

การสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าจากวัสดุคาร์บอนคอมโพสิตคาร์บอนกัมมันต์จากเปลือก
ทุเรียนกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์สำหรับอุปกรณ์ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

SYNTHESIS OF ELECTRODE FROM ACTIVATED DURAIN SHELL
CARBON AND REDUCED GRAPHENE OXIDE NANOCOMPOSITE
MATERIAL FOR SUPERCAPACITOR DEVICE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2566

KMITL-2023-SC-M-030-067

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SYNTHESIS OF ELECTRODE FROM ACTIVATED DURAIN SHELL
CARBON AND REDUCED GRAPHENE OXIDE NANOCOMPOSITE
MATERIAL FOR SUPERCAPACITOR DEVICE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2023-SC-M-030-067



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าจากวัสดุคาร์บอนโพลีเมอร์คาร์บอนกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ สำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวด
ชื่อนักศึกษา	นางสาวนันทิกร งามจำรัส
รหัสประจำตัว	64605059
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์ ดร.เชรชฐา รัตนพันธ์

บทคัดย่อ

ของเสียจากเปลือกทุเรียนถูกนำมาใช้เพื่อประดิษฐ์ถ่านกัมมันต์ (AC) โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และการใช้เครื่องบดแบบลูกบอลสามมิติ (3-D) รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) ถูกนำมาผสมกับคาร์บอนเปลือกทุเรียนที่ผ่านการกระตุ้นด้วยทางเคมี (DC) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าสำหรับการผลิตอุปกรณ์ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC) การตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ AC จากเปลือกทุเรียนคาร์บอนที่ผ่านการแปรรูปด้วยความร้อนใต้พิภพ (AC-HDC) และ AC-HDC ที่ถูกบดด้วยลูกบอล 3 มิติเป็นเวลา 15 นาที (rGO/AC-HDC-3D15M) แสดงให้เห็นอนุภาคที่อัดแน่นและกระจายสม่ำเสมอ มีความพรุนดี ตัวอย่าง rGO/AC-HDC-3D15M แสดงพื้นที่ผิวจำเพาะสูง (SSA) โดยใช้วิธีการของ Brunauer-Emmett-Teller (BET) 2311 ตารางเมตร/กรัม และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 1.88 นาโนเมตร ผลลัพธ์ทางเคมีไฟฟ้าแสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง rGO/AC-HDC-3D15M มีความจุจำเพาะสูงสุด (Cs) ที่ 545.78 F/g ความหนาแน่นของพลังงาน (Pd) 260.834 W/kg และความหนาแน่นของพลังงาน (Ed) 60.834 Wh/kg อุปกรณ์ SC เซลล์แบบเหรียญที่ใช้อิเล็กโทรด rGO/AC-HDC3D15M พร้อมด้วยอิเล็กโทรไลต์ 3M KOH มี Cs สูงที่ 65.585 F/g โดยมีความหนาแน่นพลังงานสูง 5.123 W · h/kg และความหนาแน่นของพลังงาน 47.286 W/kg ดังนั้นความแปลกใหม่ของต้นฉบับนี้คือ (1) โครงสร้างของคอมโพสิต rGO / AC - HDC - 3D15M สามารถส่งเสริมการโยกย้ายไอออนิกและอิเล็กตรอนอย่างรวดเร็วในระหว่างการชาร์จและการคายประจุ และ (2) คอมโพสิต rGO / AC - HDC - 3D15M ซึ่ง แสดงให้เห็นว่าตัวเก็บประจุแบบไฟฟ้าสองชั้น (EDLC) สามารถสร้างผลเสริมฤทธิ์เชิงบวกสำหรับปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพ ยิ่งไปกว่านั้น พื้นที่ผิวสูงของคอมโพสิต rGO / AC - HDC - 3D15M อาจลดการขยายตัวของปริมาตรของอิเล็กโทรดในระหว่างการปั่นจักรยาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นงานนี้แสดงให้เห็นว่าคอมโพสิต rGO / AC – HDC – 3D15M ที่เตรียมโดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลที่มีการกักลูกบอล 3 มิติสามารถแสดงประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าที่ได้รับการปรับปรุงสำหรับการผลิตอุปกรณ์ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ EDLC

คำสำคัญ : ถ่านกัมมันต์เปลือกทุเรียน รีดิคัลกราฟีนออกไซด์ เครื่องบดแบบลูกบอลสามมิติ คุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า อุปกรณ์ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ อุปกรณ์เซลล์คอลลี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Synthesis of electrode from activated durian shell carbon and reduce graphene oxide nanocomposite material for supercapacitor device
Student Name	Miss Nantikron ngamjumrus
Student ID	64605059
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr.Chesta Ruttanapun

Abstract

Durian shell waste was used to fabricate activated carbon (AC) using a hydrothermal process and three-dimensional (3-D) ball milling. Reduced graphene oxide (rGO) was composited with activated durian shell carbon (DC) to enhance the electrochemical properties for fabricating a supercapacitor (SC) device. Scanning electron microscopic (SEM) examination of the AC from hydrothermally processed durian shell carbon (AC-HDC) and AC-HDC that was 3D ball milled for 15 min (rGO/AC-HDC-3D15M) showed compacted and uniformly distributed particles with good porosity. The rGO/AC-HDC-3D15M sample exhibited high specific surface area (SSA) using the Brunauer-Emmett-Teller (BET) methodology, 2311 m²/g, and an average pore size of 1.88 nm. Electrochemical results showed that the rGO/AC-HDC-3D15M sample had the highest specific capacitance (Cs) of 545.78 F/g, power density (Pd) of 260.834 W/kg and energy density (Ed) of 60.834 Wh/kg. A coin cell SC device using an rGO/AC-HDC-3D15M electrode with a 3M KOH electrolyte exhibited a high Cs of 65.585 F/g with a high energy density of 5.123 Wh/kg and power density of 47.286 W/kg. Thus, the novelty of this manuscript is that (1) the structure of the rGO/AC-HDC-3D15M composite could promote fast ionic and electronic migration during charging and

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

discharging and (2) a rGO/AC–HDC–3D15M composite, which showed electric double-layer capacitor (EDLC) could produce a positive synergistic effect for efficient electro-chemical reactions. Moreover, the high surface area of the rGO/AC–HDC–3D15M composite may mitigate the volume expansion of electrodes during cycling. Thus, this work shows that an rGO/AC–HDC–3D15M composite prepared using a hydrothermal process with 3-D ball milling can show enhanced electrochemical performance for the fabrication of an EDLC supercapacitor device.

This thesis is to study electrochemical properties. Study the structure and carbon morphology at the graphene oxide reducing composite. The experiment was conducted on two conditions, namely durian husks and corn husks. By changing the composite ratio between reducing graphene oxide and carbon (carbon@rGO), it was started by burning durian husks and corn husks to obtain carbon from plants and composite with graphene oxide reducing by solid state reaction. This reaction requires zirconia grinding balls and spinning for 24 h. The ratio of carbon to graphene oxide reducing in Education is different. To determine that the proportion of carbon@rGO that the composite produced has the best electrical conductivity and then used to study the electrochemical properties also used to analyze the structure and the morphology of the substance.

Keyword : durian shell activated carbon, reduced graphene oxide; three-dimensional ball mill, electrochemical properties, supercapacitor device, coil cell device

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เกิดขึ้นได้โดยได้รับความกรุณา ความช่วยเหลือ การสนับสนุนจากแหล่งทุนและการสนับสนุนในด้านต่างๆ จากบุคคลหลายท่านด้วยกัน ทำให้ได้รับโอกาสและสร้างแรงบันดาลใจนำมาสู่ความสำเร็จที่เกิดขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงต่อท่านทั้งหลาย ดังนี้

สำหรับความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับความกรุณาอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก รองศาสตราจารย์ ดร. เชรชฐา รัตนพันธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวาลย์ ศรีวงษ์ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี ที่กรุณาให้คำปรึกษาหัวข้อวิจัย ตลอดจน คำแนะนำ ข้อเสนอแนะในการทำวิจัย ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมืออุปกรณ์ในการทดลอง รวมถึงให้ความรู้ ทุนสนับสนุน และคำปรึกษาทางวิชาการตลอดจนปลูกฝังคุณธรรม จริยธรรม และ ช่วยเหลือตลอดมา การเขียนบทความ ได้มีผลงานตีพิมพ์ในวารสารวิชาการระดับนานาชาติอันเป็นที่ยอมรับและการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สมัคร์ พิมานแพง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่เป็นประธานกรรมการสอบเค้าโครงวิทยานิพนธ์และสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เมตยา กิตติวรรณ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ร่วมเป็นคณะกรรมการสอบเค้าโครงวิทยานิพนธ์และสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ ดร. ชัยวัฒน์ พรหมเพชร ดร. วัฒนา ตู่ไชย ดร. อรรถพล กาฬพันธุ์ นักวิจัยหลังปริญญาเอก และที่ปริญญาเอก และน้องๆ นักศึกษาในศูนย์ความเป็นเลิศด้านวิจัยและนวัตกรรมวัสดุอัจฉริยะ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำในด้านวิชาการและการใช้ชีวิตได้เป็นอย่างดีและช่วยเหลือในการส่งบทความตีพิมพ์อีกด้วย และขอขอบคุณคณะอาจารย์เจ้าหน้าที่ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อในการทำการตรวจสอบวิเคราะห์ ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ

วิทยานิพนธ์นี้ ได้รับทุนอุดหนุนจากกองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โครงการทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับปริญญาโท กองทุนวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง ที่สัญญาเลขที่ KREF016409 และขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่เมตตาให้ความรู้และ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ และขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่และผู้มีพระคุณทุกท่านที่ให้การอุปการะทุน ในการศึกษาเล่าเรียนและคอยให้กำลังใจที่ดีตลอดมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับ บิดา มารดา ของ ข้าพเจ้าซึ่งเป็นที่รัก และเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้ ได้ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอด ประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวมา ณ ที่นี้

ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าโครงการพิเศษเล่มนี้จะมีประโยชน์ต่อผู้ที่มีความสนใจศึกษาหาความรู้เป็นอย่างยิ่ง

นางสาวนันทิกร งามจรัส



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1	1
บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2	4
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทูเรียน.....	4
2.1.1 ทฤษฎีพื้นฐาน ลักษณะทางพฤกษศาสตร์.....	5
2.1.1.1 ราก.....	5
2.1.1.2 ใบ.....	5
2.1.1.3 ดอก.....	6
2.1.1.4 ผล.....	6
2.2 ชีวมวล.....	6
2.2.1 องค์ประกอบของชีวมวล.....	7
2.2.1.1 ความชื้น (Moisture).....	7
2.2.1.2 คาร์บอนคงที่ (Fixed carbon).....	7
2.2.1.3 สารระเหย (Volatile matter).....	7
2.2.1.4 ขี้เถ้า (Ash).....	7
2.2.2 องค์ประกอบทั่วไปของชีวมวล.....	7
2.2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose).....	8
2.2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose).....	8
2.2.2.3 ลิกนิน (Lignin).....	9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
2.2.2.4. แป้ง	9
2.2.2.5. โปรตีน.....	10
2.2.2.6. สารอื่นๆ.....	10
2.3 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization).....	10
2.4 การกระตุ้น (Activated).....	10
2.4.1 การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์.....	11
2.4.1 กระตุ้นทางกายภาพ (Physical reactivation).....	11
2.4.2 กระตุ้นทางเคมี (Chemical activation).....	11
2.4.2.1 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide : KOH).....	12
2.5 การจำแนกขนาดรูพรุนตาม IUPAC (International Union of Pure and Applied chemistry).....	13
2.5.1 แมโครพอร์รัส (Macroporous).....	13
2.5.2 เมโซพอร์รัส (Mesoporous).....	13
2.5.3 ไมโครพอร์รัส (Microporous).....	13
2.6 กระบวนการการดูดซับ	13
2.6.1 กลไกการดูดซับ	13
2.6.1.1. การแพร่ภายใน (Internal or Pore diffusion)	13
2.6.1.2. การแพร่ภายนอก (External Diffusion).....	14
2.6.1.3. ปฏิกิริยาที่พื้นผิว (Surface reaction)	14
2.6.2 ประเภทของการดูดซับ	14
2.6.2.1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption).....	14
2.6.2.2. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)	14
2.6.2.3. ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)	14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
2.7 กราฟีน	16
2.7.1 การสังเคราะห์กราฟีน	17
2.7.1.1 Mechanical exfoliation	17
2.7.1.2 Chemical vapor deposition (CVD)	17
2.7.1.3 Chemical exfoliation	18
2.7.2 คุณสมบัติของกราฟีนออกไซด์	19
2.7.2.1 การขนส่งอิเล็กตรอน	19
2.7.2.2 สมบัติเชิงกล	19
2.7.3 การประยุกต์ใช้งาน	20
2.8 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด	20
2.8.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดไดอิเล็กทริก (Dielectric capacitor)	20
2.8.2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดความจุสูง (Supercapacitor)	21
2.8.2.1 ประเภทของตัวเก็บประจุยิ่งยวดความจุสูง	21
2.8.2.1.1 Double-layer capacitors	22
2.8.2.1.2 Pseudocapacitors	22
2.8.2.1.3 Hybrid Supercapacitors	23
2.9 เทคนิคการอัด และการคายประจุ (Charge – Discharge)	24
2.9.1 การอัดประจุ (Charge)	24
2.9.2 การคายประจุ (Discharge)	24
2.10 สมบัติเคมีเชิงไฟฟ้า	25
2.10.1 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry : CV)	25
2.10.2 เทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ (Galvanostatic charge/ discharge : GCD)	
.....	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
2.11 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์.....	28
2.11.1 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction : XRD).....	28
2.11.2 เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ (Raman Spectrometer).....	29
2.11.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR).....	29
2.11.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM).....	31
2.12.5 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer)	32
2.11.6 เครื่องมือวิเคราะห์วัสดุนาโนโดยเทคนิคสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy : XPS).....	33
2.11.7 เครื่องทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีไฟฟ้าของสารตัวอย่าง (Electrochemical Workstation).....	34
2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	37
บทที่ 3.....	40
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	40
3.1 เครื่องมือ วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวัสดุดิบที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.1.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง.....	40
3.1.2 วัสดุอุปกรณ์.....	41
3.1.3 สารเคมี.....	42
3.2 วิธีการทดลอง.....	43
3.2.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)	43
3.2.2 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน (DC).....	44
3.2.3 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอมอล (AC-HDC).....	44
3.2.4 การลดขนาดอนุภาคคาร์บอนกัมมันต์โดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (3D ballmilling) ...	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

3.2.5 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอมอลคอมโพสิตกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO/AC-HDC-3D15M).....	45
3.2.6 การเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงาน	46
3.2.7 เตรียมตัวเก็บประจุยิ่งยวด	47
3.3 เทคนิคการวัดสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Workstation).....	49
3.3.1 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry : CV).....	50
3.3.2 เทคนิคการอัดและการคายประจุไฟฟ้า (Galvanostatic charge-discharge :GCD).....	51
3.4 การวิเคราะห์	52
บทที่ 4	54
ผลการทดลอง	54
4.1 ลักษณะทางกายภาพของคาร์บอนกัมมันต์.....	54
4.1.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer : XRD).....	54
4.1.2 รามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy).....	55
4.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)	56
4.1.4 BET analysis	59
4.1.5 การวิเคราะห์ XPS.....	61
4.1.6 การวิเคราะห์ FT-IR.....	63
4.1.7 การนำไฟฟ้า.....	64
4.2 คุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical properties) ของคาร์บอนกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน	64
4.2.1 อุปกรณ์เซลล์เหรียญ.....	69
บทที่ 5.....	72
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	72

5.1 สรุปผลการทดลอง..... 72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

5.2 ข้อเสนอแนะ.....	72
เอกสารอ้างอิง	73



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงเงื่อนไขของการเตรียมตัวอย่าง.....	47
4.1 แสดงสัดส่วนของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC3D-30M and rGO/AC-HDC. -3D15M.....	59



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ทูเรียน.....	4
2.2 การเชื่อมต่อโมเลกุลของกลูโคสในสายเซลลูโลสด้วยพันธะ β -1,4-glycosidic.....	8
2.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสและตำแหน่งการเข้าทำลายด้วยเอนไซม์ชนิด.....	8
2.4 ลักษณะโครงสร้างของลิกนิน.....	9
2.5 โครงสร้างของอะไมโลส.....	9
2.6 ไอโซเทอมการดูดซับ.....	15
2.7 โครงสร้างคาร์บอนอัญรูปต่างๆ ที่เกิดจากแผ่นกราฟีน.....	17
2.8 การสังเคราะห์ด้วยวิธี Mechanical exfoliation.....	17
2.9 แผนภาพการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธี Chemical vapor deposition (CVD).....	18
2.10 การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธี Chemical exfoliation.....	19
2.11 การประยุกต์ใช้งานกราฟีน.....	20
2.12 แผนภาพจำลองลักษณะตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดไดอิเล็กทริก.....	21
2.13 แสดงประเภทของตัวเก็บประจุความจุสูง แบ่งตามปฏิกิริยาในการอัดประจุ.....	21
2.14 แผนภาพจำลองการอัดประจุแบบ Double-layer capacitors.....	22
2.15 แสดงภาพจำลองการสะสมประจุไฟฟ้าของวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสเรียบและผิวสัมผัสขรุขระ.....	23
2.16 แสดงภาพจำลองการอัดประจุแบบ Pseudocapacitors.....	23
2.17 แผนภาพจำลองแสดงกระบวนการอัดประจุ (Charge).....	24
2.18 แผนภาพจำลองแสดงกระบวนการคายประจุ (Discharge).....	24
2.19 ส่วนประกอบเซลล์เคมีไฟฟ้า.....	25
2.20 กราฟ CV ของสาร RGO ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KOH 3 M ที่อัตราการสแกน 10mV/s..	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.21 กราฟ GCD ของสาร RGO ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KOH 3 M ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้า 1 A/g.....	27
2.22 หลักการทำงานของ XRD.....	28
2.23 เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ (Raman Spectrometer).....	29
2.24 เซลล์บรรจุตัวอย่างสถานะแก๊สและสถานะของเหลว	30
2.25 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	32
2.26 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน	32
2.27 สเปกโตรสโคปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอ็กซ์	33
2.28 หลักการทำงานของเครื่อง XPS	34
2.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการวัดไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	35
2.30 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม.....	36
2.31 ตัวอย่างกราฟกัลป์นาวอลสแตติก ชาร์จ-ดิสชาร์จ.....	36
2.32 ตัวอย่างกราฟไซคลิก ชาร์จ-ดิสชาร์จ.....	37
3.1 กระบวนการเตรียมรีดิคซ์กราฟีนออกไซด์.....	43
3.2 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์จากกระบวนการคาร์บอนในเซชัน.....	44
3.3 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเทคนิคไฮโดรทอมอล.....	45
3.4 การลดขนาดคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล.....	45
3.5 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงาน.....	47
3.6 กระบวนการเตรียมตัวเก็บประจุยิ่งยวด.....	48
3.7 กระบวนการเตรียมแผ่นแยกขั้วไฟฟ้า.....	48
3.8 ส่วนประกอบของเครื่อง Electrochemical Workstation.....	49
3.9 แผนภาพจำลองเพื่อศึกษาสมบัติความเป็นตัวเก็บประจุ.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.10 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรี.....	51
3.11 กราฟการอัดและการคายประจุไฟฟ้า.....	52
3.12 การวิเคราะห์และตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ.....	53
4.1 กราฟ XRD ของเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอมอล และผ่านเครื่อง 3D-ball milling.....	55
4.2 กราฟรามานของเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอมอล และผ่านเครื่อง 3D-ball milling.....	56
4.3 (a-f) รูปภาพ SEM และสเปกตรัม EDS พร้อมการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC3D15M, AC-HDC3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M ตามลำดับ.....	58
4.4 (a) ไอโซเทอร์มของการดูดซับไนโตรเจนและการสลายตัวของไนโตรเจน และ (b) เส้นโค้งการกระจายขนาดรูขุมขน BJH ของตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC3D15M, AC-HDC3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M	60
4.5 ความละเอียดสูงของสเปกตรัม XPS ของ C1s และ O1s ของ (a, b) rGO, (c, d) DC, (e, f) AC - HDC และ (g, h) AC - HDC3D15M ตามลำดับ.....	62
4.6 สเปกตรัม FTIR ของตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M.....	63
4.7 ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรด rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M ที่อุณหภูมิห้อง.....	64
4.8 เส้นโค้ง CV ที่อัตราการสแกน 5, 10, 20, 50, 80, 100, 150 และ 200 mV/s ของ rGO (a), DC (b), AC-HDC (c), AC-HDC -3D15M (d), AC-HDC-3D30M (e) และ rGO/AC-HDC-3D15M (f) ชั่วไฟฟ้า.....	66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่

หน้า

4.9 เส้นโค้ง GCD ที่มีความหนาแน่นกระแสตั้งแต่ 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20 และ 30 A/g ของ rGO (a), DC (b), AC-HDC (c), AC-HDC-3D15M (d), AC-HDC-3D30M (e) และอิเล็กโทรด rGO/AC-HDC-3D15M (f)	67
4.10 (a) การเปรียบเทียบ Cs โดยการทดสอบ GCD ที่ความหนาแน่นปัจจุบันตั้งแต่ 0.5 ถึง 5 A/g (b) การพล็อต Ragone ที่ความหนาแน่นปัจจุบันตั้งแต่ 0.5 ถึง 5 A/g และ (c) พล็อต Nyquist ในความถี่ ช่วงตั้งแต่ 100 kHz ถึง 0.01 Hz สำหรับอิเล็กโทรด rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และอิเล็กโทรด rGO/AC-HDC-3D15M.....	69
4.11 (a) เส้นโค้ง CV ที่อัตราการสแกนที่แตกต่างกัน (b) เส้นโค้ง GCD ที่ความหนาแน่นกระแสต่างกัน (c) Cs สำหรับความหนาแน่นกระแสที่แตกต่างกัน (d) การเก็บรักษาแบบวนรอบสำหรับความหนาแน่นกระแส 5 A/g โดยมี GCD ที่ใส่เข้าไป เส้นโค้งหลังจาก 1, 000 รอบ (e) พล็อต Ragone และ (f) รูปภาพของไดโอดเปล่งแสงสีเขียวสามตัวที่ขับเคลื่อนโดยอุปกรณ์เซลล์แบบเหรียญ rGO / AC - HDC - 3D15M // rGO / AC - HDC - 3D15M สองตัวที่เชื่อมต่อเป็นอนุกรม.....	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการพัฒนาในด้านการจัดเก็บพลังงานหลายด้าน แบตเตอรี่โลหะไอออนแบบชาร์จได้ กำลังได้รับความสนใจถึงศักยภาพในการจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แบบพกพา และยานพาหนะไฟฟ้า ความท้าทายหลักประการหนึ่งคือการพัฒนาอิเล็กโทรดที่สามารถพลิกกลับด้านได้สูง ต้นทุนต่ำ มีเสถียรภาพ และปลอดภัย ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ (SC) หรือตัวเก็บประจุแบบไฟฟ้าสองชั้น (EDLC) ซึ่งเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่มีความหนาแน่นพลังงานสูง (Pd) และมีอายุการใช้งานยาวนาน ได้รับการศึกษาและพัฒนาเพื่อการใช้งานกักเก็บพลังงาน [1] ต้องใช้วัสดุที่มีรูพรุนสูงในการผลิตอิเล็กโทรดสำหรับอุปกรณ์ SC SC จะต้องถูกชาร์จและคายประจุอย่างรวดเร็ว [2-8] ตัว SC มีความเสถียรและสามารถใช้งานได้หลายรอบ วัสดุอิเล็กโทรด SC ที่เหมาะสมจะต้องมีค่าการนำไฟฟ้าสูงและมีคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าที่มีความเสถียรสูง พฤติกรรมนี้แสดงโดยวัสดุ เช่น กราไฟท์ กราฟีน และกราฟีนออกไซด์รีดิวซ์ (rGO) [2-8] rGO มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดีเยี่ยมและแรง และมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในแคโทด SC [2-8] มันเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ปล่อยออกซิเจนออกมา ส่วนประกอบของอิเล็กโทรด SC คืออิเล็กโทรดบวกและลบที่ประกอบด้วย AC และอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กโทรไลต์ประกอบด้วยไอออนบวกและไอออนลบที่ละลายในตัวทำละลาย พลังงานสามารถเก็บไว้ในไฟฟ้าสถิตซึ่งเกิดจากประจุบวกและประจุลบซึ่งก่อตัวที่อิเล็กโทรด เมื่อใช้แรงดันไฟฟ้ากับอิเล็กโทรด ไอออนจากอิเล็กโทรไลต์สามารถส่งผ่านไปยังประจุจากอิเล็กโทรดฝั่งตรงข้ามได้ ซึ่งจะทำให้เกิดการพัฒนา ca-pacitor สองชั้น

ในการเตรียมอิเล็กโทรด SC วัสดุคาร์บอน เช่น AC เป็นที่สนใจในการผลิตอิเล็กโทรด AC สามารถได้มาจากคาร์บอนที่พบในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ด้วยเหตุนี้จึงสามารถได้มาจากของเสียทางการเกษตรที่มีมากมายและมีต้นทุนต่ำ Teo และคณะ [9] รายงานเกี่ยวกับการศึกษาวัสดุอิเล็กโทรด SC ที่มี AC จากแกลบ AC ถูกเตรียมจากแหล่งกรด Bronsted หรือ Lewis โดยบรรลุลค่า ca-pacitance (Cs) สูงสุดที่ 147 F/g โดยมีพื้นที่ผิว 2,696 m²/g Guo และคณะ [10] ศึกษาการสังเคราะห์ AC จากแกลบโดยใช้การกระตุ้นทางเคมีของ KOH อิเล็กโทรดที่ได้จะมี Cs สูงสุดที่ 125–210 Fg⁻¹ นอกจากนี้ มีรายงานว่าเปลือกทุเรียนซึ่งมีรูพรุนสูง เหมาะสำหรับใช้ขั้วไฟฟ้า SC [2-8] Tey และคณะ [11] ศึกษาการใช้เปลือกทุเรียนเพื่อเตรียม AC สำหรับอิเล็กโทรดประเภท EDLC โดยใช้การกระตุ้นทางเคมีด้วยกรดฟอสฟอริก อิเล็กโทรดเหล่านี้แสดงค่า Cs สูงที่ 93.1 F/g โดยมีค่า Ed และ Pd ที่ 11.3 Wh/kg และ 170 kW/kg ตามลำดับ Ukkakimapan และคณะ [12] ศึกษาโดยใช้แกลบทุเรียนเพื่อเตรียม AC สำหรับการใช้งาน SC โดยการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ พวกเขาบรรลุลค่าความจุจำเพาะที่ 145 F/g และความจุปริมาตรที่ 70 F/cm³ ในอิเล็กโทรไลต์อินทรีย์ Ong และคณะ [13] เตรียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กโทรดคาร์บอนโดยใช้เปลือกทุเรียนเพื่อผลิตไฟฟ้ากระแสสลับเพื่อใช้ใน EDLC ใช้วิธีการฉายรังสีไมโครเวฟและอัลตราโซนิกเพื่อควบคุมผลกระทบของอุณหภูมิและเวลาในการทำความร้อน สารนี้มี Cs สูงสุดที่ 103.6 F/g นอกจากนี้ การใช้เปลือกทุเรียนเป็นวัตถุดิบยังมีประโยชน์ในการผลิตอิเล็กโทรดสำหรับอุปกรณ์ SC นี้เป็นของเสียทางการเกษตรที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมสำหรับการผลิตอิเล็กโทรด อย่างไรก็ตาม Bo และคณะ[14] รายงานการใช้ rGO ในการใช้งานกักเก็บพลังงาน Rattanaveeranon และคณะ[15] ศึกษาผลของคอมโพสิต rGO กับเปลือกทุเรียนที่มีการเติมซิงค์ออกไซด์ในเซ็นเซอร์เคมีเพื่อการตรวจจับไฮโดรราซีน อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีรายงานเกี่ยวกับการเตรียม AC ที่ได้มาจากของเสียจากเปลือกทุเรียนเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้ rGO ที่ผสมกับเปลือกทุเรียนผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล และการกักตุนบอล 3 มิติความเร็วสูงเพื่อสร้างอุปกรณ์ SC เซลล์เหรียญกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลใช้เพื่อให้ได้ตัวอย่างที่มีรูพรุนสูง และการกักตุนบอลแบบ 3 มิติมีข้อได้เปรียบในการบิดและผสมที่สม่ำเสมอสูงภายในระยะเวลาอันสั้น [16]

งานปัจจุบันดำเนินการเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของ AC จากของเสียจากเปลือกทุเรียนเพื่อให้มีพื้นที่ผิวสูง และพัฒนาอิเล็กโทรดคาร์บอนประสิทธิภาพสูงสำหรับ SC แบบสมมาตร วิธีการที่ได้รับการปรับปรุงประกอบด้วยกระบวนการคาร์บอนไนเซชันตามด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล ลดขนาดอนุภาคผ่านการกักตุนบอล 3 มิติ ซึ่งทำงานพร้อมกันรอบแกน x, y และ z เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิว AC สำหรับอิเล็กโทรด SC rGO ถูกประกอบเข้ากับคาร์บอนเปลือกทุเรียน (DC) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของอิเล็กโทรดในอุปกรณ์ SC เซลล์แบบเหรียญ มีการรายงานคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าและเซลล์เหรียญ SC ที่มี rGO ผสมกับ DC ที่เตรียมโดยใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลที่มีขนาดอนุภาคลดลงและเป็นเนื้อเดียวกันจากการบำบัดในโรงสีลูกบอล 3 มิติความเร็วสูง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1. เพื่อปรับเปลี่ยนรูปแบบของเปลือกทุเรียน ที่เหลือทิ้งทางการเกษตรมาเป็นคาร์บอนกัมมันต์ โดยกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และการกระตุ้นทางเคมีด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

1.2.2. เพื่อศึกษาลักษณะโครงสร้าง และลักษณะสัญญาณ และผลสมบัติทางเคมีเชิงไฟฟ้าของคาร์บอนกัมมันต์จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยเทคนิคไฮโดรเทอร์มอล

1.2.3 เพื่อที่จะสังเคราะห์ขั้วไฟฟ้าจากวัสดุคาร์บอนโพสิทีฟกราฟีนออกไซด์ (rGO) กับคาร์บอนกัมมันต์สำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อโครงสร้างคาร์บอนกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน เช่น เวลาในการเผาหรืออุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน การใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มอลเพื่อกระตุ้นลักษณะของคาร์บอนกัมมันต์ แล้วจึงนำไปเปรียบเทียบระหว่างคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันกับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล มีกรอบแนวคิดพื้นฐานที่สำคัญดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.1 ทำการศึกษากระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ภายใต้บรรยากาศก๊าซอาร์กอน

1.3.2 ศึกษากระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยเทคนิคไฮโดรเทอมอล โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ต่อคาร์บอนกัมมันต์สัดส่วน 1:3 และนำไปผ่านกระบวนการไฮโดรเทอมอลที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 2 ชั่วโมง

1.3.3 นำคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอมอลมาผ่านเครื่องบดทรงกลม (3D ball-milling) ที่เวลาต่างๆ

1.3.4 นำคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และคาร์บอนกัมมันต์จากกระบวนการกระตุ้นทางเคมีด้วยเทคนิคไฮโดรเทอมอล และคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอมอลมาผ่านเครื่องบดทรงกลมมาคอมโพสิตกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

1.3.4 ศึกษาลักษณะโครงสร้างและลักษณะสัณฐาน และสมบัติทางเคมีเชิงไฟฟ้า ของคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และคาร์บอนกัมมันต์ที่ถูกกระตุ้นทางเคมีด้วยเทคนิคไฮโดรเทอมอล

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของคาร์บอนกัมมันต์จากแหล่งธรรมชาติได้ และยังสามารถเรียนรู้วิธีการกระตุ้นทางเคมี เพื่อนำมาใช้งานได้

1.4.2 สามารถนำสารคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและเทคนิคไฮโดรเทอมอลแล้วมาคอมโพสิตกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ และมีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

1.4.3 สามารถอธิบายปัจจัยสมบัติทางไฟฟ้าเคมีที่ส่งผลต่อคาร์บอนกัมมันต์จากการผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และการกระตุ้นทางเคมี อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างและลักษณะสัณฐานของอนุภาคได้อีกด้วย

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทูเรียน

ทูเรียนเป็นพืชพื้นเมืองของประเทศอินโดนีเซีย มาเลเซีย บรูไน ส่วนแนวคิดที่ว่าทูเรียนเป็นพืชพื้นเมืองของฟิลิปปินส์ยังเป็นที่โต้แย้งกันอยู่[17] ทูเรียนสามารถปลูกได้ในดินร่วมซุยหรือดินร่วนปนทราย ชอบแสงแดด ชอบน้ำปานกลาง เติบโตได้ในสภาพภูมิอากาศร้อนชื้น แต่เมื่ออุณหภูมิเฉลี่ยต่ำกว่า 22 องศาเซลเซียสจะหยุดเจริญเติบโตทันที ส่วนในเรื่องของผลผลิตต้องใช้เวลาปลูกประมาณ 5-6 ปี แต่ช่วงที่จะให้ผลผลิตสูงจะอยู่ที่ 10 ปีขึ้นไป ศูนย์กลางความหลากหลายทางระบบนิเวศของทูเรียนอยู่ที่เกาะบอร์เนียว เรียกได้ว่ามีทูเรียนหลากหลายสายพันธุ์ *D. zibethinus*, *D. dulcis*, *D. graveolens*, *D. kutejensis*, *D. oxleyanus* และ *D. testudinarum* แต่ก็จะมีขายเฉพาะตลาดท้องถิ่นเท่านั้น ในบรูไนทูเรียนชนิด *D. zibethinus* ไม่มีการปลูกในเชิงการค้าขาย เพราะผู้บริโภคนิยมทูเรียนชนิดอื่นมากกว่า อย่างเช่นชนิด *D. graveolens*, *D. kutejensis* และ *D. oxleyanus* ชนิดต่างๆเหล่านี้มีการกระจายพันธุ์ทั่วบรูไนร่วมกับชนิดอื่นๆ ซึ่งส่งผลให้เห็นว่าประเทศบรูไนมีความหลากหลายของระบบนิเวศที่สูงมาก[18]



รูปที่ 2.1 ทูเรียน

แต่ถ้าหากพูดถึงทูเรียนในประเทศไทยนั้น อย่างที่กล่าวอ้างมาทูเรียนไม่ได้มีถิ่นกำเนิดในประเทศไทย แต่ก็สามารถปลูกได้ทุกพื้นที่ของประเทศไทย อีกทั้งประเทศไทยยังเป็นผู้ส่งออกหลักของทูเรียน จากผลผลิต 781,000 ตันที่ผลิตได้ในไทย จากผลผลิตรวมทั่วโลก 1,400,000 ตัน และในปีพ.ศ. 2542 ยังมีการส่งออกมากถึง 111,000 ตัน [18] ในประเทศมาเลเซียและอินโดนีเซียเป็นอันดับที่รองลงมา มีผลผลิตอยู่ที่ประมาณ 265,000 ตัน ส่วนในประเทศไทยของเรাজังหวัดจันทบุรีได้มีการจัดงานมหกรรมทูเรียนโลกทุกปี ในทุกต้นเดือนพฤษภาคม เพราะว่าจังหวัดจันทบุรีมีผลผลิตมากถึงครึ่งหนึ่งของผลผลิตรวมในประเทศไทย [19, 20] ในประเทศฟิลิปปินส์ จังหวัดดาเวาเรียกได้ว่าเป็นศูนย์กลางการปลูกทูเรียน ในทุกๆปีจะมีการจัดเทศกาลคาดายาวัน (kadayawan) เพื่อเป็นการเฉลิมฉลองและเป็นเอกลักษณ์ของจังหวัดดาเวา ซึ่งงานนี้เป็นการจัดงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เข้าไปเยี่ยมชมด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉลอง และในสถานที่อื่นๆที่มีการปลูกทุเรียนก็มี ลาว, กัมพูชา, เวียดนาม, อินเดีย, พม่า, ศรีลังกา, แคริบเบียน, รัฐฟลอริดา, รัฐฮาวาย, ปาปัวนิวกินี, โพลินีเซีย, มาดากัสการ์, ตอนเหนือของออสเตรเลีย, ตอนใต้ของจีน (เกาะไหหลำ) และสิงคโปร์

