

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากใบอ้อย

STUDY ON ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF ACTIVATED CARBON DERIVED  
FROM SUGARCANE LEAVES



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF ACTIVATED CARBON  
DERIVED FROM SUGARCANE LEAVES



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING  
IN NANOMATERIALS ENGINEERING  
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
โครงการพิเศษ

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากใบอ้อย  
Special Project Title Study on Electrochemical Properties of Activated Carbon Derived from Sugarcane leaves  
นักศึกษา นางสาวปณิตตา อुकคกิม่าพันธ์  
รหัสประจำตัว 57110028  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชา นาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
สาขาวิชา วิศวกรรมวัสดุนาโน  
ปีการศึกษา 2560  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร. มยุรี พลเยี่ยม

คณะกรรมการสอบโครงการพิเศษ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร. เบญจพล ตันอู๋	เบญจพล ตันอู๋
ผศ.ดร. ทศพล เมื่อนันท	ทศพล เมื่อนันท
ผศ.ดร. วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์	วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์
ดร. มยุรี พลเยี่ยม	มยุรี พลเยี่ยม

ภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังอนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตารินี พรหมโยธิน)

หัวหน้าภาควิชานาโนวิทยาและนาโนเทคโนโลยี  
วันที่ 15 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไบอ้อย

นักศึกษา

นางสาวปณิตตา อุดคคิมาพันธุ์

รหัสนักศึกษา

57110028

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมวัสดุนาโน

พ.ศ.

2560

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ดร.มยุรี พลเยี่ยม

## บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมหลักของประเทศไทย ปัจจุบันขยะชีวมวลจากอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายมีอยู่เป็นจำนวนมาก ส่วนที่เป็นขานอ้อยถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตน้ำมันเอทานอลและน้ำมันไบโอดีเซล เป็นอาหารสัตว์ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามส่วนที่เป็นไบอ้อยมีเหลืออยู่เป็นจำนวนมากถูกกำจัดโดยการเผาทิ้งโดยไม่ได้ถูกนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์อีกทั้งยังสร้างมลพิษทางอากาศอีกด้วย ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จึงได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากไบอ้อยและศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมีและการประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับไบอ้อยและใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด การผลิตถ่านกัมมันต์จากไบอ้อยประกอบด้วย 2 ขั้นตอนได้แก่กระบวนการคาร์บอนไนเซชันและกระบวนการกระตุ้นด้วยวิธีกายภาพด้วยไอน้ำ โดยจะศึกษาหาเงื่อนไขของกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและกระบวนการกระตุ้นที่เหมาะสมที่สุด ตัวแปรที่ศึกษาคือ อุณหภูมิการคาร์บอนไนเซชัน (400 500 และ 600 องศาเซลเซียส) และอุณหภูมิในการกระตุ้น (800 850 และ 900 องศาเซลเซียส) ผลการทดลองพบว่าถ่านชาร์ที่ทำ การคาร์บอนไนเซชันที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีพื้นที่ผิวมากที่สุด 222 ตารางเมตรต่อกรัม และเมื่อนำถ่านชาร์นั้นไปกระตุ้นด้วยไอน้ำเพื่อสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์ พบว่าที่อุณหภูมิกระตุ้น 850 องศาเซลเซียส ถ่านกัมมันต์มีค่าพื้นที่ผิวมากที่สุด 1,104 ตารางเมตรต่อกรัม แต่อย่างไรก็ตามว่า ถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิกระตุ้น 800 องศาเซลเซียส ให้ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าจำเพาะสูงสุด 14 ฟารัดต่อกรัม จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไบอ้อยสามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์ได้และถ่านกัมมันต์แสดงสมบัติการเก็บประจุ อย่างไรก็ตามการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของถ่านกัมมันต์กับค่าการเก็บประจุไฟฟ้าจำเพาะนั้น นอกเหนือจากค่าพื้นที่ผิวแล้ว จำเป็นต้องพิจารณาสมบัติของรูพรุนและค่าการนำไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ประกอบด้วย

Thesis Title	Study on Electrochemical Properties of Activated Carbon Derived from Sugarcane leaves
Student	Miss Pundita Ukkakimapan
Student ID	57110028
Degree	Bachelors of Engineering
Major	Nanomaterial Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Winadda Wongwiriyanpan
Thesis Co-Advisor	Dr. Mayuree Phonyiem

## Abstract

The sugarcane and sugar industry are one of the main industry of Thailand. Nowadays, there is a large excess of biomass waste from sugarcane and sugar industry. Bagasse is used in various applications, for example, as fuel of electricity production, as raw material for ethanol and biodiesel production and as a pet food. However, a lot of sugar cane leaves (SCL) was burnt without further application, releasing harmful gases and causing air pollution. Therefore, this special project has proposed a value-added and potential use of SCL as a raw material of activated carbon (AC) and its supercapacitor application. The synthesis of AC from SCL consists of two steps; carbonization and physical activation with steam. The synthesis condition was optimized by varying carbonization temperature (400, 500 and 600°C) and activation temperature (800, 850 and 900°C). It was found that the charcoal carbonized at 500°C shows the highest surface area of 222 m<sup>2</sup>/g. The 500°C-charcoal was used further for steam activation. It was found that properties of ACs depend on activation temperature. The AC activated at 850°C shows the highest surface area of 1,104 m<sup>2</sup>/g, while the AC activated at 800°C shows the highest specific capacitance of 14 F/g. The above results show a potential use of SCL as a precursor of AC and the SCL-derived AC show electrochemical properties of supercapacitor electrode. However, to correlate AC properties and specific capacitance values, not only surface area but the pore structure and conductivity of AC must be considered.

## กิตติกรรมประกาศ

ในลำดับแรกข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ และดร.มยุรี พลเยี่ยม ที่ให้คำปรึกษา ดูแลให้ความช่วยเหลือ แก้ไขข้อจุดที่บกพร่อง และสนับสนุนมาโดยตลอดระยะเวลาในการทำการวิจัย หากไม่ได้รับคำปรึกษาของ ผศ.ดร.วินัดดา วงศ์วิริยะพันธ์ และดร.มยุรี พลเยี่ยม งานวิจัยฉบับนี้อาจไม่ได้เป็นไปโดยราบรื่นอย่างที่ควร

ขอขอบพระคุณประธานในการสอบของข้าพเจ้า รศ.ดร. เบญจพล ต้นอู่ ประธานกรรมการสอบในครั้งนี้ตลอดจนการให้ข้อเสนอแนะและแนวทางในการทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณกรรมการในการสอบของข้าพเจ้า ผศ.ดร. ทศพล เมลืองนนท์ ที่ให้เกียรติเป็นกรรมการในการในการสอบขอข้าพเจ้าในครั้งนี้ อีกทั้งยังให้ข้อเสนอแนะเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงและแก้ไขงานวิจัยของข้าพเจ้าต่อไป

ขอขอบพระคุณ รศ. ประภาช อุคคกิมมาพันธ์ นางจีระวรรณ อุคคกิมมาพันธ์ และครอบครัว อุคคกิมมาพันธ์ ทุกคนที่ช่วยสนับสนุนส่งเสริม เป็นกำลังใจ อบรมและเลี้ยงดูข้าพเจ้ามาเป็นอย่างดี และยังช่วยให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำงานวิจัยตลอดมา

ขอขอบพระคุณ นายวิศิษฐ์พงศ์ ยอดศรี จากศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่คอยช่วยเหลือดูแลข้าพเจ้าในการฝึกฝนให้ข้าพเจ้ามีความรู้ความชำนาญ ตลอดจนช่วยเหลือทางด้านเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลการทำการวิจัย

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่ทำให้ข้าพเจ้าได้เข้ามาศึกษาหาความรู้ตลอดระยะเวลา 4 ปี ที่ได้ศึกษาอยู่ ณ ที่แห่งนี้

ปัทมา อุคคกิมมาพันธ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ii
กิตติกรรมประกาศ .....	iii
สารบัญ .....	iv
สารบัญภาพ .....	vi
สารบัญตาราง .....	ix
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ .....	2
1.3 สมมติฐานงานวิจัย .....	2
1.4 ขอบเขตการดำเนินการ .....	2
1.5 แผนการดำเนินงาน .....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ .....	5
2.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด .....	5
2.2 ส่วนประกอบของตัวเก็บประจุยิ่งยวด .....	5
2.3 ประเภทและหลักการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด .....	8
2.4 ปัจจัยที่มีความสำคัญกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด .....	14
2.5 การสร้างอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิด EDLC .....	14
2.6 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) .....	17
2.7 การนำไปใช้งานของถ่านกัมมันต์ .....	20
2.8 กระบวนการในการผลิตถ่านกัมมันต์ .....	20
2.9 เครื่องมือสำหรับการตรวจวัดและวิเคราะห์ .....	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....	35
3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทำการทดลอง .....	35

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 การผลิตถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย.....	35
3.3 การทดสอบสมบัติไฟฟ้าเคมีของถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย .....	38
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน .....	42
4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis : TGA).....	43
4.2 การวิเคราะห์ธาตุ CHN (CHN analysis) .....	44
4.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน .....	44
4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอนด้วยเทคนิครามานสเปคโตรสโคปี.....	48
4.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	50
4.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน .....	56
4.7 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย .....	59
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	68
5.1 สรุปผลงานวิจัย.....	68
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	69
บรรณานุกรม .....	70
ภาคผนวก .....	72
ประวัติผู้เขียน .....	81

# สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงการเก็บและการคายประจุไฟฟ้าระหว่างแบตเตอรี่ และ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบเคมี ..... 9
2.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Specific power และ Specific energy ของตัวเก็บประจุยิ่งยวด กับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดอื่น..... 9
2.3	แผนภาพแสดงการแยกชนิดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าโดยทั่วไป ..... 10
2.4	รูปแบบของเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz model)..... 12
2.5	รูปแบบรูพรุนทรงกระบอกและลักษณะการกระจายตัวของค่าการเก็บประจุภายในรูพรุน และ วงจรสมมูลการเพิ่มขึ้นของความต้านทานที่ลึกเข้าไปภายในรู..... 12
2.6	(a) ตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิด EDLC ,(b) ลักษณะทั่วไปของศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อม ระหว่างขั้วไฟฟ้า ที่ถูกชาร์จ ,(C) วงจรสมมูลของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ..... 16
2.7	โครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์..... 18
2.8	ลักษณะและขนาดของรูพรุนที่แบ่งตาม IUPAC ..... 19
2.9	ตัวอย่างขั้นตอนการวัดโครงสร้างรูพรุนด้วยเทคนิค BET ..... 19
2.10	สัดส่วนการนำไปใช้งานของถ่านกัมมันต์ ..... 20
2.11	ภาพแสดงลำดับขั้นตอนการกระตุ้น ..... 23
2.12	แผนภาพแสดงกระบวนการในการผลิตถ่านกัมมันต์ ..... 23
2.13	ส่วนประกอบภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ..... 25
2.14	แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน ..... 27
2.15	หลักการและขั้นตอนในการทำงานของเครื่องมือวิเคราะห์ ..... 28
2.16	เครื่อง Raman spectroscopy (Thermo Scientific DXR SmartRaman) ..... 28
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างปริมาตร ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) และความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ ) ของ Adsorption-desorption isotherm [17] ..... 29
2.18	เครื่อง FTIR PerkinElmer รุ่น Spectrum Two ..... 30
2.19	เครื่อง Metrohm AUTOLAB potentiostat ..... 31
2.20	ตัวอย่างของกราฟ CV ของขั้วที่อนาโนคาร์บอน ..... 31
2.21	ตัวอย่างของกราฟ CD ของขั้วที่อนาโนคาร์บอน ..... 32
2.22	ตัวอย่างของกราฟ EIS ของขั้วที่อนาโนคาร์บอน ..... 33
3.1	ภาพจำลองกระบวนการคาร์บอนในเซชันไบอ้อย ..... 36
3.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและ เวลาในกระบวนการคาร์บอนในเซชัน ..... 36
3.3	แผนภาพขั้นตอนการคาร์บอนในเซชัน ..... 37
3.4	ภาพจำลองกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำของถ่านชาร์ ..... 38

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 ภาพแสดงขั้วไฟฟ้าที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่เงื่อนไขต่างๆแปะลงบนแผ่นสแตนเลส.....	39
3.6 อุปกรณ์ขั้วไฟฟ้าถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย .....	40
3.7 ภาพแสดงการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์.....	40
3.8 แผนผังสรุปรงาน.....	41
4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงจาก การสลายตัวทาง ความร้อนขององค์ประกอบในไบอ้อยด้วยเทคนิค TGA .....	43
4.2 แสดงการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านชาร์ .....	45
4.3 กราฟแสดงถึงการกระจายตัวของรูพรุนและขนาดของรูพรุน .....	46
4.4 แสดงการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์ .....	47
4.5 กราฟแสดงการกระจายตัวและขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ .....	48
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรามานชิพกับความเข้มแสง.....	49
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรามานชิพและความเข้มแสงของการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที .....	50
4.8 ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของถ่านชาร์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 400°C.....	51
4.9 ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของถ่านชาร์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 500°C.....	51
4.10 ลักษณะทางสัญญาณวิทยาของถ่านชาร์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C.....	52
4.11 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800°C กำลังขยาย 20000X.....	53
4.12 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800°C กำลังขยาย 5000X .....	53
4.13 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850°C กำลังขยาย 20000X .....	54
4.14 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850°C กำลังขยาย 5000X .....	54
4.15 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C กำลังขยาย 20000X .....	55
4.16 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C กำลังขยาย 5000X .....	55
4.17 การวิเคราะห์โครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อยที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วย ไอน้ำที่อุณหภูมิ 800°C โดยมีอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที .....	56
4.18 การวิเคราะห์โครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อยที่ผ่านกระบวนการ กระตุ้นด้วย ไอน้ำที่อุณหภูมิ 850°C โดยมีอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที .....	57
4.19 การวิเคราะห์โครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อยที่ผ่านกระบวนการ .....	58
4.20 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บการเก็บประจุไฟฟ้า ของอุปกรณ์ที่ความ ต่างศักย์ไฟฟ้า 5 mV/s .....	59

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บการเก็บประจุไฟฟ้า ของอุปกรณ์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 mV/s .....	60
4.22 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บการเก็บประจุไฟฟ้า .....	60
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอัดและคายประจุ กับความต่างศักย์ของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 800°C โดยควบคุมการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที .....	62
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอัดและคายประจุ กับความต่างศักย์ของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 850°C โดยควบคุมการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที .....	62
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอัดและคายประจุ กับความต่างศักย์ของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 850°C โดยควบคุมการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที .....	63
4.26 กราฟเปรียบเทียบเงื่อนไขในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800°C 850°C และ 900°C โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาทีของความสัมพันธ์ระหว่างการอัด และคายประจุไฟฟ้า กับความต่างศักย์.....	63
4.27 กราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเงื่อนไขการกระตุ้นที่ 800°C ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที .....	65
4.28 กราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเงื่อนไขการกระตุ้นที่ 850°C ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที .....	65
4.29 กราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเงื่อนไขการกระตุ้นที่ 900°C ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที .....	66
4.30 กราฟการเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของอุณหภูมิในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 800°C, 850°C และ 900°C ที่มีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที .....	66

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาการทำวิจัย .....	4
2.1 แสดงตารางเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวของวัสดุต่างๆ และค่าการเก็บประจุของ แต่ละวัสดุ .....	7
2.2 ตารางสรุปการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคนิคการกระตุ้นแต่ละชนิด .....	24
3.1 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ .....	38
4.1 เทคนิคการวิเคราะห์และข้อมูลที่ได้รับ .....	42
4.2 แสดงปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนก่อนและหลังกระบวนการคาร์บอนเซชัน .....	44
4.3 ตารางแสดงค่าพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C และ 600°C ตามลำดับ .....	45
4.4 ตารางแสดงค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 800°C, 850°C และ 900°C ตามลำดับ .....	47
4.5 ตารางแสดงอัตราส่วนของ $I_D/I_G$ ของตัวอย่างที่เงื่อนไขที่ควบคุมการไหล ของน้ำ 3 รอบ ต่อหน้าที่ .....	50
4.6 แสดงค่าร้อยละการผลิตของถ่านชาร์ .....	52
4.7 แสดงผลค่าการเก็บประจุไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของขั้วไฟฟ้า ถ่านกัมมันต์จาก ไบอ้อย .....	61
4.8 ตารางแสดงค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ .....	64
4.9 ตารางสรุปผลค่าความต้านทานใน และค่าความต้านทานในการถ่ายโอนประจุไฟฟ้า ของอุปกรณ์ .....	67
5.1 ตารางสรุปผลค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ .....	68

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ประเทศไทยมีพื้นที่ทั้งหมด 51.31 เฮกเตอร์ [1] เป็นประเทศที่ยึดถือการเกษตรกรรมเป็นเวลายาวนาน มีพื้นที่การเกษตรถึง 46.5 เปอร์เซ็นต์ [2] หนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศคือ อ้อย อ้อยเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมน้ำตาลที่มีความสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศและการส่งออก จากการศึกษาพบว่าหลังจากกระบวนการผลิตอ้อยและน้ำตาลจะเหลือขานอ้อยและใบอ้อย โดยมีปริมาณต่อปีคิดเป็น 28 ล้านตันและ 17 ล้านตันตามลำดับ ซึ่งขานอ้อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการผลิตไฟฟ้า เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเอทานอลและไบโอดีเซล หรือใช้เป็นอาหารสัตว์เป็นต้น ทำให้ปริมาณขานอ้อยสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อได้เกือบทั้งหมด แต่สำหรับใบอ้อยแล้วยังมีการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไม่มากนักทำให้ปริมาณที่เหลือหลังจากนำไปใช้ประโยชน์แล้วยังมีจำนวนมากถึง 15 ล้านตันต่อปี ดังนั้นการนำใบอ้อยที่เหลือใช้เหล่านี้มาทำให้เกิดประโยชน์และเพิ่มมูลค่าจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น[3]

อุปกรณ์ตัวเก็บเก็บพลังงานที่ใช้งานทั่วไปในปัจจุบันที่สำคัญได้แก่ แบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) และตัวเก็บประจุ (Capacitor) ซึ่งแบตเตอรี่ประสบปัญหาที่สำคัญคือ ความหนาแน่นกำลังต่ำ จำนวนครั้งที่สามารถชาร์จไฟใหม่ ไม่คงทน มีอายุการใช้งานสั้น ส่วนตัวเก็บประจุ มีปัญหาด้านความหนาแน่นพลังงานต่ำ ราคาแพง ปัญหาเรื่องขยะที่ทลายยาก เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยข้อจำกัดดังกล่าว จึงทำให้มีการพัฒนาอุปกรณ์กักเก็บพลังงานประเภทตัวเก็บประจุยิ่งยวด ซึ่งมีข้อได้เปรียบ คือ มีค่าความหนาแน่นพลังงานและกำลังที่สูง โดยมีค่าความหนาแน่นพลังงานที่สูงกว่าตัวเก็บประจุ และมีค่าความหนาแน่นของกำลังที่สูงกว่าแบตเตอรี่ นอกจากนี้ยังสามารถชาร์จไฟใหม่ได้อย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามยังมีความต้องการพัฒนาตัวเก็บประจุยิ่งยวด ให้มีค่าความหนาแน่นของพลังงานได้เท่าเทียมแบตเตอรี่ และประดิษฐ์ได้ในราคาต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

โครงสร้างพื้นฐานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วนได้แก่ ส่วนที่ 1 ขั้วไฟฟ้าทำมา ส่วนที่ 2 อิเล็กโทรไลต์ และส่วนที่ 3 แผ่นเมมเบรนกั้นระหว่างขั้วไฟฟ้า การพัฒนาประสิทธิภาพของตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้น สามารถทำได้โดยเลือกใช้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูง เช่น ถ่านกัมมันต์ ท่อนาโนคาร์บอน และ กราฟีน แต่เนื่องจากท่อนาโนคาร์บอนและกราฟีนมีกระบวนการผลิตที่ความยุ่งยากและปริมาณที่ได้ค่อนข้างน้อย และมีราคาแพง ทำให้วัสดุหลักที่ใช้ในตัวเก็บประจุยิ่งยวดสำเร็จรูปที่วางจำหน่ายในปัจจุบันคือถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก มีการจัดเรียงตัวเป็นโครงข่ายของแผ่นกราฟีนอยู่อย่างไม่เป็นระเบียบ มีรูพรุนขนาดต่างๆ กระจายอยู่ภายในอนุภาคอย่างมหัศจรรย์ มีพื้นที่ผิวภายในสูง ส่งผลให้ถ่านกัมมันต์มีสมบัติการดูดซับที่ดีและนำไปใช้ประโยชน์มากมายหลายด้าน เช่น ใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดสารเจือปนจากของเหลวหรือแก๊ส ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าสำหรับตัวเก็บประจุยิ่งยวด ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากกากทางการเกษตรหลายชนิด เช่น กะลามะพร้าว ขานอ้อย ชังข้าวโพด เป็นต้น [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นโครงการพิเศษนี้จะเสนอการเพิ่มมูลค่าและการใช้ประโยชน์จากไบอ้อย โดยการใช้ไบอ้อยเป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมีและการประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด การผลิตถ่านกัมมันต์จากไบอ้อยประกอบด้วย 2 ขั้นตอนได้แก่ กระบวนการคาร์บอนไนเซชันและกระบวนการกระตุ้นด้วยวิธีกายภาพด้วยไอน้ำ โดยจะศึกษาหาเงื่อนไขของกระบวนการคาร์บอนไนเซชันและกระบวนการกระตุ้นที่เหมาะสมที่สุด หลังจากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้ไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ พื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุนด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดและเทคนิคการดูดซับของก๊าซไนโตรเจน หลังจากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเคมีเพื่อการประยุกต์ใช้เป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการการทำคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) เพื่อผลิตถ่านชาร์จากไบอ้อย
- 1.2.2 เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ (Steam activation) เพื่อเตรียมถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย
- 1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ที่เตรียมจากไบอ้อย
- 1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติทางด้านไฟฟ้าเคมี (Electrochemical properties) ของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อยเพื่อประยุกต์ใช้งานกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor)

## 1.3 สมมติฐานงานวิจัย

- 1.3.1 สารชีวมวลสามารถใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์ได้
- 1.3.2 อุณหภูมิ เวลา และอัตราการไหลของแก๊ส ส่งผลต่อการกระตุ้นให้เกิดความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์

## 1.4 ขอบเขตการดำเนินการ

- 1.4.1 หาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน โดยศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนเซชัน
- 1.4.2 หาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยควบคุมอุณหภูมิ เวลา และอัตราการไหลของพาหะแก๊สที่ใช้ในกระบวนการกระตุ้น
- 1.4.3 ศึกษาสมบัติเชิงความร้อนของไบอ้อย ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมแกรมวิ-เมตริก (Thermogravimetric Analysis ;TGA)
- 1.4.4 ศึกษาลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของด้วยการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy ;SEM)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1.4.5 ศึกษาโครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope ;TEM)
- 1.4.6 วิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ได้จากเงื่อนไขต่างๆ จากการดูดซับโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน
- 1.4.7 ศึกษาการเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวดของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี, กัลวานอสแตติก ชาร์จ-ดิสชาร์จ และอิเล็กโทรเคมีคอลอิมพแดนซ์ สเปกโตรสโคปี

## 1.5 แผนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินงานวิจัยนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่

- 1.5.1 ทบทวนวรรณกรรม
- 1.5.2 ศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการคาร์บอนเซชันของไบอ้อย
- 1.5.3 ศึกษาการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ เวลา และอัตราการไหลของน้ำแตกต่างกันของไบอ้อย
- 1.5.4 วิเคราะห์สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย ได้แก่ สัณฐานวิทยา และโครงสร้างความเป็นรูพรุน
- 1.5.5 ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย



ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาการทำวิจัย

ลำดับแผนงานวิจัย	ระยะเวลา (เดือน)									
	ส.ค. 60	ก.ย. 60	ต.ค. 60	พ.ย. 60	ธ.ค. 60	ม.ค. 61	ก.พ. 61	มี.ค. 61	เม.ย. 61	พ.ค. 61
ทบทวนวรรณกรรม										
ศึกษาอุณหภูมิตั้งใน กระบวนการคาร์บอน เซชันของไบอ้อย										
ศึกษาการกระตุ้น ด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ เวลา และอัตราการ ไหลของแก๊ส										
วิเคราะห์สมบัติ ต่างๆ ได้แก่ สัณฐาน วิทยา และ โครงสร้างความเป็น รูพรุน										
ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้า เคมีของถ่านกัมมันต์ จากไบอ้อย										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการ

### 2.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด

Alessandro Volta ผู้ประดิษฐ์แบตเตอรี่คนแรกในปีคริสตศักราช 1800 โดยมีการใช้แผ่นโลหะที่แตกต่างกัน 2 ชนิด ทำการเรียงสลับกันโดยแต่ละชั้นจะมีกระดาษที่ชุบด้วยน้ำส้มสายชูหรือเกลือ แทรกอยู่ เราเรียกกระดาษที่แทรกอยู่นั้นว่า Volta's pile ยุคก่อนที่มี Volta's pile นั้นนักวิจัยในศตวรรษที่ 18 ได้ใช้ Leden jar เป็นแหล่งที่ใช้สำหรับจ่ายไฟฟ้า โดย Leden jar นี้เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าในยุคแรกๆ โดยใช้โหลแก้วที่เคลือบบริเวณด้านนอกและด้านในด้วยฟอยล์เงินบางๆ ชั้นของฟอยล์ด้านนอกทำหน้าที่เป็นขั้วลบ ซึ่งจะทำให้สามารถชาร์จชั้นฟอยล์ด้านในด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ [5] แบตเตอรี่อย่างแน่นอน แต่แบตเตอรี่ได้ถูกพัฒนามายาวนานและยังมีข้อดีอยู่เวลาที่ใช้ในการประจุที่มาก อย่างไรก็ตามแบตเตอรี่ก็ยังมีใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ด้วยข้อดีของแบตเตอรี่จึงมีการพัฒนาอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดหนึ่งขึ้นเรียกว่า “ตัวเก็บประจุยิ่งยวด” หรือที่เรานิยมเรียกกันว่า ซุปเปอร์คาปาซิเตอร์ (Supercapacitor หรือ Electrochemical capacitor) เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดหนึ่งที่มีสมบัติเด่นในด้านการเก็บพลังงานที่มาก มีน้ำหนักเบาและที่สำคัญที่สุดของตัวเก็บประจุชนิดนี้ คือ สามารถประจุและคายประจุได้อย่างรวดเร็วกว่าอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดอื่น ตัวเก็บประจุไฟฟ้าทั่วไปจะใช้ตัวกันระหว่างขั้วเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก(Dielectric) ซึ่งจะอาศัยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์เหนี่ยวนำประจุให้ผ่านแผ่นกันไดอิเล็กตริก แต่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้นจะใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ภายในสารละลายจะมีไอออนอยู่เป็นจำนวนมากซึ่งเมื่อมีความต่างศักย์ (Voltage) กระทำจะทำให้เกิดการแตกตัวของไอออนที่อยู่ภายในสารละลายทำให้เกิดการเหนี่ยวนำด้วยแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ในการเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นหนึ่งข้อแตกต่างระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้าทั่วไปกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด และเมื่อนำตัวเก็บประจุยิ่งยวดมาเปรียบเทียบกับแบตเตอรี่แล้วในด้านของประสิทธิภาพในการเก็บประจุไฟฟ้า แบตเตอรี่ยังมีความหนาแน่นกำลังที่ต่ำ เนื่องจากการอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีในการแลกเปลี่ยนเลขออกซิเดชันของโลหะที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า จึงเป็นเหตุผลในการใช้เวลานานในการประจุไฟฟ้า และด้วยเป็นการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีจึงส่งผลให้เกิดการเสื่อมสภาพของขั้วไฟฟ้าทำให้มีการเสื่อมสภาพรวดเร็วอายุการใช้งานจึงสั้นตามมา ด้วยข้อเปรียบเทียบที่ได้กล่าวมาข้างต้น ตัวเก็บประจุยิ่งยวดจึงได้รับความสนใจอย่างมากในการพัฒนาเพื่อให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับแบตเตอรี่ในอนาคตข้างหน้า [6]

### 2.2 ส่วนประกอบของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ดังนี้

## 2.2.1 ขั้วไฟฟ้า (Electrode)

นิยมใช้วัสดุที่มีรูพรุนสูง วัสดุสำหรับทำขั้วนิยมนำมาใช้ คือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) สมบัติเด่นที่ทำให้วัสดุคาร์บอนได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นขั้วในตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด ได้แก่ ความเสถียรภาพทางเคมีสูง มีค่าการนำไฟฟ้าที่ดี มีปริมาณมากและมีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูง โดยค่าประสิทธิภาพการเก็บประจุของขั้วจากวัสดุคาร์บอน จะเกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของวัสดุคาร์บอน

วัสดุคาร์บอนที่ถูกนำมาใช้งาน ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม ถ่านกัมมันต์มีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีร่วมกับการมีพื้นที่ผิวที่สูง นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ยังมีข้อดีอีกประการหนึ่ง คือ มีความง่ายต่อการเตรียม เนื่องจากมีสารตั้งต้นของการผลิตมากมาย อีกทั้งกระบวนการผลิตยังให้ประสิทธิภาพที่สูง สามารถเตรียมจากวัสดุตั้งต้นได้หลากหลายชนิด (Lignocellulose, น้ำมันดิบ, ถ่านหิน, ขยะชีวมวล และอื่นๆอีกมากมาย) และการทำให้เกิดพื้นที่ผิวสูงนั้นยังทำได้ง่ายโดยการกระตุ้นทางกายภาพ หรือทางเคมี หรือในบางครั้งอาจทำผสมกันระหว่างทั้งทางกายภาพและทางเคมี ทั้งนี้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เมื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยไนโตรเจน จะอยู่ในช่วง 500 – 3,000 ตารางเมตรต่อกรัม โดยขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้เป็นสารตั้งต้นและวิธีที่ใช้ในการกระตุ้น สามารถควบคุมการกระจายตัวของรูพรุน และขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ด้วยวิธีที่ใช้ในการกระตุ้นและเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

โดยหลักการแล้วเมื่อมีพื้นที่ผิวที่สูงขึ้นจะส่งผลให้มีค่าการเก็บประจุที่สูงขึ้น แต่ในความเป็นจริงนั้นความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่ได้เกิดขึ้นเป็นเส้นตรงเสมอไป ในงานวิจัยหลากหลายชิ้นแสดงให้เห็นว่าค่าการเก็บประจุและพื้นที่ผิวไม่ได้มีแนวโน้มเป็นเส้นตรงโดยเฉพาะวัสดุคาร์บอนที่มีความหลากหลายของรูพรุน ดังนั้นในการเลือกวัสดุสำหรับทำขั้วไฟฟ้าจึงต้องมีการพิจารณาถึงลักษณะการกระจายตัวของรูพรุน วัสดุคาร์บอนตั้งต้น ขนาดไอออนของอิเล็กโทรไลต์ ความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำของพื้นผิว และความสามารถในการเข้าถึงรูพรุน ทั้งนี้ค่าพื้นที่ผิวที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้แนวโน้มได้ แต่ไม่สามารถนำมาใช้เป็นการตัดสินค่าการเก็บประจุได้เสมอไปเนื่องจาก

