

รีดิวิจกราฟีนออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตเป็นตัวเก็บประจุยวดยิ่ง
ฐานเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REDUCED GRAPHENE OXIDE/LAYERED DOUBLE HYDROXIDE COMPOSITE AS
SUPERCAPACITOR BASED ON PHOTOELECTROCHEMICAL CELL

Mr. Nuttapop Kesornthiean



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตเป็นตัวเก็บประจุวดยิ่งฐานเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง

โดย

นายณัฐภพ เกษรเทียน

สาขาวิชา

เคมีเทคนิค

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(อาจารย์ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.นิสิต ตันทวีเชษฐ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.พิชญ พัฒนสัตยวงศ์)

ณัฐภพ เกษรเทียน : รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตเป็นตัวเก็บประจุยวดยิ่งฐานเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง (REDUCED GRAPHENE OXIDE/LAYERED DOUBLE HYDROXIDE COMPOSITE AS SUPERCAPACITOR BASED ON PHOTOELECTROCHEMICAL CELL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ, 79 หน้า.

ตัวเก็บประจุยวดยิ่งเป็นอุปกรณ์กักเก็บพลังงานที่ปัจจุบันได้รับความนิยมเนื่องด้วยมีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ เช่น การอัดประจุและคายประจุรวดเร็ว มีค่าความหนาแน่นของกำลังงานสูง มีความเสถียร และมีราคาถูกเมื่อเทียบกับแบตเตอรี่ทั่วไป โดยในงานวิจัยนี้ต้องการปรับปรุงค่าความหนาแน่นพลังงานของตัวเก็บประจุยวดยิ่ง โดยใช้รีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุคอมพอสิตซึ่งสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอล โดยรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์และนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์แผ่นระดับนาโนถูกรวมกันซึ่งทั้งสองวัสดุนี้เกิดเป็นโครงสร้างระดับชั้นซึ่งสามารถป้องกันการรวมกลุ่มกันเองและยังสามารถปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่มีการเติมรีดิวิซ์กราฟีนลงไปด้วยเพราะว่าอิเล็กตรอนสามารถถ่ายโอนผ่านวัสดุคอมพอสิตได้ดีและส่งเสริมการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ในโครงสร้างคอมพอสิต โดยผลการทดลองทางเคมีไฟฟ้าโดยพบว่าค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะสูงสุดของรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1,050.4 ฟารัดต่อกรัม จากนั้นนำรีดิวิซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในตัวเก็บประจุยวดยิ่งต่อร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์เชิงเคมีไฟฟ้าเพื่อกักเก็บพลังงานในรูปของความจุไฟฟ้าไฟฟ้าชั่วขณะโดยผลการทดลองเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าตัวเก็บประจุยวดยิ่งต่อรวมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงนั้นสามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าจากการอัดประจุของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเวลา 60 วินาที สามารถเพิ่มความเสถียรของกำลังไฟฟ้าขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ชั่วขณะเมื่อความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลง

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5871955123 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEYWORDS: SUPERCAPACITOR/REDUCE GRAPHENE OXIDE/LAYERED DOUBLE HYDROXIDE/PHOTOELECTROCHEMICAL CELL

NUTTAPOP KESORNTHIEAN: REDUCED GRAPHENE OXIDE/LAYERED DOUBLE HYDROXIDE COMPOSITE AS SUPERCAPACITOR BASED ON PHOTOELECTROCHEMICAL CELL. ADVISOR: NUTTAPOL POOTRAKULCHOTE, Dr. ès sc., 79 pp.

Supercapacitors have received recent attention as a type of energy storage devices due to their prominent advantages such as fast charging and discharging, high power density, stability, and cost competitiveness compared to conventional battery devices. The goal of this work is to improve the energy density of supercapacitor by introducing a new composite material made of reduced graphene oxide (RGO) and NiCoAl Layered Double Hydroxide (NiCoAl-LDH) using hydrothermal technique. In this design, RGO and NiCoAl-LDH nanosheets were assembled into a hierarchical structure which not only minimizes the aggregation of the two materials but also improves the electrical conductivity of LDH nanosheet because of the electron transport through graphene during the faradaic redox reaction. Electrochemical test results showed that the electrical charge capacity of RGO/LDH composite materials exhibits the highest a specific capacitance of $1,050.4 \text{ F.g}^{-1}$. Furthermore, the RGO/NiCoAl-LDH based supercapacitor was integrated with the photoelectrochemical solar cell unit to convert and instantaneously store the sun power in form of electrical capacitance. This hybrid supercapacitor/solar cell device will generate a stable voltage and maintain the reliability of power output. Preliminary tests showed that the supercapacitor can store electrical energy from photoelectrical solar cell charged for 60 second which can support temporary power output from solar cell.

Department: Chemical Technology Student's Signature

Field of Study: Chemical Technology Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและการให้คำแนะนำของ อาจารย์ ดร.ณัฐพล ภูตระกูลโชติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา ให้ความรู้ และคอยชี้แนะแนวทางในการทำงานวิจัย ตลอดจนแรงผลักดันมาโดยตลอด แม้กระทั่งตรวจสอบ แก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ ประธานคณะกรรมการ บริหารหลักสูตรมหาบัณฑิตเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประธานสอบ วิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.นิสิต ตัณฑวิเชษฐ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี เทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.พิชญ พัฒนสัตยวงศ์ อาจารย์ประจำภาควิชาวัสดุศาสตร์ และวิศวกรรมวัสดุ สำนักวิชาวิทยาโมเลกุล สถาบันวิทยสิริเมธี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โคจิพงษ์ ฉัตรภรณ์ อาจารย์ประจำภาควิชา ฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ผู้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ สมรรถนะของเซลล์แสงอาทิตย์ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านของภาควิชาเคมีเทคนิคที่ได้อบรมสั่ง สอนและให้ความรู้ ขอขอบคุณนักวิทยาศาสตร์ประจำห้องปฏิบัติการในคำแนะนำและการอำนวยความสะดวกในการจัดหาอุปกรณ์สำหรับงานวิจัย และขอขอบคุณช่างเทคนิคของภาควิชาสำหรับ ความช่วยเหลือและการอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือและเครื่องจักร

ขอขอบทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อเฉลิมฉลองวโรกาสที่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวทรงเจริญพระชนมายุครบ 72 พรรษา ที่สนับสนุน ทุนการศึกษา

ขอขอบคุณพี่ เพื่อน นิสิตภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัยสำหรับน้ำใจ ความช่วยเหลือ และกำลังใจที่มีให้เสมอมา และสุดท้ายขอขอบพระคุณ บิดา มารดา พี่ และญาติ สำหรับกำลังใจและการดูแลช่วยเหลือตลอดมาจนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จ ลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ฑ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	4
1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
2.1 กราฟีน.....	6
2.1.1 สมบัติทั่วไปของกราฟีนและการนำไปประยุกต์ใช้ [6].....	7
2.1.2 สมบัติทางไฟฟ้า (Electronic properties).....	8
2.1.3 สมบัติการสั่นและสมบัติทางความร้อน (Vibrational properties and thermal properties) [10].....	11
2.1.4 การนำกราฟีนไปประยุกต์ใช้	12
2.1.4.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่โค้งงอได้ (Flexible electronics).....	12
2.1.4.2 วัสดุเก็บพลังงาน (Energy storage materials).....	12
2.1.4.3 วัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต (Polymer nanocomposite materials)...	13
2.1.5 การประยุกต์ใช้กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	13

2.1.6 การสังเคราะห์กราฟีน	14
2.1.6.1 การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีการสั่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonication)	14
2.1.6.2 การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีรีดักชันจากกราฟีนออกไซด์.....	15
2.2 เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered double hydroxide; LDH)	16
2.2.1 ลักษณะโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์.....	18
2.2.2 การดัดแปลงโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์.....	19
2.2.2.1.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange).....	20
2.2.2.2 การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation).....	21
2.2.2.3 การฟื้นฟูสภาพ (Reconstruction).....	22
2.2.2.4 กระบวนการความร้อน (Thermal or melting reaction).....	22
2.2.3 สมบัติของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ [31]	23
2.3 ตัวเก็บประจุ (Capacitor	23
2.3.1 การต่อวงจรตัวเก็บประจุ	24
2.3.1.1 วงจรอนุกรม.....	24
2.3.1.2 วงจรขนาน	24
2.3.1.3 วงจรผสม	24
2.3.2 ตัวเก็บประจุยวดยิ่ง (Supercapacitor).....	24
2.3.2.1 ชนิดของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายวดยิ่ง.....	26
2.3.2.1.1 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีสองชั้น (Electrochemical double layer capacitor, EDLC).....	26
2.3.2.1.2 ตัวเก็บประจุยวดยิ่งเทียม (Pseudocapacitors).....	26
2.3.2.1.3 ตัวเก็บประจุยวดยิ่งแบบผสม (Hybrid capacitor).....	27
2.3.2.2 หลักการทำงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง.....	27

2.3.2.2.1 ตัวเก็บประจุแบบเคมีไฟฟ้าสองชั้น	27
2.3.2.2.2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเทียม	28
2.3.3 สภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุยวดยิ่ง	29
2.3.3.1 การประจุ (Charge)	29
2.3.3.2 การคายประจุ.....	29
2.4 พลังงานจากแสงอาทิตย์.....	30
2.4.1 รังสีอาทิตย์บนพื้นโลก.....	30
2.4.2 ตำแหน่งดวงอาทิตย์และมวลอากาศ	31
2.4.3 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) [37].....	31
2.4.3.1 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์	31
2.4.3.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป	31
2.4.3.3 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์.....	32
2.4.3.4 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์	33
2.4.3.5 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์	34
2.4.3.6 ข้อจำกัดของไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์	35
2.4.3.7 กระแสและแรงดันไฟฟ้า.....	35
2.4.3.8 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	36
2.4.3.9 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [39].....	37
2.4.3.9.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.....	37
2.4.3.9.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.....	37
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	38
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	42
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	42

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย	43
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	43
3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	44
3.4.1 การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิคของฮัมเมอร์ (Hummer's method).....	44
3.4.2 การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล.....	45
3.4.3 การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตเพสต์.....	45
3.4.4 เซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสียอมไวแสง	46
3.4.4.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง (Photoanode).....	46
3.4.4.2 การเตรียมขั้วไฟฟาร่วม (Counter electrode)	47
3.4.4.3 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสง.....	47
3.4.5 ตัวเก็บประจุวดยิ่ง.....	48
3.4.5.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าในตัวเก็บประจุวดยิ่งสำหรับทดสอบเอกลักษณ์ของวัสดุ	48
3.4.5.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าในตัวเก็บประจุวดยิ่งสำหรับประกอบเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสง.....	48
3.4.6 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสียอมไวแสงเข้ากับตัวเก็บประจุวดยิ่ง.....	49
3.5. วิธีการวิเคราะห์.....	49
3.5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของกราฟีนออกไซด์, รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์, เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์,รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิต.....	49
3.5.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์, เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์, รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิต	50
3.5.3 การวิเคราะห์การกระจายตัว องค์ประกอบธาตุในเชิงคุณภาพ และปริมาณของธาตุในวัสดุคอมพอสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์.....	50

3.5.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์, เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์, รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิต	50
3.5.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับตัวเก็บประจุวดยิ่ง	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	52
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการของฮัมเมอร์	52
4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ...	55
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์	56
4.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีไฟฟ้า	59
4.4.1 การทดสอบค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี	60
4.4.2 การทดสอบค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิค Galvanostatic charge and discharge	64
4.4.3 การทดสอบค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิคการวัดความต้านทานบริเวณผิวหน้าสัมผัสด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเซิงเคมีไฟฟ้า	65
4.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของตัวเก็บประจุวดยิ่งที่มีการต่อวงจรร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง	66
บทที่ 5	68
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	68
5.1 สรุปผลการทดลอง	68
5.2 ข้อเสนอแนะ	69
รายการอ้างอิง	70

ภาคผนวก ก.....	75
ภาคผนวก ข.....	78
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	79



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 2.1	ค่าการนำความร้อนของกราฟีน ท่อนาโนคาร์บอน เพชร สารกึ่งตัวนำ และ ทองแดง	12
ตาราง 2.2	แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์.....	19
ตาราง 4.1	แสดงผลค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของสารเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่ประกอบด้วย โลหะ 2 ชนิด และ 3 ชนิดตามลำดับ	61
ตาราง 4.2	แสดงผลค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์, เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอก ไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิต	62