ในช่วงต้นปี พ.ศ. 2503 มีการนำเข้าของทุเรียนออสเตรเลีย และในปีพ.ศ. 2518 มีการนำเข้าต้นพันธุ์ (ต้นที่สามารถขยายพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ) มีการนำเข้าทุเรียนชนิด *D. zibethinus* เข้ามา มากกว่า 30 สายพันธุ์ หลังจากนั้นในปีพ.ศ. 2542 [21] ประเทศจีนก็กลายเป็นประเทศหลักที่มีการซื้อถึง 65,000 ต้น ประเทศสิงคโปร์ 40,000 ต้น ประเทศไต้หวัน 5,000 ต้น สหรัฐอเมริกามีการนำเข้าทุเรียน 2,000 ต้น แต่มาในรูปแบบของการแช่เย็น และประชาคมยุโรปมีการนำเข้า 500 ต้น [18]

เรียกได้ว่าทุเรียนนั้นเป็นผลไม้ที่มีผลผลิตเป็นฤดูกาล ไม่เหมือนผลไม้เมืองร้อนชนิดอื่นๆ เช่น มะละกอ ส่งผลให้หาทานได้ตลอดทั้งปี ในมาเลเซียตะวันตกและสิงคโปร์ จะมีผลผลิตของทุเรียนในเดือนมิถุนายนถึงสิงหาคม ส่วนในไทยฤดูกาลของทุเรียนในภาคตะวันออกคือ เดือนเมษายนถึงมิถุนายน ภาคใต้คือเดือนมิถุนายนถึงสิงหาคม หากถ้าพูดถึงเรื่องราคาทุเรียนจะมีราคาสูงกว่าผลไม้ชนิดอื่นๆ ในประเทศสิงคโปร์มีความต้องการทุเรียนสายพันธุ์ที่มีคุณภาพสูงอย่าง D24 มีราคาทั่วไปที่ S\$8- S\$15 (192-360 บาท) ต่อ กิโลกรัม เมื่อทำการชั่งทุเรียน 1 ลูกจะมีน้ำหนักอยู่ที่ 1.5 กิโลกรัม ทุเรียน 1 ผลจึงมีราคา S\$12- S\$22 (288-528 บาท) [22] ส่วนที่รับประทานได้ของทุเรียนก็คือเยื่อหุ้มเมล็ด ที่ผู้คนมักเรียกว่าเนื้อหรือพู ส่วนนี้มีน้ำหนักเพียงแค่ 15-30% ของน้ำหนักรวมผลทุเรียน [17] แต่ถึงอย่างไรก็ตามผู้บริโภคในประเทศสิงคโปร์ก็เต็มใจอย่างมากที่จะจ่ายเงินราวๆ 1,800 บาท ในการซื้อทุเรียน 1 ครั้ง

2.1.1 ทฤษฎีพื้นฐาน ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

2.1.1.1 ราก

รากหาอาหารของทุเรียนมีความลึกระดับ 50 เซนติเมตร รากพิเศษของทุเรียนจะอยู่บริเวณโคนต้น ซึ่งมีให้เห็นอยู่มากมายตามผิวดิน จะแตกออกมาเป็นลักษณะคล้ายตะขาบ จึงถูกเรียกว่า “รากตะขาบ” รากแก้วของทุเรียน ทำหน้าที่ยึดลำต้นให้มีความแข็งแรง แต่ทุเรียนนหน่อส่วนใหญ่ จะไม่มีรากแก้วเพราะปลูกจากการตอนกิ่ง ทำให้มีรากแขนงขึ้นมาแทน รากแขนงทำหน้าที่คล้ายกับรากแก้ว สามารถหยั่งลึกลงไปถึงระดับน้ำใต้ดินได้ ส่วนการดูดซับอาหารใช้รากฝอยเป็นตัวช่วย

2.1.1.2 ใบ

ทุเรียนเป็นไม้ยืนต้น ถ้าหากปลูกจากการเพาะเมล็ด มีความสูง 20-40 เมตร เป็นพืชที่ไม่มีการผลัดใบ ลักษณะเป็นทรงพุ่มแผ่กว้าง แต่ถ้าเป็นต้นที่ปลูกจากการเสียบยอด มีความสูง 8-12 เมตร ใบจะเป็นใบเดี่ยว ยาว 8-20 เซนติเมตร กว้าง 4-6 เซนติเมตร ส่วนพืชใบเลี้ยงคู่ใบจะมีลักษณะปลายใบแหลม ใต้ใบเป็นสีน้ำตาล ก้านใบสีน้ำตาลบนใบมีสีเขียวเข้มถึงเขียวแก่ เส้นใบของทุเรียนจะสานกันเป็นร่างแห แต่ก็ขึ้นอยู่กับแต่ละสายพันธุ์ของทุเรียน ซึ่งจะมีความแตกต่างไปตามสายพันธุ์นั้นๆ

2.1.1.3 ดอก

ลักษณะของดอกทุเรียนคล้ายระฆัง เป็นดอกสมบูรณ์เพศ ประกอบด้วย กลีบเลี้ยง ทำหน้าที่หุ้มกลีบดอกไว้ เมื่อดอกเริ่มบานจะเห็นกลีบเลี้ยง 2-3 กลีบ มีสีเขียวอมน้ำตาลอยู่ชั้นนอกสุด กลีบรองลักษณะคล้ายหม้อตาลโตนอยู่ถัดจากกลีบเลี้ยง และกลีบดอก มีจำนวน 5 กลีบ สีขาวนวล ก้านเกสร 5-8 อัน มีเกสรตัวผู้ 5 ชุด สำหรับดอกของทุเรียนนั้นมักจะออกเป็นช่อๆ ช่อละ 1-30 ดอก

2.1.1.4 ผล

ผลของทุเรียนมีลักษณะที่แตกต่างกันไปตามพันธุ์ ผลกลม (ก้านยาว กระดุม) ผลก้นป้าน (หมอนทอง ทอช้อย) เปลือกแข็งหนา หนามแหลมแข็ง ภายใต้อเปลือกจะมีเนื้อทุเรียน เรียกว่า “พู” แต่ละพูนั้นจะมีเนื้อทุเรียนและเมล็ดอยู่ภายใน สีขางเนื้อทุเรียนจะมีสีเหลืองอ่อน หรือสีจางา ก็ขึ้นอยู่กับสภาพของดินที่ใช้ในการปลูกและแตกต่างไปตามพันธุ์ของทุเรียน

2.2 ชีวมวล

ชีวมวล (Biomass) คือสารอินทรีย์จากแหล่งกักเก็บพลังงานธรรมชาติ สามารถนำมาใช้เพื่อผลิตพลังงานได้จาก พืชต่างๆ หรือไม่ว่าจะเป็นวัสดุเหลือใช้ทางเกษตรกร กากใยจากกระบวนการผลิต ชีวมวลประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน (Carbon : C), ออกซิเจน (Oxygen : O), ไฮโดรเจน (Hydrogen : H), กำมะถัน (Sulfur : S) และไนโตรเจน (Nitrogen : N) ชีวมวลสามารถปรับเปลี่ยนให้เป็นพลังงานได้ ในขั้นตอนการเจริญเติบโตพืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง ได้ผลผลิตออกมาเป็นแป้ง และน้ำตาลแล้วทำการกักเก็บไว้ในส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นถ้านำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงเราก็จะได้พลังงานออกมาจากการนำชีวมวลมาใช้ได้ทั้งรูปแบบของพลังงานความร้อน ไอน้ำ หรือจะผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าก็ได้ สามารถเลือกใช้ชีวมวลอย่างใดอย่างหนึ่ง หรือใช้ร่วมกันหลายชนิดก็ได้ เพราะเช่นนี้เลยส่งผลให้ชีวมวลเป็นแหล่งเชื้อเพลิงราคาถูก ยิ่งถ้ามีชีวมวลจากแหล่งที่กำลังศึกษาอยู่ก็จะลดต้นทุนในการขนส่งลงไปได้อีก ซึ่งแหล่งกำเนิดชีวมวลมี 6 แหล่งดังนี้

1.ชีวมวลจากการเพาะปลูก เป็นชีวมวลที่ผู้ใช้ ปลูกขึ้นมาเพื่อเป็นอาหารให้แก่คน หรือสัตว์ หรือปลูกมาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยเฉพาะ ปลูกเพื่อนำมาเป็นชีวมวลโดยตรง ยกตัวอย่างเช่น ปาล์ม น้ำมัน, ข้าวโพด, ถั่วเหลือง, มันสำปะหลัง เป็นต้น

2.ชีวมวลจากของเสียทางเกษตร ชีวมวลประเภทนี้เกิดขึ้นระหว่างเก็บเกี่ยวพืชผลทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว แกลบ กะลาปาล์ม และกาบ เป็นต้น

3.ชีวมวลที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมป่าไม้ ชีวมวลประเภทนี้สามารถหาได้อย่างง่ายในป่า เช่น กิ่งไม้ เศษใบไม้ หรือต้นไม้ที่ตายไปแล้ว อาจจะเป็นขี้เลื่อยที่เป็นของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมการแปรรูป เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ชีวมวลที่เกิดหลังจากไฟไหม้ป่า ชีวมวลประเภทนี้จะเกิดขึ้นหลังจากที่มีไฟไหม้ป่า เป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติเป็นประจำ ชีวมวลที่จะเห็นส่วนใหญ่คือเศษกิ่งไม้ ต้นไม้หรือตอไม้ ลำต้น ที่เหลือจากไฟไหม้ป่า

5. ชีวมวลจากมูลสัตว์ ชีวมวลประเภทนี้มีความชื้นสูงมาก เพราะเป็นสิ่งปฏิกูลที่เกิดจากการขับถ่ายของสัตว์ เช่น มูลแพะ มูลวัว มูลไก่ เป็นต้น

6. ชีวมวลเกิดจากขยะชุมชน นั่นก็คือขยะที่ทิ้งกันในทุกๆวัน เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ขยะชุมชน (Municipal Solid Waste)

2.2.1 องค์ประกอบของชีวมวล

องค์ประกอบชีวมวลจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

2.2.1.1. ความชื้น (Moisture) ชีวมวลส่วนมากจะมีความชื้นสูง เนื่องจากเป็นผลผลิตทางการเกษตรเลยส่งผลให้มีความชื้นสูงอยู่ แต่ถ้าต้องการนำชีวมวลมาปรับเปลี่ยนเป็นพลังงานโดยการเผาไหม้ ควรจะมีความชื้นไม่เกิน 50% ดังนั้นควรจะทำให้ชีวมวลแห้งก่อน

2.2.1.2. คาร์บอนคงที่ (Fixed carbon) โครงสร้างหลักของชีวมวลจะประกอบไปด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ ถ้าชีวมวลที่มีเปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงที่ต่ำหรือน้อยหมายถึงสันดาปไม่ดี มีความรวดเร็วในการติดไฟช้า อุณหภูมิติดไฟต่ำ ส่งผลมาจากชีวมวลมีความชื้นมากนั่นเอง

2.2.1.3. สารระเหย (Volatile matter) เป็นส่วนที่ติดไฟได้ง่าย หากชีวมวลใดมีค่าสารระเหยสูงส่งผลให้ติดไฟได้ง่าย

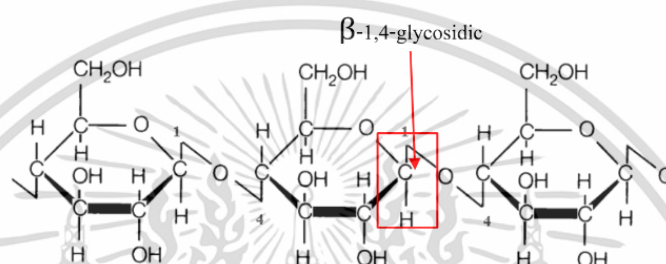
2.2.1.4. ขี้เถ้า (Ash) เป็นส่วนประกอบของสารอนินทรีย์ที่อยู่ในชีวมวลอยู่แล้ว แต่ถูกออกซิไดซ์จนสมบูรณ์เลยกลายเป็นขี้เถ้า ส่วนใหญ่ขี้เถ้าประมาณ 1-3 เปอร์เซ็นต์ ถ้าหากมีขี้เถ้ามากจะมีปัญหาในการเผาไหม้

2.2.2 องค์ประกอบทั่วไปของชีวมวล

ชีวมวลแต่ละชนิดมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันออกไป แต่องค์ประกอบหลักส่วนใหญ่ที่มีอยู่ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง และโปรตีน และมีสารอื่นๆปะปนด้วย ถึงแม้ธัญพืช สมุนไพร ดอกไม้ วัชพืช ก็มีองค์ประกอบที่แตกต่างของแต่ละประเภทเช่นเดียวกัน

2.2.2.1 เซลลูโลส (Cellulose)

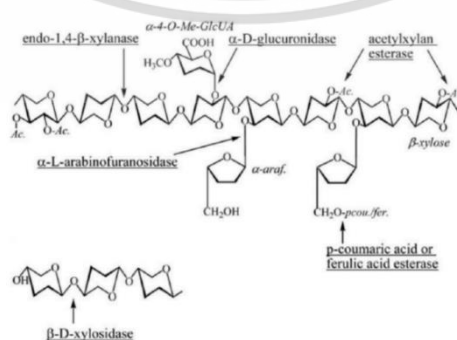
มีสูตรโมเลกุลคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ประเภทโฮมอพอลิแซ็กคาไรด์ (Homopolysaccharide) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างเป็นผลึก (Crystalline) ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส (D-glucose) เชื่อมต่อกันที่พันธะ β -1,4-glycosidic เป็นสายยาว มากกว่า 2,000 โมเลกุล และมีการเชื่อมต่อระหว่างสายของเซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจน จนเกิดเป็นเส้นใย ส่วนมากจะพบได้ในผนังเซลล์พืช ซึ่งจะรวมอยู่กับเฮมิเซลลูโลสและแพกติน เพื่อเพิ่มความแข็งแรง และเซลลูโลสละลายน้ำได้น้อย สำหรับการย่อยสลายเส้นใยเซลลูโลสสามารถใช้กรดตัดพันธะด้วยวิธีทางเคมี หรือ อาจจะใช้ตัวเร่งชีวภาพ (Enzyme) อย่างเซลลูโลสตัดพันธะได้



รูปที่ 2.2 การเชื่อมต่อโมเลกุลของกลูโคสในสายเซลลูโลสด้วยพันธะ β -1,4-glycosidic

2.2.2.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ประกอบไปด้วยน้ำตาล 5 คาร์บอนอะตอม และน้ำตาล 6 คาร์บอนอะตอม ต่อเป็นพอลิเมอร์สายสั้นและแตกกิ่งแขนง แต่ละแตกแขนงมาน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำตาล ได้แก่ น้ำตาลเพนโตส (Pentose) ต่อกันด้วยพันธะ β -D-xylose α -L-arabinose น้ำตาลเฮกโตส (Hexose) ต่อกันด้วยพันธะ β -D-mannose β -D-glucose α -D-galactose ลักษณะโครงสร้างแบบอสัณฐาน (Amorphous) โครงสร้างมีความแข็งแรงน้อยกว่าเซลลูโลส แต่เมื่อเชื่อมต่อเข้ากับเซลลูโลสแล้วส่งผลให้มีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น ไม่สามารถละลายในน้ำได้ แต่สามารถย่อยสลายได้โดยใช้กรด เบส หรือเอนไซม์ มีความสามารถในการอุ้มน้ำ และแลกเปลี่ยนไอออนประจุบวกเมื่ออยู่ในกรพเพาะและลำไส้ของมนุษย์



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสและตำแหน่งการเข้าทำลายด้วยเอนไซม์ชนิดต่างๆ ที่มา:

Collins (2005)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

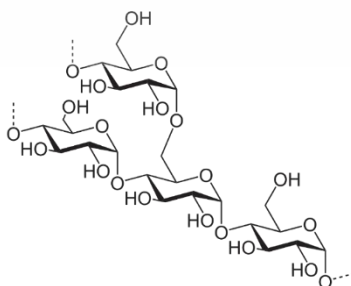
2.2.2.3. ลิกนิน (Lignin)

เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane : C_6-C_3) 3 หน่วยย่อยประกอบกันอยู่ ได้แก่ พาราโควาริลแอลกอฮอล์ (p-coumaryl alcohol) โคนิเฟอร์อลแอลกอฮอล์ (coniferyl alcohol) และไซนิพริลแอลกอฮอล์ (sinapyl alcohol) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอสเทอร์ (Ester) มากกว่า 2 พันธะ ในโมเลกุลของสารประกอบมีพันธะเดี่ยวระหว่างอะตอมของคาร์บอนเชื่อมต่ออยู่ ส่งผลให้ลิกนินมีความเสถียรสูง ย่อยสลายลิกนินได้จากกรดหรือเบส สามารถตัดพันธะของเอสเทอร์ได้จากน้ำ ในธรรมชาติลิกนินจะช่วยห่อหุ้มป้องกันเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสจากศัตรูไม้ เพราะลิกนินมีความเป็นพิษกับศัตรูไม้ อีกทั้งยังสามารถไปเพิ่มความแข็งแรงของผลึกลิกโนเซลลูโลส ดังนั้นแล้วจึงต้องทำการปรับสภาพไม้เพื่อลดปริมาณลิกนินก่อนที่จะเปลี่ยนเซลลูโลสเป็นกลูโคส

รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างของลิกนิน

2.2.2.4. แป้ง

โครงสร้างเป็นโพลีแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ซึ่งคล้ายคลึงกับเซลลูโลส ที่ประกอบไปด้วยน้ำตาลกลูโคส (D-glucose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ -1,4-glycosidic แต่จะมีความต่างของโครงสร้างพันธะเซลลูโลส จึงส่งผลให้สามารถละลายน้ำได้ แต่บางส่วนก็จำเป็นต้องใช้น้ำร้อนละลาย (ส่วนที่เป็นอะไมโลส ที่มีมอนอเมอร์เชื่อมต่อกัน ตั้งแต่ 10,000 ถึง 50,000 โมเลกุล คิดเป็นประมาณ 10-20% ของแป้ง) หรือบางส่วนที่ไม่ละลาย (ส่วนที่เป็นอะไมโลสแพกทิน ที่มีมอนอเมอร์เชื่อมต่อกัน ตั้งแต่ 50,000 ถึง 100,000 โมเลกุล คิดเป็นประมาณ 80-90% ของแป้ง) มักจะพบในราก เมล็ด และลำต้นเป็นหลัก เนื่องจากเป็นแหล่งอาหารและแหล่งพลังงานของเซลล์



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของอะไมโลส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.5. โพรตีน

สำหรับโปรตีนถือว่าเป็นสารประกอบที่มีสัดส่วนน้อยที่สุด เพราะว่ามีองค์ประกอบพื้นฐานของสารชีวมวล เนื่องจากโปรตีนประกอบด้วยโมเลกุลขนาดใหญ่หลายโมเลกุลประกอบเข้าด้วยกัน เช่น กรดอะมิโนหลายตัวถูกโพลีเมอร์ไรเซชันเข้าด้วยกัน โดยสมบัติที่ต่างกัน กับชนิดขององค์ประกอบและลำดับของโพลีเมอร์ไรเซชันของกรดอะมิโน

2.2.2.6. สารอื่นๆ

สารอื่นๆที่วุ้นนั้น สามารถเป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ได้ เช่น กลีเซอรอล เช่นน้ำมัน น้ำมันจากพืช น้ำมันปาล์ม หรือซูโครสในอ้อยและต้นบีท ตัวอย่างอื่นๆ เช่น อัลคาลอยด์ ซีผึ้ง แม้ว่าพบสารเหล่านี้ในปริมาณน้อยแต่ก็มีคุณค่ามาก เนื่องจากใช้เป็นส่วนผสมของยา สารชีวมวลประกอบไปด้วยสารอนินทรีย์ เช่น ซีลีไค ในจำนวนน้อย ธาตุโลหะพื้นฐาน เช่น โพแทสเซียมฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม ซิลิกอน อลูมิเนียม โซเดียม และเหล็ก แต่ละธาตุปะปรมาณในชนิดของสารก็จะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวล

2.3 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน เป็นการเผาในสภาพที่อ็อกซิเจน หรือในสถานที่ที่สามารถจำกัดจำนวนออกซิเจนได้ เพื่อเป็นการเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนของสารอินทรีย์ แต่ในขณะเดียวกันในกระบวนการคาร์บอนไนเซชันจะได้ผลิตภัณฑ์อื่นที่เป็นของเหลวและแก๊สออกมาด้วย ทำให้โครงสร้างหลักของสารเป็นวงแหวนอะโรมาติกกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ (Char) และกลุ่มโครงสร้างโมเลกุล หมู่นุคลีโอไซด์ที่มีขนาดเล็กจะกลั่นตัวกลายเป็น น้ำ แอมโมเนีย และแก๊สต่างๆ เป็นต้น

ขั้นตอนในการคาร์บอนไนเซชัน ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญอย่างมากที่สุดในการผลิตถ่านกัมมันต์ เมื่อเริ่มกระบวนการคาร์บอนไนเซชันแล้วจะเริ่มสร้างรูพรุนทันที หากมีธาตุหรือองค์ประกอบอื่นๆ เช่น ออกซิเจน (oxygen) ไนโตรเจน (Nitrogen) ไฮโดรเจน (Hydrogen) จะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างให้อยู่ในรูปแบบของของเหลว แก๊ส และน้ำมันชาร์ หลังจากนั้นจะได้ถ่านชาร์ ที่มีโครงสร้างการจัดเรียงตัวที่ไม่มีระเบียบมากนัก แต่จะมีช่องว่างระหว่างรูพรุนเพิ่มมากขึ้น โดยจะมีสารอินทรีย์ที่เป็นทาร์ไปอุดอยู่ระหว่างช่องเหล่านั้น ถ่านชาร์ที่ได้จะมีอัตราส่วนของคาร์บอนต่อออกซิเจน คาร์บอนต่อไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้นจากสารตั้งต้นตอนแรกด้วย วัตถุประสงค์หรือสารแต่ละชนิดที่นำมาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันนั้นจะมีภาวะความเหมาะสมแตกต่างกัน จึงต้องหาวิธีที่เหมาะสมสำหรับวัตถุประสงค์แต่ละตัวเพื่อที่จะส่งผลให้ได้คาร์บอนกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งก็จะสามารถต่อยอดนำไปใช้ในระยะเวลาต่อไปได้

2.4 การกระตุ้น (Activated)

การกระตุ้นหรือ การทำคาร์บอนกัมมันต์ มีชื่อเรียกภาษาอังกฤษว่า Activated carbon คือ การที่นำคาร์บอนไปผ่านกระบวนการกระตุ้นไม่ว่าจะทางกายภาพหรือทางเคมีก่อน เพื่อที่จะส่งผลให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างของสารเกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ในการกระตุ้นอาจจะมียอดแตกขนาดเล็กเกิดขึ้น เล็กในที่นี้หมายถึงเล็กในระดับนาโนเมตรทำให้มีรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งขนาดของรูพรุนนั้นมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับการดูดซับ ถ้ามีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ก็จะไปเพิ่มการดูดซับของโมเลกุลมากขึ้นไปอีก และการกระตุ้นเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของสาร เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้โมเลกุลบางกลุ่มได้หลุดออก ทำให้มีส่วนของการดูดซับเพิ่มขึ้นมาแทน เพื่อเพิ่มความว่องไว (Activated surface area) ของการดูดซับในพื้นที่ผิวที่มีอยู่แล้ว คือมีการจัดเปลี่ยนตำแหน่งของโครงสร้างใหม่ อะตอมคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น ทำให้มีความว่องไวในการดูดซับเพิ่มมากขึ้น

2.4.1. การสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์

ในกระบวนการผลิตคาร์บอนกัมมันต์นี้ สามารถใช้วัสดุเหลือใช้จากธรรมชาติที่มีส่วนประกอบของคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มาสังเคราะห์ได้เลย ยกตัวอย่างเช่น เศษไม้ ถ่านหิน ชานอ้อย กะลามะพร้าว หรือเปลือกพืชชนิดอื่นๆ ซึ่งการสังเคราะห์หรือกระตุ้นนั้นมี 2 วิธีด้วยกัน

2.4.1.1 กระตุ้นทางกายภาพ (Physical reactivation)

กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ เป็นการทำให้พื้นผิวของคาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น อาจจะมีรูพรุนหรือเพิ่มรูพรุนก็สามารถเป็นได้ วิธีการกระตุ้นทางกายภาพนี้เป็นการเพิ่มพื้นผิว อีกทั้งยังทำให้โครงสร้างคาร์บอนเกิดการจัดเรียงตัวใหม่ ทำให้มีการดูดซับเพิ่มมากขึ้น วิธีการนี้สามารถทำได้จากการนำถ่านไปเผาไหม้ในสภาพที่มีออกซิเจนน้อย หรือสามารถจำกัดจำนวนออกซิเจนได้ ใช้สารที่เรียกว่า ก๊าซออกซิไดซ์ (Oxidizing gas) ทำการกระตุ้นโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ใช้ร่วมกับความร้อนที่อุณหภูมิ 600 – 1000 องศาเซลเซียส ก๊าซที่ใช้จะไปทำปฏิกิริยากับน้ำที่หลงเหลืออยู่ และทำให้คาร์บอนอะตอมเกิดการก๊าซซิฟิเคชัน (Gassification) ทำให้เกิดรูพรุนขึ้น ความสามารถในการดูดซับก็สูงขึ้นด้วย ข้อดีของการกระตุ้นทางกายภาพคือ ไม่มีสารเคมีตกค้างส่วนข้อเสีย คือ ใช้พลังงานสูงมาก สำหรับวิธีการนี้มีค่าใช้จ่ายเกิดขึ้นเรื่อยๆ อีกทั้งผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นนั้นมีรูพรุนเกิดขึ้นน้อย ไม่สามารถควบคุมคุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ให้คงที่ได้

2.4.1.2 กระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

การกระตุ้นทางเคมีส่วนใหญ่จะใช้สารเคมีหลายชนิดทำปฏิกิริยากับคาร์บอนในเขชันกับชีวมวล โดยทั่วไปจะใช้สารประเภทแอลคาไลน์ โลหะแอลคาไลน์ สารประกอบคาร์บอเนต สารประเภทเบส และกรดบางชนิด เช่น กรดฟอสฟอริก (phosphoric acid : H_3PO_4) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide : KOH) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (K_2CO_3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodiumhydroxide : NaOH) ซิงค์คลอไรด์ (zinc chloride : ZnCl_2) เป็นต้น โดยจะใช้ความร้อนประมาณ 450 – 900 องศาเซลเซียส จะให้ความร้อนมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและสารเคมีที่นำมากระตุ้น สารเคมีที่เติมลงไปจะเข้าไปทำลายโครงสร้างของชีวมวล เกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ในชีวมวล มีคาร์บอนอะตอมบางส่วนเกิดการเชื่อมไขว้กัน (Crosslink) ทำให้คาร์บอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ท่านใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะตอมไม่สามารถหลุดออกไปได้ ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนเพิ่มขึ้น และการเกิดทาร์ลดลง สามารถล้างออกด้วยกรดหรือเบส ใช้อุณหภูมิไม่มาก โครงสร้างที่ได้ออกมามีความแข็งแรง นิยมอย่างมากทางภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากการกระตุ้นโดยใช้สารเคมีนี้ทำให้ได้รูพรุนจำนวนมาก ใช้ระยะเวลาในการทำน้อย แต่อย่างไรก็ตามยังมีปัญหาในด้านของการมีสารตกค้าง เช่น มีสิ่งก่สติดค้าง สังกะสีเป็นโลหะหนัก เป็นผลเสียต่อร่างกายมาก ถ้าสะสมบริเวณตับหรือไตในจำนวนมากๆ ก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้ สารเคมีที่นิยมนำมากระตุ้นทางเคมีมากที่สุด คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

2.4.1.2.1 โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide : KOH)

โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เรียกได้ว่าเป็นสารเคมีที่นิยมนำมาใช้กระตุ้นทางเคมีมากที่สุด อยู่ในวิจัยหลายๆเรื่อง เนื่องจากว่าถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ที่ผ่านการกระตุ้นจากโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะสูงมากเป็นพิเศษ มีรูพรุนเกิดมาก ขนาดรูพรุนส่วนใหญ่อยู่ในระดับไมโครพอร์ (Micropore) ซึ่งโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ จะถูกกระตุ้นด้วยอุณหภูมิ 400 – 800 องศาเซลเซียส เกิดจากการกัดกร่อนของพื้นผิวคาร์บอน โดยที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส ดังแสดงในปฏิกิริยาที่ (6) KOH เกิดการแตกตัวกลายเป็น K_2O และ H_2O จากนั้น H_2O เข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์บอนได้ CO และ H_2 หลุดออกมา (7) บางส่วนทำปฏิกิริยากับ H_2O ได้ CO_2 และ H_2 (8) ต่อจากนั้น CO_2 และ K_2O ในช่วงนี้สารส่วนใหญ่ที่หลุดออกมาคือ H_2O , CO , H_2 , CO_2



มาที่อุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส CO_2 จากปฏิกิริยาที่ (8) และ K_2O จากปฏิกิริยาที่ (6) ทำปฏิกิริยาเป็น K_2CO_3 จากปฏิกิริยาที่ (9)



ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส K_2CO_3 แตกตัวเป็น K_2O และ CO_2 หลุดออกมาปฏิกิริยาที่ (10) รวมถึง CO_2 แตกตัวและหลุดออกไปพร้อมกับ $2CO$ ในปฏิกิริยาที่ (11)



ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส K_2CO_3 เข้าไปทำปฏิกิริยากับ $2C$ ที่ผิวของตัวอย่าง (เกิดรูพรุนระดับไมโครพอร์) ผลิตภัณฑ์ได้ออกมาเป็นโลหะ K กับ $3CO$ ที่หลุดออกมาจากปฏิกิริยาที่ (12)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส K_2O เข้าไปทำปฏิกิริยาที่ (6), (9) และ (10) เข้าไปทำปฏิกิริยากับ C ที่ผิวจน K_2O แยกตัวทั้งหมดเป็นโลหะ K และ CO หลุดออกมา (13)



ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมีคือ มีพื้นที่ผิวสัมผัสจำเพาะที่สูงมาก ได้รูพรุนระดับไมโครพอร์ส และเมโซพอร์ส แต่ก็มีข้อเสียคือ เมื่อเผาเสร็จแล้วไม่ควรปล่อยให้คาร์บอนไว้ให้โดนลมเนื่องจากความชื้นในอากาศจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับโลหะโพแทสเซียมแล้วการเป็นโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ทำให้กลับมาทำปฏิกิริยากับคาร์บอนอีกครั้ง ทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้ ดังนั้นจึงควรนำไปล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCL) เพื่อล้างสารตกค้าง

2.5 การจำแนกขนาดรูพรุนตาม IUPAC (International Union of Pure and Applied chemistry)

สำหรับวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน หรือมีรูพรุนเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างนั้นๆ ขนาดของรูพรุนแต่ละชนิดมีขนาดไม่เท่ากัน การจำแนกขนาดรูพรุนมีหลักเกณฑ์การจำแนก 3 ประเภทดังนี้

2.5.1 แมโครพอร์ส (Macroporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดมากกว่า 50 นาโนเมตร

2.5.2 เมโซพอร์ส (Mesoporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดระหว่าง 2-50 นาโนเมตร

2.5.3 ไมโครพอร์ส (Microporous) เป็นรูพรุนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดน้อยกว่า 2 นาโนเมตร

2.6 กระบวนการการดูดซับ

กระบวนการการดูดซับเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรืออาจจะเป็นความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือผิวหน้า (Interface) สามารถเกิดขึ้นได้กับบริเวณผิวสัมผัส 2สถานะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับของแข็ง ของแข็งกับก๊าซ และ ก๊าซกับของเหลว โดยที่โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent)

2.6.1 กลไกการดูดซับ

2.6.1.1. การแพร่ภายใน (Internal or Pore diffusion)

เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายแพร่เข้าสู่ภายในรูเล็กๆจำนวนมากภายในเนื้อสารดูดซับรูเล็กๆ จะส่งผลให้เกิดพื้นที่ผิวปริมาณมากมายในสารดูดซับ

2.6.1.2. การแพร่ภายนอก (External Diffusion)

การแพร่ภายนอกเป็นกลไกอยู่ที่โมเลกุลของตัวถูกละลายของสารละลายภายนอก (Bulk solution) เข้าถึงผิวด้านนอกของสารดูดซับ โดยที่ผิวด้านนอกของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มอยู่ ซึ่งโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวจนเข้ามาถึงผิวหน้าสารดูดซับ

2.6.1.3. ปฏิกิริยาที่พื้นผิว (Surface reaction)

เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายถูกดูดติดอยู่ที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

2.6.2 ประเภทของการดูดซับ

2.6.2.1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เกิดขึ้นได้จากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของตัวดูดซับกับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับ มีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ส่งผลให้องค์ประกอบยึดติดแน่นบนผิวของตัวดูดซับด้วยแรงทางกายภาพ ได้แก่ แรงทางไฟฟ้าสถิต (Electrostatic force) เป็นแรงที่ดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วกับสารที่มีขั้ว หรือไม่มีขั้ว และแรงแวนเดอวาล์ (Van der Waal's force)

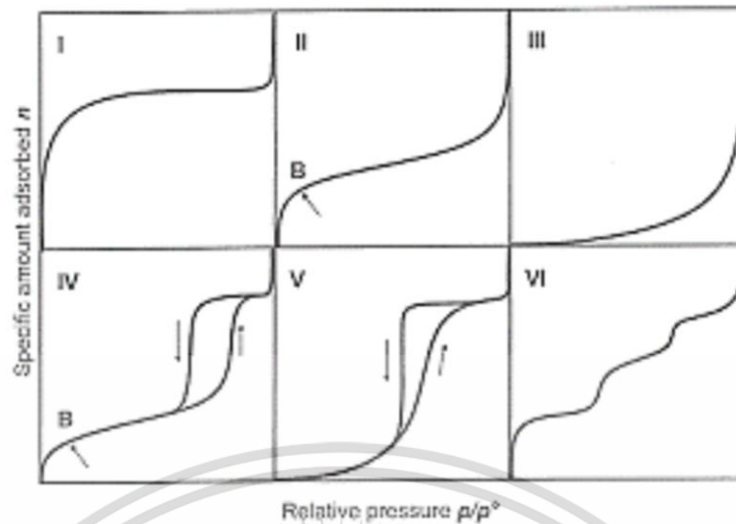
2.6.2.2. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

เกิดจากการสร้างพันธะเคมีขึ้น บนผิวของตัวดูดซับด้วยการให้ และใช้อิเล็กตรอนร่วมกันระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ ความร้อนที่เกิดขึ้นหรืออาจจะต้องใช้ในปฏิกิริยาสูงกว่าการดูดซับทางกายภาพ อีกทั้งยังสามารถเกิดขึ้นได้กับองค์ประกอบ สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ในองค์ประกอบบางชนิดที่อยู่ใต้อุณหภูมิไม่ปกติ ก็ไม่เกิดการดูดซับทางเคมี แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิแล้วก็สามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ โดยที่การดูดซับนั้นจะเกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวเฉพาะในบางตำแหน่งเท่านั้น แตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพที่จะสามารถเกิดได้บนพื้นผิวทั้งหมด การดูดซับแบบนี้ไม่สามารถเกิดได้จากการคายการดูดซับ เพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแบบผันกลับไม่ได้

