะห์หลังการตรวจวัด นอกจากนี้ยังมีข้อดีคือ สะดวกรวดเร็ว ใช้งานง่าย ใช้ระยะเวลาในการวัดสั้น และมีความปลอดภัยสูง โดยสามารถใช้วิเคราะห์ตัวอย่างได้ทั้งในสถานะของแข็งและของเหลว สำหรับการวิเคราะห์เฉพาะจุดหรือพื้นที่ขนาดเล็กสามารถใช้กล้องจุลทรรศน์อินฟราเรด (FTIR Microspectroscope) ซึ่งรองรับทั้งโหมดการวัดแบบส่องผ่าน (transmission) และแบบสะท้อนกลับ (reflection) โดยมีระบบตรวจจับรังสีอินฟราเรดให้เลือกใช้งาน 2 ประเภท

- 1) MCT detector
- 2) Focal Plane Array (FPA) detectors



รูปที่ 2.20 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม อินฟราเรดสเปกโทรไมโครสโคป (FTIR Micro-Spectrometer)[44]

2.10.7 เครื่องวัดทางเคมีไฟฟ้า

เครื่องวัดศักย์และกระแสไฟฟ้าในระบบเคมีไฟฟ้า (Potentiostat/Galvanostat) ทำหน้าที่ควบคุมแรงดันไฟฟ้าหรือกระแสไฟฟ้า และตรวจวัดการตอบสนองทางไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีในตัวอย่างที่วิเคราะห์ โดยสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับเทคนิควิเคราะห์ต่าง ๆ ได้แก่ โวลแทมเมตรี (Voltammetry), โปเทนชิโอเมตรี (Potentiometry) และอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโกปีเชิงเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Impedance Spectroscopy; EIS) การทำงานของเครื่องจะเริ่มจากการป้อนแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าเข้าสู่ระบบที่มีตัวอย่าง เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าในเซลล์ จากนั้นจะบันทึกความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้น แล้วนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณหาความเข้มข้นของสาร อัตราการกัดกร่อน รวมถึงการประเมินอายุการใช้งานของวัสดุหรือ อิเล็กโทรดแต่ละชนิด



รูปที่ 2.21 เครื่องวัดทางเคมีไฟฟ้า[45]

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

A. Berrueta, et al.[2] ระบบกักเก็บพลังงานกำลังมีบทบาทสำคัญเพิ่มมากขึ้นในหลากหลาย การประยุกต์ใช้งาน เช่น ยานยนต์ไฟฟ้า หรือระบบเชื่อมต่อกับโครงข่ายไฟฟ้า ในบริบทนี้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SCs) กำลังได้รับความนิยมเนื่องจากมีความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง ด้วยเหตุนี้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์จึงเป็นหัวข้อวิจัยที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางและมีงานวิจัยจำนวนมากเผยแพร่เกี่ยวกับวิศวกรรมวัสดุ การวิเคราะห์สมรรถนะ การรวบรวมเหตุการณ์สำคัญที่สุดในหัวข้อนี้จึงมีความ จำเป็น เพื่อให้ผู้วิจัยในสาขาที่เกี่ยวข้องได้รับข้อมูลอัปเดตเกี่ยวกับศักยภาพใหม่ ๆ ของเทคโนโลยีนี้ บทความปริทัศน์ฉบับนี้ครอบคลุมประเด็นการวิจัยและการประยุกต์ใช้งานของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ในปัจจุบัน โดยเน้นความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของวัสดุกับลักษณะทางไฟฟ้า เริ่มต้นด้วยการอธิบาย กลไกการกักเก็บพลังงานและวัสดุที่ใช้ในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ โดยจำแนกประเภทของซูเปอร์คาปาซิ เตอร์ตามวัสดุสรุปคุณสมบัติที่สำคัญ และเชื่อมโยงคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้ากับสมรรถนะทางไฟฟ้า จากความสนใจอย่างสูงในด้านการสร้างแบบจำลองระบบ และจำนวนงานวิจัยที่เผยแพร่ในหัวข้อนี้ เทคนิคการสร้างแบบจำลองจึงได้รับการจำแนก อธิบายและเปรียบเทียบ โดยกล่าวถึงจุดแข็งและ จุดอ่อน รวมถึงเทคนิคการทดลองที่ใช้ในการวัดคุณสมบัติตามแบบจำลอง นอกจากนี้ ยังมีการ วิเคราะห์การนำซูเปอร์คาปาซิเตอร์ไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม รวมถึงการคาดการณ์การเติบโตของ ตลาด บทความวิเคราะห์นี้สะท้อนให้เห็นถึงการขยายตัวของตลาดซูเปอร์คาปาซิเตอร์ในปัจจุบันและระบุ แนวโน้มการวิจัยที่มีศักยภาพสูงในสาขานี้

M.E. Şahin, et al.[4] การกักเก็บพลังงานในปริมาณมหาศาลถือเป็นความท้าทายสำคัญ สำหรับการผลิตพลังงานไฟฟ้าตลอดหลายปีที่ผ่านมา นักวิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการกักเก็บ พลังงานและการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานอย่างต่อเนื่อง ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา นักวิจัยได้ให้ ความสนใจในการพัฒนาวัสดุและเทคนิคใหม่ ๆ เพื่อกักเก็บพลังงานในปริมาณที่มากขึ้นและมี ประสิทธิภาพสูงขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แหล่งพลังงานหมุนเวียนและเทคโนโลยียานยนต์ไฟฟ้าได้กลาย มาเป็นแรงผลักดันสำคัญในการศึกษาทางวิทยาศาสตร์เหล่านี้ ในช่วงที่ผ่านมา นักวิทยาศาสตร์ และ ผู้ผลิตได้เสนอให้ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC) เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานทางเลือกหรือแบบไฮบริด บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทบทวนการประยุกต์ใช้งานและพัฒนาการของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ อย่างครอบคลุม โดยเริ่มต้นจากการศึกษารวบรวมที่เกี่ยวข้องอย่างละเอียด ผลการวิจัยในอดีตของ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ได้ถูกรวบรวมและนำเสนอในบทความนี้ โครงสร้าง หลักการทำงาน และวัสดุของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ได้รับการอธิบายอย่างละเอียดเพื่อการวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ข้อดีและข้อเสีย โพรไฟล์ตลาด ตลอดจนเทคโนโลยีใหม่ ๆ ที่เกี่ยวข้องกับบริษัทผู้ผลิตได้รับการวิเคราะห์เพื่อจัดทำารประเมินเชิงเทคโนโลยีและเศรษฐกิจของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ นอกจากนี้ บทความนี้ยังศึกษาการใช้งานซูเปอร์คาปาซิเตอร์ในยานยนต์ไฟฟ้า ระบบไฟฟ้า ระบบกักเก็บพลังงานแบบไฮบริดที่รวมแหล่งพลังงานหมุนเวียน ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานอื่น ๆ อีกด้วย นอกจากนี้ ยังมีการสำรวจหลักการออกแบบการสร้างแบบจำลองของซูเปอร์คาปาซิเตอร์ร่วมกับการทดสอบการชาร์จและการคายประจุ รวมถึงการวิเคราะห์องค์ประกอบอื่น ๆ และต้นทุนในการผลิตโมดูลที่มี E_d สูงอย่างกะทัดรัดอีกด้วย

A.G. Olabi, et al.[7] ความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ตลอดจนทิศทางในอนาคตของการขนส่งและการผลิตพลังงาน ได้ผลักดันให้นักวิจัยพัฒนาอุปกรณ์รุ่นใหม่ที่มีความจุกำลังไฟสูงขึ้น วงจรอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น และความหนาแน่นพลังงานที่เหนือกว่าซูเปอร์คาปาซิเตอร์ถือเป็นอุปกรณ์ที่มีศักยภาพสูง เนื่องจากมีความหนาแน่นกำลังไฟหายอดเยี่ยมและวงจรอายุการใช้งานยาวนานเป็นพิเศษ อย่างไรก็ตาม ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่มีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบัน ซึ่งมักใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวสูงและสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นอิเล็กโทรไลต์ ยังประสบปัญหาความหนาแน่นพลังงานที่ต่ำกว่ามาตรฐาน เนื่องจากข้อจำกัดในการเข้าถึงพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าและขอบเขตศักย์ไฟฟ้าที่จำกัดของอิเล็กโทรไลต์ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาและประเมินวัสดุขั้วไฟฟ้าที่มีความจุสูงใหม่ ๆ และอิเล็กโทรไลต์ที่ล้ำสมัย เช่น ของเหลวไอออนิก พอลิเมอร์เจล หรือแม้กระทั่งอิเล็กโทรไลต์สถานะของแข็ง อย่างเข้มข้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา บทปริทัศน์ฉบับย่อนี้ได้อภิปรายประเภทต่าง ๆ ของซูเปอร์คาปาซิเตอร์อย่างละเอียด โดยจำแนกตามกลไกการกักเก็บประจุ เนื่องจากวัสดุคาร์บอนเป็นหัวใจสำคัญของการศึกษาในครั้งนี้ จึงได้มีการกล่าวถึงพารามิเตอร์ในการสังเคราะห์ เช่น การทำให้เป็นคาร์บอน การกระตุ้น และการปรับแต่งฟังก์ชัน ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของวัสดุ และส่งผลต่อประสิทธิภาพของซูเปอร์คาปาซิเตอร์โดยตรง นอกจากนี้ ยังมีการทบทวนการสังเคราะห์และการประยุกต์ใช้งานของวัสดุคาร์บอนประเภทต่าง ๆ ได้แก่ นาโนทิวบ์คาร์บอน กราฟีน และคาร์บอนกัมมันต์ พร้อมทั้งสรุปผลและแนวโน้มในอนาคต

S. Ghosh, et al.[11] ในทุกๆวันของความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสมัยใหม่ ปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งคือวิธีการจัดหาพลังงานให้เพียงพอต่อความต้องการของการประยุกต์ใช้งานทางวิทยาศาสตร์ทั้งหมด เนื่องจากทรัพยากรเชื้อเพลิงฟอสซิลกำลังลดน้อยลงอย่างรวดเร็ว จึงมีความจำเป็นต้องแสวงหาทางเลือกอื่นเพื่อตอบสนองความต้องการของโลกในอนาคต ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดยังเป็นแรงผลักดันให้เกิดนวัตกรรมที่สามารถใช้ทรัพยากรได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น งานวิจัยนี้มีพื้นฐานมาจากกระบวนการสังเคราะห์อย่างง่ายของคาร์บอนแข็งที่ได้จากชีวมวล และการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ทางเคมีไฟฟ้า โดยใช้วัสดุคาร์บอนราคาถูก เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถสังเคราะห์ได้ง่าย มาเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับการกักเก็บพลังงานไฟฟ้าเชิงเคมี ในงานนี้ได้มีการสังเคราะห์คาร์บอนแข็งจำนวนสี่ชนิด ได้แก่

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนแข็งจากลำต้นกล้วยที่ผ่านการกระตุ้นด้วย (KHC), คาร์บอนจากลำต้นกล้วยที่ผ่านการบำบัดด้วยกรดฟอสฟอริก (PHC), คาร์บอนแข็งจากซังข้าวโพด (CHC) และคาร์บอนแข็งจากแป้งมันฝรั่ง (SHC) เพื่อนำมาทดสอบเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ โดยคาร์บอนแข็งที่ผ่านการกระตุ้นด้วย KOH ให้ค่าความจุจำเพาะสูงถึง 479.23 F/g ตามที่คำนวณจากกราฟโวลแทมโมแกรมของวงจรการชาร์จ-คายประจุ มีการวิเคราะห์เชิงลึกเพื่อตีความผลลัพธ์ที่ได้กับคุณสมบัติของวัสดุโดยละเอียด งานวิจัยนี้จึงนำเสนอการวิเคราะห์อย่างครอบคลุมเกี่ยวกับหลักวิทยาศาสตร์ที่อยู่เบื้องหลังองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบกักเก็บพลังงานไฟฟ้าเชิงเคมี ตลอดจนเหตุผลที่จำเป็นต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์ที่หลากหลายในการประเมินคุณภาพและความน่าเชื่อถือของวัสดุสำหรับการประยุกต์ใช้งานในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ทางเคมีไฟฟ้า

N. Ngamjumrus, et al. [5] เปลือกทุเรียนเหลือทิ้งถูกนำมาใช้ในการผลิตคาร์บอนกัมมันต์ (Activated Carbon: AC) โดยผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลและการบดแบบสามมิติ (3-D Ball Milling) จากนั้นได้ทำการผสมกราฟีนออกไซด์รีดิวซ์ (Reduced Graphene Oxide: rGO) เข้ากับคาร์บอนจากเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการกระตุ้น (DC) เพื่อเสริมสมบัติทางเคมีไฟฟ้าในการผลิตอุปกรณ์ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC) การตรวจสอบด้วย (SEM) ของคาร์บอนกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล (AC-HDC) และ AC-HDC ที่ผ่านการบดแบบสามมิติเป็นเวลา 15 นาที (rGO/AC-HDC-3D15M) พบว่ามีอนุภาคที่เกาะกลุ่มอย่างหนาแน่นและกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ พร้อมทั้งมีโครงสร้างรูพรุนที่ดี ตัวอย่าง rGO/AC-HDC-3D15M แสดงค่า (SSA) สูงถึง 2311 ตารางเมตรต่อกรัม ตามวิธีการของ (BET) และมีขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.88 นาโนเมตร ผลการทดสอบทางเคมีไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง rGO/AC-HDC-3D15M มีค่าความจุจำเพาะ (Specific Capacitance: Cs) สูงสุดที่ 545.78 ฟารัดต่อกรัม ค่าความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้า (Power Density: Pd) อยู่ที่ 260.834 วัตต์ต่อกิโลกรัม และค่า (Energy Density: Ed) อยู่ที่ 60.834 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม อุปกรณ์ซูเปอร์คาปาซิเตอร์แบบเหรียญที่ใช้ขั้วไฟฟ้า rGO/AC-HDC-3D15M ร่วมกับอิเล็กโทรไลต์ 3M KOH แสดงค่าความจุจำเพาะสูงถึง 65.585 ฟารัดต่อกรัม โดยมีค่าความหนาแน่นของพลังงาน 5.123 วัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม และ E_d 47.286 วัตต์ต่อกิโลกรัม ความแปลกใหม่ของงานวิจัยนี้อยู่ที่ (1) โครงสร้างของวัสดุผสม rGO/AC-HDC-3D15M สามารถส่งเสริมการเคลื่อนที่ของไอออนและอิเล็กตรอนได้อย่างรวดเร็วในระหว่างกระบวนการชาร์จและคายประจุ และ (2) วัสดุผสม rGO/AC-HDC-3D15M แสดงพฤติกรรมของคาปาซิเตอร์ชนิดชั้นประจุไฟฟ้าคู่ (Electric Double-Layer Capacitor: EDLC) ซึ่งสามารถก่อให้เกิดผลเสริมเชิงบวกต่อปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ พื้นที่ผิวสูงของวัสดุผสม rGO/AC-HDC-3D15M ยังอาจช่วยลดปัญหาการขยายตัวของปริมาตรขั้วไฟฟ้าในระหว่างการใช้งานหลายรอบ ดังนั้น งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าวัสดุผสม rGO/AC-HDC-3D15M ที่เตรียมโดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลร่วมกับการบดแบบสามมิติสามารถแสดงสมรรถนะทางเคมีไฟฟ้าที่ดีเยี่ยมในการผลิตอุปกรณ์ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ชนิด EDLC

M. Jayachandran, et al. [17] วัสดุคาร์บอนกัมมันต์ (Activated Carbon: AC) ถูกเตรียมจากใบไม้ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์ภายใต้อุณหภูมิสูงที่ 500 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำคาร์บอนที่ได้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้สารละลาย (KOH) เป็นตัวกระตุ้น โครงสร้างผลึกและปฏิสัมพันธ์ของโมเลกุลของคาร์บอนกัมมันต์ที่เตรียมได้ได้รับการยืนยันผ่านการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค (XRD) และ (FT-Raman) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุถูกวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านพร้อมด้วยระบบวิเคราะห์องค์ประกอบ (FE-SEM/EDS) ความแปลกใหม่ของคาร์บอนกัมมันต์นี้ได้รับการศึกษาโดยใช้อิเล็กโทรไลต์น้ำหลายชนิด ได้แก่ โซเดียมซัลเฟต 1 โมลาร์ (1 M Na₂SO₄), โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.5 โมลาร์ (0.5 M KOH) และ ส่วนผสมของทั้งสองชนิด (1 M Na₂SO₄ + 0.5 M KOH) ผลการทดสอบพบว่า คาร์บอนกัมมันต์ให้ค่าความจุจำเพาะสูงถึง 290 F/g ที่กระแสไฟฟ้า 1 A/g เมื่อใช้อิเล็กโทรไลต์แบบผสม (1 M Na₂SO₄ + 0.5 M KOH) นอกจากนี้ ค่าความคงตัวของความจุ (Capacity Retention) ยังคงรักษาได้ถึง 93% หลังจากผ่านการชาร์จ-คายประจุ 1000 รอบ ที่กระแสไฟฟ้า 10 A/g ดังนั้น อิเล็กโทรไลต์แบบผสมนี้แสดงศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุขั้วไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ต้องการความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าสูง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และอธิบายขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงเลือกทุเรียน และเปลือกข้าวโพด ที่เหลือทิ้งทางการเกษตร ให้ไปเป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และการกระตุ้นทางเคมี เพื่อที่จะได้ศึกษาผลหรือปัจจัยต่างๆส่งผลกระทบต่อตัวคาร์บอนกัมมันต์และทำให้นำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ได้ด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาที่ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3.1 เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

- 1) เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction : XRD ยี่ห้อ Rigaku รุ่น Miniflex600)
- 2) เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ (Raman Spectrometer ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น DXR SmartRaman)
- 3) เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Nicolet 6700)
- 4) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM ยี่ห้อ FEI รุ่น Quanta 250 ,USA)
- 5) เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer ยี่ห้อQuantachrome รุ่น Autosorb iQ-C-XR-XR-XR)
- 6) เครื่องทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีไฟฟ้าของสารตัวอย่าง (Electrochemical Workstation ยี่ห้อ CorrTest Instruments รุ่น CS350)
- 7) เครื่องประกอบเซลล์เหรียญบาท (Coin Cell Crimping Machine)
- 8) เครื่องบดแบบลูกบอล (3D-ballmilling) (รุ่น Nagao System)
- 9) เครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง (รุ่น PR224/E OHAUS 200X0.1mg โดย ประเทศจีน)
- 10) เตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ (Furnace Tube ยี่ห้อ Chavachote รุ่น Tube50/1009P)
- 11) เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace Box ยี่ห้อ Chavachote รุ่น L9/12P)
- 12) ตู้อบสาร ผลิตโดยบริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี
- 13) ตู้ดูดควัน (Fume Hood) ผลิตโดยบริษัท design-after native ประเทศไทย
- 14) เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hotplate Stirrer ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS7)

3.1.2 วัสดุอุปกรณ์

- 1) ไมโครปิเปต
- 2) โกร่งบดสาร (Mortar and Pestle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

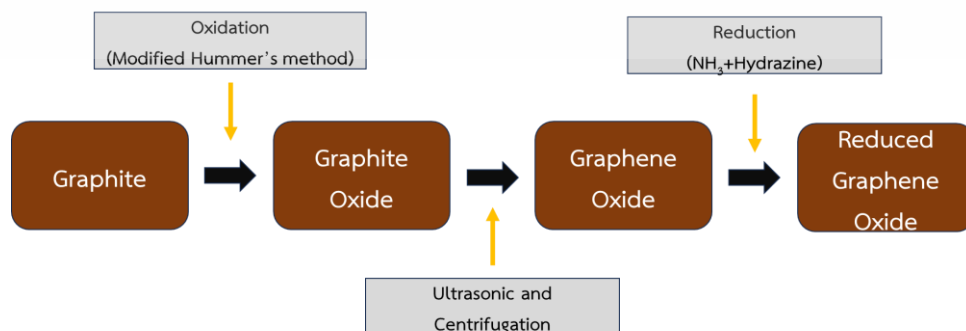
- 3) เครื่องแก้ว ได้แก่ ปีกเกอร์ปริมาตร 250ml และ 600 ml
- 4) ฟอริเซป
- 5) ซ้อนตักสารสแตนเลส (Spatula Stainless)
- 6) หลอดเซนติฟิว (Centrifuge tube) ขนาด 2 ml และ 50 ml
- 7) ไม้หนีบ
- 8) ลูกบดเซรามิกเซอร์โคเนีย (ZrO_2) ขนาด 3 mm
- 9) แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic stirring bar)
- 10) ถ้วยเผาสารอุณหภูมิสูง (Alumina ceramic crucible boat)
- 11) อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil)
- 12) แผ่นอะคริลิก
- 13) กระจกซังสาร
- 14) โฟมนิเกิล (Nickel foam)
- 15) แฉกั้นขั้ว (Separator)
- 16) เครื่องปั่นเซลล์เหรีญบาท
- 17) สปริงส่วนประกอบเซลล์เหรีญบาท
- 18) เครื่องปั่นแรงสูง

3.1.3 สารเคมี

- 1) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduce Graphene Oxide : rGO)
- 2) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide 85%, KOH, RCL labscan Ltd.)
- 3) กรดไฮโดรคลอริก 37% (HYDROCHLORIC ACID 37% HCL, RCL labscan Ltd.)
- 4) พอลิเมอร์โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene, PVDF, Sigma-aldrich Co., LLC.)
- 5) เอ็นเมธิลพิโรรลิโดน (N-methyl-2-pyrrolidone, NMP, Sigma-aldrich Co., LLC.)
- 6) เอทานอล (Ethanol, RCL Labscan Ltd.)
- 7) อะเซทิลีนแบล็ก (acetylene black)
- 8) น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water : DI)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **รูปที่ 3.1** กระบวนการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ โดยใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) ถูกสังเคราะห์โดยวิธีการออกซิเดชัน Oxidation (Hummer method) และกระบวนการรีดักชัน (reduction) ด้วยกรดแก่ในการเตรียม กราฟีนออกไซด์ (graphene : GO) นำผงแกรไฟต์บริสุทธิ์ 99% 2 กรัม เติมกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid : H₂SO₄) 46 มิลลิลิตร ผสมลงในบีกเกอร์ก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร ผสมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate : KMnO₄) 6 กรัม และกวนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 °C หลังจากนั้นกวนส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกัน ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่น (DI water) 90 ml ลงไปอย่างช้าๆ ภายใต้การกวนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 90 นาที และจะหยุดปฏิกิริยาโดยการเติมน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide : H₂O₂) 10 มิลลิลิตร ผลิตภัณฑ์จะถูกแยกด้วยการปั่นและล้างด้วย สารละลายไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid : HCL) 5% เพื่อลดค่าพีเอช หลังจากนั้นทำการกรองและ ล้างด้วยน้ำกลั่น จนค่ากรดต่างของสารกลายเป็นกลาง นำสารเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ผงกราฟไฟต์ นำไปละลายในน้ำกลั่น 120 มิลลิลิตร ภายใต้การอัลตราโซนิก เวลา 90 นาที และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที จะได้สารแขวนลอยสีน้ำตาลเข้าออกมา คือกราฟีนออกไซด์ (graphene : GO)

ดังนั้นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เตรียมจากการนำสารแขวนลอยคือกราฟีนออกไซด์ (GO) 100 ml น้ำกลั่น 100 ml แอมโมเนีย (NH₃) 1 ml และสารละลาย ไฮดราซีน (hydrazine) 0.1 ml นำส่วนผสม ทั้งหมดกวนเข้าด้วยกันภายใต้ความร้อน อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 45 นาที สุดท้ายจะได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ [5,46]