สารบัญรูป

	หน้า
รูป 1.1 (a),(b) โครงสร้างระนาบ 3 มิติของกราฟีน [3].....	2
รูป 1.2 โครงสร้างระดับชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH) [4].....	3
รูป 2.1 (a),(b) โครงสร้างระนาบ 3 มิติของกราฟีน [3].....	6
รูป 2.2 แสดงอัญรูปของกราฟีนในลักษณะต่างๆ	7
รูป 2.3 (a)แสดงรูปถ่ายแผ่นกราฟีนชั้นเดียว (Single layer graphene), (b)(c)แสดงระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอน, (d)(e) แสดงแนวรอยต่อระหว่างแผ่นกราฟีนชั้นเดียว (ส่วนบน) ไปชั้นคู่ (ส่วนล่างของรูป) (Monolayer to bilayer) (f) แสดงแนวแลตทิซของกราฟีน	7
รูป 2.4 แสดงระดับชั้นพลังงานของสารโลหะ กึ่งโลหะ และฉนวน.....	8
รูป 2.5 โครงสร้างแถบพลังงานของกราฟีน	9
รูป 2.6 แสดงสปินเทียม (Pseudo spin) ของกราฟีน	10
รูป 2.7 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์กราฟีน	14
รูป 2.8 แสดงวิธีการสังเคราะห์กราฟีนด้วยการสั่นด้วยคลื่นความถี่สูง.....	15
รูป 2.9 แสดงโครงสร้างแผ่นคาร์บอนในกระบวนการออกซิเดชันของกราฟไฟต์ มีหมู่ออกไซด์แทรก ระหว่างชั้นของแกรไฟต์เรียก แกรไฟต์ออกไซด์ จากนั้นลอกชั้นของแกรไฟต์ออกไซด์ในน้ำหรือใน ตัวทำละลาย ชั้นเดียวที่หลุดออกมาเรียก กราฟีนออกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันกับไฮดราซีนไฮ เดรตจะได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์	16
รูป 2.10 แสดงโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์.....	16
รูป 2.11 แสดงโครงสร้างระดับชั้นของกราฟไฟต์.....	17
รูป 2.12 แสดงโครงสร้างของมอนอริโลไนต์	17
รูป 2.13 แสดงโครงสร้างของสารประกอบไฮโดรทัลไซต์	18
รูป 2.14 แสดงชั้นโลหะไฮดรอกไซด์หรือชั้นบุรูไซด์	18
รูป 2.15 แสดงการแทนที่ M ²⁺ ด้วย M ³⁺ ในชั้นโลหะไฮดรอกไซด์.....	19

รูป 2.16 การแทรกของโมเลกุลแก๊สในเลเยอร์โฮสต์.....	20
รูป 2.17 การแลกเปลี่ยนไอออนของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์.....	20
รูป 2.18 แสดงกระบวนการฟื้นฟูสภาพ.....	22
รูป 2.19 แสดงโครงสร้างของตัวเก็บประจุ.....	23
รูป 2.20 กราฟของรัศมีเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกำลังงานและความหนาแน่นพลังงาน ของตัวเก็บพลังงานชนิดต่างๆ.....	25
รูป 2.21 แสดงโครงสร้างภายในตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบเคมีไฟฟ้าสองชั้น.....	26
รูป 2.22 แสดงโครงสร้างภายในตัวเก็บประจุยิ่งยวดเทียม.....	27
รูป 2.23 แผนภาพแสดงการทำงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงแบบเคมีไฟฟ้าสองชั้น....	28
รูป 2.24 แสดงกลไกการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเทียมเทียบกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน.....	29
รูป 2.25 แสดงขั้นตอนการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ.....	29
รูป 2.26 แสดงขั้นตอนการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ.....	30
รูป 2.27 แสดงรอยต่อพี-เอ็นในเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอน.....	31
รูป 2.28 ผลของความต้านทานอนุกรมต่อกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	34
รูป 2.29 ผลของความต้านทานชั้นที่ต่อกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	35
รูป 2.30 แสดงกราฟเอกลักษณ์กระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์.....	36
รูป 2.31 แสดงวงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์.....	36
รูป 2.32 แสดงกลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.....	38
รูป 3.1 ภาชนะหม้ออบความดัน (Teflon autoclave vessle).....	45
รูป 3.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง.....	46
รูป 3.3 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟาร่วม.....	47
รูป 3.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง.....	48

รูป 3.5 ขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุวดยิ่ง 48

รูป 3.6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงร่วมกับตัวเก็บประจุวดยิ่ง 49

รูป 3.7 แสดงอุปกรณ์สำหรับทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้า 50

รูป 4.1 การโซนิเคชันของกราฟไฟต์ออกไซด์สู่กราฟีนออกไซด์ 53

รูป 4.2 แสดงเส้นทางการเกิดปฏิกิริยาของกราฟไฟต์ออกไซด์ด้วยไฮดราซีนไปสู่กราฟีน 53

รูป 4.3 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (RGO) 54

รูป 4.4 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 20000 เท่าและ 50000 เท่า 55

รูป 4.5 แสดงสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (อัตราส่วนโดยโมล Ni : Co : Al = 1:1:1) 55

รูป 4.6 แสดงปฏิกิริยาการแตกตัวของยูเรียในน้ำ 56

รูป 4.7 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (อัตราส่วนโดยโมล Ni : Co : Al = 1:1:1) 56

รูป 4.8 แสดงแผนภาพการแทรกสอดระหว่างชั้นของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ 57

รูป 4.9 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์, นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ 57

รูป 4.10 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเปรียบเทียบระหว่าง รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์, นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ และ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ที่กำลังขยาย 58

รูป 4.11 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Ni:Co:Al = 1:1:1) คอมพอสิต และผล วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์	59
รูป 4.12 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของนิกเกิล-อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์, โคบอลต์- อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์, นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ สัดส่วนโดยโมล (Ni:Co:Al = 1:1:1 , 3:1:1, 1:3:1).....	60
รูป 4.13. ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์, นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เล เยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ในสัดส่วนโมล นิกเกิลต่อโคบอลต์ 1:1:1 และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/ นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ	62
รูป 4.14 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เล เยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่อัตราการสแกนต่างกัน	63
รูป 4.15 แสดง Galvanostatic charge and discharge ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับ นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์	64
รูป 4.16 แผนภาพแสดงวงจรสมมูลย์ของตัวเก็บประจุวดยิ่ง	65
รูป 4.17 แสดง Nyquist plots ของ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตเทียบกับนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์....	65
รูป 4.18 แสดงแผนภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงต่อวงจรร่วมกับตัวเก็บประจุวดยิ่ง	66

บทที่ 1

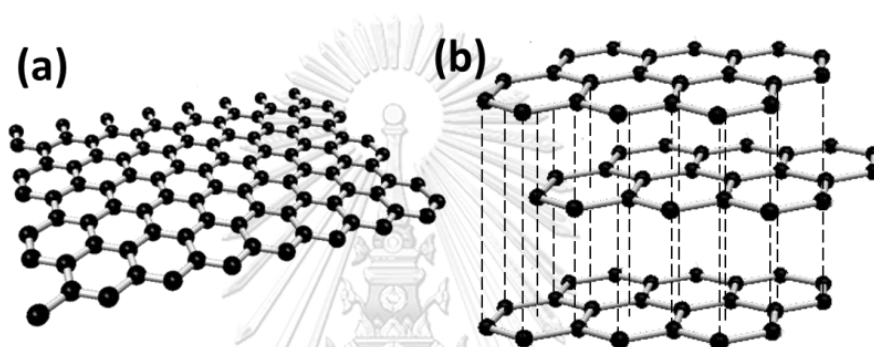
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันโลกกำลังเผชิญปัญหาโลกร้อน มลพิษสิ่งแวดล้อม และขาดแคลนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล ดังนั้นสังคมในปัจจุบันจึงให้ความสำคัญต่อพลังงานทางเลือก (Alternative energy) หรือพลังงานสะอาดเพิ่มมากขึ้น เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานน้ำ หรือพลังงานลม กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากเป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) และยั่งยืน (Sustainable) อย่างไรก็ตามในการนำพลังงานหมุนเวียนมาใช้จำเป็นต้องมีแหล่งกักเก็บพลังงาน เพื่อเก็บพลังงานไว้ใช้ในช่วงเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ และไม่มีลม เช่น แบตเตอรี่ และตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีประสิทธิภาพสูงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง แต่เนื่องจากปัจจุบันตัวเก็บพลังงานดังกล่าวยังมีประสิทธิภาพต่ำ มีความคงทนต่ำ การเก็บพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักของตัวเก็บพลังงานต่ำ มีอายุการใช้งานน้อยจึงส่งผลทำให้มีขยะที่ทำลายยากเพิ่มมากขึ้น ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อปรับปรุงข้อจำกัดดังกล่าวตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitor) จึงได้รับความสนใจอย่างมากในงานวิจัยในช่วงหลายปีที่ผ่านมา [1] เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีอัตราการบรรจุพลังงานและคายพลังงาน (Power density) สูงเพราะว่าไม่ขึ้นกับจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีและมีอายุการทำงานยาวนาน (Long cycle life) ซึ่งจากตัวอย่างสมบัติที่กล่าวมานี้ตัวเก็บประจุยิ่งยวดมีสมบัติที่ดีกว่าแบตเตอรี่ แต่เนื่องจากตัวเก็บประจุยิ่งยวดนั้นยังคงมีความหนาแน่นของพลังงาน (Energy density) ยังไม่สูงมากนัก งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อเพิ่มความหนาแน่นของพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดซึ่งสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific capacity) กล่าวคือวัสดุที่มีค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะต่ำจะมีความหนาแน่นของพลังงานน้อย โดยตัวเก็บประจุยิ่งยวดปัจจุบันแบ่งเป็น 2 ประเภท ประเภทแรก คือ อีดีแอลซี (EDLC, Electrochemical double layer capacitor) หรือ ตัวเก็บประจุเคมีไฟฟ้าแบบสองชั้น โดยสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีประจุจะถูกดูดซับสองชั้นบนขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุซึ่งส่วนใหญ่นิยมผลิตด้วยวัสดุคาร์บอน โดยค่าความจุและเสถียรภาพของการเก็บประจุจะขึ้นกับพื้นที่ผิวและประเภทสอง คือ ตัวเก็บประจุเทียม (Pseudocapacitor) จะเก็บประจุบนพื้นผิวของขั้วไฟฟ้า เช่นเดียวกับอีดีแอลซี และมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนผ่านปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีหรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุที่ถูกใช้เป็นขั้วไฟฟ้าส่งผลให้ตัวเก็บประจุเทียมสามารถเก็บประจุไฟฟ้าได้มากกว่าตัวเก็บประจุอีดีแอลซี ตัวเก็บประจุเทียมนิยมใช้โลหะออกไซด์

โลหะไฮดรอกไซด์ หรือพอลิเมอร์ผลิตเป็นขั้วไฟฟ้า โดยค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของตัวเก็บประจุเทียมสูงกว่าอีดีแอลซีในช่วงรอบเวลา (Cycle time) 10-100 ครั้ง เมื่อเกินกว่านั้นความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุจะลดลงเนื่องจากจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีลดลง [2]

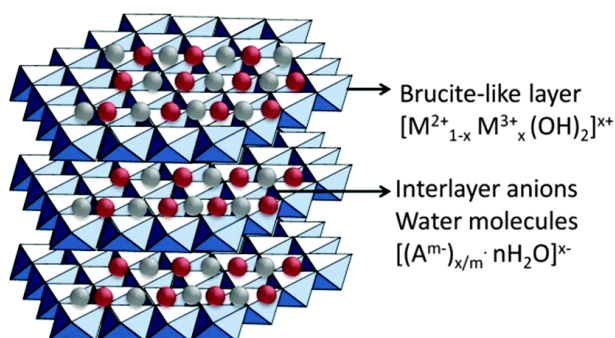
กราฟีนเป็นวัสดุคาร์บอนที่ได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในการพัฒนาเป็นตัวเก็บประจุยวดยิ่งเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นระนาบ 3 มิติ สามารถนำไฟฟ้าได้ดีและมีพื้นที่ผิวที่มากกว่าวัสดุคาร์บอนอื่น ๆ (~1000–2000 ตารางเมตรต่อกรัม) อีกทั้งมีการกระจายขนาดรูพรุนสม่ำเสมอสามารถให้อิเล็กโทรไลต์เข้าถึงพื้นผิวทั้งสองด้าน [3]



รูป 1.1 (a),(b) โครงสร้างระนาบ 3 มิติของกราฟีน [3]

อย่างไรก็ตามการประยุกต์กราฟีนมีข้อจำกัดเรื่องการกลับมารวมตัวกันเองของแผ่นกราฟีนทำให้เกิดเป็นกลุ่มกราฟไฟต์อีกครั้งเนื่องจากแรงแวนเดอร์วาล ดังนั้นจึงต้องปรับปรุงพื้นผิวของกราฟีนโดยการเติมอนุภาคอื่นลงไปป้องกันหรือลดการกลับมารวมตัวกันอีกครั้ง เช่น การเติมอนุภาคเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered double hydroxides; LDH) เป็นหนึ่งในสารประกอบแบบชั้น (Layered compound) ที่มีลักษณะเป็นผลึกจัดเรียงตัวซ้อนกันพบได้ในธรรมชาติหรือสังเคราะห์ขึ้นเองซึ่งทำได้ง่าย มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในงานทางวัสดุศาสตร์ ตัวเร่งปฏิกิริยาทางการแพทย์ และการกักเก็บพลังงาน มีสูตรเคมีทั่วไปคือ $[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_x(OH)]_n[A^{n-}]_{x/n} \cdot yH_2O$ โดย M^{2+}, M^{3+} แทนโลหะที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ 2 และ 3 ตามลำดับ x คือ อัตราส่วนโดยโมลของ $M^{3+}/(M^{2+}+M^{3+})$ และ A คือไอออนประจุลบมีประจุเท่ากับ n ซึ่ง M^{2+} ได้แก่ $Mg^{2+}, Fe^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Cd^{2+}$ หรือ Zn^{2+} และ M^{3+} ได้แก่ $Al^{3+}, Cr^{3+}, Ga^{3+}$ หรือ Fe^{3+} โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ประกอบด้วยชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ ($M^{2+}(OH)_2$) มีการจัดเรียงตัวแบบออกตะฮีดรัล (Octahedral) กับไฮดรอกไซด์แอนไอออน (OH^-) ซ้อนกันเป็นชั้นที่ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจนซึ่งเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มี