2.6.2.3. ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

การดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการดูดซับคือ ความดันหรือความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับ ชนิดของสารถูกดูดซับ สารดูดซับ และอุณหภูมิ ทำให้ในขั้นตอนของการดูดซับจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ด้วย หลักๆเลยจะทำกรควบคุมอุณหภูมิให้คงที่อยู่ตลอดเวลา และทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับกับความดันหรือความเข้มข้นของสารละลายที่สถานะสมดุลของการดูดซับโดยที่เส้นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์เรียกว่า ไอโซเทอม (isotherm) ดังภาพที่ ... เป็นการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับแก๊สตามระบบ IUPAC โดยมี 6 ชนิด (Type I ถึง Type VI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอมการดูดซับ

Type I เป็นไอโซเทอมสำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) หรือเรียกว่าแบบแลงเมียร์ (Langmuir) เป็นแบบที่ง่ายที่สุด เป็นปรากฏการณ์การดูดซับของสารที่ไม่มีรูพรุน หรือมีรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากๆ เช่น ถ่านกัมมันต์หรือซีโอไลต์ พบได้จากการดูดซับทางเคมี และการดูดซับทางชีวภาพ ซึ่งการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่ความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) ต่ำๆ และที่ความดันสัมพัทธ์สูงเข้าใกล้ 1 จะมีการดูดซับเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้นเอง

Type II ไอโซเทอมรูปตัวเอส (S-shaped isotherm) จะเกิดขึ้นกับวัสดุที่ไม่มีความพรุน หรือมีรูพรุนขนาดใหญ่ (macro-porous) ที่จุดเปลี่ยนกราฟ (inflection point or knee of isotherm) เป็นตำแหน่งของผิวหน้าที่ถูกคลุมชั้นเดียวแบบเกือบสมบูรณ์แล้ว ซึ่งถ้าความดันเพิ่มขึ้นก็จะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งชั้น จึงเรียกรูปการดูดซับแบบนี้ว่าการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer adsorption)

Type III ไอโซเทอมนี้จะไม่มีการเปลี่ยนกราฟ รูปร่างคล้ายกระจกเงา ไอโซเทอมชนิดนี้พบเห็นไม่มากนัก จะเกิดขึ้นกับการดูดซับไม่แข็งแรง ของแข็งที่มีรูพรุนขนาดเล็ก หรืออาจจะเกิดการดูดซับได้กับของแข็งที่ไม่มีรูพรุน (nonporous solid) ไอโซเทอมนี้เกิดจากแรงดึงดูดระหว่างตัวดูดซับกับตัวถูกดูดซับที่ไม่แข็งแรง ทำให้มีการดูดซับได้น้อยเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวที่ความดันสัมพัทธ์ต่ำ แต่ถ้าเมื่อไหร่มีการดูดซับมากกว่า 1 ชั้นจะเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันเอง ส่งผลให้ดูดซับได้มากขึ้นที่ความดันสัมพัทธ์มีค่าสูงขึ้น

Type IV ไอโซเทอมชนิดนี้จะพบมากที่สุดในวัสดุที่มีรูพรุนส่วนใหญ่ เป็นรูพรุนขนาดกลาง (ขนาดรูพรุน 2-50 นาโนเมตร ในช่วงแรกมีค่าความดันสัมพัทธ์ต่ำ ทำให้เหมือนกับไอโซเทอมชนิดที่ 2 จากนั้นจะเกิดการดูดซับที่รวดเร็วมากขึ้น ค่าความดันสัมพัทธ์สูงขึ้น เนื่องจากเกิดการควบแน่นแคปิลลารี (capillary condensation) ขึ้นในรูพรุนซึ่งทำให้เกิด hysteresis loop ในช่วง desorption ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลของการเกิดควมแน่นในช่วงแคปิลารี ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาการกระจายขนาดของรูพรุน (pore size distribution) ในของแข็งที่มีรูพรุนขนาดกลางได้ การควมแน่นแคปิลารีทำให้ช่วง desorption มีปริมาณดูดซับที่สูงกว่าการเกิดการดูดซับที่ควมดันเท่ากัน

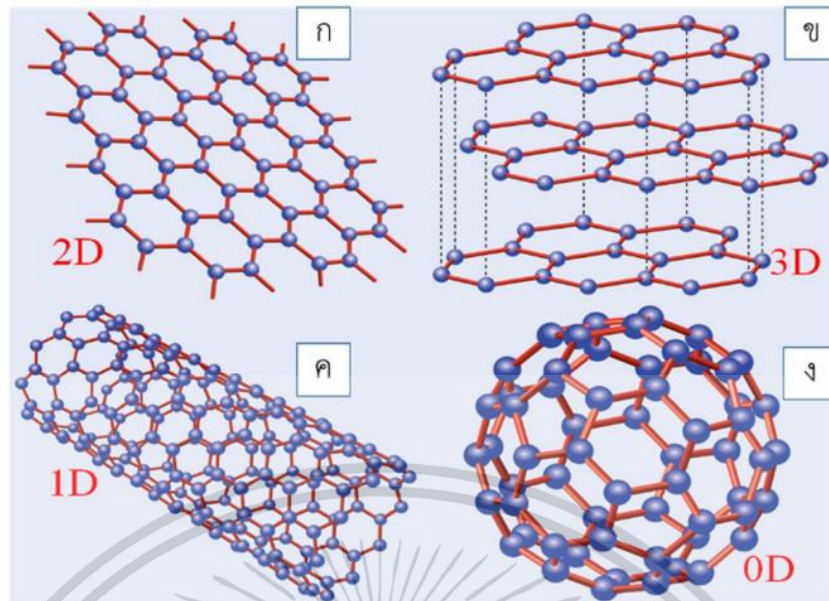
Type V คล้ายกับ ไอโซเทอมชนิด Type IV ต่างกันที่การเกิดการควมแน่นในรูพรุน (มี hysteresis loop) ไอโซเทอมชนิดนี้จะพบไม่บ่อยนัก

Type VI ไอโซเทอมแบบขั้นบันได (stepped isotherm) พบไม่ได้บ่อยนัก แต่ถ้าหากพบ จะพบที่การดูดซับแบบขั้นต่อขั้นบนพื้นที่ผิว ที่ค่อนข้างคล้ายกัน (uniform) แต่รูปร่างของไอโซเทอมจะขึ้นอยู่กับระบบ และอุณหภูมิในการดูดซับ

2.7 กราฟีน

กราฟีนเป็นวัสดุที่ได้รับความสนใจอย่างมากสำหรับนักวิจัย กราฟีนถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 2004 โดย ศ.ดร.อังเดร โกรม (Andre Geim) ศ.ดร. คอนสแตนติน โนโวเซลอ (Konstantin Novoselov) จากมหาวิทยาลัยแมนเชสเตอร์ แห่งราชอาณาจักร เริ่มแรกมีวิธีการสังเคราะห์จากการนำสก็อตเทปทาบลงบนแกรไฟต์แล้วดึงออกให้เห็นถึงชั้นกราฟีนที่ติดอยู่บนสก็อตเทป ผลลัพธ์คือได้กราฟีนที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก ต่อมาได้มีการวิเคราะห์เชิงกล (micromechanical cleavage หรือ scotch tape method) การค้นพบครั้งนี้ส่งผลให้นักวิทยาศาสตร์ทั้งคู่ได้รับรางวัลโนเบลในสาขาฟิสิกส์ปี 2010 [23]

กราฟีนเป็นวัสดุที่มีความบริสุทธิ์สูงมาก เนื่องจากเป็นอะตอมคาร์บอนชั้นเดียวเรียงตัวกันเป็นโครงสร้างรูปหกเหลี่ยมในสองมิติด้วยพันธะโควาเลนต์แบบ sp^2 มีความแข็งแรงมากกว่าเหล็กกล้า 100 เท่า และยืดหยุ่น มีน้ำหนักเบา เชื่อมต่อกันเป็นโครงร่างลักษณะคล้ายกับรวงผึ้ง [24] ดังในรูป 2.7(ก) เนื่องจากกราฟีนมีความหนาเพียงแค่คาร์บอนอะตอมเดียวจึงทำให้กราฟีนมีสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่นเหนือจากคาร์บอนในอัญรูปอื่นๆ คือมีการนำไฟฟ้าที่ดีมาก (10^6 S/cm) พื้นที่ผิวจำเพาะสูงมากในทางทฤษฎีมีค่า $2,600$ m^2/g มีความเสถียรทางเคมีและทางโครงสร้างสูง มีการนำความร้อนดี (5000 W/m.K) มีความโปร่งแสงมาก ทำให้แสงสามารถทะลุผ่านได้ 97.7% โครงสร้างสามารถโค้งงอ ม้วนหรือพับคล้ายเกลียวคลื่น อีกทั้งยังกราฟีนเป็นคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นอัญรูปอื่นๆ ได้ [25] เช่น นำวัสดุกราฟีนมาเรียงต่อกันเป็นชั้นๆ จะได้วัสดุสามมิติขึ้น เรียกว่า กราไฟต์ ดังในรูป 2.7(ข) หากนำมาม้วนเป็นกระบอกจะได้วัสดุหนึ่งมิติเรียกว่าท่อนาโนคาร์บอน (carbon nanotube) ดังในรูป 2.7 (ค) และถ้านำแผ่นกราฟีนมาห่อให้เป็นทรงกลมก็จะได้วัสดุศูนย์มิติ เรียกว่า ฟูลเลอร์ีน (fullerenes) หรือบัคกี้บอล (buckballs) ดังในรูป 2.7 (ง)



รูปที่ 2.7 โครงสร้างคาร์บอนอัญรูปต่างๆ ที่เกิดจากแผ่นกราฟีน (Castro Neto et al.2009) [25]

2.7.1 การสังเคราะห์กราฟีน [26]

2.7.1.1 Mechanical exfoliation

การสังเคราะห์วิธีนี้เรียกอีกอย่างได้ว่า scotch tape method มีขั้นตอนคือนำสก็อตเทปทาบลงบนแกรไฟต์แล้วดึงออก ทำให้ปรากฏชั้นของกราฟีนขึ้น วิธีการของเทคนิคนี้ถือว่ามีควมซับซ้อนน้อยที่สุด เทคนิคนี้เรียกได้ว่าเป็นเทคนิคแรกที่ค้นพบกราฟีน อีกทั้งยังผลลัพธ์ที่ได้ ทำให้ได้กราฟีนที่มีความบริสุทธิ์สูงอีกด้วย

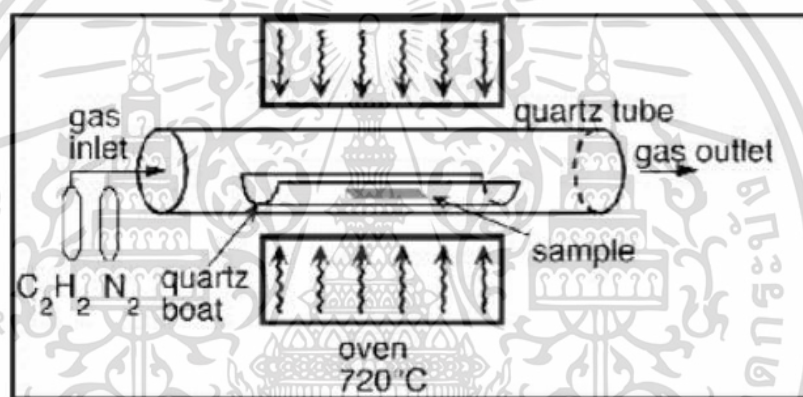


รูปที่ 2.8 การสังเคราะห์ด้วยวิธี Mechanical exfoliation [27]

2.7.1.2 Chemical vapor deposition (CVD)

วิธีการนี้ผลลัพธ์ทำให้ได้กราฟีนที่ค่อนข้างมีคุณภาพมาก รวมถึงปริมาณในการสังเคราะห์แต่ละครั้งก็มากกว่าวิธีแรกด้วย เทคนิคนี้จะอาศัยความร้อนที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสเป็นต้นไป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนทำให้โอเคมีแตกตัวและเคลือบลงบนวัสดุ ภายใต้ความดันบรรยากาศสูง เริ่มต้นกระบวนการด้วยการนำสารเคมีที่มีสมบัติในการระเหยได้มาใช้ เช่นมีเทน (Methane) ส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดการซ้อนทับแล้วลงไปเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับ (Substrate) ส่วนมากจะใช้วัสดุประเภทเซรามิกซ์หรือโลหะ โลหะพวกคอปเปอร์ (Copper) และนิกเกิล (Nikel) แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นการเลือกวัสดุรองรับจะต้องคำนึงถึงส่วนที่กราฟีนจะต้องลงไปเคลือบเกาะติดลงบนพื้นผิวของวัสดุเหล่านั้น ในขั้นตอนดังกล่าวจะใช้ระบบให้ความร้อนแบบท่อที่มีนิกเกิลเป็นส่วนประกอบ หลังจากนั้นจะมีการปล่อยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีความสามารถในการแตกตัวได้ในความร้อนเข้าไปในท่อ จากนั้นอะตอมคาร์บอนจะเกิดการตกลงบนผิวนิกเกิลทำให้เกิดการสร้างแผ่นกราฟีนขึ้น วิธีดังกล่าวจึงเหมาะสมกับการทำแผ่นฟิล์มกราฟีนในการผลิต เพราะผลผลิตในภาคอุตสาหกรรมจะได้รับกราฟีนที่มีคุณภาพและมีปริมาณมากกว่าวิธีแรก แต่ข้อเสียของวิธีนี้คือมีต้นทุนที่สูงมากพอสมควรในการสังเคราะห์แต่ละครั้ง และสารเคมีที่นำมาใช้มีความเป็นอันตรายสูง

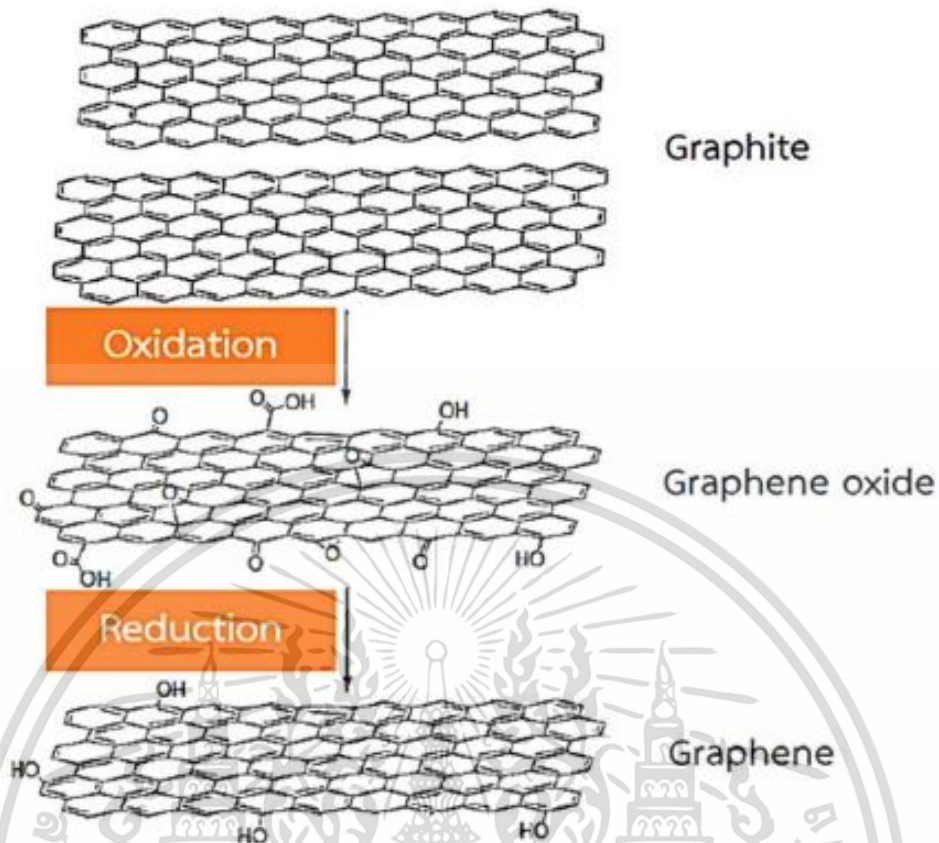


รูปที่ 2.9 แผนภาพการสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธี Chemical vapor deposition (CVD) [28]

2.7.1.3 Chemical exfoliation

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่นิยมอย่างมากในระดับอุตสาหกรรม เหมาะสมที่สุดในการสังเคราะห์กราฟีน เนื่องจากสามารถให้ผลผลิตในจำนวนมาก การสังเคราะห์ส่วนใหญ่จะใช้วิธี Modified Hummer's method [29] เป็นการสังเคราะห์กราฟีนจากกราฟไฟต์ผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชันกับโซเดียมไนเตรต (Sodium nitrate) และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate) ในสภาวะที่เป็นกรดแก่ เช่น กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) ทำให้ได้กราฟไฟต์ออกไซด์ ถัดไปจะนำแกรไฟต์ออกไซด์เข้าสู่ขั้นตอนที่สอง คือการทำอัลตราโซนิก (Ultrasonication) ด้วยคลื่นความถี่สูงเพื่อให้แกรไฟต์ออกไซด์ในแต่ละชั้นหลุดออกมาจากโครงสร้างเพื่อที่จะกลายเป็นแผ่นกราฟีนออกไซด์ จะกระจายตัวอยู่ในเฟสของตัวทำละลายที่เป็นน้ำ และขั้นตอนสุดท้ายคือนำกราฟีนออกไซด์ที่ได้จากขั้นตอนที่สองมารีดิวซ์ด้วยไฮดราซีน (Hydrazine) เพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันบนแผ่นกราฟีนออกไซด์ที่กระจายตัวอยู่ในน้ำ ในขั้นสุดท้ายทำให้ได้วัสดุรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธี Chemical exfoliation [30]

2.7.2 คุณสมบัติของกราฟีนออกไซด์ [26]

2.7.2.1 การขนส่งอิเล็กตรอน

กราฟีนมีโครงสร้างสองมิติเป็นอะตอมคาร์บอนเรียงต่อกันในลักษณะรังผึ้ง กราฟีนเลเยอร์ถูกจัดเป็นวัสดุกึ่งโลหะ (semi-metal) มีความสามารถในการขนส่งอิเล็กตรอน อีกทั้งยังสามารถเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนมากกว่า $15,000 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ส่วนอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่บนแผ่นกราฟีนแบบเป็นเส้นตรงคล้ายลูกกระสุนเรียกว่า Ballistic transport แทบจะไม่มีมวลเลยเรียกว่า massless relativistic particle อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่บนแผ่นกราฟีนมีความสามารถในการทะลุทะลวงชั้นที่มาขวางได้ดี โดยที่ไม่มีการสูญเสียโมเมนตัมและความคล่องตัวสูงมาก เรียกว่า Klein effect

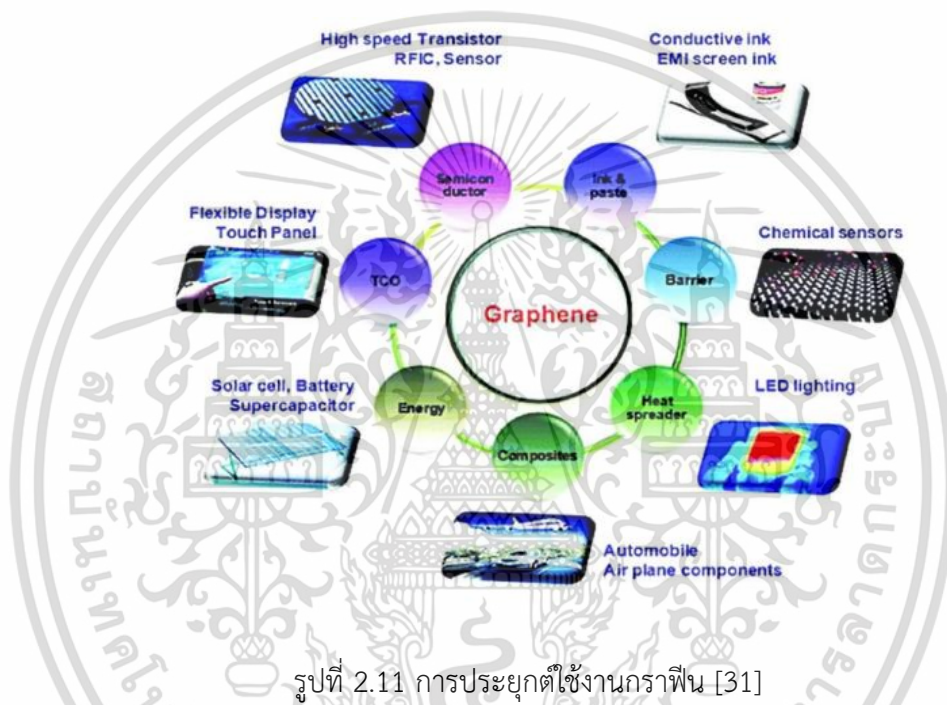
2.7.2.2 สมบัติเชิงกล

ความแข็งแรงของกราฟีนมีมากกว่าเหล็กกล้าที่มีความหนาเท่ากันถึง 100 เท่า โดยที่ค่าความทนแรงดึงนั้นมีมากกว่า 1 TPa แต่คุณสมบัติเชิงกลของกราฟีนจะแปรผันตามประสิทธิภาพการสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 การประยุกต์ใช้งาน

กราฟีนมีความโดดเด่นหลายอย่างมาก จึงส่งผลให้มีการนำวัสดุกราฟีนไปประยุกต์ใช้ในหลายๆ ด้าน อาจจะเป็นการผลิตตัวกรองจากกราฟีน ตัวกราฟีนสามารถกรองเกลือออกจากน้ำได้เป็นอย่างดี เรียกว่ามีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีอื่น อีกทั้งตัวกราฟีนยังมีการนำไฟฟ้าที่สูง มีความโปร่งใสทางแสง สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับขั้วไฟฟ้าโปร่งใสเพื่อที่จะนำไปพัฒนาใช้กับหน้าจอสัมผัส หรือจะนำไปทำเป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวดก็ได้ หรือนำกราฟีนไปเคลือบวัสดุบนพื้นผิวเพื่อช่วยเพิ่มสมบัติไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ก็เป็นทางเลือกที่ดีที่จะนำกราฟีนไปประยุกต์ใช้



รูปที่ 2.11 การประยุกต์ใช้งานกราฟีน [31]

2.8 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

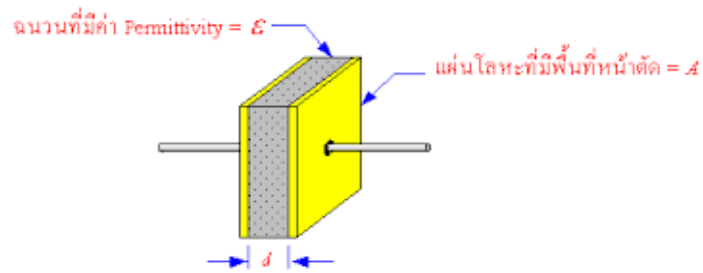
ตัวเก็บประจุไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดไดอิเล็กทริก (Dielectric capacitor) และตัวเก็บประจุยิ่งยวดความจุสูง (Supercapacitor)

2.8.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดไดอิเล็กทริก (Dielectric capacitor)

ตัวเก็บประจุชนิดนี้อาศัยสารไดอิเล็กทริกในการกักเก็บประจุไฟฟ้า มีส่วนประกอบดังนี้ คือ แผ่นอิเล็กโทรดนำไฟฟ้า 2 แผ่น และคั่นกลางด้วยสารไดอิเล็กทริก ซึ่งตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าการเก็บประจุไฟฟ้า (C) ของตัวเก็บประจุชนิดไดอิเล็กทริกคือพื้นที่ของอิเล็กโทรด (A) ระยะห่างระหว่างขั้ว (d) ค่าเพอร์มิตติวิตีของสารไดอิเล็กทริก (ϵ) ดังสมการ (11)

$$C = \frac{A \times \epsilon}{d} \text{----- (11)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

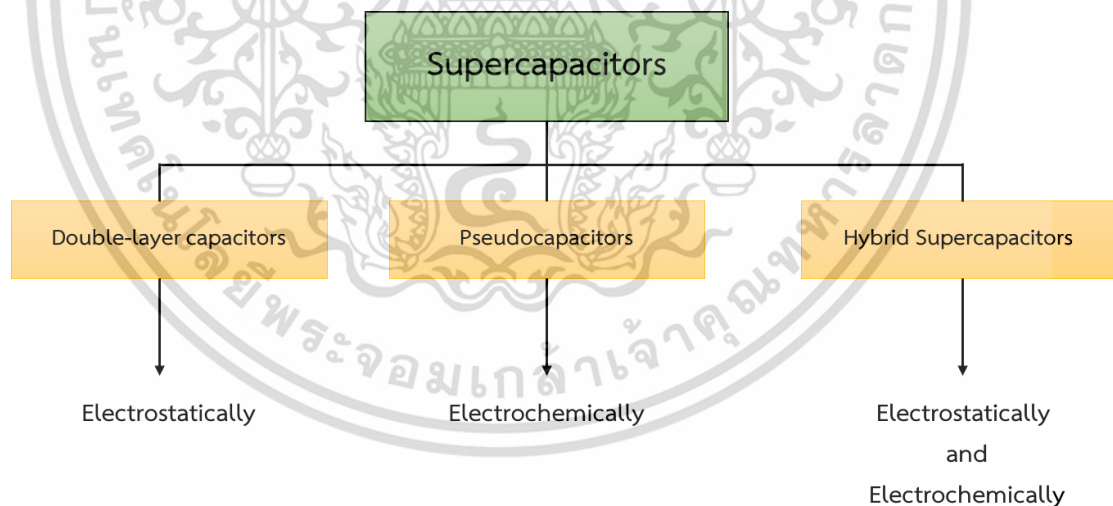


รูปที่ 2.12 แผนภาพจำลองลักษณะตัวเก็บประจุยิ่งยวดชนิดไดอิเล็กทริก

2.8.2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดความจุสูง (Supercapacitor)

ตัวเก็บประจุยิ่งยวด หรือ ตัวเก็บประจุด้วยไฟฟ้า 2 ชั้น มีความสามารถกักเก็บพลังงานได้มากกว่า 10 -100 เท่า ถ้านำไปเปรียบเทียบกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าทั่วไป ใช้ระยะเวลาในการชาร์จอย่างรวดเร็ว (Fast charge) รอบการชาร์จ และการคายประจุมากกว่าแบตเตอรี่แบบชาร์จไฟได้ เพราะว่าตัวซูเปอร์คาปาซิเตอร์ไม่มีปฏิกิริยาเคมีเข้ามาเกี่ยวข้อง สำหรับสิ่งที่กล่าวมาข้างต้นนี้ได้รับการพัฒนา มาโดยตลอดจนยุคปัจจุบันเพื่อประโยชน์ทางอุตสาหกรรม ในด้านอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ความจุของตัวซูเปอร์คาปาซิเตอร์ นี้วัดได้ในหน่วยฟารัด (Farad's : F) ข้อได้เปรียบหลักของตัวเก็บประจุยิ่งยวดนี้คือประสิทธิภาพและความจุในการจัดเก็บพลังงานสูง

2.8.2.1 ประเภทของตัวเก็บประจุยิ่งยวดความจุสูง

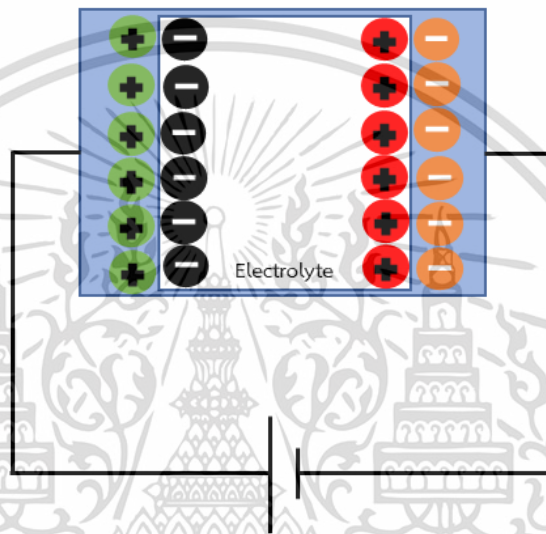


รูปที่ 2.13 แสดงประเภทของตัวเก็บประจุความจุสูง แบ่งตามปฏิกิริยาในการอัดประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2.1.1 Double-layer capacitors

ตัวเก็บประจุชนิดนี้ใช้หลักการอัดประจุด้วยกระบวนการไฟฟ้าสถิต (Electrostatically) นั่นก็คือ ศักย์ภายนอกดึงดูดไอออนบวกในอิเล็กโทรไลต์ให้เคลื่อนที่มาเกาะบนผิวของอิเล็กโทรดที่ต่อเข้ากับขั้วลบของแบตเตอรี่ และไอออนลบในอิเล็กโทรไลต์เคลื่อนที่มาเกาะบนผิวของอิเล็กโทรดที่ต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ ดังแสดงในรูปที่ 2.11 วัสดุที่เหมาะสมที่จะเป็น Double-layer capacitors คือควรมีพื้นที่สัมผัสมาก และนำไฟฟ้าได้ดี เช่น คาร์บอน ท่อนาโนคาร์บอน แกรฟีน เป็นต้น ซึ่งการที่มีพื้นที่มากจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความจุไฟฟ้า เนื่องจากประจุไฟฟ้าสะสมมากขึ้น ดังแสดงในภาพรูปที่ 2.113



รูปที่ 2.14 แผนภาพจำลองการอัดประจุแบบ Double-layer capacitors

2.8.2.1.2 Pseudocapacitors

ใช้หลักการอัดประจุด้วยการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี (Electrochemically) การอัดประจุแบบนี้จะแสดงให้เห็นว่าไอออนเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox) กับวัสดุเก็บประจุเกิดเป็นสารใหม่ วัสดุที่เหมาะสมสำหรับเป็น Pseudocapacitors ได้แก่ Polyaniline ,Iron oxide (Fe_3O_4), Manganese oxide (MnO_x) และ Nickel oxide (NiO) รูปที่ 2.114

ตัวอย่างปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการอัดประจุของฟิล์มแมงกานีสออกไซด์ที่ต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่

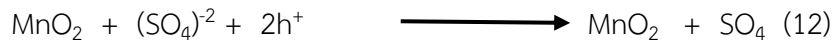
เป็นดังสมการ (11)



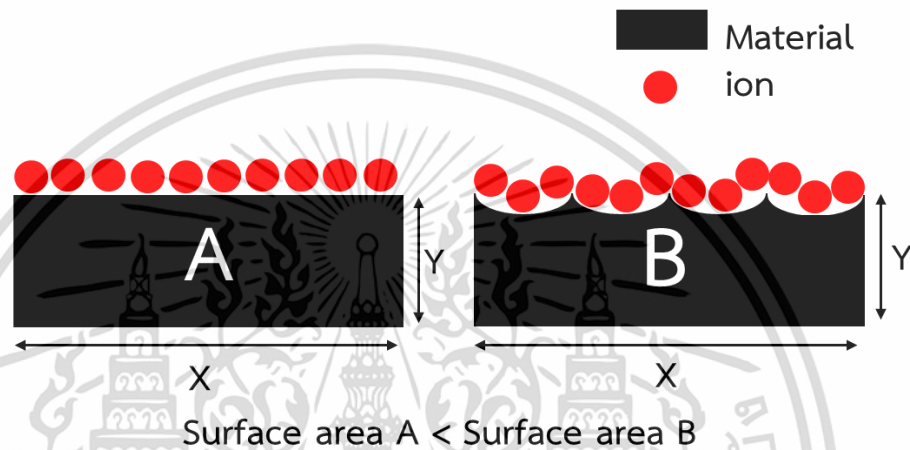
ตัวอย่างปฏิกิริยาที่เกิดในกระบวนการอัดประจุของฟิล์มแมงกานีสออกไซด์ที่ต่อกับขั้วบวกของแบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

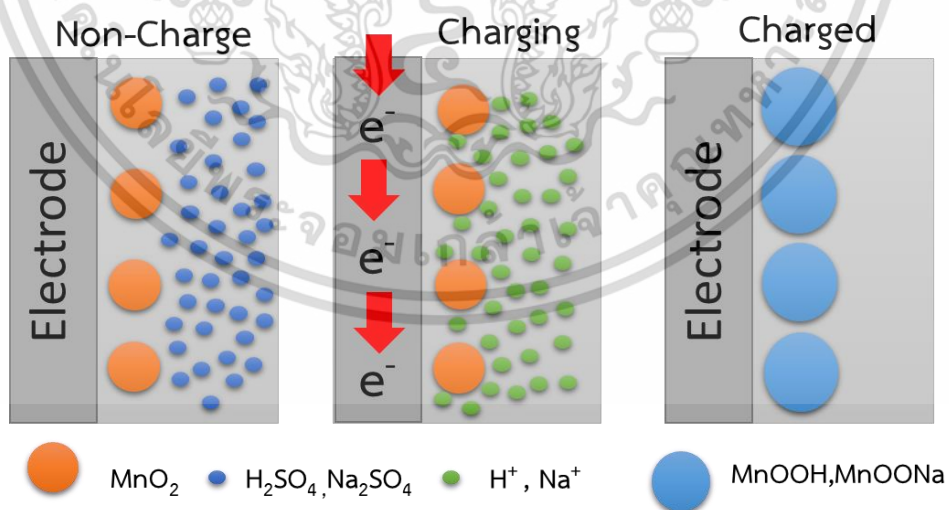
เป็นดังสมการ (12)



ซึ่งสมการ (11) มีผลที่จะทำให้แมงกานีสมีเลขออกซิเดชันเปลี่ยนไปจาก +4 ลดลงเป็นเลขออกซิเดชัน +3 สำหรับสมการ (12) พบว่าแมงกานีสไม่เปลี่ยนเลขออกซิเดชันเลยเนื่องจากที่ขั้วบวกไม่เกิดพันธะระหว่าง MnO_2 กับ SO_4 ดังนั้นคุณสมบัติที่ดีของวัสดุแบบ Pseudocapacitors คือสามารถเปลี่ยนค่าเลขออกซิเดชันได้หลายสถานะ



รูปที่ 2.15 แสดงภาพจำลองการสะสมประจุไฟฟ้าของวัสดุที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสเรียบและผิวสัมผัสขรุขระ



รูปที่ 2.16 แสดงภาพจำลองการอัดประจุแบบ Pseudocapacitors

2.8.2.1.3 Hybrid Supercapacitors

จะใช้หลักการ Electrostatically และ Electrochemically มารวมกัน ในการอัดประจุแบบ

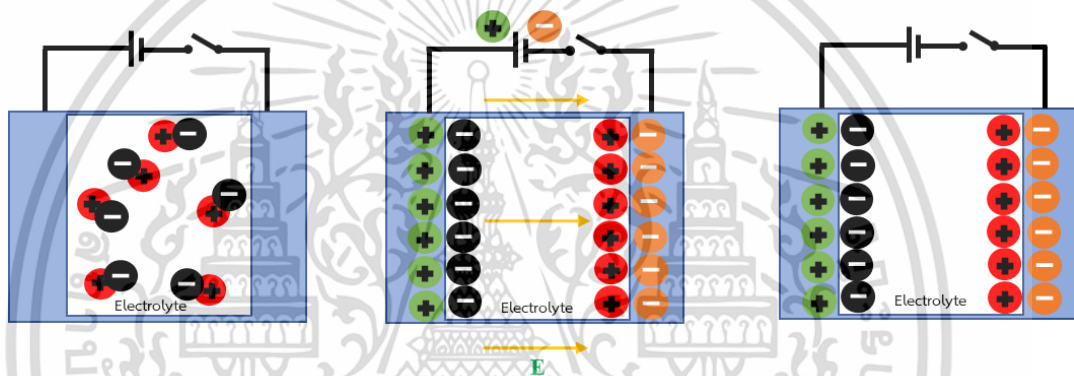
Hybrid Supercapacitors จะให้ค่าการเก็บประจุที่สูงกว่าตัวเก็บประจุแบบ Double-layer เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาไปเผยแพร่เนื้อหาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

capacitor และ Pseudocapacitor ตัวอย่างของวัสดุ Hybrid Supercapacitors คือ CNT/Fe₃O₄ และ CNTs/MnO₂ เป็นต้น