3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมถ่านเพื่อให้ได้ถ่านไม้ไผ่จากธรรมชาติ

ก) การทำให้แห้ง (drier) ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการเผาเพื่อผลิตถ่านคาร์บอน จำเป็นต้องควบคุมระดับความชื้นของวัสดุให้อยู่ในสภาพทั้งหมด โดยมีความชื้นไม่เกิน 17% หรือต่ำกว่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากชีวมวลแต่ละประเภทมีปริมาณน้ำที่แตกต่างกัน การลดความชื้นจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก เช่น ในเซลล์ลูโลส เมื่อมีการขจัดน้ำออกไป 6 ส่วน จะเหลือสารประกอบที่เป็นคาร์บอนอยู่ 6 ส่วน เช่นเดียวกันสำหรับขั้นตอนการ เผาถ่าน (carbonization) จะดำเนินการภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนจำกัดหรือแทบไม่มี โดยใช้อุณหภูมิสูงกว่า 400–450 °C ความร้อนในระดับนี้จะทำให้สารประกอบอินทรีย์ภายในวัตถุดิบสลายตัวและระเหยออกไป เหลือไว้เพียงโครงสร้างของคาร์บอนที่กลายเป็นถ่านในที่สุด

- 1) นำไม้ไผ่ที่ได้มานำเข้าตู้อบเพื่ออบไล่ความชื้น ณ อุณหภูมิ 100 °C 24 ชั่วโมง
- 2) นำไม้ไผ่ที่ผ่านการให้ความร้อนเพื่อไล่ความชื้นแล้วหักเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วใส่ในถ้วยครุซีเบลเพื่อที่จะนำไปเผาเป็นถ่าน
- 3) นำไม้ที่แห้งแล้วไปเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูง ณ อุณหภูมิ 700 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในบรรยากาศอาร์กอน (Ar)
- 4) เมื่อทำการเผาเรียบร้อยแล้ว จะนำถ่านที่ได้ไปปั่นในเครื่องปั่นแรงสูง
- 5) จะได้ผงถ่านไม้ไผ่ (Bamboo carbon : BBC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

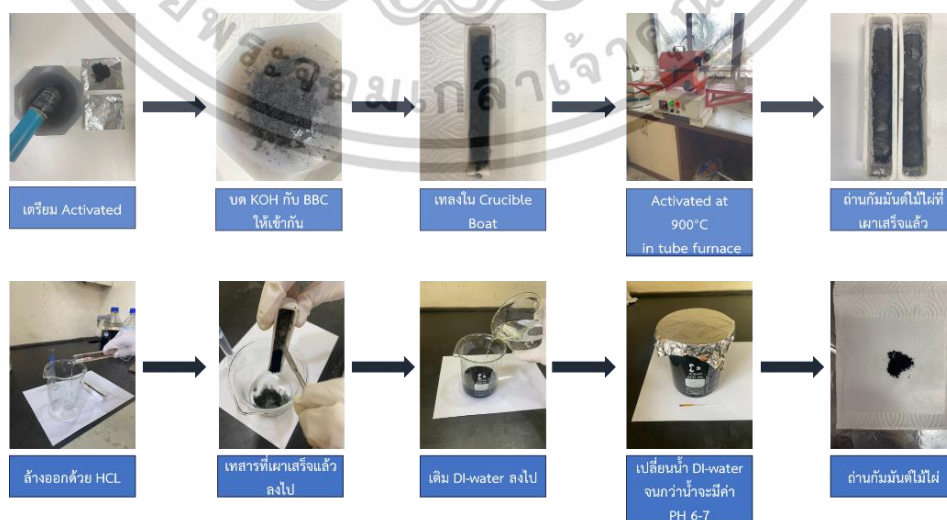


รูปที่ 3.2 การเตรียมผงถ่านไม้ไฟ

3.2.3 ขั้นตอนการทำถ่านกัมมันต์จากไม้ไฟ (Bamboo activated carbon)

ข) การเพิ่มพื้น-ที่ผิว และรูพรุนของถ่านไม้ไฟด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยสารเคมี (Chemical Activation)

- 1) โดยใช้ถ่านไม้ไฟจากการเผา 0.5 กรัมและใช้ KOH 1.5 กรัม บดให้เข้ากัน ควรใช้ระยะเวลา ประมาณ 15 นาที
- 2) จะนำสารที่บดผสมกับ KOH เสร็จสมบูรณ์แล้ว ใส่ใน Crucible boat และนำมาเผาในเตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ ณ อุณหภูมิ 900 °C
- 3) นำสารที่เผาเสร็จสมบูรณ์แล้วมาล้าง KOH ออกด้วยกรด HCL
- 4) เติมน้ำ DI-water ให้เต็มบีกเกอร์ รอจนสารตกตะกอนและเปลี่ยนน้ำ DI-water จนกว่าจะมี pH 6-7
- 5) นำไปเข้าเตาอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 6) จะได้ผงถ่านกัมมันต์ไม้ไฟ (Bamboo activated carbon : AC-BBC)

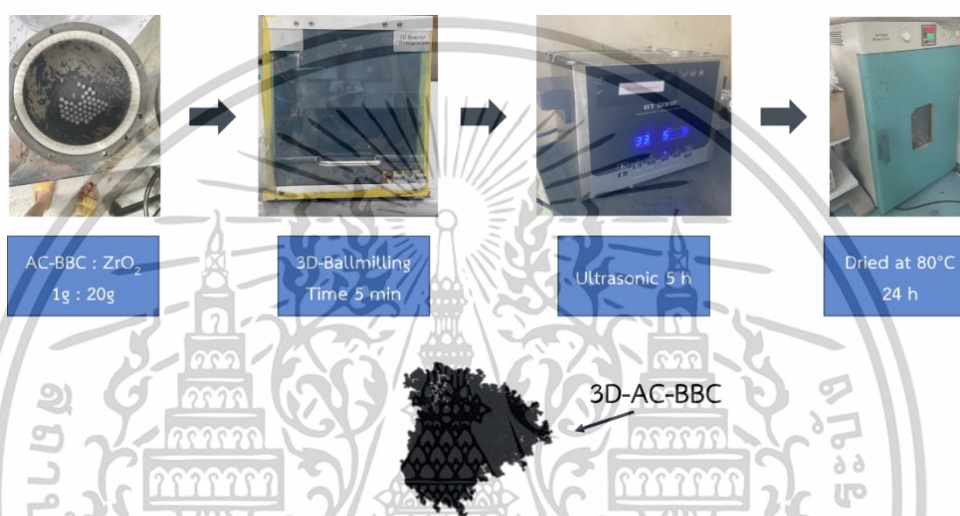


รูปที่ 3.3 การเตรียมถ่านกัมมันต์ไม้ไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะที่เท่านั้น มิใช่ข้อมูลใดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การลดขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์โดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (3D ball milling)

- 1) เตรียมถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ 1 กรัม ต่อลูกบดเซอร์โคเนีย 40 กรัม (ลูกบดเซอร์โคเนีย มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร) ลงในโถบดแบบลูกบอล นำโถบดใส่ลงในเครื่องบดแบบลูกบอลและทำการบดเพื่อลดขนาดเป็นเวลา 5 นาที
- 2) จากนั้นนำสารที่ผ่านการบดแล้วไปกระจายตัวในเครื่อง Ultrasonic Bath เป็นเวลา 5 ชั่วโมง
- 3) นำสารที่กระจายตัวเสร็จเรียบร้อยแล้ว ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) จะได้ผงถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ที่ผ่านการลดขนาดอนุภาค (3D ball milling Bamboo activated carbon : 3D-AC-BBC)



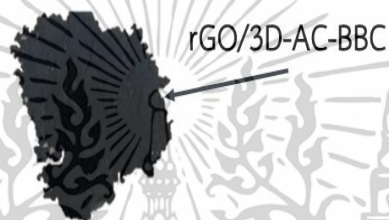
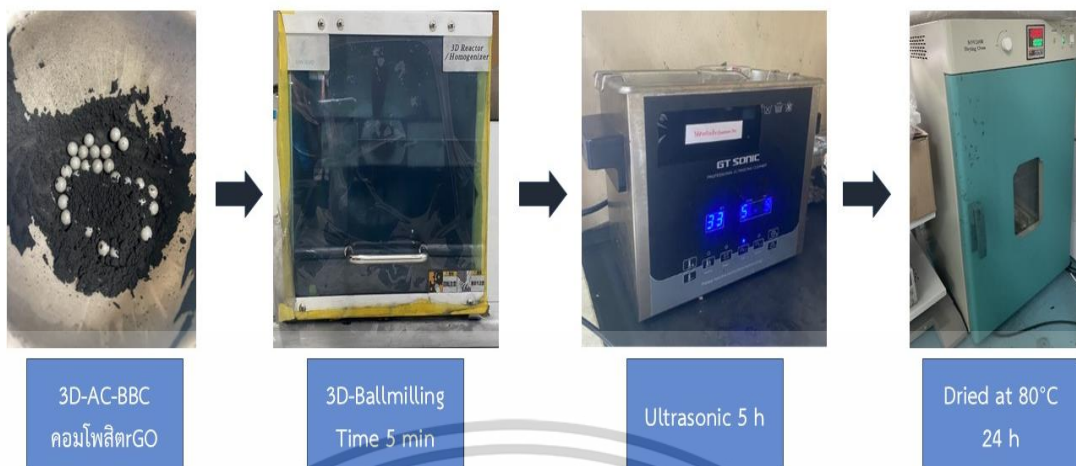
รูปที่ 3.4 การลดขนาดอนุภาคถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล

3.2.5 การเตรียมคอมโพสิตถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่โดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (3D ball milling) กับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO/3D-AC-BBC)

ค) ในการคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับคาร์บอนกัมมันต์จะใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (3D ball milling)

- 1) ใช้ผงถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ที่ผ่านกระบวนการลดขนาดอนุภาค (3D-AC-BBC) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) ในอัตราส่วนต่างๆตามน้ำหนัก (wt.%) ได้แก่ 1, 3, 5 และ 7 wt.% โดยใช้เครื่องบดแบบ 3 มิติ (3-D ball mill) ที่ความเร็ว 300 รอบต่อนาที จะถูกเรียกชื่อว่า rGO/3D-AC-BBC
- 2) จากนั้น ผง rGO/3D-AC-BBC จะถูกกระจายตัวในน้ำปราศจากไอออน (deionized water) เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิก แล้วจึงนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สุดท้ายจึงได้ตัวอย่าง 3D-AC-BBC ที่มี rGO ในสัดส่วน 1, 3, 5 และ 7 wt.% ซึ่งถูกเรียกชื่อว่า rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



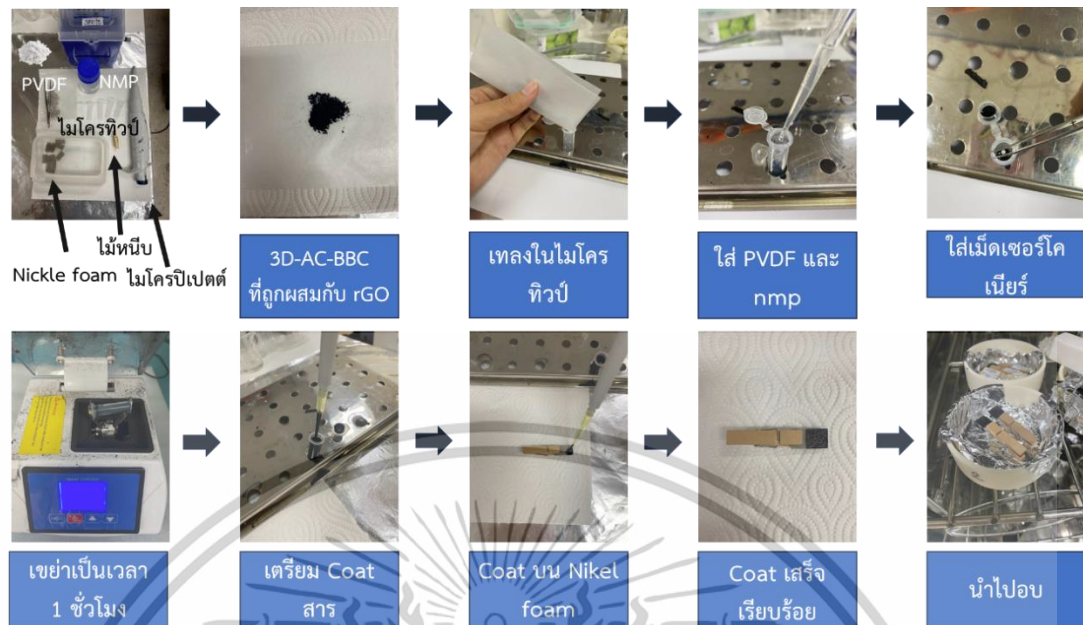
รูปที่ 3.5 การเตรียมคอมโพสิตถ่านกัมมันต์ไม่ฝังกับบริดจ์กราฟีนออกไซด์

3.2.6 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ง) เตรียมขั้วไฟฟ้าทำงานเพื่อที่จะวัดสมบัติเคมีไฟฟ้าของสาร โดยใช้ตัวอย่าง rGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC ที่ได้จากตัวอย่าง PVDF และอะเซทิลีนแบล็กที่ได้มาในอัตราส่วน 85 : 5 : 10 % โดยน้ำหนัก

- 1) นำผงคาร์บอนที่เตรียมได้จากการเตรียมคอมโพสิตถ่านกัมมันต์ไม่ฝังกับบริดจ์กราฟีนออกไซด์ โดยทำการใส่อะเซทิลีนแบล็ก (acetylene black) 0.005 g หลังจากนั้นใส่พอลิเมอร์โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) 0.010 g
- 2) ใส่ลูกบดเซอร์โคเนียลงในหลอดไมโครทิวป์ แล้วทำการเติมสารละลาย N-methyl-2- pyrrolidone (NMP) เมื่อเตรียมสารละลายใส่ลงในหลอดไมโครทิวป์ เรียบร้อยแล้วให้นำหลอดไมโครทิวป์ไปเขย่าเป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- 3) สารที่ผ่านการเขย่าเรียบร้อยแล้ว ให้นำสารที่หยดลงบนแผ่นนิกเกิ้ลโพรปริมาตร 200 ไมโครลิตร
- 4) นำไปอบแห้งที่ 80 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อเตรียมไปวัดค่าการนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้า

ตารางที่ 3-1 แสดงเงื่อนไขของการเตรียมตัวอย่าง

No	Sample	AC (g)	rGO (g)	CB (g)	PVDF (g)
1	rGO	-	0.085	0.005	0.010
2	BBC	0.085	-	0.005	0.010
3	AC-BBC	0.085	-	0.005	0.010
4	3D-AC-BBC	0.085	-	0.005	0.010
5	rGO1%/3D-AC-BBC	0.089	0.001	0.005	0.010
6	rGO3%/3D-AC-BBC	0.087	0.003	0.005	0.010
7	rGO5%/3D-AC-BBC	0.085	0.005	0.005	0.010
8	rGO7%/3D-AC-BBC	0.083	0.007	0.005	0.010

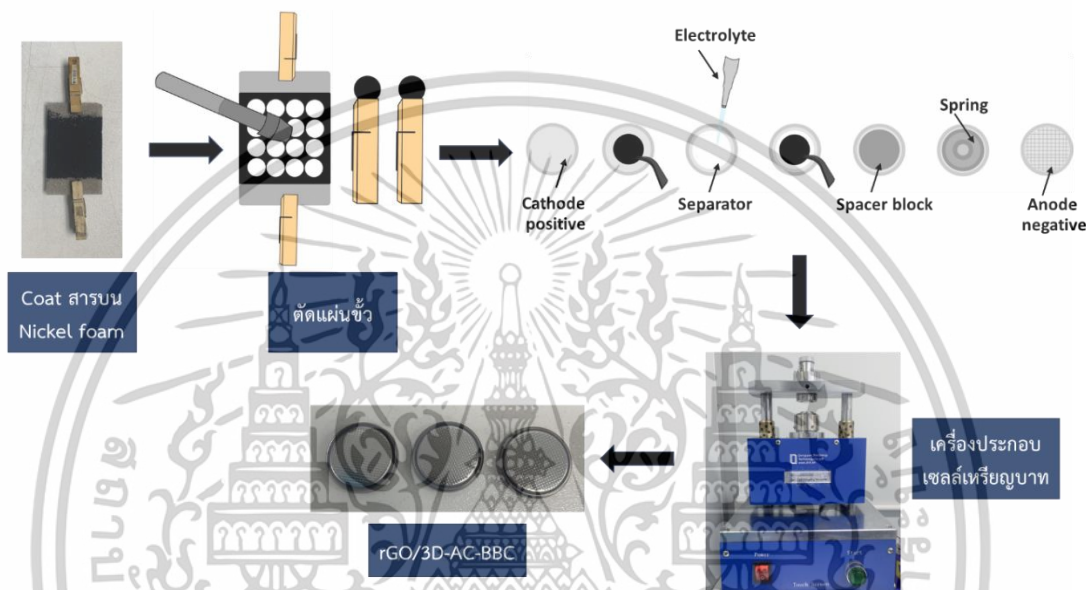
3.2.7 เตรียมตัวเก็บประจุยิ่งยวด

จ) เตรียมตัวเก็บประจุแบบเซลล์เหรียญบาทจากสาร rGO/3D-AC-BBC โดยใช้ไอเล็กโตรไลต์ KOH-3M

- นำรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตกับคาร์บอนกัมมันต์ (rGO/3D-AC-BBC) แล้วนำมาหยดลงบนแผ่นนิกเกิลโพลิม
- นำเข้าตู้อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
- ตัดแผ่นนิกเกิลให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร เพื่อที่จะนำไปประกอบเป็น เซลล์เหรียญบาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) นำขั้วไฟฟ้าแคโทด (-) ใส่ลงในเคสเป็นชั้นที่ 1 ใส่แผ่นกั้นขั้วเป็นชั้นที่ 2 ทำการหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KOH-3M ใส่ขั้วไฟฟ้าแอโนด (+) เป็นชั้นที่ 3 ใส่แผ่นเพิ่มความหนาขนาด 1 มิลลิเมตรเป็นชั้นที่ 4 ใส่สปริงเป็นชั้นที่ 5 ขึ้นไปตามลำดับ หลังจากนั้น ใส่ฝาปิด
- 5) หากประกอบส่วนประกอบของเซลล์เหรียญบาทเรียบร้อยแล้ว ให้นำไปวางใส่เครื่องประกอบเซลล์เหรียญบาท แล้วอัดที่ความดัน 0.5 ตัน เป็นเวลา 1 นาที



รูปที่ 3.7 กระบวนการเตรียมตัวเก็บประจุยิ่งยวด

3.3 เทคนิคการวัดสมบัติทางเคมีไฟฟ้า

3.3.1 เทคนิคการวัดสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Workstation)

การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์จากไม้ไผ่ ด้วยเทคนิค CV, GCD โดยเครื่อง Electrochemical Workstation มีส่วนประกอบคือ โปเทนชิโอสแตตซึ่งเป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวควบคุมการจ่ายความต่างศักย์ และวัดกระแสไฟฟ้าที่มีความละเอียดสูง ในปัจจุบันเครื่องโพเทนชิโอสแตตจะต่อกับคอมพิวเตอร์และมีซอฟต์แวร์ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานและแสดงผลการวิเคราะห์ เป็นผลให้เราทำงานได้อย่างสะดวกในงานวิจัยนี้เครื่องโพเทนชิโอสแตตจะถูกต่อไปยังเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบ 3 ขั้ว (Three - electrode electrochemical cell)[46,47] ได้แก่

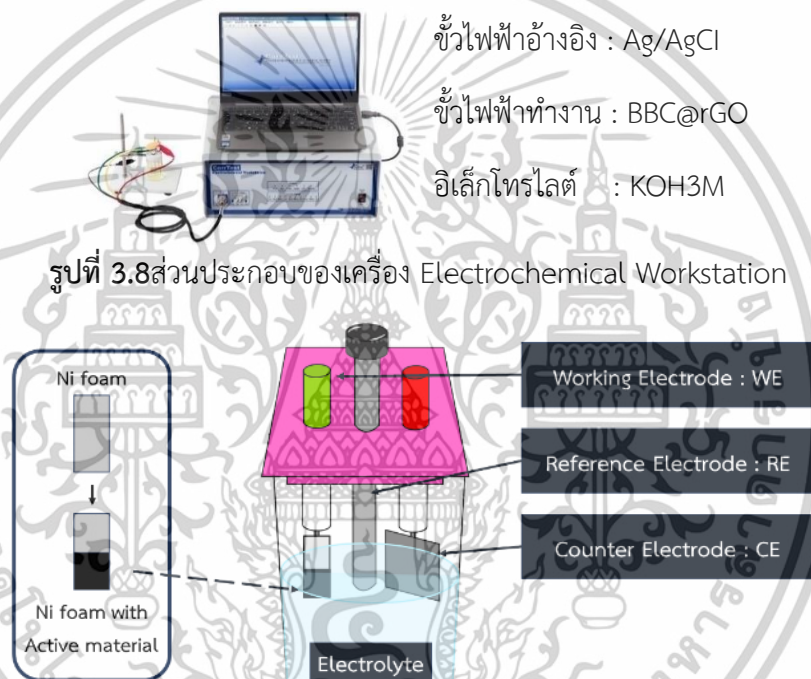
- 1) ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode: W.E.) เป็นขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่ต้องการจะศึกษา
- 2) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode : R.E.) เป็นขั้วไฟฟ้ามาตรฐานมีความต่างศักย์คงที่ และมี หน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นค่าเปรียบเทียบ ทำให้เรารู้ถึงค่าความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode : C.E.) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำให้ระบบครบวงจรวัสดุที่นิยมนำมาใช้ ในขั้วนี้มากที่สุด คือ ลวดแพลทินัม

ในการศึกษาจะในขั้ว 3 ขั้วนี้จุ่มอยู่ในสารละลายภายในเซลล์เคมีไฟฟ้า เซลล์นี้ส่วนใหญ่จะทำด้วยแก้ว บรรจุสารละลายซึ่งจะประกอบด้วยสารที่ต้องการวิเคราะห์ ตัวทำละลาย และอิเล็กโทรไลต์ สามารถ แยกตัวเป็นไอออนได้ง่าย และเป็นตัวทำให้อาร์ละลายมีค่าการนำไฟฟ้าได้ดีขึ้น สารอิเล็กโทรไลต์และ ตัวทำละลายที่กล่าวมานั้นควรจะเป็นสารประกอบที่ไม่รบกวนปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของ สารที่เราสนใจ และต้องมีความเสถียรในการวิเคราะห์ ทั้ง 3 ขั้วจะอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กัน แต่ไม่ต่อกัน

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาตามสภาวะที่กำหนดดังนี้ ขั้วไฟฟ้าทำงาน : ขั้วแพลทินัม



รูปที่ 3.8 ส่วนประกอบของเครื่อง Electrochemical Workstation

รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบเซลล์เคมีไฟฟ้า

3.3.2 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry : CV)

สำหรับเทคนิคนี้จะใช้วัดอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารตัวอย่างที่ต้องการจะทดสอบ ซึ่งหลักการการทำงานคือมีการจ่ายศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในระบบ แล้วหลังจากนั้นจะมีการบันทึกกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าช่วย ผลที่ได้ออกมาจะแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ซึ่งในกราฟจะมีการเกิดพีค (Peak) เป็นตัวบ่งบอกและแสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (C) ได้จากสมการ (1)

$$C = \frac{Ac}{m2v\Delta V} \quad (1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่เพื่อเผยแพร่ให้ผู้อื่นได้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