- (1) ความไม่แม่นยำในการตรวจวัดพื้นที่ผิว เช่น เทคนิค BET ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายนั้น มักที่จะให้ค่าพื้นที่ผิวที่มากเกินไปเนื่องจากเกิดการควบแน่นของแก๊สไนโตรเจนภายในรูแบบไมโครพอร์ส
- (2) วัสดุคาร์บอนตั้งต้นที่แตกต่างกันจะให้ค่าการเก็บประจุที่ต่างกันด้วย เช่น อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของแผ่นเรียบภายใน (Basal carbon) กับขอบ (Edge) ในโครงสร้างของแกรไฟต์เป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเนื่องจากค่าการเก็บประจุที่ขอบมักสูงกว่าบริเวณแผ่นเรียบภายใน
- (3) ในขั้นตอนการกระตุ้นบางขั้นตอน หรือวัสดุคาร์บอนตั้งต้นบางชนิด มีผลทำให้ถ่านกัมมันต์มีการเจือของอะตอมอื่น (ออกซิเจนหรือไนโตรเจน) จำนวนมากเกิดขึ้นในโครงสร้าง โดยอะตอมเจือดังกล่าวส่งผลต่อสมบัติต่างๆของวัสดุคาร์บอนอีกเช่นกัน เช่น ความสามารถในการนำไฟฟ้า การคายประจุด้วยตัวเอง และประสิทธิภาพในระยะยาว
- (4) รูที่มีขนาดใหญ่กว่า 0.5 นาโนเมตรสามารถมีไอออนของสารละลายอิเล็กโทรไลต์แบบมีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous) เข้าถึงได้ แต่ไอออนสามารถเข้าถึงรูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่านั้นได้ ทำให้ไม่เกิดการสร้าง Double-layer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (5) การแอ็ดของประจุบนผนังของรูส่งผลให้เกิดการจำกัดทางพื้นที่ สำหรับวัสดุคาร์บอนที่มีผนังรูพรุนหนาน้อยกว่า 1 นาโนเมตรพื้นที่ปลอดประจุทั้งสองพื้นที่ที่อยู่ติดกันในส่วนที่เป็นผนังรูจึงเกิดการซ้อนทับส่งผลให้เกิดการอึดตัวของคาร์บอน

นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์สามารถให้ค่าการเก็บประจุที่หลากหลายโดยขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว ขนาดของรูพรุน องค์ประกอบทางเคมี และสภาพการนำไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วจะมีค่าการเก็บประจุอยู่ในช่วง 100 ถึง 400 ฟารัดต่อกรัม เมื่อใช้กับอิเล็กโทรไลต์แบบมีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous) และอยู่ในช่วง 120 ถึง 150 ฟารัดต่อกรัม สำหรับอิเล็กโทรไลต์แบบสารอินทรีย์ และแบบของเหลวไอออนิก

### 2.2.2 แผ่นกั้นระหว่างขั้ว (Separator)

เป็นแผ่นที่มีหน้าที่สำหรับ กั้นระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง เพื่อไม่ให้ขั้วไฟฟ้าเกิดการช็อตเมื่อสัมผัสกัน แผ่นกั้นระหว่างขั้วนี้จะต้องมีสมบัติในการยอมให้อิออนที่อยู่ภายในอิเล็กโทรไลต์สามารถที่จะเคลื่อนที่ผ่านไปได้

### 2.2.3 สารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

เป็นสารละลายที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าเนื่องจากภายในสารละลายนั้นมีการเคลื่อนที่ไปมาของไอออนภายในสารละลาย ซึ่งประกอบไปด้วยไอออนบวกและไอออนลบ [7]

โดยทั่วไปแล้วชนิดของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในงานใน EDLC สามารถแบ่งออกได้ 3 ชนิด ได้แก่

1. แบบมีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous)
2. เกลือที่ละลายในสารอินทรีย์
3. สารละลายของเหลวไอออน

ข้อดีและข้อเสียของอิเล็กโทรไลต์แต่ละชนิดสามารถอธิบายได้ดัง ตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงตารางเปรียบเทียบค่าพื้นที่ผิวของวัสดุต่างๆ และค่าการเก็บประจุของแต่ละวัสดุ

Electrode material	SA (m <sup>2</sup> /g)	C (F g <sup>-1</sup> )		
		Aqueous	Organic	ILs
Activated carbons	1000-3000	200-400	100-150	100-150
Template carbon	500-2500	120-350	120-135	150
Carbon nanotube (CNTs)	120-500	20-180	20-80	20-45
Carbide-derived carbon	1000-1600	-	100-140	100-150
Carbon black	250-2000	<300	-	-
Aerogels/xerogels	400-1000	40-220	<160	-

SA: surface area and C: gravimetric capacitance values.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

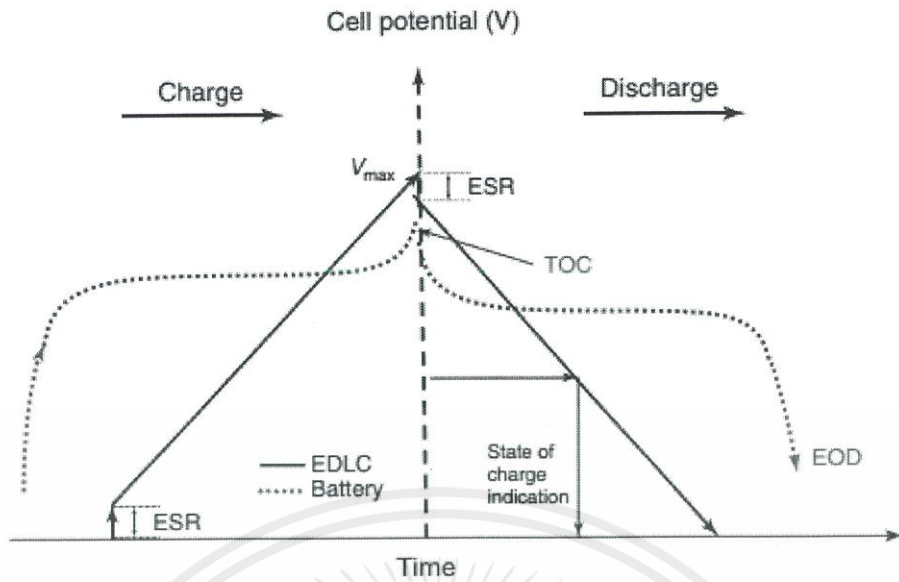
## 2.3 ประเภทและหลักการทํางานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

### 2.3.1 ตัวเก็บประจุยิ่งยวด หรือตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมี

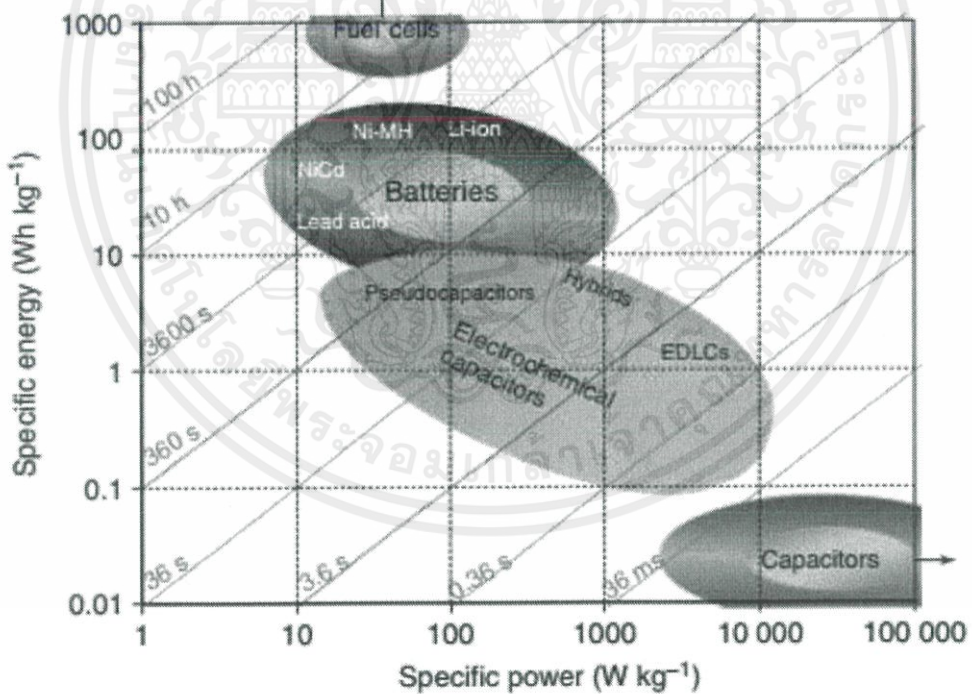
ตัวเก็บประจุยิ่งยวด หรือตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมี (ECs) เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานในกลุ่มของคาปาซิเตอร์ กระบวนการทํางาน คือ กระบวนการในการแลกเปลี่ยนประจุเกิดขึ้นเมื่อมีความต่างศักย์กระทำ อิเล็กโทรไลต์ที่ประกอบไปด้วยไอออนบวกและลบจะแตกตัวจากนั้นจะเกิดการเหนี่ยวนำ และแลกเปลี่ยนไอออนเพียงแค่ออกซิเจนเกิดไฟฟ้าสถิตบริเวณขั้วไฟฟ้าเท่านั้น

ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นตัวเก็บประจุที่มีลักษณะพิเศษ คือ ลักษณะการเก็บประจุไฟฟ้าและการคายประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น ณ บริเวณรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ ส่วนขั้วไฟฟ้ามักใช้วัสดุที่มีพื้นที่ผิวสูง เช่น วัสดุคาร์บอนที่มีรูพรุนหลักการทํางานตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีหลักการทํางานที่มีพื้นฐานคล้ายคลึงกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าธรรมดา ตัวเก็บประจุไฟฟ้านิชนิดนี้เหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปใช้งานที่มีความต้องการความเร็วในการเก็บและคายพลังงาน ตัวเก็บประจุยิ่งยวดซึ่งใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าตัวเก็บประจุและมีชั้นไดอิเล็กทริกซึ่งเป็นระยะห่างระหว่างประจุบวกและประจุลบ ทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้สูงกว่าถึง 10,000 เท่า และตัวเก็บประจุยิ่งยวดนี้ยังมีความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าให้อยู่ในรูปที่สามารถเก็บและคายพลังงานได้หลายรอบ อีกทั้งด้วยค่าความต้านทานของอุปกรณ์ (ESR) ที่ต่ำทำให้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดนี้สามารถที่จะใช้งานในงานที่ต้องการใช้กำลัง (Power) สูงได้อีกด้วย

ในขณะที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้นมีความคล้ายคลึงกับรีซาร์จแบตเตอรี่ในเรื่องการเก็บและการคายประจุ แต่กระบวนการในการเก็บประจุยิ่งยวดมีความแตกต่างกันอยู่อย่างสิ้นเชิง (ในตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีลักษณะการเก็บประจุแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic)/Non-faradic แต่ในทางกลับกัน แบตเตอรี่มีการเก็บประจุไฟฟ้าแบบ Chemical/Faradic) ดังนั้นการที่จะบอกว่า ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แทนแบตเตอรี่คงยังไม่มีความเป็นไปได้ แต่สามารถเป็นเสมือนอุปกรณ์ที่ช่วยเสริมในบางจุดที่แบตเตอรี่ยังมีความบกพร่องอยู่มากกว่า ในอนาคตข้างหน้าหากมีการออกแบบและพัฒนาตัวเก็บประจุยิ่งยวดให้มีค่าการกักเก็บพลังงานและกำลังงานที่สูงขึ้น อาจมีความเป็นไปได้สูงที่จะถูกนำไปใช้งานแทนแบตเตอรี่ได้ หากทำการเปรียบเทียบระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้าและแบตเตอรี่ ตัวเก็บประจุยิ่งยวด มีความสามารถที่จะเก็บประจุไฟฟ้าได้มีความรวดเร็วกว่าอย่างเห็นได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบในปริมาณที่เท่ากัน แสดงดัง รูปที่ 2.1 การที่ตัวเก็บประจุยิ่งยวดสามารถเก็บและคายประจุได้อย่างรวดเร็ว รวมไปถึงมีรอบในการใช้งานที่สูงนั้นเป็นผลมาจาก ไม่มีปฏิกิริยาเคมีที่ใช้เวลานานหรือมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นระหว่างการเก็บและคายประจุเหมือนแบตเตอรี่ [5]



รูปที่ 2.1 แสดงการเก็บและการคายประจุไฟฟ้าระหว่างแบตเตอรี่ และ ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบเคมี [5]



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Specific power และ Specific energy ของตัวเก็บประจื่อยวดยกกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดอื่น [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

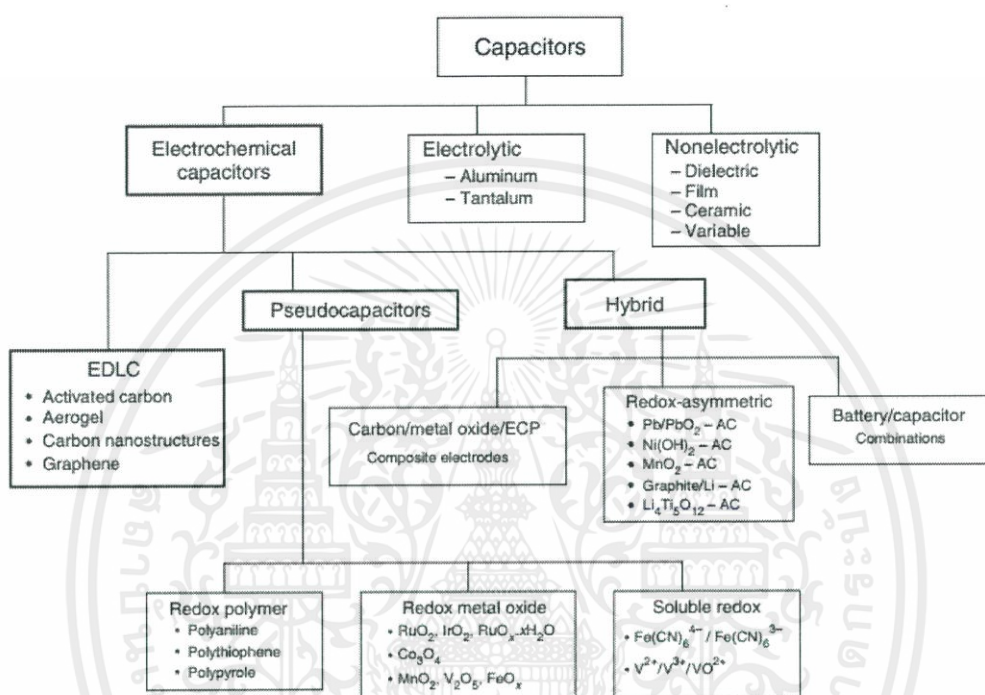
ในปัจจุบันสามารถที่จะจำแนกตัวเก็บประจุยิ่งยวดออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

2.3.1.1 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบดับเบิลเลเยอร์ (Double layer)

2.3.1.2 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบซูโดคาปาซิทีฟ (Pseudocapacitive)

2.3.1.3 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบผสม (Hybrid)

ซึ่งในงานวิจัยนี้มีความสนใจตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบดับเบิลเลเยอร์และจะมีการกล่าวถึงและอธิบายในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการแยกชนิดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าโดยทั่วไป [5]

2.3.2 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบดับเบิลเลเยอร์ (Double layer)

ในศตวรรษที่ 19 มีการศึกษาความเป็นดับเบิลเลเยอร์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบดับเบิลเลเยอร์ โดย Von Helmholtz (เฮล์มโฮลทซ์) เป็นผู้ริเริ่มในการพัฒนา โดยได้ให้ความสนใจความเป็นดับเบิลเลเยอร์ในสารละลายคอนลอร์ด จากรูปแบบของเฮล์มโฮลทซ์ แสดงให้เห็นว่าชั้นของประจุที่มีขั้วที่ตรงข้ามกันจะมีการก่อตัวขึ้นบริเวณรอยต่อของขั้วไฟฟ้ากับอิเล็กโทรไลต์ โดยระหว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์จะอยู่ในระดับอะตอม

Stern ได้นำเอารูปแบบของเฮล์มโฮลทซ์ร่วมกับรูปแบบของ Gouy-Chapman แล้วได้มีการเรียกในส่วนที่มีการกระจายตัวของไอออนที่บริเวณรอยต่อระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์ว่า “Compact layer” หรือ “ชั้นสะเทิน (Stern layer)” ซึ่ง Stern layer หรือชั้นสะเทินนี้ คือส่วนที่อยู่ด้านใน และส่วนที่อยู่ติดกันคือส่วนที่เรียกว่า ชั้นของการแพร่ หรือ “Diffuse layer” ซึ่งจากรูปที่ 2.4 จะสังเกตเห็นได้ว่าจะเป็นส่วนที่อยู่ด้านนอก ในชั้นสะเทินจะถูกแรงจากขั้วไฟฟ้าดูดเอาไว้ ในขณะที่ชั้นของการแพร่ จะมีการกระจายตัวของไอออนจากพลังงานทางความร้อนในสารละลายอย่างต่อเนื่อง ทำให้ค่าการเก็บประจุบริเวณรอยต่อของขั้วไฟฟ้ากับอิเล็กโทรไลต์มีลักษณะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดับเบิลเลเยอร์ (Double layer :  $C_{dl}$ ) ซึ่งสามารถที่แบ่งออกได้ 2 ค่าได้แก่ ค่าการเก็บประจุสะท้อน (Compact double layer ( $C_H$ )) และค่าการเก็บประจุของการแพร่ (Diffuse ( $C_{diff}$ )) สามารถเขียนความสัมพันธ์แบบอนุกรมของ  $C_{dl}$  ได้ดัง สมการที่ 2.1

$$\frac{1}{C_{dl}} = \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_{diff}} \quad (2.1)$$

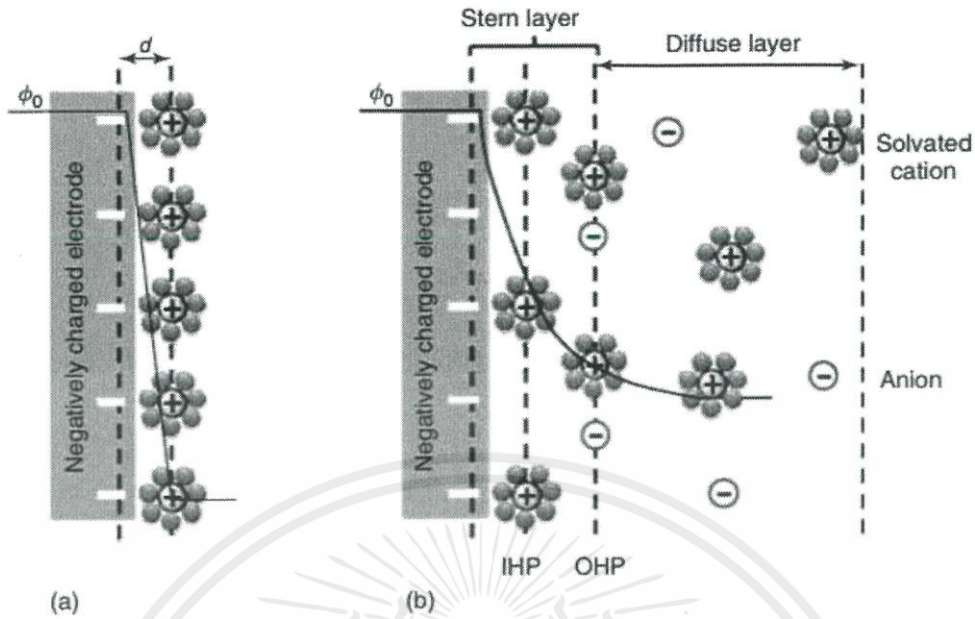
ตัวแปรที่เป็นตัวบ่งชี้ค่าการเก็บประจุของดับเบิลเลเยอร์ ได้แก่ วัสดุในการทำขั้วไฟฟ้า พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า พื้นที่ผิวที่สามารถเข้าถึงได้ของขั้วไฟฟ้า และสมบัติของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

จากงานวิจัยของ Hauang et al. ได้เสนอแนวทางการศึกษาของดับเบิลเลเยอร์บนพื้นผิวของวัสดุรูพรุนโดยใช้ทฤษฎีฟังก์ชันนอลความหนาแน่นในการคำนวณและวิเคราะห์ข้อมูลการทดลอง ทั้งนี้ได้นำรัศมีความโค้งมาใช้ในการคำนวณ โดยผลที่ได้ คือ รูพรุนระดับมาโคร (Macropores,  $>50$  nm) มีลักษณะการเก็บประจุเหมือนกับตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะคู่ขนานเนื่องจากรัศมีความโค้งมีค่ามากทำให้พื้นผิวของรูพรุนมีพฤติกรรมเหมือนผิวในแนวระนาบ ในขณะที่รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores, 2-50 nm) ไอออนของอิเล็กโทรไลต์มีการจัดเรียงตัวกันตามพื้นผิวของรูลักษณะคล้ายทรงกรวยอยู่ภายใน เรียกว่า “Electric double-cylinder capacitor: EDCC” และรูขนาดเล็ก (Microspores,  $<2$  nm) ซึ่งมีขนาดเล็กกว่ารูพรุนขนาดกลาง ทำให้ไอออนในอิเล็กโทรไลต์ไม่สามารถเรียงตัวแบบ EDCC ได้ แต่มีลักษณะการจัดเรียงตัวเป็นแบบเส้น เรียกว่า “Eclectic wire-in cylinder capacitor: EWCC” โดยรูปแบบที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวัสดุคาร์บอนและอิเล็กโทรไลต์ได้อย่างดีเยี่ยม นอกจากนี้ความแตกต่างของสมบัติในการเก็บประจุของดับเบิลเลเยอร์ยังขึ้นอยู่กับความเป็นรูพรุนของวัสดุอีกด้วย การจะทำให้วัสดุคาร์บอนที่มีความเป็นรูพรุนมีค่าการเก็บประจุสูงจำเป็นจะต้องคำนึงถึงรูที่มีขนาดเล็กที่จะเป็นตัวที่ขัดขวางการเคลื่อนที่ของไอออนและทำให้การตอบสนองของอุปกรณ์ช้าลง การเคลื่อนตัวของอิเล็กโทรไลต์ภายในโครงสร้างของรูพรุนในวัสดุที่ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับขนาด ความคดเคี้ยวของรู ความยาว และปรากฏการณ์ “Ion sieving/exclusion” บริเวณปากรู ดังนั้นพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าที่มีความเป็นรูพรุนไม่ได้มีการเข้าถึงของอิเล็กโทรไลต์ทั้งหมดในเวลาเดียวกัน ดังนั้นอัตราการคายประจุจึงมีความแตกต่างกันออกไปด้วย

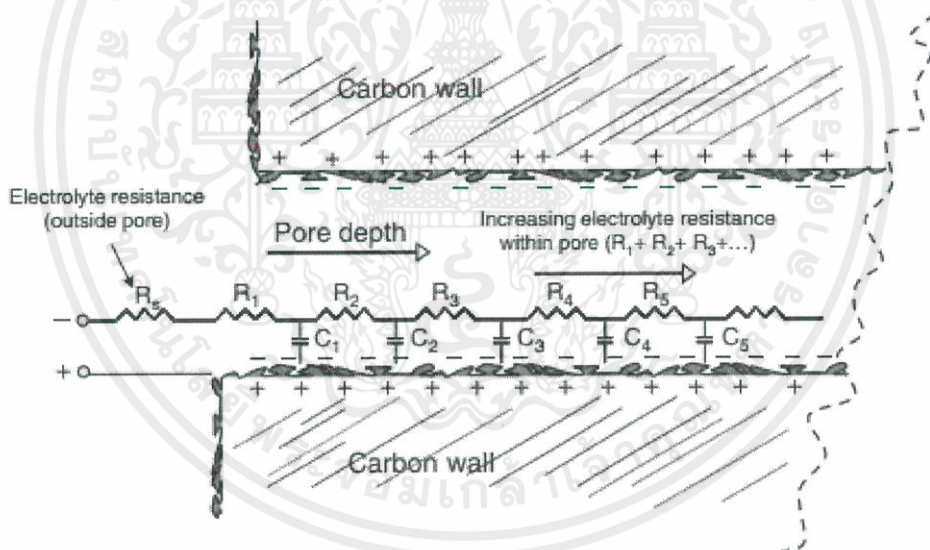
ในงานวิจัยของ DE Levie ได้พัฒนารูปแบบสำหรับใช้อธิบายการกระจายตัวของประจุในวัสดุรูพรุน จากรูปที่ 2.5 ได้แสดงถึงรูที่เป็นทรงกระบอกและมีการกระจายตัวของประจุอย่างง่ายตามวงจรสมมูลที่เรียกว่า “Transmission line”

โดยที่	$R_s$	คือ ความต้านทานของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในbulk
	$C_{dl}$	คือ ค่าการเก็บประจุของดับเบิลเลเยอร์ ที่มีการกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของรู
	$R_x$	คือ ความต้านทานที่ต่ออนุกรมกันลึกลงไปตลอดความยาวของรู โดยจะสัมพันธ์กับความสามารถในการเคลื่อนที่ลึกลงไปในรู ยิ่งมีค่ามากยิ่งส่งผลให้ได้รับอิทธิพลจากผนังของรูและลักษณะของรูมากยิ่งขึ้นและยังส่งผลต่อการเก็บประจุอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 รูปแบบของเฮล์มโฮลทซ์ (Helmholtz model) [5]



รูปที่ 2.5 รูปแบบรูพรุนทรงกระบอกและลักษณะการกระจายตัวของค่าการเก็บประจุภายในรูพรุน และวงจรสมมูลการเพิ่มขึ้นของความต้านทานที่ลึกเข้าไปภายในรู [5]

### 2.3.3 หลักการของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

ตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะทำการเก็บพลังงานในรูปของสนามไฟฟ้าสถิตมากกว่าในรูปแบบของสารเคมี ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า (Plate) สองแผ่นแยกออกจากกันด้วยวัสดุ dielectric สามารถชาร์ตได้โดยการให้ความต่างศักย์ (Voltage) ตกร่อมระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งจะทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสะสมของประจุที่บริเวณแผ่นโลหะ ความสามารถในการกักเก็บพลังงานในรูปของประจุของตัวเก็บประจุสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2.2

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.2)$$

โดยที่	C	คือ ความสามารถในการกักเก็บประจุ (F : Farads)
	Q	คือ ประจุบนแผ่นขั้วไฟฟ้า (C : Coulomb)
	V	คือ ความต่างศักย์ตกร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้า (V : Volt)

สำหรับตัวเก็บประจุแบบแผ่นคู่ขนานโดยทั่วไปค่า C สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2.3

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{D} \quad (2.3)$$

โดยที่	$\epsilon_0$	คือ Permittivity ของสุญญากาศ
	$\epsilon_r$	คือ Permittivity ของวัสดุไดอิเล็กทริก
	A	คือ พื้นที่ผิวของแผ่นขั้วไฟฟ้า
	D	คือ ระยะห่างระหว่างแผ่นขั้วไฟฟ้า

ดังนั้นตัวแปรที่เป็นตัวกำหนดความสามารถในการกักเก็บประจุของตัวเก็บประจุนั้นก็คือ พื้นที่ผิวของแผ่นขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และสมบัติของวัสดุไดอิเล็กทริก

คุณสมบัติหลักของตัวเก็บประจุ คือ ความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) และความหนาแน่นของกำลังงาน (Power density) โดยปริมาณทั้งสองสามารถที่จะระบุได้เป็นต่อน้ำหนักหรือต่อหน่วยปริมาตรได้ หากเป็นต่อน้ำหนักเราจะเรียกว่า “Specific energy” และ “Specific power” ทั้งนี้พลังงานที่เก็บในตัวเก็บประจุไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2.4

$$E = \frac{CV^2}{2} \quad (2.4)$$

จากความสัมพันธ์ของสมการสามารถอธิบายได้ว่า ค่าพลังงานจะสูงที่สุดก็ต่อเมื่อค่าความต่างศักย์มีค่าสูงที่สุด ซึ่งโดยส่วนมากนั้นมักจะถูกจำกัดโดยค่า Breakdown strength ของวัสดุไดอิเล็กทริก

กำลังงาน (Power : P) เป็นอัตราการรับส่งพลังงานต่อหนึ่งหน่วยเวลา ในการคำนวณค่ากำลังงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าตัวหนึ่งจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความต้านทานของชิ้นส่วนภายในตัวเก็บประจุไฟฟ้า เช่น Current corrector, ขั้วไฟฟ้า, ไดอิเล็กทริก, อิเล็กโทรไลต์ และแผ่นกั้นระหว่างขั้ว ในการคำนวณ โดยความต้านทานที่เกิดขึ้นในส่วนนี้จะถูกเรียกว่า Equivalent series resistance (ESR) ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดความต่างศักย์สูงสุดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าในระหว่างการคาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประจุ จึงเป็นค่าที่จำกัดพลังงานและกำลังของตัวเก็บประจุไฟฟ้าด้วย การวัดกำลังของตัวเก็บประจุไฟฟ้ามักวัดกันที่ค่าอิมพีแดนซ์ที่มีความเหมาะสม (ซึ่งหมายถึง ค่าความต้านทานของโหลดมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานภายในของตัวเก็บประจุไฟฟ้า) ซึ่งสามารถได้ค่ากำลังงานสูงสุดดังสมการที่ 2.5

$$P_{max} = \frac{V^2}{4ESR} \quad (2.5)$$

อย่างไรก็ตามแม้ว่าค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ดีควรจะต่ำกว่าโหลดที่นำมาต่อด้วยค่ากำลังที่ได้จะต่ำกว่าค่ากำลังสูงสุดที่คำนวณอยู่เพียงเล็กน้อย

## 2.4 ปัจจัยที่มีความสำคัญกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ซูเปอร์คาปาซิเตอร์ที่ดีควรที่จะต้องมีความจุไฟฟ้าที่มาก มีความต้านทานต่ำ และต้องมีอายุการใช้งานที่ยาวนาน สิ่งที่มีความสำคัญที่ควรปรับปรุง และพัฒนาจึงควรที่จะมุ่งเน้นในการพัฒนาส่วนที่เรียกว่า “ขั้วไฟฟ้า” โดยมีปัจจัยดังต่อไปนี้

### 2.4.1 พื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้า

หากส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้ามีพื้นที่ผิวมากจะส่งผลให้มีค่าการเก็บประจุไฟฟ้าที่มากขึ้นตามไปด้วย หมายความว่าเมื่อมีพื้นที่ผิวที่มากจะมีพื้นที่ที่ให้สารละลายอิเล็กโทรไลต์เข้าทำปฏิกิริยาได้มากและทำให้พื้นที่ในการเหนี่ยวนำได้มากอีกด้วย

### 2.4.2 วัสดุที่เลือกใช้ควรที่จะมีสมบัติความชอบน้ำ

ในกรณีที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบน้ำเป็นตัวทำละลาย พื้นที่ผิวของวัสดุขั้วไฟฟ้าจะเป็นส่วนที่มีการสัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์หรือสารละลายได้ดี หากมีการยึดเกาะกับสารละลายได้ดีจะเป็นการลดความต้านทานที่บริเวณพื้นผิว และส่งผลให้แลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าได้ดียิ่งขึ้น

ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าขั้วไฟฟ้านี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการเก็บประจุไฟฟ้า โดยส่วนมากส่วนที่เป็นขั้วไฟฟ้านิยมใช้ถ่านกัมมันต์หรือคาร์บอนที่มีรูพรุน ซึ่งอาจได้จากวัสดุตั้งต้นที่มีความหลากหลาย [6]

## 2.5 การสร้างอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิด EDLC

จากที่ได้มีการกล่าวถึงในข้างต้น อุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิด EDLC เป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่มีความคล้ายกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานแบบดั้งเดิม หากแต่มีความต่างกันเพียง อุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิด EDLC มีความสามารถในการกักเก็บพลังงานที่มากกว่า นั่นหมายความว่าสามารถที่จะเก็บประจุไฟฟ้าได้มากกว่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบดั้งเดิม ผลของการเก็บประจุที่มากกว่าเป็นผลมาจากตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบดั้งเดิมนั้นมีการใช้เพียงแผ่นโลหะคู่ขนาน แต่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิด EDLC ใช้วัสดุรูพรุนที่มีพื้นที่ผิวสูง ไม่เพียงแต่การใช้วัสดุที่นำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าที่มี