2.9 เทคนิคการอัด และการคายประจุ (Charge – Discharge)

2.9.1 การอัดประจุ (Charge)

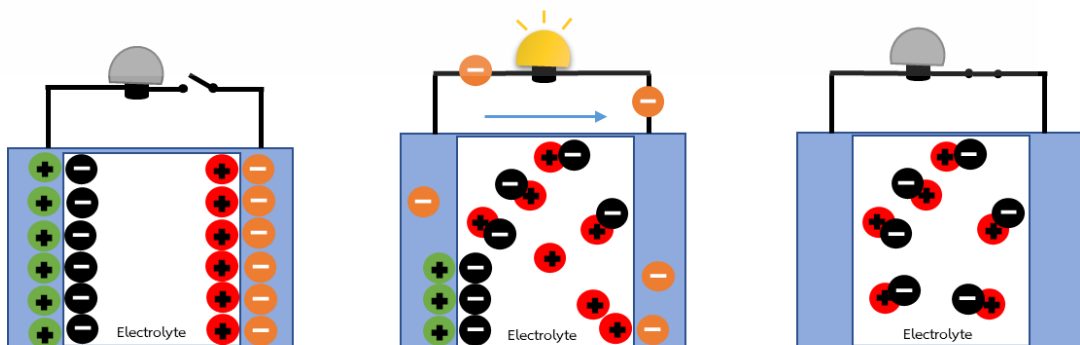
การอัดประจุ คือ การต่อแบตเตอรี่เข้ากับตัวเก็บประจุไฟฟ้า เพื่อส่งต่อประจุให้แก่แผ่นอิเล็กโทรดทั้งสอง จากนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าขึ้นภายในตัวเก็บประจุ ทำให้เกิดการดึงดูดไอออนบวกและไอออนลบในสารอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ให้มาสะสมอยู่บนพื้นผิว โดยที่ขั้วบวก จะทำการดึงไอออนลบจากสารอิเล็กโทรไลต์มาสะสมที่พื้นผิวและทำปฏิกิริยาเคมีกับฟิล์ม ส่วนขั้วลบจะทำการดึงไอออนบวกจากสารอิเล็กโทรไลต์มาสะสมที่พื้นผิวและทำปฏิกิริยาเคมีกับฟิล์ม และเมื่อเอาแบตเตอรี่ออกประจุก็จะยังสะสมอยู่บนแผ่นอิเล็กโทรดพร้อมที่จะนำไปใช้งานได้



รูปที่ 2.17 แผนภาพจำลองแสดงกระบวนการอัดประจุ (Charge)

2.9.2 การคายประจุ (Discharge)

การคายประจุ คือ การนำตัวเก็บประจุที่มีประจุสะสมอยู่ มาต่อเข้ากับตัวต้านทานหรือหลอดไฟ จะทำให้ประจุลบที่สะสมอยู่บนพื้นผิวของแผ่นอิเล็กโทรด จะแยกออกจากไอออนบวกของอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กตรอนจะทำการวิ่งจากแผ่นที่มีประจุลบสะสมผ่านตัวต้านทาน ไปยังแผ่นที่มีประจุบวกสะสมอยู่ และรวมกันเป็นกลาง ส่งผลให้ไอออนบวกและไอออนลบที่สะสมอยู่ที่ผิวอิเล็กโทรดแยกตัวกลับเข้าสู่อิเล็กโทรไลต์ตามเดิมจนหมด



รูปที่ 2.18 แผนภาพจำลองแสดงกระบวนการคายประจุ (Discharge)

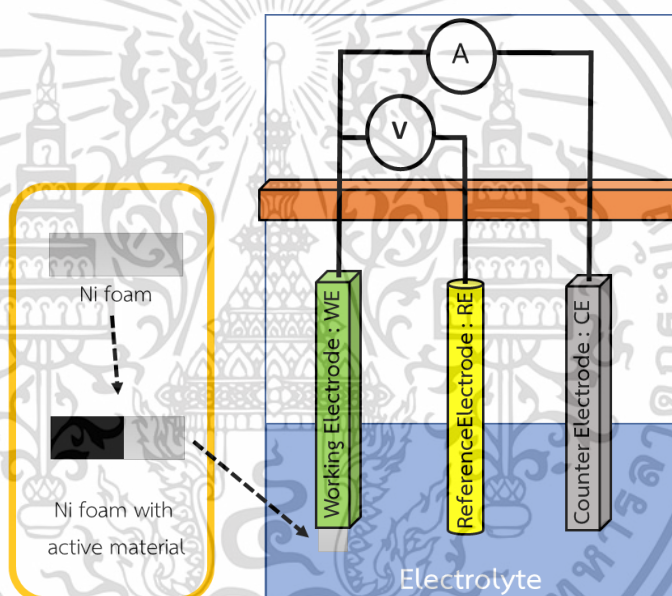
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 สมบัติเคมีเชิงไฟฟ้า

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

2.10.1 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry : CV) [32]

เทคนิคนี้ใช้ศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยให้ความต่างศักย์จากภายนอกเข้าสู่ภายในเซลล์ ซึ่งในเซลล์ประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้า(electrode) และ อิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) เพื่อที่จะวัดกระแสที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยา สำหรับข้อมูลที่จะได้จากการใช้เทคนิคนี้ เกิดจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน และรีดักชันของสารเคมีที่จะนำมาศึกษา สำหรับการศึกษา นั้นจะศึกษาบนขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode : WE)



รูปที่ 2.19 ส่วนประกอบเซลล์เคมีไฟฟ้า

เซลล์เคมีไฟฟ้าประกอบด้วย

1. ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode : WE)

ใช้ในการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของวัสดุที่อยู่บนขั้ว ทำมาจากวัสดุที่นำไฟฟ้าได้ มีความเสถียรสูง

2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode : RE)

ทำหน้าที่อ้างอิงศักย์ไฟฟ้าของระบบ เป็นตัวควบคุมความต่างศักย์ของระบบและควบคุมความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง มีความต่างศักย์ที่แน่นอนไม่แปรผันหรือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

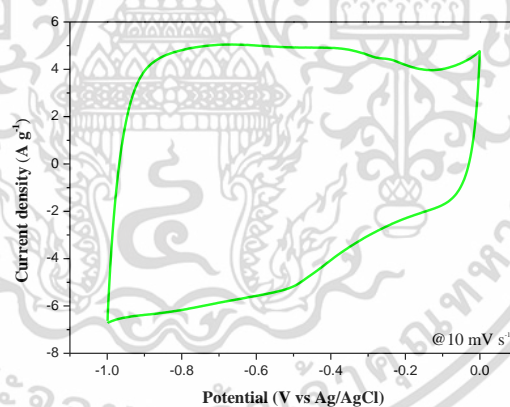
3. เคาเตอร์อิเล็กโทรด (Counter Electrode : CE)

ต้องเป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับขั้วไฟฟ้าทำงานเพื่อส่ง และรับอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้าทำงาน ดังนั้นการวัดกระแสของระบบทดสอบจะวัดกระแสที่เกิดขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานและเคาเตอร์อิเล็กโทรด

4. อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

สารละลายที่เป็นตัวนำไอออนระหว่างเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน สำหรับคุณสมบัติของอิเล็กโทรไลต์ที่ดี คือ มีความต้านทานต่ำ แตกตัวให้ออออนได้ดี มีความหนาแน่นของไอออนสูง มีความเสถียรทางเคมีสูง

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้า (แกน x) กับความหนาแน่นของกระแสที่เกิดบนขั้วไฟฟ้าทำงาน (แกน y) ความหนาแน่นของกระแสคือความต่างศักย์ไฟฟ้าขั้วไฟฟ้าทำงาน และขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และความหนาแน่น สำหรับการวัดจะต้องกำหนดอัตราการเพิ่มความต่างศักย์ไฟฟ้าต่อเวลา (scan rate)



รูปที่ 2.20 กราฟ CV ของสาร RGO ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KOH 3 M ที่อัตราการสแกน 10 mV/s

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)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m = active material เคลือบบนนิกเกิลโพลิม (g)

V = อัตราการแสกน (Volt/s)

ΔV = ความต่างศักย์ไฟฟ้า (Volt)

2.10.2 เทคนิคกัลวานอสแตติกชาร์จ-ดิสชาร์จ (Galvanostatic charge/ discharge : GCD)

สำหรับเทคนิคนี้ นิยมวัดค่า C_{sc} จากข้อมูลการทำงาน ใช้ศึกษาความเสถียรของขั้วไฟฟ้าทำงานโดยการอัดและคายประจุ หลายๆรอบ (มากกว่า 1000 รอบ) เทคนิคและหลักการ คือ ให้กระแสคงที่ไหลเข้าระบบและออกจากระบบและวัดค่าความต่างศักย์เทียบกับเวลา กราฟแสดงความสัมพันธ์เวลา (แกน x) กับความต่างศักย์ (แกน y)

การคำนวณค่า C_{sc} จากสมการ

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

เมื่อ Q คือค่าประจุไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ

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

จะได้

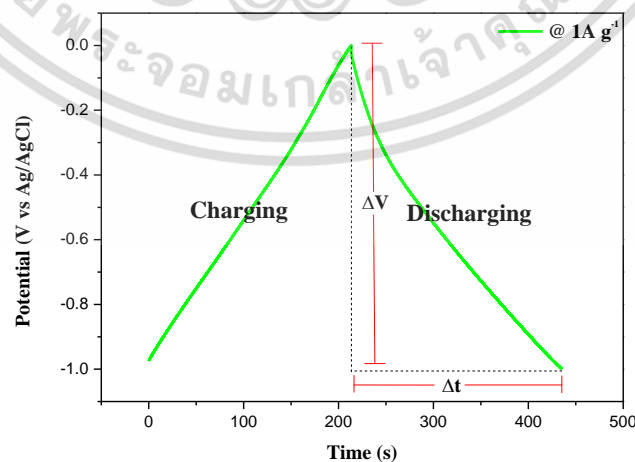
$$C_{sc} = \frac{i(\Delta t)}{V}$$

กรณีคายประจุไฟฟ้า

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

i = กระแสไฟฟ้าคงที่ ที่ออกจากระบบ (Amp)

Δt = ช่วงเวลาของการคายประจุไฟฟ้า (s)



รูปที่ 2.21 กราฟ GCD ของสาร RGO ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KOH 3 M ที่ความหนาแน่น

กระแสไฟฟ้า 1 A/g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11 เครื่องมือสำหรับวิเคราะห์

2.11.1 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction : XRD)

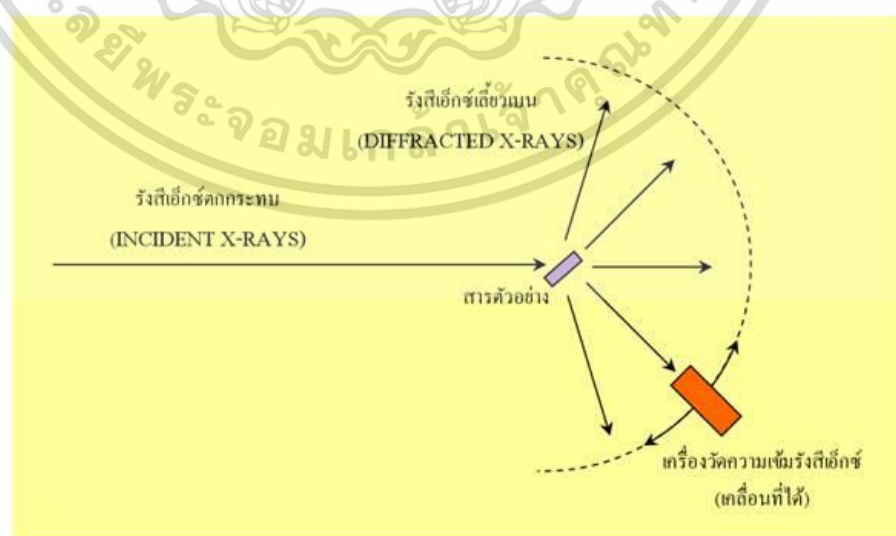
เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์โครงสร้างของวัสดุโดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [33] สามารถวิเคราะห์สารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่าง ขนาดของสารตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีมุมิตเซลล์ที่ต่างกัน ส่งผลให้ภาพของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แผ่ออกมานั้นมีไม่เท่ากัน ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ได้ ทำให้รู้ถึงสารประกอบทั่วไปภายในสารตัวอย่างได้ จะศึกษาโดยใช้กฎของแบรกก์ (Bragg's law) มีสมการดังนี้

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

โดยที่ n คือ เลขจำนวนเต็ม θ คือ มุมตกกระทบ d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ hkl

λ คือ ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ที่ใช้ในวิเคราะห์

เทคนิคของเครื่องนี้คือ ใช้หลักการของการยิงรังสีเอกซ์ไปกระทบที่ตัวอย่าง ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนสะท้อนออกมาที่มุมต่างๆ ส่งมาที่ตัวรับข้อมูลคือหัววัดสัญญาณ (Detector) ซึ่งสารแต่ละตัวจะมีองค์ประกอบและโครงสร้างที่มุมการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับรูปร่างขนาด องค์ประกอบภาพร่าง ลักษณะผลึก จึงเป็นตัวยืนยันว่าสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างสามารถนำมาวิเคราะห์ ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างได้ และการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ก็สามารถเกิดขึ้นได้หลายอย่างอาจจะเป็นการตกกระทบที่ผิวของผลึก การกระจายและทะลุผ่านชั้นของคริสตัล ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการแบรกก์เพื่อหาระยะห่างระหว่างระนาบได้



รูปที่ 2.22 หลักการทำงาน XRD [27]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.11.2 เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ (Raman Spectrometer)

การวิเคราะห์โดยรามานอาศัยหลักการกระเจิงของแสงที่เกิดจากอนุภาคแสงเข้าชนโมเลกุลของสาร เช่นการให้แสงเลเซอร์ความยาวคลื่นหนึ่งผ่านสารที่เป็นของเหลวที่โปร่งแสง จะมียอนุภาคจำนวนหนึ่งที่ทะลุผ่านไป แต่บางส่วนที่เหลืออยู่จะชนเข้ากับโมเลกุลสาร และเปลี่ยนทิศทางการชนกัน โดยส่วนมากพลังงานของแสงที่เกิดหลังการชนจะไม่เปลี่ยนแปลงเป็นการชนแบบยืดหยุ่น (Rayleigh scattering) แต่ก็จะมีอนุภาคแสงส่วนน้อยที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนพลังงานกับโมเลกุลของสาร แสงอาจจะเกิดความถี่ที่มากขึ้นหรือน้อยลงหลังจากนั้นเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานไป ซึ่งพลังงานหลังจากเกิดการชนเรียกว่า Raman scattering แต่ถ้าอนุภาคของแสงเข้าชนโมเลกุลในสถานะความถี่หลังชน เรียกว่า Stokes Raman scattering แต่ถ้าอนุภาคแสงชนโมเลกุลในสถานะกระตุ้น ความถี่หลังการชนจะเพิ่มขึ้น ในที่นี้ความถี่ทั้งหมดสามารถเปลี่ยนได้ขึ้นอยู่กับสารแต่ละชนิด มีความสามารถเปลี่ยนความถี่ของแสงได้ ค่า ν และ Anti-stokes Raman scattering แตกต่างกัน ความเข้มของแสงที่กระเจิงออกมาก็มีค่าต่างกันด้วย ดังนั้นจึงนิยมใช้วิธีรามานศึกษาโครงสร้างของสารได้



รูปที่ 2.23 เครื่องรามานสเปกโทรมิเตอร์ (Raman Spectrometer) ที่มา : mahidol.ac.th

2.11.3 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR)

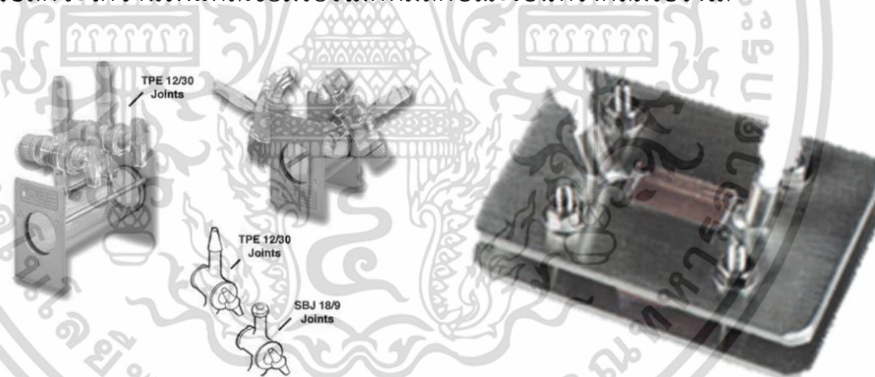
เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี นิยมที่จะนำมาวิเคราะห์ตรวจสอบโมเลกุลของสารโดยอาศัยหลักการการสั่น (Vibration) ของโมเลกุล โดยจะทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น 12800 ถึง 10 cm^{-1} จำแนกออกได้เป็น 3 ช่วงความถี่คือ 1. ย่านอินฟราเรดใกล้ Near IR ($4,000\text{--}12,800\text{ cm}^{-1}$) 2. ย่านอินฟราเรดกลาง Mid IR ($200\text{--}4,000\text{ cm}^{-1}$) และ 3. ย่านอินฟราเรดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไกล Far IR ($10\text{-}200\text{ cm}^{-1}$) เมื่อสารอินทรีย์ดูดกลืนรังสีย่านอินฟราเรดกลาง หรือเรียกว่าความถี่ ทำให้เกิดการทรานซิชันการสั่นพร้อมกันทรานซิชันการหมุนเรียกเทคนิคนี้ว่า อินฟราเรดสเปกโตรสโคปี ทรานซิชันชนิดนี้สามารถบอก หรือระบุชนิดของหมู่ทำหน้าที่ เช่น พันธะคู่ พันธะสาม หมู่คาร์บอนิล หมู่ไฮดรอกซิล หมู่อะมิโน หรือภายในโครงสร้างของสาร

ส่วนประกอบหลักของเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี

1. แหล่งกำเนิดแสง ทำหน้าที่ให้รังสีอินฟราเรด โดยมีวัสดุจากใยเนิร์นสต์ (Optic nerve) ทำมาจากออกไซด์ของโครเนียม (ZrO_2) ทอเรียม (ThO_2) และซีเรียม (CeO_2)

2. เซลล์ตัวอย่าง ตัวอย่างบางชนิดที่จะนำมาศึกษาต้องบรรจุลงในเซลล์ตัวอย่างที่ทำมาจากเกลือของแฮไลด์ เช่น ซิลเวอร์คลอไรด์ มีลักษณะโปร่งใส ไม่ดูดกลืนรังสีอินฟราเรดช่วงเดียวกันกับเซลล์ตัวอย่างที่นำมาทดลอง ตัวอย่างที่มีสถานะแก๊สจะถูกบรรจุในเซลล์ที่มีระบบสุญญากาศ ทำให้รังสีอินฟราเรดผ่านหน้าต่างโซเดียมคลอไรด์ สำหรับตัวอย่างของเหลวจะมีเซลล์บรรจุตัวอย่างเป็นแบบจานซึ่งจานหรือหน้าต่างสำหรับวิเคราะห์นิยามทำจากโซเดียมคลอไรด์ แต่ถ้าหากตัวอย่างเป็นของแข็งสามารถทำได้ 2 กรณีคือ ใช้ตัวทำละลายทำให้ละลายแล้วนำไปทดสอบในวิธีเดียวกันกับของเหลว แต่ถ้าหากละลายไม่ได้สามารถทำได้อีกวิธีคือบดตัวอย่างเข้ากับโพแทสเซียมโบรไมด์แล้วนำไปวางบนเครื่องอัดไฮดรอลิกจะได้จานโพแทสเซียมโบรไมด์ที่มีลักษณะเป็นทรงกลมโปร่งใส



รูปที่ 2.24 เซลล์บรรจุตัวอย่างสถานะแก๊สและสถานะของเหลว (ที่มา : Shimazu Crop,2023)

3. เครื่องตรวจหา ทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวอย่างเป็นสัญญาณไฟฟ้า มีหลายชนิดโดยชนิดที่นิยมใช้กับเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์คือแบบฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Fourier Transform Infrared Spectrometer : FTIR) มีข้อดีคือตอบสนองสัญญาณไวกว่าเครื่องตรวจหาชนิดเทอร์โมคัปเปิล

4. เครื่องบันทึก ทำหน้าที่บันทึกสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องตรวจหา การวิเคราะห์หมู่หน้าที่ของสารอินทรีย์ด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์จะเป็นโหมดการดูดกลืนมากกว่าการสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 1,000-8,000 องศาเซลเซียสกับแหล่งกำเนิดรังสีแล้วรังสีที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะผ่านไปยังเซลล์ตัวอย่าง ทำให้ดูคลื่นรังสีตรงกับความถี่การสั่นหลักมูลของพันธะ ซึ่งความเข้มข้นของสัญญาณจะวิเคราะห์ด้วยเครื่องตรวจหาได้เป็นคลื่น หลังจากผ่านการประมวลผลโดยการแปลงฟูเรียร์จะเปลี่ยนเป็น spectrum ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและความถี่ การวิเคราะห์สารตัวอย่างด้วยเทคนิค FT-IR สามารถใช้ได้กับตัวอย่างที่มีสถานะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้แม้ตัวอย่างจะมีปริมาณน้อย สามารถสแกนตัวอย่างได้อย่างชัดเจนรวดเร็ว ได้สเปกตรัมที่มีการแยกชัดไม่มีพื้นหลัง ศึกษาได้ทั้งการสะท้อนหรือการดูดกลืน อีกทั้งในการเตรียมตัวอย่างไม่มีความซับซ้อน วิเคราะห์ตัวอย่างโดยที่ตัวอย่างไม่ถูกทำลาย (Non-destructive) เพราะว่าแสงที่ใช้อยู่ในย่านพลังงานที่ค่อนข้างต่ำเกินที่จะทำลายพันธะเคมีได้

2.11.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นเทคนิคที่พัฒนาประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุของกล้องจุลทรรศน์ เพื่อที่จะสามารถมองรายละเอียดของภาพให้ชัดเจนมากขึ้นกว่าเดิม จึงจำเป็นอย่างมากที่จะต้องใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงจากความยาวคลื่นสั้น เพื่อที่จะเป็นตัวช่วยวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัตถุได้ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะต้องมีกำลังขยายมากกว่า 3000 – 1,000,000 เท่า อีกทั้งยังต้องสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพในระดับ 1-100 นาโนเมตร เพื่อที่จะแสดงถึงความละเอียดมากขึ้นกว่าเดิม เพราะอิเล็กตรอนมีค่าความยาวคลื่นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสง โดยการใช้เลนส์สนามไฟฟ้ามาแทนเลนส์กระจก จะได้นำมาเป็นตัวบังคับทิศทางของอิเล็กตรอน แล้วจะมีตัวตรวจวัดที่นำมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากตัวอย่างหลายระดับพลังงานแบ่งได้เป็น

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) อิเล็กตรอนชนิดนี้ใช้ในการสร้างภาพบริเวณพื้นผิวของสารตัวอย่าง สำหรับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด อิเล็กตรอนทุติยภูมิเป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากชั้นแถบการนำ (Conduction band) หรือแถบพลังงานเวเลนซ์ (Valence band) ทำให้ไม่ต้องใช้พลังงานสูงมากก็สามารถหลุดออกจากผิวตัวอย่างได้ง่าย มักจะถูกเรียกว่าอิเล็กตรอนอิสระ มีพลังงานในช่วง 10 – 50 อิเล็กตรอนโวลต์

อิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (Back scattered electron) เป็นอิเล็กตรอนที่ถูกอิเล็กตรอนปฐมภูมิวิ่งเข้าชนกับตัวอย่าง ทำให้สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในตัวอย่างเพียงบางส่วน และมีการกระเจิงกลับออกจากตัวอย่างไป พลังงานของอิเล็กตรอนชนิดนี้จะมีค่าตั้งแต่อิเล็กตรอนปฐมภูมิ ไปจนถึงพลังงานอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ค่าพลังงานที่กระเจิงกลับจะขึ้นอยู่กับเลขมวลอะตอมของธาตุที่เป็นองค์ประกอบหลักในตัวอย่าง สามารถสร้างภาพแสดงความแตกต่างของธาตุในแบบความเข้มและสว่างของภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละบริเวณในการวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.25 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ที่มา : jeol.com,2023)

2.12.5 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (Surface Area and Pore Size Analyzer)

เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์พื้นผิว ขนาดการกระจาย และปริมาตรของรูพรุนแบบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 2-50 นาโนเมตร (Mesopore) และแบบที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 2 นาโนเมตร (Micropore) หลักการทำงานของเครื่องนี้จะใช้การดูดซับหรือคายก๊าซเพื่อที่จะวิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน ของพื้นที่ผิวของสารตัวอย่าง อาศัยหลักการของ Volumetric Gas Adsorption Method เช่น N_2 , Ar_2 , CO_2 , H_2 และก๊าซไม่ก่ดกร่อนอื่นๆ ในการวิเคราะห์สามารถวิเคราะห์พร้อมกันได้ไม่เกิน 3 ตัวอย่าง และเป็นอิสระจากกัน ส่งผลให้การวิเคราะห์มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ซึ่งมีการใช้วิธีวิเคราะห์แบบ AFMS จะส่งผลช่วยให้มีความแม่นยำในการวิเคราะห์สูง สามารถทำการวิเคราะห์ข้อมูลซ้ำได้ ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิจัย และการควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรม ในการวิเคราะห์พื้นที่ผิวของสารตัวอย่างแบบผง เช่น อลูมินา ซิลิกา ซีเรีย ถ่านกัมมันต์ ถั่วแกลบ แต่ถ้าเป็นมีลักษณะเป็นชิ้น เช่น ซีโอไลท์ และชิ้นส่วนของแบตเตอรี่ เป็นต้น

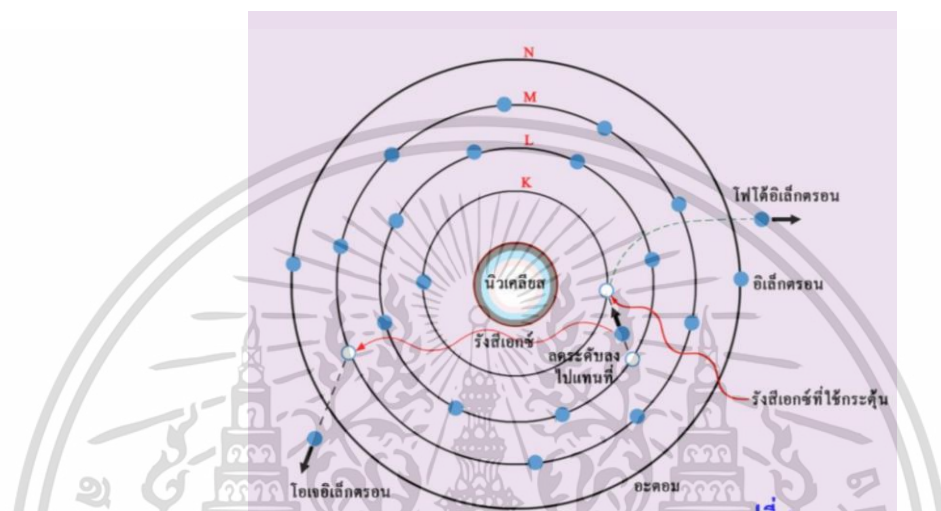


รูปที่ 2.26 เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวและรูพรุน (ที่มา : ciqtek.com,2023)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

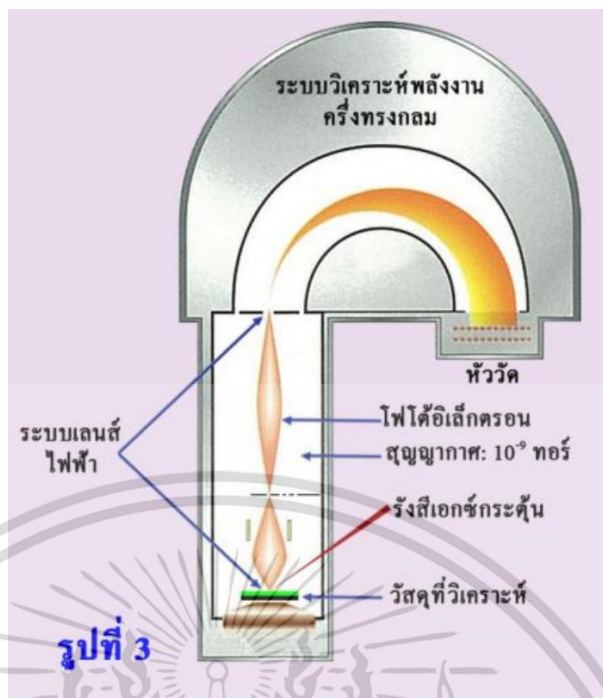
2.11.6 เครื่องมือวิเคราะห์วัสดุนาโนโดยเทคนิคสเปกโทรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy : XPS)

XPS เป็นตัวย่อของคำเต็มว่า X-ray Photoelectron Spectroscopy แปลเป็นไทยได้ว่า “สเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอ็กซ์” ดังแสดงในรูป 2.26 อิเล็กตรอนที่ได้รับอิสรภาพด้วยวิธีการแบบนี้ เรียกว่า “โฟโตอิเล็กตรอน” ถึงแม้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นั้นจะเป็นแสงธรรมดา รังสี UV หรือรังสีเอ็กซ์ก็ตาม



รูปที่ 2.27 สเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยรังสีเอ็กซ์ (ที่มา : ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (THEP), 2023)

หลักการทำงานของเครื่อง XPS คือ เริ่มต้นการยิงรังสีเอ็กซ์พลังงานเดี่ยวใส่วัสดุสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ รังสีเอ็กซ์นี้จะทราบค่าพลังงานอย่างแน่นอน เพราะผลิตจากหลอดที่เป่าแอโนดทำด้วยโลหะเบา เช่น ถ้าเป็นอลูมิเนียมจะให้รังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงาน 1486.6 eV แมกนีเซียมจะให้พลังงาน 1253.6 eV รังสีเอ็กซ์กลุ่มนี้จัดอยู่ในพวกที่เรียกว่า soft X-rays (โฟตอนมีพลังงานในย่าน 200-2000 eV) รังสีเอ็กซ์ที่ใช้ถ่ายภาพปิดตามโรงพยาบาลอยู่ในกลุ่ม hard X-rays มีพลังงาน 10,000 eV ผลิตจากเป่าแอโนดทำด้วยโลหะหนักจำพวกทังสเตน ไม่ได้ให้รังสีเอ็กซ์พลังงานเดี่ยว โฟโตอิเล็กตรอนจากผิววัสดุจะถูกรวบรวมและโฟกัสไปที่รูปิดเล็กๆ ตรงปากทางเข้าของระบบวิเคราะห์พลังงานของอนุภาคอิเล็กตรอนด้วยระบบเลนส์ไฟฟ้า ชุดเลนส์มีความยาว 50 เซนติเมตร ระบบวิเคราะห์พลังงานของอิเล็กตรอน ประกอบด้วยแผ่นโลหะคู่ขนาน รูปครึ่งวงกลม ต่อกับศักย์ไฟฟ้าคงที่ มีหน้าที่บังคับอิเล็กตรอนวิ่งโค้งด้วยรัศมีเฉลี่ย 16.5 เซนติเมตร จนถึงแผงหัววัด วิธีการวัดพลังงานของโฟโตอิเล็กตรอน ดังแสดงในรูป 2.27



รูปที่ 2.28 หลักการทำงานของเครื่อง XPS (ที่มา : ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (THEP), 2023)

เทคนิค Electron Spectroscopy for Chemical Analysis (ESCA) หรือเทคนิค XPS จะใช้แสงในย่านของ soft X-ray เพื่อที่จะกระตุ้นให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนและเน้นที่การวิเคราะห์ค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนชั้นในสุด (core electron) เนื่องจากค่าพลังงานดังกล่าวเป็นค่าเฉพาะของอะตอมในแต่ละธาตุและขึ้นอยู่กับสถานะทางเคมีของอะตอมนั้นๆ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคดังกล่าวจึงทำให้สามารถระบุชนิดและสถานะทางเคมีของธาตุที่เป็นองค์ประกอบบริเวณพื้นผิวของสารที่ต้องการวิเคราะห์ได้ เทคนิคนี้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับวัสดุหลายชนิด เช่น โลหะ สารกึ่งตัวนำ เซรามิกส์ แก้ว พลาสติก ใย เป็นต้น

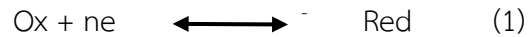
2.11.7 เครื่องทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีไฟฟ้าของสารตัวอย่าง (Electrochemical Workstation)

2.11.7.1 ไชคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry :CV)

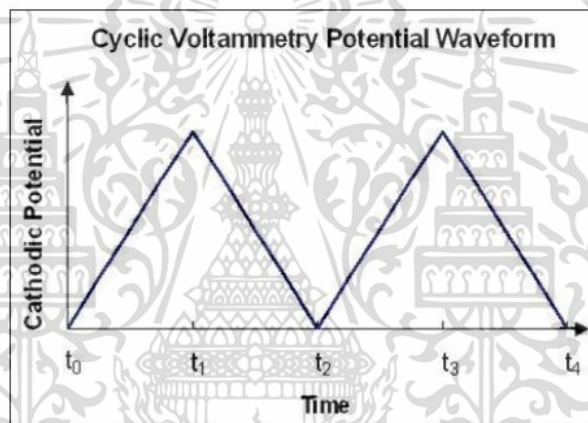
เป็นเทคนิคที่ให้ศักย์ไฟฟ้า (ในลักษณะสามเหลี่ยมหน้าจั่ว) แก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน เพื่อศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าของสารบริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงาน อีกทั้งยังศึกษาสภาวะเหมาะสมในการวิเคราะห์ เช่นการบันทึกกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการให้ศักย์ไฟฟ้าในขั้วไฟฟ้าทำงาน ศักย์ไฟฟ้าใน ไชคลิกโวลแทมเมทรีจะเป็นการให้อัตราสแกน (Scan rate) คงที่เทียบกับเวลาที่จุดสูงสุด และลดศักย์ไฟฟ้าในทิศตรงกันข้ามที่อัตราการสแกนเดียวกัน และทำการพลอตค่ากระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้า เรียกว่า ไชคลิกแทมโมแกรม (Cyclic voltammogram)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไซคลิกโวลแทมโมแกรมเป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ กระแสจะเกิดขึ้นได้ เมื่อให้ ศักย์ไฟฟ้าที่เป็นส่วนกลางเป็นค่าลบเพิ่มขึ้นจากเวลา t_0 ไปถึง t_1 ตัวออกซิไดซ์ (Ox) หรือสาร ที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกรีดิวซ์ (Red) ที่ขั้วไฟฟ้าทำงาน ดังปฏิกิริยาที่ (1)