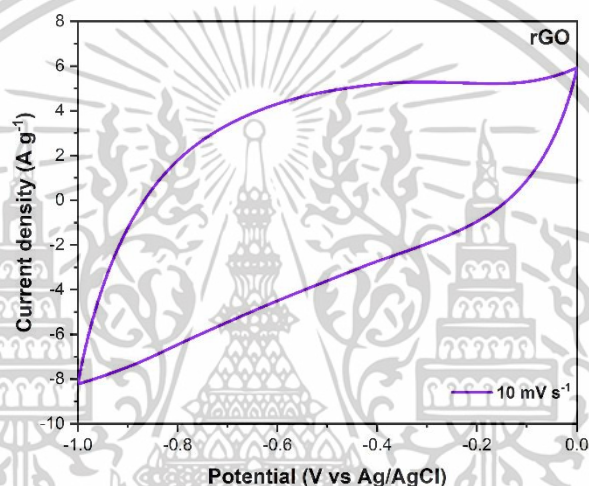
เมื่อ A_c คือ พื้นที่ในวงปิด

m คือ มวล (g)

v คือ อัตราการสแกน (mV/s)

ΔV คือ ช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

จากกราฟจะแสดงค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้ขั้วไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นหรือเรียกว่า ไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยค่าความต่างศักย์ตรงตำแหน่งที่กราฟสูงสุด เป็นค่าความต่างศักย์ของ ปฏิกริยา รีดักชัน (cathodic peak potential : E_{pc}) และตำแหน่งที่ต่ำสุดเป็นค่าความต่างศักย์ของ ปฏิกริยาออกซิเดชัน (anodic peak potential : E_{pa})



รูปที่ 3.10 กราฟ CV ของสาร RGO ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KOH 3 M ที่อัตราการ สแกน 10 mV/s

3.3.3 เทคนิคการอัดและการคายประจุไฟฟ้า (Galvanostatic charge-discharge :

GCD)

สำหรับเทคนิคนี้ส่วนมากจะนำมาใช้วัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุความจุสูง ซึ่ง หลักการทำงาน คือ จะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งกระแสที่จ่ายเข้าป้อน เป็นกระแสไฟฟ้าคงที่ ทำการไหลเข้าและออกจากตัวเก็บประจุความจุสูง แล้วทำการบันทึกค่าความ ต่างศักย์ไฟฟ้าเทียบกับเวลาในการอัดหรือคายประจุไฟฟ้า

โดยสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะในกรณีอัดประจุไฟฟ้าได้จากสมการ (2) และค่า ความจุจำเพาะในกรณีคายประจุไฟฟ้าจากสมการ (3)

$$C = \frac{I\Delta t}{m\Delta V} \dots\dots\dots(2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

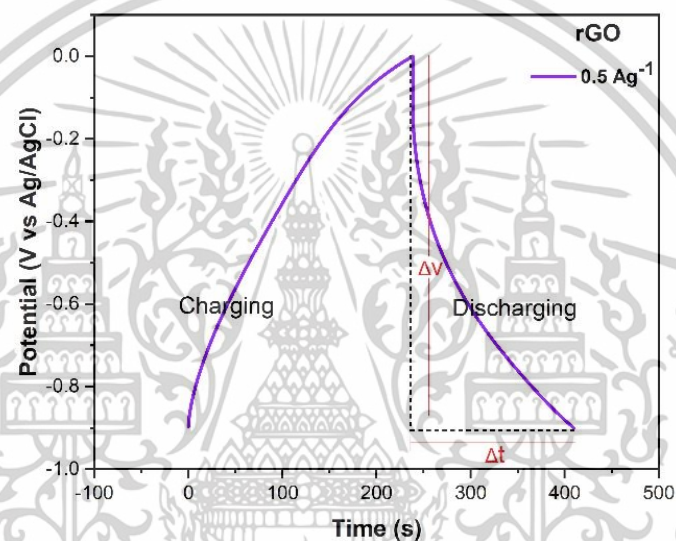
$$C = -\frac{I\Delta t}{m\Delta V} \dots\dots\dots (3)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

m คือ มวลของสารตัวอย่าง

Δt คือ ช่วงเวลาการอัดหรือคายประจุไฟฟ้า (s)

ΔV คือ ช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

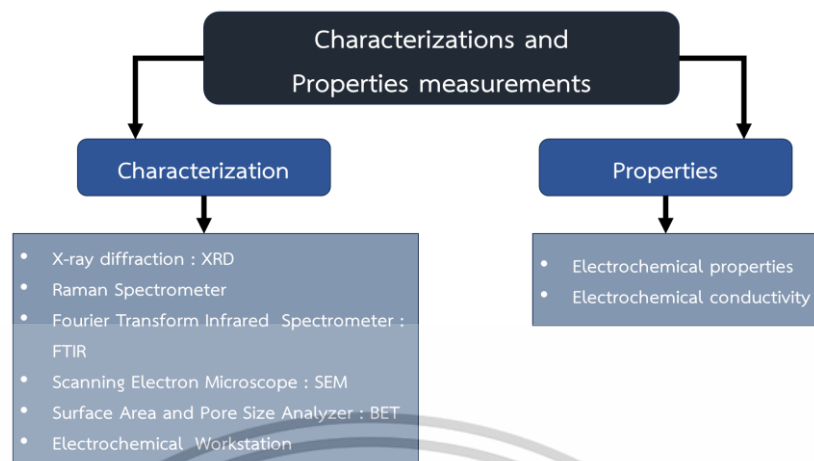


รูปที่ 3.11 กราฟ GCD ของสาร RGO ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KOH 3 M ที่ความหนาแน่น กระแสไฟฟ้า 0.5 A/g

3.4 การวิเคราะห์

ในการศึกษานี้ วัสดุคาร์บอนจากไม้ไผ่ถูกนำมาผสมกับวัสดุ rGO ที่มีโครงสร้างสองมิติ (2D-structured rGO) ในสัดส่วน 1, 3, 5 และ 7 % โดยน้ำหนัก (wt.%) เพื่อเสริมสมรรถนะทางอิเล็กโทรเคมีของคาร์บอนจากไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นสำหรับอุปกรณ์ supercapacitor (SC) ตัวอย่างคาร์บอนจากไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นถูกเตรียมโดยการอบภายใต้บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน จากนั้นจึงบดและผสมด้วยเครื่องบดลูกบอลสามมิติความเร็วสูง เทคนิค XRD, Raman, SEM, EDX และ FTIR รวมถึงการวัดพื้นที่ผิวจำเพาะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของตัวอย่าง คุณสมบัติทางอิเล็กโทรเคมี (cyclic voltammetry (CV), galvanostatic charge-discharge (GCD) และ electrochemical impedance spectroscopy (EIS)) ของตัวอย่างคาร์บอนจากไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นถูกทดสอบโดยใช้ขั้วไฟฟ้าแบบ half-cell ขั้วไฟฟ้าที่มีสมรรถนะดีที่สุดซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนจากไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้น ถูกนำไปประกอบเป็นเซลล์ SC แบบสมมาตรชนิดเหรียญ และรายงานคุณสมบัติทางอิเล็กโทรเคมีของเซลล์ดังกล่าว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



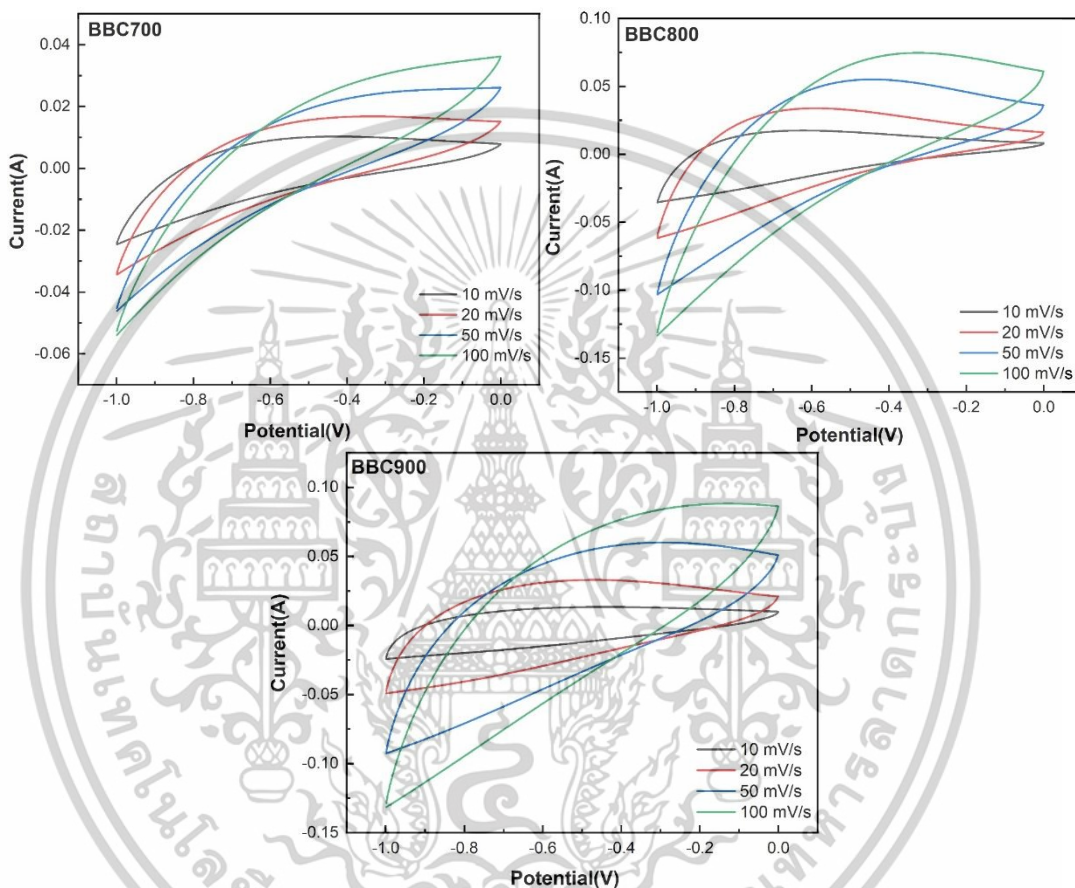
รูปที่ 3.12 การวิเคราะห์และตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

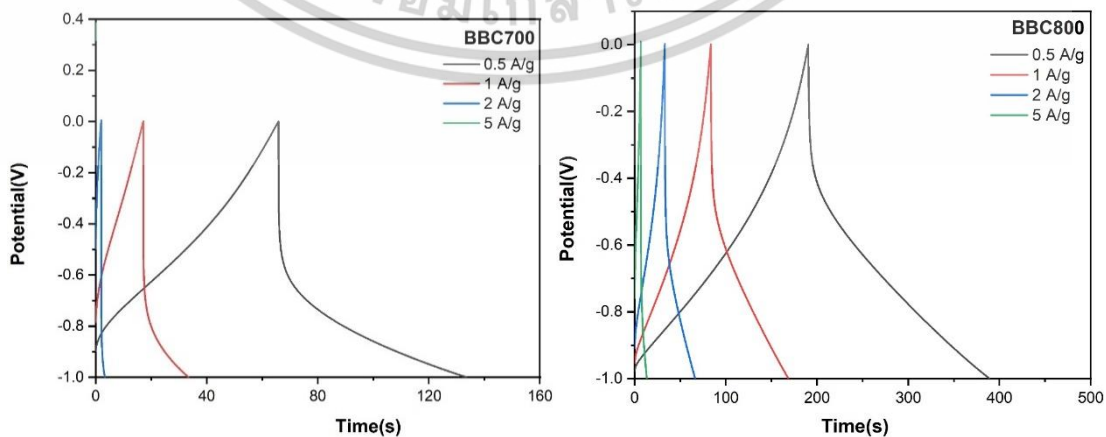
บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

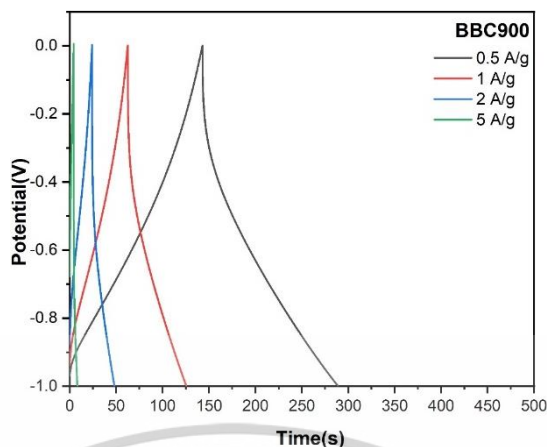
จากการศึกษาจากเทคนิคการวัดสมบัติทางเคมีไฟฟ้า การเผาถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.1 เส้นโค้ง CV ที่ Scan Rate 10, 20, 50 และ 100 mV/s ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



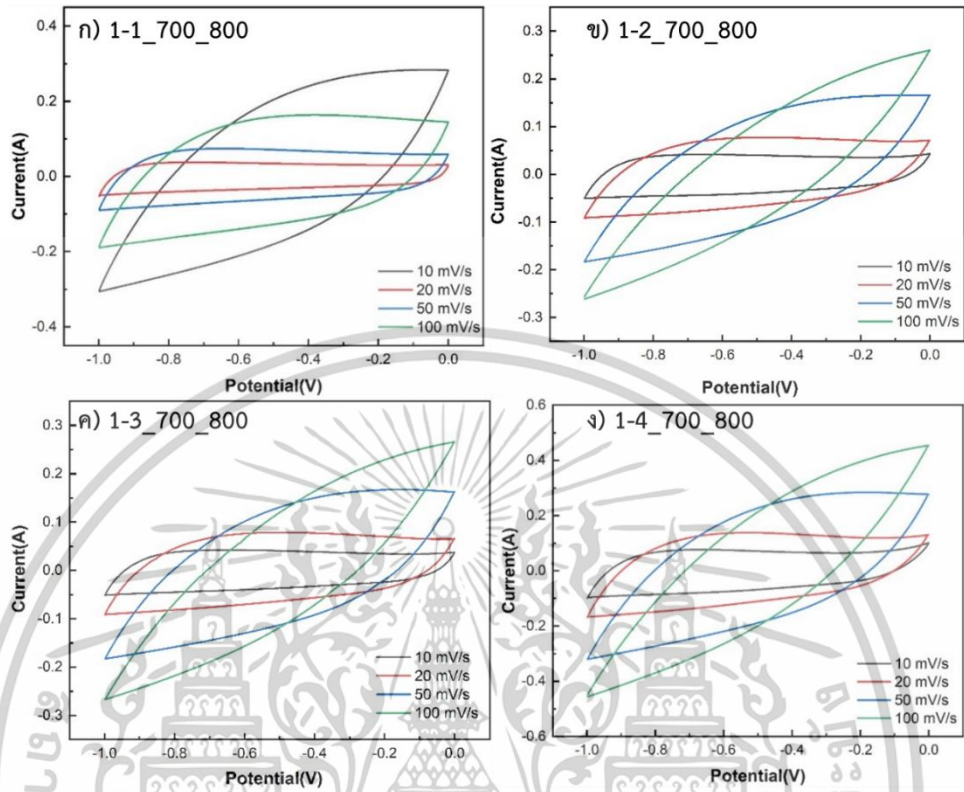
รูปที่ 4.2 เส้นโค้ง GCD ที่ Current Density 0.5, 1, 2 และ 5 A/g ถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4-1 แสดงผลการศึกษาศักยภาพเชิงเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ของการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสและ Activated carbon ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

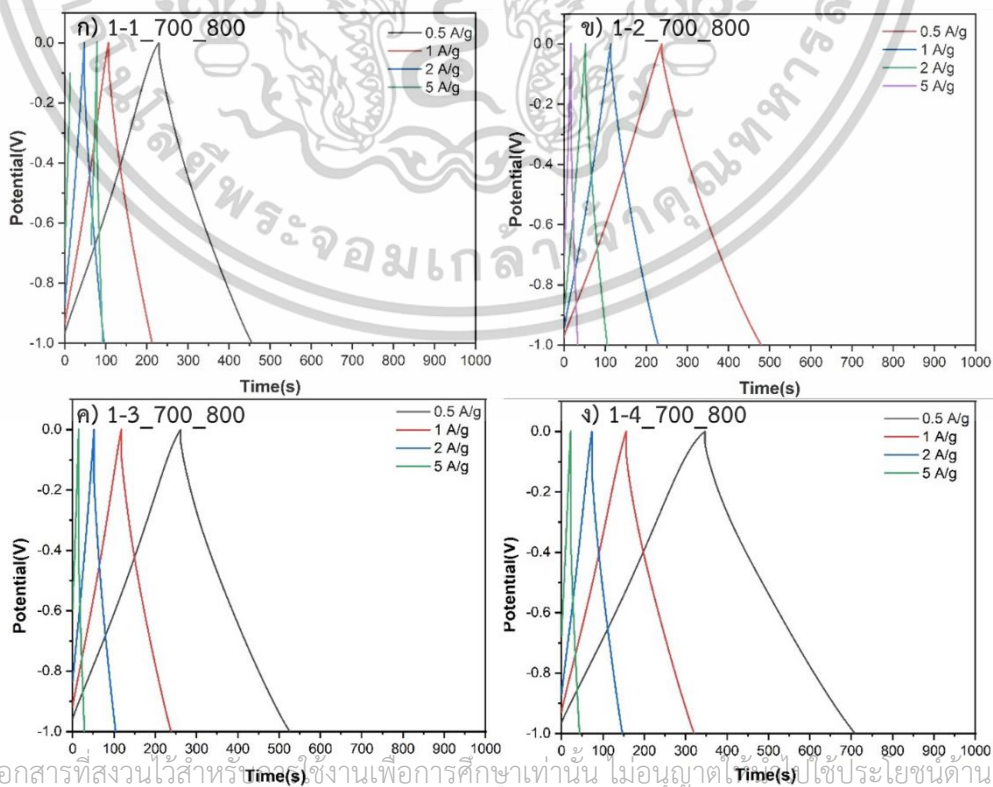
Sample	Current Density (Ag ⁻¹)	Specific capacitance (F/g)
700	0.5	48
	1	32
	2	10
	5	2
800	0.5	105
	1	95
	2	84
	5	58
900	0.5	79
	1	71
	2	62
	5	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส Activated carbon ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วน carbon : KOH เป็น 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ใช้ค่าย่อเป็น 700_800



รูปที่ 4.3 เส้นโค้ง CV ที่ Scan Rate 10, 20, 50 และ 100 mV/s ถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 700_800 ก) 1-1_700_800 ข) 1-2_700_800 ค) 1-3_700_800 ง) 1-4_700_800



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

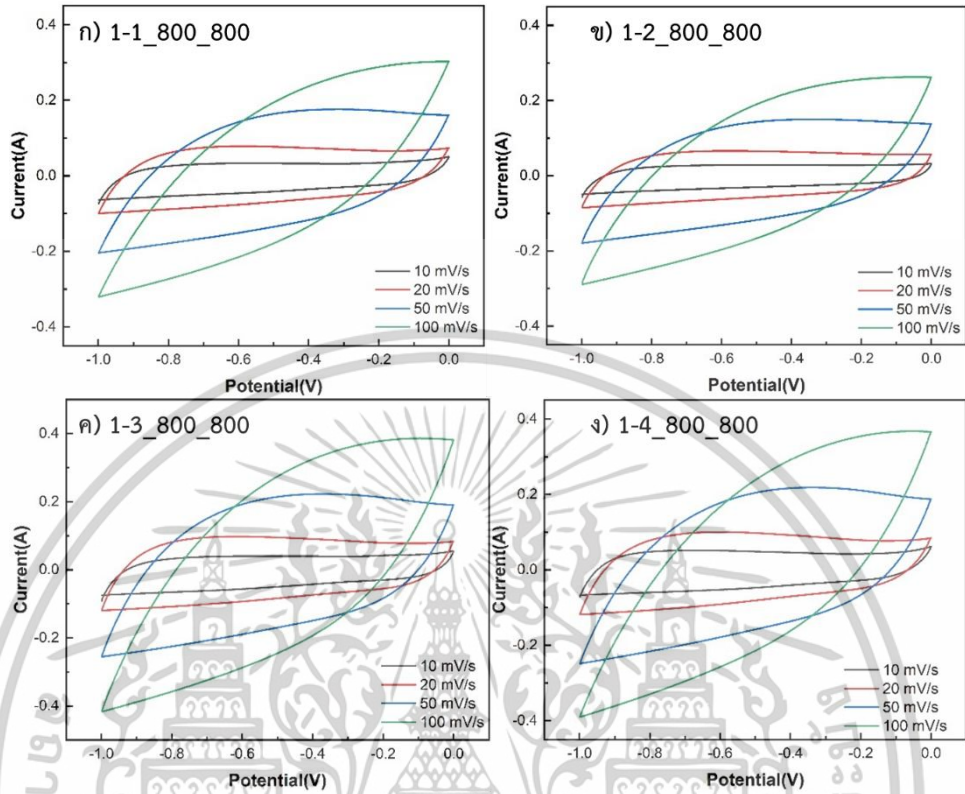
รูปที่ 4.4 เส้นโค้ง GCD ที่ Current Density 0.5, 1, 2 และ 5 A/g ถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 700_800
ก) 1-1_700_800 ข) 1-2_700_800 ค) 1-3_700_800 ง) 1-4_700_800

ตารางที่ 4-2 แสดงผลการศึกษาศักยภาพเชิงเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ของการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสและ Activated carbon ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

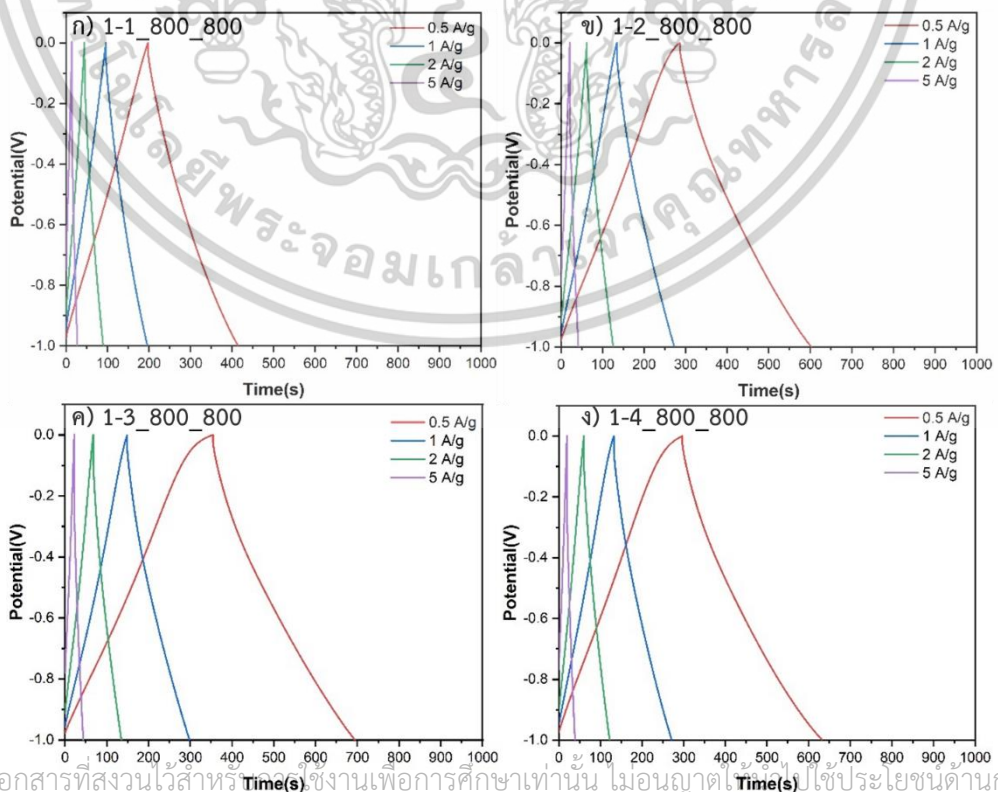
Sample	Current Density (Ag ⁻¹)	Specific capacitance (F/g)
1-1_700_800	0.5	122
	1	118
	2	114
	5	110
1-2_700_800	0.5	112
	1	100
	2	97
	5	90
1-3_700_800	0.5	201
	1	183
	2	171
	5	158
1-4_700_800	0.5	203
	1	179
	2	165
	5	150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส Activated carbon ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วน carbon : KOH เป็น 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ใช้ค้ำยเป็น 800_800