ความเหมาะสมในการประยุกต์เป็นตัวเก็บประจุวดยิ่งเนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนองค์ประกอบได้ มีความจุไฟฟ้าจำเพาะสูง มีความว่องไวในปฏิกิริยารีดอกซ์ ต้นทุนต่ำ และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่มีข้อด้อยคือมีระยะห่างระหว่างชั้นที่แคบจึงทำให้พื้นที่ผิวน้อย (20-120 ตารางเมตรต่อกรัม) [4, 5]



รูป 1.2 โครงสร้างระดับชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH) [5]

จากที่กล่าวมาข้างต้นกราฟีนและเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับพัฒนาเป็นตัวเก็บประจุวดยิ่ง ดังนั้นการสังเคราะห์วัสดุคอมโพสิตร่วมกราฟีนและเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จึงสามารถลดการยุบรวมตัวกันเองในเนื้อวัสดุแต่ละชนิดได้ งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดจะพัฒนาขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุวดยิ่งจากวัสดุคอมโพสิตระหว่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (RGO) และเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH) โดยใช้โลหะประจุสองบวกคือนิกเกิลและโคบอลต์และโลหะประจุสามบวกคืออะลูมิเนียม เนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยารับและส่งอิเล็กตรอนที่ดี (ปฏิกิริยารีดอกซ์) เพื่อเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ ความหนาแน่นของพลังงาน และสามารถบรรจุพลังงานในตัวเองจากพลังแสงอาทิตย์ผ่านเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงได้

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. ศึกษาองค์ประกอบและสัดส่วนที่เหมาะสมของวัสดุคอมโพสิตที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในตัวเก็บประจุวดยิ่ง
2. ศึกษาประสิทธิภาพการเก็บประจุของตัวเก็บประจุวดยิ่งทำงานร่วมกับเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาการนำวัสดุคอมพอสิตของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (RGO) และเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH) ผลิตเป็นขั้วไฟฟ้าในตัวเก็บประจุวดยิ่งเพื่อเพิ่มปริมาณความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific capacity) ศึกษาผลของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตต่อประสิทธิภาพการเก็บประจุของตัวเก็บประจุวดยิ่ง และความสามารถบรรจุพลังงานในตัวเองจากพลังแสงอาทิตย์ผ่านเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง

1.4 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมเครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการดำเนินงานวิจัย
3. เตรียมวัสดุคอมพอสิตของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (RGO) และเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH)
4. ประกอบตัวเก็บประจุวดยิ่ง
5. ออกแบบอุปกรณ์เก็บประจุที่ทำงานร่วมกับเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสง
6. พิสูจน์เอกลักษณ์ของวัสดุคอมพอสิต
 - วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุคอมพอสิตด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD)
 - วิเคราะห์สัณฐานวิทยาแบบส่องกราดของวัสดุคอมพอสิตด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy (SEM)
 - วิเคราะห์การกระจายตัวขององค์ประกอบของธาตุในเชิงคุณภาพ และและปริมาณของธาตุในวัสดุคอมพอสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS)
7. วิเคราะห์เซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงและตัวเก็บประจุวดยิ่ง
 - วิเคราะห์ประสิทธิภาพของเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงด้วยเทคนิค Photocurrent density-voltage characterization
 - วิเคราะห์ความต้านทานบริเวณรอยต่อของวัสดุด้วยเทคนิค Electrochemical impedance spectroscopy (EIS)
 - วิเคราะห์ความจุไฟฟ้าจำเพาะและอัตราการบรรจุและคายประจุด้วยเทคนิค Cyclic voltammetry (CV) และเทคนิค Galvanostatic charge and discharge (GCD)
8. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผล และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้องค์ประกอบและสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์กับเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในตัวเก็บประจุวดยิ่งและสร้างตัวเก็บประจุวดยิ่งระดับห้องปฏิบัติการที่ทำงานร่วมกับเซลล์เคมีไฟฟ้าเชิงแสงเพื่อบรรจุพลังงานจากพลังแสงอาทิตย์

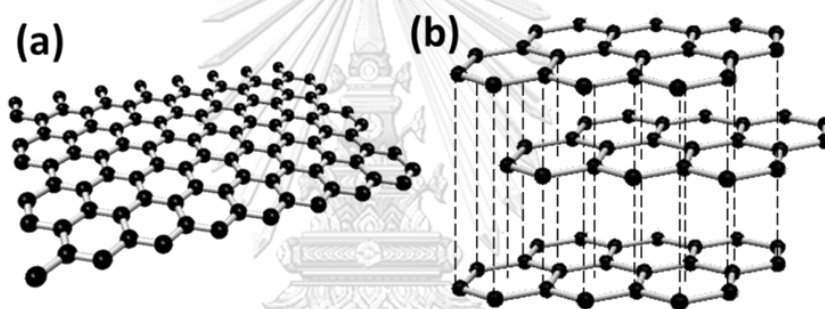


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

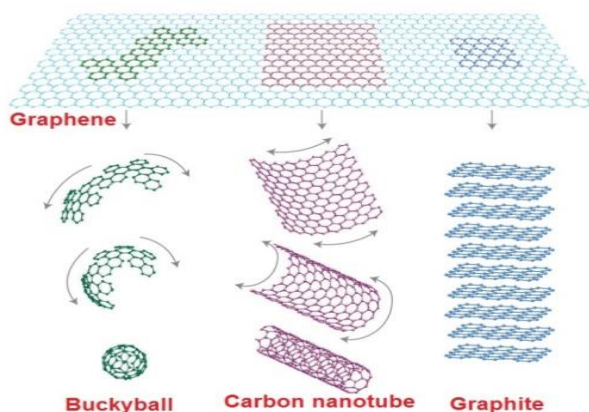
2.1 กราฟีน

การศึกษาเกี่ยวกับกราฟีนเริ่มต้นมาตั้งแต่ปี ค.ศ.1947 โดย P. R. Wallace เพื่อจะนำไปใช้ในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยพบว่าชั้นกราฟไฟต์เดี่ยวชั้นเดียวนั้นไม่เสถียรพอที่จะคงรูปอยู่ได้ ต่อมาในปี ค.ศ.1957 Slonczewski, Weiss และ McClure ได้ศึกษาโครงสร้างระดับชั้น (Band structure) ของกราฟไฟต์ หลังจากนั้นมีการค้นพบท่อนาโนคาร์บอนตั้งแต่ปี 1991 นักวิทยาศาสตร์จึงได้ใช้คุณสมบัติของกราฟีนในการคำนวณคุณสมบัติของท่อนาโนคาร์บอน ทำให้สามารถทราบคุณสมบัติที่สำคัญหลายประการ



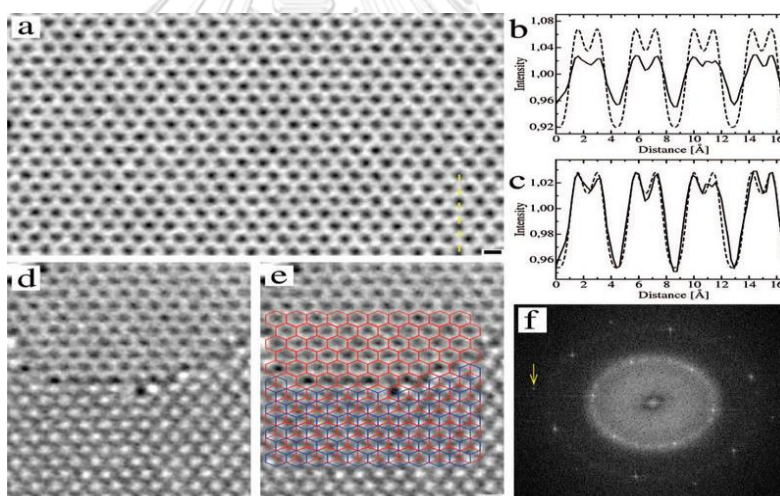
รูป 2.1 (a),(b) โครงสร้างระนาบ 3 มิติของกราฟีน [3]

ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานกราฟีนที่หลากหลายโดยส่วนใหญ่ยังอยู่ในขั้นวิจัยและพัฒนา เช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ตัวเก็บประจุความจุสูง เซลล์แสงอาทิตย์ และอาวุธชีวภาพ เป็นต้น กราฟีนมีองค์ประกอบพื้นฐานของวัสดุมาจากคาร์บอน โดยมีโครงสร้างหลายรูปแบบ ถ้ามีลักษณะเป็นลูกกลมจะเรียกว่า บัคกี้บอล (Buckyball) กราฟีนเป็นแท่งกลมจะได้ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) หรือเมื่อกราฟีนมาซ้อนกันเป็นชั้นๆจะได้กราฟไฟต์ (Graphite) ซึ่งเป็นวัสดุในถ่านหรือไส้ดินสอด่ ซึ่งลักษณะของโครงสร้างที่ต่างกันจะส่งผลต่อสมบัติที่แตกต่างกันด้วย [6]



รูป 2.2 แสดงอัญรูปของกราฟีนในลักษณะต่างๆ [7]

กราฟีนมีลักษณะเป็นแผ่นบางเรียงต่อกันด้วยของอะตอมคาร์บอนโดยแต่ละอะตอมยึดกันไว้ด้วยพันธะโควาเลนต์ (Covalence bond) แต่ละอะตอมมีระยะห่างกัน 0.142 นาโนเมตร และมีระยะห่างระหว่างแผ่นกราฟีนแต่ละชั้นในกราฟไฟต์ประมาณ 0.335 นาโนเมตร



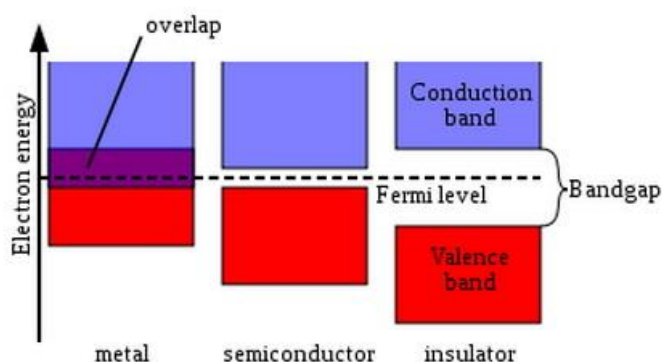
รูป 2.3 (a) รูปถ่ายแผ่นกราฟีนชั้นเดียว (Single layer graphene), (b)(c) ระยะห่างระหว่างอะตอมคาร์บอน, (d)(e) แนวรอยต่อระหว่างแผ่นกราฟีนชั้นเดียว (ส่วนบน) ไปชั้นคู่ (ส่วนล่างของรูป) (Monolayer to bilayer) (f) แนวแลตทิซของกราฟีน [8]

2.1.1 สมบัติทั่วไปของกราฟีนและการนำไปประยุกต์ใช้ [6]

1. กราฟีนเป็นวัสดุที่บางที่สุดที่มีการค้นพบ ในทางทฤษฎีไม่สามารถวัดความหนาของอะตอมได้ แต่สามารถวัดระยะห่างระหว่างอะตอมได้ ทำให้สามารถประเมินได้ว่าแผ่นกราฟีนหนาประมาณ 0.335 นาโนเมตร

2. กราฟีนมีค่าการดูดซับแสง (Optical properties) อยู่ที่ 2.3 เปอร์เซ็นต์จึงสามารถให้แสงทะลุผ่านชั้นกราฟีนได้
3. กราฟีนมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำ เป็นตัวนำที่นำไฟฟ้าได้ดีที่อุณหภูมิห้อง
4. กราฟีนมีค่าระดับความแข็งแรงเทียบเท่าเพชรสามารถบิดงอ ม้วน หรือพับได้โดยไม่ทำให้โมเลกุลเสียหาย
5. ความสามารถในการนำความร้อนจำเพาะ (Thermal conductivity) ของกราฟีนสูงกว่าวัสดุประเภทอื่นและนำความร้อนได้ดีกว่าเพชร จึงสามารถนำกราฟีนไปช่วยในระบบระบายความร้อนของหน่วยประมวลผลคอมพิวเตอร์
6. ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electronic mobility) ในกราฟีนมีค่าสูงมากทำให้สามารถนำมาสร้างทรานซิสเตอร์ได้
7. สภาพความยืดหยุ่น (Mechanic: Young's Modulus) ของกราฟีนมีค่ามอดูลัสของยังสูง