กระแสที่เกิดขึ้นเป็นกระแสแคโทดิก (Cathodic current) จะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึง จุดสูงสุด และจุดนี้ตัวออกซิไดซ์จะถูกรีดิวซ์ออกจนหมด ทำให้ปริมาณตัวออกซิไดซ์ที่ผิวหน้า ของขั้วไฟฟ้าทำงานลดน้อยลง หลังจากนั้นกระแสจะลดลงถึงค่าต่ำสุด เมื่อเวลา t_1 โวลแทมโม แกรมจะมีลักษณะเป็นพีคเรียกว่า แคโทดิกพีค (Cathodic peak) กระแสแคโทดิกที่วัดจาก เส้นฐานของจุดเริ่มต้นไปจุดสูงสุด เรียกว่า กระแสแคโทดิกพีค (Peak cathodic current : I_{pc}) และศักย์ไฟฟ้าที่จุดกระแสแคโทดิกมีค่าเท่ากับ I_{pc} คือ E_{pc} (Peak cathodic potential)



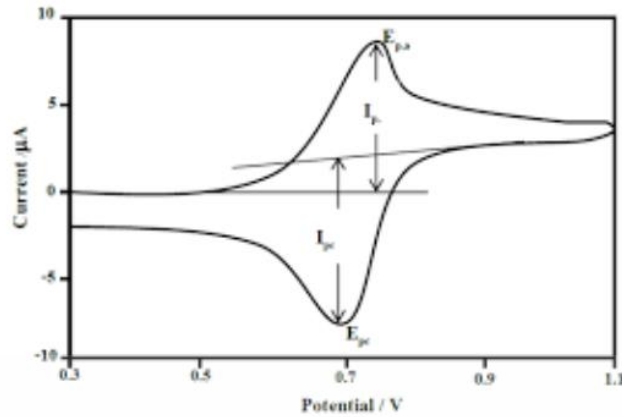
รูปที่ 2.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้าและเวลาที่ใช้ในการวัดไซคลิกโวลแทมเมทรี

หลังจากเวลา t_1 จะลดศักย์ไฟฟ้าที่ให้ไปในทิศทางที่เป็นบวก (หรือศักย์ไฟฟ้าที่ผันกลับกับตอน แรก) ดังแสดงในภาพที่ 4.5 แต่ก็ยังเป็นศักย์ไฟฟ้าแคโทดิกเกิดขึ้นอยู่ เพราะศักย์ไฟฟ้ายังเป็นค่าลบ เพียงพอที่จะเกิดปฏิกิริยารีดักชันที่อยู่ใกล้ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าทำงานเริ่มถูกออกซิไดซ์ ดังปฏิกิริยาที่ (2)



กระแสที่เกิดขึ้นเป็นกระแสแอโนดิก (Anodic current) กระแสจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งความเข้มข้นรอบขั้วไฟฟ้าของตัวรีดิวซ์ลดลง มีค่าเป็นศูนย์ ขณะนี้ค่ากระแสแอโนดิกจะมี ค่าสูงสุด และจะลดลงเรื่อยๆ จนถึงเวลา t_2 โวลแทมโมแกรมมีลักษณะเป็นพีคเรียกว่า แอโนดิกพีค (Anodic peak) กระแสแอโนดิกสามารถวัดได้จากเส้นฐานพีคที่ลากจากเวลา t_1 ไปถึงจุดสูงสุดของพีค เรียกว่ากระแสแอโนดิกพีค (Peak anodic current : I_{pa}) และศักย์ไฟฟ้าที่จุดกระแสแอโนดิกมีค่า เท่ากับ I_{pa} คือ E_{pa} (Peak anodic potential)

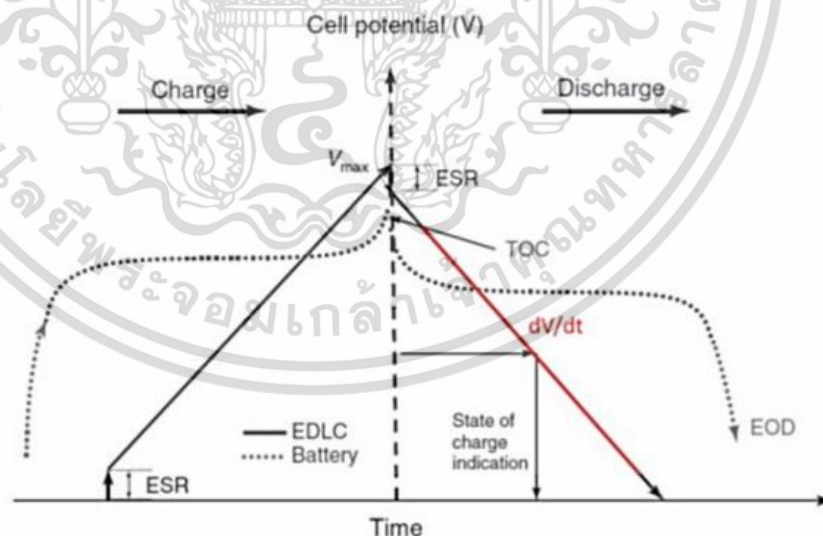
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 ไซคลิกโวลแทมโมแกรม

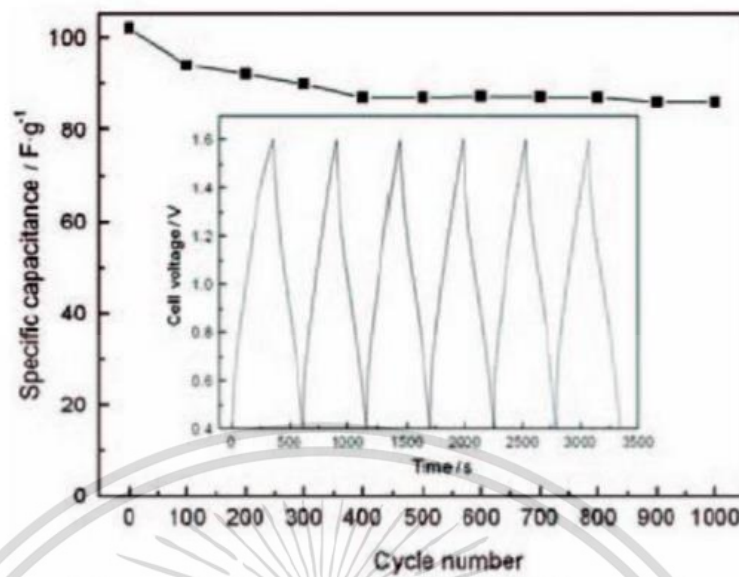
2.11.7.2 กัลป์วานอสแตติก ชาร์จ- ดิสชาร์จ (Galvanostatic charge-discharge)

เป็นเทคนิคที่ให้กระแสไฟฟ้า (ในลักษณะสามเหลี่ยมหน้าจั่ว) แก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน เพื่อศึกษาความสามารถในการชาร์จประจุไฟฟ้า และคายประจุไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของตัวอย่าง เทคนิคทางไฟฟ้าเคมีสามารถศึกษาใช้บันทึกความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ได้จากการให้กระแสไฟฟ้าแก่ขั้วไฟฟ้าทำงาน ทำการพลอตค่าระยะเวลากับศักย์ไฟฟ้า เรียกว่า กัลป์วานอสแตติก ชาร์จ- ดิสชาร์จ โดยกระแสที่จะให้ขึ้นอยู่กับค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าเมื่อเทียบกับเวลาถึงจุดสูงสุดและทำการคายประจุไฟฟ้าออกมา



รูปที่ 2.31 ตัวอย่างกราฟกัลป์วานอสแตติก ชาร์จ-ดิสชาร์จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.32 ตัวอย่างกราฟไซคลิก ชาร์จ-ดิสชาร์จ

ไซคลิก ชาร์จ - ดิสชาร์จ เป็นเทคนิคมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพ อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าประเภท EDLCs และแบตเตอรี่ระหว่างการชาร์จ-ดิสชาร์จ และการถ่ายประจุเข้าเป็นวงจร โดยส่วนใหญ่จะชาร์จประจุไฟฟ้าและคายประจุไฟฟ้าให้กระแสเป็นค่าคงที่จนกว่าจะถึงแรงดันไฟฟ้าที่สามารถกักเก็บได้

2.12 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

J. P. Tey , et al. [11] ได้นำเปลือกทุเรียนมาผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี โดยถ่านกัมมันต์ที่มีการปรับปรุงนั้นอยู่ในระดับ mesoporous ซึ่งในการกระตุ้นนั้นจะใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เป็นตัวกระตุ้น และนำคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นนั้นไปทดสอบลักษณะโครงสร้างและลักษณะสัณฐานด้วยเครื่องมือ เทคโนโลยีเฉพาะทางต่างๆ โดยมีการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก (TGA) กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ไนโตรเจน N_2 ไอโซเทอร์มการดูดซับ การสลายตัว และการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ หลังจากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้ไปทำเป็นวัสดุอิเล็กโทรดที่ทำงานอยู่ในตัวเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น (EDLC) ร่วมกับอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นกลางในน้ำ มีค่าเฉพาะเจาะจงอยู่ที่ 120 mF cm^{-2} หรือถ้าเทียบกับค่าความจุจำเพาะของอิเล็กโทรดเดี่ยว มีค่า 93.1 F g^{-1} มีค่าความหนาแน่นของพลังงาน และความหนาแน่นของกำลังงานเท่ากับ 11.3 Wh kg^{-1} และ 170 kW kg^{-1} ตามลำดับที่กล่าวมาคือเป็นประสิทธิภาพสำหรับความจุอิเล็กโทรดเดี่ยว

P. Ukkakimapan, et al. [12] ได้ทำการเตรียมถ่านกัมมันต์ (ACs) ผ่านกระบวนการคายน้ำของเปลือกทุเรียน (DH) สำหรับการทำให้ใช้งานของตัวซูเปอร์คาปาซิเตอร์ โดยที่เปลือกทุเรียนถูกทำให้แห้งโดยใช้กรดซัลฟิวริก และกระตุ้นให้ได้คาร์บอนกัมมันต์โดยใช้สารเคมีไฮเดรตไฮดรอกไซด์ที่

อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส ถูกเรียกว่าเป็น DA ซึ่งมีค่ามากกว่าคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เซชัน หรือการกระตุ้นแบบดั้งเดิม โดยที่ DA มีพื้นที่ผิวสูงถึง $2578 \text{ m}^2/\text{g}$ ปริมาตรรูพรุนรวม $1.27 \text{ cm}^3/\text{g}$ โดยที่ DA สามารถทำหน้าที่เป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับอิเล็กโทรดซูเปอร์คาปาซิเตอร์ โดยมีความจุรวิมาตริกและปริมาตร 145 F/g และ 70 F/cm^3 ในอิเล็กโทรไลต์อินทรีย์ และมีอุปกรณ์แสดงประสิทธิภาพของตัวคาปาซิเตอร์ที่ความหนาแน่น 32 Wh/kg และความหนาแน่นของพลังงาน 316 W/kg ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการเตรียมทุเรียนโดยผ่านการกำจัดน้ำที่เป็นกรดของเปลือกทุเรียนมีข้อดีคือ มีต้นทุนต่ำ เรียบง่าย ใช้ระยะเวลาในการประมวลผลสั้นเพื่อให้ได้คาร์บอนกัมมันต์ที่เจือในตัวเองด้วยเฮเทอโรอะตอม ซึ่งมีพื้นที่ผิวสูงสำหรับซูเปอร์คาปาซิเตอร์ประสิทธิภาพสูง

L. Ong, et al. [13] ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับ microporosity และ mesoporosity จากเปลือกทุเรียนเลยทำการปรับปรุงโครงสร้างและคุณสมบัติทางเคมีของพื้นผิวของคาร์บอนหลัก โดยใช้เทคนิคการฉายรังสีอัลตราโซนิกและไมโครเวฟ ทำการศึกษาผลกระทบในเรื่องของอุณหภูมิและระยะเวลาของเทคนิคการฉายรังสีอัลตราโซนิกกำลังไฟฟ้า และเวลาในการฉายรังสีไมโครเวฟ โดยที่ประสิทธิภาพของการสังเคราะห์เป็นซิวอิเล็กโทรดออกมานั้นทดสอบโดยวงจรไซคลิกโวลต์แทมรี (CV) และการอัดและคายประจุแบบกัลวานอสแตติก ผลสรุปว่าค่าพลังงานไฟฟ้าของการจัดเก็บอิเล็กโทรดนั้นขึ้นอยู่กับความพรุนขนาดเล็ก และคุณสมบัติทางเคมีของพื้นผิวของสารกัมมันต์คาร์บอน ซึ่งที่ความจุของอิเล็กโทรดที่สูงสุดของการศึกษานี้คือ 103.6 F/g โดยในการเตรียมคาร์บอนกัมมันต์นั้นใช้อุณหภูมิ ultrasonication 323.15 K เป็นเวลา 10 นาที และใช้พลังงานไมโครเวฟกำลังขับ 900 วัตต์ นาน 10 นาที

Attaphol Karaphun, et al. [34] ได้ทำการหล่อหลอมโครงสร้างเพื่อที่จะได้พื้นที่ผิวจำเพาะขนาดใหญ่ และค่าไฟฟ้าเคมีที่เพิ่มขึ้นการสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) สำหรับอิเล็กโทรดซูเปอร์คาปาซิเตอร์กระบวนการหลอมด้วยความร้อน (rGO_An) แสดงถึงการเกิดขึ้นของ mesoporous และ macropores ขนาดใหญ่ มีพื้นที่ผิวจำเพาะขนาด $672.1 \text{ m}^2/\text{g}$ และขนาดรูพรุนเฉลี่ย 46.2 nm ส่งผลให้ตัวอย่าง rGO_An มีค่าความจุจำเพาะ (Cs) มากกว่า rGO ส่งผลถึงการนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการหลอมด้วยความร้อน หลังจากทดสอบด้วยเทคนิคกัลวานอสแตติก (GCD) มีความเสถียรหลังจาก 750 รอบอยู่ที่ 97.32% ค่าความจุจำเพาะสูงสุดและความหนาแน่นของพลังงานเฉลี่ยเท่ากับ 412.096 F/g และ 74.5 Wh/kg ที่ 1 A/g ดังนั้นกระบวนการหลอมแอสมารุส่งผลให้เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ของ mesoporous และ macropores ซึ่งเป็นตัวช่วยปรับปรุงการนำไฟฟ้าและความสามารถในการคงตัวเพื่อใช้เป็นอิเล็กโทรดในซูเปอร์คาปาซิเตอร์

Likkhasit Wannasen et al. [35] เตรียมคาร์บอนกัมมันต์จากชานอ้อย ซึ่งใช้ไพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวกระตุ้น จากนั้นนำไปผ่านเครื่องบดแบบ High-energy ball mill (HEBM) ภายใต้กระบวนการต่างๆ โดยใช้ความเร็วที่ (600, 1200 และ 1800 รอบต่อนาที) เพื่อผลิตอนุภาคคาร์บอนกัมมันต์จากอนุภาคขนาดไมโคร หลังจากตัวอย่างผ่าน HEBM แล้ว จะแสดงขนาดอนุภาคที่เล็กลง ปริมาตร mesopore เพิ่มขึ้นและปริมาณออกซิเจนที่พื้นผิวที่เข้มข้น ซึ่งมีส่วนช่วยให้ค่าเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

pseudocapacitance สูงขึ้น เครื่อง HEBM ในการกำหนดความเร็วถูกนำมาใช้เพื่อค้นหาประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าที่ดี ส่งผลให้ AC/BM12 ที่รอบ 1200 ต่อนาที ใช้เวลา 30 นาที แสดงความจุจำเพาะสูงสุดที่ 257 F/g ที่ความหนาแน่นกระแส 0.5 A/g ซึ่งสูงกว่าตัวอย่าง AC ประมาณ 2.4 เท่า หลังจากการทดสอบ 3,000 รอบ การเก็บรักษาความจุมีประสิทธิภาพ 93.5% ที่ความหนาแน่นกระแส 5 A/g หลังจากนั้นนำอิเล็กโทรด AC/BM12 ไปประกอบเซลล์แบบเหรียญ ในอิเล็กโทรไลต์ 1 M LiPF₆ มีค่าความจุจำเพาะ 110 F/g และความหนาแน่นของพลังงานสูง 27.9 Wh/kg



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงอุปกรณ์ เครื่องมือ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง และอธิบายขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงสีกุญเรือน และเปลือกข้าวโพด ที่เหลือทิ้งทางการเกษตร ให้ไปเป็นคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และการกระตุ้นทางเคมีด้วยเทคนิคไฮโดรเทอมอล เพื่อที่จะได้ศึกษาผลหรือปัจจัยต่างๆส่งผลต่อตัวคาร์บอนกัมมันต์และทำให้นำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุได้ด้วย 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. เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (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 ยี่ห้อ Quantachrome รุ่น Autosorb iQ-C-XR-XR)
6. เครื่องมือวิเคราะห์วัสดุนาโนโดยเทคนิคสเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray Photoelectron Spectroscopy : XPS ยี่ห้อ Kratos Model Axis ultra DLD)
7. เครื่องทดสอบสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีไฟฟ้าของสารตัวอย่าง (Electrochemical Workstation ยี่ห้อ CorrTest Instruments รุ่น CS350)
8. เครื่องประกอบเซลล์เหรียญบาท (Coin Cell Crimping Machine)
9. เครื่องบดแบบลูกบอล (3D-ballmilling) (รุ่น Nagao System)
10. เครื่องชั่งดิจิตอลทศนิยม 4 ตำแหน่ง (รุ่น PR224/E OHAUS 200X0.1mg โดย

ประเทศจีน)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เตาเผาอุณหภูมิสูงแบบท่อ (Furnace Tube ยี่ห้อ Chavachote รุ่น Tube50/1009P)
12. เตาเผาอุณหภูมิสูง (Furnace Box ยี่ห้อ Chavachote รุ่น L9/12P)
13. ตู้อบสาร ผลิตโดยบริษัท Memmert ประเทศเยอรมนี
14. ตู้ดูดควัน (Fume Hood) ผลิตโดยบริษัท design-after native ประเทศไทย
15. เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hotplate Stirrer ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS7)
16. เครื่องปฏิกรณ์หม้อน้ำความดันสังเคราะห์ไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal Synthesis Reactor)

3.1.2 วัสดุอุปกรณ์

1. ไมโครปิเปต
2. โกร่งบดสาร (Mortar and Pestle)
3. เครื่องแก้ว ได้แก่ บีกเกอร์ปริมาตร 250ml และ 600 ml
4. ฟอร์เซป
5. ช้อนตักสารสแตนเลส (Spatula Stainless)
6. หลอดเซนติฟิว (Centrifuge tube) ขนาด 2 ml และ 50 ml
7. ไม้หนีบ
8. ลูกบิดเซรามิกเซอร์โคเนีย (ZrO_2) ขนาด 3 mm
9. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (magnetic stirring bar)
10. ถ้วยเผาสารอุณหภูมิสูง (Alumina ceramic crucible boat)
11. หลอดหยดพลาสติก (Plastic dropper)
12. อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil)
13. แผ่นอะคริลิก
14. กระดาษขี้สาร
15. โฟมนิเกิล (Nickel foam)
16. แผ่นกั้นขี้ (Separator)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

17. เครสฟาบิตเซลล์เหรียญบาท
18. สปิงส่วนประกอบเซลล์เหรียญบาท
19. พาราฟิล์ม (Parafilm, Bemis Company)

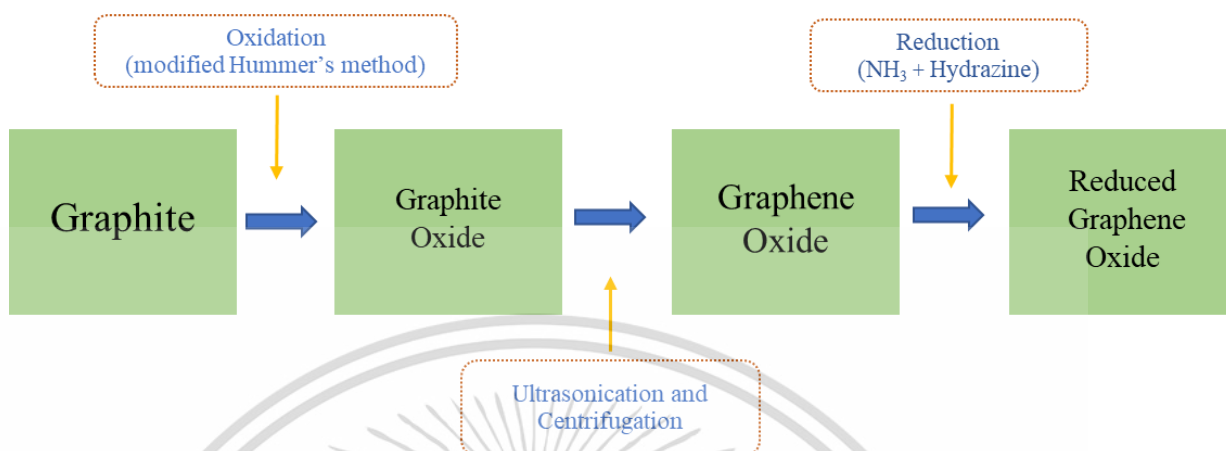
3.1.3 สารเคมี

1. รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (Reduce Graphene Oxide : rGO)
2. โซเดียมซัลเฟต (*Sodium sulfate* , Na₂SO₄)
3. โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide 85%, KOH, RCL labscan Ltd.)
4. พอลิเมอร์โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Polyvinylidene, PVDF, Sigma-aldrich Co., LLC.)
5. สารละลาย Dimethylformamide (DMF)
6. เอ็นเมธิลพิโรลิโดน (N-methyl-2-pyrrolidone, NMP, Sigma-aldrich Co., LLC.)
7. อะซิโตน (Acetone : C₃H₆O)
8. เอทานอล (Ethanol, C₂H₅OH, RCL Labscan Ltd.)
9. น้ำปราศจากไอออน (Deionized Water : DI)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO)



รูปที่ 3.1 กระบวนการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

กระบวนการเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) ถูกสังเคราะห์โดยวิธีการออกซิเดชัน Oxidation (Hummer method) และกระบวนการรีดักชัน (reduction) ด้วยกรดแก่ในการเตรียม กราฟีนออกไซด์ (graphene : GO) นำผงแกรไฟต์บริสุทธิ์ 99% 2 กรัม เติมกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid : H_2SO_4) 46 มิลลิลิตร ผสมลงในปีกเกอร์ก้นกลมขนาด 500 มิลลิลิตร ผสมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate : $KMnO_4$) 6 กรัม และกวนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 15 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นกวนส่วนผสมทั้งหมดเข้าด้วยกัน ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นเติมน้ำกลั่น (DI water) 90 ml ลงไปอย่างช้าๆ ภายใต้การกวนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที และจะหยุดปฏิกิริยาโดยการเติมน้ำกลั่น 250 มิลลิลิตร และเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide : H_2O_2) 10 มิลลิลิตร ผลิตภัณฑ์จะถูกแยกด้วยการปั่นและล้างด้วย สารละลายไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid : HCL) 5% เพื่อลดค่าพีเอชหลังจากนั้นทำการกรองและ 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)

ตั้งนั้นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เตรียมจากการนำสารแขวนลอยคือกราฟีนออกไซด์ (GO) 100 ml น้ำกลั่น 100 ml แอมโมเนีย (NH_3) 1 ml และสารละลาย ไฮดราซีน (hydrazine) 0.1 ml นำส่วนผสม ทั้งหมดกวนเข้าด้วยกันภายใต้ความร้อน อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที สุดท้ายจะได้ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ

3.2.2 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน (DC)

(ก) เตรียมสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์จากแหล่งธรรมชาติ คือเปลือกทุเรียน เพื่อที่จะขจัดวัสดุขจัดวัสดุลิกโนเซลลูโลสของเปลือกทุเรียนที่ได้รับคือประมาณ 30 % โดยน้ำหนัก

1. นำเปลือกทุเรียน ที่เป็นวัสดุเหลือใช้เพื่อมาเป็นแหล่งคาร์บอนจากธรรมชาตินำมาหั่นให้เป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อให้แห้งได้ง่ายขึ้น
2. นำเปลือกทุเรียน ที่หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้แห้ง
3. นำเปลือกทุเรียน ที่แห้งแล้วไปเผาในเตาท่อ ดังรูปที่ 1 ที่อุณหภูมิ 600, องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ในบรรยากาศอาร์กอน (Ar)
4. เมื่อทำการเผาเสร็จจะได้ลักษณะสีดำ หลังจากนั้นนำมาบดให้ละเอียด
5. หลังจากนั้นนำมาบดให้ละเอียดจะได้ลักษณะผงคาร์บอนสีดำที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคขนาดไมครอน



รูปที่ 3.2 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

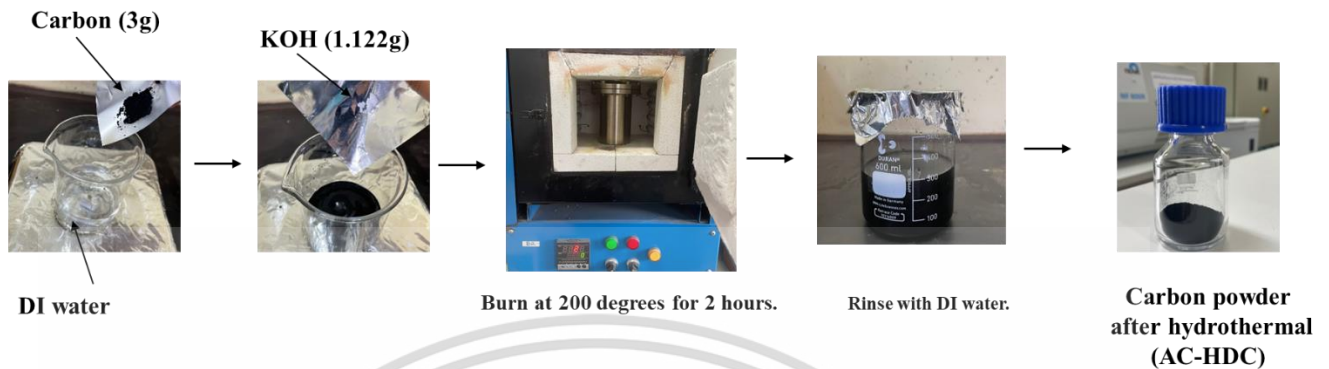
3.2.3 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอมอล (AC-HDC)

(ข) เตรียมสังเคราะห์คาร์บอนกัมมันต์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอมอล (AC-HDC) เพื่อที่จะเพิ่มความพรุนให้กับสาร

1. นำคาร์บอน 1 กรัม ที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันไปปั่นกับน้ำ DI 100ml หลังจากนั้นใส่สารละลาย KOH (0.2 M) 1.122 กรัม และทำการปั่นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
2. เมื่อครบ 3 ชั่วโมงแล้วนำสารใส่ในหม้อนึ่งความดันสเตนเลสสตีลเคลือบเทฟลอน แล้วใส่ในเตาเผาที่ 200 องศา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
3. ให้นำสารที่ผ่านการไฮโดรเทอมอลแล้วเทใส่ในปีกเกอร์ แล้วเติมน้ำ DI
4. วางไว้ให้ตกตะกอน แล้วทำการเปลี่ยนน้ำ 2 ครั้ง เหมือนเป็นการล้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. นำไปเข้าเตาอบให้แห้งที่ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แล้วนำไปบดให้ละเอียด และจะได้ผงคาร์บอนกัมมันต์จากกระบวนการไฮโดรเทอมอล (AC-HDC)



รูปที่ 3.3 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอมอล

3.2.4 การลดขนาดอนุภาคคาร์บอนกัมมันต์โดยใช้เครื่องบดแบบลูกบอล (3D ballmilling)

1. เตรียมคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอมอล 1 กรัม ต่อลูกบดเซอร์โคเนีย 20 กรัม (ลูกบดเซอร์โคเนียมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร) ลงในโถบดแบบลูกบอล
2. นำโถบดใส่ลงในเครื่องบดแบบลูกบอล และทำการบดเพื่อลดขนาดเป็นเวลา 5, 10, 15, 20, 30 และ 45 นาที
3. ได้ผงคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านการลดอนุภาคที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 3.4 การลดขนาดคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล

3.2.5 การเตรียมคาร์บอนกัมมันต์ด้วยเทคนิคไฮโดรเทอมอลคอมโพสิตกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO/AC-HDC-3D15M)

(ค) ในการคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับคาร์บอนกัมมันต์จะใช้เทคนิคไฮโดรเทอมอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

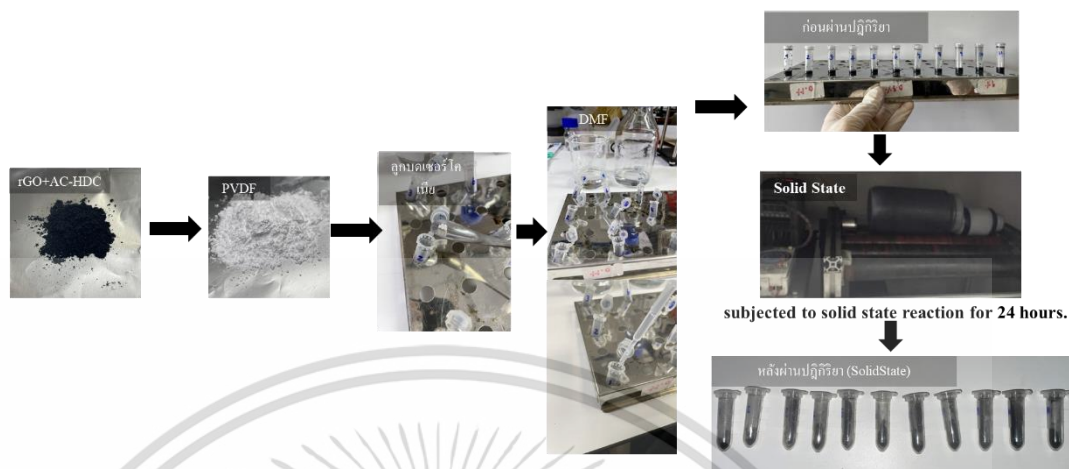
1. ใช้ผงคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอมอล (HDC) 1 กรัม ละลายอยู่ในสารแขวนลอยกราฟีนออกไซด์ที่มีความเข้มข้น (4.2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร)
2. ปั่นให้คาร์บอนกัมมันต์เข้ากันกับสารแขวนลอย
3. หลังจากนั้นเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.122 กรัม ทำการปั่นเป็นเวลา 3 ชั่วโมง
4. นำสารละลายที่ปั่นรวมกันแล้วถ่ายโอนลงในหม้อนึ่งความดันสเตนเลสตีลเคลือบเทฟลอนสำหรับกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล ใส่เตาเผาที่อุณหภูมิ 200 องศา เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. นำสารผ่านกระบวนการไฮโดรเทอมอลแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำไปใส่เครื่อง 3D ball-milling เป็นเวลา 15 นาที จะเป็นการคอมโพสิตอย่างสมบูรณ์

3.2.6 การเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงาน

(ก) เตรียมขั้วไฟฟ้าทำงานเพื่อที่จะวัดสมบัติเคมีไฟฟ้าของสารแต่ละตัวด้วยวิธีการ ball milling โดยใช้ตัวอย่าง rGO , DC, AC-HDC, AC-HDC-3D 5M, AC-HDC-3D 10M, AC-HDC-3D 15M, AC-HDC-3D 20M, AC-HDC-3D 30M AC-HDC-3D 45M, and rGO/AC-HDC-3D 15M ที่ได้จากตัวอย่าง PVDF และอะเซทิลีนแบล็กที่ได้มาในอัตราส่วน 85: 10 : 5 % โดยน้ำหนัก

1. นำผงคาร์บอนที่เตรียมได้จากขั้นตอนแรกมาคอมโพสิตกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) โดยทำการใส่สารรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) หลังจากนั้นใส่พอลิเมอร์โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) 0.010 g
2. ใส่ลูกบดเซอร์โคเนียลงในหลอดเซนทริฟิวล์ แล้วทำการเติมสารละลาย N-methyl-2-pyrrolidone (NMP) เมื่อเตรียมสารละลายใส่ลงในหลอดเซนทริฟิวล์เรียบร้อยแล้วตั้งรูปที่ให้นำหลอดเซนทริฟิวล์ไป ball milling โดยการปั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
3. หลังจากที่ผ่านมาการ ball milling เรียบร้อยแล้ว ให้นำสารที่ผ่านกระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงานหยดลงบนแผ่นนิกเกิลโพลีเมตริกปริมาตร 200 ไมโครลิตร

4. แล้วยำไปอบแห้งที่ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เพื่อเตรียมไปวัดค่าการนำไฟฟ้า



รูปที่ 3.5 กระบวนการเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงาน

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขของการเตรียมตัวอย่าง

No.	name	AC (mg)	rGO (mg)	CB (mg)	PVDF (mg)
1	rGO	-	0.0850	0.0050	0.0100
2	DC	0.0850	-	0.0050	0.0100
3	HDC	0.0850	-	0.0050	0.0100
4	AC-HDC	0.0850	-	0.0050	0.0100
5	AC-HDC-3D 15M	0.0850	-	0.0050	0.0100
6	AC-HDC-3D 30M	0.0850	-	0.0050	0.0100
7	rGO/AC-HDC-3D 15M	0.0800	0.0050	0.0050	0.0100

3.2.7 เตรียมตัวเก็บประจุยิ่งยวด

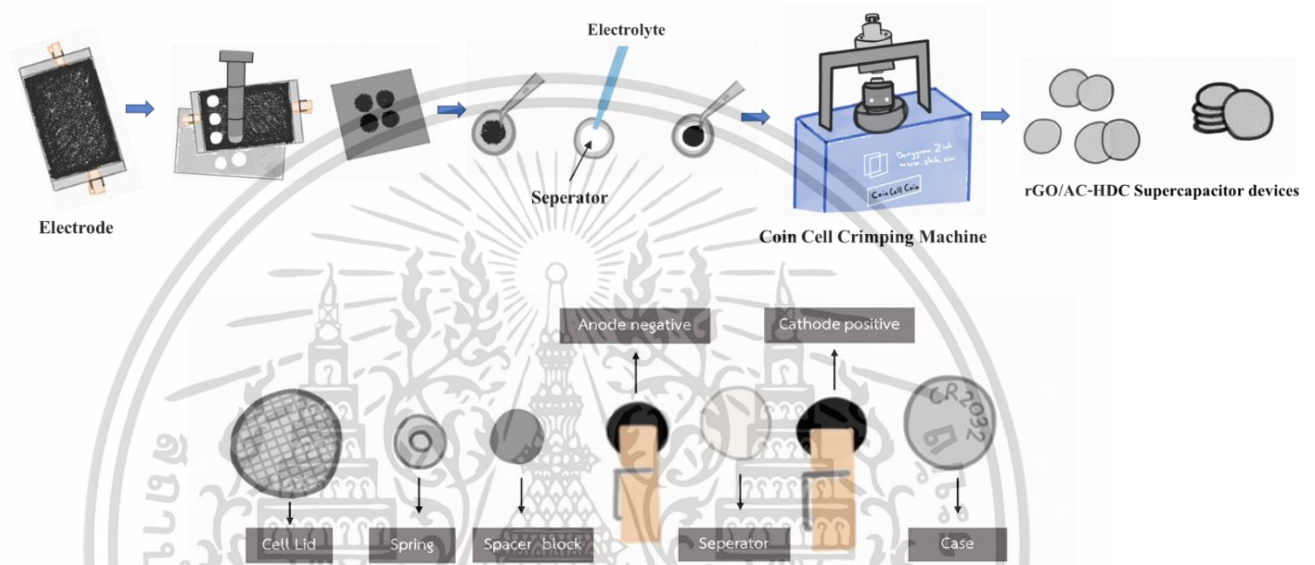
(ข) เตรียมตัวเก็บประจุแบบเซลล์เหรียญบาทจากสาร rGO/AC-HDC โดยใช้เซลล์ CR 2032-coin ที่ประกอบโดยตรงกับ PVA-3M KOH โซลิดอิเล็กโทรไลต์