รูปที่ 4.5 เส้นโค้ง CV ที่ Scan Rate 10, 20, 50 และ 100 mV/s ถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 800_800
 ก) 1-1_800_800 ข) 1-2_800_800 ค) 1-3_800_800 ง) 1-4_800_800



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกิจกรรมการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

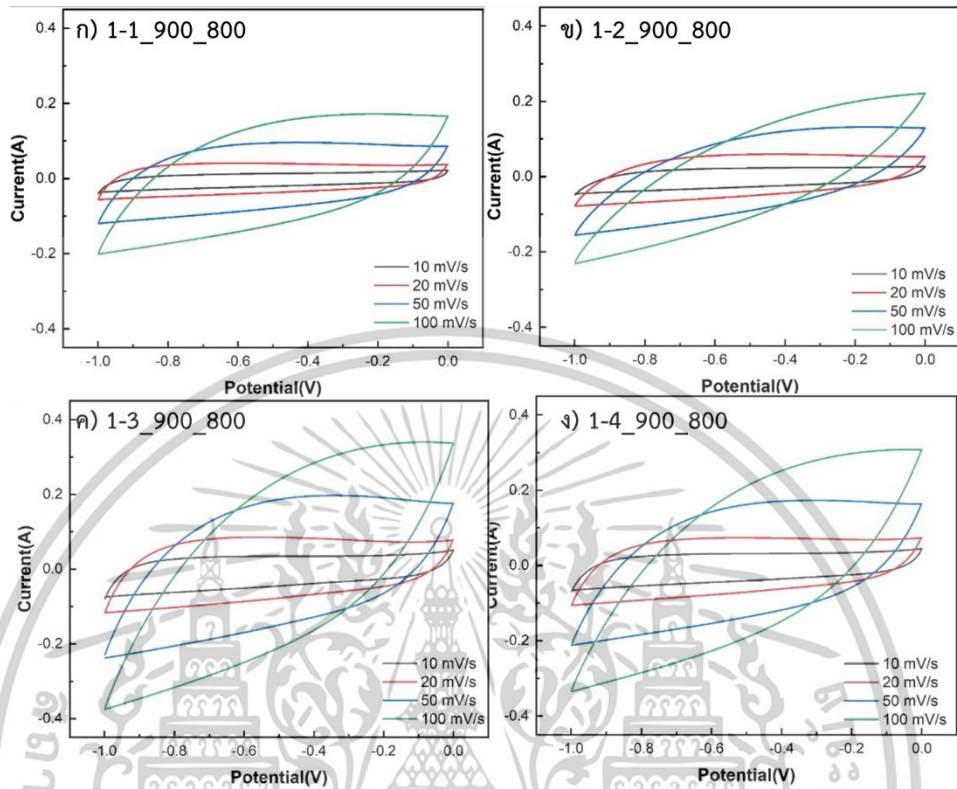
รูปที่ 4.6 เส้นโค้ง GCD ที่ Current Density 0.5, 1, 2 และ 5 A/g ถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 800_800
ก) 1-1_800_800 ข) 1-2_800_800 ค) 1-3_800_800 ง) 1-4_800_800

ตารางที่ 4-3 แสดงผลการศึกษาศักยภาพเชิงเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ของการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสและ Activated carbon ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

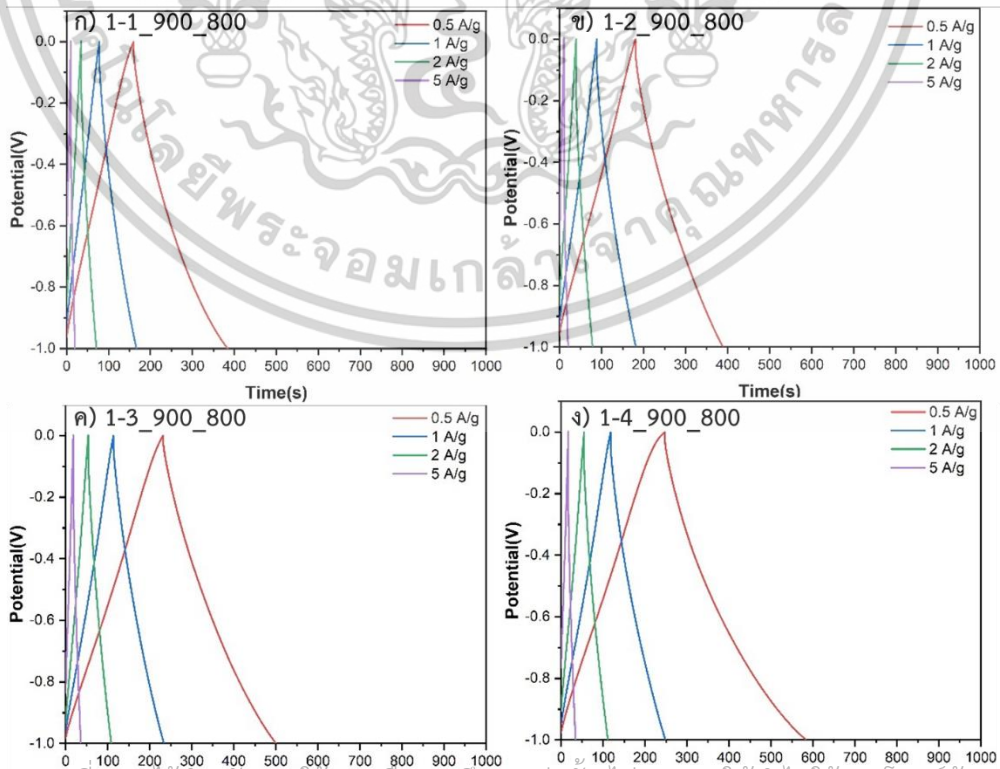
Sample	Current Density (Ag ⁻¹)	Specific capacitance (F/g)
1-1_800_800	0.5	108
	1	105
	2	101
	5	93
1-2_800_800	0.5	155
	1	144
	2	137
	5	130
1-3_800_800	0.5	167
	1	156
	2	148
	5	140
1-4_800_800	0.5	164
	1	146
	2	136
	5	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส Activated carbon ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วน carbon : KOH เป็น 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ใช้ค่าย่อเป็น 900_800



รูปที่ 4.7 เส้นโค้ง CV ที่ Scan Rate 10, 20, 50 และ 100 mV/s ถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 900_800 ก) 1-1_900_800 ข) 1-2_900_800 ค) 1-3_900_800 ง) 1-4_900_800



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

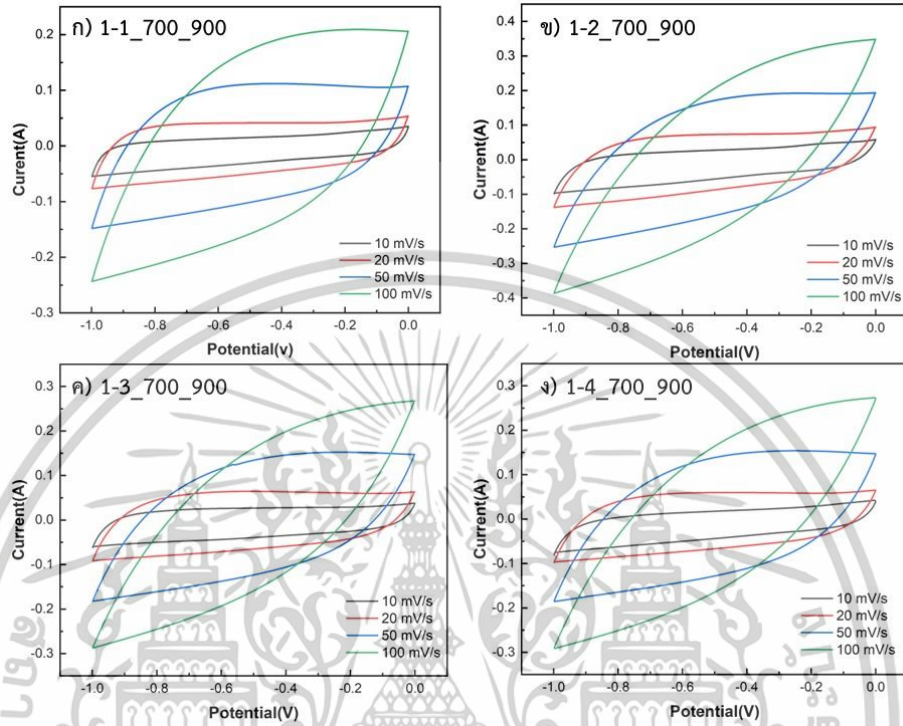
รูปที่ 4.8 เส้นโค้ง GCD ที่ Current Density 0.5, 1, 2 และ 5 A/g ถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 900_800
ก) 1-1_900_800 ข) 1-2_900_800 ค) 1-3_900_800 ง) 1-4_900_800

ตารางที่ 4-4 แสดงผลการศึกษาศักยภาพเชิงเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่ของการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสและ Activated carbon ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

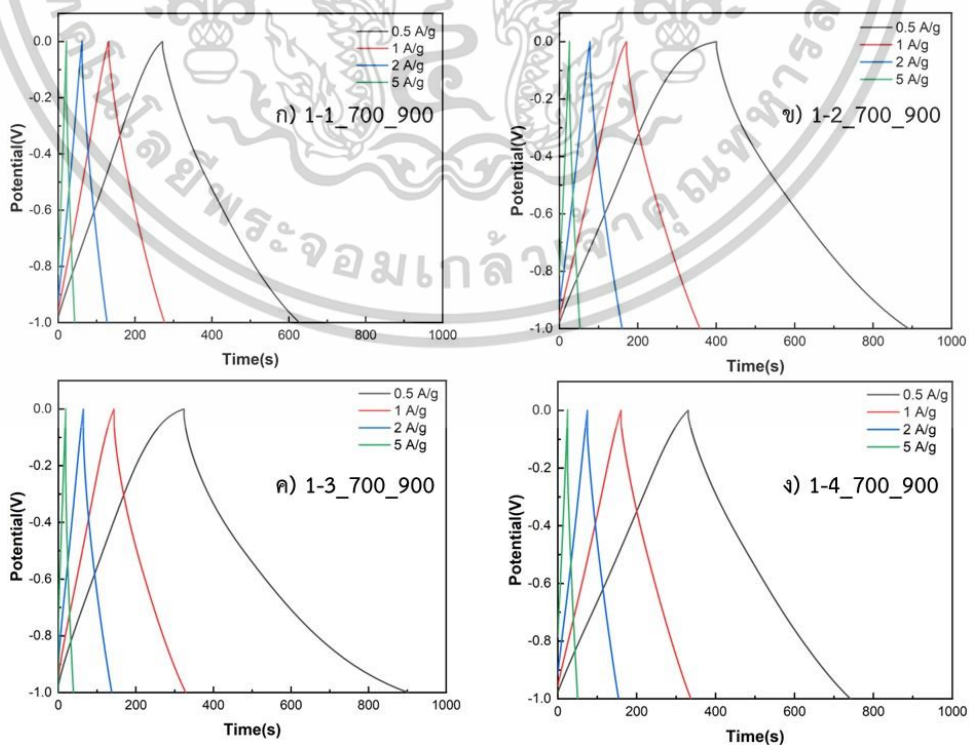
Sample	Current Density (Ag ⁻¹)	Specific capacitance (F/g)
1-1_900_800	0.5	109
	1	101
	2	93
	5	77
1-2_900_800	0.5	135
	1	125
	2	118
	5	109
1-3_900_800	0.5	158
	1	126
	2	113
	5	106
1-4_900_800	0.5	113
	1	95
	2	84
	5	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเผาถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส Activated carbon ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วน carbon : KOH เป็น 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ใช้คำย่อเป็น 700_900



รูปที่ 4.9 เส้นโค้ง CV ที่ Scan Rate 10, 20, 50 และ 100 mV/s ถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 700_900
ก) 1-1_700_900 ข) 1-2_700_900 ค) 1-3_700_900 ง) 1-4_700_900



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

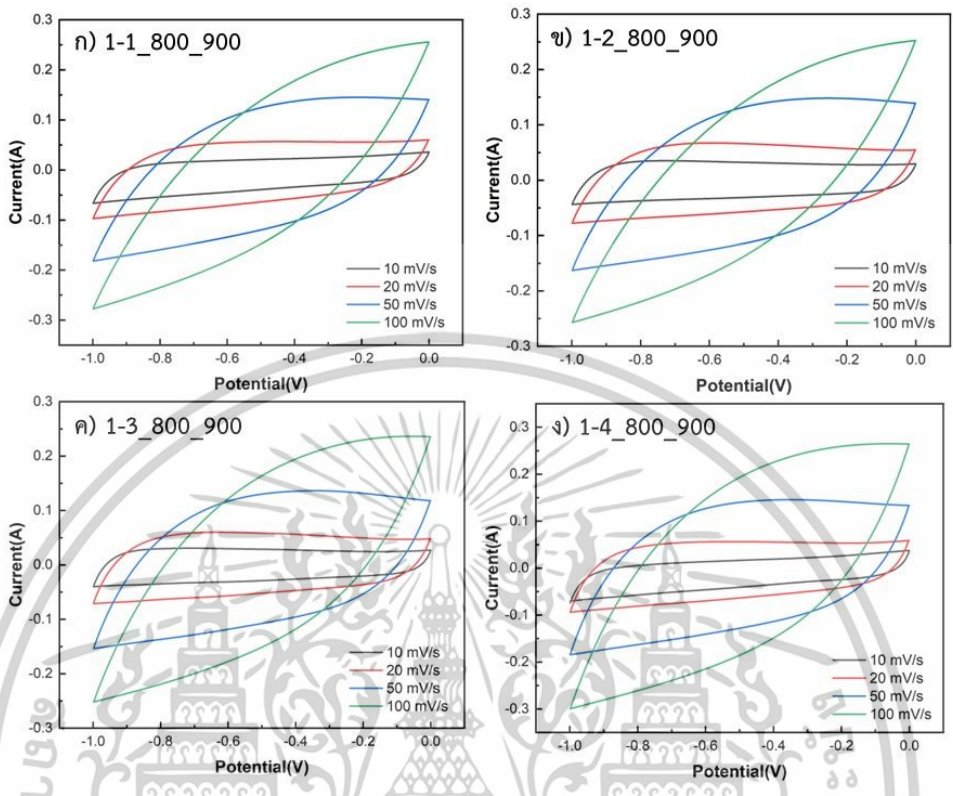
รูปที่ 4.10 เส้นโค้ง GCD ที่ Current Density 0.5, 1, 2 และ 5 Ag^{-1} ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 700_900
 ก) 1-1_700_900 ข) 1-2_700_900 ค) 1-3_700_900 ง) 1-4_700_900

ตารางที่ 4-5 แสดงผลการศึกษาศักยภาพเชิงเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ไม้ไฟของการเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียสและ Activated carbon ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

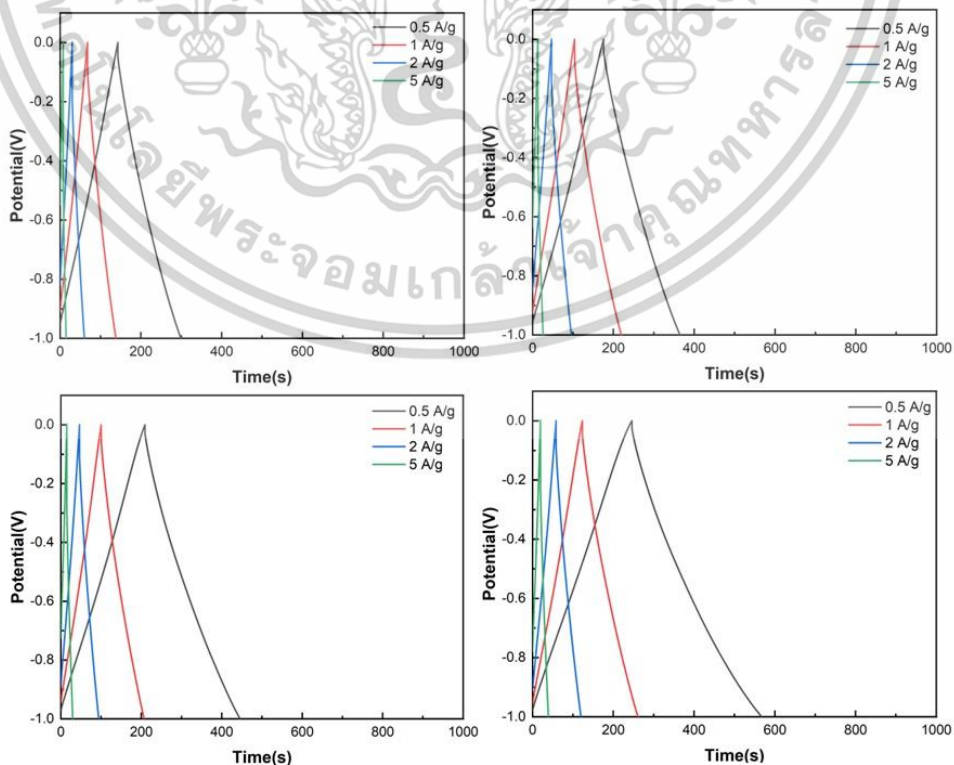
Sample	Current Density (Ag^{-1})	Specific capacitance (F/g)
1-1_700_900	0.5	179
	1	158
	2	148
	5	138
1-2_700_900	0.5	219
	1	195
	2	175
	5	153
1-3_700_900	0.5	223
	1	207
	2	182
	5	175
1-4_700_900	0.5	210
	1	184
	2	172
	5	161

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เผาถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส Activated carbon ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วน carbon : KOH เป็น 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ใช้ค้ำยอเป็น 800_900



รูปที่ 4.11 เส้นโค้ง CV ที่ Scan Rate 10, 20, 50 และ 100 mV/s ถ่านไม้ไผ่ที่อุณหภูมิ 800_900 ก) 1-1_800_900 ข) 1-2_800_900 ค) 1-3_800_900 ง) 1-4_800_900



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

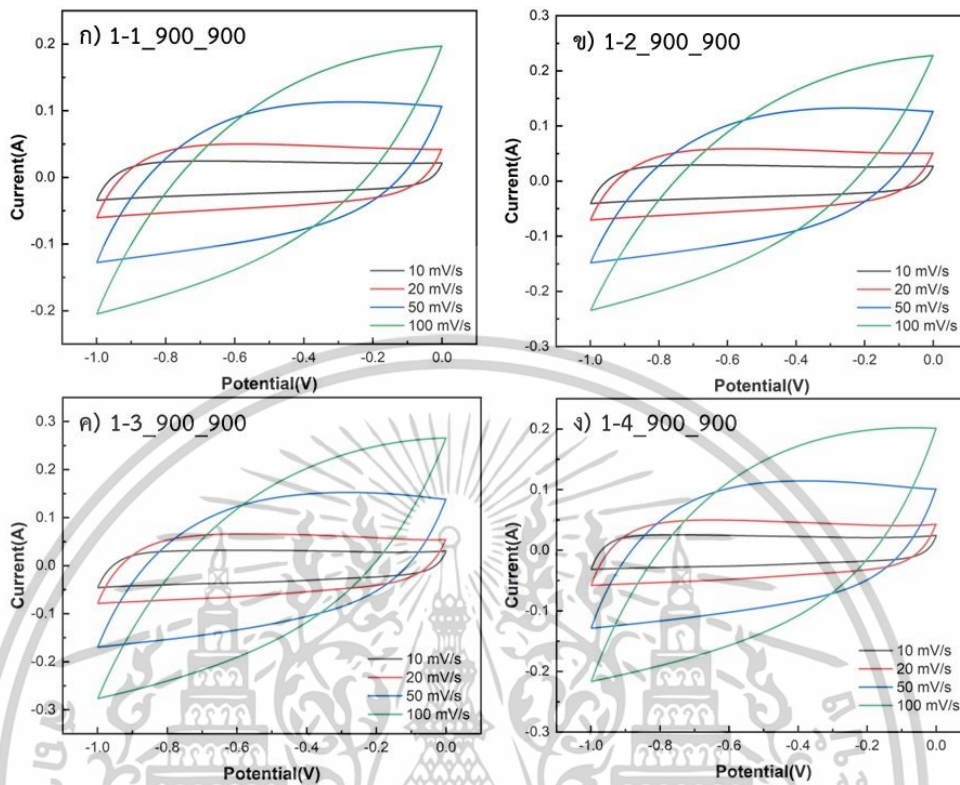
รูปที่ 4.12 เส้นโค้ง GCD ที่ Current Density 0.5, 1, 2 และ 5 Ag^{-1} ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 800_900
 ก) 1-1_800_800 ข) 1-2_800_900 ค) 1-3_800_900 ง) 1-4_800_900

ตารางที่ 4-6 แสดงผลการศึกษาศักยภาพเชิงเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ไม้ไฟของการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสและ Activated carbon ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

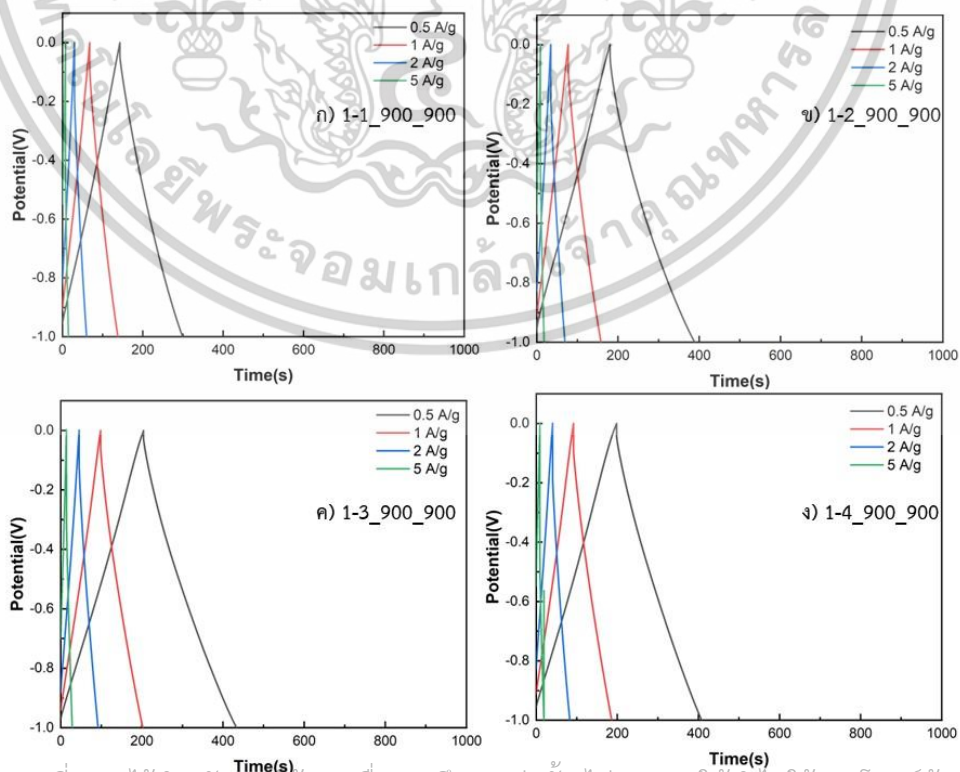
Sample	Current Density (Ag^{-1})	Specific capacitance
1-1_800_900	0.5	98
	1	93
	2	89
	5	83
1-2_800_900	0.5	127
	1	113
	2	107
	5	101
1-3_800_900	0.5	140
	1	124
	2	115
	5	102
1-4_800_900	0.5	164
	1	143
	2	135
	5	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เผาถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส Activated carbon ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วน carbon : KOH เป็น 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ใช้คำย่อเป็น 900_900