ความแตกต่างกันเท่านั้น ยังมีปัจจัยอื่นที่เป็นข้อแตกต่างระหว่างตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบดั้งเดิม และตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบ EDLC

(1) ปริมาณของประจุที่เข้าถึงวัสดุที่เป็นขั้วไฟฟ้า เนื่องจากพื้นที่ผิวที่มากทำให้มีการเข้าถึงที่สูงขึ้น

(2) ความบางของชั้นดับเบิลเลเยอร์ที่บริเวณรอยต่อของขั้วไฟฟ้ากับอิเล็กโทรไลต์

หากพูดถึงอุปกรณ์กักเก็บพลังงานส่วนใหญ่จะนึกถึงแบตเตอรี่ ส่วนประกอบของแบตเตอรี่จะประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว และขั้วทั้ง 2 นั้นจะถูกแช่ลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยมีการวิ่งไปมาของไอออน บริเวณตรงกลางระหว่างขั้วนั้นจะมีฉนวนไฟฟ้าคั่นกลางอยู่เพื่อไม่ให้เกิดการลัดวงจรระหว่างขั้วไฟฟ้า จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของแบตเตอรี่และอุปกรณ์ EDLC มีส่วนประกอบที่เหมือนกันจะต่างแต่เพียงวัสดุที่ใช้ประกอบ ดังนั้นการสร้าง EDLC ก็เหมือนการสร้างแบตเตอรี่ในสถานะที่ถูกชาร์จสารละลายอิเล็กโทรไลต์บวกและลบถูกเหนี่ยวนำและเคลื่อนที่เข้าหาขั้วไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดดับเบิลเลเยอร์ขึ้นบริเวณขั้วไฟฟ้าแต่ละข้าง ทั้งนี้การที่ไอออนเคลื่อนที่แยกออกจากกันยังส่งผลให้เกิดความต่างศักย์ขึ้นภายในอุปกรณ์อีกด้วย (แสดงดังรูปที่ 2.6) ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าแต่ละข้างจะเปรียบเสมือนตัวเก็บประจุหนึ่งตัว เมื่อมองโดยรวมของอุปกรณ์แล้วจะเป็นการต่ออนุกรมกันของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ดังนั้นค่าการเก็บประจุในอุดมคติของอุปกรณ์สามารถคำนวณได้จาก  $C_{cell}$  ดังสมการ 2.6

$$\frac{1}{C_{cell}} = \frac{1}{C_+} + \frac{1}{C_-} \quad (2.6)$$

โดยที่  $C_+$ ,  $C_-$  คือ เป็นค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้า(ขั้วบวกและขั้วลบ) ดังนั้นหากมองว่าความสามารถในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุแบบสมมาตรมีค่า  $C_+$  และ  $C_-$  เท่ากันจะทำให้สามารถคำนวณค่าการเก็บประจุของอุปกรณ์ได้ดังสมการ 2.7

$$C_{cell} = \frac{C_e}{2} \quad (2.7)$$

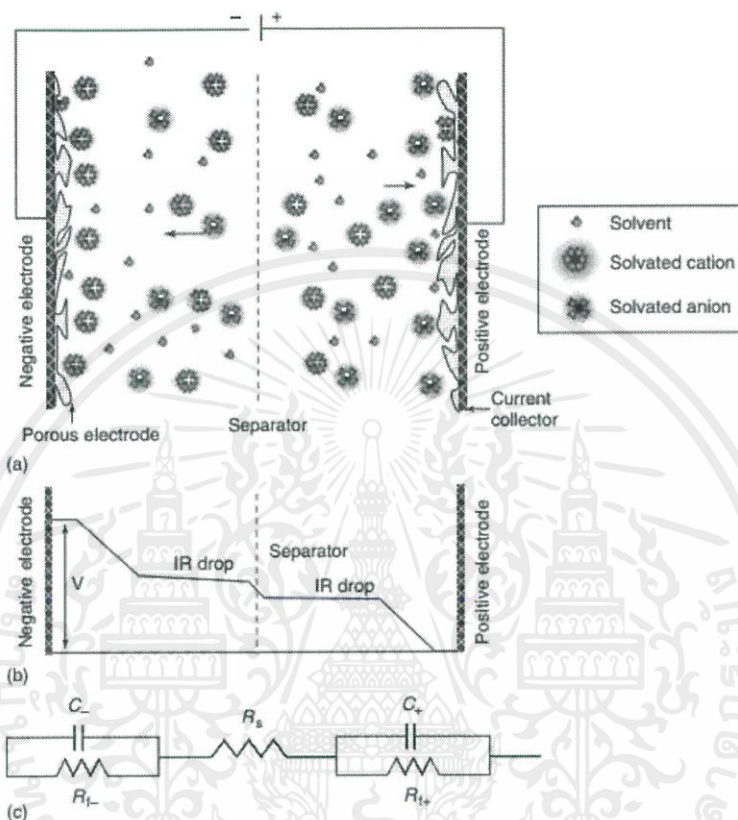
โดยที่  $C_e = C_+ = C_-$

ดังนั้นการรายงานผลจึงต้องมีการกำกับทุกครั้งว่าค่าการเก็บประจุที่ได้เป็นค่าการเก็บประจุของอุปกรณ์หรือของขั้วไฟฟ้า โดยที่ค่าการเก็บประจุที่เห็นในงานวิจัยต่างๆจะเป็นค่าการเก็บประจุของขั้วไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวเท่านั้น และมักได้การวัดสมบัติทางไฟฟ้าแบบระบบการวัดแบบ 3 ขั้ว ที่มีขั้วไฟฟ้าอ้างอิงและขั้วเคาเตอร์รวมอยู่ด้วย ค่าการเก็บประจุนี้มักจะมีค่าสูงกว่าค่าการเก็บประจุในความเป็นจริงของตัวอุปกรณ์ ซึ่งในความเป็นจริงจะวัดค่าการเก็บประจุไฟฟ้าแบบ 3 ขั้ว สิ่งที่มีความสำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ การเปรียบเทียบระหว่างค่าการเก็บประจุจำเพาะทั้งต่อมวลและต่อปริมาตร โดยค่าการเก็บประจุจำเพาะต่อมวล (Gravimetric) สามารถคำนวณได้จาก สมการ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_e(Fg^{-1}) = \frac{2 \times C_{cell}}{m_e} \quad (2.8)$$

โดยที่  $m_e$  คือ น้ำหนักของวัสดุที่มีการเก็บประจุจริงบนขั้วไฟฟ้าหนึ่งขั้ว โดยทั่วไปแล้วค่าการเก็บประจุของวัสดุคาร์บอนจะอยู่ในช่วง 10 ถึง 30  $F g^{-1}$



รูปที่ 2.6 (a) ตัวเก็บประจุไฟฟ้าชนิด EDLC ,(b) ลักษณะทั่วไปของศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้าที่ถูกชาร์จ ,(C) วงจรสมมูลของตัวเก็บประจួយวด

การนำตัวเก็บประจุไฟฟ้ามาใช้งานส่วนมากมักถูกจำกัดด้วยปริมาณมากกว่าน้ำหนัก ดังนั้นความสามารถในการเก็บประจุต่อปริมาตรจึงเหมาะสมมากกว่า ซึ่งค่าการเก็บประจุต่อปริมาตรสามารถคำนวณได้จากการนำเอาค่าการเก็บประจุแบบ Gravimetric หาดด้วยค่าความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้เก็บประจุไฟฟ้า ในขณะที่ค่าการเก็บประจุทั้งแบบต่อน้ำหนักและต่อปริมาตรของขั้วไฟฟ้าสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการหาคุณภาพของวัสดุในการเก็บประจุไฟฟ้า อุปกรณ์ที่สมบูรณ์แล้วจะต้องระมัดระวังในเรื่องน้ำหนักและปริมาตรของส่วนประกอบอื่นๆ คือ Binder, Additive, Collector, Separator, อิเล็กโทรไลต์, อุปกรณ์ห่อหุ้ม และบริเวณรอยต่อ โดยส่วนใหญ่ น้ำหนักของวัสดุที่ใช้ในการเก็บประจุไฟฟ้าจริงจะมีเพียง 20-30% ของน้ำหนักสุทธิของอุปกรณ์

ในงานวิจัยของ De Levie [5] กล่าวว่าวิธีการกระจายตัวของค่าการเก็บประจุไฟฟ้าในวัสดุรูพรุนโดยใช้วงจร RC แบบขนาน วงจรสมมูล RC นี้ยังถูกใช้ในการอธิบายระบบการทำงานพื้นฐานของ EDLC แผนภาพวงจร RC จะใช้เป็นตัวแทนการเก็บประจุไฟฟ้าแบบดับเบิลเลเยอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.6a, 2.6b โดยที่  $C_{+/-}$  และ  $R_{f+/-}$  คือค่าการเก็บประจุไฟฟ้าและความต้านทานไฟฟ้าแบบพารา ดิกสำหรับขั้วไฟฟ้าบวกและลบ ตามลำดับ ทั้งนี้การคายประจุออกจะขึ้นกับค่าของ  $R_f$  ในขณะที่  $R_s$  เป็นค่า ESR ของอุปกรณ์ ค่าคงที่ของเวลา (T) มักถูกกำหนดให้เป็นระยะเวลาที่ใช้ในการตอบสนอง ของอุปกรณ์ สามารถคำนวณได้จาก ความต้านทาน (R) คูณกับค่าการเก็บประจุ (C)

ประสิทธิภาพโดยรวมของ EDLC ขึ้นกับปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย คือ

- ชนิดของวัสดุขั้วไฟฟ้า จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการกักเก็บประจุไฟฟ้า
- อิเล็กโทรไลต์ จะเป็นตัวกำหนดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สามารถใช้งานได้

ทั้งนี้นอกจากปัจจัยหลักทั้ง 2 ปัจจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วยังสามารถที่จะเกิดจากปัจจัยอื่นๆ ที่ ส่งผลต่อค่า ESR ได้อีกด้วย ปัจจัยดังกล่าวได้แก่

- ค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุขั้วไฟฟ้า
- ความต้านทานระหว่างวัสดุที่มีหน้าที่เก็บประจุไฟฟ้ากับตัว Current collector
- ค่าความต้านทานการแพร่ของไอออนในรูขนาดเล็ก
- ค่าความต้านทานของไอออนในการเคลื่อนผ่านแผ่นกั้นระหว่างขั้วไฟฟ้า
- ค่าความต้านทานไอออนในอิเล็กโทรไลต์

โดยความต้านทานภายในที่เกิดขึ้นจะเป็นตัวจำกัดกำลังงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าวรรวมไปถึงการ นำไปใช้งานด้วย

ในขณะที่เดียวกันมีการนำแบตเตอรี่มาต่ออนุกรมและต่อแบบขนานกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า เพื่อให้มีความสามารถในการใช้งานที่มีค่าความต่างศักย์สูงขึ้น หรือได้ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดยปริมาณของอุปกรณ์ที่นำมาต่อกันจะขึ้นกับการนำไปใช้งาน ทั้งนี้ค่าความต่างศักย์รวมอาจทำให้ อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้ จึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างมากเมื่อต่ออุปกรณ์แบบอนุกรม ค่าความต่างศักย์ ตกคร่อมภายในอุปกรณ์แต่ละตัวจะต้องไม่เกินค่าความต่างศักย์สูงสุดที่ใช้งานได้ ซึ่งปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ ส่วนมากจะเกิดจากค่า ESR ของอุปกรณ์ในระบบมีค่าแตกต่างกัน หรือมีความเป็นไปได้ที่จะเกิดจาก อุปกรณ์มีการเสื่อมสภาพตามอายุการใช้งานหรือเกิดความเสียหายได้ กล่าวโดยสรุปคือ ในระบบที่มี ตัวเก็บประจุจำนวนมากรวมกันมักมีระบบที่เรียกว่า Cell balance เข้ามาช่วยควบคุมความต่าง ศักย์ภายในตัวอุปกรณ์

## 2.6 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

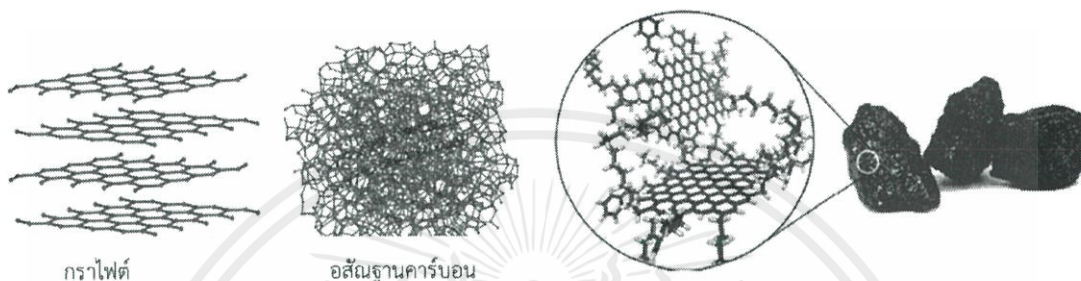
ถ่านกัมมันต์ เป็นสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก (ร้อยละ 87 ถึง 97) มีโครงสร้างเป็นรูพรุน (ปริมาตรรวมรูพรุน  $0.2-1 \text{ cm}^3/\text{g}$ ) และอีกทั้งยังมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ( $400-2500 \text{ m}^2/\text{g}$ ) ถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติเด่นในเรื่องการดูดซับโดยสามารถที่จะดูดซับได้ทั้งของเหลว และแก๊ส ยังมีการนำไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เช่น นำไปใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำ แม้กระทั่งนำไปดูดซับแก๊สพิษ หรือดูดซับกลิ่น ซึ่งอาศัยความเป็นรูพรุนให้สารหรือสิ่งที่ต้องดูดซับเข้าไปโดยสารที่ต้องการจะดูดซับจะเกาะหรือดูดซับบริเวณพื้นผิวของรูพรุนที่เป็นรูลักษณะเป็นรูเปิด สารตั้งต้นของถ่านกัมมันต์มีความหลากหลายทั้ง สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์ หรือแม้กระทั่งถ่านหิน อย่างไรก็ตามปัจจุบันได้รับความนิยมอย่างมากในการนำขยะชีวมวลมาประยุกต์ใช้งานเป็นถ่านกัมมันต์ เพื่อเพิ่มมูลค่า และทำให้ขยะเหล่านั้นเกิดประโยชน์สูงสุด ตัวอย่างของขยะชีวมวลที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นของถ่านกัมมันต์ เช่น กะลามะพร้าว ชานอ้อย แกลบ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องด้วยคุณสมบัติเด่นในเรื่องพื้นที่ผิวที่มากของถ่านกัมมันต์ กล่าวคือหากมีพื้นที่ผิวในการเข้าทำปฏิกิริยาระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์มากจะส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนประจุไฟฟ้าได้มากด้วยเช่นกัน ถ่านกัมมันต์จึงนิยมถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด ซึ่งจะใช้ในส่วนของการทำขั้วไฟฟ้าที่อยู่ภายในตัวอุปกรณ์

### 2.6.1 สมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

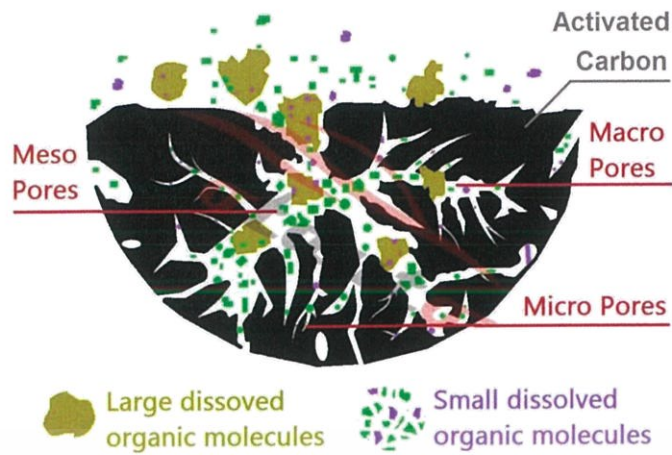
โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ภายในจะประกอบไปด้วยโครงสร้างส่วนที่เป็นระเบียบ (ผลึกกราฟิต) และที่ไม่เป็นระเบียบ (อสัณฐานคาร์บอน) ทั้งสองส่วนมีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง รูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์

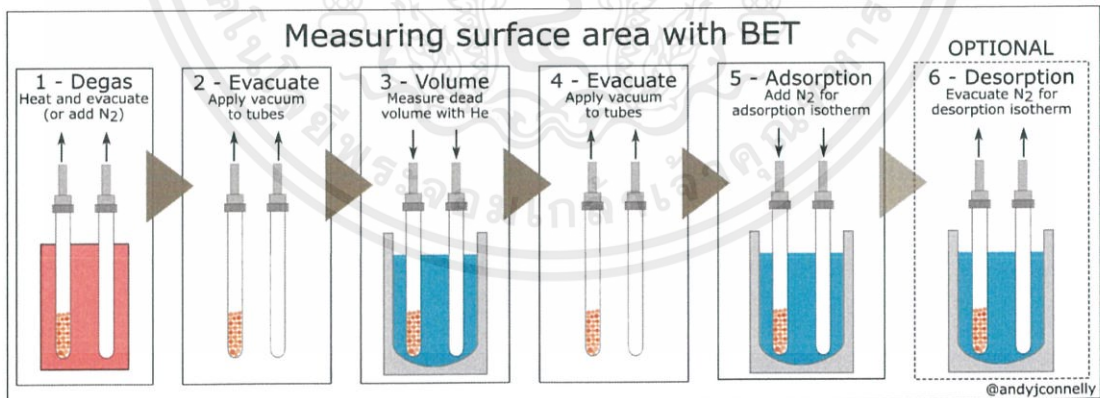
ทิศทางของคาร์บอนที่เป็นระเบียบจะถูกรบกวนในระหว่างกระบวนการกระตุ้น คาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบถูกกำจัดออกระหว่างการกระตุ้นเกิดเป็นช่องว่างตลอดช่วงที่เป็นกราฟิตและระหว่างผลึกของถ่านกัมมันต์ และเกิดเป็นแขนงภายในและขนานกับระนาบกราฟิต เกิดโครงสร้างรูพรุนขนาดต่างๆ ซึ่งโครงสร้างของรูพรุนได้มีการจำแนกตามขนาดของรูพรุนเป็น 3 ประเภท ตาม International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) สามารถจำแนกได้ ดังนี้

- (1) รูพรุนขนาดเล็ก (Microspores) มีขนาดในช่วง  $< 2$  nm ซึ่งการดูดซับส่วนใหญ่เกิดขึ้นที่รูพรุนขนาดเล็ก และถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงมากๆ จะมีรูพรุนขนาดเล็กประมาณร้อยละ 90-95
- (2) รูพรุนขนาดกลาง (Mesopores) มีขนาดในช่วง 2-50 nm
- (3) รูพรุนขนาดใหญ่ (Macropores) มีขนาดในช่วง  $> 50$  nm



รูปที่ 2.8 ลักษณะและขนาดของรูพรุนที่แบ่งตาม IUPAC [8]

การทดสอบโครงสร้างความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์เราสามารถทำการวิเคราะห์ได้ด้วยเทคนิค BET (Brunauer–Emmett–Teller) เป็นการวัดปริมาตรก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิไนโตรเจนเหลว (77K, -196°C) โดยมีกระบวนการโดยย่อดังนี้ ในช่วงแรกไอน้ำที่ดูดซับในถ่านกัมมันต์ออก จากนั้นจะมีการการดูดซับและการคายดูดซับของก๊าซไนโตรเจนที่ 77K (-196°C) เราจะได้ข้อมูลไอโซเทอมการดูดซับและการคายดูดซับของก๊าซไนโตรเจนที่ 77K (-196°C) และนำไปคำนวณค่าการกระจายตัว ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิว และปริมาตรรูพรุน โดยขั้นตอนที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9 โดยการวัดลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ผิว จะได้ข้อมูลออกมาให้หน่วยของตารางเมตรต่อกรัม ( $\text{m}^2/\text{g}$ )

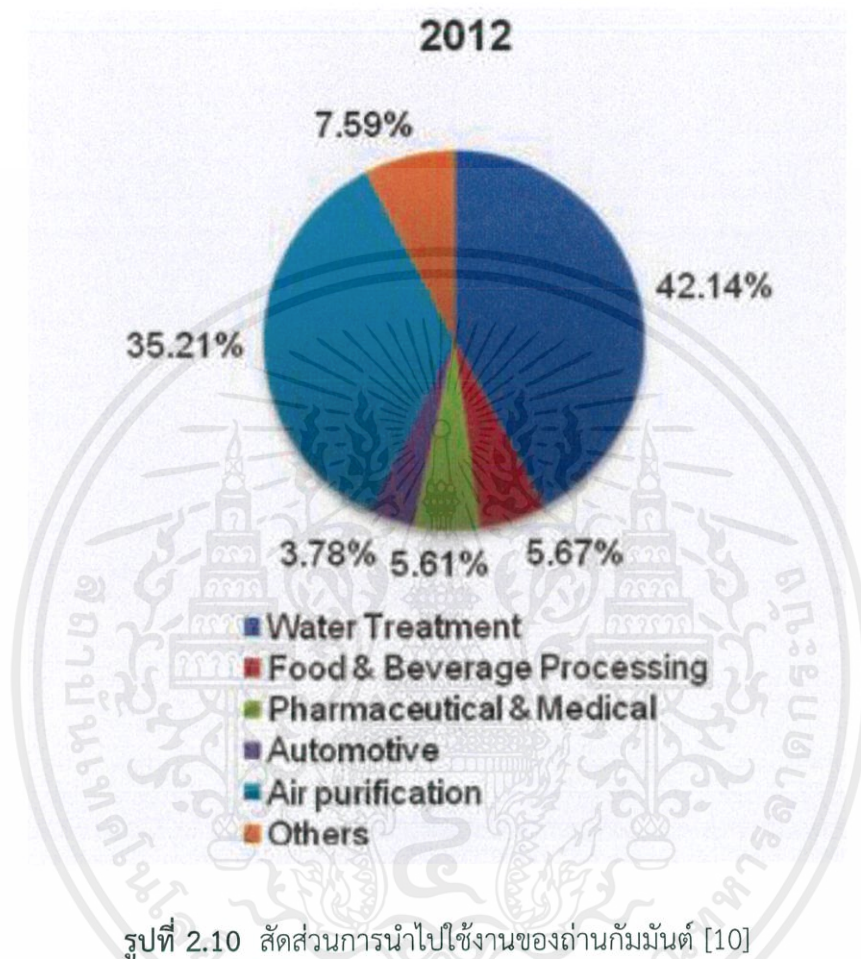


รูปที่ 2.9 ตัวอย่างขั้นตอนการวัดโครงสร้างรูพรุนด้วยเทคนิค BET [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 การนำไปใช้งานของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่มีจุดเด่นเรื่องรูพรุนจำนวนมากจึงสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลาย ได้แก่ กรองน้ำ กรองอากาศ อุตสาหกรรมยาและอาหาร อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น โดยมีสัดส่วนการนำไปใช้งานดังรูปที่ 2.10



## 2.8 กระบวนการในการผลิตถ่านกัมมันต์

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์จะจำเป็นต้องมีวัตถุดิบในการผลิตซึ่งวัตถุดิบนั้นสามารถจำแนกได้ดังนี้

1. ปีโตเลียม
2. แร่ลิกไนต์
3. ชีวมวลที่เหลือจากการเกษตร

ทั้งนี้วัตถุดิบในการผลิตทั้ง ปีโตเลียม และแร่ลิกไนต์นั้นยังมีข้อด้อยบางประการเช่น มีราคาสูงและไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ในทางกลับกันชีวมวลจากการเกษตรกลับมีจุดเด่นในราคาต้นทุนที่ต่ำกว่าและยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ด้วยจุดเด่นของชีวมวลจากการเกษตรนี้จึงเป็นอีกเหตุผลหลักๆในการเลือกนำมาเป็นวัตถุดิบในการทำงานวิจัยนี้ เนื่องจากอย่างที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าประเทศไทยนั้นเป็นประเทศที่มีการทำเกษตรกรรมเป็นจำนวนมาก อีกทั้งยังเป็นเศรษฐกิจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักของประเทศไทย โดยหลังจากกระบวนการเก็บเกี่ยวของภาคเกษตรกรรมเพื่อนำไปส่งยังโรงงานอุตสาหกรรมตลอดจนหลังกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆล้วนมีขยะเหลือใช้จำนวนมากที่สามารถนำมาใช้เป็นพลังงานชีวมวลและวัตถุดิบสำหรับถ่านกัมมันต์ได้

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ 2 ขั้นตอน คือ กระบวนการคาร์บอนไนเซชันและกระบวนการกระตุ้น

### 2.8.1 กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน หรือบางครั้งอาจเรียกว่า การผลิตถ่านกัมมันต์ [11] เป็นกระบวนการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบอื่นๆในสารอินทรีย์เพื่อให้ได้มาซึ่งคาร์บอนเป็นการให้ความร้อนแก่วัตถุดิบที่อุณหภูมิสูงในสภาพไร้ออกซิเจนหรือมีปริมาณออกซิเจนจำกัด เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการลุกไหม้และกลายเป็นเถ้า กระบวนการนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุด กระบวนการนี้จะทำให้เกิดโครงสร้างของรูพรุนขนาดเล็ก ในห้องปฏิบัติการนิยมให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ในการะบวนการสลายตัวทางความร้อนนั้นการสลายตัวทางความร้อนจะได้ผลิตภัณฑ์ 2 ผลิตภัณฑ์ ได้แก่

1. ส่วนที่เป็นก๊าซ ประกอบด้วย ก๊าซไฮโดรเจนปริมาณมาก สารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเบา และน้ำมันดิน
2. ส่วนที่เป็นของแข็ง มีปริมาณคาร์บอนสูง เรียกว่า “ถ่าน” หรือ “ถ่านชาร์”

ปัจจัยที่สำคัญและส่งผลต่อการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วยกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ได้แก่

1. อุณหภูมิที่ใช้ในการสลายตัวทางความร้อน
2. อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในหนึ่งนาที
3. อัตราการไหลของแก๊ส
4. ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการ

### 2.8.2 กระบวนการกระตุ้น (Activation)

หลังจากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันเราจะได้ถ่านที่เรียกว่า “ถ่านชาร์” ซึ่งในกระบวนการคาร์บอนไนเซชันอย่างที่ได้กล่าวมาข้างต้นว่าจะเป็นการสลายตัวทางความร้อนของสารอินทรีย์ที่อยู่ในวัตถุดิบ จะมีการเกิดขึ้นของรูพรุนเล็กน้อยและเป็นรูพรุนขนาดเล็ก (ไมโครพอร์ส) เราจึงนำถ่านชาร์นั้นมาผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อทำให้เกิดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น โดยกระบวนการกระตุ้นนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการกระตุ้นทางกายภาพ และกระบวนการกระตุ้นทางเคมี

#### 2.8.2.1 การกระตุ้นทางกายภาพ

1. การกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการเกิดปฏิกิริยาระหว่างคาร์บอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังสมการ (2.9)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวคือ เมื่อคาร์บอนมอนอกไซด์หลุดออกไป จะทำให้โครงสร้างภายในของถ่านชาร์เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีลักษณะเป็นรูพรุนกระจายอยู่ทั่วไป รูพรุนที่ได้จะมีขนาดเล็กกว่าการกระตุ้นทางเคมี

2. การกระตุ้นด้วยไอน้ำจะต้องใช้ไอน้ำที่ร้อนยิ่งยวด (Superheated steam) เมื่อให้ไอน้ำไหลผ่านเข้าไปในระบบ ไอน้ำสัมผัสกับถ่านชาร์จะเกิดปฏิกิริยาดัง สมการที่ 2.10 และสมการที่ 2.11



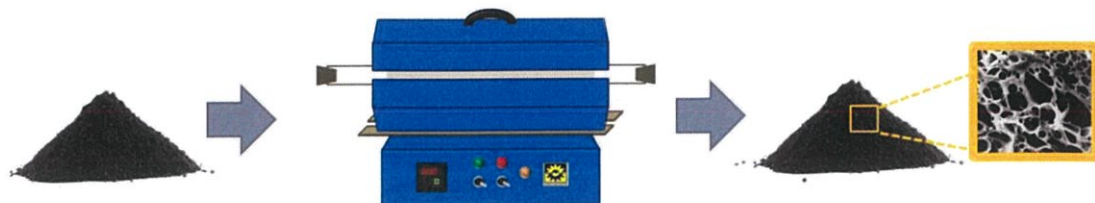
เมื่อไอน้ำสัมผัสกับถ่านชาร์จะเกิดปฏิกิริยาได้ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับน้ำควบคู่กันไป ทำให้มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในระบบ ในการกระตุ้นนี้ปัจจัยสำคัญ ได้แก่ อัตราส่วนมวลไอน้ำต่อถ่านชาร์ อุณหภูมิ และระยะเวลา เทคนิคการกระตุ้นด้วยไอน้ำเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมากกว่าการกระตุ้นด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เนื่องจากไอน้ำมีราคาที่ถูกกว่า และได้รูพรุนที่มีขนาดเล็ก

#### 2.8.2.2 การกระตุ้นทางเคมี

เป็นการใช้สารเคมีในการเข้าทำปฏิกิริยากับโครงสร้างคาร์บอนของถ่านชาร์ สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นสามารถใช้ได้ทั้งกรดและเบส ส่วนมากจะนิยมใช้เบสในกระบวนการกระตุ้นเนื่องจากความอันตรายจะน้อยกว่าสารเคมีที่เป็นกรด สารเคมีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เช่น  $\text{ZnCl}_2$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$  และ  $\text{KOH}$  อย่างไรก็ตามกระบวนการกระตุ้นด้วยเคมีหลังจากที่เสร็จสิ้นกระบวนการกระตุ้นจะต้องผ่านการล้างสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นให้เกิดรูพรุนออกทำให้กระบวนการกระตุ้นทางเคมียังมีจุดต่อตรงที่กระบวนการล้างสารเคมีจะเหลือเป็นสารละลายเคมี ซึ่งการกำจัดเคมีที่เป็นสารละลายนี้เป็นการกำจัดที่ยาก เป็นพิษสิ่งแวดล้อม และราคาในการกำจัดค่อนข้างสูง

ขั้นตอนในการกระตุ้นทางเคมีแสดงลำดับขั้นตอนดังรูปที่ 2.11 ประกอบด้วยขั้นตอนดังต่อไปนี้

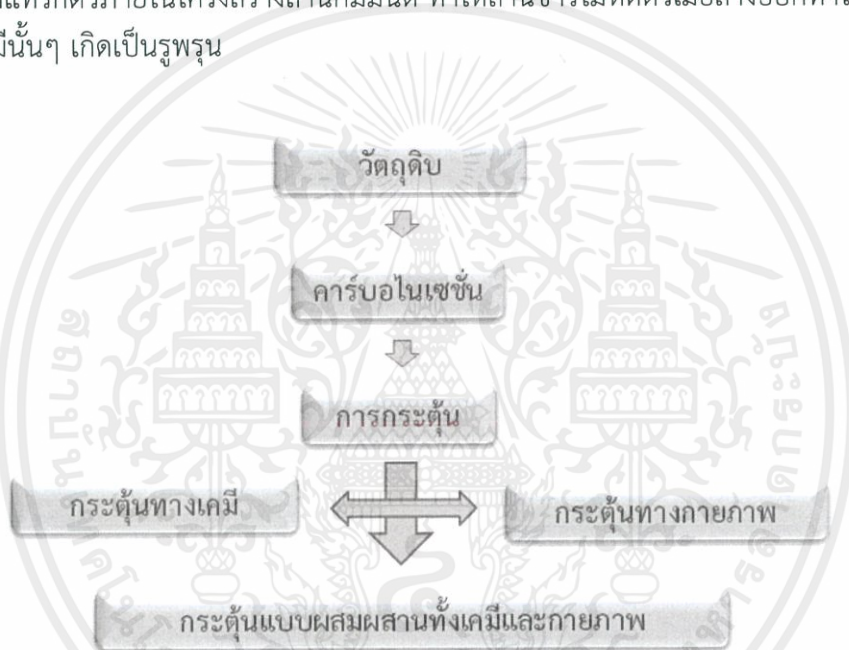
1. ผสมสารเคมีที่ทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นเข้ากับถ่านชาร์
2. นำถ่านชาร์ไปทำการไพโรไลซิส (ให้ความร้อนภายใต้สภาพจำกัดออกซิเจน)
3. ทำการล้างสารเคมีออก