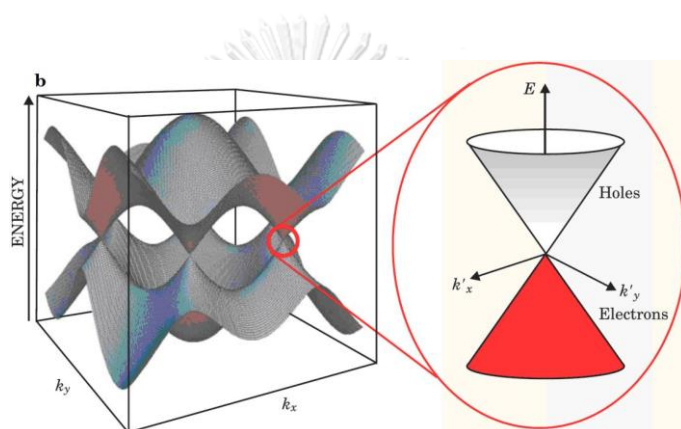
2.1.2 สมบัติทางไฟฟ้า (Electronic properties)



รูป 2.4 ระดับชั้นพลังงานของสารโลหะ กึ่งโลหะ และฉนวน [9]

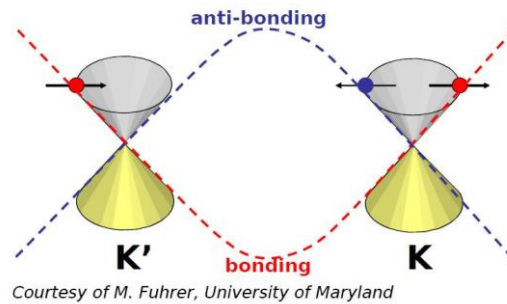
กราฟีนมีการจัดเรียงตัวของอิเล็กตรอนในอะตอมเป็น $^{12}_6\text{C} = 1s^2 2s^2 2p^2$ โดยประกอบด้วยออร์บิทัล $2s$, $2p_x$, $2p_y$ และ $2p_z$ โดยออร์บิทัลเหล่านี้สามารถผสมกันเกิดเป็นออร์บิทัลลูกผสม (Hybrid orbital) ชนิด sp^3 ในกรณีของกราฟีนจะเกิดการผสมกันระหว่างออร์บิทัล s และ p_x , p_y เกิดเป็น sp^2 ซึ่งจะเกิดพันธะซิกมา (σ) 3 พันธะ และเหลือออร์บิทัล p_z เป็นพันธะพาย (π) 1 พันธะ ส่งผลให้กราฟีนมีสมบัติทางไฟฟ้าที่พิเศษ กราฟีนมีแลตทิซเป็นแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal lattice) โดยมีความยาวพันธะระหว่างอะตอมคาร์บอนเท่ากับ 0.142 นาโนเมตร เนื่องจากอิเล็กตรอนในกราฟีนมีการเคลื่อนที่ในระนาบสองมิติ เมื่อทำการพล็อตระหว่างค่าพลังงานและการกระจาย

โมเมนต์โดยใช้ Tight-binding model (TB model) พบว่ากราฟีนเป็นสารกึ่งตัวนำที่ไม่มีช่องว่างแถบพลังงาน แต่แถบนำไฟฟ้า (Conduction bands) กับแถบวาเลนซ์ (Valence bands) นั้นไม่ซ้อนทับกันจึงไม่ใช่ทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำแต่แถบนำไฟฟ้ากับแถบวาเลนซ์ของกราฟีนจะสัมผัสกันพอดีที่จุดๆหนึ่ง เรียกว่า จุดดิแรก (Dirac point) ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้า เนื่องจากกราฟีนนั้นไม่มีระดับชั้นพลังงาน (Band gap energy) จึงเรียกว่าเป็น Semi-metal หรือ Zero band gap semi-conductor จากรูปเป็นโครงสร้างแถบของกราฟีนในช่วงพลังงานต่ำ จะเห็นว่าไม่มีช่องว่างระดับชั้นพลังงานและมีโครงสร้างแถบพลังงาน (Band structure) เป็นทรงกรวย



รูป 2.5 โครงสร้างแถบพลังงานของกราฟีน [6]

โครงสร้างที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะนี้จึงทำให้อิเล็กตรอนในกราฟีน มีคุณสมบัติไม่เหมือนอิเล็กตรอนในโลหะ หรือสารกึ่งตัวนำแบบอื่น คือในโลหะอิเล็กตรอนจะเป็นอนุภาคที่นำไฟฟ้า ส่วนในสารกึ่งตัวนำจะมีทั้งอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่นำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (N-type) และมีโฮล (Holes) หรือที่ว่างของอิเล็กตรอนเป็นอนุภาคที่นำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) แต่ในกราฟีนอิเล็กตรอนและโฮลจะถูกสร้างขึ้นพร้อมกันและเคลื่อนที่ไปด้วยกัน เรียกอนุภาคนี้นรวมกันว่า เอ็กซิตอน (Exciton) นอกจากนี้ด้วยโครงสร้างผลึกทำให้อิเล็กตรอนมีคุณสมบัติพิเศษที่ เรียกว่า สปินเทียม (Pseudo-spin)



รูป 2.6 สปินเทียม (Pseudo spin) ของกราฟีน [10]

การกระจายตัวอิเล็กตรอนิกส์ (Electronic dispersion) ของกราฟีนคำนวณได้จาก Tight binding approximation ประกอบด้วยแถบพลังงาน 2 แถบ คือ แถบวาเลนซ์ของโฮล (แถบล่าง) และแถบการนำของอิเล็กตรอน (แถบบน) จุดที่ทั้งสองแถบสัมผัสกันเรียกว่าจุดดิแรก มี 6 จุดสัมผัสกับตำแหน่งคาร์บอน สามารถอธิบายตามสมการ 2.1 [11]

$$E(k_x, k_y) = \pm t \sqrt{1 + 4\cos^2\left(\frac{\sqrt{3}}{2}a_0k_x\right) + 4\cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}a_0k_x\right)\cos\left(\frac{3}{2}a_0k_y\right)} \quad (\text{สมการ 2.1})$$

เมื่อ t (2.8eV) คือพลังงาน Hopping ระหว่างอะตอมคาร์บอนที่ใกล้ที่สุด และ a_0 (1.418 อังสตรอม) เป็นระยะห่างระหว่างอะตอม $c=c$

- ค่าการนำไฟฟ้าของกราฟีนมีค่าต่ำสุดไม่เป็นศูนย์ แม้ความหนาแน่นของประจุไฟฟ้าจะเป็นศูนย์ก็ตาม
- ปรากฏการณ์ควอนตัมฮอลล์ในกราฟีนเป็นแบบจำนวนเต็มครั้งสอดคล้องกับความสัมพันธ์ของพลังงานเชิงเส้นของอนุภาคดิแรกอิเล็กตรอน
- มวลไซโคลตรอน (Cyclotron mass, m_c) ของอนุภาคเฟอร์มิออนในกราฟีน มีสภาพไร้มวล (Massless) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ 2.2

$$m_c = \frac{E_F}{v_F^2} \quad (\text{สมการ 2.2})$$

1. เกิดปรากฏการณ์ขัดแย้งของไคลน์ (Klein paradox) คือ อนุภาคพาหะในกราฟีนสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านกำแพงศักย์ได้ 100 เปอร์เซ็นต์เมื่ออนุภาคพาหะนั้นตกกระทบกำแพงศักย์ที่มุมศูนย์ แตกต่างจากอนุภาคพาหะในวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดอื่นซึ่งจะเกิดการสะท้อนพลังงานขณะที่เคลื่อนที่ทะลุผ่านกำแพงศักย์

โครงสร้างแถบพลังงาน (Band structure) ในกราฟีนแตกต่างจากสารกึ่งตัวนำทั่วไป คือ

- ณ จุดที่แถบวาเลนซ์สัมผัสกับแถบนำไฟฟ้า ความชันของโครงสร้างแถบพลังงานจะเป็นพลังงานจะเป็นเส้นตรง เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำทั่วไป พบว่าโครงสร้างแถบพลังงานที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์และจุดต่ำสุดของแถบการนำจะเป็นเส้นโค้งพาราโบลาที่ความชันน้อยกว่าการที่เส้นความชันของโครงสร้างแถบพลังงานของกราฟีนเป็นเส้นตรงแสดงถึงมวลยังผลของอิเล็กตรอนมีค่าเป็นศูนย์ (Effective mass of electron) ดังนั้นกราฟีนจึงมีความคล่องตัวของอิเล็กตรอนมากถึง 1000 เท่าของซิลิคอน
- แถบวาเลนซ์และแถบกราฟีนมีการสัมผัสเชื่อมต่อกันเป็นจุดต่อจุดต่อเนื่องหรือช่องว่างแถบพลังงานมีค่าเป็นศูนย์ซึ่งสมบัติทำให้กราฟีนไม่สามารถประพฤติตัวเป็นสารกึ่งตัวนำได้จึงทำให้เกิดปัญหาในการนำไปต่อกับอุปกรณ์ดิจิทัล

นอกจากนี้ยังมีสมบัติอื่นและความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ เช่น มีความหนาแน่นของตัวนำพาหะสูงอยู่ในระดับ 10^{13} cm^{-2} มีความยาวคลื่นเฟอมี $\lambda_F \approx 50\text{-}100$ นาโนเมตร ระยะทางอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ~ 400 นาโนเมตร นำความร้อนสูง แต่สภาพต้านทานต่ำ และอันตรกิริยาระหว่างสปินของการเคลื่อนที่ของตัวนำพาหะ (Spin-orbit coupling) ต่ำ กราฟีนจึงถูกนำมาใช้ทดแทนซิลิคอนในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ไม่ว่าจะเป็นเซนเซอร์ เซลล์แสงอาทิตย์ ทรานซิสเตอร์ เป็นต้น โดยเฉพาะไมโครชิปในคอมพิวเตอร์ ทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพให้กับอุปกรณ์ทั้งความเร็วที่เพิ่มขึ้น ลดการสูญเสียพลังงาน และราคาถูกลง [10]

2.1.3 สมบัติการสั่นและสมบัติทางความร้อน (Vibrational properties and thermal properties) [10]

โดยปกติเมื่อมีพลังงานความร้อนเกิดขึ้นจะส่งผลให้แลตทิซของของแข็งเกิดการสั่น (Lattice vibration) เกิดการปลดปล่อยพลังงานเรียกว่า โฟนอน (Phonon) โดยโฟนอนจะแพร่ผ่านวัสดุที่มีการสั่นด้วยความเร็วเสียง ทำให้สามารถศึกษาสมบัติทางความร้อนของของแข็งได้

ตาราง 2.1 ค่าการนำความร้อนของกราฟีน ท่อนาโนคาร์บอน เพชร สารกึ่งตัวนำ และทองแดง

วัสดุ	ค่าการนำความร้อน (W/cm.K)
กราฟีน	~ 50
ท่อนาโนคาร์บอน	~ 35
เพชร	10 ~ 22
ซิลิคอน	1.4
เจอร์เมเนียม	0.6
ซิลิคอนคาร์ไบด์	4.1
ทองแดง	4

โดยค่าการนำความร้อนในกราฟีนมีมากแสดงถึงความสมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก โดยจากตาราง 2.1 พบว่ากราฟีนมีค่าการนำความร้อนสูงกว่าท่อนาโนคาร์บอน เพชร สารกึ่งตัวนำ และทองแดง

2.1.4 การนำกราฟีนไปประยุกต์ใช้

2.1.4.1 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่โค้งงอได้ (Flexible electronics)

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางประเภท เช่น หน้าจอทีวี เซลล์แสงอาทิตย์ หน้าจอสัมผัสของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอุปกรณ์เปล่งแสงอาทิตย์ (Organic light emitting diodes, OLEDs) ต้องการความโปร่งแสงมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์และความต้านทานแผ่นที่ต่ำ (Sheet resistance) กราฟีนจึงจัดเป็นตัวเลือกหนึ่งที่มีความโดดเด่นต่อการนำมาใช้พัฒนาอุปกรณ์เหล่านี้โดยกราฟีนหนึ่งชั้นให้ค่าความโปร่งแสงสูงถึง 97-98 เปอร์เซ็นต์และนำไฟฟ้าได้ดีมาก ในปัจจุบันได้มีความพยายามในการนำกราฟีนมาใช้ทดแทนอินเดียมทินออกไซด์ (Indium tin oxide, ITO) เพราะราคาถูก ทนต่อสารเคมีและการกัดกร่อน ให้สมบัติเชิงกลที่ดีกว่าและมีความยืดหยุ่นสูง ซึ่งกราฟีนมีค่าความเค้นต่อการแตกหัก (Fracture strain) สูงกว่าอินเดียมทินออกไซด์ถึง 10 เท่า จึงทำให้สามารถผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่โค้งงอและม้วนได้ [12]

2.1.4.2 วัสดุกักเก็บพลังงาน (Energy storage materials)

ปัจจุบันมีการศึกษาการนำกราฟีนมาใช้ในแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน ปกติขั้วแคโทดของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนจะพบปัญหาเกี่ยวกับการนำไฟฟ้าต่ำ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มปริมาณกราฟีนและคาร์บอนแบล็คลงในขั้วอิเล็กโทรด เนื่องจากกราฟีนมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี มีพื้นที่ผิวมาก