รูปที่ 4.13 เส้นโค้ง CV ที่ Scan Rate 10, 20, 50 และ 100 mV/s ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 900_900 ก) 1-1_900_900 ข) 1-2_900_900 ค) 1-3_900_900 ง) 1-4_900_900



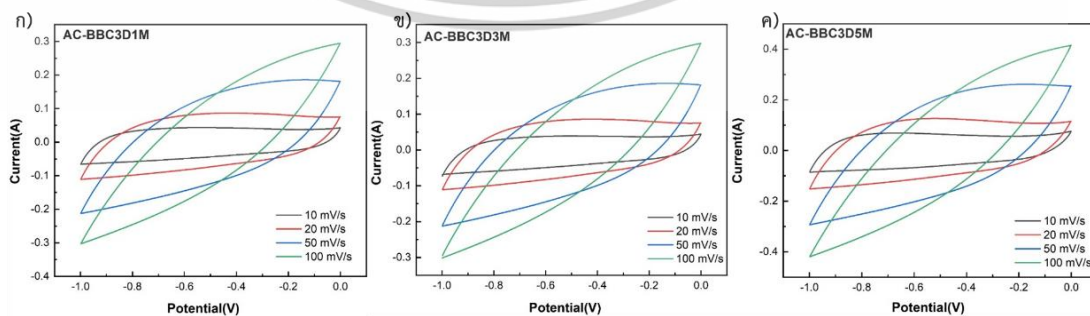
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 เส้นโค้ง GCD ที่ Current Density 0.5, 1, 2 และ 5 Ag^{-1} ถ่านไม้ไฟที่อุณหภูมิ 900_900
 ก) 1-1_900_900 ข) 1-2_900_900 ค) 1-3_900_900 ง) 1-4_900_900

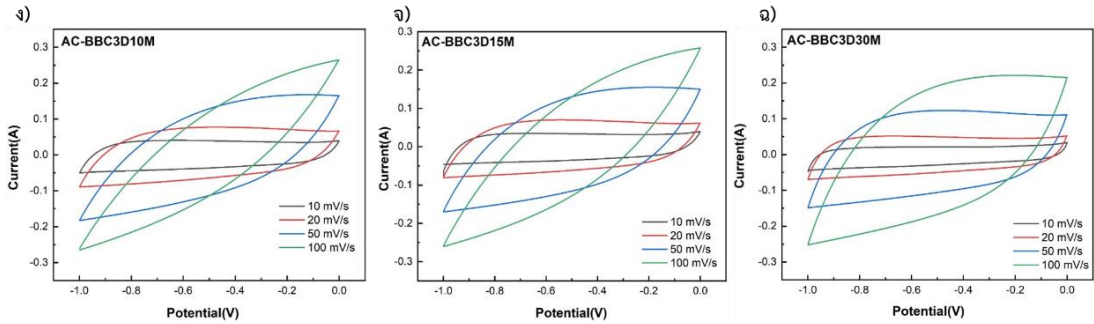
ตารางที่ 4-7 แสดงผลการศึกษาศสมบัติเชิงเคมีไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ไม้ไฟของการเผาที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียสและ Activated carbon ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

Sample	Current Density (Ag^{-1})	Specific capacitance (F/g)
1-1_900_900	0.5	87
	1	81
	2	73
	5	66
1-2_900_900	0.5	101
	1	88
	2	84
	5	78
1-3_900_900	0.5	118
	1	110
	2	106
	5	100
1-4_900_900	0.5	138
	1	126
	2	120
	5	113

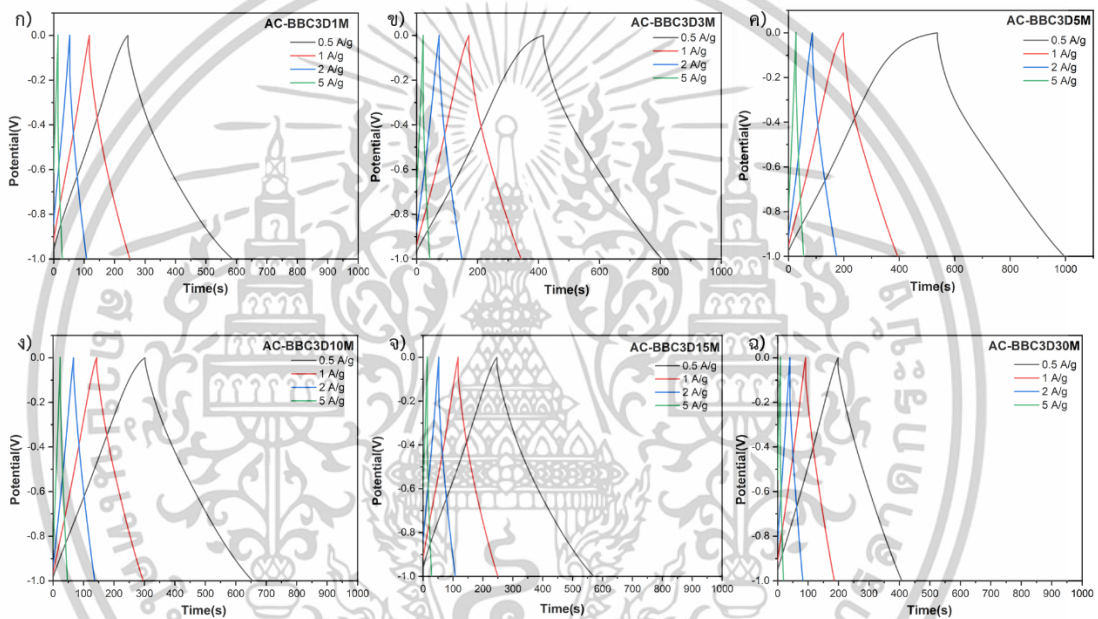
การลดอนุภาคคาร์บอนกัมมันต์ไม้ไฟโดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (3D ballmilling) โดยจะใช้เวลา 1, 3, 5, 10, 15 และ 30 นาทีตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 เส้นโค้ง CV ที่ Scan Rate 10, 20, 50 และ 100 mV/s ของการลดอนุภาคคาร์บอนกัมมันต์ไม่เผ้โดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (3D ball milling) ก) AC-BBC3D1M ข) AC-BBC3D3M ค) AC-BBC3D5M ง) AC-BBC3D10M จ) AC-BBC3D15M ฉ) AC-BBC3D30M



รูปที่ 4.16 เส้นโค้ง GCD ที่ Current Density 0.5, 1, 2 และ 5 A/g¹ ของการลดอนุภาคคาร์บอนกัมมันต์ไม่เผ้โดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (3D ball milling) ก) AC-BBC3D1M ข) AC-BBC3D3M ค) AC-BBC3D5M ง) AC-BBC3D10M จ) AC-BBC3D15M ฉ) AC-BBC3D30M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-8 ผลการการลดอนุภาคคาร์บอนกัมมันต์ไม้ไฟโดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (3D ball milling) โดยจะใช้เวลา 1, 3, 5, 10, 15 และ 30 นาทีตามลำดับ

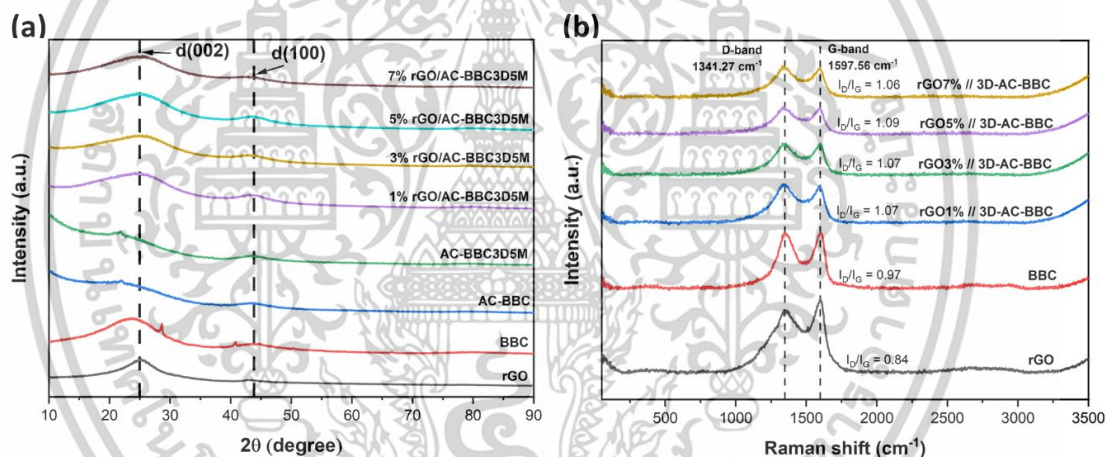
Sample	Current Density (Ag^{-1})	Specific capacitance (F/g)
AC-BBC3D1M	0.5	220
	1	188
	2	133
	5	110
AC-BBC3D3M	0.5	225
	1	204
	2	184
	5	159
AC-BBC3D5M	0.5	231
	1	215
	2	191
	5	174
AC-BBC3D10M	0.5	179
	1	158
	2	148
	5	138
AC-BBC3D15M	0.5	168
	1	144
	2	131
	5	116
AC-BBC3D30M	0.5	109
	1	103
	2	102
	5	50

ดังนั้นจึงเลือกเงื่อนไขการเผาถ่านที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปกระตุ้นให้เป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วน คาร์บอน : KOH คือ 1g : 3g และการลดขนาดอนุภาคของถ่านไม้ไฟกัมมันต์ที่เวลา 5 นาที มาศึกษาต่อโดยการ composites rGO โดยมีเงื่อนไขคือ 1, 3, 5 และ 7 wt% ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1 การวิเคราะห์ด้วย XRD และ Raman Spectroscopy

รูปแบบ XRD และสเปกตรัม Raman แสดงในรูปแบบที่ 4.1 รูปที่ 22(a) แสดงรูปแบบ XRD ของตัวอย่างเหล่านี้ พีค XRD ของ BBC, AC-BBC, และ 3D-AC-BBC แสดงพีคที่ $2\theta = 24.5^\circ$ และ 43.9° ซึ่งบ่งชี้ถึงคาร์บอนที่พีค XRD ของ rGO แสดงพีคการกระเจิงที่กว้างที่ $2\theta = 25.1^\circ$ ซึ่งเกี่ยวข้องกับพีคมาตรฐานของ rGO[48,49] พีค XRD ของตัวอย่าง rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC, และ rGO7%/3D-AC-BBC แสดงพีคที่กว้างที่ $2\theta = 25.3^\circ$ ซึ่งเกิดจาก rGO ในตัวอย่าง[48-51] รูปที่ 4.1(b) แสดงสเปกตรัม Raman สำหรับ rGO, BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC, และ rGO7%/3D-AC-BBC สเปกตรัม Raman ของ rGO แสดงพีคหลักสองพีคที่ 1597.56 cm^{-1} และ 1341.27 cm^{-1} ซึ่งเกี่ยวข้องกับสเปกตรัม G-band และ D-band ของโครงสร้าง Lattice แบบหกเหลี่ยม 2D อัตราส่วนความเข้ม ID/IG สำหรับ rGO เท่ากับ 0.84[52,53], ขณะที่ค่านี้สำหรับ BBC เท่ากับ 0.97 สเปกตรัม Raman สำหรับตัวอย่าง rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC, และ rGO7%/3D-AC-BBC มีค่า 1.07, 1.07, 1.09 และ 1.06 ตามลำดับ ค่าดังกล่าวใกล้เคียงกับค่าในตัวอย่างที่ผสมกับ rGO[53,54]



รูปที่ 4.17 (a) การวิเคราะห์ XRD และ (b) สเปกตรัม Raman สำหรับ rGO, BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC

4.2 การวิเคราะห์ SEM และ EDX

ภาพ SEM และสเปกตรัม EDX สำหรับการวิเคราะห์ธาตุของตัวอย่างแสดงในรูปแบบที่ 4.2 รูปที่ 4.2(a) แสดงภาพ SEM ของ rGO ซึ่งเผยให้เห็นลักษณะของวัสดุ GO การวิเคราะห์ธาตุของ rGO พบว่า C และ O มีน้ำหนักร้อยละ 73.22 และ 25.79 ตามลำดับ[5,55-57] รูปที่ 4.2(b) แสดงภาพ SEM ของตัวอย่าง BBC ซึ่งแสดงอนุภาคที่กระจายอยู่ในรูพรุนที่ไม่สม่ำเสมอ การวิเคราะห์ธาตุพบว่า C และ O มีน้ำหนักร้อยละ 86.41 และ 9.22 ตามลำดับ รูปที่ 4.2(c) แสดงภาพ SEM ของตัวอย่าง AC-BBC ภาพนี้แสดงความพรุนสูงและอนุภาคที่กระจายอย่างสม่ำเสมอซึ่งเกิดจากการบดบอล 3D การวิเคราะห์ธาตุพบว่า C และ O มีน้ำหนักร้อยละ 82.03 และ 13.92 ตามลำดับ รูปที่ 4.2(d) แสดงภาพ SEM ของตัวอย่าง 3D-AC-BBC ภาพนี้แสดงอนุภาคที่กระจายอย่างสม่ำเสมอซึ่งเกิดจากการบดบอล

3D ที่ความเร็วสูง การวิเคราะห์ธาตุพบว่า C และ O มีน้ำหนักร้อยละ 82.31 และ 16.58 ตามลำดับ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

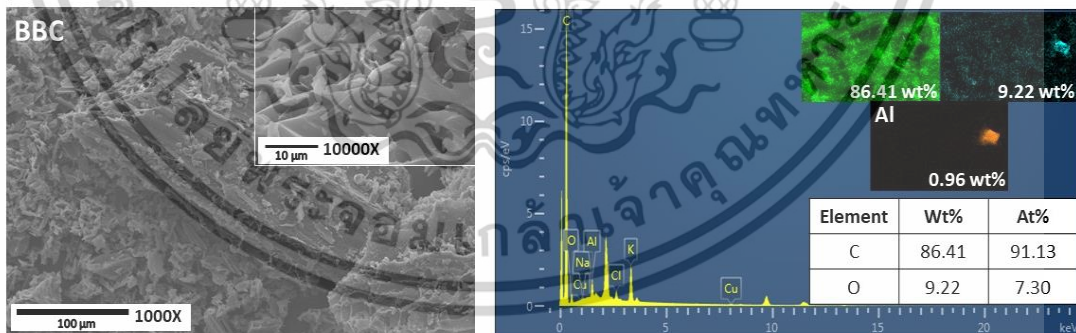
รูปที่ 4.2(e), (f), (g), และ (h) แสดงภาพ SEM และสเปกตรัม EDS ของตัวอย่าง rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC, และ rGO7%/3D-AC-BBC ตามลำดับ ภาพ SEM ของตัวอย่างแสดงอนุภาคที่ละเอียดและกระจายอย่างสม่ำเสมอซึ่งเกิดจากการบดบอล 3D ที่ความเร็วสูง การวิเคราะห์ธาตุสำหรับ C และ O พบว่า rGO1%/3D-AC-BBC มีน้ำหนักร้อยละ 87.74 และ 9.74, rGO3%/3D-AC-BBC มีน้ำหนักร้อยละ 80.88 และ 7.93, rGO5%/3D-AC-BBC มีน้ำหนักร้อยละ 83.89 และ 10.62, และ rGO7%/3D-AC-BBC มีน้ำหนักร้อยละ 84.56 และ 8.81 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ธาตุ C และ O ใกล้เคียงกับตัวอย่าง AC-BBC

ตารางที่ 4-1 แสดงการวิเคราะห์ธาตุในหน่วย wt.% และอัตราส่วน C/O คือ 2.84, 9.37, 5.89, 4.96, 9.01, 10.20, 7.90 และ 9.60 ตามลำดับ ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วน C/O ของ AC-BBC ใกล้เคียงกับ 3D-AC-BBC แต่ต่ำกว่าของ BBC ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการกระตุ้น[29]. อัตราส่วน C/O ของ rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC, และ rGO7%/3D-AC-BBC ใกล้เคียงกับแต่สูงกว่าของ BBC เนื่องจากการเพิ่ม rGO ใน AC-BBC[52,58-60].

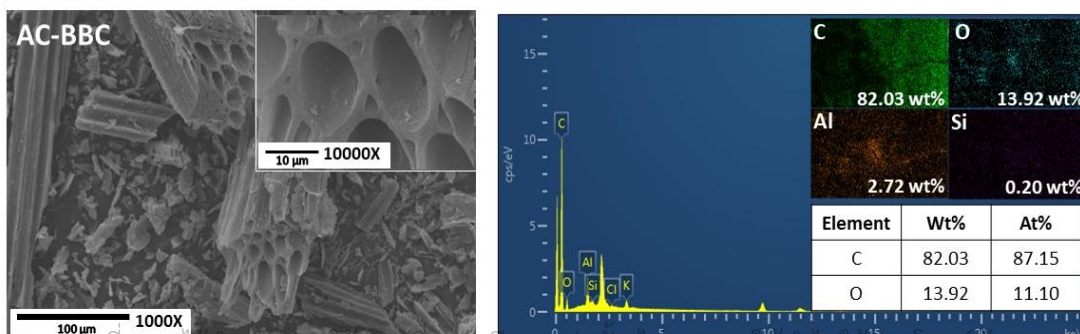
(a)



(b)



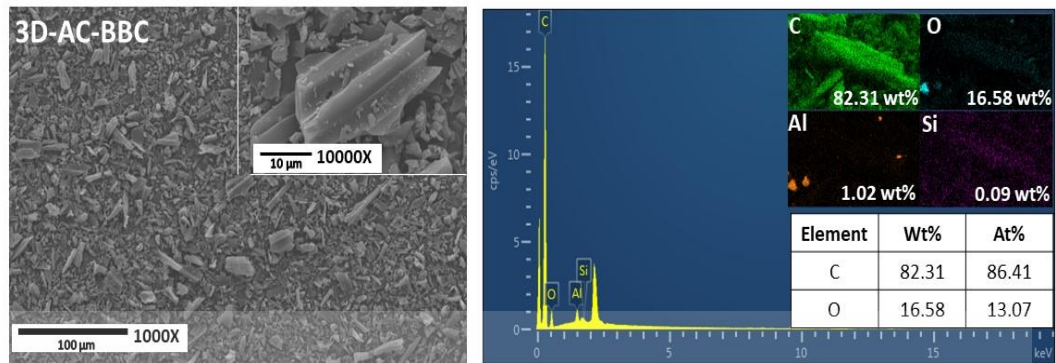
(c)



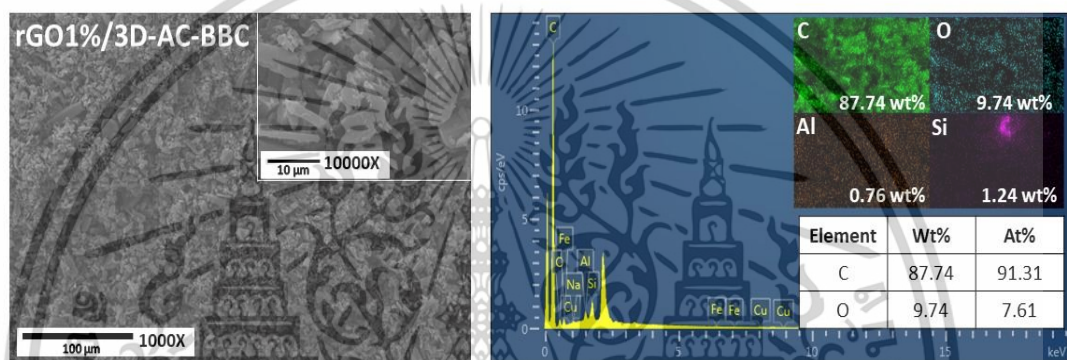
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

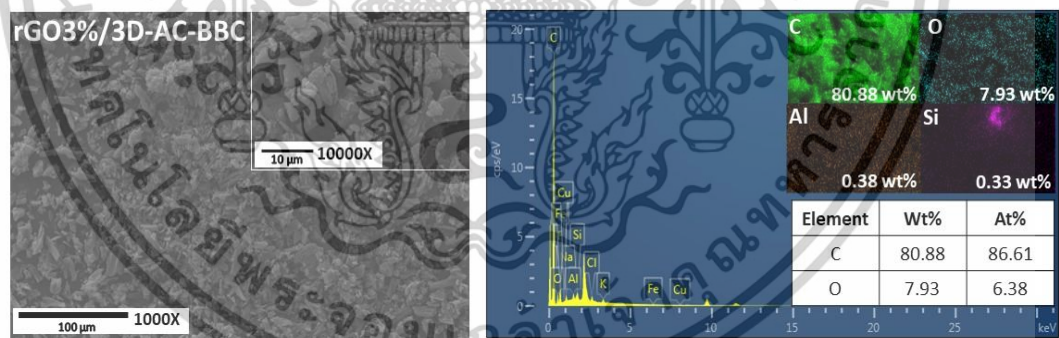
(d)



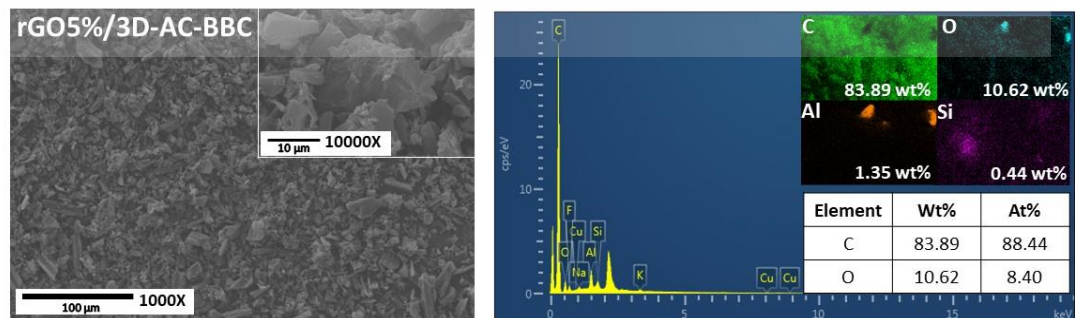
(e)



(f)

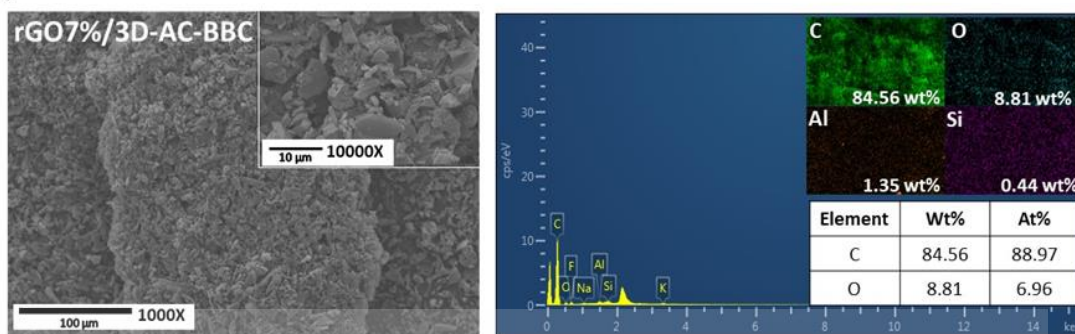


(g)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(h)