รูปที่ 2.11 ภาพแสดงลำดับขั้นตอนการกระตุ้น

การเกิดของรูพรุนจะเกิดขึ้นโดย

1. สารเคมีจะทำลายโครงสร้างเดิมของถ่านชาร์จากปฏิกิริยาเคมีของสารเคมีชนิดนั้นๆกับถ่าน
2. สารเคมีทำให้เกิดการสลายตัวขององค์ประกอบอินทรีย์บางชนิดที่ผิว
3. สารเคมีแทรกตัวภายในโครงสร้างถ่านกัมมันต์ ทำให้ถ่านชาร์ไม่หดตัวเมื่อล้างออกทำให้เกิดโพรงของสารเคมีนั้นๆ เกิดเป็นรูพรุน



รูปที่ 2.12 แผนภาพแสดงกระบวนการในการผลิตถ่านกัมมันต์

เทคนิคการกระตุ้นเพื่อทำให้เกิดรูพรุนทั้งทางเคมีและทางกายภาพจะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันซึ่งสามารถสรุปโดยรวมได้ดัง ตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางสรุปการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคนิคการกระตุ้นแต่ละชนิด

ข้อดี/ข้อเสีย	เทคนิคการกระตุ้นด้วยไอน้ำ	เทคนิคการกระตุ้นด้วยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์	เทคนิคการกระตุ้นทางเคมี
ข้อดี	รูปพรุนขนาดเล็ก	รูปพรุนขนาดเล็ก	ร้อยละการผลิตสูง
ข้อเสีย	ร้อยละการผลิตต่ำ	ร้อยละการผลิตต่ำ	รูปพรุนขนาดใหญ่
	การควบคุมอัตราส่วนมวลคาร์บอนต่อไอน้ำทำให้แม่นยำและเสถียรได้ยาก	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีราคาแพง	มีสารเคมีตกค้างต้องใช้เวลานานในการล้าง
			เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมหากกำจัดไม่หมด
			มีต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้นจากการกำจัดสารเคมี

## 2.9 เครื่องมือสำหรับการตรวจวัดและวิเคราะห์

### 2.9.1 Thermogravimetric Analysis (TGA)

Thermogravimetric Analysis หรือ TAG เป็นเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ความเสถียรของวัสดุที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน โดยดูการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักที่สูญเสียไปเมื่อมีการเพิ่มสูงขึ้นของอุณหภูมิ น้ำหนักที่สูญเสียไปเกิดจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ โดยภายในเครื่องซึ่งที่มีความไวและความละเอียดสูง ในสภาวะแวดล้อมที่กำหนด สามารถใช้ศึกษาสมบัติได้หลากหลายชนิด เช่น เซรามิก โพลีเมอร์ สารอินทรีย์ โดยสามารถวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลว การสูญเสียน้ำหนัก หาสารเจือปนในตัวอย่าง รวมไปถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนโครงสร้างทางจุลภาพ (Phase) ของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อน [12]

สามารถได้ข้อมูลได้ดังนี้

1. องค์ประกอบของสาร (Composition)
2. เสถียรภาพทางความร้อน (Thermal stability/decomposition)
3. ปริมาณสารสัมพันธ์ที่เกิดปฏิกิริยา (Stoichiometry of reaction)
4. จลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยา (Kinetics of reactions)
5. กระบวนการดูด/คายพลังงาน (Desorption/adsorption processes)
6. การระเหย (Evaporation)

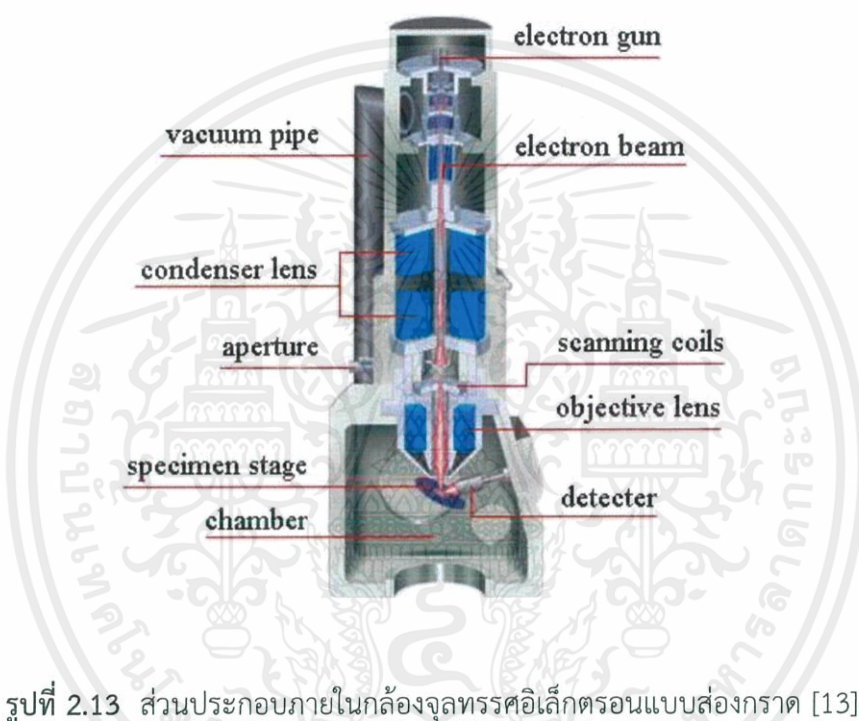
### 2.9.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

Scanning Electron Microscope หรือ กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด เป็นเทคนิคหนึ่งที่ได้รับคามนิยมในการใช้วิเคราะห์ข้อมูลพื้นผิวของชิ้นงาน เทคนิคนี้มีกำลังขยายสูงสามารถที่จะตรวจดูอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้และได้ภาพที่มีความคมชัด เนื่องจากเทคนิคนี้ใช้ลำแสงของอิเล็กตรอนได้การตรวจดูภาพบริเวณพื้นผิวของตัวอย่าง โดยเทคนิคนี้จะสามารถให้ข้อมูลได้ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ภูมิลักษณะ (Topography) ข้อมูลในลักษณะพื้นผิว ความหยาบ หน้าตาของชิ้นงาน ความละเอียดของพื้นผิว สามารถที่จะแสดงได้ถึงระดับนาโนเมตร ภาพที่ได้จะเป็นภาพแบบ 3 มิติ เนื่องด้วยชิ้นงานที่ใช้มีความหนาจึงเป็นภาพแบบ 3 มิติ
2. สัณฐานวิทยา (Morphology) เป็นการแสดงข้อมูลในลักษณะรูปร่างของชิ้นงาน ขนาด การจัดเรียงตัวที่พื้นผิวของตัวอย่าง
3. องค์ประกอบ (Composition) แสดงข้อมูลองค์ประกอบทางเคมี ธาตุ และปริมาณเชิงเปรียบเทียบ ได้จากเทคนิค EDS

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด กล่าวโดยสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบภายในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [13]

1. หัวจ่ายอิเล็กตรอนมีหน้าที่เสมือน (Virtual) เป็นลำอิเล็กตรอน
2. ลำแสงอิเล็กตรอนถูกบีบให้รวมตัวกันโดยเลนส์รวมแสงเลนส์คอนเดนเซอร์ (มักถูกควบคุมโดยปั๊มกระแสโพรบอย่างหยาบ (Coarse probe current))
3. ลำอิเล็กตรอนที่มีมุมกว้างจะถูกกำจัดออกโดยการใช้ช่องรับแสงของเลนส์รวมแสง
4. เลนส์รวมแสงตัวที่สองทำให้ลำแสงของอิเล็กตรอนบางลงและเป็นลำอิเล็กตรอนแบบลำเดี่ยว (มักถูกควบคุมโดยปั๊มกระแสโพรบอย่างละเอียด (Fine probe current))
5. ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้ช่องรับแสงของเลนส์วัตถุเพื่อกำจัดอิเล็กตรอนมุมกว้างออกไปได้
6. ชุดขดลวด (Coils) จึงสแกนหรือกวาดลำแสงในรูปแบบกริด อาศัยอยู่ที่จุดตามช่วงเวลาตามที่ ถูกกำหนดโดยความเร็วในการสแกนมักอยู่ในช่วงไมโครวินาที
7. เลนส์วัตถุ ทำหน้าที่โฟกัสลำแสงลงบนบริเวณของชิ้นงานที่ต้องการ
8. เมื่อลำอิเล็กตรอนชนกับชิ้นงาน อันตรกิริยาจึงเกิดขึ้นในตัวอย่างและถูกตรวจสอบโดย เครื่องมือที่มีความหลากหลายขึ้นอยู่กับสัญญาณที่เลือกใช้

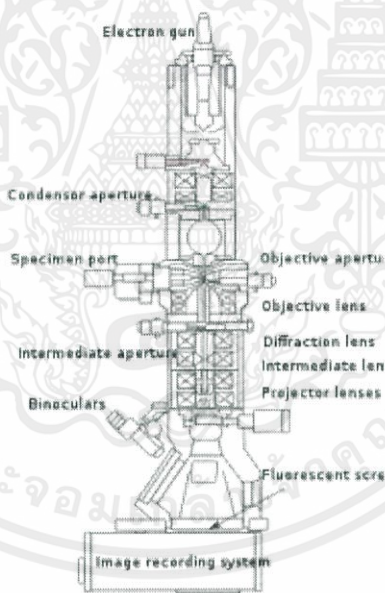
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ก่อนที่ลำอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังจุดอาศัยจุดถัดไป เครื่องมือเหล่านี้จึงตรวจนับสัญญาณ และแสดงจำนวนการเกิดอัตรกิริยาในจอ CRT โดยที่ความเข้มคือจำนวนนับนี้ (หากปฏิกิริยาเกิดมากจะส่งผลให้ความเข้มมากตามไปด้วย)
10. กระบวนการนี้จะเกิดขึ้นจนกระทั่งการสแกนกริดเสร็จสิ้นและเกิดซ้ำอีกครั้ง
- สัญญาณต่างๆที่เกิดขึ้นในเทคนิค SEM เป็นการเกิดอันตรกิริยาระหว่างลำอิเล็กตรอนกับชิ้นงาน โดยสัญญาณที่เกิดขึ้นบนส่วนของชิ้นงานคือ อิเล็กตรอนสะท้อนกลับ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ และรังสีเอกซ์ สัญญาณต่างๆเหล่านี้เกิดขึ้นที่ระยะจากผิวของชิ้นงานลงไปที่แตกต่างกัน อีกทั้งพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกผลิตขึ้นมาไม่เท่ากัน ทำให้เกิดบริเวณที่ผลิตสัญญาณเหล่านี้ที่แตกต่าง [14]



### 2.9.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)

หลักการการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านนั้น จะอาศัยลำแสงอิเล็กตรอนวิ่งไปชนกับวัตถุที่ต้องการจะทดสอบ โดยอาศัยการป้อนพลังงานไฟฟ้าไปยังขดลวดที่เป็นขั้วแคโทด เมื่อพลังงานมากพอ อิเล็กตรอนจะถูกปลดปล่อยออกมา แต่เนื่องจากตัวอิเล็กตรอนมันแต่เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นขั้วประจุไฟฟ้า มันก็จะวิ่งเข้าไปหาอนุภาคที่มีขั้วประจุต่างกันเช่นในอากาศ ทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถวิ่งเข้าไปชนเป้าชิ้นตัวอย่างได้ ดังนั้นภายในกล้องจุลทรรศน์จะต้องทำให้เป็นระบบสุญญากาศ และจะมีคอนเดนเซอร์เป็นตัวเพิ่มความเข้มแสง ซึ่งจะใช้เป็นขดลวดพันรอบแท่งเหล็ก เพื่อเหนี่ยวนำให้ทิศทางของลำอิเล็กตรอนอยู่ในทิศทางเดียวกัน ซึ่งจะให้เกิดความเข้มของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้น เมื่ออนุภาคหรือลำแสงอิเล็กตรอนสามารถวิ่งไปชนวัตถุหรือชิ้นงาน แสงก็จะถูกดูดกลืนและลำแสงส่วนที่เหลือก็จะสามารถทะลุผ่านชั้นวัตถุไปยัง เลนส์วัตถุ (Objective lens) หลังจากนั้นทางด้านล่างของเลนส์วัตถุจะมีระบบเลนส์ต่างๆเพื่อแยกการมองออกเป็นสองเส้นทาง ทำให้ได้ภาพเป็นสองมิติ โดยจอฟลูออเรสเซนส์ (Fluorescence screen) จะเป็นฉากรับภาพ ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพ 2 มิติ โดยความเข้มของภาพจะขึ้นอยู่กับ ค่าเลขอะตอม (Atomic number) ของวัตถุที่ถูกแสงอิเล็กตรอนส่องผ่าน [15]



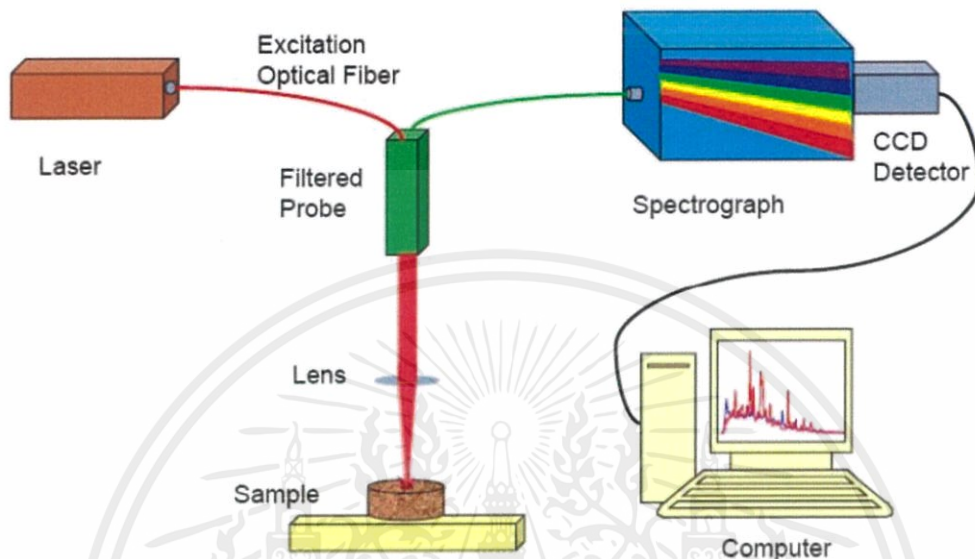
รูปที่ 2.14 แสดงส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน [15]

### 2.9.4 เทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy)

เทคนิครามานสเปกโทรสโคปี (Raman Spectroscopy) เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการตรวจยืนยันเอกลักษณ์ของสาร โดยอาศัยหลักการทางแสง โดยที่สารแต่ละตัวจะมีลักษณะการกระเจิงแสงไม่เหมือนกัน ข้อดีของเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี คือไม่ทำลายตัวอย่าง (Non-Destructive) และไม่ต้องสัมผัสสารโดยตรง สามารถวัดสารผ่านภาชนะบรรจุที่มีลักษณะใส (Transparent) เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขวดแก้วใส ขวดพลาสติกใส ถุงพลาสติก ในปัจจุบันนิยม ในปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคนิครามานสเปกโทรสโคปี ไปตรวจยืนยันสาร เช่น สารเสพติด สารระเบิด สารตั้งต้น ฯลฯ เนื่องจากมีความรวดเร็วในการออกผล และถูกต้อง แม่นยำ [16]



รูปที่ 2.15 หลักการและขั้นตอนในการทำงานของเครื่องมือวิเคราะห์ [16]



รูปที่ 2.16 เครื่อง Raman spectroscopy (Thermo Scientific DXR SmartRaman)

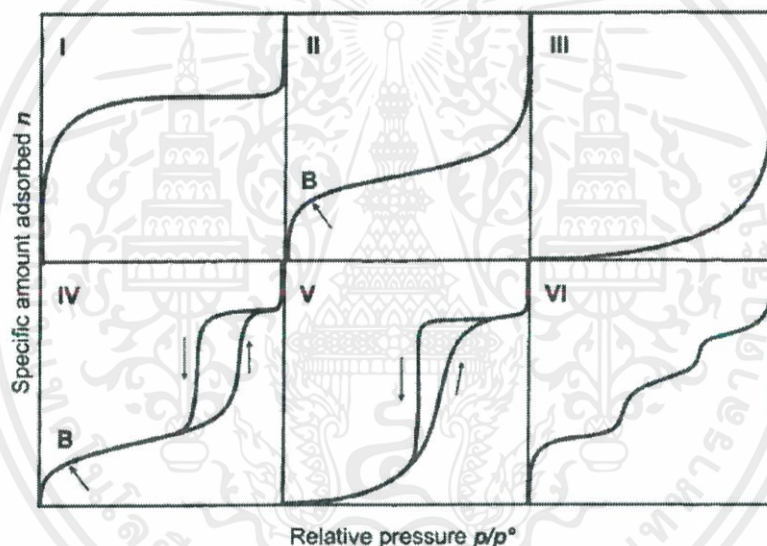
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.9.5 เทคนิคการวิเคราะห์พื้นผิวและความเป็นรูพรุนของวัสดุ BET (The Brunauer Emmett-Teller)

BET เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาตรรูพรุน พื้นที่ผิวจำเพาะ และการกระจายตัวของรูพรุน โดยอาศัยการดูดซับโมเลกุลแก๊สบริเวณพื้นผิวของรูพรุน ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ ) กับปริมาตรหรือน้ำหนักของก๊าซที่ถูกดูดซับ (Adsorption) และการคายซับ (Desorption) ของวัสดุนั้นๆ เทคนิคนี้สามารถที่จะสามารถนำแนวประเภทของรูพรุนได้ [9] โดยประเภทของรูพรุนจะแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่

1. กลุ่ม Micropore มีขนาดน้อยกว่า 2 นาโนเมตร
2. กลุ่ม Mesopore มีขนาดอยู่ในช่วง 2-50 นาโนเมตร
3. กลุ่ม Macropore มีขนาดมากกว่า 50 นาโนเมตร

สามารถวิเคราะห์ประเภทของรูพรุนได้จากกราฟ Adsorption-desorption isotherm เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) และความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ ) จากลักษณะกราฟสามารถแบ่งลักษณะการดูดซับและการคายซับได้ 6 ประเภท ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างระหว่างปริมาตร ( $\text{cm}^3/\text{g}$ ) และความดันสัมพัทธ์ ( $P/P_0$ ) ของ Adsorption-desorption isotherm [17]

### 2.9.6 Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

เป็นเทคนิคใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาหมู่ฟังก์ชันของตัวอย่าง ตัวอย่างที่ต้องการวัดสามารถเป็นได้ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ อีกทั้งยังสามารถตรวจวัดปริมาณของสารตัวอย่างไม่ทราบชนิดที่เป็นสารผสมได้ในหน่วยกรัมได้ (เช่น มีการชนิด A 0.5 กรัม และ B 1.5 กรัม) โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้การกระตุ้นและดูดกลืนทางแสงซึ่งแสงในที่นี้จะเป็นแสงที่อยู่ในความยาวคลื่นในช่วงอินฟราเรด (Infrared :IR) กล่าวคือ จะมีการดูดกลืนความยาวคลื่นในช่วงอินฟราเรด ซึ่งความถี่ที่ถูกดูดกลืนเป็นความถี่ที่ตรงกับการยืด (Stretching) และการงอ (Bending) ของพันธะที่จับกันภายในโมเลกุล พันธะที่ได้กล่าวถึงนั้นคือ พันธะโคเวเลนต์ การดูดกลืนแสงในช่วงอินฟราเรดจะมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole moment) ของโมเลกุล จากนั้นเครื่องมือจะมีการตรวจวัดค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มแสงต่อความถี่หรือความยาวคลื่น (Wave number) เป็นสเปกตรัม เรียกว่า “Interferogram” ดังนั้นสเปกตรัมของสารแต่ละชนิดจะมีความจำเพาะแต่จะตัวทำให้มีค่าความยาวคลื่นที่มีความต่างกัน [18]



รูปที่ 2.18 เครื่อง FTIR PerkinElmer รุ่น Spectrum Two

### 2.9.7 เทคนิคการวัดสมบัติทางไฟฟ้าเคมี

มีเทคนิคหลัก 3 เทคนิค ได้แก่

- Cyclic voltammetry (CV)
- Galvanostatic charge-discharge (CD)
- Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

ทั้ง 3 เทคนิคที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้จะใช้ Metrohm AUTOLAB potentiostat galvanostat เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์

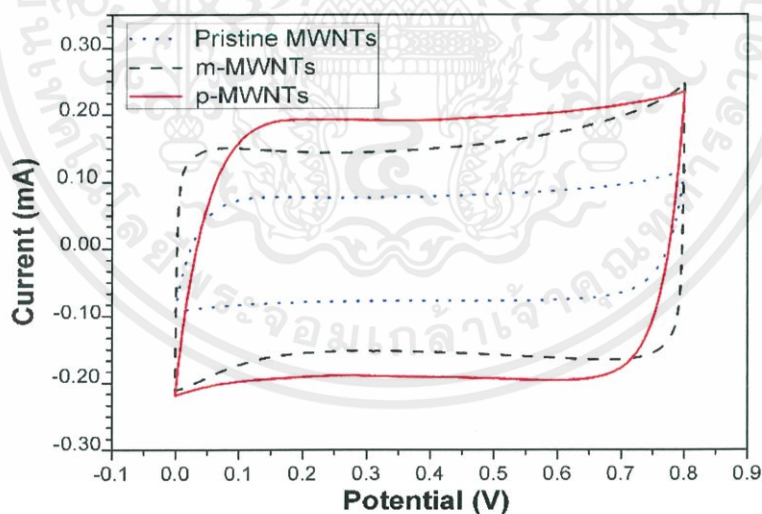
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 เครื่อง Metrohm AUTOLAB potentiostat

### 2.9.7.1 เทคนิค Cyclic voltammetry (CV)

เป็นวิเคราะห์โดยการเพิ่มและลดความต่างศักย์ (Potential; E [V]) ที่ขั้วไฟฟ้าด้วยอัตราคงที่ (Scan rate;  $v$  [V/s]) และวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ข้อมูลที่ได้เป็นข้อมูลเชิงคุณภาพและปริมาณเกี่ยวกับปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีระหว่างวัสดุขั้วและอิเล็กโทรไลต์ ตัวอย่างของกราฟ CV ของขั้วท่อนาโนคาร์บอน แสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ตัวอย่างของกราฟ CV ของขั้วท่อนาโนคาร์บอน

จากกราฟ CV สามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ

$$C_s = \frac{\int_{V_1}^{V_2} I(V) dV}{2mv(E_2 - E_1)} \quad (2.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

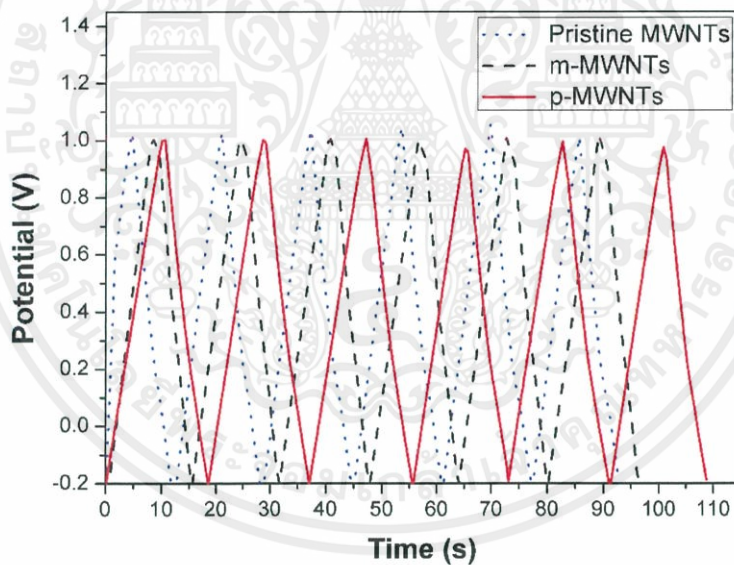
เมื่อ	$C_s$	: ความจุไฟฟ้าจำเพาะ [F/g]
	$V$	: ศักย์ไฟฟ้า [V]
	$I$	: กระแสไฟฟ้า [A]
	$\dot{V}$	: อัตราการสแกนศักย์ไฟฟ้า [V/s]
	$M$	: น้ำหนักของขั้ว [g]

### 2.9.7.2 Galvanostatic charge-discharge (CD)

เป็นการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ต่อเวลาภายใต้ค่ากระแสไฟฟ้าที่คงที่โดยข้อมูลที่ได้จะเป็นเชิงคุณภาพและปริมาณเกี่ยวกับ

- ลักษณะการอัดและการคายประจุไฟฟ้า (charge-discharge)
- ค่าความจุไฟฟ้า
- ค่าความต้านทานภายในอุปกรณ์
- ค่าความเสถียร-อายุการใช้งาน (Cycle life)

ตัวอย่างของกราฟ CD ของขั้วที่อนาโนคาร์บอน แสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ตัวอย่างของกราฟ CD ของขั้วที่อนาโนคาร์บอน

จากกราฟ CD สามารถคำนวณหาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ

$$C_s = \frac{I dt}{m dV} \quad (2.13)$$

เมื่อ	$C_s$	: ความจุไฟฟ้าจำเพาะ [F/g]
	$V$	: ศักย์ไฟฟ้า [V]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

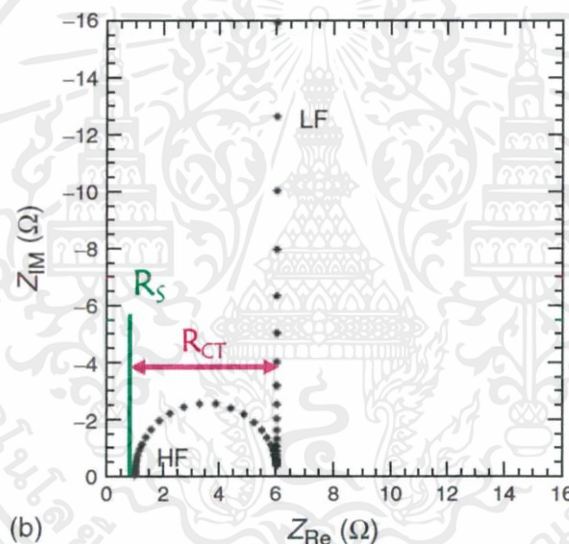
- I : กระแสไฟฟ้า [A]  
M : น้ำหนักของขั้ว [g]

### 2.9.7.3 Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์ค่าอิมพีแดนซ์ที่เกิดขึ้นภายใต้ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่มีค่าความถี่ต่างๆ โดยข้อมูลที่ได้จะเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพและปริมาณเกี่ยวกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างรอยต่อของอิเล็กโทรไลต์และขั้ว

- ค่าความต้านทานของอุปกรณ์ (ค่าความต้านทานระหว่างรอยต่อของขั้วกับคอลเลคเตอร์ ค่าความต้านทานของวัสดุขั้ว และค่าความต้านทานของอิเล็กโทรไลต์)
- ค่าความต้านทานของการถ่ายเทประจุระหว่างวัสดุขั้วและอิเล็กโทรไลต์
- วงจรสมมูลของอุปกรณ์ (Equivalent circuit)

ตัวอย่างของกราฟ EIS ของขั้วท่อนาโนคาร์บอน แสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ตัวอย่างของกราฟ EIS ของขั้วท่อนาโนคาร์บอน

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณ หาความหนาแน่นพลังงาน ได้จาก

$$E = \frac{1}{2} C_s V^2 \quad (2.14)$$

เมื่อ E : ความหนาแน่นพลังงาน [Wh/kg]

และคำนวณหาความหนาแน่นกำลัง ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = \frac{E}{t} \quad (2.15)$$

เมื่อ P: ความหนาแน่นกำลัง [W/kg]  
t: เวลาการคายประจุ [h]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยเล่มนี้ได้ทำการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการเตรียมถ่านกัมมันต์และศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของถ่านกัมมันต์ที่ทำจากใบอ้อย เพื่อประยุกต์ใช้งานในตัวเก็บประจุยิ่งยวด

#### 3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทำการทดลอง

##### 3.1.1 สารเคมี

- (1) น้ำปลอดประจุ (Deionization water: DI)
- (2) แก๊สไนโตรเจน 99.999% ( $N_2$ )
- (3) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid; HCl)
- (4) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide; KOH)

##### 3.1.2 อุปกรณ์

- (1) ปีกเกอร์
- (2) ตะแกรงร่อนขนาด  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  (Sieve)
- (3) เครื่องปั่น
- (4) เตาชนิดหลอดอุณหภูมิสูง (Tube furnace)
- (5) ท่อควอซ
- (6) เตาอบ (Oven)
- (7) ถ้วยอลูมินา
- (8) บีมจ่ายของเหลวแบบรีดท่อ
- (9) ชุดกรองสาร (Filtration)
- (10) เครื่องอัดไฮดรอลิก (Hydraulic press)

#### 3.2 การผลิตถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

##### 3.2.1 การผลิตถ่านชาร์ด้วยกระบวนการคาร์บอนเซชัน (Carbonization)

มีขั้นตอนและกระบวนการดังต่อไปนี้

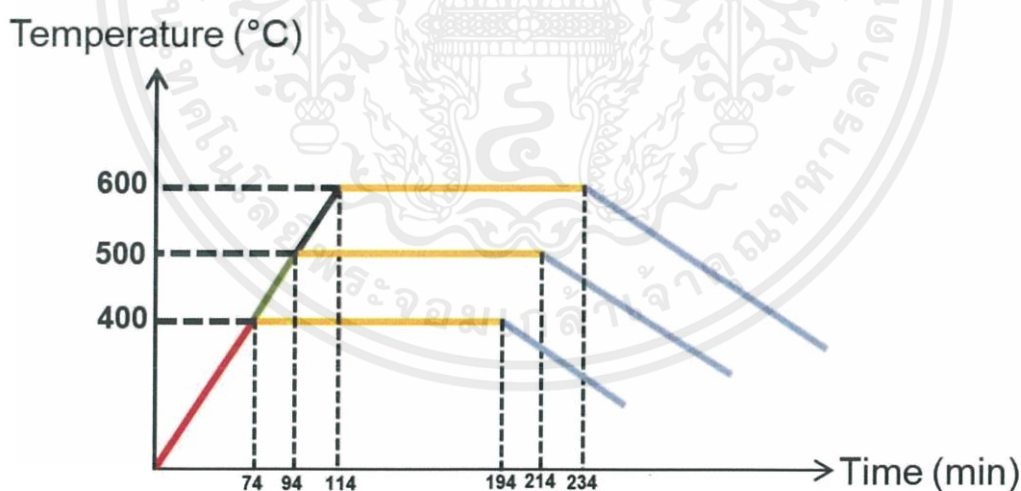
- (1) นำลำต้นของอ้อยที่ได้มาตัดแยกเพื่อนำมาใช้เฉพาะส่วนที่เป็นใบ จากนั้นนำไปที่ไต้ไปตากให้แห้งจนสังเกตได้ว่าใบของอ้อยเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อนเป็นเวลา 3 วัน
- (2) ใบอ้อยที่ได้จากการตากให้แห้งในข้อที่ (1) จะถูกนำไปปั่นหยาบเพื่อลดขนาดของใบเพื่อให้สามารถนำไปอบไล่ความชื้นได้ในปริมาณที่มากขึ้น
- (3) นำใบอ้อยตากแห้งที่ผ่านการปั่นหยาบแล้ว ไปใส่ในภาชนะเพื่อนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ  $80^\circ\text{C}$  เป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (4) จากนั้นนำไปปั่นหยาบเพิ่มอีกครั้ง เพื่อให้มีความละเอียดเพิ่มมากยิ่งขึ้นและทำการคัดแยกเอาเฉพาะส่วนที่สามารถผ่านตะแกรงร่อนที่มีขนาด 1x1 ตารางเซนติเมตรได้เท่านั้น
- (5) ผงใบอ้อยจากที่ได้จากการร่อนตะแกรงจะถูกเตรียมลงในถ้วยใส่สารอลูมินา เพื่อนำเข้าเตาหลอด (CVD) และเริ่มกระบวนการเผา (คาร์บอนไนเซชัน) กระบวนการเผาจะเผาที่อุณหภูมิ 300 ถึง 500 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง โดยมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน โดยมีอัตราการไหลของแก๊ส 0.3 ลิตรต่อนาที
- (6) นำถ่านชาร์ (ผงใบอ้อยเผา) ที่ได้ไปทำการวิเคราะห์หาค่าร้อยละการผลิต โครงสร้างสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน และวิเคราะห์ความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 3.1 ภาพจำลองกระบวนการคาร์บอนไนเซชันใบอ้อย