และประกอบกับโครงสร้างของกราฟีนมีลักษณะเป็นแผ่นเหมาะต่อการแทรกชั้น (Intercalation) ดังนั้นกราฟีนจึงถูกเลือกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อช่วยปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้า โดยกราฟีนจะถูกเตรียมในรูปของวัสดุคอมพอสิต เช่น วัสดุนาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบอนุภาคนาโนในรูปโลหะแกนกลางและเปลือกหุ้ม (Core-shell system) หรือวัสดุนาโนคอมพอสิตที่มีโครงสร้างแบบแซนด์วิช ซึ่งจะช่วยให้ค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้น และยังมีสมบัติการนำความร้อนที่ดีจะช่วยลดความร้อนจากภาระงานซึ่งเกิดจากการใช้งานแบตเตอรี่ได้ นอกจากนี้กราฟีนยังถูกนำมาใช้กับวัสดุกักเก็บพลังงานในรูปแบบอื่น เช่น ตัวเก็บประจุยวดยิ่ง หรือเป็นตัวรองรับสำหรับอนุภาคนาโนของโลหะบางประเภทเพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการแยกแก๊สไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (PEMFC) ด้วย [13]

2.1.4.3 วัสดุพอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต (Polymer nanocomposite materials)

กราฟีนถูกนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางความร้อนเนื่องจากกราฟีนมีอัตราส่วนของพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงสามารถสังเคราะห์ได้ในปริมาณมาก ราคาถูก พอลิเมอร์หลายชนิดจึงถูกนำมาใช้เป็นเมทริกซ์ร่วมกับกราฟีนเพื่อสังเคราะห์เป็นวัสดุคอมพอสิต พบว่าการใช้กราฟีนเป็นสารเติมแต่งร่วมกับพอลิเมอร์จะให้สมบัติเชิงกล สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางความร้อนที่ดีกว่า เนื่องจากกราฟีนมีคุณสมบัติและลักษณะพิเศษที่สำคัญ คือ 1. กราฟีนมีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูงส่งผลให้มีพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับพอลิเมอร์ได้มากกว่า 2. โครงสร้างของกราฟีนเป็นแผ่นแบนเรียบจะช่วยลดความต้านทานความร้อนที่รอยต่อระหว่างพื้นผิวและความต้านทานไฟฟ้า 3. กราฟีนมีพื้นที่ผิวและรอยย่นมากส่งผลอันตรกิริยารอยต่อระหว่างผิวของกราฟีนและพอลิเมอร์เกิดขึ้นได้มากกว่าซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ [14]

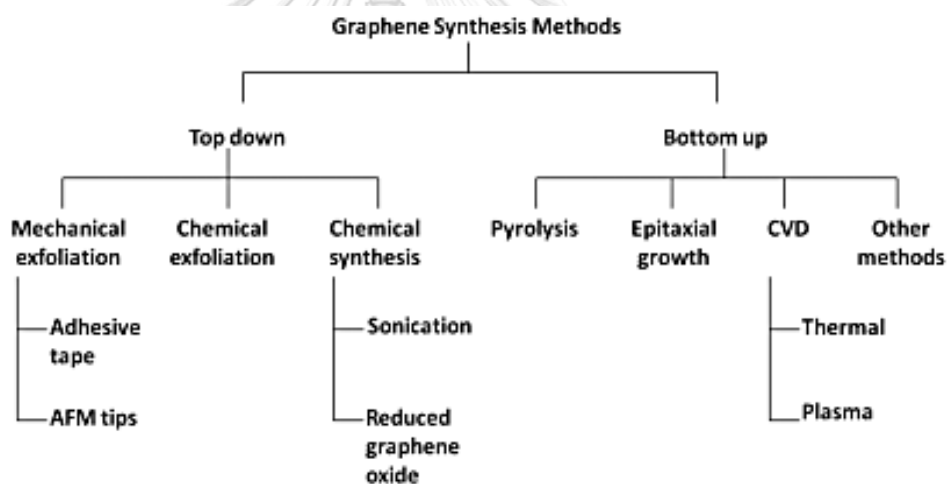
2.1.5 การประยุกต์ใช้กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์

กราฟีนออกไซด์มีโครงสร้างเป็นชั้นคล้ายกับกราฟีน แต่ระหว่างชั้นของอะตอมคาร์บอนในกราฟีนออกไซด์จะมีออกซิเจนประกอบของกลุ่มออกซิเจน ซึ่งจะช่วยให้ขยายระยะห่างระหว่างชั้นและทำให้มีความชอบน้ำมากขึ้น ซึ่งการปรากฏหมู่โครงสร้างของออกซิเจนนี้ทำให้กราฟีนออกไซด์สามารถกระจายตัวอยู่ในน้ำด้วยภาวะการสั่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonication) กราฟีนออกไซด์สามารถถูกกำจัดหมู่ออกซิเจนในโครงสร้างกลายเป็นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพื่อเพิ่มพันธะคอนจูเกตในโครงสร้าง กราฟีนออกไซด์มี 2 เอกลักษณ์สำคัญคือ 1. สามารถสังเคราะห์ได้จากกราฟีนที่มีราคาถูก

และได้ปริมาณมาก 2. เนื่องจากมีคุณสมบัติการชอบน้ำจึงสามารถเสถียรอยู่เป็นคอลลอยด์ในสารละลายได้ง่ายสามารถรวมกับอนุภาคอื่นง่ายในกระบวนการสารละลาย [15]

2.1.6 การสังเคราะห์กราฟีน

การสังเคราะห์กราฟีนสามารถทำได้หลายแบบแบ่งตามกระบวนการสังเคราะห์วัสดุนาโน คือ กระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่าง (Top-down) และ แบบล่างสู่บน (Bottom-up) ในกระบวนการสังเคราะห์แบบบนลงล่างแบ่งเป็นการลอกแผ่นกราฟีนโดยตรง เช่น ใช้สก็อตเทปลอกแผ่นกราฟีนจากกราฟไฟต์บริสุทธิ์ การใช้เข็ม AFM ลากแผ่นกราฟีนออกมา และการสังเคราะห์ทางเคมี เช่น การสังเคราะห์ด้วยเสียงความถี่สูง และการรีดิวซ์จากกราฟีนออกไซด์ ส่วนกระบวนการสังเคราะห์แบบล่างสู่บน ได้แก่ กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) การปลูกฟิล์มบางกราฟีนแบบผลึกเดี่ยว การปลูกฟิล์มบางด้วยไอระเหยทางเคมี ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ที่ยั่งยืน ต้องใช้เครื่องมือขั้นสูง แต่ให้กราฟีนปริมาณมาก [3]

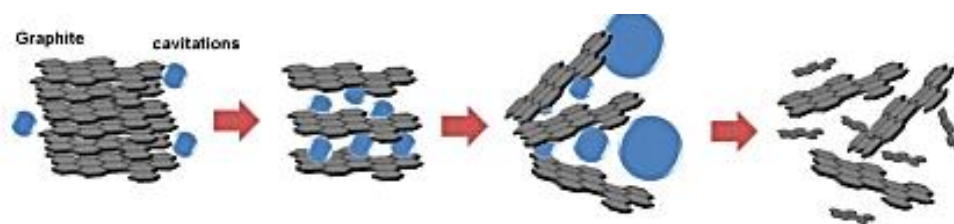


รูป 2.7 แผนภาพแสดงวิธีการสังเคราะห์กราฟีน [16]

2.1.6.1 การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีการสั่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Ultrasonication)

การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงช่วยในการสังเคราะห์กราฟีน เนื่องจากคลื่นเสียงสามารถเดินทางผ่านไปในตัวกลางที่เป็นของเหลวหรือสารละลายได้ ส่งต่อพลังงานให้แก่ของเหลวทำให้มีการเปลี่ยนแปลงความดันส่วนอัด (Compression) และส่วนขยาย (Rarefaction) จึงเกิดฟองสุญญากาศขนาดเล็กจำนวนมากโดยเฉพาะบริเวณส่วนอัดซึ่งมีความดันสูง เรียกว่า จุดความร้อน (Cavitation) และเกิดการระเบิดของฟองอากาศในเวลาต่อมา โดยปกติจุดความร้อนขนาดเล็กๆ นี้ จะมีอุณหภูมิสูงถึง

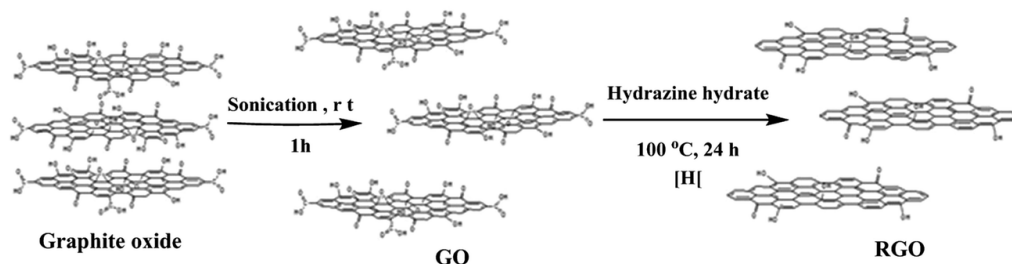
5000 เคลวิน และอาจมีความดันถึง 2000 บรรยากาศ ขึ้นอยู่กับความถี่ของพลังงานคลื่นเสียง ซึ่งการระเบิดดังกล่าวสามารถทำให้โมเลกุลของเหลวมีความเร็วถึง 280 เมตรต่อวินาที รูป 2.8 แสดงกระบวนการลอกแผ่นกราฟีนจากกราไฟต์ด้วยวิธีการใช้เสียงความเข้มสูงซึ่งเกิดฟองอากาศขนาดเล็กและแรงระเบิดมากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ ทำให้สามารถลอกชั้นของกราฟีนออกได้ ปรากฏการณ์นี้นำมาใช้ในทาง Sonochemistry ทำอันตรกิริยาระหว่างพลังงานกับสสารด้วยจุดความร้อนที่เกิดขึ้นภายในฟองอากาศขนาดเล็ก เมื่อมีการลดอุณหภูมิด้วยอัตรามากกว่า 1010 เคลวินต่อวินาที ใช้สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคระดับนาโนได้ [17]



รูป 2.8 วิธีการสังเคราะห์กราฟีนด้วยการสั่นด้วยคลื่นความถี่สูง [18]

2.1.6.2 การสังเคราะห์กราฟีนด้วยวิธีรีดักชันจากกราฟีนออกไซด์

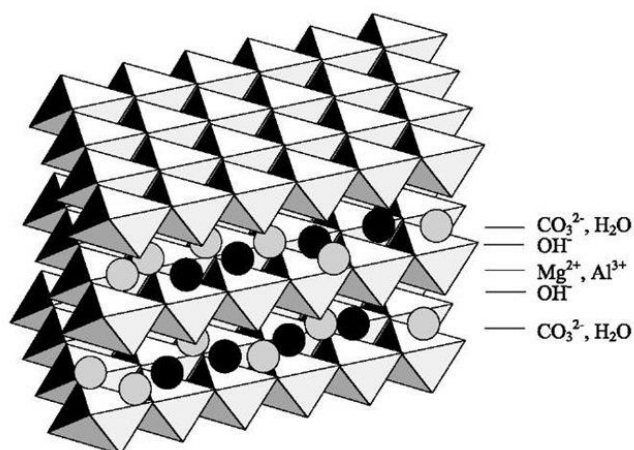
กราฟีนออกไซด์ (Graphene oxide) เป็นกราฟีนที่มีการดัดแปลงทางเคมี (Chemically modified graphene) เติร์มจากกระบวนการปฏิกิริยาออกซิเดชันของกราไฟต์และลอกเป็นชั้นเดียวของกราฟีน ซึ่งสัดส่วนของปริมาณอะตอมของคาร์บอนต่อออกซิเจนน้อยกว่า 3.0 และสัดส่วนที่ดีที่สุดมีค่าใกล้เคียง 2.0 รูป 2.9 แสดงโครงสร้างแผ่นคาร์บอนในกระบวนการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของกราไฟต์ด้วยการทำปฏิกิริยากับกรดแก่ จากแบบจำลองของ Lerf-Klinowski แสดงหมู่ออกไซด์แทรกระหว่างชั้นของกราไฟต์หรือบนผิวของกราไฟต์ โดยเฉพาะกลุ่ม 1,2-อีพอกไซด์และไฮดรอกซิล ส่วนบริเวณขอบจะมีกลุ่มคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิล เกาะเป็นส่วนใหญ่ และอาจมี 5- และ 6-Membered lactols ทำให้ระยะห่างระหว่างชั้น (D-spacing) จาก 0.335 นาโนเมตร ขยายถึง 2-3 เท่า เรียกสารที่ได้ว่า กราไฟต์ออกไซด์ (Graphite oxide) จากนั้นสามารถแยกชั้นของแกรไฟต์ในน้ำหรือในตัวทำละลายเป็นชั้นเดียวเรียกว่า กราฟีนออกไซด์ เมื่อทำปฏิกิริยารีดักชันกับไฮดราซีน (N_2H_4) จะได้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ซึ่งหมู่ออกไซด์ส่วนใหญ่ที่อยู่บริเวณผิวของกราฟีนหลุดออกอาจมีหลงเหลือตามขอบหรือสามารถทำด้วยกับอุณหภูมิสูง การใช้คลื่นไมโครเวฟ หรือการใช้แสงเพื่อกำจัดออกซิเจนที่สร้างพันธะกับกลุ่มอะตอมคาร์บอน [19]