รูปที่ 4.18 (a-h) ภาพ SEM และสเปกตรัม EDX สำหรับการแจกแจงธาตุของตัวอย่าง rGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC ตามลำดับ

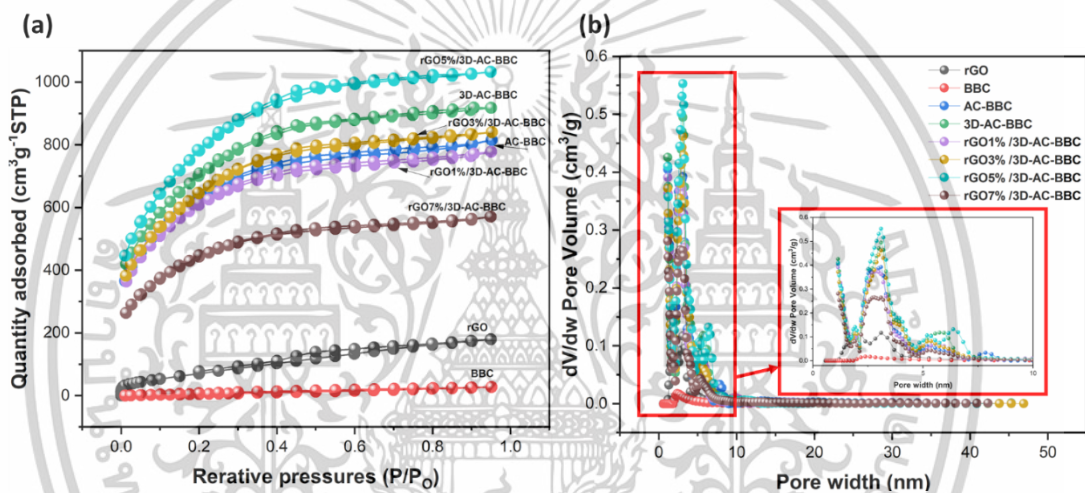
ตารางที่ 4-9 การวิเคราะห์ธาตุในหน่วย wt.% และอัตราส่วน C/O

Sample	Element				C/O Ratio
	Carbon (C)	Oxygen (O)	Aluminum (Al)	Silica (Si)	
rGO	73.22	25.79	-	-	2.84
BBC	86.41	9.22	0.96	-	9.37
AC-BBC	82.03	13.92	2.71	0.20	5.89
3D-AC-BBC	82.31	16.58	1.02	0.09	4.96
1%rGO/3D-AC-BBC	87.74	9.74	0.76	1.24	9.01
3%rGO/3D-AC-BBC	80.88	7.93	0.38	0.37	10.20
5%rGO/3D-AC-BBC	83.89	10.62	1.35	0.44	7.90
7%rGO/3D-AC-BBC	84.56	8.81	0.56	0.40	9.60

4.3 การวิเคราะห์ BET

การแจกแจงขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวเฉพาะ (SSA) สำหรับ ที่ได้รับการทดสอบด้วยวิธี BJH และ BET แสดงในรูปที่ 4.3 รูปที่ 24 (a) แสดง SSA สำหรับตัวอย่างเหล่านี้ รูปแบบของ isotherms ของทุกตัวอย่างแสดงลูอิสเทอร์ซีสประเภทที่ IV ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแมโครสโพรตและเมโซสโพรตที่มีส่วนช่วยในพื้นที่ผิวเฉพาะ ค่า SSA มีดังนี้ 191.93, 22.09, 1801.62, 2022.59, 1773.92, 1865.65, 2239.81 และ 1274.21 m^2/g สำหรับ rGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC ตามลำดับ ค่า SSA ของ rGO สูงกว่าค่า SSA ของ BBC ประมาณ 10 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่า rGO ที่มีขนาดนาโนมีค่า SSA ที่สูงกว่า ค่า SSA ของ 3D-AC-BBC สูงกว่าค่า SSA ของ BBC และ AC-BBC[61,62] ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ตัวอย่างได้รับผลกระทบจากการกระตุ้นด้วย KOH และการบัดด้วยลูกบอล 3D ความเร็วสูง ค่า SSA สูงสุดคือ 2239.81 m^2/g สำหรับ rGO5%/3D-AC-BBC ซึ่งสูงกว่า BBC ประมาณ 100 เท่า ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่า 3D-AC-BBC ที่มีการผสมกับ rGO 5 wt.% เป็นตัวเลือกที่ดีในการเพิ่มค่า SSA การแจกแจงปริมาตรรูพรุนสำหรับตัวอย่างต่างๆ ในการศึกษาแสดงในรูปที่ 4.3(b) ทุกตัวอย่างได้รับการวิเคราะห์โดยการแจกแจงขนาดรูพรุนเฉลี่ยจากเทคนิค BJH ค่าปริมาตรรูพรุนมีดังนี้ 0.11, 0.02, 0.39, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.50, 0.38, 0.46, 0.55 และ 0.26 cm^3/g ตามลำดับ ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่า ปริมาตรรูพรุนของ rGO5%/3D-AC-BBC สูงกว่าตัวอย่างอื่นๆ ประมาณ 30 เท่า[63-65] นี้แสดงให้เห็นว่า การผสม rGO ขนาดนาโน 5 wt.% กับตัวอย่าง 3D-AC-BBC ช่วยเพิ่มปริมาตรรูพรุนของวัสดุ BBC นอกจากนี้ ค่าการแจกแจงขนาดรูพรุนเฉลี่ยมีดังนี้ 3.91, 3.97, 2.18, 2.21, 2.16, 2.20, 2.22 และ 2.18 nm สำหรับ rGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC ตามลำดับ ขนาดรูพรุนเฉลี่ยที่เล็กที่สุดพบในวัสดุ rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC ซึ่งอยู่ที่ประมาณ 2.2 nm ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าวัสดุ rGOx%/3D-AC-BBC (x=1, 3, 5, และ 7 wt.%) ที่ผสมกันมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานในซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC)[66,67]

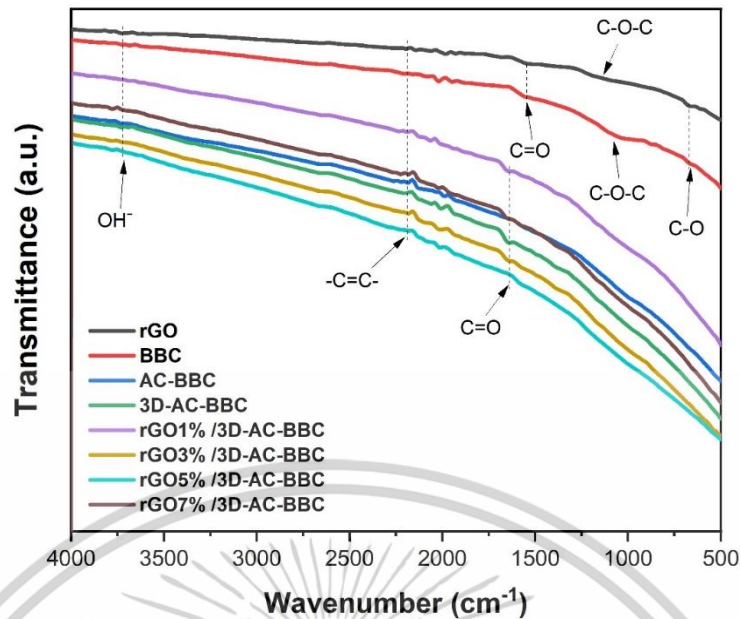


รูปที่ 4.19 (a) การดูดซับและการปล่อยไนโตรเจน, และ (b) การแจกแจงปริมาตรรูพรุน BJH สำหรับตัวอย่าง rGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC

4.4 การวิเคราะห์ FT-IR

สเปกตรัม FT-IR แสดงในรูปที่ 4.4 พีคลักษณะของ rGO ปรากฏที่ประมาณ 2450 ถึง 2160 cm^{-1} , 1460 ถึง 1260 cm^{-1} , และ 1020 ถึง 1210 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการยึดตัวของ $\text{C}=\text{C}$ -, การยึดตัวของ $\text{C}-\text{O}$ และการเชื่อมต่อ $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงลักษณะของโครงสร้าง rGO ที่มี sp^2 พีคที่ 375 cm^{-1} สอดคล้องกับโหมดการยึดตัวของ $\text{O}-\text{H}$ ซึ่งเป็นกลุ่มไฮดรอกซิลที่เชื่อมโยงกับ H_2O บนพื้นผิวโมเลกุล[68,69] ตัวอย่าง AC-BBC และ 3D-AC-BBC แสดงเพียงพีคการสั่นสะเทือนของการยึดตัวของ $\text{C}-\text{O}$ และการเชื่อม $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ตัวอย่าง rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC แสดงพีคการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการยึดตัวของ $\text{C}=\text{O}$ แบบสมมาตร. ผลลัพธ์เหล่านี้ยืนยันว่า rGO เป็นส่วนสำคัญของวัสดุ BBC[70,71]

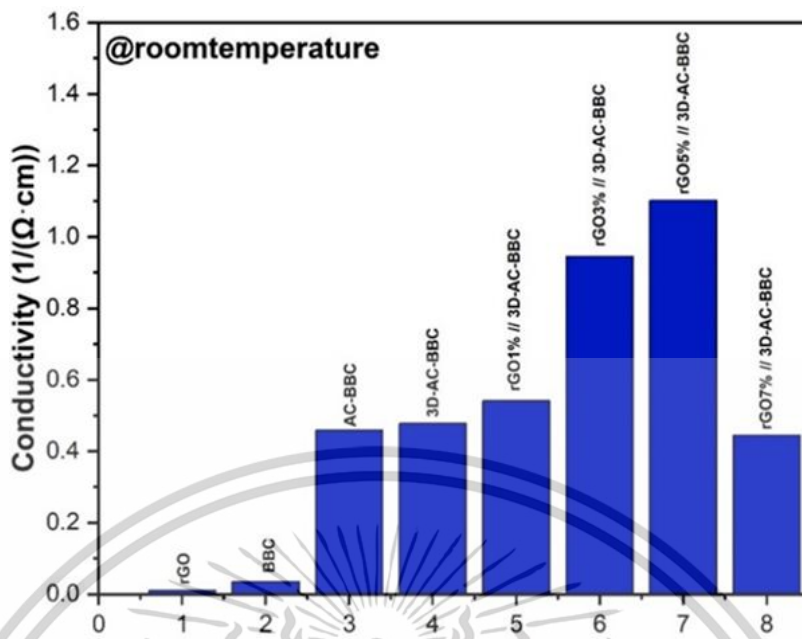
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 สเปกตรัม FT-IR ของ rGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC

4.5 ความสามารถในการนำไฟฟ้า

รูปที่ 4.5 แสดงความสามารถในการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดที่มีวัสดุแอคทีฟเป็นอิเล็กโทรดทำงานที่อุณหภูมิห้อง สารละลายอิเล็กโทรดถูกผลิตจากวัสดุแอคทีฟที่กำหนด, แอซีทีลีนแบล็กและ PVDF ในอัตราส่วน 85:10:5 (wt.%) ในตัวทำละลาย NMP สารละลายอิเล็กโทรดแต่ละตัวถูกเคลือบบนขั้วสเตรตแก้วและทำการอบแห้งก่อนทำการวัดผลขอลที่อุณหภูมิห้อง ผลลัพธ์แสดงความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรดที่มี คือ 0.01, 0.04, 0.46, 0.48, 0.54, 0.95, 1.10 และ 0.45 ($1/\Omega\cdot\text{cm}$) ตามลำดับ[72] ความสามารถในการนำไฟฟ้าของ 3D-AC-BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC มีค่ามากกว่า BBC ที่เป็นวัสดุฐานจากไม้ไผ่ ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่า rGO ต้องถูกผสมกับ BBC เพื่อเสริมประสิทธิภาพ ค่าในสารละลายอิเล็กโทรดจาก rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, และ rGO5%/3D-AC-BBC ที่ได้รับการกระตุ้นด้วย KOH และการบัดด้วยลูกบอล 3D ความเร็วสูงมีค่ามากกว่า BBC นี้แสดงให้เห็นว่าการกระตุ้นด้วย KOH และการบัดด้วยลูกบอล 3D ความเร็วสูงช่วยในการผสมวัสดุ rGO สารละลายอิเล็กโทรดจากวัสดุ rGO5%/3D-AC-BBC แสดงความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูงสุดที่ 1.10 ($1/\Omega\cdot\text{cm}$). ความสามารถในการนำไฟฟ้าของ rGO5%/3D-AC-BBC สูงกว่าค่า BBC ประมาณ 47 เท่า นี่ยืนยันว่า rGO 5 wt.% มีส่วนช่วยในการนำไฟฟ้า

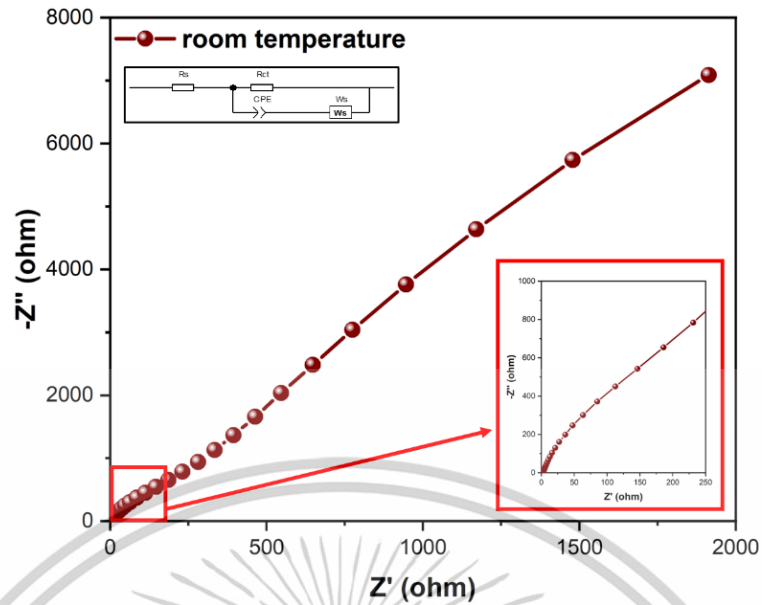


รูปที่ 4.21 ความสามารถในการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มี rGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC ในอิเล็กโทรดทำงานที่อุณหภูมิห้อง

4.6 สมบัติทางเคมีไฟฟ้า

การนำไฟฟ้าไอออนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KOH 3.0 M ถูกวัดโดยใช้การวิเคราะห์ EIS การวัดนี้ทำที่ความถี่ตั้งแต่ 1000 kHz ถึง 1 Hz ที่อุณหภูมิ 30, 40, 50, 60 และ 70 °C การวิเคราะห์ EIS ของการพืงพาดอุณหภูมิใช้ระบบเซลล์ซูเปอร์แคปาซิเตอร์ที่มีสามขั้วไฟฟ้าในการวัดสมบัติทางเคมีไฟฟ้าและการใช้เครื่องมือวัดอุณหภูมิ ขั้วไฟฟ้าทั้งสามประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทำงาน Pt sheet, ขั้วอ้างอิง, และขั้ว Pt sheet ตัวคูณ ข้อมูล R ที่ได้จากการตัดขอบของผลลัพธ์ที่แกนความต้านทานจริงของ EIS เท่ากับ 1.09 Ω [50] เนื่องจากการแยกตัวของไอออน K⁺ ในสารละลาย KOH ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.22 การวิเคราะห์ EIS จากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KOH 3.0 M

คุณสมบัติของการวัดแรงดันรอบ (CV) ของขั้วไฟฟ้าทำงานที่ผลิต ถูกตรวจสอบ การวัดใช้ แผ่น Ag/AgCl เป็นขั้วอ้างอิงและลวดแพลตินัมเป็นขั้วตัวคูณ โดยขั้วไฟฟ้าทำงานถูกผลิตจากตัวอย่างที่เตรียมไว้ สารละลาย KOH 3.0 M ถูกใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ไอออน การวัดทำที่ศักย์แรงดันจาก -1.0 V ถึง 0.0 V ที่อัตราการสแกน 10, 20, 50, และ 100 mV/s เพื่อหาค่าความหนาแน่นกระแส

กราฟ CV สำหรับขั้วไฟฟ้าทำงาน แสดงในรูปที่ 4.7 การสแกนที่อัตรา 10, 20, 50, และ 100 mV/s ถูกใช้เพื่อศึกษาการนำทางเคมีไฟฟ้า กราฟ CV ของทุกขั้วไฟฟ้าที่อัตราสแกนเหล่านี้แสดงในรูปที่ 4.7(a), (b), (c), และ (d) ตามลำดับ รูปที่ 4.7(a) แสดงกราฟ CV ที่อัตราสแกน 10 mV/s ผลลัพธ์ในช่วงแรงดัน -0.1-0.0 V โดยมีความหนาแน่นกระแสที่ -1.0 และ 1.0 A/g ที่ได้ระหว่างการทดสอบทางเคมีไฟฟ้า รูปแบบเกือบสี่เหลี่ยมในกราฟ CV แสดงปฏิกิริยาที่สามารถกลับได้และแสดงลักษณะซูเปอร์แคปาซิทีฟที่การโต้ตอบระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ [73-75] ขั้วไฟฟ้าทั้งหมดแสดงคุณสมบัติซูเปอร์แคปาซิทีฟ [74,75] ลักษณะซูเปอร์แคปาซิทีฟของขั้วไฟฟ้าสามารถประเมินได้จากค่าความจุเฉพาะ (Cs) ซึ่งคำนวณจากสมการ (4)

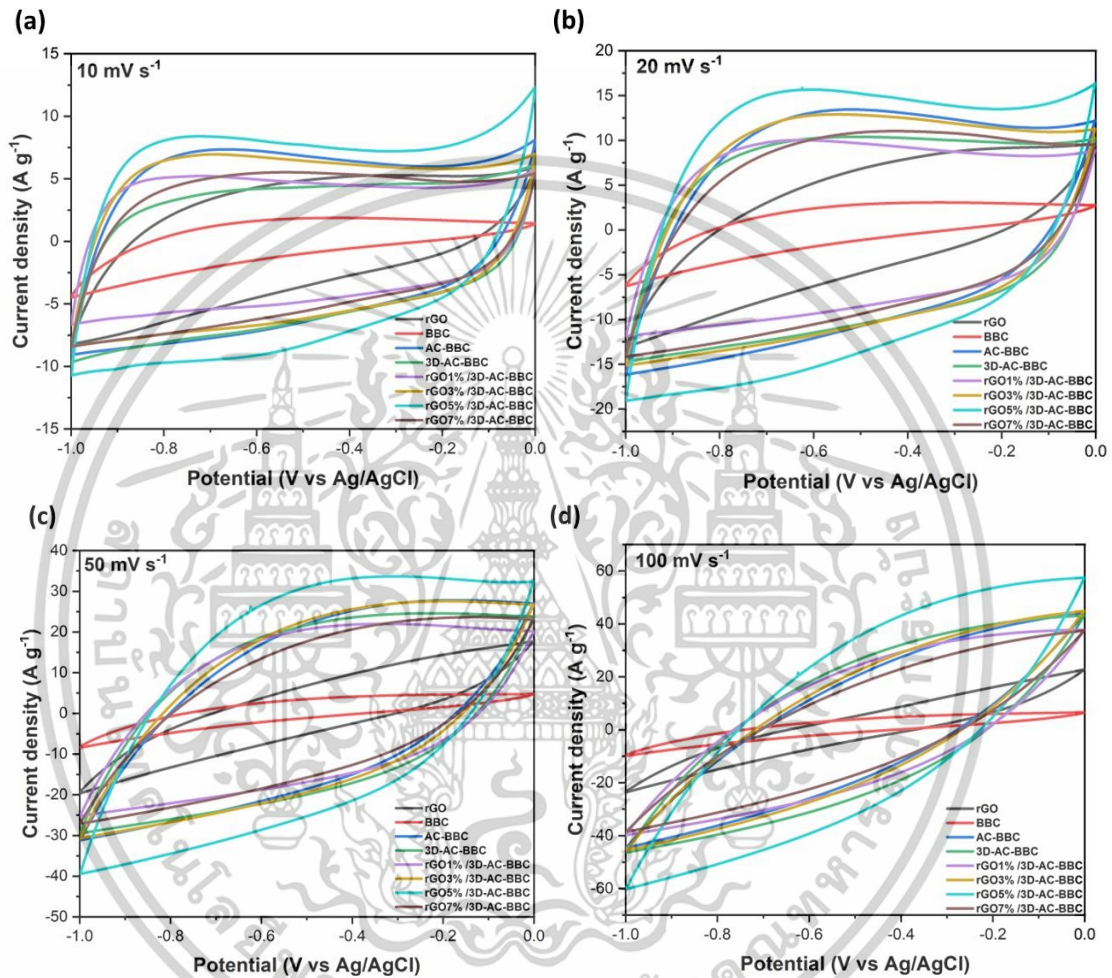
$$C_s = \frac{1}{mS\Delta V} \int_{V_a}^{V_c} IdV \quad (4)$$

โดยที่ dV คือการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน, I คือกระแสที่สูงสุดของการรีดอกซ์, m คือน้ำหนักที่ใช้ได้, S คืออัตราการสแกน และ ΔV คือการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เป็นหน้าต่าง ที่อัตราการสแกน 10 mV/s ค่าของ Cs ที่ได้จากขั้วไฟฟ้าคือ 117.78, 48.16, 223.12, 231.73, 198.39, 228.52, 301.80 และ 193.08 F/g สำหรับ rGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC ตามลำดับ ขั้วไฟฟ้าที่ทำจาก BBC แสดงค่าความจุเฉพาะ Cs ที่เล็กที่สุด ซึ่งแสดงพฤติกรรมซูเปอร์แคปาซิทีฟที่ไม่ดี ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าที่ทำจาก rGO5%/3D-AC-BBC แสดงค่าความจุเฉพาะที่สูง ซึ่งแสดงคุณสมบัติซูเปอร์แคปาซิทีฟที่ดี [76-77]

รูปที่ 4.7(a), (b), (c) และ (d) แสดงกราฟ CV ที่อัตราสแกน 10, 20, 50 และ 100 mV/s ตามลำดับ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