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและ เวลาในกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยการคำนวณหาค่าร้อยละการผลิตสามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 3.1

$$\text{ร้อยละการผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักของถ่านชาร์}}{\text{น้ำหนักของใบอ้อย}} \times 100 \quad (3.1)$$

รูปที่ 3.3 แสดงแผนภาพขั้นตอนกระบวนการคาร์บอนเซชัน ซึ่งในกระบวนการคาร์บอนเซชันนี้ เป็นกระบวนการที่ใช้แก๊สเป็นตัวพาสารประกอบอินทรีย์ ( $C, H, O, N$ ) ที่อยู่ในใบอ้อย ออกไปเพื่อให้เหลือคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งภายหลังจากการคาร์บอนเซชันเสร็จเรียบร้อยแล้ว เราจะได้ถ่านชนิดหนึ่งที่มีลักษณะเป็นน้ำตาล และถ่านชนิดนี้จะถูกเรียกว่า “ถ่านชาร์” ถ่านชาร์ที่ได้นี้ จะถูกนำไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มลักษณะความเป็นรูพรุนให้กับถ่านชาร์ต่อไป



รูปที่ 3.3 แผนภาพขั้นตอนการคาร์บอนเซชัน

### 3.2.2 การผลิตถ่านกัมมันต์จากใบอ้อยด้วยกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ

เมื่อผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันและได้ถ่านชาร์เรียบร้อยแล้วจะนำไปกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) นำถ่านชาร์ไปบดให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องบดแบบลูกบอล (Ball milling) โดยใช้ความเร็ว 15 เฮิร์ต เป็นเวลา 20 นาที
- (2) นำไปกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยจ่ายน้ำเข้าระบบด้วยปั๊มจ่ายของไหล โดยมีการศึกษาเงื่อนไขดังต่อไปนี้
  - (2.1) เวลาที่ใช้ในการกระตุ้น (10 – 60 นาที)
  - (2.2) อุณหภูมิที่ใช้ในการกระตุ้น (800 – 900 °C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (3) นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเพื่อกำจัดธาตุปนเปื้อน
- (4) นำถ่านกัมมันต์ไปทำการวิเคราะห์หรือย่อยผลการผลิต โครงสร้างสำนักงานวิทยาดด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน และวิเคราะห์ความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิคการดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจน

ตารางที่ 3.1 แสดงเงื่อนไขที่ใช้ในการกระตุ้นเพื่อผลิตถ่านกัมมันต์

อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน (sccm)	เวลาในการกระตุ้น (นาที)	อุณหภูมิ (°C)
300	17	800
		850
		900

โดยการคำนวณร้อยละการผลิตสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{ร้อยละการผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักของถ่านกัมมันต์}}{\text{น้ำหนักของถ่านชาร์}} \times 100 \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.4 ภาพจำลองกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำของถ่านชาร์

### 3.3 การทดสอบสมบัติไฟฟ้าเคมีของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย

#### 3.3.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้า

มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) นำถ่านกัมมันต์จากไบอ้อยและพอลิเมอร์มาบดผสมให้เข้ากันในครกบด
- (2) นำวัสดุผสมในข้อ (1) ใส่ลงในแท่นอัด และใช้แรง 9806.65 นิวตัน (1ตัน) เป็นเวลา 1 นาที โดยเม็ดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มิลลิเมตร และมีความหนา 1 มิลลิเมตร
- (3) นำขั้วที่อัดได้ มาชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า
- (4) นำขั้วมาติดบนแผ่นสแตนเลสด้วยกาวคาร์บอน นำไปอบให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 การเตรียมแผ่นรองรับขั้วไฟฟ้า

มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- (1) ตัดแผ่นสแตนเลสความหนา 0.05 มิลลิเมตร ให้มีขนาดความกว้าง 15 มิลลิเมตร ยาว 50 มิลลิเมตร
- (2) ตัดให้มีลักษณะดัง รูปที่ 3.5
- (3) ล้างแผ่นขั้วสแตนเลสด้วย Acetone, Ethanol และน้ำปลอดประจุ อย่างละ 15 นาที ตามลำดับ จากนั้นเป่าด้วยแก๊สไนโตรเจนให้แห้ง และนำไปใช้งาน

### 3.3.3 การเตรียมอิเล็กโทรไลต์

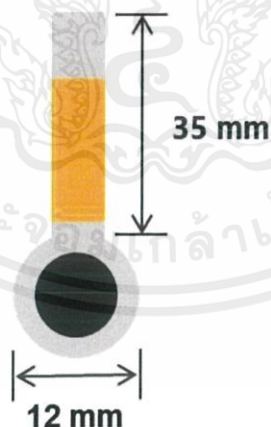
มีขั้นตอนเตรียมสารละลายโซเดียมซัลเฟต ความเข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ดังต่อไปนี้

- (1) ชั่งโซเดียมซัลเฟตจำนวน 71.02 กรัม
- (2) นำน้ำปลอดประจุผสมกับโซเดียมซัลเฟต 71.02 กรัม (ปริมาตรรวมเป็น 500 มิลลิลิตร) และคนให้เข้ากัน

### 3.3.4 การทดสอบประสิทธิภาพตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดจากถ่านกัมมันต์ต่อขั้ว

ในการทดสอบประสิทธิภาพจะใช้ขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ประกอบกันคั่นด้วยแผ่นเมมเบรน มีขั้นตอนการประกอบขั้วดังต่อไปนี้

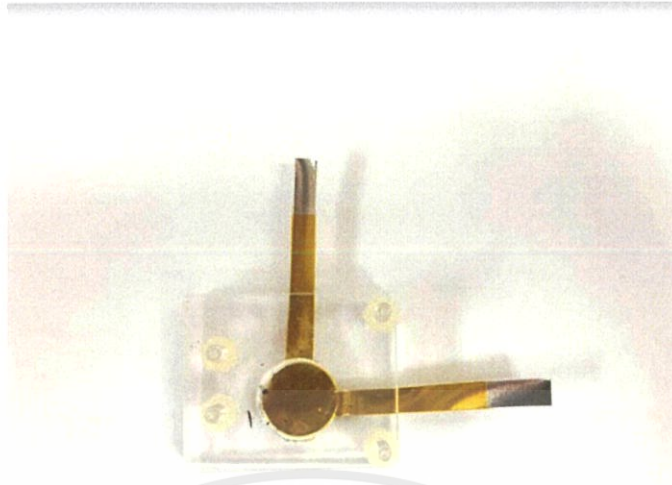
- (1) นำขั้วไฟฟ้าที่ทำการอัดเม็ดติดลงบนแผ่นสแตนเลส ดังรูปที่ 3.5



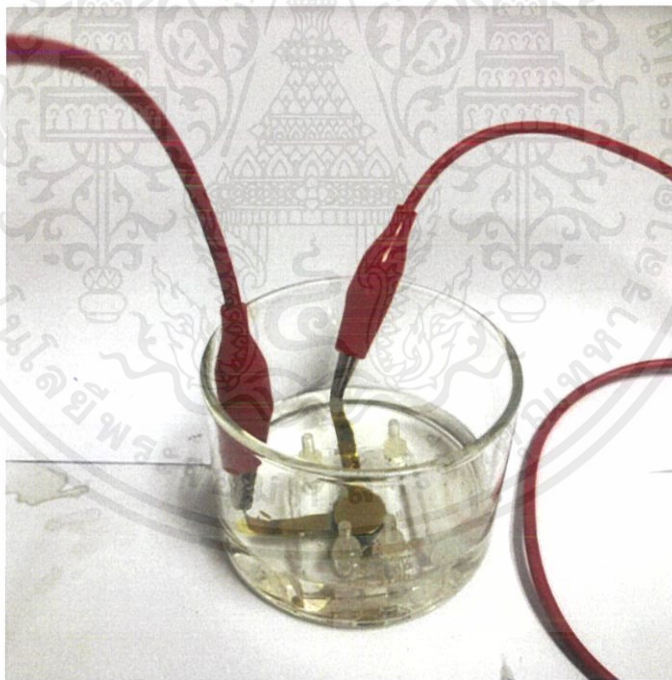
รูปที่ 3.5 ภาพแสดงขั้วไฟฟ้าที่ได้จากถ่านกัมมันต์ที่เจือปนโซดต่างๆ แปะลงบนแผ่นสแตนเลส

- (2) นำขั้วไฟฟ้าที่แปะลงบนแผ่นสแตนเลสประกบกัน โดยมีแผ่นเมมเบรนขั้วระหว่างขั้วทั้ง 2
- (3) แช่ขั้วลงในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- (4) ทำการทดสอบประสิทธิภาพด้วยเทคนิค CV, CD และ EIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



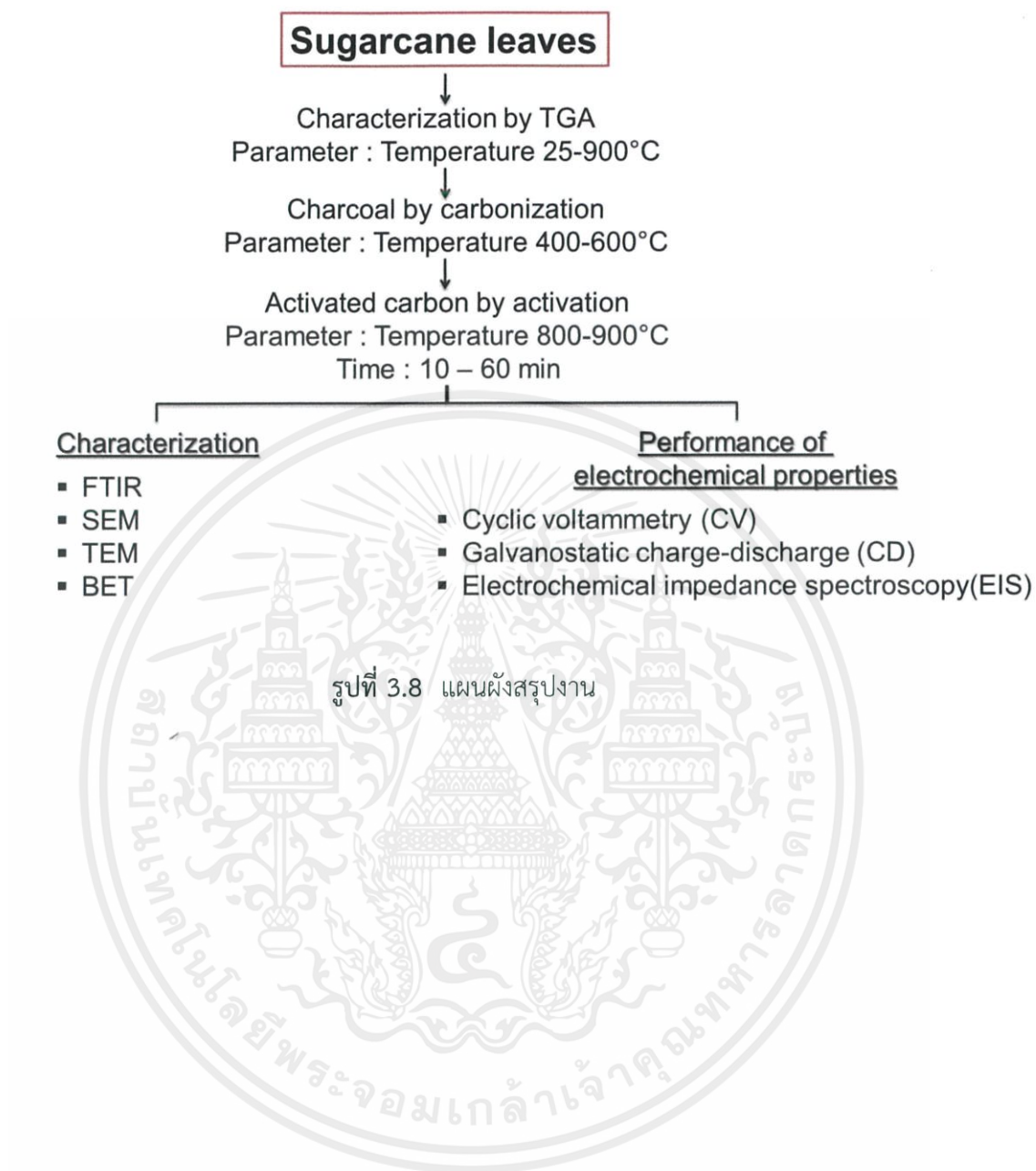
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ขั้วไฟฟ้าผ่านกัมมันต์จากไบออย



รูปที่ 3.7 ภาพแสดงการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนการดำเนินการโครงการพิเศษสรุปแสดงในรูปที่ 3.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

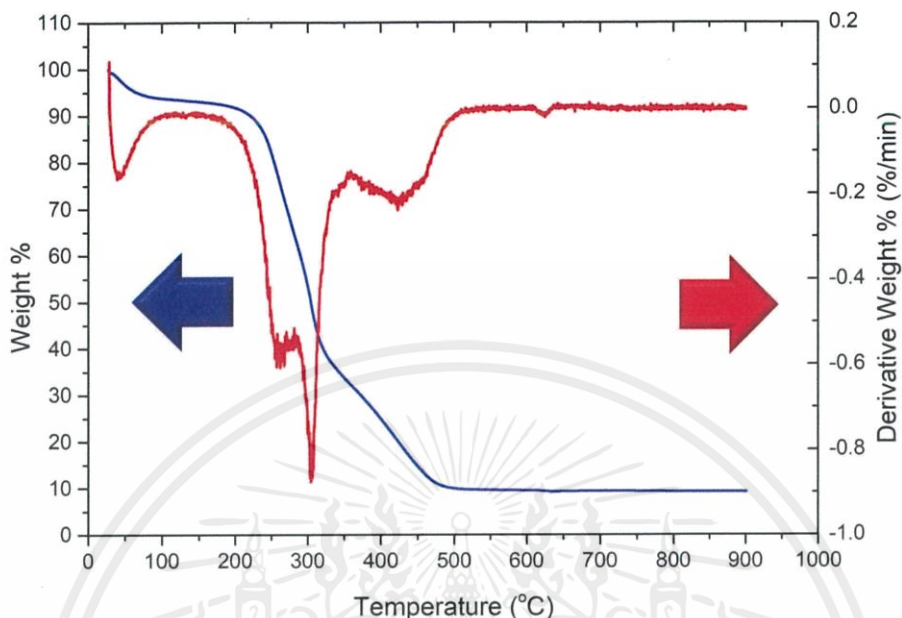
จากการดำเนินการทดลองได้นำวัสดุตัวอย่างไปทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิคต่างๆ โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 เทคนิคการวิเคราะห์และข้อมูลที่ได้รับ

เทคนิคการวิเคราะห์	ข้อมูล
Thermogravimetric analysis : TGA	วิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบในวัสดุที่ทำการศึกษา
Elemental analysis (CHONS)	วิเคราะห์ธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ภายในวัสดุที่ทำการศึกษา
Brunauer–Emmett–Teller (BET)	วิเคราะห์พื้นที่ผิวของวัสดุจากการดูดซับและการคายของแก๊สไนโตรเจน
Raman spectroscopy	วิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอน
Scanning electron microscopy (SEM)	วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยา
Transmission electron microscope (TEM)	วิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุ
Potentiostat	วิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีของอุปกรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis : TGA)



รูปที่ 4.1 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงจากการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบในไบอ้อยด้วยเทคนิค TGA

การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบในวัสดุด้วยเทคนิค TGA เพื่อเป็นการศึกษาแนวโน้มก่อนจะเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนในเซชัน โดยเทคนิคนี้ทำภายใต้เงื่อนไขที่อุณหภูมิ 25°C – 900°C ในสภาวะบรรยากาศไนโตรเจน จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลทำให้น้ำหนักลดลงซึ่งจะหมายถึงการสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ภายในไบอ้อย ซึ่งการสลายตัวทางความร้อนของสารอินทรีย์นี้จะเป็นการเกิดช่องว่างบริเวณพื้นผิวที่เราเรียกว่า “รูพรุน” ซึ่งเมื่อมีรูพรุนที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุมากขึ้นจะส่งผลให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

จากกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าว มีความน่าสนใจในการศึกษาอุณหภูมิในช่วง 400°C, 500°C และ 600°C เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงตั้งแต่ 500°C ขึ้นไป จนถึง 900°C จะเห็นได้ว่าน้ำหนักของสารจะเริ่มคงที่และไม่มีการเปลี่ยนแปลง น้ำหนักที่คงที่นั้นจะเป็นสารที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนเป็นส่วนมากเนื่องจากโครงสร้างของคาร์บอนนั้นเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงและมีเสถียรภาพทางความร้อนสูงทำให้คาดการณ์ได้ว่า น้ำหนักที่คงเหลืออยู่นั้นจะเป็นสารที่มีองค์ประกอบของคาร์บอนเป็นหลัก และความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนัก ณ อุณหภูมิที่ 300°C โดยประมาณจะเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักมากที่สุดซึ่งจะแสดงให้เห็นดัง รูปที่ 4.1 หลังจากนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักจะเริ่มคงที่เมื่อไม่มีการสลายตัวทางความร้อนของสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ภายใน

เมื่อนำเงื่อนไขที่ต้องการศึกษาเข้าสู่กระบวนการคาร์บอนเซชันเพื่อทำการศึกษาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงต่อความเป็นรูปพรุนของวัสดุได้นำไปตรวจสอบสารประกอบอินทรีย์ ( C,H,O,N ) ที่อยู่ในในใบอ้อยด้วยเทคนิคแอลเมนทอล แอนาไลซิส

## 4.2 การวิเคราะห์ธาตุ CHN (CHN analysis)

จากการตรวจสอบปริมาณของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ที่อยู่ในใบอ้อย พบว่า เมื่ออุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้นทำให้ธาตุคาร์บอนในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้นโดยมีค่าร้อยละ 38.69, 46.88 , 47.79 , 49.29 ของ SGL, SG400, SG500, SG600 ตามลำดับ ในทางกลับกันจะมีปริมาณของธาตุไนโตรเจนและไฮโดรเจนที่ลดลงเมื่ออุณหภูมิในการคาร์บอนเซชันเพิ่มสูงขึ้น แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนก่อนและหลังกระบวนการคาร์บอนเซชัน

Sample name	Elemental composition (%)			
	Mass	N	C	H
SGL	0.1050	1.2203	38.697	5.5728
SG400	0.1046	1.6213	46.881	2.5719
SG500	0.1053	1.5524	47.797	1.9276
SG600	0.1090	1.3985	49.291	1.2916

โดยที่ SGL คือ ใบอ้อยแห้ง

SG400 คือ ใบอ้อยที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่ 400°C

SG500 คือ ใบอ้อยที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่ 500°C

SG600 คือ ใบอ้อยที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่ 600°C

## 4.3 การวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน

หลังจากกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 300°C, 400°C, 500°C และ 600°C เป็นที่เรียบร้อยแล้ว ได้นำตัวอย่าง (ถ่านชาร์) ปริมาณ 0.05-0.1 กรัมไปทำการหาค่าพื้นที่ผิว (Surface area) ของถ่านชาร์ ซึ่งเทคนิคนี้จะเป็นการตรวจสอบพื้นที่ผิวโดยการดูดซับ และการคายซับของแก๊สไนโตรเจนที่ความดันเพิ่มสูงขึ้น โดยสามารถสรุปค่าพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ได้ ดังนี้

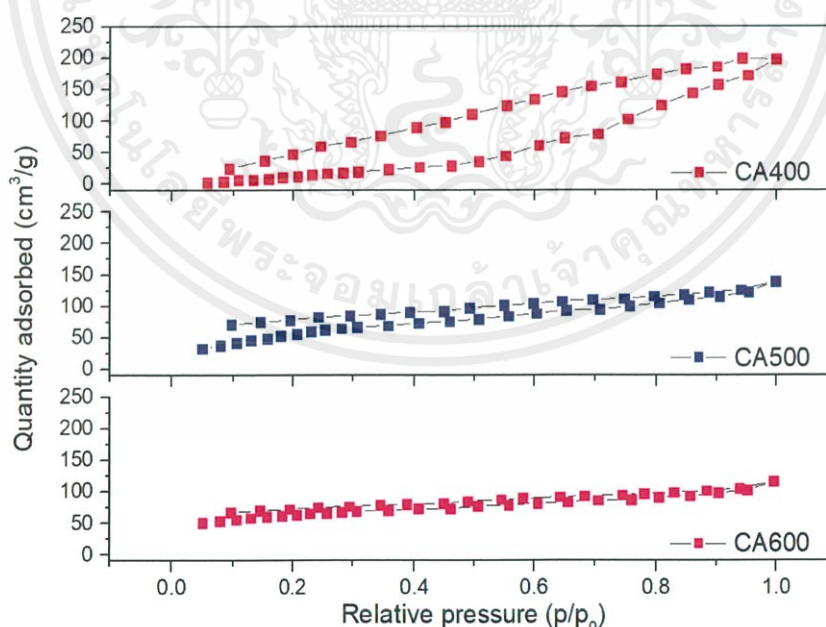
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 400°C, 500°C และ 600°C ตามลำดับ

ชื่อตัวอย่าง	พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)
CA300	-
CA400	77.89
CA500	222.50
CA600	210.30

\*หมายเหตุ ด้วยข้อจำกัด และระเบียบในการวัดผลตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่ 300°C ไม่สามารถที่จะทำการวัดค่าได้ เนื่องจากตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400°C จะยังมีสารประกอบอินทรีย์อยู่เป็นจำนวนมากทำให้อาจเกิดความเสียหายกับเครื่องมือวัดได้

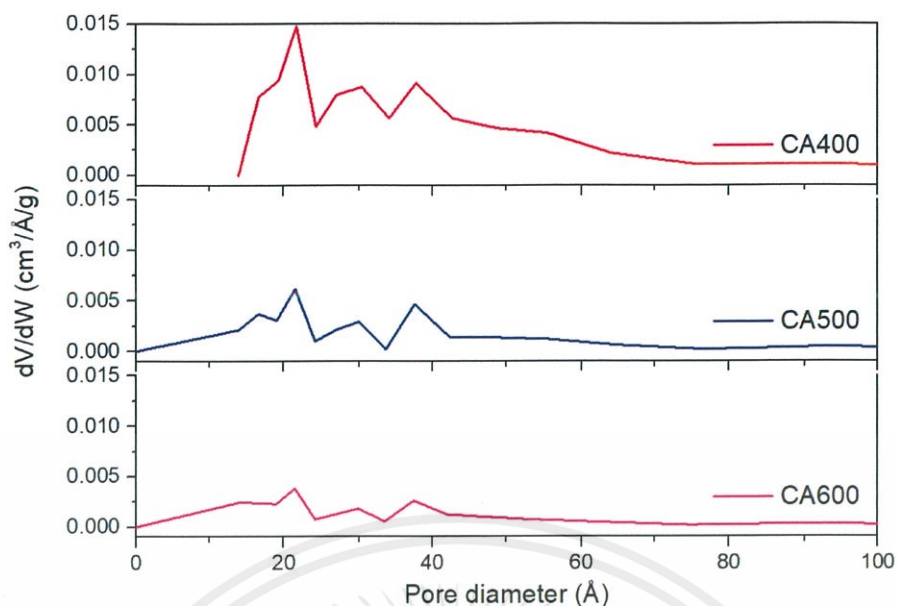
โดยจาก ตารางที่ 4.3 เสรียนโซที่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุดได้แก่ 500°C, 600°C และ 400°C ตามลำดับ จึงเป็นผลทำให้เลือกถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 500°C ไปทำการกระตุ้นด้วยไอน้ำต่อไป

รูปที่ 4.2 แสดงการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านชาร์ที่เตรียมที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 400, 500 และ 600°C ซึ่งจากรูปร่างและลักษณะของการดูดซับแก๊สนี้เมื่อนำไปวิเคราะห์ จะเห็นได้ว่า ลักษณะการดูดซับแก๊สนี้เป็นประเภท 4 ตามการจัดแบ่งของ IUPAC แสดงถึงลักษณะของรูพรุนขนาดเล็ก (Microporous) และรูพรุนขนาดกลาง (Mesoporous) ที่ผสมกันอยู่ ซึ่งในที่นี้ จะสามารถทราบถึงขนาดและการกระจายตัวได้จากรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านชาร์

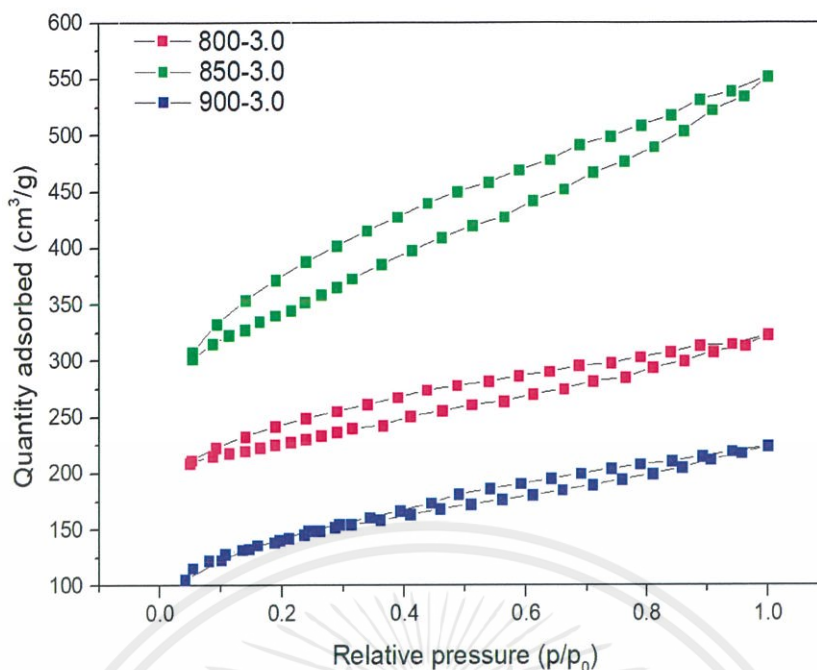
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงถึงการกระจายตัวของรูพรุนและขนาดของรูพรุน

ซึ่งจาก รูปที่ 4.3 นี้จะเห็นได้ว่าขนาดของรูพรุนของทั้ง 3 เจริญไซจะมีกระจายตัวสูงอยู่ในช่วงตั้งแต่ 21 อังสตรอม หรือ 2.1 นาโนเมตร ซึ่งเป็นรูพรุนที่จัดอยู่ในกลุ่มรูพรุนขนาดกลางตามการจัดแบ่งของ IUPAC ทั้งนี้ถ่านชาร์ทั้ง 3 เจริญไซไม่ได้มีเพียงแต่รูพรุนขนาดกลางเท่านั้น แต่มีรูพรุนที่มีขนาดเล็ก (<20 อังสตรอม หรือ < 2 นาโนเมตร) ปะปนอยู่ด้วยเช่นกัน

หลังจากที่นำถ่านชาร์ที่ผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิ 500°C ไปทำการกระตุ้นเพื่อให้เกิดความเป็นรูพรุนที่บริเวณพื้นผิวของวัสดุด้วยเทคนิคการกระตุ้นด้วยไอน้ำเพื่อให้มีพื้นที่ผิวที่เพิ่มสูงขึ้นภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิในการกระตุ้น 800, 850 และ 900°C และมีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาทีในบรรยากาศไนโตรเจน จากนั้นนำมาตรวจสอบการดูดซับและการคายซับของแก๊สไนโตรเจนเพื่อทำการวิเคราะห์พื้นที่ผิวที่เพิ่มสูงขึ้นอีกครั้ง แสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์

จากรูปที่ 4.4 กราฟการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจนของถ่านกัมมันต์แต่ละประเภท แสดงลักษณะการดูดซับแก๊สนี้เป็นประเภท 4 ตามการจัดแบ่งของ IUPAC เมื่อนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4.4

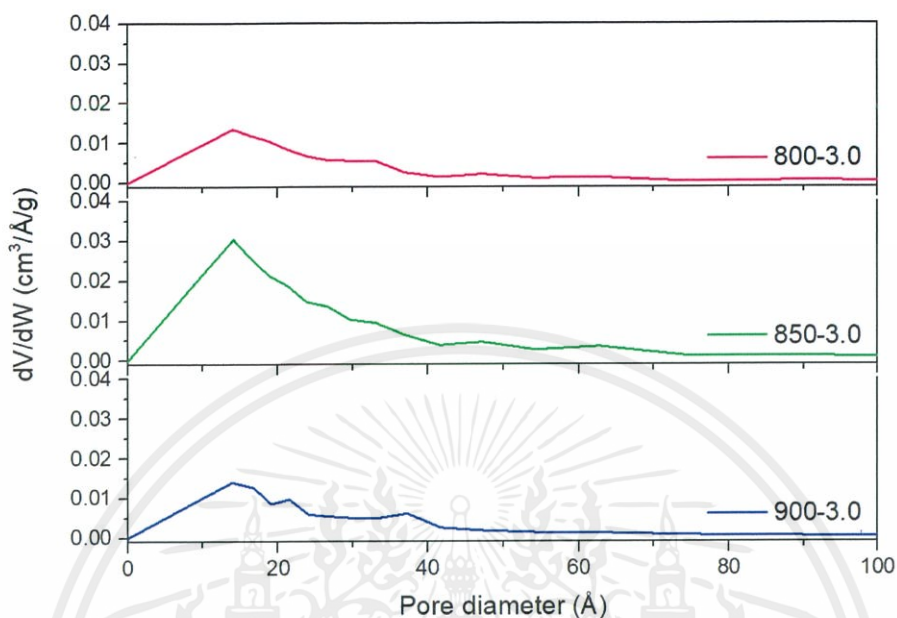
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 800°C, 850°C และ 900°C ตามลำดับ

ชื่อตัวอย่าง	พื้นที่ผิว ( $m^2/g$ )
AC800	707.6
AC850	1104
AC900	466.2

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงพื้นที่ผิวต่อมวลของถ่านกัมมันต์ที่ทำกรวิเคราะห์ด้วยการดูดซับและการคายซับแก๊สไนโตรเจน ซึ่งจะเห็นได้ว่าเงื่อนไขที่มีพื้นที่ผิวสูงที่สุดได้แก่ เงื่อนไขอุณหภูมิ 850, 800 และ 900°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้ยังสามารถบอกถึงการกระจายตัวและขนาดของรูพรุนได้ ดัง รูปที่ 4.5