รูป 2.9 โครงสร้างแผ่นคาร์บอนในกระบวนการออกซิเดชันและรีดักชันของกราฟไฟต์เป็นรีดิวซ์กราฟไฟต์ออกไซด์ [20]

2.2 เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (Layered double hydroxide; LDH)

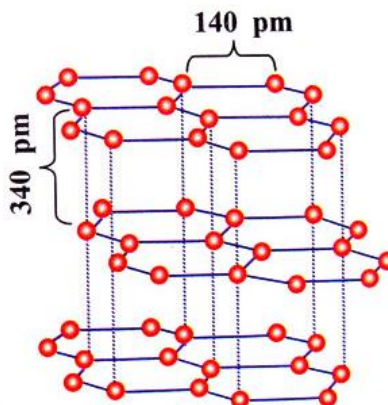
เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์หรือสารประกอบแบบไฮโดรทัลไซต์ (Hydrotalcite-like compounds) สังเคราะห์ขึ้นครั้งแรกในห้องปฏิบัติการในปี ค.ศ. 1942 เมื่อ Feithnecht ทำการผสมระหว่างสารละลายเบสกับเกลือโลหะ ซึ่งยังไม่สามารถสรุปโครงสร้างที่แน่ชัด กระทั่งในปี ค.ศ.1960 Taylor และ Almann ทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างของแข็งด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD) พบว่าเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ประกอบด้วยชั้นของโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจุบวกเรียงซ้อนกัน โดยมีโมเลกุลน้ำและไอออนประจุลบแทรกอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างชั้นโดยเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่พบบนนั้นประกอบด้วยแมกนีเซียม-อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์คาร์บอเนต มีสูตรทางเคมีคือ $Mg_6Al_2(OH)_{16}CO_3 \cdot 4H_2O$ ซึ่งมีคาร์บอเนตเป็นไอออนประจุลบภายในช่องว่างระหว่างชั้น [21]



รูป 2.10 โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ [22]

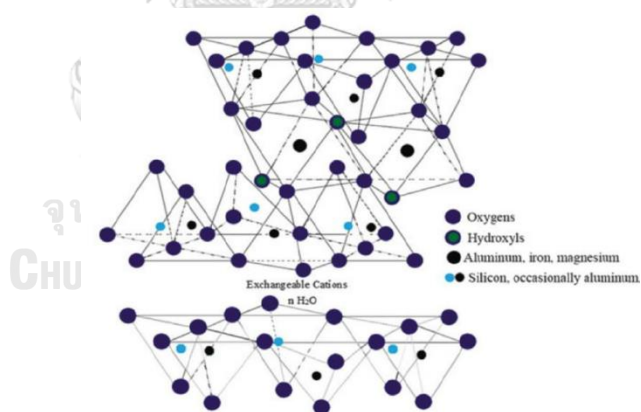
โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เป็นสารประกอบแบบชั้น (Layered compound) สามารถแบ่งชนิดตามประจุไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้นได้ 3 ประเภท คือ

1. โครงสร้างไม่มีไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้น ไม่มีการดูดประจุภายในช่องว่างระหว่างชั้น เนื่องจากประจุของชั้นโลหะเป็นกลาง เช่น กราไฟต์



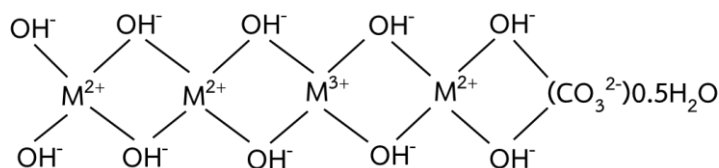
รูป 2.11 โครงสร้างระดับชั้นของกราไฟต์ [23]

2. โครงสร้างมีไอออนภายในช่องว่างระหว่างชั้นเป็นประจุบวก (Cationic ion) เช่น แร่ดินเหนียว (Clay mineral) ซึ่งประกอบด้วย แผ่นของชั้นไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมซิลิเกตที่มีประจุโดยรวมของชั้นเป็นลบ เรียงตัวเป็นชั้นมีการดูดประจุด้วยชั้นของไอออนประจุบวก เช่น มอนมอริลโลไนต์ (Montmorillonite) [24] ดังแสดงในรูป 2.12



รูป 2.12 โครงสร้างของมอนมอริลโลไนต์ [24]

3. โครงสร้างที่มีไอออนภายในช่องว่างชั้นมีประจุลบ (Anionic ion) ประกอบด้วยชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจุเป็นบวกซ้อนกันเป็นชั้น มีการดูดประจุด้วยชั้นของไอออนประจุลบ เช่น เลเยอร์ไฮดรอกไซด์ซอลท์ (LDs.M²⁺(OH)_{2-x}(A_n)_{x/n}) เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (LDH-M²⁺_{1-x}M³⁺_x(OH)₂(A_n)_{x/n}.nH₂O) หรือไฮโดรทัลไซต์ (Hydrotalcite) [25] ดังแสดงโครงสร้างในรูป 2.13



รูป 2.15 การแทนที่ M^{2+} ด้วย M^{3+} ในชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ [25]

ตาราง 2.2 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของสารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

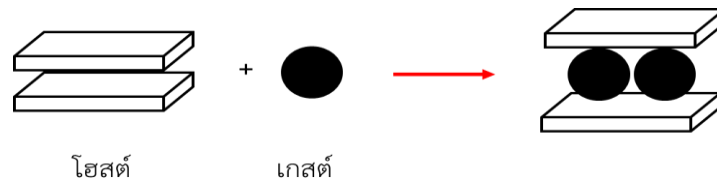
วัสดุ	องค์ประกอบทางเคมี
Brucite	$Mg(OH)_2$
Gibbsite	$Al(OH)_3$ monoclinic
Hydrocalumite	$Ca_2Al(OH)_6(CO_3)_{1.1}(OH)_{0.782} \cdot 38H_2O$
Meixnerite	$Mg_3Al_2(OH)_8(CO_3)_{0.5} \cdot 2H_2O$
Natural hydrotalcite	$Mg_5Al_2(OH)_{16}(CO_3) \cdot 4H_2O$
Pyroaurite	$Mg_3Fe(OH)_8(CO_3)_{0.5} \cdot 2.25H_2O$
Sjogrenie	$Mg_3Fe(OH)_8(CO_3)_{0.5} \cdot 2.25H_2O$
Stichite	$Mg_3Cr(OH)_8(CO_3)_{0.5} \cdot 2H_2O$
Takovite	$Ni_3Al(OH)_8(CO_3)_{0.5} \cdot 2H_2O$

2.2.2 การดัดแปลงโครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

โดยทั่วไปช่องว่างระหว่างชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีขนาดขึ้นกับชนิดและขนาดของไอออนประจุลบที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างชั้น เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่พบในธรรมชาติและได้จากการสังเคราะห์จะมีคาร์บอเนตไอออน (CO_3^{2-}) เป็นไอออนประจุลบจึงทำให้มีระยะห่างช่องว่างระหว่างชั้นที่แคบ (2.9 อังสตรอม) ทำให้การประยุกต์ใช้เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือตัวดูดซับค่อนข้างจำกัด ดังนั้นจึงมีการศึกษาเพื่อเพิ่มระยะห่างของช่องว่างระหว่างชั้นโดยการสอดแทรกไอออนของประจุลบหรือโมเลกุลขนาดใหญ่ (Intercalation) เข้าสู่โครงสร้าง [26]

2.2.2.1 การสอดแทรก (Intercalation)

เป็นการสอดแทรกหรือใส่เกสต์ชนิดต่างๆ (Guest species) เช่น ไอออนโมเลกุลหรือพอลิเมอร์เข้าไปภายในช่องว่างระหว่างชั้นของวัสดุโฮสต์ที่มีโครงสร้างเป็นชั้นที่เรียกว่า วัสดุเลเยอร์โฮสต์ (Layered host material) โดยองค์ประกอบพื้นฐานไม่เปลี่ยนแปลง

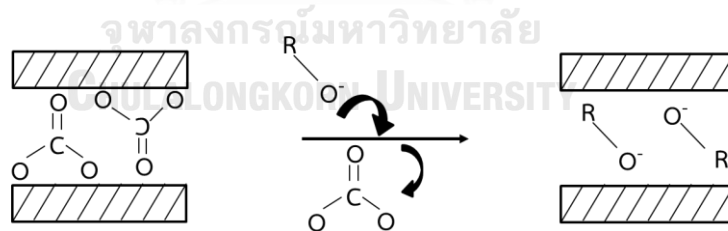


รูป 2.16 การแทรกของโมเลกุลเกสต์ในเลเยอร์โฮสต์ [27]

การสอดแทรกทำให้โครงสร้างภายในของวัสดุเลเยอร์โฮสต์เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่ต่างกักันขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุเลเยอร์โฮสต์และเกสต์ที่เข้าทำร่วมกัน ปกติแล้วเกสต์จะกระจายอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของวัสดุเลเยอร์โฮสต์ได้อย่างสม่ำเสมอทุกๆชั้น แต่ในบางกรณีการกระจายตัวของเกสต์อาจมีลักษณะที่แตกต่างออกไป เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สามารถแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบที่อยู่ภายในช่องว่างระหว่างชั้นกับไอออนประจุลบอื่นซึ่งส่งผลให้ระยะห่างระหว่างชั้นของโลหะไฮดรอกไซด์หรือระยะห่างระหว่างช่องว่างระหว่างชั้นเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยการสอดแทรกของไอออนประจุลบนั้นทำได้หลายวิธี

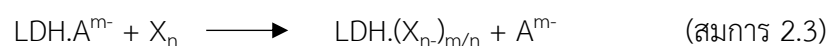
2.2.2.1.1 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange)

วิธีนี้ไอออนประจุลบระหว่างชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จะถูกแลกเปลี่ยนกับเกสต์ที่มีไอออนประจุลบดังรูป 2.17 การแลกเปลี่ยนไอออนจะเกิดขึ้นได้ง่ายหรือยากขึ้นกับอันตรกิริยาทางประจุ (Electrostatic intercalation) ระหว่างชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจุบวกกับไอออนประจุลบเดิมในโครงสร้าง



รูป 2.17 การแลกเปลี่ยนไอออนของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ [28]

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการแลกเปลี่ยนไอออน



โดย A คือ ไอออนประจุลบในโครงสร้างเดิม m ประจุ

X คือ เกสต์ที่มีไอออนประจุลบ n ประจุ

จากสมการ 2.3 เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบ เช่น คลอไรด์ ไนเตรต คาร์บอเนต หรือ คาร์บอกซิเลต ที่อยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ซึ่งมีอันตรกิริยาทางประจุกับ ชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ที่แตกต่างกันตามจำนวนประจุโดยมีปัจจัยที่ส่งผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออนดังนี้

- **สัมพรรคภาพของไอออนประจุลบ (Affinity for incoming anion)**

การแลกเปลี่ยนไอออนประจุลบขึ้นกับชนิดของไอออนประจุลบภายในช่องว่างระหว่างชั้นซึ่งพบว่าไอออนประจุลบแต่ละชนิดภายในช่องว่างระหว่างชั้นมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่แตกต่างกัน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนง่ายหรือยากขึ้นกับจำนวนประจุของไอออนลบ โดยเรียงจากยากมาง่าย คือ $\text{CO}_3^{2-} \gg \text{SO}_4^{2-} \gg \text{OH}^- > \text{F}^- > \text{Cl}^- > \text{Br}^- > \text{NO}_3^- > \text{I}^-$ โดยทั่วไปนิยมใช้เลเยอร์ไฮดรอกไซด์ที่มีไนเตรตไอออนเป็นประจุลบภายในช่องว่างระหว่างชั้นเป็นสารตั้งต้นในการแลกเปลี่ยนไอออน

- **ความหนาแน่นของประจุในชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ (Charge density of the sheet)**

ความหนาแน่นของประจุในชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ส่งผลต่ออันตรกิริยาทางประจุระหว่างชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ที่มีประจุบวกกับไอออนประจุลบเดิมในโครงสร้างเมื่อมีความหนาแน่นของประจุในชั้นไฮดรอกไซด์หนาแน่นส่งผลให้อันตรกิริยาทางประจุระหว่างไฮดรอกไซด์กับไอออนประจุลบเดิมสูง ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนได้ยาก ซึ่งความหนาแน่นของประจุในชั้นขึ้นกับอัตราส่วนของโลหะสองบวกต่อสามบวก ($\text{M}^{2+}/\text{M}^{3+}$) โดยความหนาแน่นของประจุในชั้นเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของโลหะสองบวกต่อสามบวกลดลง