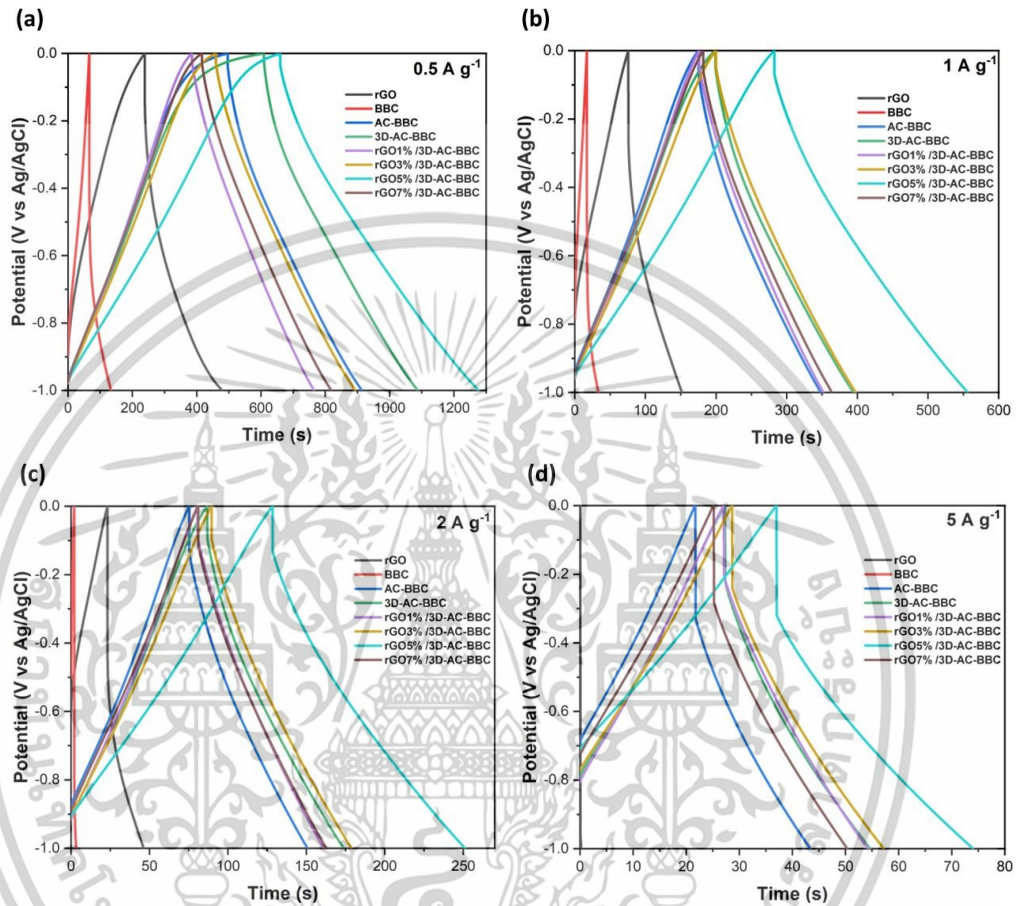
ชีวไฟฟ้าที่ทำจาก rGO5%/3D-AC-BBC มีพื้นที่ที่ใหญ่ที่สุดและแสดงพฤติกรรมซูเปอร์แคปาซิทิฟที่ดี [73-75] ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า ชีวไฟฟ้าที่ทำจาก rGO5%/3D-AC-BBC มีความจุเฉพาะที่ใหญ่ที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับชีวไฟฟ้าอื่นๆ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุ BBC ได้รับการเสริมสมรรถนะทางซูเปอร์แคปาซิทิฟเมื่อเติม rGO นาโนคอมโพสิต 5 wt.% ตามด้วยการเปิดใช้งาน KOH และการอบบอล 3D ความเร็วสูง



รูปที่ 4.23 กราฟ CV ที่อัตราสแกนต่างๆ สำหรับชีวไฟฟ้า rGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC, อัตราสแกน 10 mV/s (a), 20 mV/s (b), 50 mV/s (c) และ 100 mV/s (d)

รูปที่ 4.8 แสดงกราฟ GCD ทำภายในหน้าต่างแรงดันจาก -1.0 V ถึง 0.0 V ที่ความหนาแน่นกระแส 0.5, 1, 2, และ 5 A/g รูปที่ 4.8(a) แสดงกราฟ GCD สำหรับตัวอย่าง rGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC ภายในหน้าต่างแรงดันจาก -1.0 V ถึง 0.0 V ที่ความหนาแน่นกระแส 0.5 A/g กราฟ GCD ทั้งหมดแสดงรูปสามเหลี่ยมสมมาตรเกือบที่แสดงพฤติกรรมของชีวไฟฟ้าที่ทำงานซูเปอร์แคปาซิทิฟที่มีการนำไฟฟ้าสูง [78-80] ตัวอย่าง rGO5%/3D-AC-BBC แสดงรูปสามเหลี่ยมของความหนาแน่นกระแส เวลาในการปลดปล่อยที่ช้า และพื้นที่ใหญ่ภายใต้กราฟ GCD ซึ่งบ่งชี้ถึงความเหมาะสมสำหรับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การใช้งานในอุปกรณ์ EDLC รูปที่ 4.8(b), (c), และ (d) แสดงกราฟ GCD ภายในหน้าต่างแรงดันจาก -1.0 V ถึง 0.0 V ที่ความหนาแน่นกระแส 0.5, 1, 2, และ 5 A/g ตัวอย่าง rGO5%/3D-AC-BBC แสดงรูปสามเหลี่ยมที่ชัดเจนที่สุด ซึ่งบ่งชี้ว่า ขั้วไฟฟ้านั้นมีความจุเฉพาะสูงสำหรับตัวพาในอุปกรณ์ EDLC [78-80]



รูปที่ 4.24 กราฟ GCD กับความหนาแน่นกระแสจากขั้วไฟฟ้า rGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC ที่ (a) 0.5 A/g, (b) 1.0 A/g, (c) 2.0 A/g และ (d) 5.0 A/g

กราฟการคำนวณค่า C_s สำหรับอิเล็กโทรด ที่ความหนาแน่นกระแสจาก 0.5 ถึง 5 A/g แสดงในรูปที่ 4.9(a) ค่า C_s ของอิเล็กโทรดเหล่านี้ลดลงเมื่อความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้น อิเล็กโทรด BBC มีค่า C_s ต่ำที่สุด ขณะที่อิเล็กโทรด rGO5%/3D-AC-BBC มีค่า C_s สูงที่สุด ค่า C_s ของ rGO สูงกว่า BBC ในทุกความหนาแน่นกระแสที่ใช้ นอกจากนี้ ค่า C_s ของอิเล็กโทรด 3D-AC-BBC สูงกว่า BBC และ AC-BBC ในทุกความหนาแน่นกระแสที่ใช้ การสังเกตนี้แสดงให้เห็นว่าการผสมผสานระหว่างการคาร์บอนเชิงซ้อนและการมิลลิ่งลูกบอล 3D ความเร็วสูงทำให้ค่าของ C_s ของวัสดุ BBC ดีขึ้น ค่า C_s สำหรับอิเล็กโทรด rGO5%/3D-AC-BBC สูงกว่า 3D-AC-BBC, ขณะที่อิเล็กโทรด rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC ต่ำกว่า 3D-AC-BBC นาโนคอมโพสิตที่ประกอบด้วย rGO 2-D นาโนวัสดุ 5 wt.% กับ 3D-AC-BBC แสดงให้เห็นค่าของ C_s ที่ดีขึ้นสำหรับวัสดุที่อิง BBC นอกจากนี้ อิเล็กโทรด

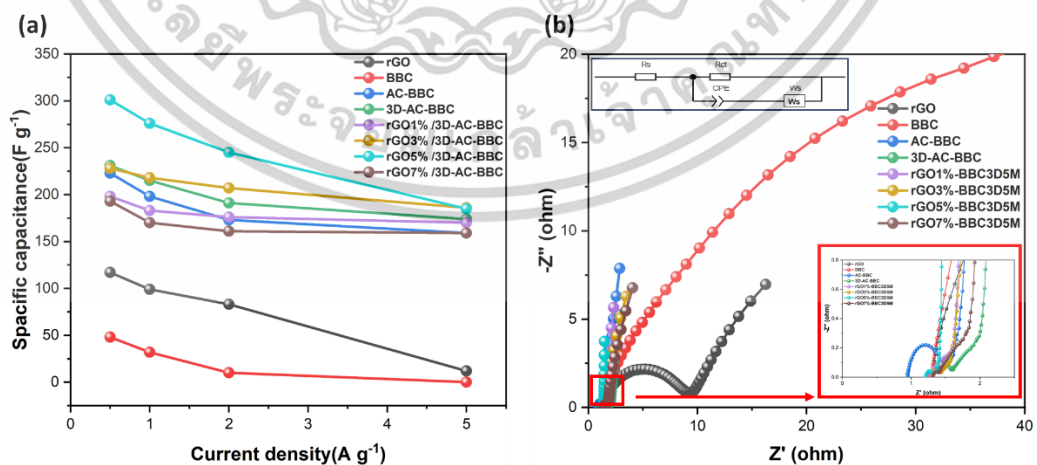
rGO5%/3D-AC-BBC แสดงค่าของ C_s สูงสุดในทุกความหนาแน่นกระแสที่ใช้ ค่า C_s ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

rGO5%/3D-AC-BBC คือ 301.80, 276.29, 245.47, และ 185.56 F/g สำหรับความหนาแน่นกระแสที่ 0.5, 1.0, 2.0 และ 5.0 A/g ตามลำดับ ค่านี้สูงกว่า BBC ประมาณ 47 เท่าที่ความหนาแน่นกระแส 0.5 A/g. ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวัสดุ 3D-AC-BBC ผสมกับ rGO 2-D นาโนวัสดุ 5 wt.% เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์ซูเปอร์แคปาซิเตอร์ [81,82]

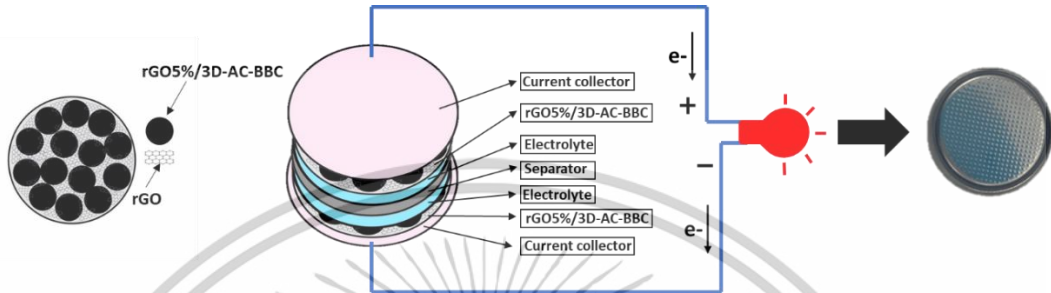
รูปที่ 4.9(b) แสดงกราฟ Nyquist สำหรับอิเล็กโทรด ที่ความถี่จาก 100 kHz ถึง 0.01 Hz จากกราฟ Nyquist, ส่วนประกอบ EIS ที่แท้จริงและจินตภาพของอิมพีแดนซ์ถูกกำหนด กราฟ Nyquist แสดงส่วนที่เป็นเส้นเฉียงที่ความถี่ต่ำและรูปวงกลมในบริเวณความถี่สูง. ความต้านทานภายใน, ความจุที่เกี่ยวข้องกับจลนการชาร์จ-คายประจุ, และการแพร่กระจายของไอออนอิเล็กโทรไลต์ถูกกำหนด. กราฟ Nyquist ได้รับข้อมูลเกี่ยวกับ (1) ความต้านทานอนุกรม (R_s), (2) ความต้านทานการถ่ายโอนประจุ (R_{ct}), (3) ความจุชั้นคู่ (CPE), (4) องค์ประกอบ Warburg (W), และ (5) องค์ประกอบเฟสคงที่ ค่า R_s ได้มาจากการตัดขวางของแกนจริงในพื้นที่ความถี่สูง ค่า R_{ct} และ CPE ได้มาจากพื้นที่วงกลมในกราฟ และ W ถูกกำหนดจากหางของกราฟที่มุม 45° ที่ความถี่ต่ำค่า R_s คือ 1.32, 1.32, 0.95, 1.32, 1.26, 1.30, 1.20 และ 1.36 ohm สำหรับอิเล็กโทรด rGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC ตามลำดับ รูปวงกลมในบริเวณความถี่สูงสำหรับอิเล็กโทรด BBC แสดงความต้านทานการถ่ายโอนประจุ (R_{ct}) ที่ใหญ่ที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นความจุชั้นคู่ (CPE) ที่ไม่ดี [83-85] ค่า R_{ct} ของอิเล็กโทรด rGO เล็กกว่าของอิเล็กโทรด BBC อย่างไรก็ตาม ค่า R_{ct} ของ rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC ต่ำกว่าของอิเล็กโทรด 3D-AC-BBC. อิเล็กโทรด rGO5%/3D-AC-BBC แสดงค่า R_{ct} ที่เล็กที่สุด ซึ่งบ่งชี้ถึงความจุชั้นคู่ (CPE) ที่ดี, ตามที่แสดงในรูปย่อของ รูปที่ 30(b) สำหรับองค์ประกอบ Warburg (W), อิเล็กโทรดทั้งหมดแสดงหางของกราฟที่มุม 45° ที่ความถี่ต่ำ ปัจจัยเหล่านี้บ่งชี้ถึงพฤติกรรมซูเปอร์แคปาซิเตอร์ อิเล็กโทรด rGO5%/3D-AC-BBC เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุปกรณ์ซูเปอร์แคปาซิเตอร์



รูปที่ 4.25 (a) ค่า C_s จากผลลัพธ์ GCD ที่ความหนาแน่นกระแสที่ 0.5 ถึง 5 A/g, (b) กราฟ Nyquist ในช่วงความถี่ 100 kHz ถึง 0.01 Hz สำหรับอิเล็กโทรด rGO, BBC, AC-BBC, 3D-AC-BBC, rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 อุปกรณ์ Coin Cell

จากกราฟ Nyquist ในรูปที่ 4.10(b) พบว่าอิเล็กโทรด rGO5%/3D-AC-BBC ได้รับการเลือกสำหรับการสร้างอุปกรณ์ supercapacitor แบบ coin cell รูปที่ 31 แสดงการสร้างและส่วนประกอบของอุปกรณ์ supercapacitor แบบสมมาตรที่ใช้ร่างของ rGO5%/3D-AC-BBC โดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์บวกและลบจากวัสดุ rGO5%/3D-AC-BBC พร้อมสารอิเล็กโทรไลต์ 3 M KOH



รูปที่ 4.26 แผนภาพเชิงสัญลักษณ์ของ supercapacitor แบบสมมาตรของอุปกรณ์ coin cell ที่ใช้ rGO5%/3D-AC-BBC

รูปที่ 4.11(a) แสดงค่า CV สำหรับอุปกรณ์ supercapacitor แบบสมมาตรที่ใช้ร่างของ rGO5%/3D-AC-BBC อุปกรณ์ coin cell การวัดค่า CV ทำในช่วงกระแสจาก -1.0 V ถึง 0.0 V โดยใช้อัตราการสแกนจาก 5 ถึง 200 mV/s กราฟ CV ทุกกราฟแสดงพื้นที่ที่เหมาะสมซึ่งแสดงถึงพฤติกรรมของ supercapacitor ในช่วงกระแสระหว่าง -1.0 V และ 0.0 V รูปที่ 4.11(b) แสดงผลการวัด GCD สำหรับอุปกรณ์ supercapacitor แบบสมมาตร rGO5%/3D-AC-BBC coin cell ผลลัพธ์ GCD สำหรับอุปกรณ์ coin cell วัดได้ในช่วงความหนาแน่นกระแสจาก 0.1 A/g ถึง 20.0 A/g ค่าคงตัวของอุปกรณ์ rGO5%/3D-AC-BBC coin cell เพิ่มขึ้นตามความหนาแน่นกระแส รูปที่ 4.11(c) แสดงกราฟ Nyquist สำหรับอุปกรณ์ supercapacitor แบบสมมาตร rGO5%/3D-AC-BBC coin cell ในช่วงความถี่จาก 100 kHz ถึง 0.01 Hz กราฟแสดงรูปแบบวงกลมในพื้นที่ความถี่สูงและส่วนเส้นทแยงในช่วงท้ายที่มุม 45° ที่ความถี่ต่ำ ตัวอย่างในรูปที่ 4.11(c) แสดงว่า ค่า R_s เท่ากับ 0.76Ω ซึ่งได้จากการตัดขวางแกนจริงในพื้นที่ความถี่สูง รูปที่ 4.11(d) แสดงค่าของ C_s สำหรับอุปกรณ์ supercapacitor แบบสมมาตร rGO5%/3D-AC-BBC coin cell ที่ความหนาแน่นกระแสจาก 0.1 ถึง 20.0 A/g ค่า R_s แสดงให้เห็นว่าค่าของ C_s ของอุปกรณ์ coin cell มีค่า $85.93, 80.54, 78.60, 74.47, 70.60, 69.41, 65.54, 62.54, 47.87,$ และ 22.94 F/g สำหรับความหนาแน่นกระแสที่ $0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 10.0$ และ 20.0 A/g ตามลำดับ ค่า C_s ลดลงจาก 85.93 ถึง 22.94 F/g ตามการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นกระแสจาก 0.1 ถึง 20.0 A/g รูปที่ 4.11(e) แสดงประสิทธิภาพการเก็บพลังงานของอุปกรณ์ supercapacitor แบบสมมาตร rGO5%/3D-AC-BBC coin cell [55,56,49,64-70] ประสิทธิภาพ Coulombic ได้รับการพิจารณาจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าสำหรับระบบการเก็บพลังงาน อิเล็กโทรดคอมโพสิตของอุปกรณ์ coin cell แบบสมมาตรแสดงความสามารถในการย้อนกลับวงจรได้ดีหลังจากการทดสอบ $10,000$ รอบ ซึ่งยืนยันถึงประสิทธิภาพที่ยอดเยี่ยมของมัน ประสิทธิภาพ Coulombic (CE) ของอิเล็กโทรดถูกประเมินจากอัตราการถ่ายโอนประจุและประสิทธิภาพโดยใช้สมการ (5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

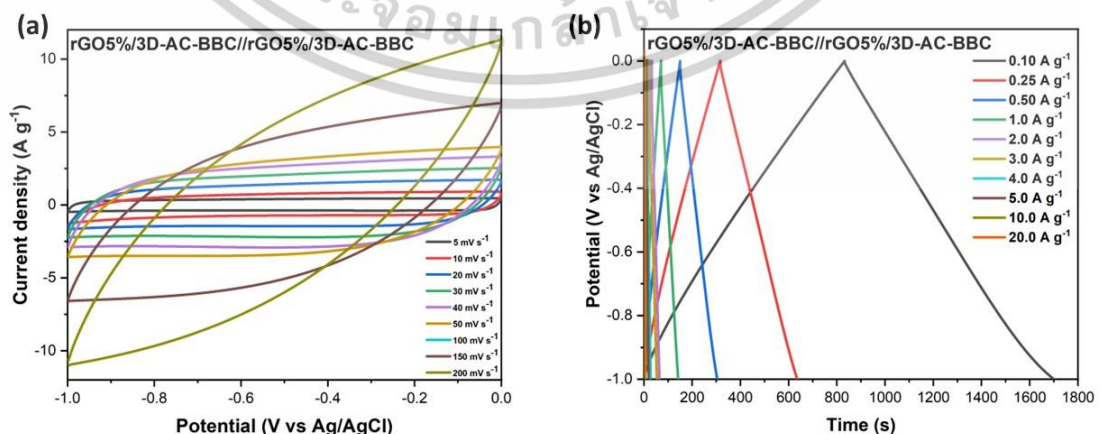
$$CE = \frac{Td}{Tc} \times 100 \quad (5)$$

โดยที่ Td และ Tc คือเวลาของการปล่อยและการชาร์จ อุปกรณ์ supercapacitor coin cell แบบสมมาตร rGO5%/3D-AC-BBC แสดง CE ที่ 99.8% หลังจาก 1,000 รอบ อุปกรณ์สามารถทำค่า CS ได้ที่ 69.41 F/g ในความหนาแน่นกระแส 1.0 A/g

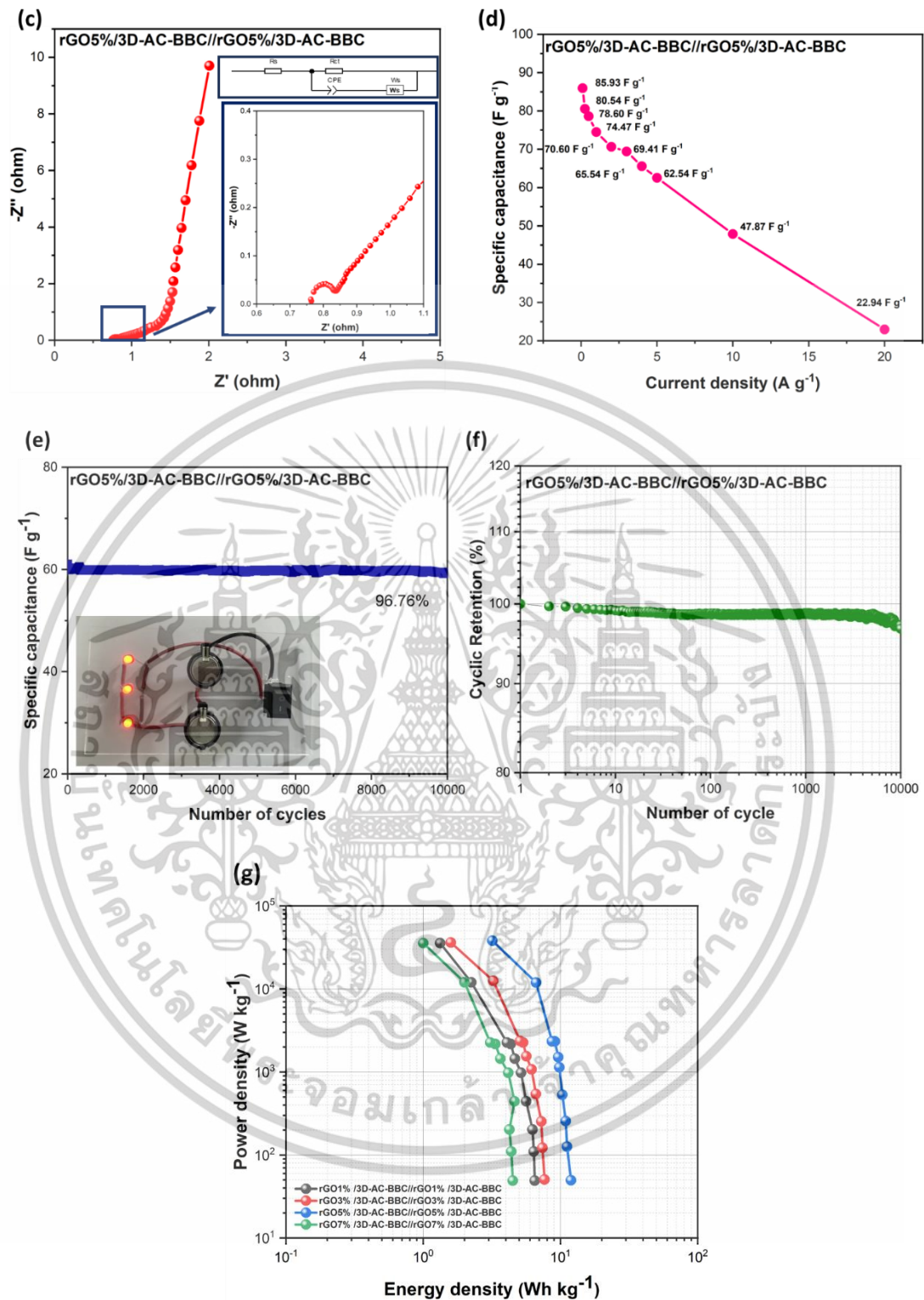
รูปที่ 4.11(f) แสดงว่า หลังจาก 10,000 รอบที่ความหนาแน่นกระแส 5 A/g เซลล์ยังคงรักษา ค่าประมาณ 97% ซึ่งแสดงถึงความเสถียรในการใช้งานที่ยอดเยี่ยม

รูปที่ 4.11(g) แสดงกราฟ Ragone สำหรับอุปกรณ์ supercapacitor แบบ rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC coin cell ในช่วงความหนาแน่นกระแสจาก 0.1 ถึง 20.0 A/g ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าความหนาแน่นพลังงานของอุปกรณ์ coin cell [77,78,83,86-89] อยู่ในช่วงจาก 45.01 ถึง 35,594.81, 48.74 ถึง 36,274, 49.56 ถึง 38,249.67 และ 43.34 ถึง 35,590 W/kg โดยมีความหนาแน่นพลังงานจาก 6.51 ถึง 1.33, 7.66 ถึง 1.59, 11.94 ถึง 3.19 และ 4.5 ถึง 1.07 Wh/kg ตามลำดับ ค่าของ Pd ลดลงพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของค่าของ Ed ที่เกิดจากความหนาแน่นกระแสที่เพิ่มขึ้นจาก 0.1 A/g ถึง 20.0 A/g