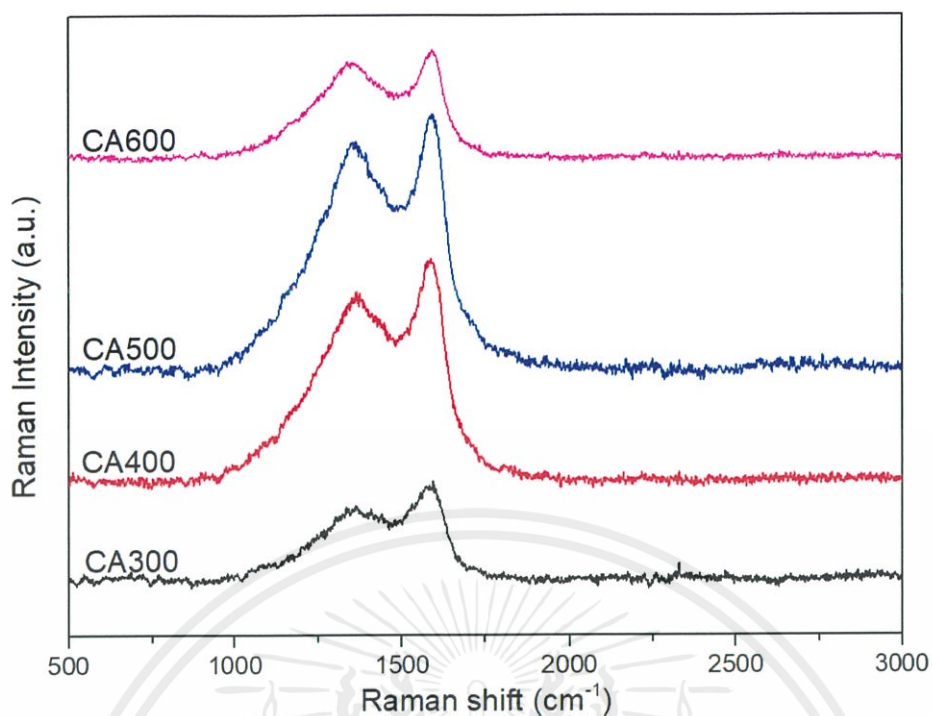
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงการกระจายตัวและขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าจะมีการกระจายตัวของรูพรุนสูงที่ขนาด 14 อังสตรอม (1.4 นาโนเมตร) ซึ่งเป็นรูพรุนที่อยู่ในชนิดของรูพรุนขนาดเล็กตามการจัดกลุ่มของ IUPAC โดยทั้งนี้ก็มีการกระจายตัวร่วมกับรูพรุนขนาดกลางที่อยู่ในช่วง 20 – 50 อังสตรอม (2-5 นาโนเมตร) ด้วย

#### 4.4 การวิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอนด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี

หลังจากกระบวนการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิต่างๆได้นำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์โครงสร้างคาร์บอนด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี พบว่าที่ถ่านชาร์ที่เตรียมที่อุณหภูมิในการคาร์บอนในเซชันที่ 300 ถึง 600°C แสดง Raman shift ของ D band ซึ่งมาจากโครงสร้างคาร์บอนที่ไม่เป็นระเบียบ และ G band ซึ่งมาจากโครงสร้างของกราฟไฟต์ ในช่วงประมาณ 1300 และ 1500  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ

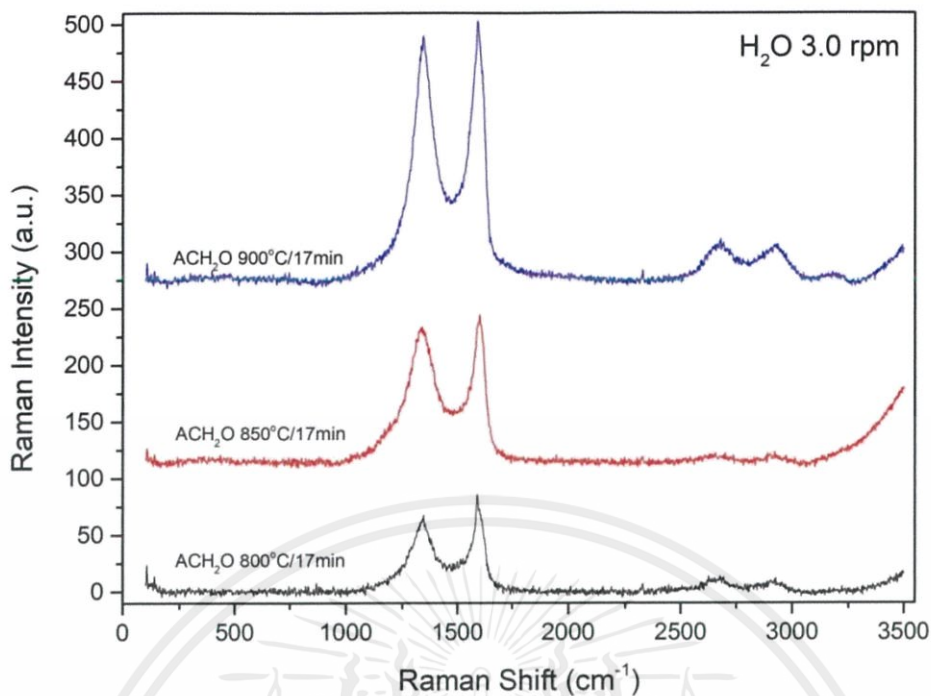
ซึ่งทั้ง 2 พีคที่ได้กล่าวมานั้นเป็นพีคหลักของคาร์บอน โดยมีอัตราส่วน  $I_D/I_G$  0.740, 0.822, 0.889, และ 0.890 ของอุณหภูมิในการคาร์บอนในเซชันที่อุณหภูมิ 300°C, 400°C, 500°C และ 600°C ตามลำดับ



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรามานชิฟกับความเข้มแสง

และหลักจากกระบวนการกระตุ้นได้นำมาวิเคราะห์ความเป็นระเบียบและความไม่เป็นระเบียบของโครงสร้างตัวอย่างอีกครั้ง พบว่าที่เงื่อนไขการกระตุ้นด้วยอัตราการไหลของน้ำ 3.0 rpm แสดงพีคในช่วง Raman shift ที่ 1300 และ 1500  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ และยังแสดงพีค 2D band ในช่วง Raman shift ที่ 2700  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นพีคของวัสดุในกลุ่มกราฟีน โดยที่อุณหภูมิในการกระตุ้น 900°C แสดงพีคให้เห็นได้ชัดเจนมากที่สุด ซึ่งเทคนิคนี้ยังไม่สามารถยืนยันได้อย่างชัดเจนว่าภายในตัวอย่างจะมีการปรากฏขึ้นของวัสดุในกลุ่มกราฟีน โดยจะนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM และ TEM ถัดไป

จากพีคของ D band และ G band ที่ปรากฏสามารถนำมาหาอัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  เพื่อวิเคราะห์ความเป็นระเบียบของวัสดุดังตารางที่ 4.5 ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิในการกระตุ้น 800°C, 850°C และ 900°C



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรามานชิฟและความเข้มแสงของการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยควบคุมอุณหภูมิการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที

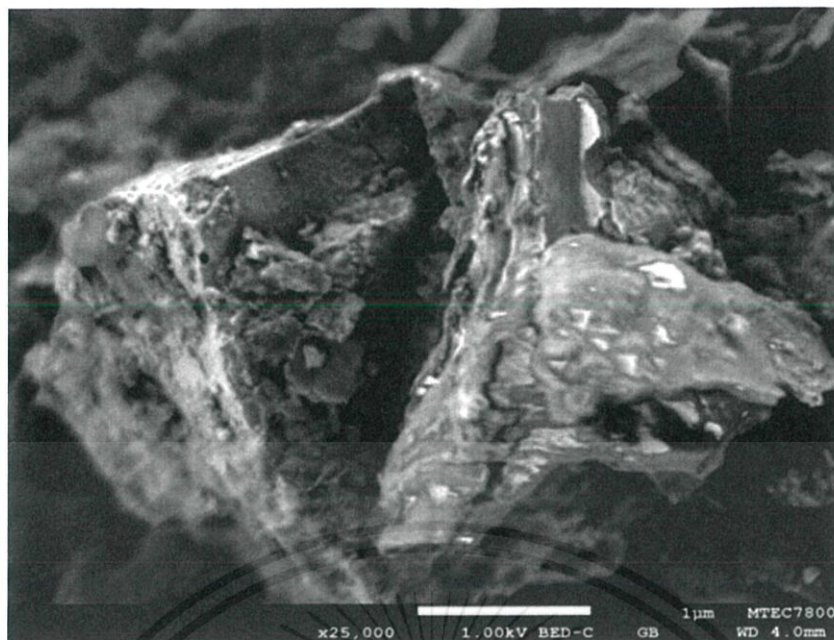
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงอัตราส่วนของ  $I_D/I_G$  ของตัวอย่างที่เงื่อนไขที่ควบคุมการไหลของน้ำ 3.0 รอบต่อนาที

เงื่อนไขอุณหภูมิ (C)	800°C	850°C	900°C
$I_D/I_G$	0.79	0.92	0.94

#### 4.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนี้จะใช้ในการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ในการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของวัสดุเพื่อตรวจสอบความเป็นรูพรุนที่เกิดขึ้นหลังจากกระบวนการคาร์บอนเซชันและกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ โดยแสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชาร์ดรูปที่ 4.8 รูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ของเงื่อนไขอุณหภูมิ 400 500 และ 600°C ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

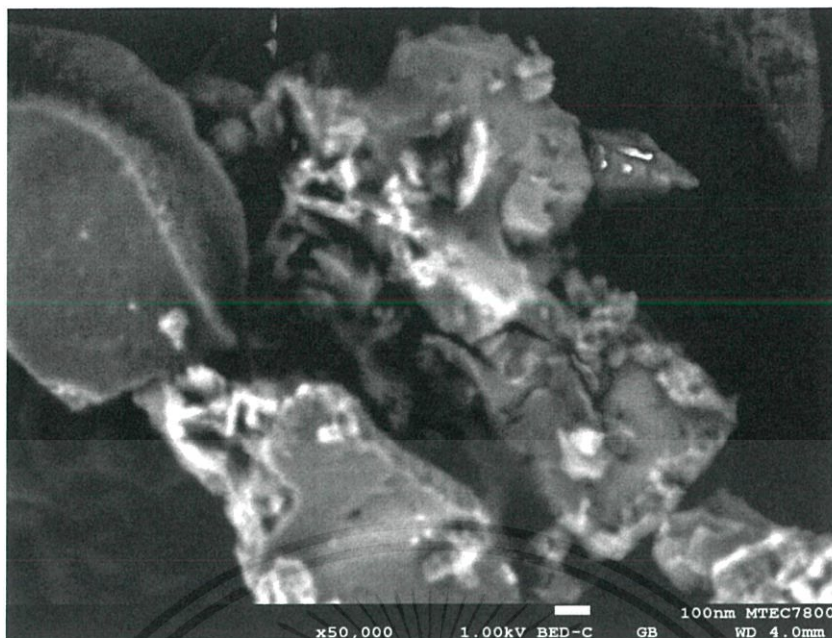


รูปที่ 4.8 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชาร์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่ 400°C



รูปที่ 4.9 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชาร์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่ 500°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของถ่านชาร์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันที่ 600°C

จากภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะสังเกตได้ว่า ที่บริเวณพื้นผิวของตัวอย่างไม่แสดงความเป็นรูพรุนหลังจากที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง

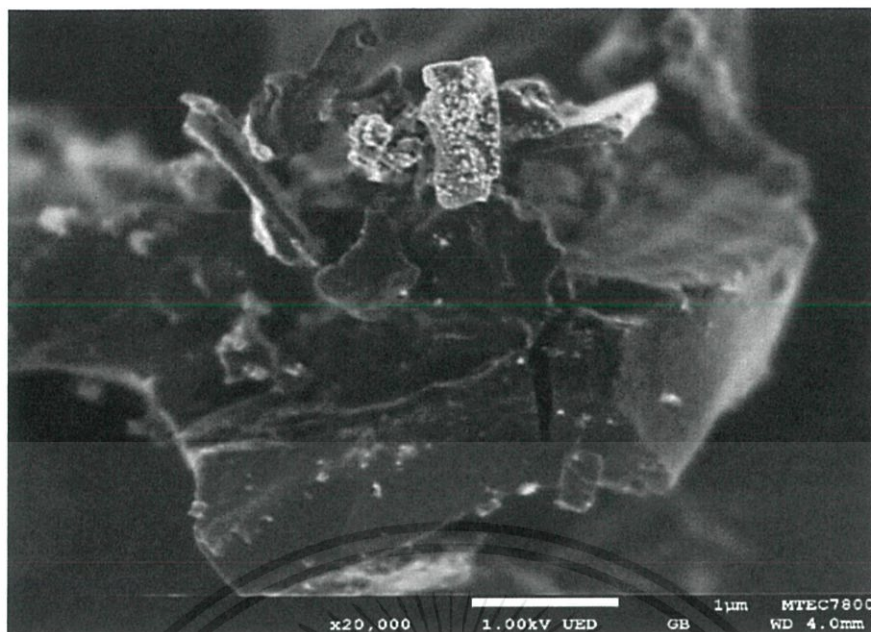
ในกระบวนการคาร์บอนไนเซชันนี้สามารถคำนวณร้อยละการผลิตรถของถ่านชาร์ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าร้อยละการผลิตรถของถ่านชาร์

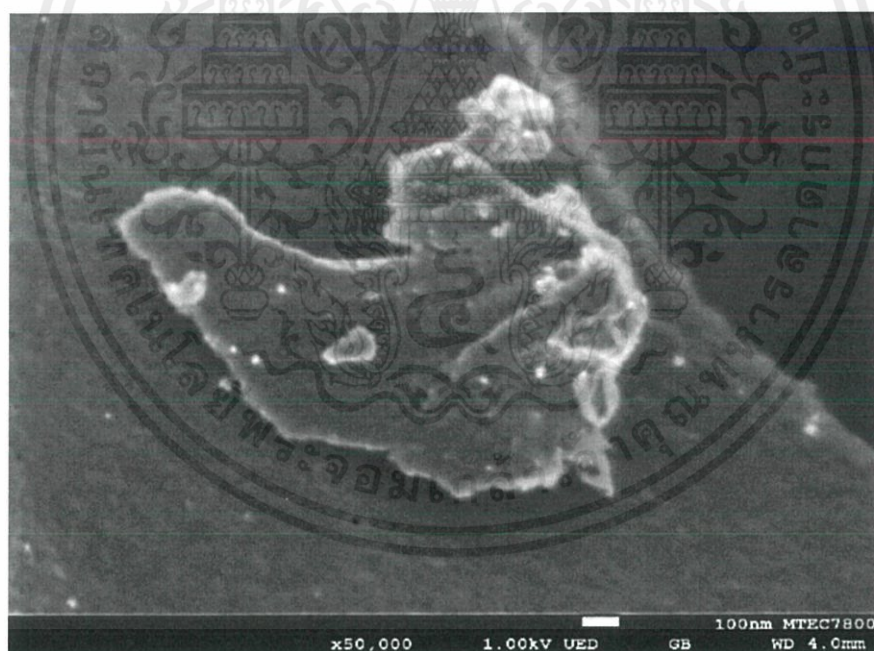
เงื่อนไขอุณหภูมิการคาร์บอนไนเซชัน	ร้อยละการผลิตรถ
400°C	40.22%
500°C	37.66%
600°C	34.70%

ภายหลังจากกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำเพื่อเพิ่มความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง และได้นำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า เงื่อนไขในการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800°C (รูปที่ 4.11 และ รูปที่ 4.12) บริเวณพื้นผิวของตัวอย่างไม่แสดงความเป็นรูพรุนที่ชัดเจน ซึ่งสามารถตรวจสอบพื้นผิวภายในของตัวอย่างได้จากเทคนิค TEM เพื่อตรวจสอบโครงสร้างภายในอีกครั้ง ในขณะที่เมื่ออุณหภูมิในการกระตุ้นเพิ่มสูงขึ้นจะสังเกตเห็นความเป็นรูพรุนที่บริเวณพื้นผิวของตัวอย่างที่ชัดเจนมากขึ้น (รูปที่ 4.12 ถึง รูปที่ 4.16) และมีการกระจายตัวของรูพรุนขนาดต่างๆ ทั่วทั้งพื้นผิวของตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

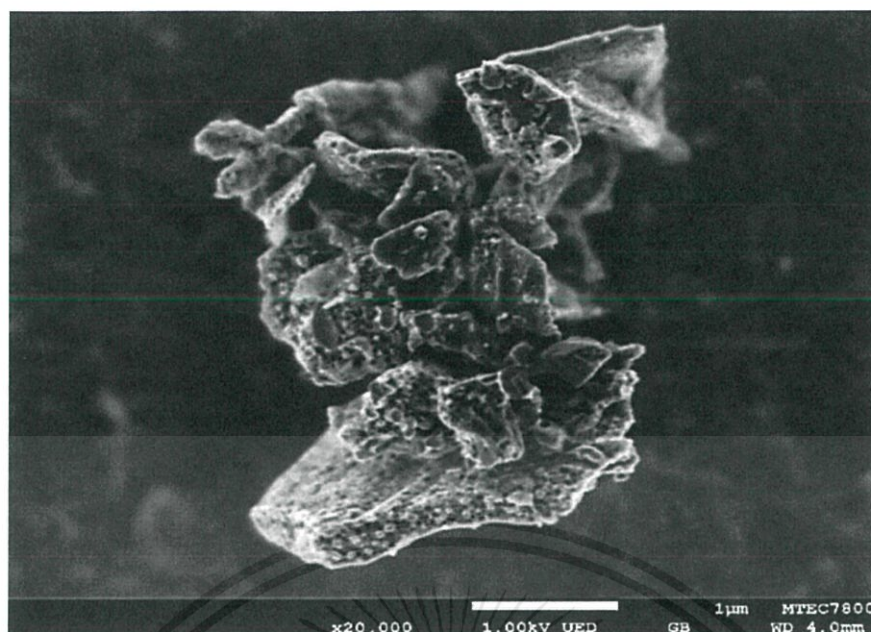


รูปที่ 4.11 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800°C กำลังขยาย 20000X

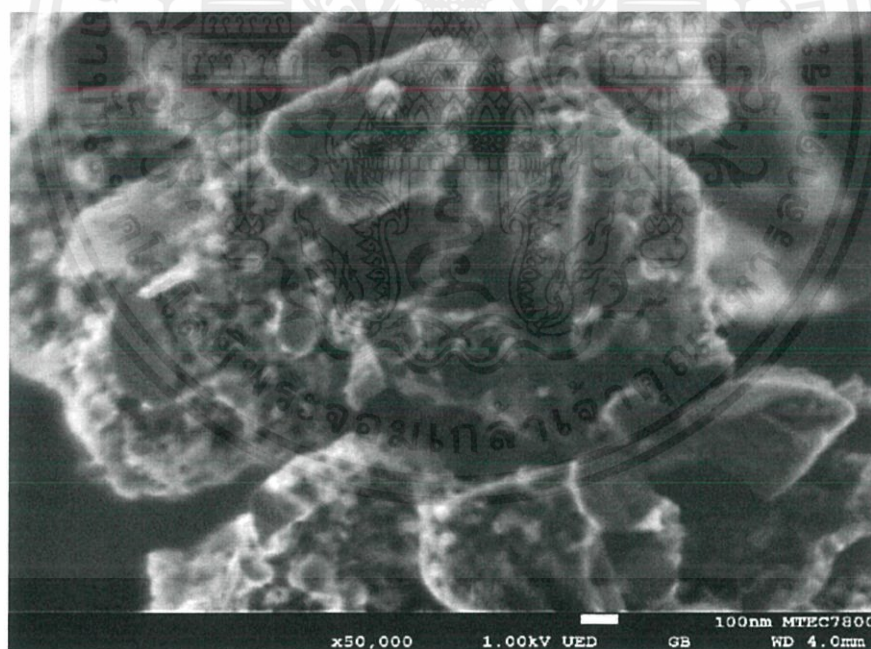


รูปที่ 4.12 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800°C กำลังขยาย 50000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

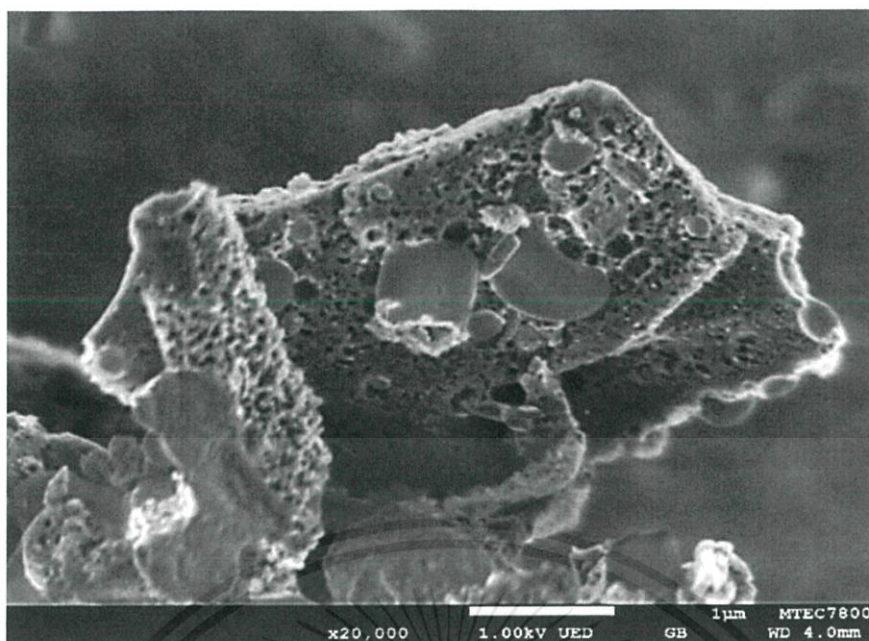


รูปที่ 4.13 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850°C กำลังขยาย20000X

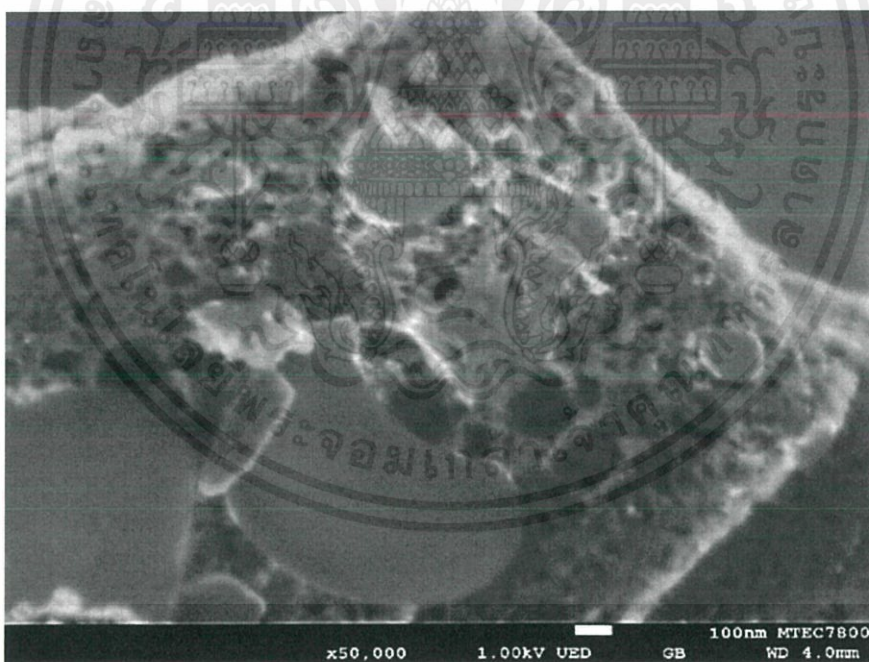


รูปที่ 4.14 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 850°C กำลังขยาย5000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C กำลังขยาย20000X



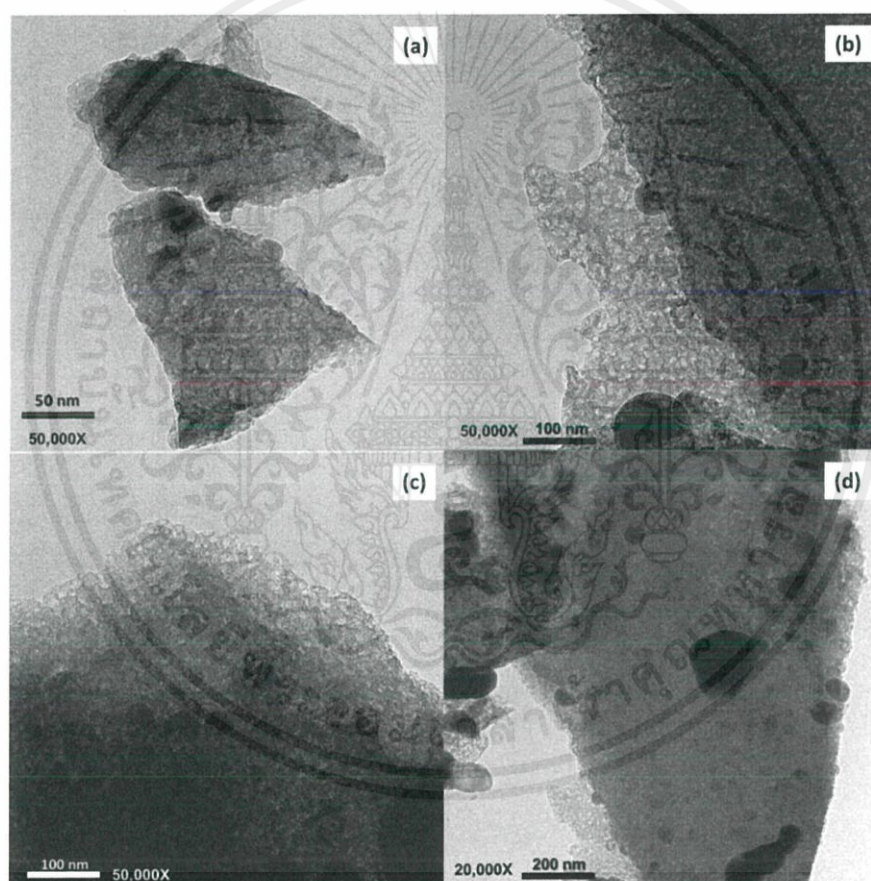
รูปที่ 4.16 ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C กำลังขยาย50000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

การวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุนิยมใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านในการวิเคราะห์ ในขณะเดียวกันในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์โครงสร้างภายในของรูพรุนของถ่านกัมมันต์ถูกกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800°C, 850°C และ 900°C ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที โดยแสดงดัง รูปที่ 4.17 รูปที่ 4.18 และ รูปที่ 4.19 ตามลำดับ

โดยที่ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านจะมีส่วนที่อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านไปได้ (ส่วนสว่าง) และส่วนที่แสงไม่สามารถทะลุผ่านไปได้ (ส่วนมืด) ในส่วนมืดสามารถอธิบายได้ว่าตัวอย่างอาจมีการกระจายตัวไม่ดีจึงมีการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน

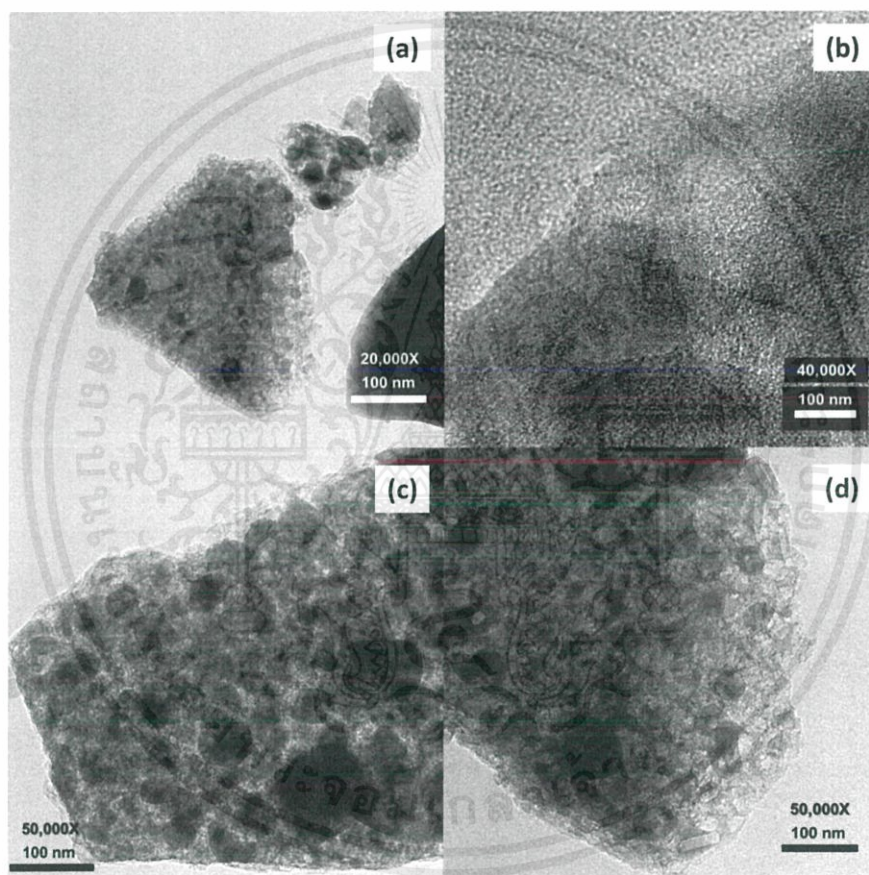


รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์โครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อยที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800°C โดยมีอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที

จากรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นถึงลักษณะความเป็นรูพรุนของวัสดุหลังจากที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 800°C ซึ่งลักษณะของรูพรุนค่อนข้างมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุน

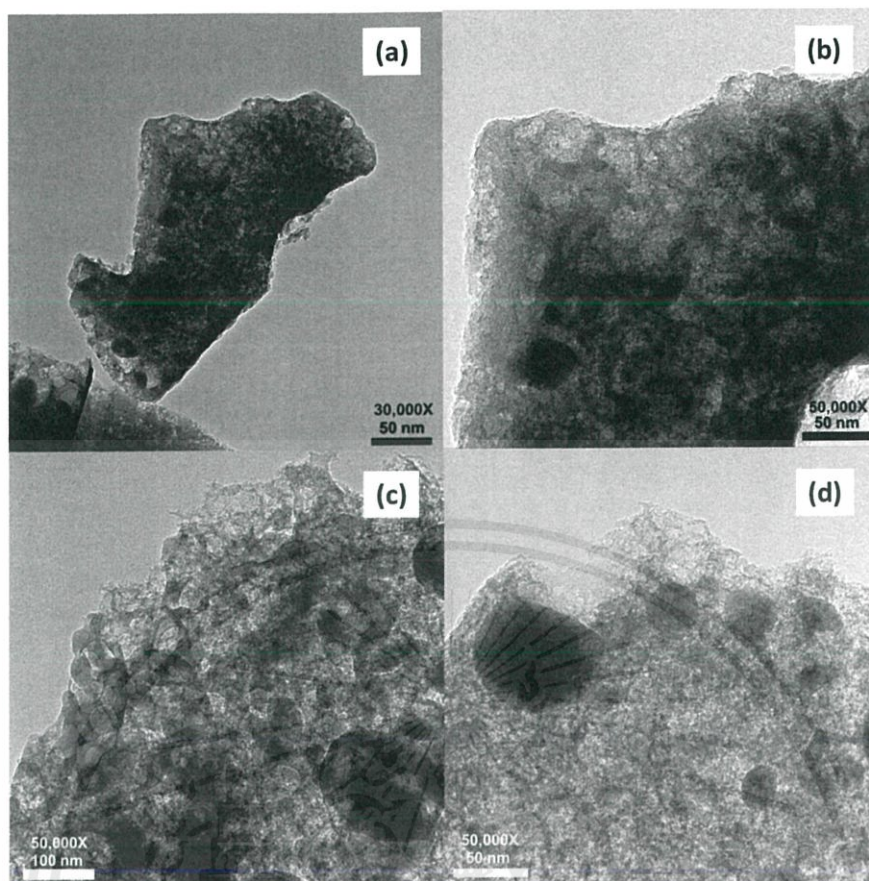
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจากการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาไม่สามารถระบุได้ชัดเจนได้ว่าโครงสร้างภายในของตัวอย่างมีความเป็นรูพรุนหรือไม่ และลักษณะทางสัณฐานวิทยาของที่เงื่อนไข 800°C ไม่ปรากฏความเป็นรูพรุนของตัวอย่าง ในขณะที่เมื่อนำตัวอย่างมาทำการวิเคราะห์ลักษณะโครงสร้างภายในของตัวอย่างที่อุณหภูมิ 800°C ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน พบว่าลักษณะโครงสร้างภายในของตัวอย่างมีความเป็นรูพรุนสูง และมีการกระจายตัวของรูพรุนอยู่ทั่วทั้งโครงสร้างของตัวอย่าง (รูปที่ 4.17) เงื่อนไขอุณหภูมิ 850°C และ 900°C ก็แสดงโครงสร้างที่มีการกระจายตัวของรูพรุนทั่วทั้งบริเวณโครงสร้างเช่นเดียวกัน (รูปที่ 4.18 และ รูปที่ 4.19)