- **ตัวกลางในการแลกเปลี่ยน (Exchange medium)**

เมื่อมีการใช้ตัวทำละลายที่เหมาะสมเป็นตัวกลางในการแลกเปลี่ยนไอออน ตัวทำละลายจะช่วยให้เกิดการขยายช่องว่างระหว่างชั้นได้ขณะที่ทำการแลกเปลี่ยนไอออน เนื่องจากสมบัติการบวมตัว (Swelling) ของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ซึ่งช่วยให้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนเข้าสู่ภายในโครงสร้างได้ง่ายขึ้น เช่น น้ำ

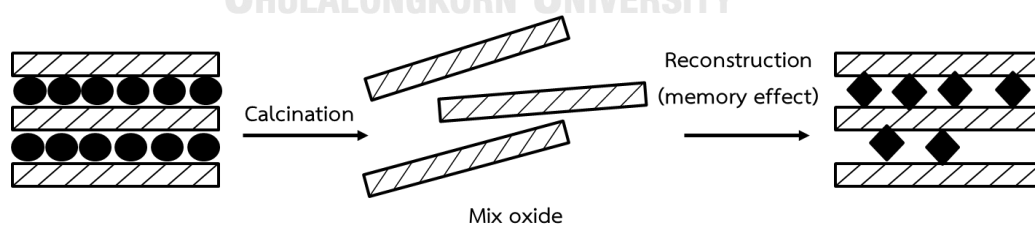
2.2.2.2 การตกตะกอนร่วม (Co-precipitation)

การตกตะกอนร่วมเป็นการสอดแทรกไอออนประจุลบเข้าสู่โครงสร้างของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์โดยตรง เป็นการตกตะกอนร่วมกันระหว่างสารละลายเกลือโลหะประจุบวกสองและประจุบวกสามกับสารละลายเบสที่มีไอออนประจุลบที่ต้องการสอดแทรกผสมอยู่ โดยไอออนประจุลบที่ต้องการสอดแทรกต้องมีความสามารถในการดูลประจุของชั้นโลหะไฮดรอกไซด์มากกว่าไอออนร่วม

ของเกลือโลหะ มิฉะนั้นไอออนร่วมของเกลือโลหะจะสอดแทรกเข้าสู่ระหว่างชั้นแทนไอออนประจุลบที่ต้องการ โดยทั่วไปจะนิยมใช้เกลือโลหะคลอไรด์หรือไนเตรตเป็นสารตั้งต้นในการเตรียม โดยการตกตะกอนควรตกอยู่ในภาวะไนโตรเจนเพื่อป้องกันคาร์บอนไดออกไซด์ไอออนในอากาศ ($\text{CO}_2(\text{air}) + \text{moisture} \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$) ซึ่งจะต้องมีการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายโดยควบคุมค่าพีเอช (pH) ในการตกตะกอนสูงหรือเท่ากับพีเอชที่ชั้นโลหะไฮดรอกไซด์จะสามารถตกตะกอนได้โดยอุณหภูมิในการตกตะกอนมีผลต่อลักษณะความเป็นผลึกของสาร ซึ่งจะควบคุมอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 0-100 องศาเซลเซียสเป็นเวลาหลายชั่วโมง หรือใช้ หม้ออบความดัน (Autoclave) ภายใต้ความดัน 10-150 เมกกะปาสคาล [29]

2.2.2.3 การฟื้นฟูสภาพ (Reconstruction)

เป็นกระบวนการที่นิยมนำมาใช้ในการสอดแทรกไอออนประจุลบเข้าสู่ช่องว่างระหว่างชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เมื่อให้อุณหภูมิ 300-500 องศาเซลเซียส จะเกิดการกำจัดหมู่ไฮดรอกซิลของชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ น้ำและไอออนประจุลบภายในช่องว่างระหว่างชั้น เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จะสลายโครงสร้างอยู่ในรูปออกไซด์โลหะประจุสองบวกและประจุสามบวก เมื่อนำมาผสมในสารละลายโครงสร้างของออกไซด์โลหะเหล่านี้จะกลับคืนเป็นโครงสร้างชั้นโลหะไฮดรอกไซด์ร่วมกับไอออนประจุลบในสารละลายกลับมาสู่ภายในช่องว่าง เรียกว่า Memory effect โดยวิธีนี้จะใช้เมื่อต้องการแทรกโมเลกุลขนาดใหญ่ เพื่อหลีกเลี่ยงการแข่งขันของสารอนินทรีย์ที่มาจากเกลือของโลหะ โดยอุณหภูมิของการเผาไหม้ผลต่อการฟื้นฟูโครงสร้าง เมื่อใช้อุณหภูมิสูงเกินไป การฟื้นฟูโครงสร้างจะลดลง เนื่องจากการเกิดการเคลื่อนที่ของโลหะบวกสองไปสู่ตำแหน่งเตตระฮีดรอกเกิดเป็นฟอร์มีสไปเนล (Spinel)



รูป 2.18 กระบวนการฟื้นฟูสภาพ [30]

2.2.2.4 กระบวนการความร้อน (Thermal or melting reaction)

เป็นกระบวนการใหม่ในการเตรียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สอดแทรกด้วยไอออนประจุลบ โดยกระบวนการนี้อาศัยการผสมเข้ากันของสารตั้งต้นของไอออนประจุลบกับเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์หรือออกไซด์ที่ได้จากการเผาเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์โดยกำหนดอัตราการให้ความร้อนแก่สาร

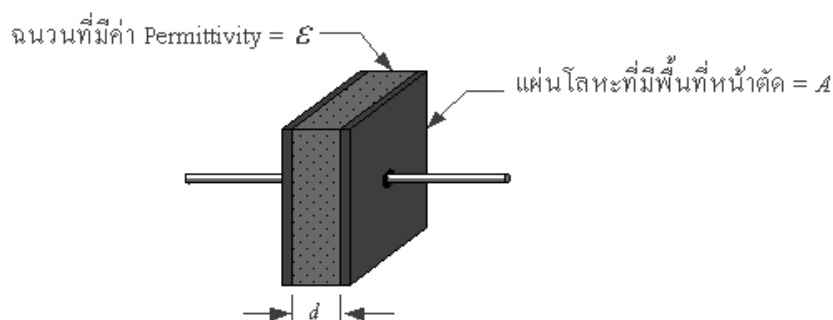
ผสมไม่เกิน 10 องศาเซลเซียสต่อนาทีจนถึงอุณหภูมิที่มากกว่าจุดหลอมเหลวของสารประมาณ 10 องศาเซลเซียส จากนั้นจะคงอุณหภูมิไว้จนถึงจุดสมดุลจึงลดอุณหภูมิลงที่อุณหภูมิปกติ

2.2.3 สมบัติของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ [31]

- 1.สังเคราะห์ได้ง่าย ราคาถูก
- 2.สามารถปรับแต่งโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีได้ง่าย มีความยืดหยุ่นสูง (Flexibility)
- 3.มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดี
- 4.สามารถกลับสู่โครงสร้างเดิมได้ (Memory effect)

2.3 ตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ตัวเก็บประจุเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บประจุ และสามารถคายประจุได้ นิยมนำมาประกอบในวงจรทางด้านไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป เช่น วงจรกรองกระแส วงจรผ่านสัญญาณ วงจรสตาร์ทเตอร์ วงจรถ่ายทอดสัญญาณ หน่วยของตัวเก็บประจุ คือ ฟารัด (Farad) รูป 2.19 แสดงโครงสร้างและสัญลักษณ์ของตัวเก็บประจุ ซึ่งมีตัวนำ 2 ชั้น มาวางในลักษณะขนานใกล้ๆกัน แต่ไม่ต้อถึงกัน ระหว่างตัวนำทั้งสองจะถูกกั้นด้วยฉนวนที่เรียกว่าไดอิเล็กตริก (Dielectric) ความจุทางไฟฟ้าเกิดจากการป้อนแรงเคลื่อนให้กับขั้วทั้งสองของจุดที่ต่อใช้งานของสารตัวนำซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์ทางไฟฟ้า สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนสารตัวนำที่เป็นแผ่นเพลท จะทำให้เกิดค่าความจุทางไฟฟ้าขึ้น ลักษณะนี้เรียกว่าการเก็บประจุ (Charge) เมื่อต้องการนำไปใช้งานเรียกว่าการคายประจุ (Discharge) [2]



รูป 2.19 โครงสร้างของตัวเก็บประจุ [32]

2.3.1 การต่อวงจรตัวเก็บประจุ

2.3.1.1 วงจรอนุกรม

การต่อวงจรอนุกรม คือ การนำเอาตัวเก็บประจุตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปมาต่ออนุกรมหรืออันดับ การต่อลักษณะนี้จะทำให้พื้นที่รวมของแผ่นเพลทลดลง แต่ความหนาของไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้น มีผลทำให้การเก็บประจุรวมมีค่าลดลง แต่อัตราทนแรงไฟมากขึ้น ค่าการเก็บประจุรวมหาได้จากสมการ 2.4

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (\text{สมการ 2.4})$$

2.3.1.2 วงจรขนาน

การต่อวงจรขนาน คือการนำเอาตัวเก็บประจุมาต่อขนานกัน การต่อลักษณะนี้จะทำให้พื้นที่รวมของเพลทเพิ่มขึ้น มีผลทำให้การเก็บประจุรวมมีค่ามากขึ้นด้วย อัตราทนแรงไฟสูงสุดของวงจรมีค่าเท่ากับตัวที่มีอัตราทนแรงไฟน้อยที่สุด ค่าการเก็บประจุรวมคำนวณจากการรวมพื้นที่ของแผ่นเพลททุกแผ่นรวมกันหาได้จากสมการ 2.5

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n \quad (\text{สมการ 2.5})$$

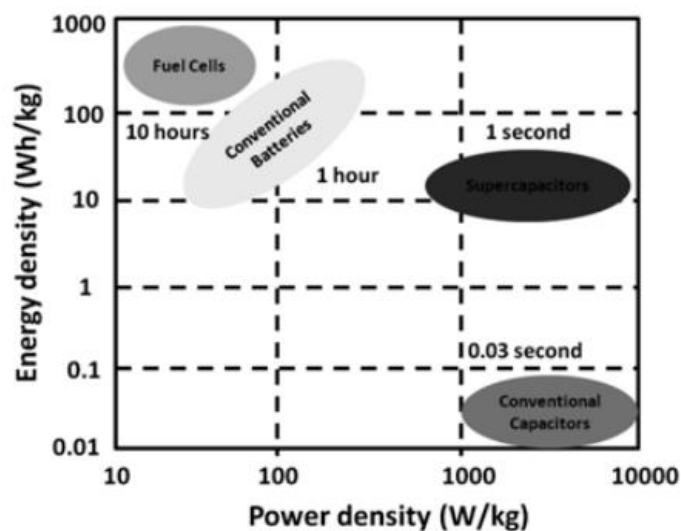
2.3.1.3 วงจรผสม

การต่อวงจรผสมคือการนำเอาตัวเก็บประจุอนุกรม และขนานในวงจรเดียวกัน การวิเคราะห์หาค่าความจุรวมต้องหาค่าความจุทีละส่วนแล้วหาผลรวมของค่าความจุรวมในขั้นตอนสุดท้าย

2.3.2 ตัวเก็บประจุวดยิ่ง (Supercapacitor)

ปัจจุบันตัวเก็บประจุเคมีไฟฟ้าวดยิ่งได้รับความสนใจในงานวิจัยและอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก เพราะสามารถเก็บพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักของตัวเก็บประจุได้สูง เนื่องจากเก็บประจุเคมีที่พื้นผิวของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้า นอกจากนี้อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุเคมีไฟฟ้าวดยิ่งจะยาวนานกว่าแบตเตอรี่ เนื่องจากการบรรจุพลังงานแต่ละครั้งไม่มีปฏิกิริยาข้างเคียงเกิดขึ้น อัตราการเร็วในการบรรจุพลังงาน และคายพลังงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าวดยิ่งสูงกว่าแบตเตอรี่เพราะไม่ขึ้นกับจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมี จากกราฟของราโกเน (รูป 2.20) เปรียบเทียบความหนาแน่นกำลังงาน (Power density) และความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) [1] ของ