1. เมื่อนำรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์คอมโพสิตกับคาร์บอนกัมมันต์ (rGO/AC-HDC) แล้ว ให้นำมาหยดลงบนแผ่นนิกเกิลโฟม
2. นำเข้าตู้อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง
3. ตัดแผ่นนิกเกิลให้ได้เส้นผ่านศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร เพื่อที่จะนำไปประกอบเป็นเซลล์เหรียญบาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำขั้วไฟฟ้าแคโทด (-) ใส่ลงในเคสเป็นชั้นที่ 1 ใส่แผ่นกั้นขั้วเป็นชั้นที่ 2 ทำการหยดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ KOH 3 โมลาร์ ใส่ขั้วไฟฟ้าแอโนด (+) เป็นชั้นที่ 3 ใส่แผ่นเพิ่มความหนาขนาด 1 มิลลิเมตรเป็นชั้นที่ 4 ใส่สปริงเป็นชั้นที่ 5 ลงไปตามลำดับ หลังจากนั้นใส่ฝาปิด

5. หากประกอบส่วนประกอบของเซลล์เหรียญบาทเรียบร้อยแล้วให้นำไปวางใส่เครื่องประกอบเซลล์เหรียญบาท แล้วอัดที่ความดัน 0.5 ตัน เป็นเวลา 1 นาที

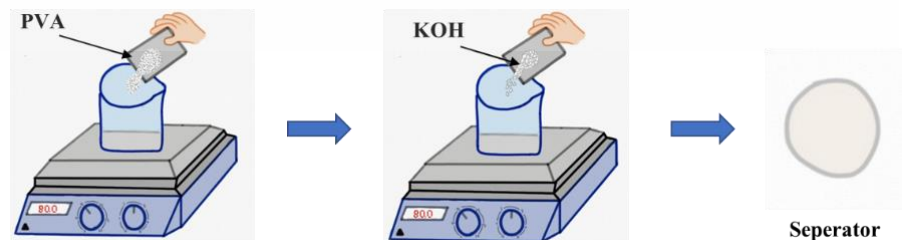


รูปที่ 3.6 กระบวนการเตรียมตัวเก็บประจุยิ่งยวด

(ค) การทำตัวแยกขั้วไฟฟ้า (Seperator)

1. นำสารละลาย PVA 0.5 กรัมละลายในน้ำ DI ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปั่นกวนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2. หลังจากได้สารละลายเจล PVA ให้เติม KOH 3M และทำการปั่นกวนต่อที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 กระบวนการเตรียมแผ่นแยกขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 เทคนิคการวัดสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical Workstation)

การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของอนุภาคผงนาโน rGO_Durian และ rGO_Corn ด้วยเทคนิค CV, GCD โดยเครื่อง Electrochemical Workstation มีส่วนประกอบคือ โพลเทนซีโอสแตตซึ่งเป็นเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้าซึ่งเป็นตัวควบคุมการจ่ายความต่างศักย์และวัดกระแสไฟฟ้าที่มีความละเอียดสูง ในปัจจุบันเครื่องโพลเทนซีโอสแตตจะต่อกับคอมพิวเตอร์และมีซอฟต์แวร์ ที่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงาน และแสดงผลการวิเคราะห์ เป็นผลให้เราทำงานได้อย่างสะดวก

ในงานวิจัยนี้เครื่องโพลเทนซีโอสแตตจะถูกต่อไปยังเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบ 3 ขั้ว (Three - electrode electrochemical cell) ได้แก่

1. ขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working electrode: W.E.) เป็นขั้วไฟฟ้าของสารตัวอย่างที่ต้องการจะศึกษา
2. ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode : R.E.) เป็นขั้วไฟฟ้ามาตรฐานมีความต่างศักย์คงที่และมี หน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้เป็นค่าเปรียบเทียบ ทำให้เรารู้ถึงค่าความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าทำงาน
3. ขั้วไฟฟ้าช่วย (Counter electrode : C.E.) เป็นขั้วไฟฟ้าที่ทำให้ระบบครบวงจร วัสดุที่นิยมนำมาใช้ ในขั้วนี้มากที่สุด คือ สลวดแพลทินัม

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

ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาตามสภาวะที่กำหนดดังนี้ ขั้วไฟฟ้าทำงาน : ขั้วแพลทินัม



ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง : Ag/AgCl

ขั้วไฟฟ้าทำงาน : rGO/AC-HDC

อิเล็กโทรไลต์ : KOH 3 M , Na₂SO₄

รูปที่ 3.8 ส่วนประกอบของเครื่อง Electrochemical Workstation

(อ้างอิงจากเว็บ www.corrtest.en.made-in-china.com, 19 มีนาคม 2565)

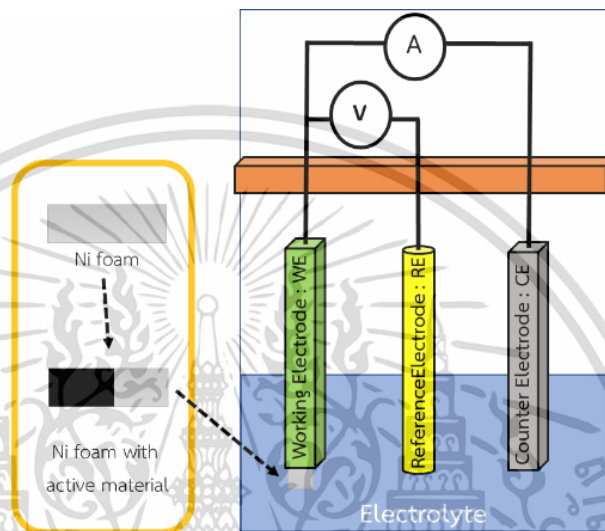
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ WE คือ ขั้วไฟฟ้าใช้งาน (Working electrode)

RE คือ ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference electrode)

CE คือ เคา์นเตอร์อิเล็กโทรด (Counter electrode)

Electrolyte คือ สารละลายที่เป็นตัวนำไอออนระหว่าง ปฏิกริยาออกซิเดชันหรือรีดักชัน



รูปที่ 3.9 แผนภาพจำลองเพื่อศึกษาสมบัติความเป็นตัวเก็บประจุ

3.3.1 เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic Voltammetry : CV)

สำหรับเทคนิคนี้จะใช้วัดอัตราการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารตัวอย่างที่ต้องการจะทดสอบ ซึ่งหลักการทำงานคือมีการจ่ายศักย์ไฟฟ้าเข้าไปในระบบ แล้วหลังจากนั้นจะมีการบันทึกกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าทำงานและขั้วไฟฟ้าช่วย ผลที่ได้ออกมาจะแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้า ซึ่งในกราฟจะมีการเกิดพีค (Peak) เป็นตัวบ่งบอกและแสดงให้เห็นถึงการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (c) ได้จากสมการ (3.1)

$$C = \frac{Ac}{m2v\Delta V} \dots\dots\dots (3.1)$$

เมื่อ Ac คือ พื้นที่ในวงปิด

m คือ มวล (g)

v คือ อัตราการแสกน (mV/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

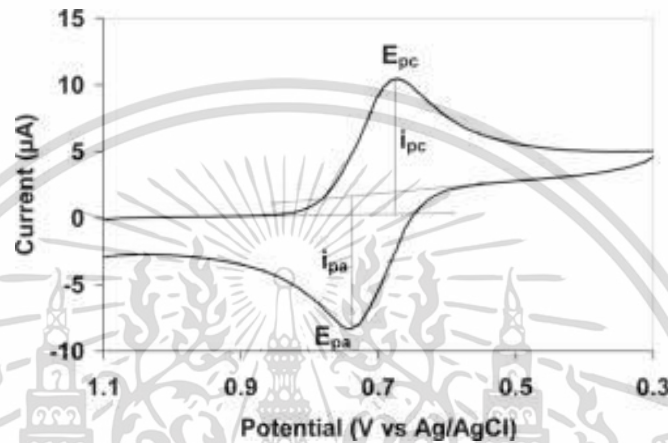
ΔV คือ ช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

จากกราฟจะแสดงค่าความต่างศักย์ที่ป้อนให้ขั้วไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นหรือเรียกว่า ไชคลิก

โวลแทมเมตรี โดยค่าความต่างศักย์ตรงตำแหน่งที่กราฟสูงสุด เป็นค่าความต่างศักย์ของปฏิกิริยา

รีดักชัน (cathodic peak potential : E_{pc}) และตำแหน่งที่ต่ำสุดเป็นค่าความต่างศักย์ของปฏิกิริยา

ออกซิเดชัน (anodic peak potential : E_{pa})



รูปที่ 3.10 กราฟไซคลิกโวลแทมเมตรี (อ้างอิงจากเว็บ www.sawadee.wiki, 19 มีนาคม 2565)

3.3.2 เทคนิคการอัดและการคายประจุไฟฟ้า (Galvanostatic charge-discharge :GCD)

สำหรับเทคนิคนี้ส่วนมากจะนำมาใช้วัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุความจุสูง ซึ่งหลักการทำงาน คือ จะมีการจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งกระแสที่จ่ายเข้าป้อนเป็นกระแสไฟฟ้าคงที่ ทำการไหลเข้าและออกจากตัวเก็บประจุความจุสูง แล้วทำการบันทึกค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเทียบกับเวลาในการอัดหรือคายประจุไฟฟ้า

โดยสามารถคำนวณค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะในกรณีอัดประจุไฟฟ้าได้จากสมการ (3.2) และค่าความจุจำเพาะในกรณีคายประจุไฟฟ้าจากสมการ (3.3)

$$C = \frac{I\Delta t}{m\Delta V} \dots\dots\dots(3.2)$$

$$C = -\frac{I\Delta t}{m\Delta V} \dots\dots\dots (3.3)$$

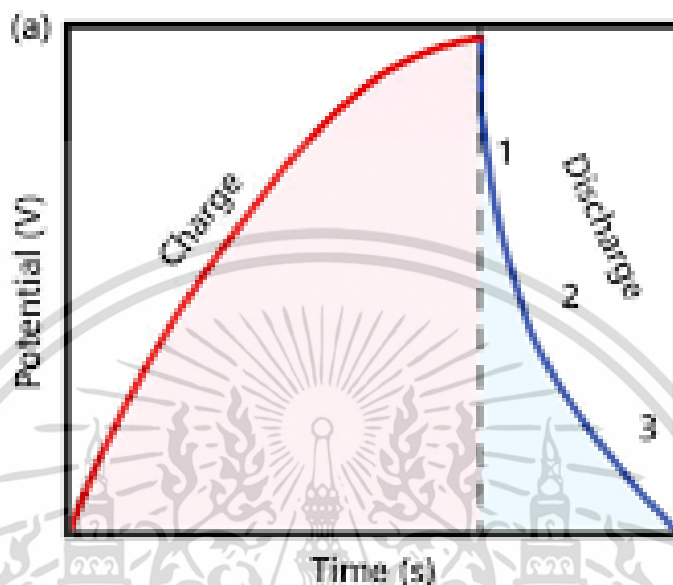
เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้า (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m คือ มวลของสารตัวอย่าง

Δt คือ ช่วงเวลาการอัดหรือคายประจุไฟฟ้า (s)

ΔV คือ ช่วงความต่างศักย์ไฟฟ้า (V)

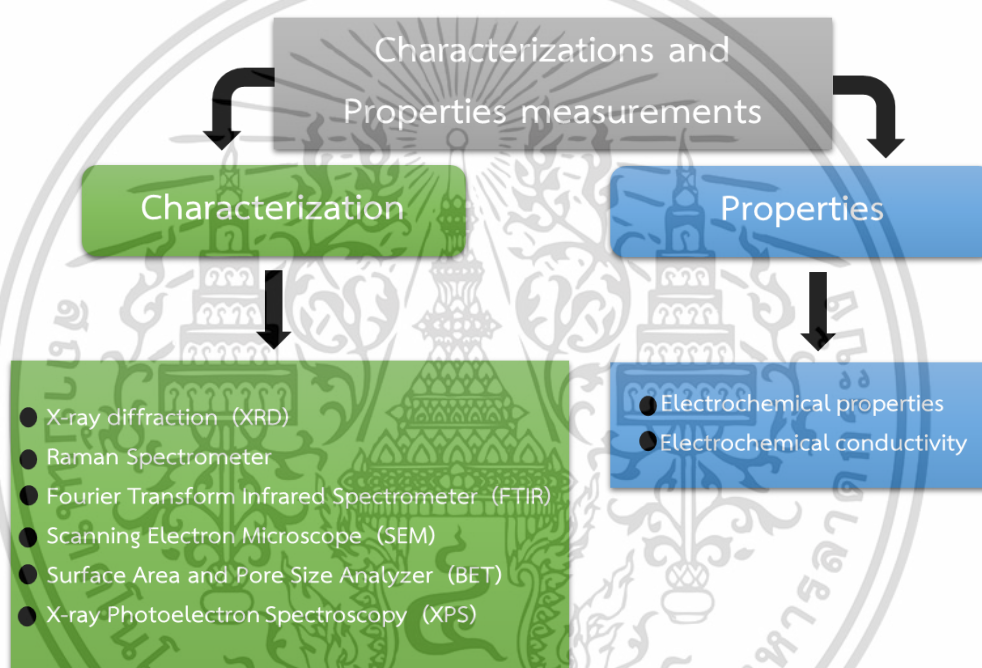


รูปที่ 3.11 กราฟการอัดและการคายประจุไฟฟ้า (อ้างอิงจากเว็บ www.onlinelibrary.wiley.com, 19 มีนาคม 2565 [21])

3.4 การวิเคราะห์

โครงสร้างผลึกของวัสดุ rGO, DC, AC – HDC, AC – HDC – 3D15M, ACHDC – 3D30M และ rGO / AC – HDC – 3D15M ได้รับการประเมินโดยใช้ X-ray diffraction (XRD) (Miniflex600, Rigaku, Japan) โดยแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์จะมี แล $\text{CuK}\alpha = 1.5406 \text{ \AA}$ สันฐานวิทยาขนาดเกรน และองค์ประกอบของตัวอย่างได้รับการประเมินโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (JEOL SEM JSM-5800 LV) การกระจายตัวของอะตอมถูกสังเกตโดยใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์สเปกโทรสโกปีแบบกระจายพลังงาน (EDX) และการทำแผนที่ EDX ดำเนินการรามาณสเปกโทรสโกปี (DXR Smart, Thermo Fisher Scientific) โดยมีความยาวคลื่นกระตุ้น 532 นาโนเมตร เทคนิคการแปลงฟูริเยร์อินฟราเรด (FTIR) ใช้สำหรับการวิเคราะห์โหมดการสั่นสะเทือนของพันธะอะตอม (Bruker, Sen-terra, Saint Paul, MN, USA) การกระจายขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวจำเพาะ (SSA) ของวัสดุถูกวัดโดยใช้เทคนิค Barrett – Joyner – Halenda (BJH) และ Brunauer – Emmett – Teller (BET) ที่ใช้เทคนิคการดูดซับไนโตรเจน – ไอโซเทอร์มการดูดซับไนโตรเจน (Autosorb1, Quantachrome, Boynton Beach, ฟลอริดา สหรัฐอเมริกา) สถานะออกซิเดชันของวัสดุได้รับการประเมินโดยใช้ X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) (Kratos Axis ultra DLD, XPS, PHI5000 Versa Probe II, ULVAC-PHI, Chigasaki, ญี่ปุ่น) ที่ศูนย์วิจัยร่วม SUT-NANOTEC เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SLRI , สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (SLRI) ประเทศไทย เวิร์กสเตชันเคมีไฟฟ้าโพเทนชิโอสแตท / กัลวานอสแตท (หุวู้ฮั่น Cor-test Instruments Co., Ltd., หุวู้ฮั่น, จีน) ถูกนำมาใช้สำหรับโวลแทมเมทรีแบบวงจร (CV), การปล่อยประจุไฟฟ้าแบบ gal-vanostatic (GCD) และสเปกโทรสโกปีอิมพีแดนซ์อิมพีแดนซ์เคมีไฟฟ้า (EIS) มีการใช้คุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์สำหรับการวัดอิเล็กทรอนิกส์ทรานซิสเตอร์ (rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M) ในอิเล็กโทรไลต์น้ำ 3.0 M KOH ที่มี 0.5 ลวดแพลตตินัมเส้นผ่านศูนย์กลาง มม. และ Ag/AgCl ใน 3.0 M HCl เพื่อใช้อ้างอิงและอิเล็กโทรดเคาน์เตอร์ ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายอิเล็กโทรดถูกวัดโดยใช้เทคนิคการวัด Hall Effect โดยการใช้สารละลายกับขั้วสเตรตแก้วตามด้วยการทำให้แห้งที่ 80 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมงก่อนการวัดด้วย HCS 1—ระบบการวัด Hall Effect (Linseis Inc., เซลป์, เยอรมนี)



รูปที่ 3.12 การวิเคราะห์และตรวจสอบคุณสมบัติต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

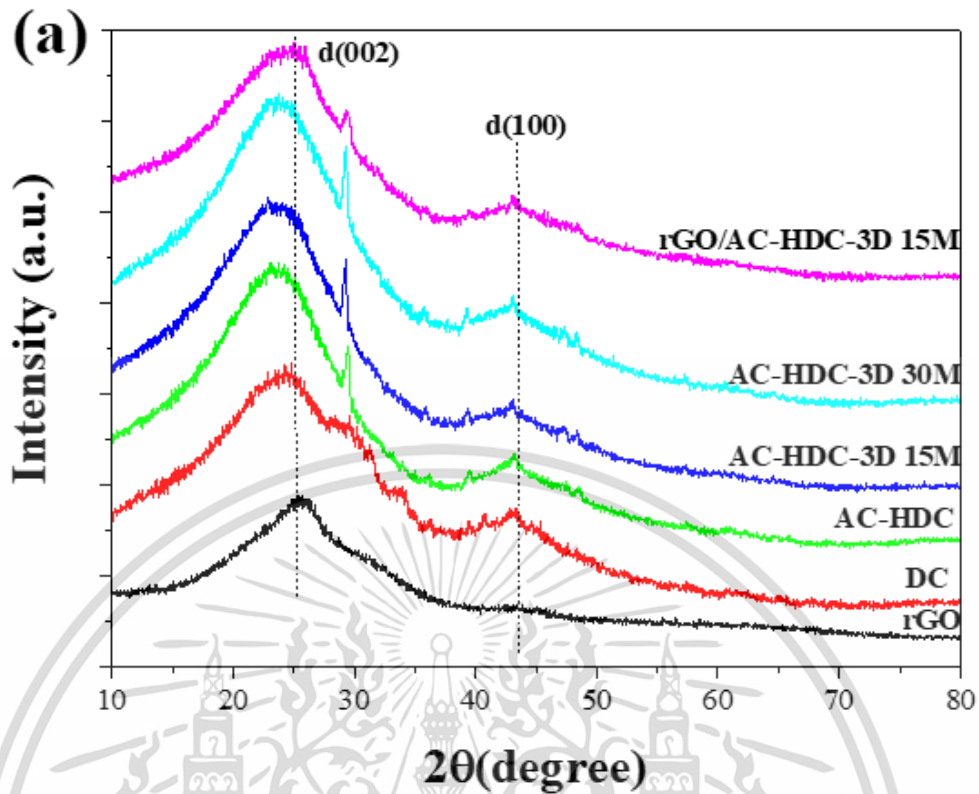
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและอภิปรายผลเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของคาร์บอนกัมมันต์ โดยกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเงื่อนไขของคาร์บอนของกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิต่างกัน เพื่อเลือกหาอุณหภูมิที่เหมาะสม และนำไปกระตุ้นทางเคมีผ่านกระบวนการไฮโดรเทอมอล หลังจากนั้นนำไปลดขนาดของอนุภาคผ่านเครื่องบดแบบวงกลม (3D-ballmilling) โดยจะใช้เวลาแตกต่างกันออกไปเพื่อหาจุดสมดุลของขนาดที่พอดี และนำไปศึกษาองค์ประกอบทางเคมี ศึกษาลักษณะโครงสร้างสัณฐานสมบัติทางเคมีไฟฟ้า และการนำคาร์บอนกัมมันต์ไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวด

4.1 ลักษณะทางกายภาพของคาร์บอนกัมมันต์

4.1.1 เครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer : XRD)

การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกคาร์บอนจากเปลือกทุเรียน ทำการศึกษาด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer : XRD) และในภาพที่ดังรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกคาร์บอนจากเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง (DC) และถูกกระตุ้นทางเคมีผ่านกระบวนการไฮโดรเทอมอลด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide :KOH) ที่อัตราส่วน 1:1 (AC-HDC) และคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านเครื่องบดวงกลม (3D-ballmilling) ที่เวลา 15 นาที (AC-HDC-3D 15M) และ 30 นาที (AC-HDC-3D 30M) อีกทั้งยังแสดงให้เห็นถึงการคอมโพสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และคาร์บอนกัมมันต์ (rGO/AC-HDC-3D 15M) ทำให้คาร์บอนที่สังเคราะห์ได้มีพีคฐานกว้างที่ตำแหน่ง $2\theta = 25.14^\circ$ ซึ่งสอดคล้องกับการเลี้ยวเบนของระนาบ (002) ที่สอดคล้องกับแผ่น rGO ด้วยระยะห่าง $d = 0.354$ นาโนเมตร[36] พีค XRD ของตัวอย่าง DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M และ AC-HDC-3D30M แสดงพีคที่ $2\theta = 24.94^\circ$ และ 43.56° ที่เกี่ยวข้องกับระนาบการเลี้ยวเบน (002) และ (100) [37-44]. ผลลัพธ์ตรงกับขบวนการเลี้ยวเบนของวัสดุคาร์บอนอสัณฐานที่ได้จากวัสดุชีวมวลหลังจากการทำให้เป็นคาร์บอน จุดสูงสุด XRD ของตัวอย่าง rGO / AC - HDC - 3D15M ปรากฏขึ้นรวมกันในจุดสูงสุดขนาดเล็กและกว้างกว่าเล็กน้อยที่ $2\theta = 25.14^\circ$ เพื่อยืนยันคอมโพสิต rGO ด้วยตัวอย่าง AC - HDC - 3D15M โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ยอดกว้างที่ $2\theta = 24-25^\circ$ มาจากคาร์บอนอสัณฐานซึ่งพบได้ในคาร์บอนธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ จุดสูงสุดของ XRD ที่ $43-44^\circ$ บ่งชี้ถึงโครงตาข่ายกราฟไฟท์หกเหลี่ยมที่มีอยู่ในโครงสร้าง ซึ่งสอดคล้องกับ JCPDS 75-1621 สามารถบ่งบอกได้ว่าการกระตุ้นด้วยกระบวนการทางเคมีส่งผลต่อการสลายองค์ประกอบคาร์บอนในคาร์บอนกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

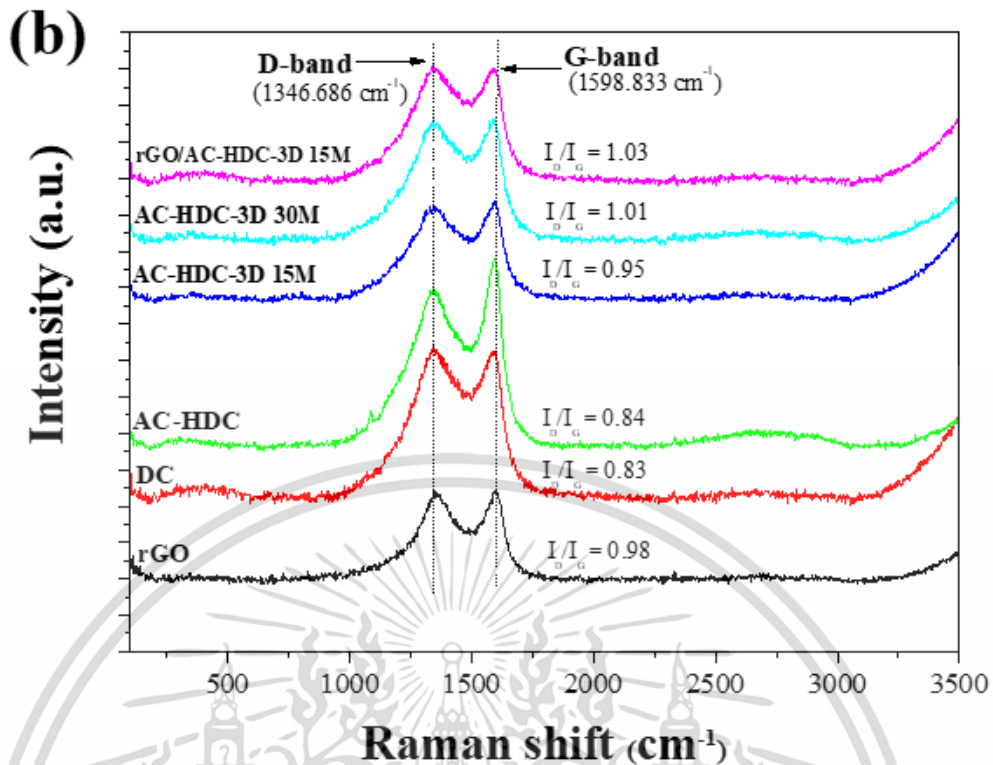


รูปที่ 4.1 กราฟ XRD ของเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไอเซน 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอมอล และผ่านเครื่อง 3D-ball milling

4.1.2 รามานสเปกโทรสโกปี (Raman Spectroscopy)

จากการวิเคราะห์การศึกษาโครงสร้างผลึกของตัวอย่างด้วยเทคนิครามานสเปกโทรสโกปี ดังแสดงในรูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมรามานแบบกระจายของตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M สเปกตรัมรามานของตัวอย่างเหล่านี้แสดงจุดสูงสุดหลักสองจุดที่ตำแหน่งประมาณ $1,598.83 \text{ cm}^{-1}$ และ $1,346.686 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งสอดคล้องกับแถบ G-band ซึ่งอธิบายว่าเป็นอะตอมของคาร์บอนที่ถูกพันธะ sp^2 ซึ่งสัมพันธ์กับโครงสร้างตาข่ายหกเหลี่ยม 2 มิติ และสเปกตรัม D-band แถบซึ่งอธิบายข้อบกพร่องและความผิดปกติของชั้นกราฟไฟต์หกเหลี่ยมชั้นแรก [14, 40, 44, 45] ค่าของอัตราส่วนความเข้ม ID / IG ของตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M คือ 0.98, 0.83, 0.84, 0.95, 0.95 และ 1.03 ตามลำดับ อัตราส่วน ID/IG ของตัวอย่าง rGO/AC-HDC-3D15M มีความคล้ายคลึงกับอัตราส่วนของตัวอย่าง rGO ซึ่งบ่งชี้ว่า rGO ถูกประกอบในตัวอย่าง rGO/AC-HDC-3D15M บ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของความเข้มของแถบ D ที่เชื่อมโยงกับการเพิ่มอัตราส่วน ID/IG คุณลักษณะเหล่านี้บ่งชี้ถึงการเพิ่มขึ้นของผลึกคาร์บอนกราฟไฟต์สำหรับโครงสร้าง rGO/AC-HDC-3D15M ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ XRD ที่แสดงในรูปที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กราฟรามานของเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง ผ่านการกระตุ้นทางเคมีด้วย KOH โดยใช้กระบวนการไฮโดรเทอมอล และผ่านเครื่อง 3D-ball milling

4.1.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)

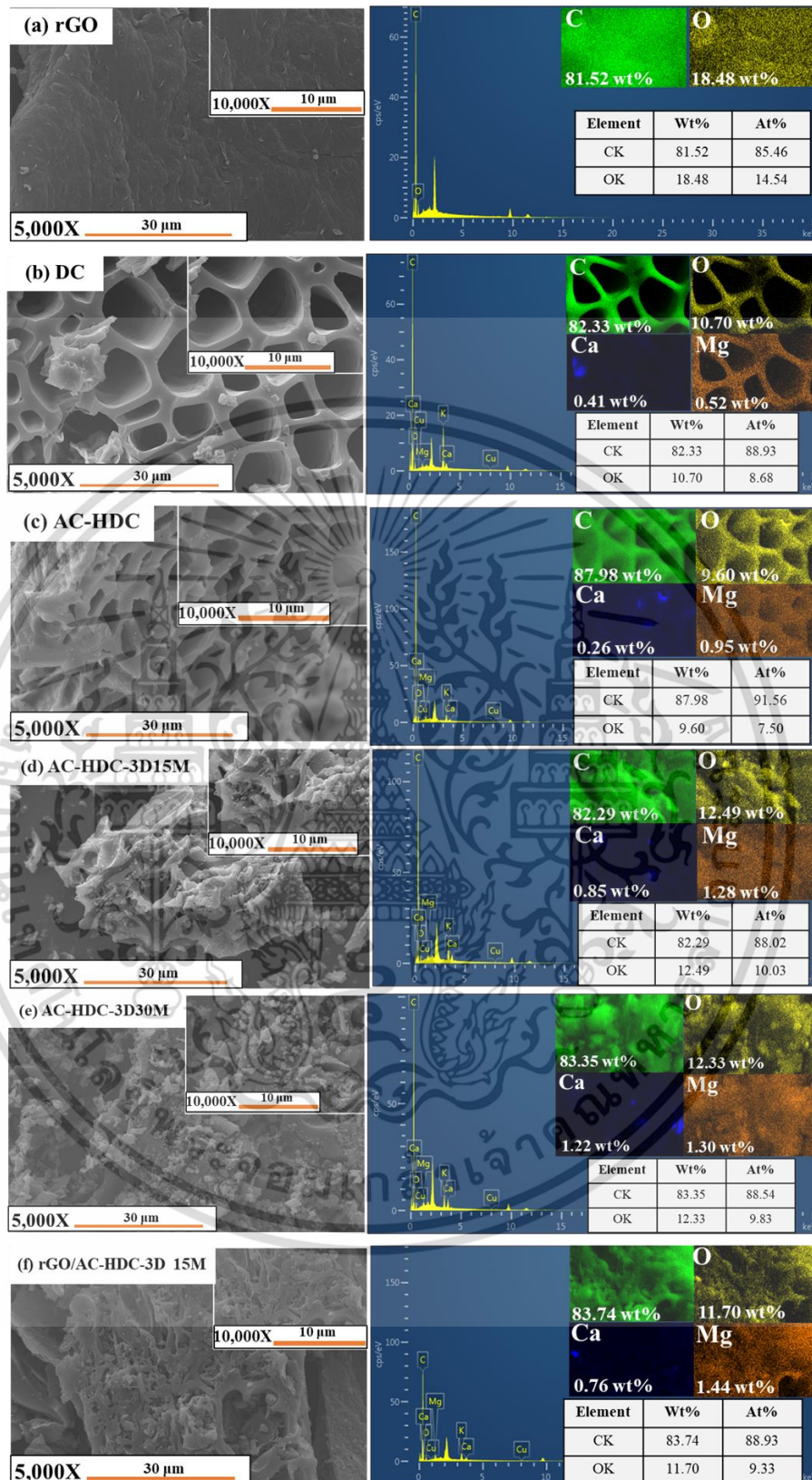
จากการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวอย่างด้วยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) ผลว่าการถ่ายภาพรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (rGO) มีลักษณะเป็นแผ่น การถ่ายภาพคาร์บอนจากเปลือกทุเรียนที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส 3 ชั่วโมงมีพื้นที่ผิวที่เรียบเนียน มีความพรุนเมื่อมีการกระตุ้นด้วยกระบวนการทางเคมีด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ทำให้พื้นที่ผิวมีความพรุนมากขึ้น และเมื่อนำคาร์บอนกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอมอลแล้วมาบดที่เวลา 15 และ 30 นาที ทำให้พื้นที่ผิวของคาร์บอนมีความขรุขระ ความพรุนเพิ่มมากขึ้นกว่าการกระตุ้นทางเคมีเพียงอย่างเดียว มีการแตกหักของโครงสร้างเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีชิ้นส่วนเล็กๆ กระจายตัวอยู่เป็นจำนวนมาก สิ่งเหล่านี้ส่งผลให้คาร์บอนมีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงเมื่อผ่านการกระตุ้นอย่างถูกวิธี

จากผลการวิเคราะห์เมื่อพิจารณาลักษณะสัณฐานวิทยา เมื่อเปรียบเทียบระหว่างคาร์บอนที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันกับคาร์บอนที่ถูกนำไปกระตุ้นทางเคมีเพิ่มเติมแสดงให้เห็นว่าคาร์บอนที่กระตุ้นทางเคมีหรือคาร์บอนกัมมันต์นั้นจะมีความพรุนมากกว่าคาร์บอนธรรมดา แต่เมื่อนำคาร์บอนกัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มันต์ที่ผ่านการกระตุ้นทางเคมีไปลดขนาด โดยผ่านเครื่องบดวงกลม (3D-ballmilling) ก็ยิ่งส่งผลที่ดีขึ้นกว่าเดิมทั้งในเรื่องของพื้นที่ผิว ความพรุนมีมากกว่าคาร์บอนที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันเพียงอย่างเดียว แต่ถ้ามีการบดที่ใช้ระยะเวลาที่มากเกินไปการคาร์บอนจะรับได้ก็อาจจะส่งผลให้เกิดการทับกันของสาร และทำให้กลับไปเป็นผลึกที่ติดกัน แกรมไม่มีรูพรุนเกิดขึ้นเลย

พื้นที่โดยรวมของภาพ SEM และการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M แสดงในรูปที่ 4.3 (a-f) รูปที่ 4.3 (a) นำเสนอภาพ SEM ของตัวอย่าง rGO ซึ่งยืนยันว่าสัณฐานวิทยา rGO ไม่มีการเปลี่ยนแปลงบนพื้นฐานของความผิดปกติของการซ้อนและการทับซ้อนกัน ซึ่งบ่งชี้ถึงการลดวัสดุ GO ที่ประสบความสำเร็จ ในรูปที่ 4.3 (b) ภาพ SEM ของตัวอย่าง DC แสดงอนุภาคที่มีการกระจายไม่สม่ำเสมอซึ่งไม่ได้ถูกกระตุ้น สำหรับตัวอย่าง AC-HDC รูปที่ 4.3 (c) แสดงรูพรุนแบนโดยนำเสนอตัวอย่างที่ได้รับผลกระทบจากการกระตุ้นด้วยไอน้ำโดยมีคุณสมบัติมีความพรุนสูง ตัวอย่าง AC-HDC-3D15M ซึ่งถูกบดเป็นลูกบอลเป็นเวลา 15 นาที นำเสนอภาพ SEM ที่มีความพรุนที่ดี ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (d) รูปที่ 4.3 (e) แสดงภาพ SEM ของตัวอย่าง AC - HDC - 3D30M ซึ่งถูกบดเป็นลูกบอลเป็นเวลา 30 นาที โดยไม่แสดงรูพรุนที่ทับซ้อนกัน รูปที่ 4.3 (f) แสดงภาพ SEM ของตัวอย่าง rGO/AC - HDC - 3D15M ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวอย่างมีความผิดปกติของการซ้อนโดยมีอนุภาคที่เกาะกลุ่มกันอย่างใกล้ชิดและจัดกลุ่มแบบสุ่มในเครือข่ายที่กว้างขวางของอนุภาคที่เชื่อมต่อกันพร้อมความพรุนที่ดีขึ้น นอกจากนี้ สเปกตรัม X-ray การกระจายพลังงาน (EDS) ของตัวอย่าง rGO, DC, AC - HDC, AC - HDC - 3D15M, AC - HDC - 3D30M และตัวอย่าง rGO / AC - HDC - 3D15M แสดงค่า C / O wt ที่ลดลง % อัตราส่วนดังที่แสดงในตารางที่ 1 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันออกซิเจนตกค้างถูกจัดกลุ่มโดยมีขอบเขตที่ลดลงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลลัพธ์ FTIR ในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.3 (a-f) รูปภาพ SEM และสเปกตรัม EDS พร้อมการวิเคราะห์องค์ประกอบของตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC3D15M, AC-HDC3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 4.1 แสดงสัดส่วนของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC3D-30M and rGO/AC-HDC. -3D15M