รูปที่ 4.18 การวิเคราะห์โครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อยที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 850°C โดยมีอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



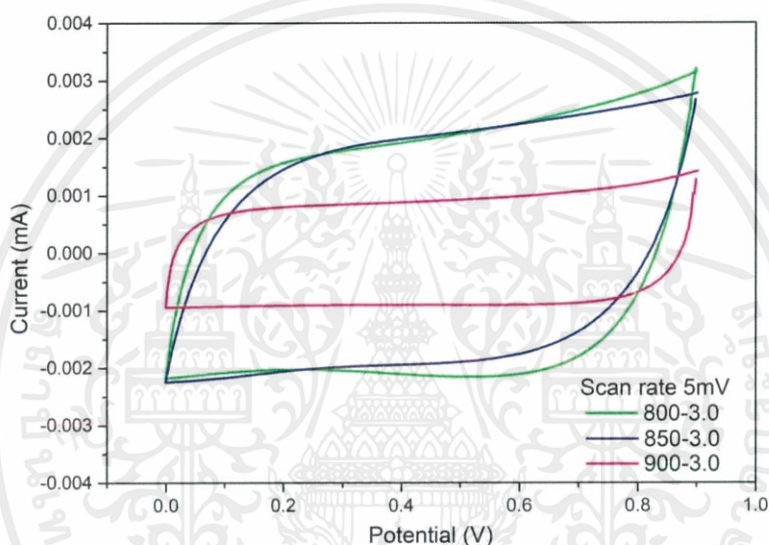
รูปที่ 4.19 การวิเคราะห์โครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์จากไบอ้อยที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 900°C โดยมีอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 800-850 และ 900°C แสดงดังรูปที่ 4.17 รูปที่ 4.18 และ รูปที่ 4.19 พบว่าที่บริเวณพื้นผิวภายในมีความเป็นรูพรุนจำนวนมาก และมีรูพรุนที่มีการกระจายตัวของขนาดต่างๆ ซึ่งจากภาพจะเห็นได้ว่าจะมีส่วนที่มีความทึบแสง และส่วนที่มีความโปร่งแสง ในส่วนของรูพรุนนั้นจะเป็นส่วนที่มีความโปร่งแสงซึ่งหมายความว่าอิเล็กตรอนสามารถที่จะทะลุผ่านไปได้ ส่วนที่เป็นส่วนทึบแสงนั้นสามารถตีความหมายได้ว่าการเกาะกลุ่มก้อนของถ่านกัมมันต์จำนวนหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดความหนาขึ้นเป็นผลทำให้อิเล็กตรอนไม่สามารถที่จะทะลุผ่านไปได้

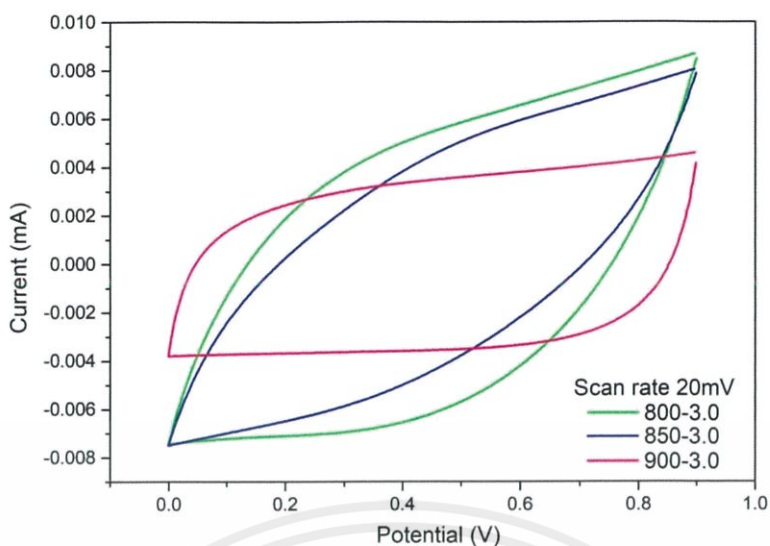
## 4.7 การทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของถ่านกัมมันต์จากใบอ้อย

### 4.7.1 เทคนิค Cyclic voltammetry (CV)

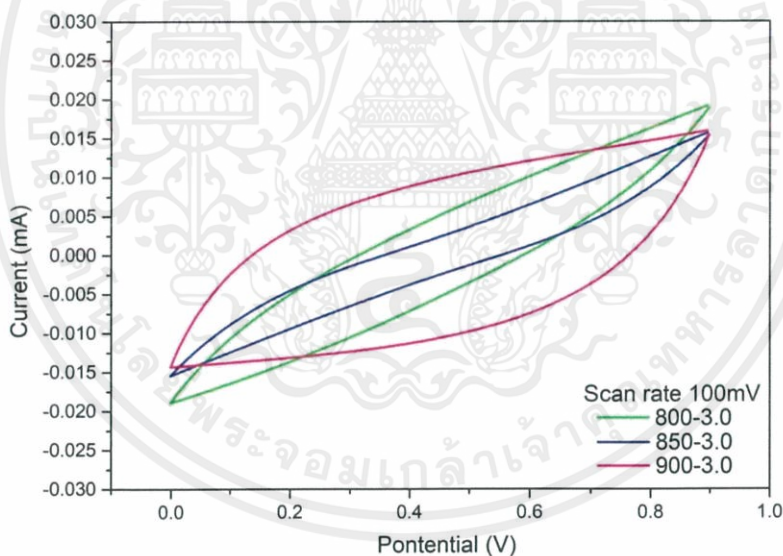
จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งเป็นวิเคราะห์โดยการเพิ่มและลดความต่างศักย์ไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้จะทำการเปลี่ยนความต่างศักย์ไฟฟ้า(Scan rate) 5mV/s, 20mV/s และ100mV/s ตามลำดับ เงื่อนไขที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที แสดงผลดังรูปที่ 4.20 รูปที่ 4.21 และ รูปที่ 4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 5 mV/s



รูปที่ 4.21 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 mV/s



รูปที่ 4.22 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้า 100 mV/s

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้นสามารถหาความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ที่ 5mV/s 20mV/s และ 100mV/s ได้จากสมการที่ 2.12 ดังตารางที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงผลค่าการเก็บประจุไฟฟ้าที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของขั้วไฟฟ้า ถ่านกัมมันต์จากไบอ้อย

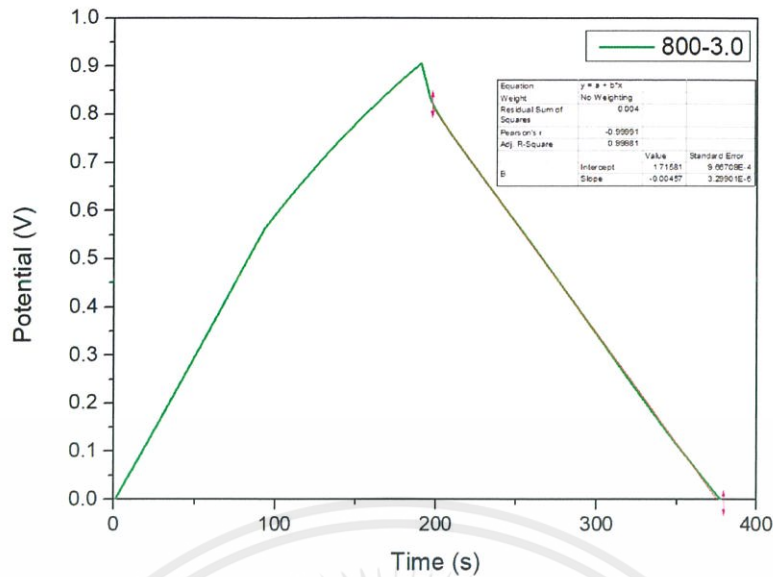
เงื่อนไข	5mV/s	20mV/s	100mV/s
800-3.0	13.73 F/g	6.18 F/g	1.48 F/g
850-3.0	12.09 F/g	5.88 F/g	0.78 F/g
900-3.0	7.29 F/g	6.40 F/g	3.26 F/g

จากการวัดค่าประสิทธิภาพการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ของเงื่อนไขที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาทีที่จะเห็นได้ว่า จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ และกระแสไฟฟ้า เมื่อความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจะสังเกตเห็นได้ว่า พื้นที่ใต้กราฟจะมีขนาดเล็กลง แต่จะเห็นได้ว่าที่เงื่อนไขอุณหภูมิในการกระตุ้น 900°C นั้นจะค่อนข้างมีเสถียรภาพในการเก็บประจุไฟฟ้าที่มีความเสถียรสูงที่สุด ซึ่งเมื่อวิเคราะห์จากลักษณะของกราฟแล้วนั้นมีความใกล้เคียงที่จะเป็นสี่เหลี่ยมซึ่งหมายความว่าสามารถเก็บประจุได้มากมีการสูญเสียประจุไปค่อนข้างน้อย และเมื่อหาค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ โดยคำนวณจากพื้นที่ใต้กราฟที่เงื่อนไขการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800°C, 850°C และ 900°C มีค่าการเก็บประจุที่น้อยลงตามลำดับ โดยที่มีค่าการเก็บประจุ 13.73F/g, 12.09F/g และ 7.28F/g ตามลำดับ

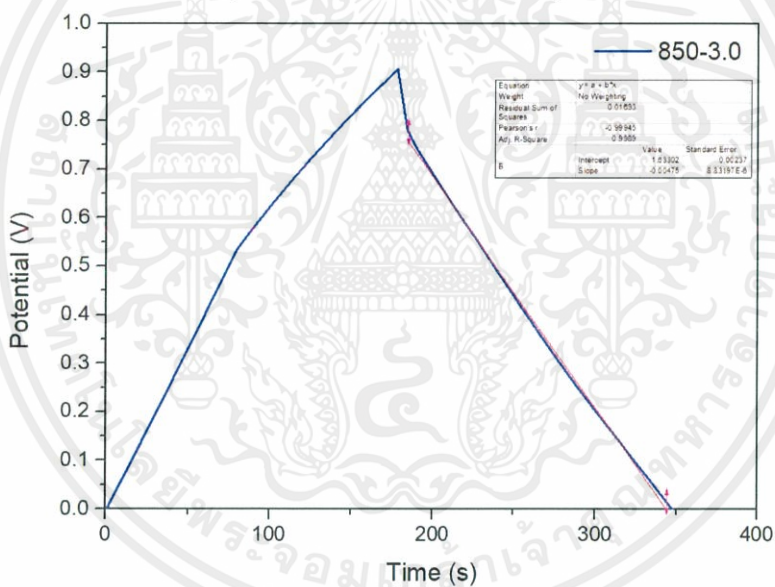
กล่าวโดยรวมของการวัดประสิทธิภาพการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ เงื่อนไขที่มีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 ที่อุณหภูมิ 900°C มีเสถียรภาพในการเก็บประจุที่ดีที่สุดแต่มีความสามารถในการเก็บประจุได้ต่ำกว่าอุณหภูมิ 800°C และ 850°C ทั้งนี้หากนำไปใช้งานที่มีความต่างศักย์ต่ำ เงื่อนไขที่ 800°C และ 850°C จะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานมากกว่า

#### 4.7.2 เทคนิค Galvanostatic charge-discharge (CD)

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ต่อเวลาภายใต้ค่ากระแสไฟฟ้าที่คงที่ จะเป็นการอัดและคายประจุไฟฟ้าในกับอุปกรณ์ ซึ่งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างเวลา(วินาที) ในการอัดและคายประจุ กับความต่างศักย์ ในการวัดผลนี้จะอุปกรณ์ที่เงื่อนไขอุณหภูมิ 800°C, 850°C และ 900°C โดยทั้ง 3 อุณหภูมิที่ได้กล่าวมาข้างต้นนั้นจะมีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 ที่เงื่อนไขแสดงดัง รูปที่ 4.23 รูปที่ 4.24 และ รูปที่ 4.25 ตามลำดับ

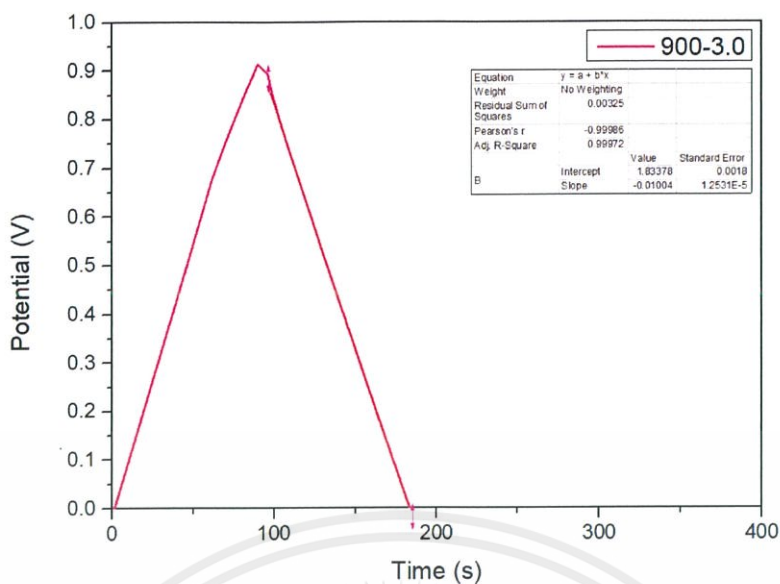


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอัดและคายประจุ กับความต่างศักย์ของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 800°C โดยควบคุมการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที

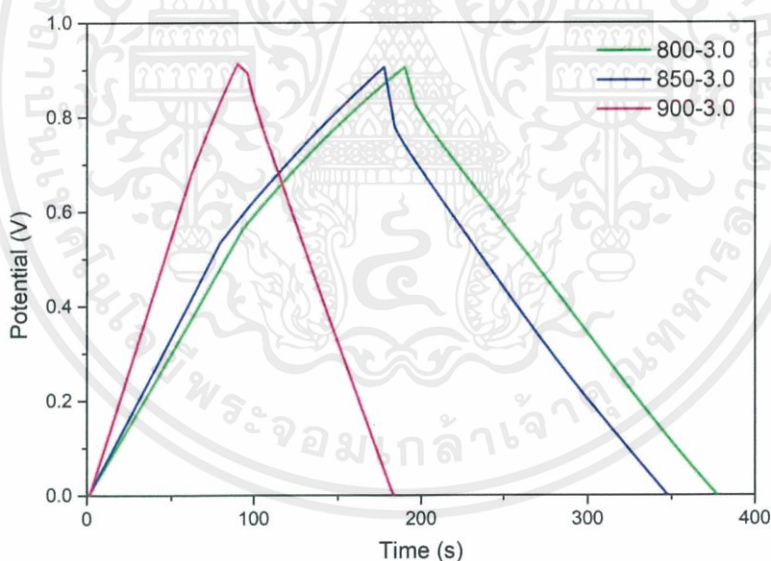


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอัดและคายประจุ กับความต่างศักย์ของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 850°C โดยควบคุมการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอัดและคายประจุ กับความต่างศักย์ของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 850°C โดยควบคุมการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.26 กราฟเปรียบเทียบเงื่อนไขในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800°C 850°C และ 900°C โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาทีของความสัมพันธ์ระหว่างการอัดและคายประจุไฟฟ้า กับความต่างศักย์

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้นนี้สามารถหาค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ได้จากความชันของกราฟดังสมการที่ 2.13 ดังตารางที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ตารางแสดงค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์

เงื่อนไขอุณหภูมิ	ความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้า
800-3.0	7.51 mF/g
850-3.0	6.88 mF/g
900-3.0	3.76 mF/g

จากการวิเคราะห์ข้อมูลในการอัดและคายประจุของทั้ง 3 เงื่อนไขลักษณะของกราฟทั้ง 2 ด้าน มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมที่ค่อนข้างสมมาตรกัน ที่เงื่อนไขที่มีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบ ต่อนาที เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นแนวโน้มในการอัดและคายประจุลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจน และเมื่อ คำนวณหาค่าการเก็บประจุไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงขึ้นมีแนวโน้มในการเพิ่มขึ้นของค่าการเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งค่าการเก็บประจุที่ลดลงนั้นอาจเป็นผลจากพื้นที่ผิว หรือค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นซึ่งจะต้องมีการ วิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่างๆต่อไป

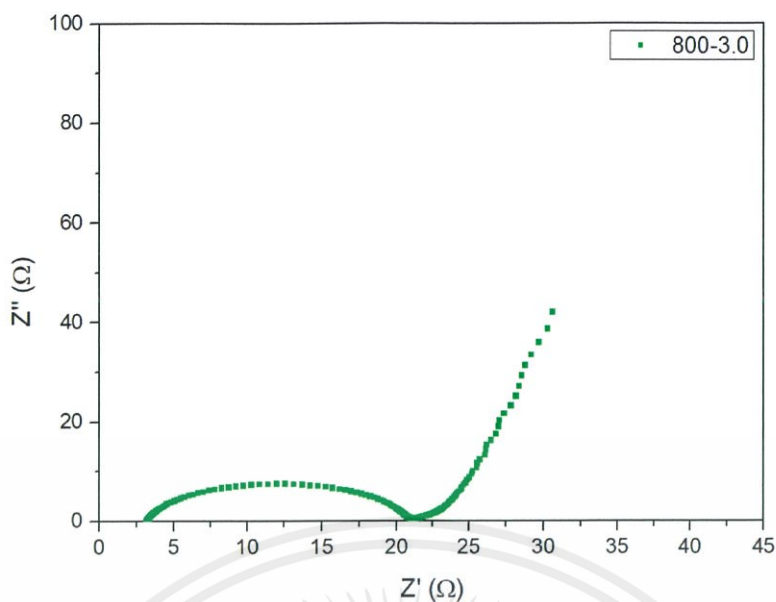
ซึ่งเมื่อสังเกตในส่วนของการคายประจุจะมีส่วนที่มีการลดลงของข้อมูลก่อนที่จะมีการคาย ประจุ ในส่วนนั้นจะเป็นส่วนที่เกิดจากความต้านทาน ซึ่งผลจากความต้านทานนั้นจะทำให้เรา สูญเสียประจุที่ทำการอัดเข้าไป แต่จะสามารถทราบได้ว่าความต้านทานส่วนที่หายไปนั้นเกิดขึ้นจาก ส่วนใดนั้นจะต้องทำการยืนยันด้วยการวัดด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy

#### 4.7.3 เทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)

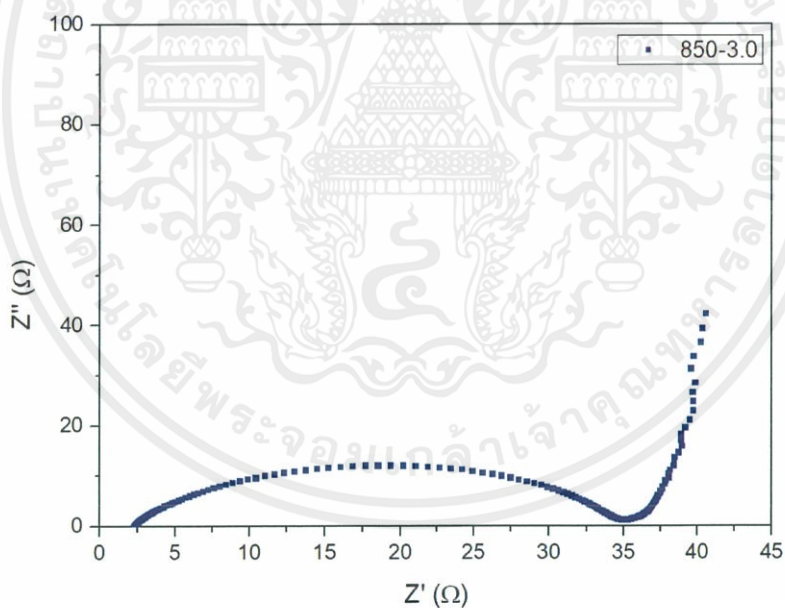
เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่ใช้ในการหาค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ โดยเทคนิคนี้จะมีการ ให้ค่าความถี่ของความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ค่าต่างๆ ซึ่งสามารถบอกค่าความต้านทานได้ทั้งหมด 3 ค่า ด้วยกัน ได้แก่

- (1) ค่าความต้านทานของอุปกรณ์
- (2) ค่าความต้านทานของการถ่ายเทประจุระหว่างวัสดุขั้วและอิเล็กโทรไลต์
- (3) วงจรสมมูลของอุปกรณ์ (Equivalent circuit)

ซึ่งภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิในการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ 800°C, 850°C และ 900°C โดยควบคุม อัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที สามารถแสดงค่าความต้านทานดังกล่าวทั้ง 3 ได้ดังรูปที่ 4.27 รูปที่ 4.28 และ รูปที่ 4.29 ตามลำดับ

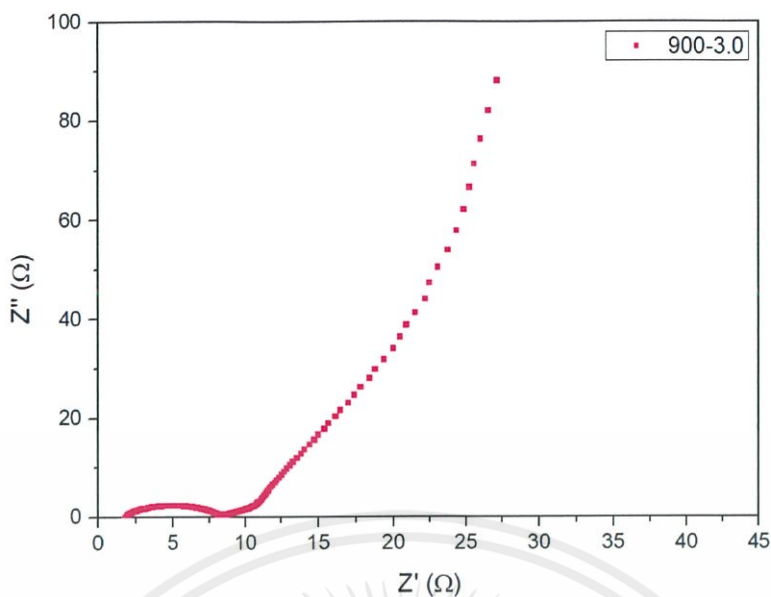


รูปที่ 4.27 กราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเงินไซการกระตุ้นที่ 800°C ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที

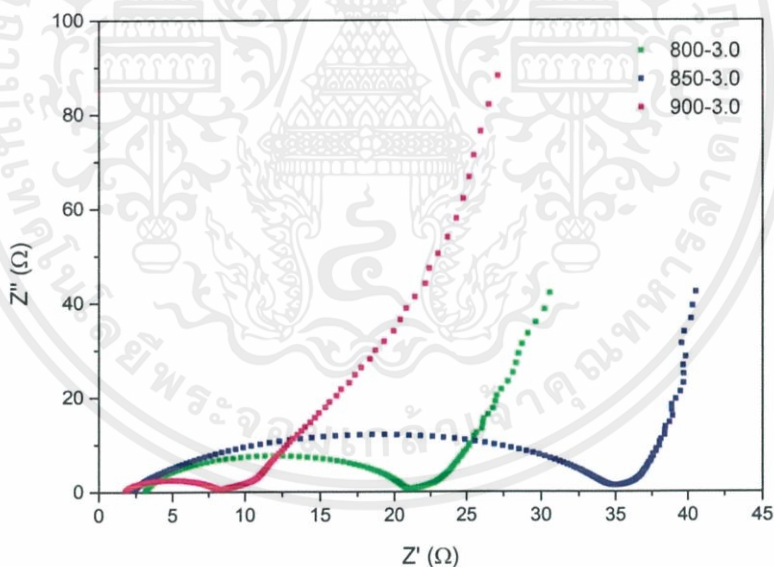


รูปที่ 4.28 กราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเงินไซการกระตุ้นที่ 850°C ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 กราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเงื่อนไขการกระตุ้นที่ 900°C ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.30 กราฟการเปรียบเทียบอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของอุณหภูมิในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 800°C, 850°C และ 900°C ที่มีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที

จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้น (รูปที่ 4.30) จะสังเกตเห็นได้ว่าจุดเริ่มต้น ( $R_s$ ) ของกราฟมีค่าที่เข้าใกล้ศูนย์มากๆ ซึ่งสามารถบอกได้ว่าค่าความต้านทานของอุปกรณ์นั้นมีค่าน้อยซึ่งเป็นลักษณะที่ดีของอุปกรณ์ตัวเก็บประจุไฟฟ้า แต่ในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาส่วนโค้ง ( $R_{ct}$ ) ซึ่งหมายถึงค่าความเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้านทานของการถ่ายเทประจุระหว่างวัสดุขั้วและอิเล็กโทรไลต์ หากมีความกว้างของครึ่งวงกลมมากนั้นจะหมายความว่าค่าความต้านทานในการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าและอิเล็กโทรไลต์นั้นมีค่ามาก และในส่วนสุดท้ายจะเป็นส่วนที่บ่งบอกค่าความต้านทานของสารอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งเมื่อนำมาวิเคราะห์ และเปรียบเทียบกันทั้ง 3 เงื่อนไข จะเห็นได้อย่างชัดเจนจากรูปที่ 4.30 ว่าที่เงื่อนไขในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C มีค่าความต้านทานของอุปกรณ์ต่ำที่สุด อีกทั้งยังมีค่าความต้านทานในการถ่ายโอนประจุระหว่างขั้วไฟฟ้ากับอิเล็กโทรไลต์ที่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบผลการเก็บประจุไฟฟ้าที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค CV และ CD แล้ว พบว่าการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 900°C ให้ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะที่ต่ำที่สุด ซึ่งจะในการวิเคราะห์ถึงผลที่ขัดแย้งกันนี้ ต้องนำข้อมูลของพื้นที่ผิวมาพิจารณาร่วมด้วยต่อไป

โดยค่าความต้านทานของอุปกรณ์ และค่าความต้านทานในการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าที่ได้กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปและแสดงดัง ตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ตารางสรุปผลค่าความต้านทานใน และค่าความต้านทานในการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์

Temperature	800°C	850°C	900°C
$R_s (\Omega)$	3.11	2.60	1.79
$R_{ct} (\Omega)$	18.01	32.46	6.50

## บทที่ 5

# สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TGA ทำให้กำหนดช่วงอุณหภูมิในการศึกษา และช่วงอุณหภูมิที่เลือกได้แก่ 300°C 400°C 500°C และ 600°C โดยในกระบวนการคาร์บอนเซชันจะใช้อัตราในการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันได้นำตัวอย่างทั้งหมด 4 เงื่อนไขไปทำการวัดการดูดซับและการคายซับของแก๊สไนโตรเจนด้วยเทคนิค BET เพื่อตรวจสอบพื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านชาร์ที่อุณหภูมิ 500°C แสดงค่าพื้นที่ผิว 222.5 m<sup>2</sup>/g ซึ่งเป็นค่าที่มากที่สุดจึงเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่จะเพิ่มความเป็นรูพรุน โดยหลังจากนั้นได้นำถ่านชาร์ที่ผ่านกระบวนการคาร์บอนเซชันที่อุณหภูมิ 500°C เข้าสู่กระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่มีการกำหนดเงื่อนไขอุณหภูมิ 800°C, 850°C และ 900°C และควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 3 ต่อนาที เป็นเวลา 17 นาที โดยเมื่อนำตัวอย่างทั้งหมดไปวิเคราะห์โครงสร้างของคาร์บอนด้วยเทคนิครามานสเปกโตรสโคปี ค่าอัตราส่วนของ I<sub>D</sub>/I<sub>G</sub> ที่อุณหภูมิ 800°C, 850°C และ 900°C ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที มีค่า 0.79 0.92 และ 0.94 ตามลำดับ ซึ่งที่เงื่อนไขการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800°C ที่อัตราการไหลของน้ำ 3 รอบต่อนาที มีความสมบูรณ์ของโครงสร้างกราฟไฟต์มากที่สุด

ในการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมี ได้นำถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์ขึ้นไปอัดเม็ดเป็นขั้วไฟฟ้าด้วยระบบอัดไฮโดรลิกโดยใช้แรง 1 ตัน เป็นเวลา 1 นาที และทำการวัดสมบัติไฟฟ้าเคมีของขั้วไฟฟ้าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์โซเดียมซัลเฟตความเข้มข้น 1 โมลาร์ ผลการทดสอบด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry สามารถสรุปได้ดัง ตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ตารางสรุปผลค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์

เงื่อนไข	5mV/s	20mV/s	100mV/s
800-3.0	13.73 F/g	6.18 F/g	1.48 F/g
850-3.0	12.09 F/g	5.88 F/g	0.78 F/g
900-3.0	7.29 F/g	6.40 F/g	3.26 F/g

ผลการทดสอบด้วยเทคนิค Galvanostatic charge-discharge พบว่ามีค่าความต้านทานเกิดขึ้นเล็กน้อยในขณะที่มีการคายประจุไฟฟ้า โดยมีค่าการเก็บประจุไฟฟ้า 7.51, 6.88 และ 3.76 F/g ของเงื่อนไขอุณหภูมิ 800°C, 850°C และ 900°C ตามลำดับ

ผลการทดสอบด้วยเทคนิค Electrochemical Impedance Spectroscopy พบว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นที่อุณหภูมิ 800°C, 850°C และ 900°C มีค่าความต้านทานรวม (R<sub>s</sub>) 3.11, 2.60 และ 1.79 โอห์ม ตามลำดับ และมีค่าความต้านทานในการถ่ายโอนประจุไฟฟ้า (R<sub>ct</sub>) 18.01, 32.46 และ 6.50 โอห์ม ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดสอบทั้งสามเทคนิค พบว่า เจริญไซท์ที่ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่  $850^{\circ}\text{C}$  ให้ค่าการเก็บประจุไฟฟ้าจำเพาะที่สูงที่สุด  $13.73 \text{ F/g}$  แต่เมื่อเปรียบเทียบความเสถียรของค่าการเก็บประจุไฟฟ้าจำเพาะที่ค่าการสแกนความต่างศักย์ต่างๆกัน พบว่าเจริญไซท์ที่ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นที่  $900^{\circ}\text{C}$  มีเสถียรภาพในการเก็บประจุที่มีความเสถียรกว่าเจริญไซท์อื่นๆ และมีค่าความต้านทานรวมและค่าความต้านทานการถ่านเทพระจุที่ต่ำที่สุด

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไบออยสามารถใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตถ่านกัมมันต์ได้และถ่านกัมมันต์แสดงสมบัติการเก็บประจุ อย่างไรก็ตามการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของถ่านกัมมันต์กับค่าการเก็บประจุไฟฟ้าจำเพาะนั้น นอกเหนือจากค่าพื้นที่ผิวแล้ว จำเป็นต้องพิจารณาสมบัติของรูพรุนและค่าการนำไฟฟ้าของถ่านกัมมันต์ประกอบด้วย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

(1) ภายหลังจากกระบวนการคาร์บอนเซชันควรที่จะมีการล้างเพื่อนำสารประกอบอินทรีย์ที่อยู่ภายในโครงสร้างออก เช่น แคลเซียม (Ca) ซิลิกอน (Si) เป็นต้น ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการกระตุ้นต่อไป