อุปกรณ์ supercapacitor แบบ rGO5%/3D-AC-BBC จำนวน 2 ตัวถูกเชื่อมต่อในวงจรอนุกรมเพื่อจ่ายพลังงานให้กับสามหลอดไฟ LED สีแดง ตามที่แสดงในตัวอย่างในรูปที่ 4.11(e) การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของวัสดุอิเล็กโทรดและอุปกรณ์ supercapacitor แสดงในตารางที่ 2 ในงานนี้ ค่าที่สูงที่สุดของ Cs ได้จากวัสดุอิเล็กโทรด rGO5%/3D-AC-BBC ที่มีค่า Cs 301.80 F/g ที่ความหนาแน่นกระแส 0.5 A/g ในขณะที่ BBC coin cell ใช้วัสดุนี้ได้ค่า Cs 85.93 F/g ที่ความหนาแน่นกระแส 0.1 A/g โดยใช้สารอิเล็กโทรไลต์ 3 M KOH ซึ่งแสดงให้เห็นว่า 2-D rGO นาโนวัสดุที่ประกอบด้วยคาร์บอนจากไม้ไผ่ในอิเล็กโทรดที่ใช้งานสามารถเสริมสมรรถภาพทางไฟฟ้าเคมีของ supercapacitor แบบสมมาตรได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 (a) กราฟ CV ที่อัตราการสแกนจาก 5 ถึง 200 mV/s, (b) กราฟ GCD ที่ความหนาแน่นกระแสจาก 0.1 ถึง 20 A/g, (c) กราฟ Nyquist, (d) ค่าของ C_s สำหรับความหนาแน่นกระแสต่างๆ, (e) การเก็บพลังงานในรอบการใช้งานที่ 5 A/g และกราฟ GCD หลังจาก 10,000 รอบ พร้อมกับตัวอย่างแสดงการจ่ายพลังงานให้กับหลอดไฟ LED สีเขียวสามดวงโดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ rGO5%/3D-AC-BBC // rGO5%/3D-AC-BBC coin cell ในวงจรอนุกรม, (f) การเก็บพลังงานในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบการใช้งานที่ 5 A/g และ (g) กราฟ Ragone ของ rGO1%/3D-AC-BBC, rGO3%/3D-AC-BBC, rGO5%/3D-AC-BBC และ rGO7%/3D-AC-BBC coin cell devices

ตารางที่ 4-10 รายงานจากวรรณกรรมเกี่ยวกับอุปกรณ์ supercapacitor ที่ใช้กราฟีนคาร์บอน

Material	Electrolytes	Current Density or Scan rate	Specific Capacitance (F g ⁻¹)	Ref.
Bamboo-derived AC (KOH activation)	1M TEABF ₄ /PC	100 mA g ⁻¹ or 5.2 mA cm ⁻²	24	[20]
Bamboo base activated carbon	1M KOH	5 mV	143	[21]
Carbon bamboo stem	1M Et ₄ NBF ₄	0.1 A g ⁻¹	25.63	[83]
Carbon cassava tubers	1M Et ₄ NBF ₄	0.1 A g ⁻¹	18.26	[83]
Cassava tubers-Bamboo Stem Blend Activated Carbon	1M Et ₄ NBF ₄	0.1 A g ⁻¹	43.44	[83]
rGO5%/3D-AC-BBC (electrode)	3 M KOH	0.5	301	This work
rGO5%/3D-AC-BBC (coin cell)	3 M KOH	0.1	35.93	This work

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วัสดุผสมคอมโพสิตของคาร์บอนจากไม้ไผ่ที่ผ่านการกระตุ้นและรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (AC-BBC-rGO) ได้รับการเตรียมภายใต้บรรยากาศของแก๊สอาร์กอนและกระบวนการบดแบบ 3 มิติ (3-D ball milling) โดยได้ทำการศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของวัสดุนาโนกราฟีนออกไซด์สองมิติ (2-D rGO) ที่ผสมกับคาร์บอนจากไม้ไผ่และนำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดเชิงรุก อิเล็กโทรด rGOx%/3D-AC-BBC ($x = 1, 3, 5$ และ 7 wt.%) ได้รับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD, Raman spectroscopy, SEM, EDX และ FT-IR เพื่อยืนยันเฟสของคาร์บอนจากไม้ไผ่และ rGO ภายในอิเล็กโทรดการวิเคราะห์ BET แสดงให้เห็นว่า rGO5%/3D-AC-BBC มีค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA) และปริมาณรูพรุนสูงสุด ค่าความนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรดสูงสุดพบในวัสดุ rGO5%/3D-AC-BBC ซึ่งมีค่าความนำไฟฟ้าสูงกว่า BBC ถึงประมาณ 47 เท่า อิเล็กโทรด rGO5%/3D-AC-BBC ยังแสดงค่าความหนาแน่นของพลังงานและความหนาแน่นของกำลังสูงสุดอีกด้วย โดยค่าความจุไฟฟ้าเฉพาะ (Cs) สูงสุดที่ได้คือ 301.80 F/g ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.5 A/g อุปกรณ์ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ชนิดเหรียญที่ผลิตโดยใช้อิเล็กโทรด rGO5%/3D-AC-BBC แสดงความสามารถในการคงค่าความจุไฟฟ้าเฉพาะ (Cs retention) ได้ถึง 96.76% หลังการชาร์จ-คายประจุต่อเนื่อง 10,000 รอบ พร้อมค่าความจุไฟฟ้าเฉพาะสูงสุด 85.93 F/g ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 0.1 A/g รายงานนี้แสดงให้เห็นว่า rGO ที่ผสมกับคาร์บอนจากไม้ไผ่สามารถนำมาใช้ผลิตอิเล็กโทรดเชิงรุกที่มีสมบัติทางเคมีไฟฟ้าที่ดีขึ้นสำหรับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ชนิดสมมาตรได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำถ่านกัมมันต์ไม้ไผ่มาเป็นขั้ววัสดุไฟฟ้า ทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีไฟฟ้า ดังนั้นงานวิจัยที่ควรศึกษาต่อคือ

5.2.1 ทดลองประยุกต์วัสดุคอมโพสิตในระบบซูเปอร์คาปาซิเตอร์ชนิดต่าง ๆ

เช่น ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ชนิดไม่สมมาตร (Asymmetric Supercapacitor) หรือชนิดไฮบริด (Hybrid Supercapacitor) เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะและประสิทธิภาพของวัสดุในระบบที่หลากหลาย

5.2.2 พิจารณาความเป็นไปได้ในการผลิตในระดับอุตสาหกรรม

รวมถึงศึกษาต้นทุนการผลิต ความง่ายในการปรับกระบวนการ และผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อเตรียมความพร้อมในการประยุกต์ใช้งานจริงในเชิงพาณิชย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Mahmud, M. B., Medha, M., & Hasanuzzaman, M. (2023). *RTBM*, *49*, 101011.
- [2] Berrueta, A., Ursúa, A., Martín, I. S., Eftekhari, A., & Sanchis, P. (2019). *IEEE Access*, *7*, 50869–50896.
- [3] Li, H., Cao, L., Wang, F., Duan, G., Xu, W., Mei, C., Zhang, G., Liu, K., Yang, M., & Jiang, S. (2020). *Frontiers in Chemistry*, *8*, 89.
- [4] Şahin, M. E., Blaabjerg, F., & Sangwongwanich, A. (2022). *Energies*, *15*, 674.
- [5] Ngamjumrus, N., Silakaew, K., Thompho, S., Sriwong, C., & Ruttanapun, C. (2023). *Energies*, *16*, 6962.
- [6] Jian, X., Liu, S., Gao, Y., Tian, W., Jiang, Z., Xiao, X., Tang, H., & Yin, L. (2016). *Journal of Electrical Engineering*, *4*, 75–87.
- [7] Olabi, A. G., Abbas, Q., Abdelkareem, M. A., Alami, A. H., Mirzaeian, M., & Sayed, E. T. (2023). *Batteries*, *9*, 19.
- [8] Wang, Y., Zhang, L., Hou, H., Xu, W., Duan, G., He, S., Liu, K., & Jiang, S. (2021). *Journal of Materials Science*, *56*, 173–200.
- [9] Lekakou, C., Moudam, O., Markoulidis, F., Andrews, T., Watts, J. F., & Reed, G. T. (2011). *Nanotechnology*, *2011*, 409382.
- [10] Jung, S., Myung, Y., Kim, B. N., Kim, I. G., You, I. K., & Kim, T. (2018). *Scientific Reports*, *8*, 1915.
- [11] Ghosh, S., Santhosh, R., Jeniffer, S., Raghavan, V., Jacob, G., Nanaji, K., Kollu, P., Jeong, S. K., & Grace, A. N. (2019). *Scientific Reports*, *9*, 16315.
- [12] Lee, K.-C., Lim, M. S. W., Hong, Z.-Y., Chong, S., Tiong, T. J., Pan, G.-T., & Huang, C.-M. (2021). *Energies*, *14*, 4546.
- [13] Brito, C. H. V., Gloria, D. C. S., Santos, E. B., Domingues, R. A., Valente, G. T., Vieira, N. C. S., & Gonçalves, M. (2023). *Chemical Engineering Research and Design*, *191*, 387–400.
- [14] Youn, H. C., Bak, S. M., Kim, M. S., Jaye, C., Fischer, D. A., Lee, C. W., Yang, X. Q., Roh, K. C., & Kim, K. B. (2015). *ChemSusChem*, *8*, 1875–1884.
- [15] Zhang, G., Chen, Y., Chen, Y., & Guo, H. (2018). *Materials Research Bulletin*, *102*, 391–398.
- [16] Taer, E., Pratiwi, A., Apriwandi, L., Mustika, W. S., Taslim, R., & Agustino, A. (2020). *Communication in Science and Technology*, *5*, 22–30.
- [17] Jayachandran, M., Babu, S. K., Maiyalagan, T., Rajadurai, N., & Vijayakumar, T. (2021). *Materials Letters*, *301*, 130335.
- [18] Farma, R., Putri, A., Taer, E., Awitdrus, & Apriwandi, A. (2021). *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *32*, 7681–7691.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [19] Echeverry-Montoya, N. A., Prías-Barragán, J. J., Tirado-Mejía, L., Agudelo, C., Fonthal, G., & Ariza-Calderón, H. (2017). *Physica Status Solidi (C)*, 14(9), 1600258.
- [20] Khuong, D. A., Tsubota, T., & Nguyen, H. N. (2024). *The Journal of Physical Chemistry C*, 128, 17313–17327.
- [21] Ajay, K. M., & Dinesh, M. N. (2016). *Materials Today: Proceedings*, 46, 4510–4514.
- [22] Tuichai, W., Karaphun, A., & Ruttanapun, C. (2022). *Materials Research Bulletin*, 145, 111552.
- [23] Sahakij Charoen. ความหมายของซีมวล. [Online]. Available: <http://www.efe.or.th/home.php?>
- [24] บริษัท แบมบูฟาร์ม จำกัด. ไม้ (Bamboo). [Online]. Available: <https://www.bamboofarm.org/about-bamboo>
- [25] พี่เอก. 2010. กราฟีน วัสดุแห่งอนาคต : ตัวช่วยที่จะมายึดอายุขัยของมัวร์. Available: <https://shorturl.asia/AeCLZ>
- [26] A. Koyappayil, A.K.Yagati, M.-H. Lee. *Biosensors*. 13(1), 91 (2023)
- [27] Reddy, B. (Ed.). (2011). *Advances in nanocomposites: synthesis, characterization and industrial applications*. BoD–Books on Demand
- [28] Nur Samihah Khairir et al. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 99, 012031 (2015)
- [29] วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. 2563. วัสดุคัมพัสเจอร์รี่แกรฟีน: กลยุทธ์การสังเคราะห์สมบัติการพัฒนากาการพิสูจน์เอกลักษณ์และการประยุกต์ใช้. [Online]. Available: [file:///C:/Users/ASUS/Downloads/juthamaspr,](file:///C:/Users/ASUS/Downloads/juthamaspr)
- [30] The Momentum. 2017. กราฟีน: วัสดุแห่งอนาคตผลิตจากน้ำมันถั่วเหลือง. Available: <https://shorturl.asia/CgbVS>
- [31] Guoqiang Ren. 2025. carbon nanotube. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/carbon-nanotube>
- [32] อาอีเซาะส์ เบ็ญหวานและคณะ. 2561. การเตรียมและศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของถ่านกัมมันต์ จากเปลือกลูกหูกยี่. [Online]. Available: <https://wb.yru.ac.th/bitstream/yr/5560/1/15.pdf>
- [33] Huson. 2025. *Managing Particulate Matter Pollution: Risks, Effects & Solutions*. [Online]. Available: <https://shorturl.asia/LY3C8>
- [34] MO Memoir. 2565. *Physisorption isotherms Type I และ Type IV*. [Online]. Available: <https://shorturl.asia/nHsWt>
- [35] Gammaco. 2021. การอัดและคายประจุของตัวเก็บประจุ. [Online]. Available: <https://shorturl.asia/Vz8m2>
- [36] ดร.ชิตกมล ทูลคำรักษ์. 2567. *ELECTROCHEMICAL SENSOR*. [Online]. Available: <https://shorturl.asia/MO2zn>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [37] Tyler S. et al. 2019. Energy Storage Data Reporting in Perspective-Guidelines for Interpreting the Performance of Electrochemical Energy Storage Systems. 9 (39), pp.1902007.
- [38] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน. X-Ray Diffractometer (XRD) เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์. [Online]. Available: <https://shorturl.asia/GNqe6>
- [39] Advance Analytical. RAMAN: MULTIRAM. Available: <https://shorturl.asia/LPRh8>
- [40] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน. Scanning Electron Microscope(SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด. [Online]. Available: <https://shorturl.asia/g94xf>
- [41] ดลฤดี โตเย็น. การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิคEnergy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). [Online]. Available: <https://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/EDS.pdf>
- [42] ดลฤดี โตเย็น. การวิเคราะห์ธาตุและองค์ประกอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). [Online]. Available: <https://www3.rdi.ku.ac.th/cl/knowledge/EDS.pdf>
- [43] ศูนย์เครื่องมือและทดสอบวิเคราะห์ คณะวิทยาศาสตร์ พลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ วิทยาเขตระยอง. 2023. BET-Surface Area Analyzer. [Online]. Available: <https://www.siatc.sciee.kmutnb.ac.th/bet-surface/>
- [44] สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน. FTIR Micro-Spectrometer เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรไมโครสโคป. Available: <https://shorturl.asia/CWvbd>
- [45] ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. เครื่องตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า (Potentiostat/Galvanostat/Impedance). [Online]. Available: <https://shorturl.asia/u4jAV>
- [46] Ruiz, V., Blanco, C., Granda, M., Menéndez, R., & Santamaría, R. (2007). *Journal of Applied Electrochemistry*, 37, 717–721.
- [47] Cuéllar-Herrera, L., Arce-Estrada, E. M., Pacheco-Catalán, D. E., Vivas, L., Ortiz-Landeros, J., Jiménez-Lugos, C., & Romero-Serrano, A. (2024). *International Journal of Electrochemical Science*, 19, Article 9.
- [48] Imtiaz, M., Alyousef, H. A., Alotaibi, B. M., Alrowaily, A. W., Alotiby, M. F., Farid, H. M., Al-Sehemi, A. G., & Hanaesh, A. M. (2024). *Journal of Energy Storage*, 101, 113987.
- [49] Khandare, L. N., Mahabal, M. S., Bhosale, S. R., Late, D. J., Kshirsagar, A., & Chaure, N. B. (2024). *Journal of Energy Storage*, 102, 114166.
- [50] Zhang, Y., Xu, J., Lu, S., Li, H., Yonar, T., Hua, Q., Zhang, Y., & Liu, T. (2025). *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 8, 108.
- [51] Pawar, D. C., Malavekar, D. B., Lokhande, A. C., & Lokhande, C. D. (2024). *J. Energy Storage*, 79, 110154.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [52] Hussain, M., Alanazi, M. M., Abdelmohsen, S. A., Alahmari, S. D., Abdullah, M., Aman, S., Al-Sehemi, A. G., Henaish, A. M. A., Ahmad, Z., & Farid, H. M. T. (2024). *Diam. Relat. Mater.*, 142, 110764.
- [53] Osora, H., Kolkoma, D., Anduwan, G., Immanuel Edison, T. N. J., Chandrasekaran, S., Waimbo, M., & Velusamy, S. (2024). *Emergent Mater.*, 35, 891–901.
- [54] Karaphun, A., Phrompet, C., Tuichai, W., Chanlek, N., Sriwong, C., & Ruttanapun, C. (2021). *Mater. Sci. Eng. B*, 264, 114941.
- [55] Korkmaz, S., Kariper, İ. A., Karaman, O., & Karaman, C. (2021). *Ceram. Int.*, 47, 34514–34520.
- [56] Maruthamani, D., Vadivel, S., Kumaravel, M., Saravanakumar, B., Paul, B., Dhar, S. S., Habibi-Yangjeh, A., Manikandan, A., & Ramadoss, G. (2017). *J. Colloid Interface Sci.*, 498, 449–459.
- [57] Ramesh, S., Khandelwal, S., Rhee, K. Y., & Hui, D. (2018). *Compos. Part B: Eng.*, 138, 45–54.
- [58] Gangwar, A., Das, T., Shawa, S. K., & Prasada, N. K. (2021). *Electrochim. Acta*, 390, 138823.
- [59] Manalu, A., Tarigan, K., Humaidi, S., Ginting, M., Sebayang, K., Rianna, M., Hamid, M., Subhan, A., Sebayang, P., & Manalu, I. P. (2022). *Int. J. Electrochem. Sci.*, 17, 22036.
- [60] Choi, M., Lee, S.-H., Kim, D.-H., Shin, K.-H., Jin, C.-S., Kim, S.-S., Kang, Y. C., & Yeon, S.-H. (2019). *J. Phys. Chem. Solids*, 131, 69–78.
- [61] Rosaiah, P., Maaouni, N., Goddati, M., Lee, J., Sambasivam, S., Karim, M. R., Alnaser, I. A., Reddy, V., Reddy, M., & Kim, W. (2024). *J. Energy Storage*, 76, 109636.
- [62] Wang, J., Li, Q., Peng, C., Shu, N., Niu, L., & Zhu, Y. (2020). *J. Power Sources*, 450, 227611.
- [63] Iakunkov, A., Skrypnichuk, V., Nordenström, A., Shilayeva, E. A., Korobov, M., Prodana, M., Enachescu, M., Larsson, S. H., & Talyzin, V. A. (2019). *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 21, 17901–17912.
- [64] Folaranmi, G., Bechelany, M., Sstat, P., Cretin, M., & Zaviska, F. (2021). *Nanomaterials*, 11(5), 1090.
- [65] Rohmawati, L., Intifadhah, S. H., & Setyarsih, W. (2019). *J. Phys. Conf. Ser.*, 1171(1), 012036.
- [66] Salamon, J., Simi, A., Joy Prabu, H., Felix Sahayaraj, A., & Johnson, A. (2024). *JIOPM*, 1–13.
- [67] Sadiq, M., & Islam, M. U. (2024). *J. Energy Storage*, 100, 113525.
- [68] Chavan, P. P., Babar, U. D., Redekar, R., Chougale, A., Tarwal, N. L., & Kamble, P. D. (2025). *J. Energy Storage*, 109, 115215.
- [69] El-Bahy, Z. M., AlMasoud, N., Ali, M., Alomar, T. S., Al-wallan, A. A., & Tahir, H. M. (2024). *J. Alloys Compd.*, 1010, 178091.

- [70] Maneesai, K., Silakaew, K., Khammahong, S., Phrompet, C., Sriwong, C., Thanachayanont, C., & Ruttanapun, C. (2023). *AIP Adv.*, 13, 035333.
- [71] Abad, Z. A. K., Nemati, A., Khachatourian, A. M., & Golmohammad, M. (2020). *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31, 14998–15005.
- [72] Ghosh, D., Giri, S., Dhibar, S., & Das, C. K. (2014). *Electrochimica Acta*, 147, 557–564.
- [73] Sadiq, M., Khan, M. A., Sarvar, M., Raza, M. M. H., Aalam, S. M., Zulfequar, M., & Ali, J. (2023). *Hybrid Advances*, 3, 100051.
- [74] Salehifar, N., Shayeh, J. S., Siadat, S. O. R., Niknam, K., Ehsani, A., & Movahhed, S. K. (2015). *RSC Advances*, 5, 96130–96137.
- [75] Sundriyal, S., Sharma, M., Kaur, A., & Mishra, S. (2018). *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29, 12754–12764.
- [76] Zhu, Y., Cheng, S., Zhou, W., Jia, J., Yang, L., Yao, M., Wang, M., Zhou, J., Wu, P., & Liu, M. (2017). *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5, 5067–5074.
- [77] Hoang, V. C., Nguyen, L. H., & Gomes, V. G. (2019). *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 832, 87–96.
- [78] Kumar, A., Kumar, N., Sharma, Y., Leu, J., & Tseng, T. Y. (2019). *Nanoscale Research Letters*, 14, 266.
- [79] Kiran, S. K., Shukla, S., Struck, A., & Saxena, S. (2020). *Carbon*, 158, 527–535.
- [80] Jung, H. Y., Kim, Y. R., & Jeong, H. T. (2020). *Carbon Letters*, 30, 107–113.
- [81] Muthi Aturroifah, N. I., Diantoro, M., Meevasana, W., & Maensiri, S. (2024). *E3S Web of Conferences*, 517, 10003.
- [83] Memou, C. H., Bekhti, M. A., Kiari, M., Benyoucef, A., Alelyani, M., Alqahtani, M. S., Alshihri, A. A., & Bakkour, Y. (2023). *Nanomaterials (Basel)*, 13, 2664.
- [83] Male, U., Uppugalla, S., & Srinivasan, P. (2015). *Journal of Solid State Electrochemistry*, 19, 3381–3388.
- [84] Wadekar, P. H., Khose, R. V., Pethsangave, D. A., & Some, S. (2020). *ChemistrySelect*, 5, 11769–11777.
- [85] Kulandaivalu, S., Hussein, M. Z., Jaafar, A. M., Abdah, M. A. A. M., Azman, N. H. N., & Sulaiman, Y. (2019). *RSC Advances*, 9, 40478–40486.
- [86] Guan, C., Liu, J., Wang, Y., Mao, L., Fan, Z., Shen, Z., Zhang, H., & Wang, J. (2015). *ACS Nano*, 9, 5198–5207.
- [87] Vivas, L., Jara, A., Garcia-Garfido, J. M., Serafini, D., & Singh, D. P. (2022). *ACS Omega*, 7, 42446–42455.
- [88] Fathy, M., Gomaa, A., Taher, F. A., El-Fass, M. M., & Kashyout, A. E. B. (2016). *Journal of Materials Science*, 51, 5664–5675.
- [89] Ma, G., Li, J., Sun, K., Peng, H., Mu, J., & Lei, Z. (2014). *Journal of Power Sources*, 256, 281–287.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ นางสาวกิติมา ศรีไชยปภา

ที่อยู่ปัจจุบัน 82, 69 ถนน สุวรรณภูมิ 4 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

ประวัติการศึกษา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ 2565เกรดเฉลี่ย 3.33

- ได้รับทุนจากกองทุนพัฒนาคณะกรรมการและวิทยาศาสตร์ จากผลงานตีพิมพ์ ANTIMONY-DOPED LEAD OXIDE NANOPARTICLES SYNTHESIZED VIA USING CHEMICAL PRECIPITATION AND ANNEALING TREATMENTS: STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES, 2021
- ได้รางวัลเหรียญเรียนดี ประจำปีพ.ศ.2564
- ได้รับรางวัลประกาศเกียรติคุณ นิสิตปัจจุบันดีเด่น ประจำปีพ.ศ.2564

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้