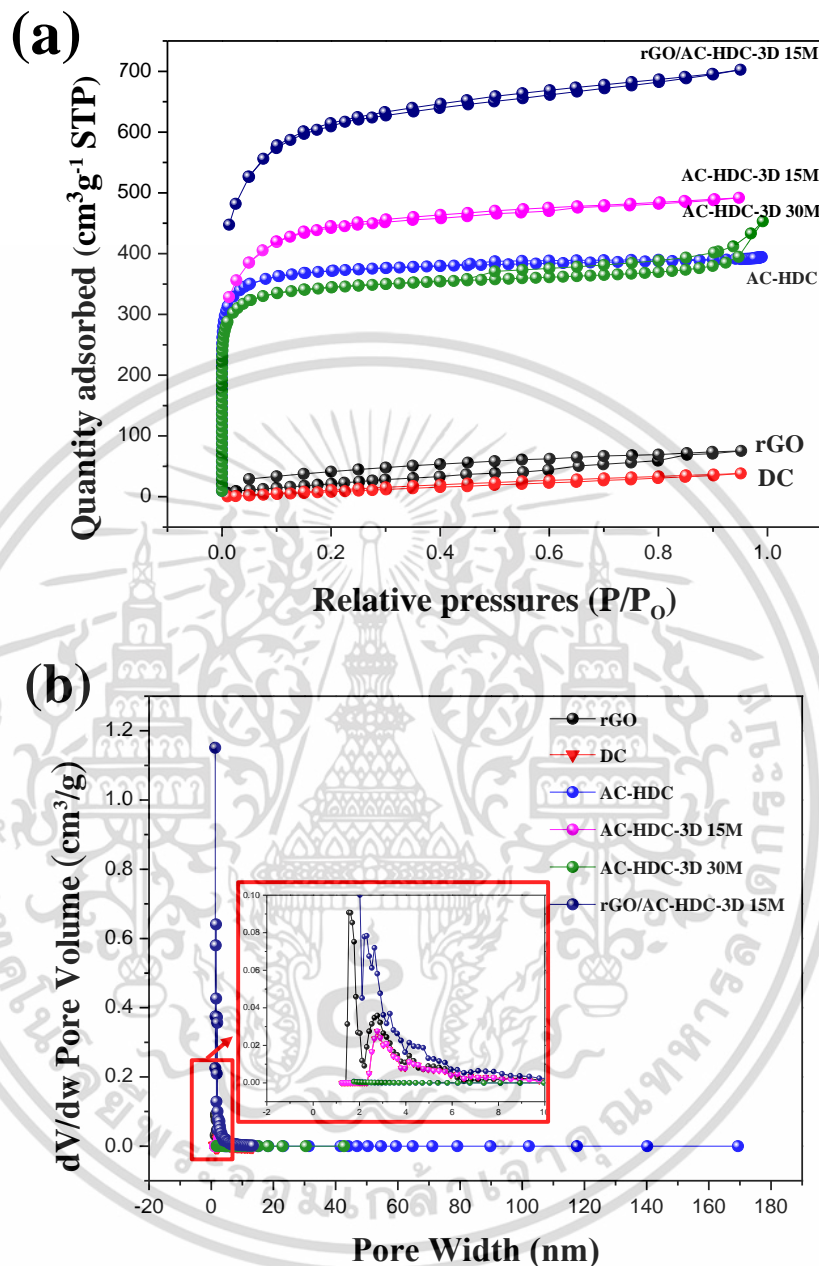
Sample	Element				C/O Ratio
	Carbon (C)	Oxygen (O)	Calcium (Ca)	Magnesium (Mg)	
rGO	81.52	18.48	--	--	4.411
DC	82.33	10.70	0.41	0.52	7.694
AC-HDC	87.98	9.60	0.26	0.95	9.164
AC-HDC-3D15M	82.29	12.49	0.85	1.28	6.588
AC-HDC-3D30M	83.35	12.33	1.22	1.30	6.759
rGO/AC-HDC-3D15M	83.74	11.70	0.76	1.44	7.157

4.1.4 BET analysis

รูปที่ 6 แสดงผลลัพธ์ SSA สำหรับตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M SSA ของตัวอย่างถูก investigated โดยอาศัยไอโซเทอรัมการดูดซับไนโตรเจน-การคายการดูดซึม ไอโซเทอรัมของ rGO แสดงลูบฮิสเทรีซิสชนิดที่ 4 ซึ่งบ่งชี้ว่ามีไมโครพอร์และมีเมโซพอร์อยู่ด้วย [37, 46] การกระจายขนาดรูพรุนเฉลี่ยของตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.4 SSA ของตัวอย่าง rGO, DC, AC - HDC, AC - HDC - 3D15M, AC - HDC - 3D30M และ rGO / AC - HDC - 3D15M คือ 109 , 62, 1146, 1683, 1065 และ 2311 m²/g ตามลำดับ ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าค่า SSA ของตัวอย่างเหล่านี้ ซึ่งได้รับการบำบัดด้วยไฮโดรเทอร์มอล สูงกว่าค่าของตัวอย่าง DC นี่หมายความว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลสามารถเพิ่ม SSA ของวัสดุ DC ได้ รูปที่ 4.4 (b) แสดงการกระจายขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยโดยใช้เทคนิค BJG สำหรับตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M ซึ่งเท่ากับ 4.26 , 3.82, 2.63, 1.80, 3.24 และ 1.88 นาโนเมตร ตามลำดับ ผลการวิจัยพบว่าการกระจายขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยของตัวอย่าง AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M ที่ได้รับการบำบัดโดยใช้กระบวนการความร้อนได้พิภพมีขนาดเล็กกว่าของ DC ตัวอย่าง. นี่หมายความว่ากระบวนการไฮโดรเทอร์มอลสามารถลดการกระจายตัวของขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยสำหรับวัสดุ DC ได้ ผลลัพธ์ของการกระจายปริมาตรรูพรุนของตัวอย่าง rGO, DC, AC - HDC, AC - HDC - 3D15M, AC - HDC - 3D30M และ rGO / AC - HDC - 3D15M เท่ากับ 0.105, 0.053, 0.611, 0.680, 0.702 และ 0.970 cm³/g ตามลำดับ ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการกระจายขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยสำหรับตัวอย่าง rGO / AC - HDC - 3D15M นั้นสูงกว่าการกระจายขนาดรูพรุนสำหรับตัวอย่าง AC - HDC,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC – HDC – 3D15M และ AC – HDC – 3D30M นี้หมายความว่า rGO ได้ต่อกับตัวอย่าง rGO / AC – HDC – 3D15M เพื่อปรับปรุงการกระจายขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยของวัสดุ DC



รูปที่ 4.4 (a) ไอโซเทอร์มของการดูดซับไนโตรเจนและการสลายตัวของไนโตรเจน และ (b) เส้นโค้งการกระจายขนาดรูพรุน BJH ของตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC3D15M, AC-HDC3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M .

ตามที่ Wang และคณะ (2018) [37] กระบวนการใหม่ในการสร้างรูพรุนในเชื้อราที่ทิ้งรากสามารถผลิตคาร์บอนที่มีรูพรุนที่ใช้งานได้โดยมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง วิธีการที่ใช้เชื้อราในการผลิตคาร์บอนที่มีรูพรุนที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะ ultra-high (3439 m² g⁻¹) ถูกสร้างขึ้นอันเป็นผลมาจากกลไกที่เป็นรากฐานของการพัฒนาโดยตรงของเห็ดไปสู่สารตั้งต้นลิกโนเซลลูโลสที่ได้รับการชี้แจง คาร์บอนที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

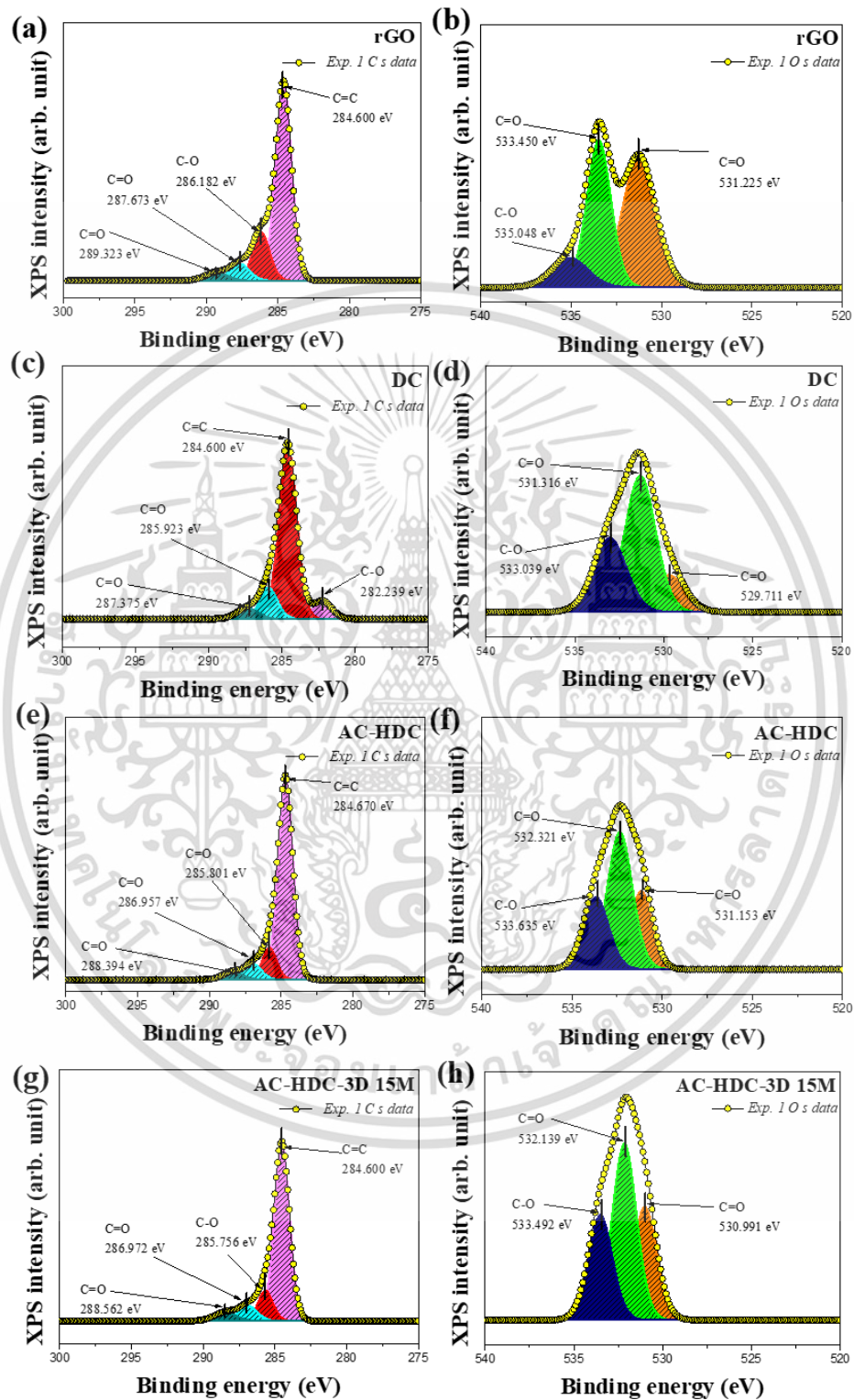
มีรูปพุนดังกล่าวอาจนำไปใช้ในการเร่งปฏิกิริยาด้วยไฟฟ้า การบำบัดสิ่งแวดลอม และการเก็บสะสมพลังงาน โดยธรรมชาติแล้ว SSA ที่สูงและการกระจายตัวของรูปพุนที่มีขนาดเล็กโดยเฉลี่ยสำหรับวัสดุอิเล็กโทรดแบบแอคทีฟนั้นมีประโยชน์สำหรับการขนส่งไอออนของอิเล็กโทรไลต์ไปยังอิเล็กโทรดด้วยความจุความจุจำเพาะที่ได้รับการปรับปรุงและสูงของอุปกรณ์ซูเปอร์คาปาซิเตอร์[37] นอกจากนี้ตัวอย่าง rGO/AC-HDC-3D15M ยังเหมาะสำหรับวัสดุอิเล็กโทรดที่ใช้งานในการผลิตอุปกรณ์ SC มากกว่าตัวอย่างอื่นๆ

4.1.5 การวิเคราะห์ XPS

รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัม XPS ของตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC และ AC-HDC-3D15M วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและความจุทางเคมีขององค์ประกอบของตัวอย่างทั้งหมด รูปที่ 4.5 (a),(c),(e),(g) แสดงสเปกตรัม C1s ความละเอียดสูงของตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC และ AC-HDC-3D15M ในขณะที่รูปที่ 4.5 (b),(d),(f),(h) นำเสนอสเปกตรัม O1s ความละเอียดสูงของ rGO ตัวอย่าง DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M รูปที่ 4.5 (a) แสดงสเปกตรัม C1s ของตัวอย่าง rGO ที่มีตำแหน่งจุดสูงสุดหลักที่ 284.60, 286.18, 287.67 และ 289.32 eV ผลลัพธ์ยืนยันการมีส่วนร่วมของพันธะ C-C จากโครงสร้างอะโรมาติก sp³ และพันธะ C-O (คาร์บอนิลคาร์บอน) ที่พื้นผิวของแผ่น rGO [14, 45, 47] รูปที่ 4.5 (b) แสดงสเปกตรัม O1s ของตัวอย่าง rGO ที่แสดงโดยตำแหน่งจุดสูงสุดหลักสามตำแหน่งที่ 531.22, 533.45 และ 535.04 eV ผลลัพธ์เหล่านี้ยืนยันพันธะ C-O (คาร์บอนิลคาร์บอน) สำหรับแผ่น rGO [45, 47-49] รูปที่ 4.5 (c) แสดงสเปกตรัม C1s ของตัวอย่าง DC โดยมีจุดสูงสุดหลักที่ 282.23, 284.60, 285.92 และ 287.37 eV รูปที่ 4.5 (d) แสดงสเปกตรัม O1s ของตัวอย่าง DC โดยมีตำแหน่งจุดสูงสุดหลักสามตำแหน่งที่ 529.71, 531.31 และ 533.03 eV รูปที่ 4.5 (e) แสดงสเปกตรัม C1s ของตัวอย่าง AC-HDC โดยมีพีคที่ 284.67, 285.80, 286.95 และ 288.39 eV รูปที่ 4.5 (f) แสดงสเปกตรัม O1s ของตัวอย่าง AC-HDC ที่มีตำแหน่งสูงสุดที่ 531.15, 532.32 และ 533.63 eV รูปที่ 4.5 (g) แสดงสเปกตรัม C1s ของตัวอย่าง AC-HDC-3D15M โดยมีพีคที่ 284.60, 285.75, 286.92 และ 288.56 eV รูปที่ 4.5 (h) แสดงสเปกตรัม O1s ของตัวอย่าง AC-HDC-3D15M ที่มีตำแหน่งสูงสุดที่ 530.99, 532.13 และ 533.49 eV ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงสเปกตรัม C1 ที่มีตำแหน่งสูงสุดใกล้เคียงสำหรับตัวอย่าง DC, AC-HDC และ AC-HDC-3D15M ตำแหน่งจุดสูงสุดหลักของสเปกตรัม O (1s) ของตัวอย่าง DC, AC - HDC และ AC - HDC - 3D15M มีความคล้ายคลึงกับตัวอย่าง rGO อัตราส่วน C/O สำหรับตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC และ AC-HDC-3D15M อยู่ที่ประมาณ 7.19, 5.21, 7.65 และ 7.70 ตามลำดับ ผลลัพธ์เหล่านี้แสดงอัตราส่วน C/O สำหรับ rGO (7.19) ที่สูงกว่า DC (5.21) อัตราส่วน C/O สำหรับตัวอย่าง AC-HDC (7.65) และ AC-HDC-3D15M (7.70) สูงกว่าสำหรับตัวอย่าง DC (5.21) ผลลัพธ์นี้บ่งบอกเป็นนัยว่าค่าที่เพิ่มขึ้นของอัตราส่วน C/O ได้รับผลกระทบจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล อัตราส่วน C/O ของตัวอย่าง AC-HDC-3D15M (7.70) ใกล้เคียงกับอัตราส่วนของตัวอย่าง AC-HDC (7.65) ผลลัพธ์เหล่านี้บ่งบอกเป็นนัยว่าอัตราส่วน C/O ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุ DC สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล นอกจากนี้ rGO ยังทำงานร่วมกับตัวอย่าง AC-HDC-3D15M เพื่อเพิ่มอัตราส่วน C/O สำหรับตัวอย่างที่ใช้ DC และ DC

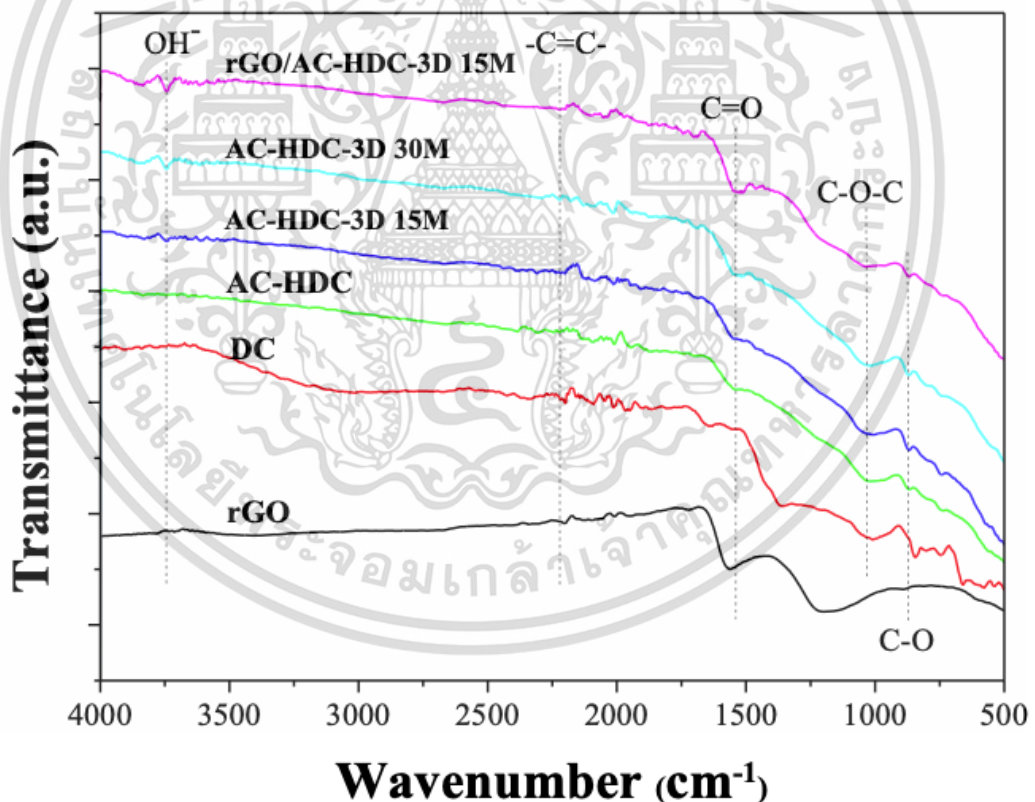


รูปที่ 4.5 ความละเอียดสูงของสเปกตรัม XPS ของ C1s และ O1s ของ (a, b) rGO, (c, d) DC, (e, f)

AC - HDC และ (g, h) AC - HDC3D15M ตามลำดับ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.6 การวิเคราะห์ FT-IR

รูปที่ 4.6 แสดงสเปกตรัม FT-IR ของตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M จุดสูงสุดของการสั่นของตัวอย่างทั้งหมดปรากฏที่ตำแหน่งประมาณ 4000 ถึง 3450 cm^{-1} ผลลัพธ์เหล่านี้สอดคล้องกับโหมดการยืด O-H ซึ่งมีอยู่เนื่องจากการสั่นของกลุ่มไฮดรอกซิลที่เกิดจาก H₂O บนพื้นผิวโมเลกุล [40, 42, 50] การสั่นสะเทือนสูงสุดที่ประมาณ 2,450–2160 cm^{-1} , 1460–1260 cm^{-1} และ 1,020–1210 cm^{-1} บ่งชี้ถึงการยืดแบบสมมาตรและไม่สมมาตรของพันธะ C=C, C-H และ C-O-C ตามลำดับ จุดสูงสุดของการสั่นสะเทือนปรากฏที่ 840–940 cm^{-1} สำหรับตัวอย่าง DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M แต่ไม่ใช่สำหรับตัวอย่าง rGO นอกจากนี้ การสั่นสะเทือนของแถบความถี่สูงสุดที่ 1,670–1,492 cm^{-1} สำหรับตัวอย่าง rGO และ rGO/AC-HDC-3D15M ซึ่งเป็นผลมาจากการยืด C=O แบบสมมาตร สิ่งนี้แสดงให้เห็นถึงการมีอยู่ของคุณสมบัติ sp² [40, 42, 47] สำหรับโครงสร้าง rGO และยืนยันว่า rGO ได้รับการประกอบอย่างมีนัยสำคัญด้วยวัสดุ rGO/AC-HDC-3D15M

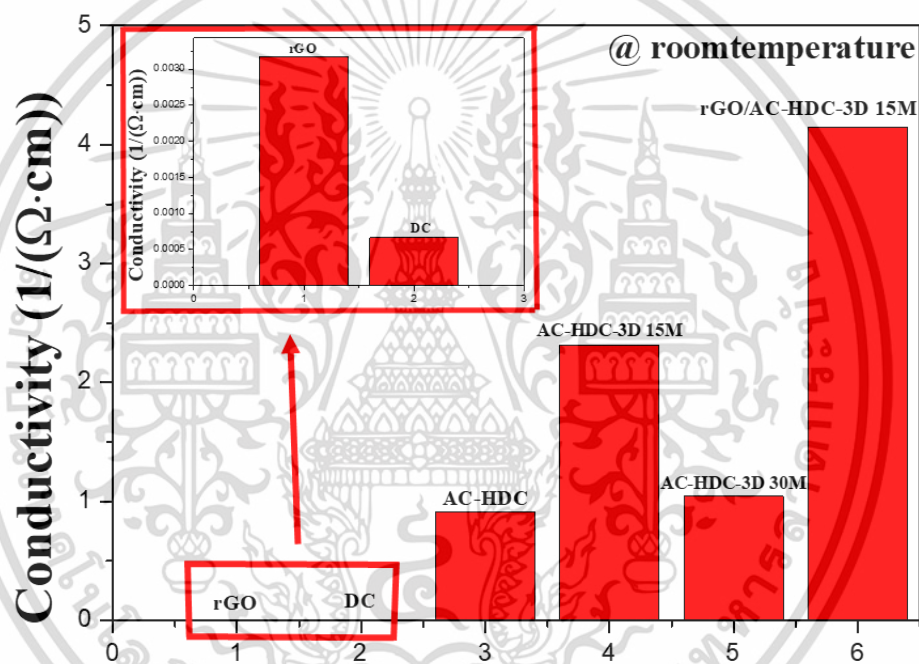


รูปที่ 4.6 สเปกตรัม FTIR ของตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.7 การนำไฟฟ้า

รูปที่ 4.7 แสดงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M สำหรับอิเล็กโทรดทำงานที่อุณหภูมิห้องจากการวัดเอฟเฟกต์ฮอลล์ รูปนี้แสดงให้เห็นว่าค่าการนำไฟฟ้าของสารละลาย AC-HDC, AC-HDC-3D15M และ AC-HDC-3D30M อยู่ที่ 0.915, 2.318 และ 1.046 ($1/\Omega\text{cm}$) ตามลำดับ ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ rGO และ DC ดิบซึ่งเป็นวัสดุผงชั้นจำนวนมากที่ได้จากสารละลายเคลือบบนพื้นผิวแก้วตามด้วยการอบแห้งคือ 3.1×10^{-3} และ 6.68×10^{-4} ($1/\Omega\text{cm}$) ตามลำดับ เนื่องจากในการแทรกของรูปที่ 9 อิเล็กโทรดสารละลาย rGO / AC - HDC - 3D15M มีค่าการนำไฟฟ้าสูงสุด โดยยืนยันว่า rGO ทำงานร่วมกับตัวอย่าง AC - HDC - 3D15M เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า



รูปที่ 4.7 ค่าการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรด rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M ที่อุณหภูมิห้อง

4.2 คุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemical properties) ของคาร์บอนกัมมันต์จากเปลือกทุเรียน

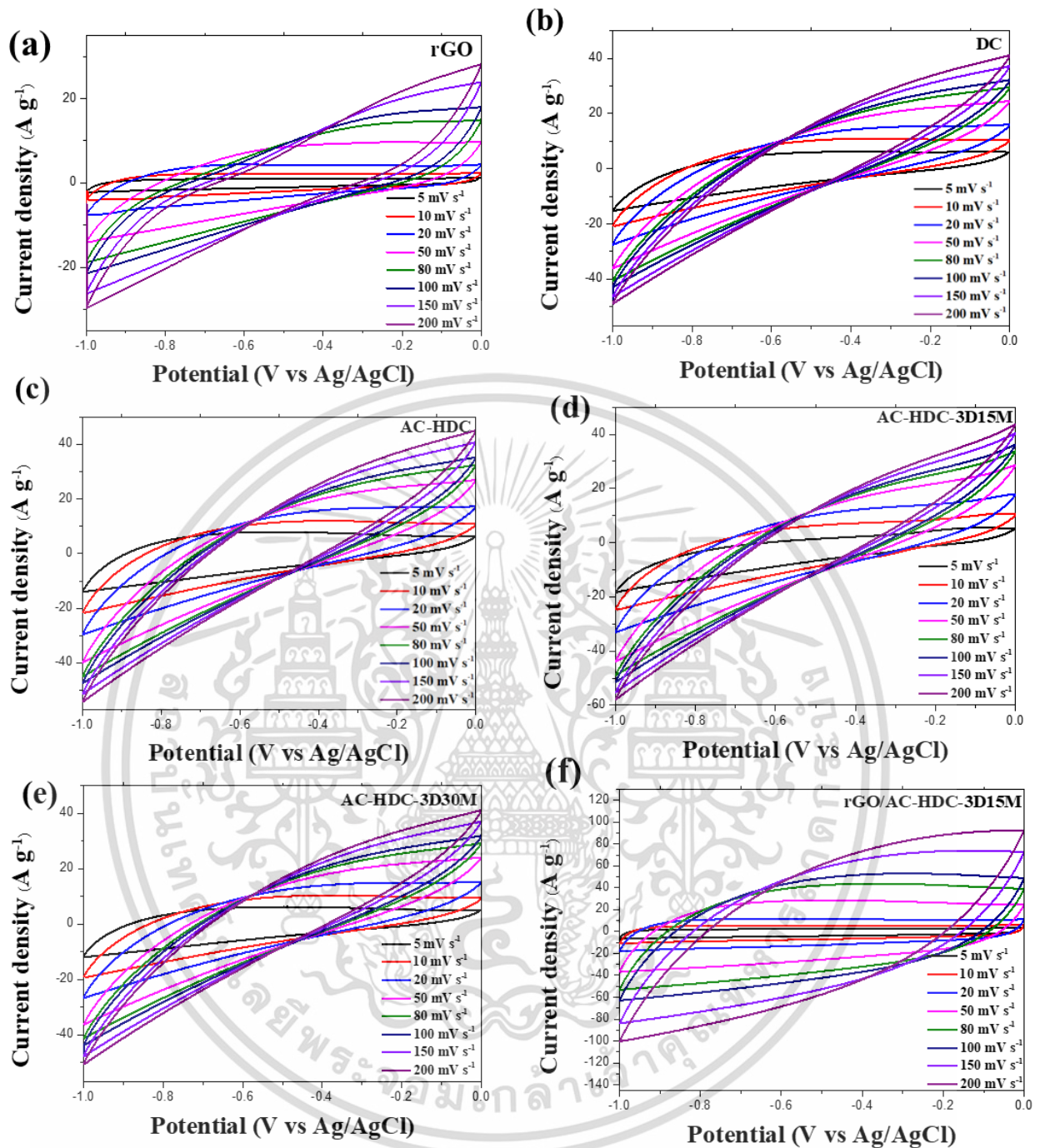
อธิบายด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry : CV) และเทคนิคการอัดและคายประจุไฟฟ้า (Galvanostatic charge-discharge : GCD)

ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M เป็นอิเล็กโทรดที่ใช้งาน ในอิเล็กโทรไลต์แบบน้ำ 3M KOH และ Ag/AgCl ใน 3.0 M HCl เพื่อศึกษาอิเล็กโทรดอ้างอิงและลดแพลทินัมสำหรับอิเล็กโทรดด้าน เส้นโค้ง CV ที่อัตราการสแกน 10 mV/s ที่ศักย์ไฟฟ้าภายในระหว่าง -1.0 V ถึง 0.0 V ของ rGO, DC, AC-HDC, เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M แสดงรูปร่างกึ่งสี่เหลี่ยมผืนผ้าของเส้นโค้ง CV ซึ่งบ่งชี้ปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ของพฤติกรรมแบบคาปาซิทีฟที่เกิดขึ้นที่ส่วนต่อประสานของอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ สิ่งเหล่านี้แสดงให้เห็นว่ามีกลไกการจัดเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุสองชั้น (EDLCs) อยู่

รูปที่ 4.8 (a)–(f) แสดงเส้นโค้ง CV ของอิเล็กโทรดที่ใช้งาน rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M ทำการวัดที่อัตราการสแกนตั้งแต่ 5 ถึง 200 มิลลิโวลต์/วินาที โดยใช้หน้าต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่าง -1.0 V ถึง 0.0 V ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าเส้นโค้ง CV ของอิเล็กโทรดทั้งหมดแสดงความหนาแน่นกระแสที่เพิ่มขึ้นพร้อมอัตราการสแกนที่มากขึ้น รูปร่างสี่เหลี่ยมที่มีพีคดอกซ์ขนาดเล็กแสดงพฤติกรรม EDLC และรูปร่างที่บิดเบี้ยวบ่งบอกถึงพฤติกรรมหลอกคาปาซิเตอร์อันเป็นผลมาจากฟังก์ชันออกซิเจนตกค้าง รูปแบบกึ่งสี่เหลี่ยมของเส้นโค้ง CV ระบุปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ด้วยพฤติกรรมการเก็บประจุจากการโต้ตอบที่ส่วนต่อประสานอิเล็กโทรด/อิเล็กโทรไลต์ ข้อมูลเหล่านี้แสดงพฤติกรรมการจัดเก็บประจุของ EDLC อิเล็กโทรดที่ใช้งานได้ทั้งหมดประกอบด้วยวัสดุแอคทีฟ rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M นำเสนอพฤติกรรม EDLC

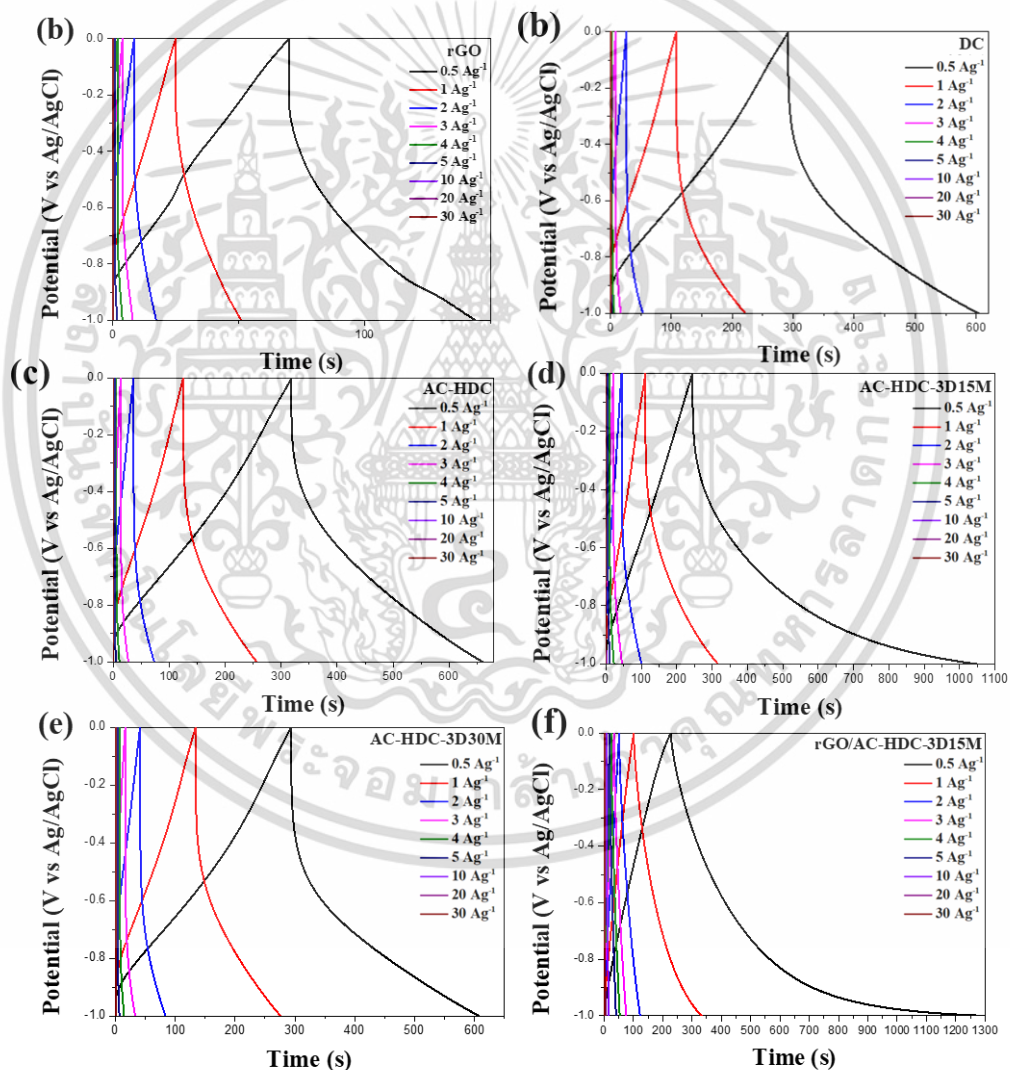
เห็นได้ชัดว่าในรูปที่ 4.8 (f) rGO / AC – HDC – 3D15M ซึ่งเป็นคอมโพสิตของ rGO กับ AC – HDC – 3D15M ที่ถูกบดลูกบอล 3 มิติเป็นเวลา 15 นาที แสดงค่า CV curve ca-pacitive ที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดอื่น สิ่งเหล่านี้แสดงให้เห็นว่าการเตรียม DC สำหรับวัสดุอิเล็กโทรดคอมโพสิตที่มี rGO ภายใต้การบำบัดด้วยความร้อนและการกวดลูกบอล 3 มิติความเร็วสูงเป็นเวลา 15 นาทีสามารถเพิ่มค่า capacitive ของอิเล็กโทรดได้ ค่าการนำไฟฟ้าเหล่านี้ได้รับการปรับปรุงในวัสดุคอมโพสิตเนื่องจากการถ่ายโอนระหว่างกลุ่มควินิน/ไฮโดรควิโนนผ่านวัสดุคาร์บอน