(2) จากผลการทดลองทั้งหมดนั้นยังไม่มีมีความเชื่อมโยงกันระหว่างค่าการเก็บประจุไฟฟ้ากับวัสดุในการทำขั้วไฟฟ้าได้ โดยเจริญไซท์ที่ควรมีค่าการเก็บประจุไฟฟ้าสูงที่สุดควรจะเป็นเจริญไซท์ที่ใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ  $850^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากมีพื้นที่ผิวสูงถึง  $1104 \text{ m}^2/\text{g}$  แต่มีค่าการเก็บประจุไฟฟ้าเพียง  $12.09 \text{ F/g}$  ทั้งนี้ปัจจัยที่มีผลต่อค่าการเก็บประจุไฟฟ้านี้ ไม่สามารถตัดสินได้จากเพียงปัจจัยของพื้นที่ผิว แต่ควรพิจารณา ขนาดของรูพรุน ความหนาแน่นของรูพรุน การกระจายตัวของรูพรุนและ ค่าการนำไฟฟ้า ประกอบด้วย

## บรรณานุกรม

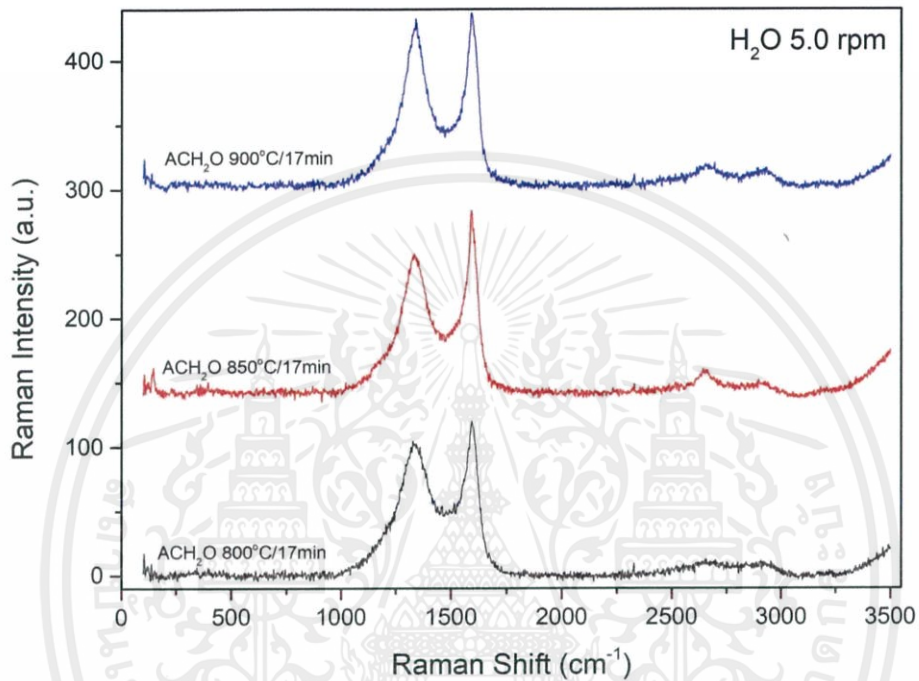
- [1] Wikipedia, “ประเทศไทย,” 2560. [ออนไลน์]. Available: <https://th.wikipedia.org/wiki/ประเทศไทย>. (3 ก.ย. 2560).
- [2] กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, “พื้นที่ทางการเกษตรประเทศไทย,” สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2560. [ออนไลน์]. Available: <http://www.oae.go.th/main.php?filename=index>. (3 ก.ย. 2560).
- [3] “ตารางแสดงการชีวมวลแต่ละชนิด,” กระทรวงพลังงานกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556. [ออนไลน์]. Available: [http://biomass.dede.go.th/biomass\\_web/index.html](http://biomass.dede.go.th/biomass_web/index.html). (30 ต.ค. 2560).
- [4] Z. Kavaliauskas, L. Marcinauskas, and P. Valatkevicius, “Formation and Characterization of Carbon and Nickel Oxide / Carbon Composites for Supercapacitors,” vol. 119, no. 2, pp. 253–255, 2011.
- [5] F. B. and E. Frackowiak, *Supercapacitors Materials Systems and Applications*. WILEY-VCH Verlag GmbH & co. KGaA, 2013.
- [6] J. Z. Brian Kihun Kim, Serubbable Sy, Aiping Yu, *Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Conversion*. pp. 1–5, 2015.
- [7] C. Zhong, Y. Deng, W. Hu, J. Qiao, L. Zhang, and J. Zhang, “A review of electrolyte materials and compositions for electrochemical supercapacitors,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 44, no. 21, pp. 7484–7539, 2015.
- [8] “ลักษณะและขนาดความเป็นรูพรุนที่แบ่งตาม IUPAC.” [ออนไลน์]. Available: <https://images-na.ssl-images-amazon.com>. (30 ต.ค. 2560).
- [9] “เทคนิคการวิเคราะห์ลักษณะของวัสดุ,” *National Metal and Materials Technology Center (MTEC)*. [ออนไลน์]. Available: [https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/files/presentation/Technique\\_for\\_PC.pdf](https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/files/presentation/Technique_for_PC.pdf). (30 ต.ค. 2560).
- [10] “Activated Carbon Market (Powdered, Granular) for Liquid Phase and Gas Phase Applications in Water Treatment, Food & Beverage Processing, Pharmaceutical & Medical, Automotive and Air purification - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and ,” 2013. [ออนไลน์]. Available: <https://www.transparencymarketresearch.com>. (1 พ.ย. 2560).
- [11] S. Mopoung, *Activated Carbon*. Phitsanulok: Naresuan University Publishing House, 2015.
- [12] “Thermogravimetric Analysis (TGA),” *ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC)*, 2017. [ออนไลน์]. Available: [https://www2.nanotec.or.th/th/?page\\_id=569](https://www2.nanotec.or.th/th/?page_id=569) and <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/thermal-analysis-instrument-menu/item/111-thermogravimetric-analysis-tga.html>. (1 พ.ย. 2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] หัสวิภา หมายมั่น, “Scanning Electron Microscope : SEM,” *STiC, Mea Fah Luang University*. [ออนไลน์]. Available: <http://web2.mfu.ac.th/center/stic/micro-analysis-instrument-menu/item/96-scanning-electron-microscope.html>. (1 ต.ค. 2560).
- [14] “E. Goldstein, J., Newbury, D.E., Echlin, P., Joy, D.C., Romig Jr., A.D., Lyman, C.E., Fiori, C., Lifshin, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Springer Science & Business Media ,” 1992.
- [15] Microscopes, “กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM).” [ออนไลน์]. Available: <http://www.microscopes.in.th/422>. (3 พ.ย. 2560).
- [16] ห้องปฏิบัติการสเปกโตรสโคปี ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, “Raman spectroscopy,” 2544. [ออนไลน์]. Available: [www2.mtec.or.th](http://www2.mtec.or.th). (3 พ.ย. 2560).
- [17] Z. A. Allothman, “A Review: Fundamental Aspects of Silicate Mesoporous Materials,” *Material*, vol. 5, no. 12, 2012.
- [18] M. A. Ganzoury, N. K. Allam, T. Nicolet, and C. All, “Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 50, pp. 1–8, 2015.

## ภาคผนวก

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของคาร์บอนด้วยเทคนิครามาน สเปกโตรสโคปี ของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800 850 และ 900°C ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 5 รอบต่อนาที

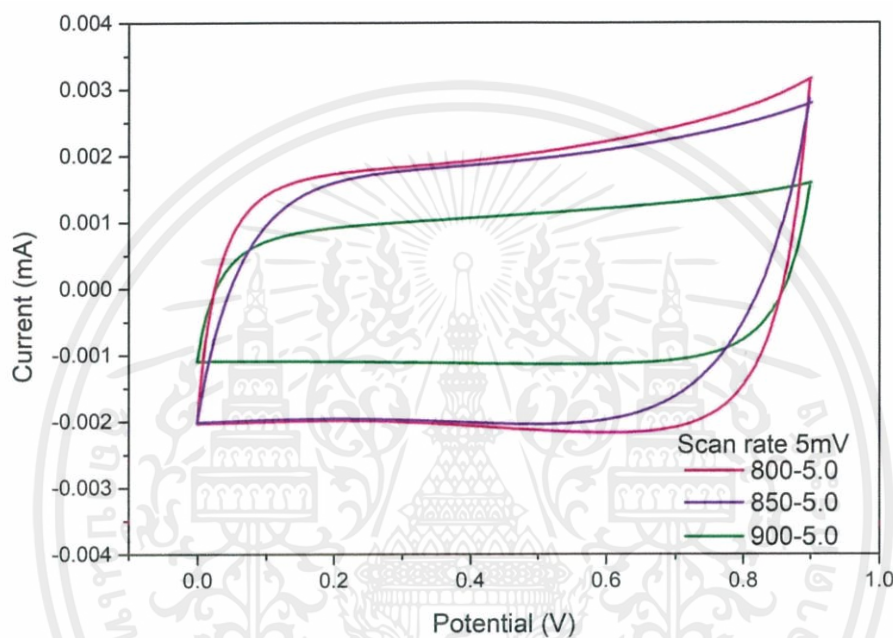


รูปที่ 1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรามานชิฟ และความเข้มแสงของถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำโดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 5 รอบต่อนาที

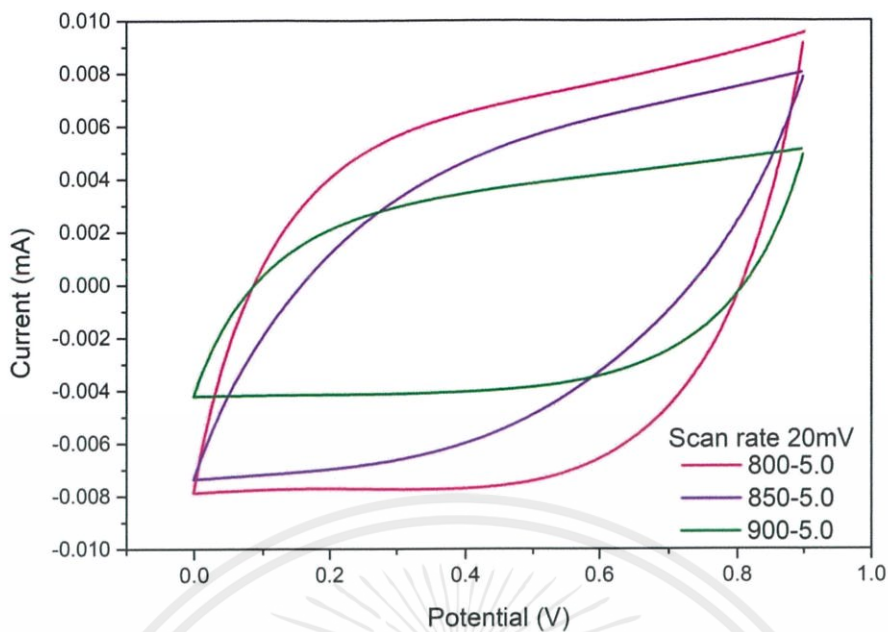
จากกราฟความสัมพันธ์ข้างต้นนี้แสดงพิกที่บ่งบอกลักษณะของคาร์บอนทั้ง 2 พิก ได้แก่ พิกที่  $1300\text{ cm}^{-1}$  (D-band) และ พิกที่  $1500\text{ cm}^{-1}$  (G-band) ตามลำดับ จากกราฟสามารถหาค่าความเป็นผลึกของวัสดุได้จากอัตราส่วนระหว่าง  $I_D/I_G$  ได้เท่ากับ 0.87, 0.76 และ 0.97 ของเงื่อนไขอุณหภูมิ 800, 850 และ 900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

เมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำภายใต้การควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 5 รอบต่อนาที ของอุณหภูมิต่างๆ มาวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าเคมีและประสิทธิภาพการเก็บประจุไฟฟ้าด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) พบว่า

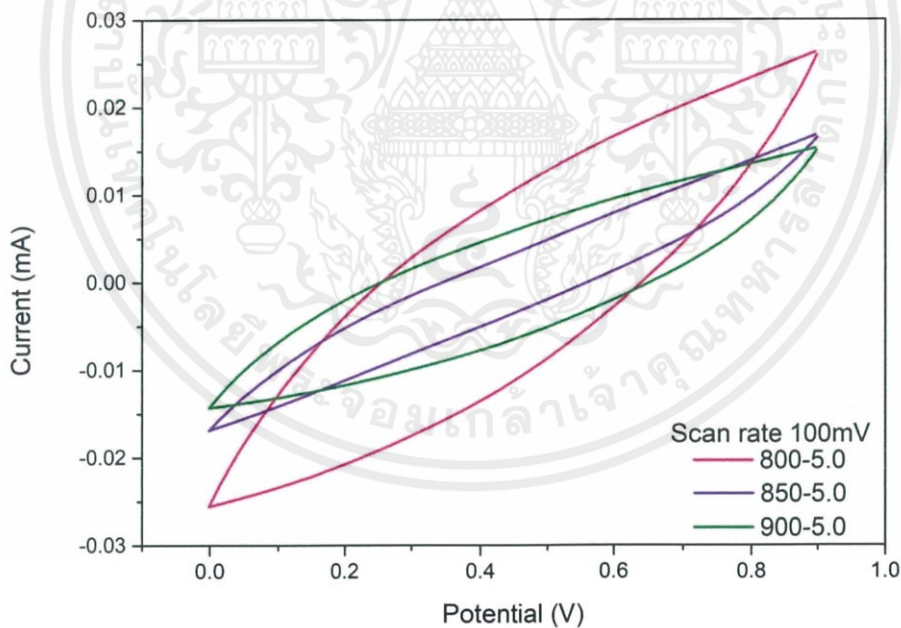
ในเงื่อนไขที่มีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 5 รอบต่อนาทีได้มีการนำไปวัดค่าประสิทธิภาพและความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าเช่นเดียวกัน แสดงดัง รูปที่ 2 รูปที่ 3 และ รูปที่ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์  
ที่อัตราการไหลของกระแสไฟฟ้า 5 mV/s



รูปที่ 3 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์  
ที่อัตราการไหลของกระแสไฟฟ้า 20 mV/s



รูปที่ 4 ข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการเก็บการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์  
ที่อัตราการไหลของกระแสไฟฟ้า 100 mV/s

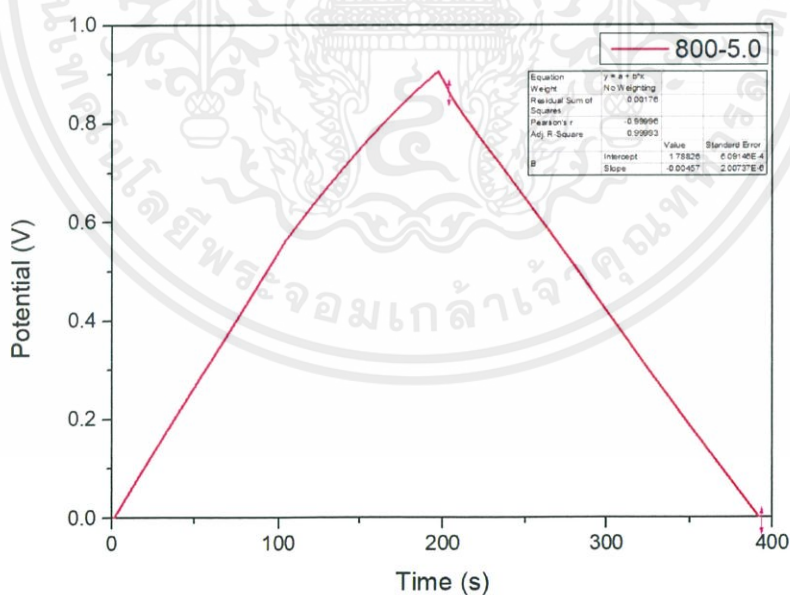
และในเงื่อนไขที่มีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 5 รอบต่อนาที เมื่อทำการวัดค่าประสิทธิภาพ  
และความสามารถในการเก็บประจุได้จากสมการที่ 2.12 โดยมีการเปลี่ยนอัตราการไหลของ  
กระแสไฟฟ้า 5mV/s, 20mV/s และ 100mV/s ตามลำดับ แสดงดัง ตารางที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

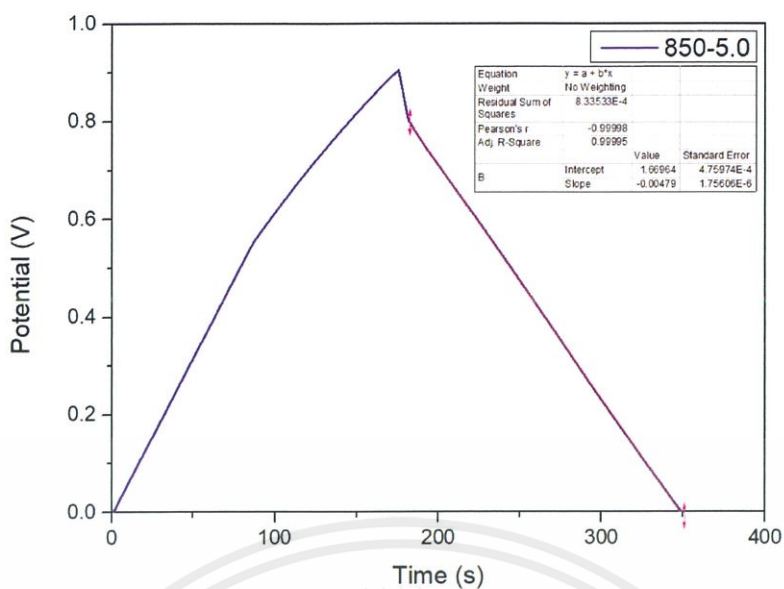
ตารางที่ 1 แสดงผลค่าการเก็บประจุไฟฟ้าที่อัตราการไหลของกระแสไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นของขั้วไฟฟ้า ถ่านกัมมันต์จากไบออย

เงื่อนไข	5mV/s	20mV/s	100mV/s
800-5.0	14.32 F/g	10.66 F/g	2.91 F/g
850-5.0	14.39 F/g	8.17 F/g	1.14 F/g
900-5.0	7.83 F/g	5.80 F/g	1.74 F/g

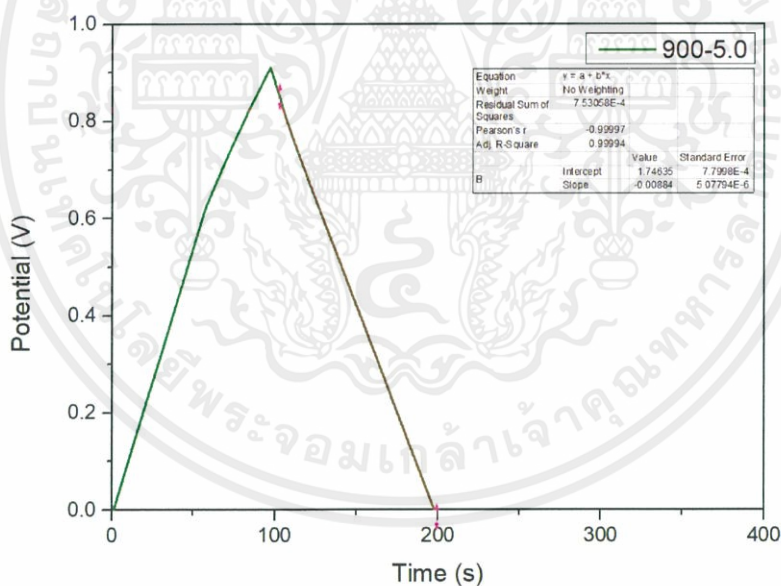
หลังจากที่วัดค่าการเก็บประจุไฟฟ้าโดยมีการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 5mV/s, 20mV/s และ 100mV/s ของขั้วไฟฟ้าที่ทำจากถ่านกัมมันต์จากไบออยที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำที่ 5 รอบต่อนาที จะเห็นได้ว่าจาก รูปที่ 2 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ที่เพิ่มมากขึ้นจะมีพื้นที่ใต้กราฟที่มีแนวโน้มเล็กลง ส่งผลให้เมื่อคำนวณค่าการเก็บประจุไฟฟ้ามีค่าลดน้อยลงจากที่ความต่างศักย์ต่ำ ซึ่งมีค่าการเก็บประจุไฟฟ้า 14.32, 14.39 และ 7.83 F/g โดยที่ค่าการเก็บประจุดังกล่าวเป็นค่าการเก็บประจุของเงื่อนไขในการกระตุ้นที่ 800°C, 850°C และ 900°C ตามลำดับ



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอัดและคายประจุ กับความต่างศักย์ของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 800°C โดยควบคุมการไหลของน้ำ 5 รอบต่อนาที

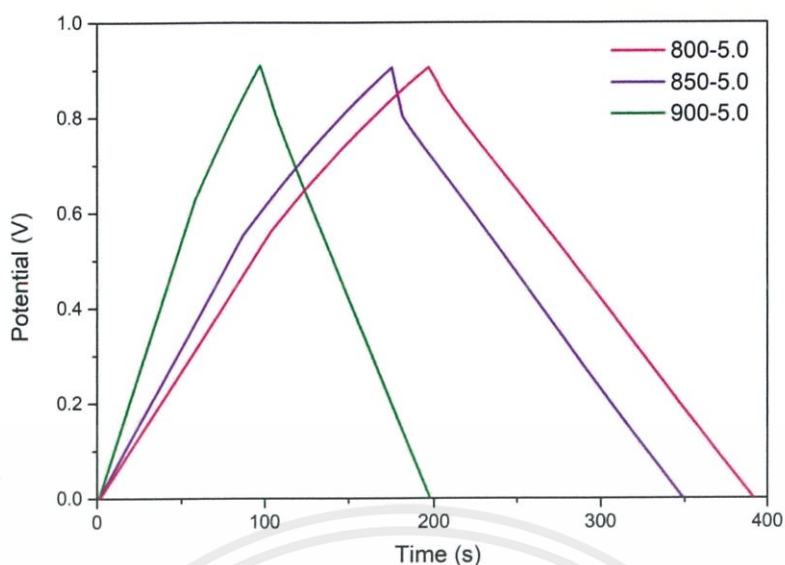


รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอัดและคายประจุ กับความต่างศักย์ของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 850°C โดยควบคุมการไหลของน้ำ 5 รอบต่อนาที



รูปที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการอัดและคายประจุ กับความต่างศักย์ของตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 900°C โดยควบคุมการไหลของน้ำ 5 รอบต่อนาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



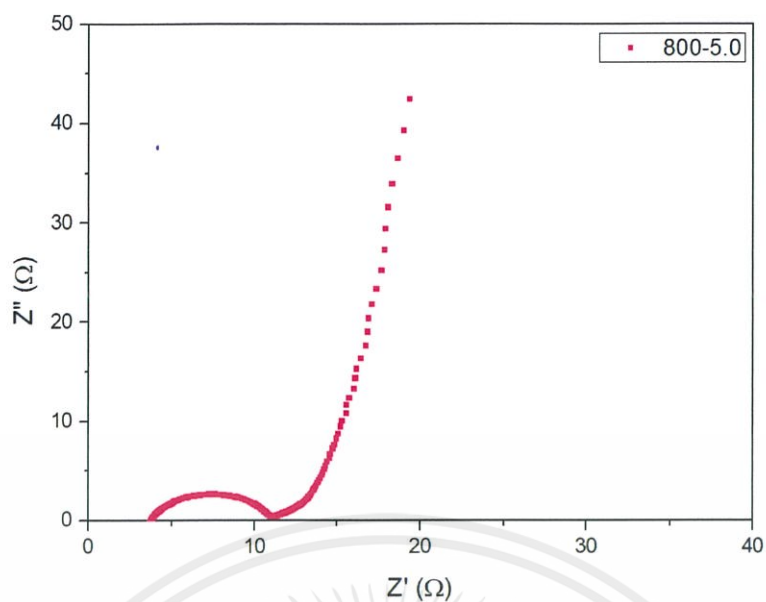
รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบเงื่อนไขในการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 800°C 850°C และ 900°C โดยควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 5 รอบต่อนาทีของความสัมพันธ์ระหว่างการอัดและคายประจุไฟฟ้ากับความต่างศักย์

จากกราฟความสัมพันธ์สามารถหาค่าการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ได้จากสมการที่ 2.13 และสามารถแสดงได้ดัง ตารางที่ 2

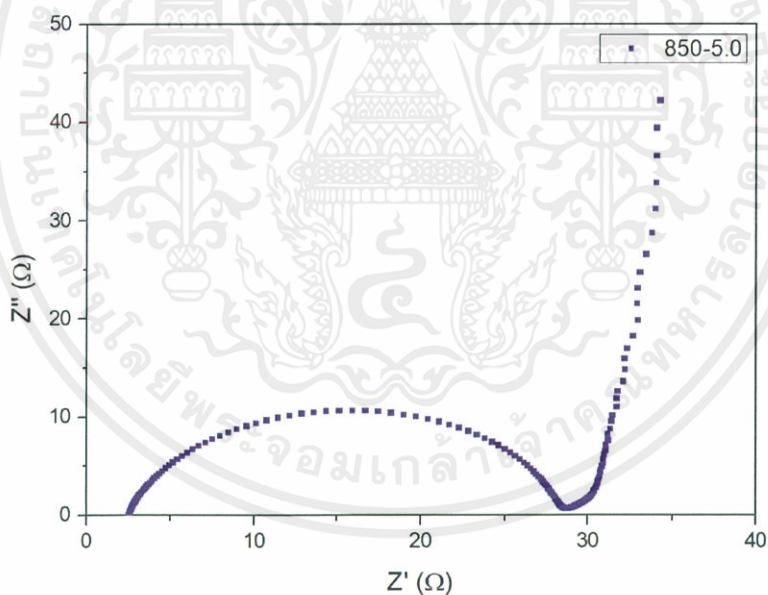
ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้าของอุปกรณ์

เงื่อนไขอุณหภูมิ	ความสามารถในการเก็บประจุไฟฟ้า
800-5.0	7.38 mF/g
850-5.0	8.01 mF/g
900-5.0	3.89 mF/g

เงื่อนไขการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 800°C, 850°C และ 900°C ที่มีอัตราการไหลของน้ำ 5 รอบต่อนาที เมื่อนำมาประกอบเป็นขั้วไฟฟ้าและนำมาวิเคราะห์ความต้านทานที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ สามารถแสดงผลที่เกิดขึ้นดัง รูปที่ 9 รูปที่ 10 และ รูปที่ 11 ตามลำดับ

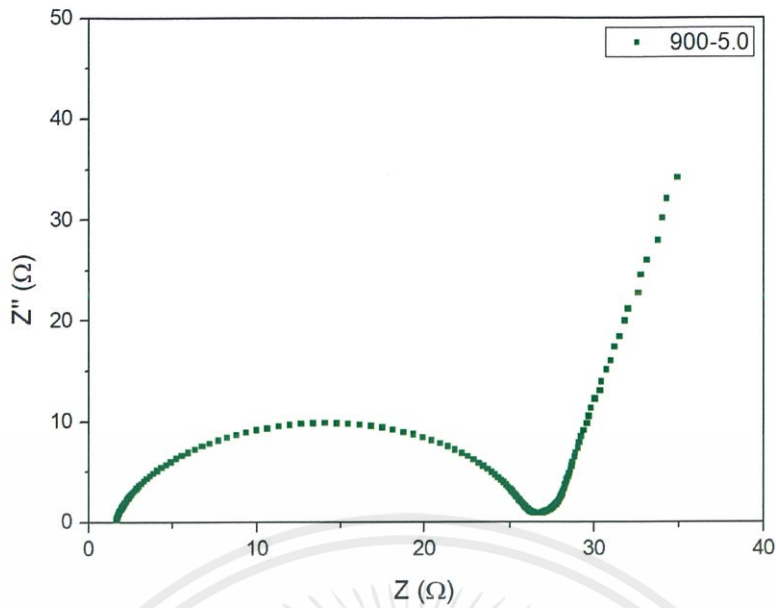


รูปที่ 9 กราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเงินไซการกระตุ้นที่ 800°C ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 5 รอบต่อนาที



รูปที่ 10 กราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปีของเงินไซการกระตุ้นที่ 850°C ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 5 รอบต่อนาที

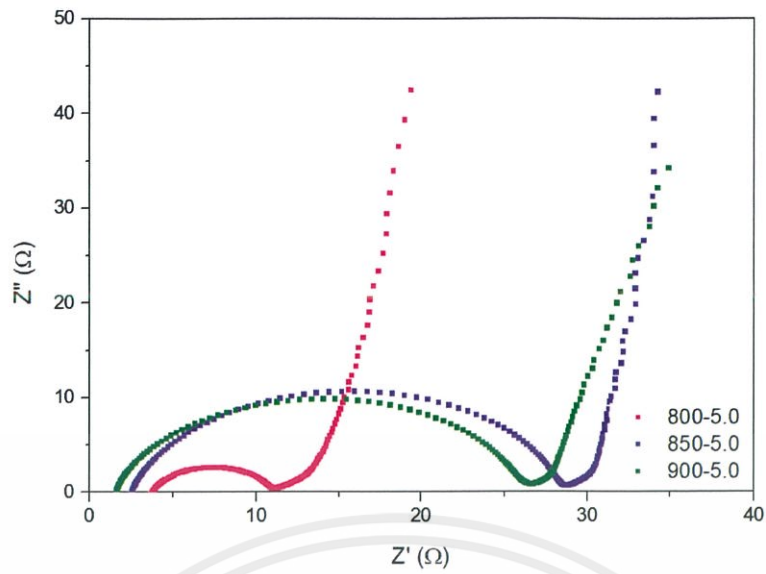
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 กราฟของอิมพีแดนซ์สเปกโตรสโคปของเงื่อนไขการกระตุ้นที่ 900°C ที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 5 รอบต่อนาที

จากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้แสดงมานั้นเมื่อพิจารณาในส่วนของความต้านทานของอุปกรณ์เงื่อนไขที่มีค่าความต้านทานน้อยที่สุดได้แก่ที่อุณหภูมิ 900°C, 850°C และ 900°C ตามลำดับ และหากพิจารณาในส่วนถัดไป คือส่วนที่มีลักษณะเป็นรูปครึ่งวงกลมซึ่งจะหมายถึงค่าความต้านทานในการถ่ายโอนประจุไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้า ซึ่งค่าความต้านทานในส่วนนี้ที่น้อยที่สุดได้แก่เงื่อนไข 900°C, 800°C และ 850°C ตามลำดับ

หลักจากที่มีการนำกราฟความสัมพันธ์ของทั้ง 3 อุณหภูมิมาเปรียบเทียบกันแล้วนั้น ที่อุณหภูมิ 900°C มีความเหมาะสมที่จะเป็นอุปกรณ์ในการเก็บประจุไฟฟ้ามากที่สุด ซึ่งจะเห็นได้จากรูปที่ 12 เนื่องจากมีค่าความต้านทานในการถ่ายโอนประจุของ ( $R_{CT}$ ) ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขอุณหภูมิในการกระตุ้นที่ 800 และ 850 องศาเซลเซียส



รูปที่ 12 กราฟการเปรียบเทียบของอิมพีแดนซ์ในการกระตุ้นด้วยไอน้ำ 800°C, 850°C และ 900°C ที่มีการควบคุมอัตราการไหลของน้ำ 5 รอบต่อนาที



# ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล ปณิตตา อुकคกิมพันธ์  
วัน เดือน ปีเกิด 10 กันยายน พ.ศ. 2538  
ที่อยู่ 100/390 หมู่บ้านชัยพฤกษ์1 ถนนคุ้มเกล้า แขวงลำปลาทิว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520  
การศึกษา ระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย  
โรงเรียนนวมินทราชินูทิศ เตรียมอุดมศึกษาน้อมเกล้า  
แผนการเรียน วิทยาศาสตร์ – คณิตศาสตร์  
จบการศึกษาปีการศึกษา 2556

ระดับชั้นปริญญาตรี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน  
จบการศึกษาปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้