รูปที่ 4.8 เส้นโค้ง CV ที่อัตราการสแกน 5, 10, 20, 50, 80, 100, 150 และ 200 mV/s ของ rGO (a), DC (b), AC-HDC (c), AC-HDC-3D15M (d), AC-HDC-3D30M (e) และ rGO/AC-HDC-3D15M (f) ชั่วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9 แสดงเส้นโค้ง GCD ของตัวอย่าง rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M ที่ประเมินโดย GCD บนหน้าต่างที่เป็นไปได้ระหว่าง -1.0 V ถึง 0.0 V ที่ความหนาแน่นกระแส 0.5 A/g รูปที่ 4.9 (a)–(f) แสดงข้อมูลสำหรับตัวอย่างทั้งหมดที่ความหนาแน่นปัจจุบันตั้งแต่ 0.5 A/g ถึง 30 A/g ตัวอย่างทั้งหมดแสดงเส้นโค้ง GCD ที่มีรูปร่างสามเหลี่ยมเกือบสมมาตร นี่เป็นลักษณะเฉพาะของพฤติกรรมของ EDLC ซึ่งเผยให้เห็นค่าการนำไฟฟ้าสูงของอิเล็กโทรดที่ใช้งาน เห็นได้ชัดว่าในรูปที่ 4.9 (f) ตัวอย่าง rGO/AC-HDC-3D15M แสดงรูปทรงสามเหลี่ยมสำหรับกระแสและการปล่อยที่ช้า นำเสนอเส้นโค้ง GCD ที่ใหญ่ที่สุดด้วย C สูงสุด นี่หมายความว่าอิเล็กโทรด rGO/AC-HDC-3D15M เหมาะสมสำหรับใช้ใน EDLC อิเล็กโทรด rGO / AC - HDC - 3D15M แสดงความจำเพาะที่ดีสำหรับตัวพาประจุใน EDLC



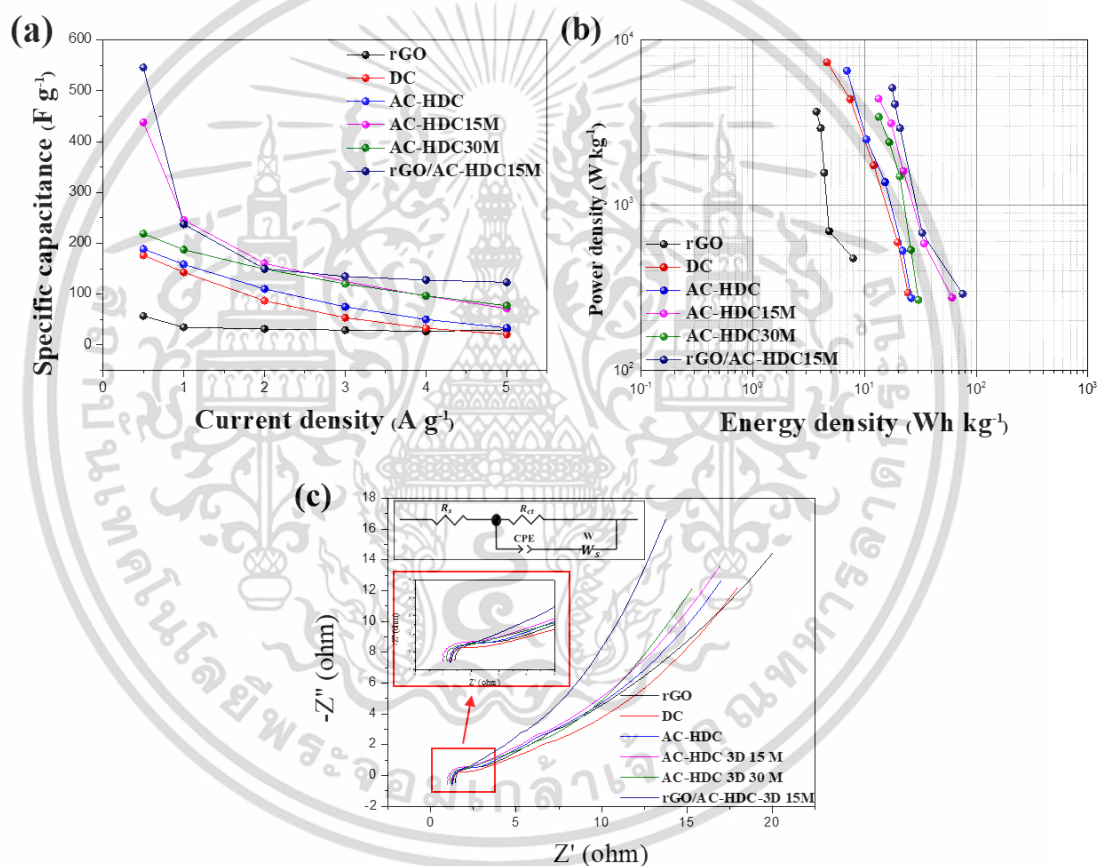
รูปที่ 4.9 เส้นโค้ง GCD ที่มีความหนาแน่นกระแสตั้งแต่ 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20 และ 30 A/g ของ rGO (a), DC (b), AC-HDC (c), AC -HDC-3D15M (d), AC-HDC-3D30M (e) และอิเล็กโทรด rGO/AC-HDC-3D15M (f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 (a) แสดงค่า Cs ที่คำนวณโดยใช้สูตร (1) สำหรับอิเล็กโทรด rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และ rGO/AC-HDC-3D15M จากการวัด GCD ที่ความหนาแน่นกระแส จาก 0.5 ถึง 5 A/g ค่า Cs ของอิเล็กโทรด rGO, DC, AC - HDC และ AC - HDC - 3D30M ลดลงเมื่อความหนาแน่นกระแสเพิ่มขึ้น ค่า Cs ของอิเล็กโทรด rGO / AC - HDC - 3D15M เป็นค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ปรับใช้ทั้งหมด ค่า Cs ที่ 0.5 A/g สำหรับอิเล็กโทรด rGO, DC, AC - HDC, AC - HDC - 3D15M, AC - HDC - 3D30M และ rGO / AC - HDC - 3D15M คือ 57.1776, 176.594, 188.936, 219.015, 438.11, และ 545.78 F/g ตามลำดับ ชั่วไฟฟ้า rGO/AC-HDC-3D15M นำเสนอ Cs สูงสุด การเตรียมวัสดุอิเล็กโทรดคอมโพสิต DC ด้วย rGO ที่ผ่านการบำบัดด้วยความร้อนได้พิภพและการกักตุน 3 มิติความเร็วสูงสำหรับค่า Cs ที่ปรับปรุงแล้ว 15 นาที จากแปลง Ragone ที่แสดงในรูปที่ 4.10 (b) Pd กับ Ed จะถูกพล็อตตามสูตร (2) และ (3) ที่ความหนาแน่นกระแส 0.5-5 A/g Pd ของอิเล็กโทรด AC-HDC-3D30M เพิ่มขึ้นจาก 267.091 W/kg เป็น 2400.555 W/kg ในขณะที่ความหนาแน่นของพลังงานลดลงจาก 30.418 Wh/kg เป็น 13.453 Wh/kg ยิ่งไปกว่านั้น Pd ในอิเล็กโทรด AC-HDC-3D15M เพิ่มขึ้นจาก 275.478 W/kg เป็น 2408.15 W/kg ในขณะที่ Ed ลดลงจาก 60.834 W/kg เป็น 13.378 W/kg ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าทั้ง Ed และ Pd ของอิเล็กโทรด rGO / AC - HDC - 3D15M นั้นสูงกว่าอิเล็กโทรด AC - HDC - 3D15M และ AC - HDC - 3D30M Pd ของอิเล็กโทรด rGO/AC-HDC-3D15M เพิ่มขึ้นจาก 260 W/kg เป็น 5,000 W/kg ในขณะที่ Ed ลดลงจาก 60 W/kg เป็น 13 W/kg Ed และ Pd ของอิเล็กโทรด rGO / AC - HDC - 3D15M แสดงค่าที่ดีตามแผน Ragone แผน Nyquist แสดงความต้านทานภายในของ จลนพลศาสตร์การปลดปล่อยประจุและการแพร่กระจายไอออนของอิเล็กโทรไลต์ ข้อมูล EIS ถูกนำมาใช้สำหรับแผน Nyquist ซึ่งเป็นแผนขององค์ประกอบจริงและจินตภาพของอิมพีแดนซ์ โครงสร้าง Nyquist มีสองส่วน: ครึ่งวงกลมในบริเวณความถี่สูงและส่วนเชิงเส้นเฉียงที่ความถี่ต่ำ แผนภาพนี้ใช้เป็นวงจรสมมูลที่มีความต้านทานอนุกรมเท่ากัน (R_s) ความต้านทานการถ่ายโอนประจุ (R_{ct}) ความจุไฟฟ้าสองชั้น (CPE) องค์ประกอบ Warburg (W) และองค์ประกอบเฟสคงที่ R_s ซึ่งเป็นค่าของจุดตัดของกราฟ Nyquist บนแกนของส่วนประกอบจริงในพื้นที่ความถี่สูง คือผลรวมของความต้านทานช้าของอิเล็กโทรไลต์ ความต้านทานของวัสดุแอคทีฟภายใน และความต้านทานการสัมผัสของวัสดุแอคทีฟและโดย นักสะสมปัจจุบัน R_{ct} เกิดขึ้นจากกระบวนการถ่ายโอนประจุและเกี่ยวข้องกับกระบวนการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าสองชั้นและฟาราเดอิก R_{ct} และ CPE ถูกนำเสนอในพื้นที่ครึ่งวงกลมในโครงสร้าง ความต้านทานของ Warburg สอดคล้องกับการแพร่กระจายของไอออนที่ความถี่ต่ำที่มุม 45° เฟสคงที่ที่ถูกอธิบายว่าเป็นการกระจายเชิงพื้นที่ของค่าความจุ แผน Nyquist ของอิเล็กโทรด rGO, DC, AC - HDC, AC - HDC - 3D15M, AC - HDC - 3D30M และ rGO / AC - HDC - 3D15M ที่ความถี่ตั้งแต่ 100 kHz ถึง 0.01 Hz แสดงในรูปที่ 4.10 (c) และส่วนแทรก ที่ความถี่ต่ำกว่า แผนภาพ Nyquist ของตัวอย่างทั้งหมดแสดงให้เห็นว่าส่วนจินตภาพของอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ผลลัพธ์เหล่านี้ยืนยันพฤติกรรมการเก็บประจุของวัสดุอิเล็กโทรด ที่ความถี่สูงกว่า แผนภาพของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งหมดแสดงเส้นโค้งครึ่งวงกลมเล็กๆ แทนค่าคงที่ของเวลา ซึ่งเกี่ยวข้องกับ การถ่ายโอนประจุไฟฟ้าในวัสดุอิเล็กโทรดจากกระบวนการฟาราเดอิก เส้นโค้งในรูปนี้แสดงว่า AC-HDC-3D15M มี R_s ต่ำที่สุด 1 โอห์ม นอกจากนี้ ส่วนโค้งในภูมิภาคความถี่สูงสำหรับอิเล็กโทรด rGO / AC - HDC - 3D15M นำเสนอ re-gion ครึ่งวงกลมที่เล็กที่สุด นี่หมายความว่า rGO ที่หมักด้วย AC - HDC - 3D15M (ในฐานะ rGO / AC - HDC - 3D15M) มีส่วนทำให้กระบวนการถ่ายโอนประจุในชั้นไฟฟ้าสองชั้นและกระบวนการถ่ายโอนประจุของ Faradaic สำหรับข้อมูล Warburg สารตั้งต้น rGO/AC-HDC-3D15M แสดงส่วนท้ายด้วยมุม 45 องศา ที่ความถี่ต่ำซึ่งสอดคล้องกับการแพร่กระจายของไอออนขึ้นอยู่กับความถี่ มีการเสนอค่าต่ำสำหรับ R_{ct} ในกลไก EDLC ผลการวิจัยพบว่าอิเล็กโทรด rGO/AC-HDC-3D15M แสดงความจุสูงของพฤติกรรม EDLC สำหรับอุปกรณ์ SC



รูปที่ 4.10 (a) การเปรียบเทียบ C_s โดยการทดสอบ GCD ที่ความหนาแน่นปัจจุบันตั้งแต่ 0.5 ถึง 5 A/g (b) การพล็อต Ragone ที่ความหนาแน่นปัจจุบันตั้งแต่ 0.5 ถึง 5 A/g และ (c) พล็อต Nyquist ในความถี่ ช่วงตั้งแต่ 100 kHz ถึง 0.01 Hz สำหรับอิเล็กโทรด rGO, DC, AC-HDC, AC-HDC-3D15M, AC-HDC-3D30M และอิเล็กโทรด rGO/AC-HDC-3D15M

4.2.1 อุปกรณ์เซลล์เหรียญ

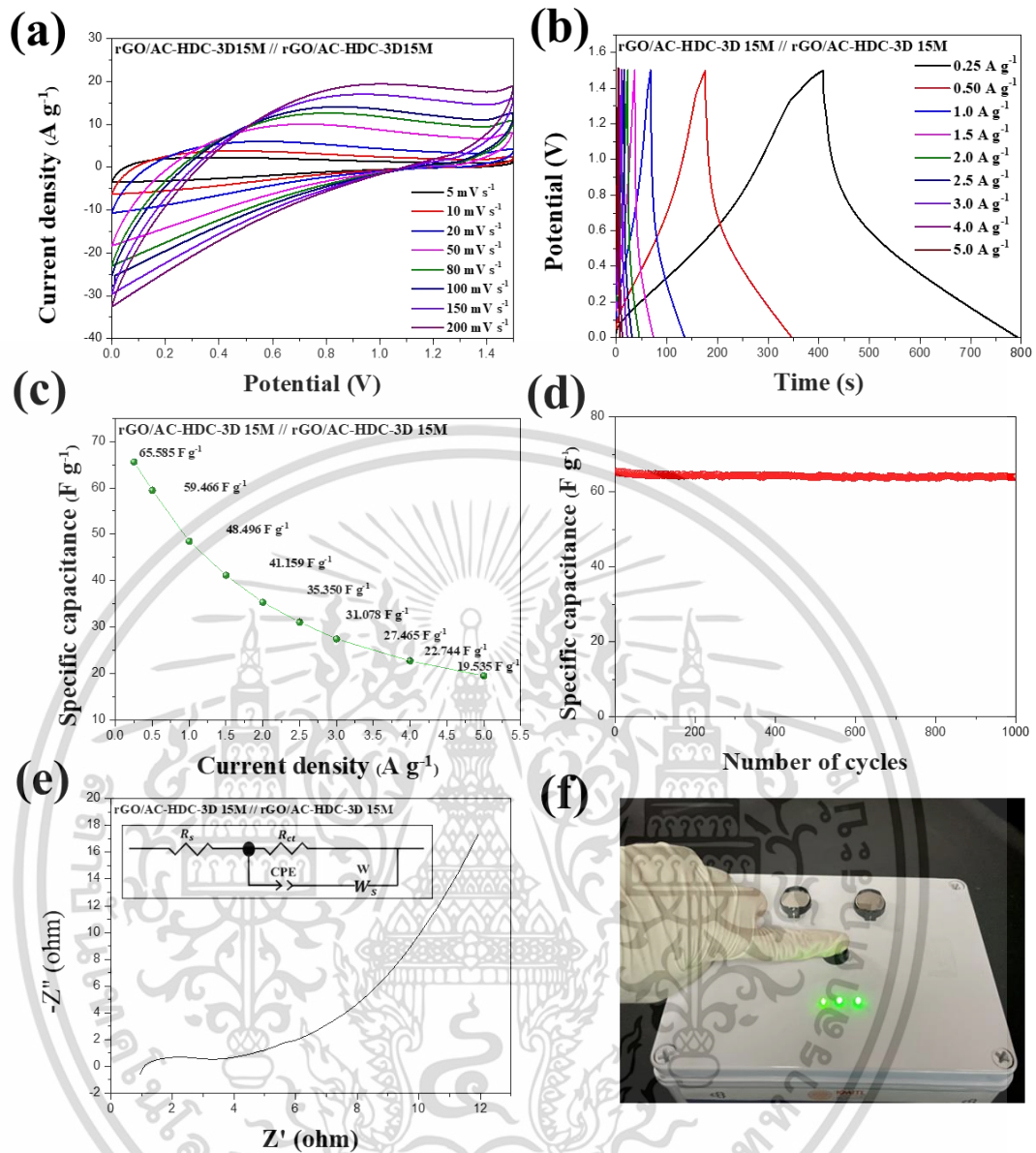
ตัวอย่าง rGO / AC - HDC - 3D15M ถูกใช้ในอุปกรณ์ SC เพื่อสาธิตการใช้งานจริง อุปกรณ์เซลล์แบบ

เหรียญถูกประดิษฐ์โดยใช้วัสดุ rGO / AC - HDC - 3D15M สังเคราะห์เป็นอิเล็กโทรดสำหรับอุปกรณ์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SC ดังแสดงในรูปที่ 4.11 อิเล็กโทรด rGO / AC – HDC – 3D15M แบบสมมาตรเมตริกสำหรับเซลล์แบบเหรียญถูกประดิษฐ์โดยใช้ 3 M KOH อิเล็กโทรไลต์เพื่อเพิ่ม Ed ของอุปกรณ์ ค่า CV คำนวณโดยการแปลงการตอบสนองปัจจุบันที่อัตราการสแกนจาก 5 mV/s เป็น 200 mV/s รูปที่ 4.11(a) แสดงเส้นโค้ง CV ของอุปกรณ์เซลล์แบบเหรียญ rGO/AC-HDC-3D15M ซึ่งคงอยู่ในรูปแบบของรูปทรงสี่เหลี่ยมในอุดมคติในหน้าต่างระหว่าง 0.0 V ถึง 1.5 V รูปที่ 4.11(b) แสดงเส้นโค้ง GCD ของเซลล์แบบเหรียญ อุปกรณ์ที่ความหนาแน่นกระแสตั้งแต่ 0.25 A/g ถึง 5.0 A/g ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าค่า Cs ของอุปกรณ์เซลล์แบบเหรียญ rGO/AC-HDC-3D15M ในอิเล็กโทรไลต์ 3 M KOH คือ 65.585 F/g ที่ 0.25 A/g และ 48.496 F/g ที่ 1.0 A/g รูปที่ 4.11(c) แสดงค่า Cs ที่ความหนาแน่นกระแสต่างๆ สำหรับเซลล์แบบเหรียญ rGO/AC-HDC-3D15M//rGO/AC-HDC-3D15M ยิ่งไปกว่านั้น รูปที่ 4.11(d) แสดงการกักเก็บ Cs ที่ยอดเยี่ยมที่ 98.74% หลังจาก 1000 รอบที่ความหนาแน่นกระแส 5.0 A/g รูปที่ 4.11(e) แสดงแผน Nyquist สำหรับเซลล์เหรียญ rGO/AC-HDC-3D15M//rGO/AC-HDC-3D15M SC ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 kHz ถึง 0.01 Hz โคจรเรื่อง Nyquist มีส่วนครึ่งวงกลมในภูมิภาคความถี่สูงและส่วนเชิงเส้นในพื้นที่ความถี่ต่ำ Rs ต่ำสุดคือ 1 โอห์ม รูปที่ 4.11(f) แสดงประสิทธิภาพการจัดเก็บพลังงานของอุปกรณ์ rGO/AC-HDC-3D15M//rGO/AC-HDC-3D15M SC ตามที่ Miao และคณะ [40, 42, 50] วัสดุคาร์บอนแสดงคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และทางกลที่น่าสนใจ และได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางว่าเป็นอิเล็กโทรดซูเปอร์คาปาซิเตอร์ ความจุไฟฟ้าของอิเล็กโทรดคาร์บอนที่สลักด้วยกรดสามารถเข้าใกล้ 5310 mF cm⁻² ที่ความหนาแน่นกระแส 5 mA cm⁻² โดยมีความเสถียรในการรีไซเคิลที่โดดเด่น ซูเปอร์คาปาซิเตอร์แบบสมมาตรแบบโซลิดสเตตทั้งหมดส่งความหนาแน่นพลังงานสูงที่ 4.27 mWh cm⁻³ ที่ความหนาแน่นพลังงานที่ 1.32 W cm⁻³ นอกจากนี้ ซูเปอร์คาปาซิเตอร์แบบสมมาตรนี้ยังแสดงความยืดหยุ่นเชิงกลที่โดดเด่น และความจุยังคงไม่เปลี่ยนแปลงเกือบหลังจากการดัดงอ 1,000 รอบ สิ่งที่น่าสนใจคือมีการนำยูเทคติกอิเล็กโทรไลต์แบบผสมผสานมาใช้เพื่อสร้างชั้น SEI (GHS) ไฮบริดแบบไล่ระดับอินทรีย์/อนินทรีย์บนขั้วบวก Zn ผ่านการสร้างสารเคมีขึ้นใหม่ ในแหล่งกำเนิด ตามที่รายงานโดย Meng และคณะ[40, 42, 50]. ซึ่งส่งผลให้ขั้วบวก Zn มีความเสถียรเป็นพิเศษ โดยมี CE ที่ได้รับการปรับปรุงอย่างมากที่ 99.8% จาก 1200 รอบและความสามารถในการชดเชยสูงที่ 5.57 A h cm⁻² ที่ 5 mA cm⁻² ประสิทธิภาพของแนวทางนี้แสดงให้เห็นได้จากอายุการใช้งานที่ยาวนานมากถึง 22,000 รอบของ Zn//V2O5 เต็มเซลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 (a) เส้นโค้ง CV ที่อัตราการสแกนที่แตกต่างกัน (b) เส้นโค้ง GCD ที่ความหนาแน่นกระแสต่างกัน (c) C_s สำหรับความหนาแน่นกระแสที่แตกต่างกัน (d) การเก็บรักษาแบบวนรอบสำหรับความหนาแน่นกระแส 5 A/g โดยมี GCD ที่ใส่เข้าไป เส้นโค้งหลังจาก 1, 000 รอบ (e) พล็อต Ragone และ (f) รูปภาพของไดโอดเปล่งแสงสีเขียวสามตัวที่ขับเคลื่อนโดยอุปกรณ์เซลล์แบบเหรียญ rGO / AC – HDC – 3D15M // rGO / AC – HDC – 3D15M สองตัวที่เชื่อมต่อเป็นอนุกรม

เซลล์สองเหรียญสามารถจ่ายพลังงานได้เพียงพอในการขับเคลื่อนไดโอดเปล่งแสงสีเขียวสามตัวโดยใช้อุปกรณ์สองตัวที่เชื่อมต่อกันแบบอนุกรม แผ่น Ragone ของอุปกรณ์เซลล์แบบเหรียญ rGO/AC-HDC-3D15M ในอิเล็กโทรไลต์อินทรีย์ 3 M KOH เมื่อเปรียบเทียบกับคาร์บอนที่มีรูพรุนต่างๆ จากเปลือกทุเรียนแสดงไว้ในตารางที่ 2 การเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าอิเล็กโทรด rGO/AC-HDC-3D15M ใน 3 M KOH มี E_d อยู่ที่ 5.123 Wh/kg และ P_d อยู่ที่ 47.289 W/kg

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ถ่านกัมมันต์เปลือกทุเรียน (DC) เตรียมโดยการทำให้แห้ง การทำให้เป็นคาร์บอน และการบำบัดด้วยความร้อนด้วยการกระตุ้นทางเคมีโดย KOH (AC-HDC) มันถูกบำบัดเพิ่มเติมโดยใช้การกักลูกบอล 3 มิติความเร็วสูงด้วยความเร็วการบิด 300 รอบต่อนาที (AC-HDC-3D) rGO ถูกประกอบเข้ากับตัวอย่าง AC - HDC3D (rGO / AC - HDC-3D) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมีไฟฟ้าและสร้างอุปกรณ์ SC แบบสมมาตร ผลการทดลองยืนยันว่ากระบวนการคาร์บอนไนเซชันภายใต้อาร์กอนส่งผลต่อการลดลงของค่าระยะห่าง d ที่เกี่ยวข้องกับพีค XRD ที่เล็กและกว้างกว่าเล็กน้อย ผลลัพธ์ SEM ของตัวอย่าง rGO/AC-HDC-3D แสดงให้เห็นว่าอนุภาคถูกอัดแน่นและกระจายอย่างสม่ำเสมอโดยมีความพรุนที่ดีสำหรับตัวอย่างที่ได้รับการกักลูกบอล 3 มิติเป็นเวลา 15 นาที (rGO/AC-HDC-3D15M) ผลการทดลองพบว่าการบำบัดด้วยความร้อนสามารถเพิ่ม SSA และการกระจายขนาดรูพรุนโดยเฉลี่ยของวัสดุ DC คอมโพสิต rGO กับตัวอย่าง AC - HDC - 3D15M แสดงให้เห็นค่าการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น rGO/AC-HDC-3D15M แสดง SSA สูงสุดที่ 2311 m²/g โดยมีการกระจายขนาดรูพรุนเฉลี่ยสูงสุดที่ 1.88 นาโนเมตร ตัวอย่าง rGO/AC-HDC-3D15M แสดงคุณสมบัติ EDLC ที่ยอดเยี่ยม โดยมี C_s สูงสุดที่ 545.78 F/g, Pd ที่ 260.834 W/kg และ Ed ที่ 60.834 Wh/kg จากแปลง Ragone ที่ความหนาแน่นกระแส 0.5 A/g ค่า Ed และ Pd ของเซลล์แบบเหรียญ rGO/AC-HDC-3D15M คือ 5.123 Wh/kg และ 47.289 W/kg นี้แสดงให้เห็นว่าตัวอย่าง rGO/AC-HDC-3D15M ที่ประมวลผลโดยใช้การกักลูกบอล 3 มิติเป็นเวลา 15 นาทีสามารถนำมาใช้ในอุปกรณ์ SC ที่ใช้งานได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นเพียงการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำคาร์บอนกัมมันต์เป็นวัสดุขั้วไฟฟ้า ทั้งสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีไฟฟ้า กล่าวคือขั้วไฟฟ้าที่เตรียมได้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้จริง ดังนั้นงานวิจัยที่ควรศึกษาต่อคือมุ่งเน้นการเตรียมขั้วไฟฟ้าให้สามารถกักเก็บประจุไฟฟ้าและนำไปประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้จริง

เอกสารอ้างอิง

1. Kötz, R. and M. Carlen, *Principles and applications of electrochemical capacitors*. *Electrochimica acta*, 2000. 45(15-16): p. 2483-2498.
2. Khandelwal, M. and A. Kumar, *One-step chemically controlled wet synthesis of graphene nanoribbons from graphene oxide for high performance supercapacitor applications*. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015. 3(45): p. 22975-22988.
3. Liu, C., et al., *Graphene-based supercapacitor with an ultrahigh energy density*. *Nano letters*, 2010. 10(12): p. 4863-4868.
4. Mahmood, N., et al., *Graphene-based nanocomposites for energy storage and conversion in lithium batteries, supercapacitors and fuel cells*. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014. 2(1): p. 15-32.
5. Mensah-Darkwa, K., et al., *Supercapacitor energy storage device using biowastes: A sustainable approach to green energy*. *Sustainability*, 2019. 11(2): p. 414.
6. Ogata, C., et al., *All-graphene oxide flexible solid-state supercapacitors with enhanced electrochemical performance*. *ACS applied materials & interfaces*, 2017. 9(31): p. 26151-26160.
7. Rasul, S., et al., *Rational design of reduced graphene oxide for superior performance of supercapacitor electrodes*. *Carbon*, 2017. 111: p. 774-781.
8. Wang, M., et al., *All-solid-state reduced graphene oxide supercapacitor with large volumetric capacitance and ultralong stability prepared by electrophoretic deposition method*. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015. 7(2): p. 1348-1354.
9. Teo, E.Y.L., et al., *High surface area activated carbon from rice husk as a high performance supercapacitor electrode*. *Electrochimica Acta*, 2016. 192: p. 110-119.
10. Guo, Y., et al., *Performance of electrical double layer capacitors with porous carbons derived from rice husk*. *Materials Chemistry and Physics*, 2003. 80(3): p. 704-709.
11. Tey, J., et al., *Durian shell-based activated carbon electrode for EDLCs*. *Ionics*, 2016. 22: p. 1209-1216.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Ukkakimapan, P., et al., *Preparation of activated carbon via acidic dehydration of durian husk for supercapacitor applications*. *Diamond and Related Materials*, 2020. 107: p. 107906.
13. Ong, L., et al., *A facile and green preparation of durian shell-derived carbon electrodes for electrochemical double-layer capacitors*. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2012. 22(6): p. 624-630.
14. Bo, Z., et al., *Green preparation of reduced graphene oxide for sensing and energy storage applications*. *Scientific reports*, 2014. 4(1): p. 4684.
15. Rattanaveeranon, S., K. Jiamwattanapong, and N. Jandee, *Effect of Durian Peel Ash Added in Zinc Oxide/Reduced Graphene Oxide Composites Used as a Chemical Sensor for Hydrazine Detection*. *Materials Sciences and Applications*, 2021. 12(2): p. 111-120.
16. Li, W., et al., *Hierarchical porous carbon induced by inherent structure of eggplant as sustainable electrode material for high performance supercapacitor*. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022. 17: p. 1540-1552.
17. Brown, M.J.D.A.B.R. สถาบันทรัพยากรพันธุกรรมพืชนานาชาติ (IPGRI). ISBN 978-92-9043-318-7. [5 october 2023].
18. 2023], C.o.C.P.V.O.o.M.T.F.F.D.o.
19. "งานมหกรรมทุเรียนโลก 2548". ข้าว -- ข้าวและข้อมูลจากส่วนราชการ. กรมประชาสัมพันธ์, ก.ม.พ.ศ.ค.-.-๐.
20. "Thailand's Durian growing areas". *Food Market Exchange*. 2003. [5 october 2023].
21. Baum, D., *Die Durianfrucht [Bearbeiten]*.
22. "ST Foodies Club - Durian King". *The Straits Times*. 2006. [5 october 2023].
23. วิเศษสุวรรณภูมิ, ด.ศ. "แกรฟีนวัสดุ 2 มิติเพื่ออนาคต". ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ. [5 october 2023]. . Available from: Available from: https://www2.mtec.or.th/th/emagazine/admin/upload/302_65.pdf
24. Bhuyan, M.S.A., et al., *Synthesis of graphene*. *International Nano Letters*, 2016. 6: p. 65-83.
25. Neto, A.C., et al., *The electronic properties of graphene*. *Reviews of modern physics*, 2009. 81(1): p. 109.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26. Nuamcharoen., P. *Physical properties of reduce graphene oxide/poly (buty-lenesuccinate) composite. The Degree of Master of Science Program in Petro Chemistry and Polymer Science, Chulalongkorn University, 2015. [5 october 2023]*
Available from: [http:// cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/63502](http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/63502)
27. Shin, Y.C., M.S. Dresselhaus, and J. Kong, *Preparation of Graphene with Large Area*, in *Carbon Nanotubes and Graphene*. 2014, Elsevier. p. 39-76.
28. Aslanidis, E., *Nanoparticle Sensor Arrays on Flexible Substrates*. 2021.
29. Hummers Jr, W.S. and R.E. Offeman, *Preparation of graphitic oxide*. *Journal of the american chemical society*, 1958. 80(6): p. 1339-1339.
30. Singh, V., et al., *Graphene based materials: past, present and future*. *Progress in materials science*, 2011. 56(8): p. 1178-1271.
31. Chua, C.K. and M. Pumera, *Chemical reduction of graphene oxide: a synthetic chemistry viewpoint*. *Chemical Society Reviews*, 2014. 43(1): p. 291-312.
32. Thuesobat., T., *Preparation and electrocatalytic activity for ethanol oxidation of Pt-TiO₂/graphene composite nanofibers for direct ethanol fuel cell application. The Degree of Master of Science Program in Ceramic Technology, Chulalongkorn University, 2016. [5 october 2023]*.
33. Thongsamrit., W., *Electrical properties and NH₃ gas sensing of MoO₃ microstructures doped with graphene oxide. The Bachelor of Science Program in Physics, Ubon Ratchathani University, 2017.*
34. Karaphun, A., et al., *The influence of annealing on a large specific surface area and enhancing electrochemical properties of reduced graphene oxide to improve the performance of the active electrode of supercapacitor devices*. *Materials Science and Engineering: B*, 2021. 264: p. 114941.
35. Wannasen, L., et al., *Enhanced Electrochemical Performance of Sugarcane Bagasse-Derived Activated Carbon via a High-Energy Ball Milling Treatment*. *Nanomaterials*, 2022. 12(20): p. 3555.
36. Basu, P., et al., *One-pot hydrothermal preparation of Cu₂O-CuO/rGO nanocomposites with enhanced electrochemical performance for supercapacitor applications*. *Applied Surface Science*, 2018. 449: p. 474-484.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

37. Kotutha, I., et al., *Electrochemical properties of rGO/CoFe₂O₄ nanocomposites for energy storage application*. Ionics, 2019. 25: p. 5401-5409.
38. Lee, B.S., et al., *Structural properties of reduced graphene oxides prepared using various reducing agents*. Carbon letters, 2015. 16(4): p. 255-259.
39. Mohamed, M.A., et al., *A novel one-pot facile economic approach for the mass synthesis of exfoliated multilayered nitrogen-doped graphene-like nanosheets: new insights into the mechanistic study*. Physical Chemistry Chemical Physics, 2019. 21(25): p. 13611-13622.
40. Phrompet, C., C. Sriwong, and C. Ruttanapun, *Mechanical, dielectric, thermal and antibacterial properties of reduced graphene oxide (rGO)-nanosized C3A/H6 cement nanocomposites for smart cement-based materials*. Composites Part B: Engineering, 2019. 175: p. 107128.
41. Ramesh, A., M. Jeyavelan, and M.S.L. Hudson, *Electrochemical properties of reduced graphene oxide derived through camphor assisted combustion of graphite oxide*. Dalton Transactions, 2018. 47(15): p. 5406-5414.
42. Saleem, H., M. Haneef, and H.Y. Abbasi, *Synthesis route of reduced graphene oxide via thermal reduction of chemically exfoliated graphene oxide*. Materials Chemistry and Physics, 2018. 204: p. 1-7.
43. Wang, R., et al., *Facile one-step hydrazine-assisted solvothermal synthesis of nitrogen-doped reduced graphene oxide: reduction effect and mechanisms*. RSC advances, 2013. 3(4): p. 1194-1200.
44. Youn, H.C., et al., *High-surface-area nitrogen-doped reduced graphene oxide for electric double-layer capacitors*. ChemSusChem, 2015. 8(11): p. 1875-1884.
45. Jha, P.K., et al., *High-level supercapacitive performance of chemically reduced graphene oxide*. Chem, 2017. 3(5): p. 846-860.
46. Duangchuen, T., et al., *Effect of SnS₂ concentrations on electrochemical properties of SnS₂/RGO nanocomposites synthesized by a one-pot hydrothermal method*. Applied Surface Science, 2019. 487: p. 634-646.
47. Xu, X.-l., et al., *Excellent dielectric properties of poly (vinylidene fluoride) composites based on partially reduced graphene oxide*. Composites Part B: Engineering, 2017. 109: p. 91-100.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

48. Abdelkader, A.M., et al., *Ultraflexible and robust graphene supercapacitors printed on textiles for wearable electronics applications*. 2D Materials, 2017. 4(3): p. 035016.
49. Otari, S.V., et al., *Rapid synthesis and decoration of reduced graphene oxide with gold nanoparticles by thermostable peptides for memory device and photothermal applications*. Scientific reports, 2017. 7(1): p. 10980.
50. Tian, J., et al., *Novel preparation of hydrophilic graphene/graphene oxide nanosheets for supercapacitor electrode*. Applied Surface Science, 2019. 496: p. 143696.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้