อุปกรณ์กักเก็บพลังงานรูปแบบต่างๆ พบว่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดจะมีค่าความหนาแน่นกำลังงานสูงกว่าแบตเตอรี่และเซลล์เชื้อเพลิง โดยเซลล์เชื้อเพลิงเป็นอุปกรณ์เปลี่ยนพลังงานเคมีที่เก็บไว้ในพันธะไปเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีข้อดีคือมีความหนาแน่นของพลังงานสูงสุดเมื่อเทียบกับอุปกรณ์กักเก็บพลังงานชนิดอื่น แต่การที่จะทำให้เกิดการแตกออกของพันธะเคมีเพื่อให้อิเล็กตรอนนั้นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีราคาสูง เช่น แพลตตินัม และจลนศาสตร์การเกิดปฏิกิริยาเคมีบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาช้า ส่งผลให้ความหนาแน่นของกำลังงานต่ำ ในส่วนของแบตเตอรี่นั้นเป็นอุปกรณ์ที่เก็บพลังงานโดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ เช่น ลิเทียมไอออน แบตเตอรี่เมื่อพลังงาน ปฏิกิริยารีดอกซ์จะเกิดขึ้นโดยลิเทียมไอออนที่อยู่ในผลึกของโลหะออกไซด์ เช่น โคบอลต์ออกไซด์จะรับอิเล็กตรอนกลายเป็นโลหะลิเทียมในขั้วไฟฟ้าของกราไฟต์ ในขณะที่การคายพลังงานจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือโลหะลิเทียมสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นลิเทียมไอออนกลับไปยังโลหะที่มีออกไซด์อยู่ แบตเตอรี่จึงให้ความหนาแน่นพลังงานสูง แต่ความหนาแน่นของกำลังงานยังต่ำ ส่งผลให้เวลาในการบรรจุพลังงานช้า เพราะจลนศาสตร์ของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นช้า และยังมีเสถียรภาพต่ำและบ่อยครั้งพบปัญหาการระเบิดของแบตเตอรี่ เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติข้อดีและข้อเสียของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดกับแบตเตอรี่ พบว่ากลไกการเก็บพลังงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดยิ่งอาศัยการดูดซับเชิงฟิสิกส์ของอิเล็กโทรไลต์ ขณะที่แบตเตอรี่อาศัยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี ส่งผลให้แบตเตอรี่มีข้อจำกัดเรื่องกำลังงานต่ำ หรือการบรรจุและคายพลังงานต่ำซึ่งไม่พบในตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด และปัจจุบันได้นำเอาวัสดุนาโนที่มีพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูงนำมาใช้ทำขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยิ่งยวด [1]



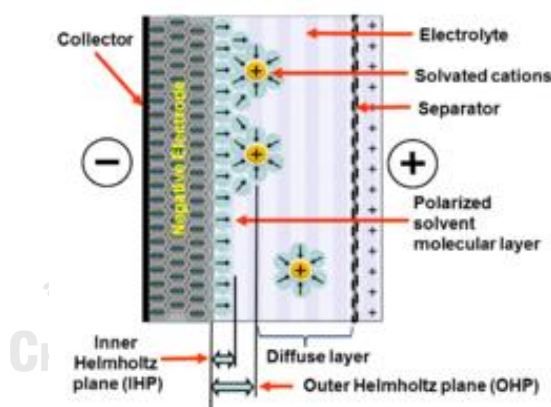
รูป 2.20 กราฟของราโกเนเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกำลังงานและความหนาแน่นพลังงานของตัวเก็บพลังงานชนิดต่างๆ [1]

2.3.2.1 ชนิดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าวยวดยิ่ง

ปัจจุบันตัวเก็บประจุไฟฟ้าวยวดยิ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ตามกลไกของการกักเก็บพลังงานในตัวเก็บประจุ

2.3.2.1.1 ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีสองชั้น (Electrochemical double layer capacitor, EDLC)

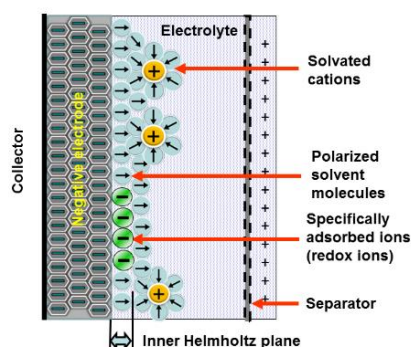
ถูกคิดค้นขึ้นโดย H. I. Becker นักวิจัยของบริษัท General Electric Co. ในปี ค.ศ. 1957 จากแผนภาพเห็นว่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าวยวดยิ่งแบบอีดีแอลซีมีการเก็บประจุไฟฟ้าสองชั้น โดยชั้นในจะเรียกว่า อินเนอร์ เฮล์มโฮลทซ์ และชั้นนอก เรียกว่า เออเตออร์ เฮล์มโฮลทซ์ โดยชั้นของอินเนอร์ เฮล์มโฮลทซ์ จะประกอบด้วยประจุบวกของอิเล็กโทรไลต์ที่ถูกล้อมรอบด้วยตัวทำละลายลักษณะครึ่งวงกลมเกาะที่ผิวขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุวยวดยิ่งที่ถูกเหนี่ยวนำทำให้เกิดประจุลบด้วยการให้ศักย์ไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าภายนอก ในขณะที่ชั้นเออเตออร์ เฮล์มโฮลทซ์ ประกอบด้วยประจุบวกที่ถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของตัวทำละลายมีลักษณะเป็นวงกลม ถัดจากนั้นจะเป็นชั้นการแพร่ของสารละลาย



รูป 2.21 โครงสร้างภายในตัวเก็บประจุยวดยิ่งแบบเคมีไฟฟ้าสองชั้น [33]

2.3.2.1.2 ตัวเก็บประจุยวดยิ่งเทียม (Pseudocapacitors)

การเก็บประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุยวดยิ่งเทียมจะมีค่าการเก็บประจุสูงกว่าตัวเก็บประจุแบบเคมีไฟฟ้าสองชั้น เนื่องจากตัวเก็บประจุยวดยิ่งเทียมเก็บประจุไฟฟ้า เช่น Na^+ และ H^+ ที่พื้นผิวเหมือนกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีสองชั้น แล้วยังมีการเก็บประจุ (อิเล็กตรอน) ผ่านปฏิกิริยารีดอกซ์ของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า โดยกระบวนการนี้คล้ายกับปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่จึงทำให้มีค่าการเก็บประจุไฟฟ้าที่สูง



รูป 2.22 โครงสร้างภายในตัวเก็บประจุยิ่งยวดเทียม [33]

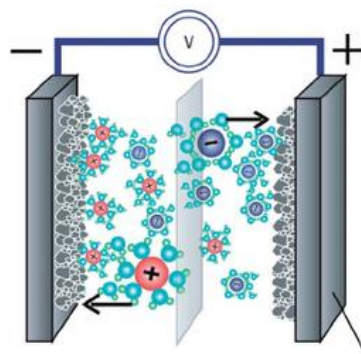
2.3.2.1.3 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดแบบผสม (Hybrid capacitor)

ตัวเก็บประจุชนิดนี้เกิดจากการรวมกันของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีสองชั้นกับตัวเก็บประจุเทียมโดยกลไกที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับทั้งการเก็บความจุไฟฟ้าในรูปของไอออนในช่องว่างรูพรุนและการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ของสารที่ใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าพร้อมกัน จะทำให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบไฮบริดนี้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นโดยเพิ่มค่าความหนาแน่นกำลังจากสมบัติของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีสองชั้น และค่าความหนาแน่นพลังงานจากสมบัติตัวเก็บประจุเทียม

2.3.2.2 หลักการทำงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง

2.3.2.2.1 ตัวเก็บประจุแบบเคมีไฟฟ้าสองชั้น

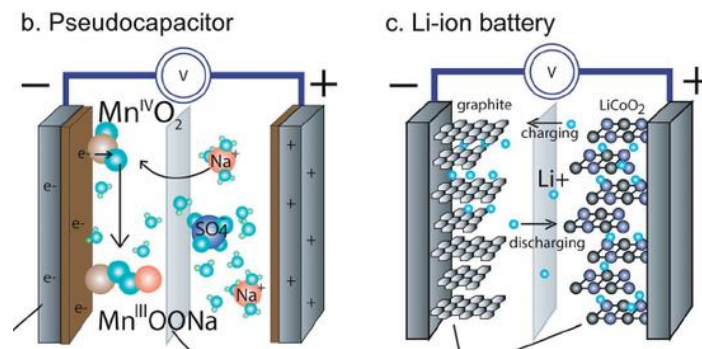
ตัวเก็บประจุไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบที่มีการเรียงตัวของประจุแบบสองชั้น (Electrochemical double-layer capacitors, EDLCs) ประกอบด้วยวัสดุที่มีรูพรุนทำหน้าที่เป็นตัวสะสมกระแสไฟฟ้าและสารอิเล็กโทรไลต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวนำประจุไฟฟ้าที่จะแทรกผ่านรูพรุนของวัสดุ เมื่อมีการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในตัวเก็บประจุไฟฟ้าประสิทธิภาพสูง แผ่นอิเล็กโทรดที่ต่ออยู่กับขั้วบวกจะดึงอิเล็กตรอนที่เป็นขั้วลบจากสารอิเล็กโทรไลต์ให้มาสะสมอยู่บนพื้นผิว ส่วนแผ่นที่ต่ออยู่กับขั้วลบจะดึงประจุบวกจากอิเล็กโทรไลต์มาที่พื้นผิวของอิเล็กโทรด เพื่อให้ประจุไฟฟ้าที่พื้นผิวของอิเล็กโทรดทั้งสองขั้วสมดุลดังรูป 2.23



รูป 2.23 แผนภาพแสดงการทำงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าประสิทธิภาพสูงแบบเคมีไฟฟ้าสองชั้น [34]

2.3.2.2.2 ตัวเก็บประจุยิ่งยวดเทียม

ตัวเก็บประจุเทียม (Pseudocapacitors) เก็บพลังงานไฟฟ้าได้โดยการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างอิเล็กโทรดและอิเล็กโทรไลต์ ผ่านกระบวนการการดูดซับเชิงไฟฟ้า (Electrosorption) ระหว่างปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (ปฏิกิริยารีดอกซ์) ตัวเก็บประจุเทียมเป็นส่วนหนึ่งของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด ประสิทธิภาพที่แตกต่างกันของตัวเก็บประจุชนิดนี้ขึ้นอยู่กับสารที่นำมาใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าส่วนใหญ่นิยมใช้โลหะออกไซด์หรือพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ค่าความสามารถในการเก็บประจุของตัวเก็บประจุเทียมนี้มีค่ามากกว่าประมาณ 100 เท่าของตัวเก็บประจุแบบสองชั้น เนื่องจากตัวเก็บประจุเทียมมีปฏิกิริยาทางเคมีที่ขั้วไฟฟ้าซึ่งแตกต่างจากตัวเก็บประจุแบบสองชั้นที่จัดเก็บประจุไฟฟ้าจะถูกเก็บไว้ในไฟฟ้าสถิตโดยไม่มีปฏิกิริยาระหว่างขั้วไฟฟ้าและไอออน ค่าความจุเทียมนี้เกิดจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างอิเล็กโทรไลต์และขั้วไฟฟ้า ไอออนที่ดูดซับไม่มีปฏิกิริยาเคมีกับอะตอมของขั้วไฟฟ้า (ไม่มีพันธะเคมีเกิดขึ้น) มีแค่การถ่ายเทประจุ ตัวอย่างคือปฏิกิริยารีดอกซ์ขณะทำการอัดประจุไอออนเป็น O^{2+} ขั้วไฟฟ้าด้านหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ในขณะที่อีกด้านหนึ่งจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันซึ่งจะเกิดการผันกลับของปฏิกิริยาเมื่อทำการคายประจุซึ่งแตกต่างจากแบตเตอรี่ในอิเล็กตรอนอิสระที่เกาะติดกับโครงสร้างอะตอมของขั้วไฟฟ้า การจัดเก็บพลังงานที่มีปฏิกิริยารีดอกซ์เกิดรวดเร็วทำให้การชาร์จและการถ่ายเทได้เร็วกว่าแบตเตอรี่ ปริมาณของประจุไฟฟ้าที่จัดเก็บอยู่ในรูปประจุเทียมเป็นสัดส่วนเชิงเส้นตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้

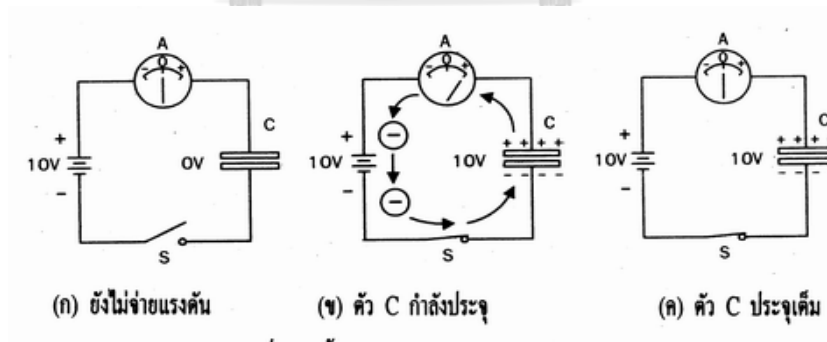


รูป 2.24 กลไกการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดเทียบกับแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน [34]

2.3.3 สภาวะการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

2.3.3.1 การประจุ (Charge)

การเก็บประจุ คือ การเก็บอิเล็กตรอนไว้ที่แผ่นเพลทของตัวเก็บประจุซึ่งอธิบายโดยละเอียดดังในรูป 2.25 เมื่อนำแบตเตอรี่อื่นต่อกับตัวเก็บประจุอิเล็กตรอนจากขั้วลบของแบตเตอรี่จะเข้าไปออกันที่แผ่นเพลททำให้เกิดประจุลบขึ้นและยังส่งสนามไฟฟ้าไปผลักอิเล็กตรอนของแผ่นเพลทตรงข้าม (เหมือนกับนำแผ่นแม่เหล็กที่มีขั้วเหมือนกันมาใกล้กันมันก็จะผลักกัน) ซึ่งโดยปกติในแผ่นเพลทจะมีประจุบวกและประจุลบปะปนกันอยู่ เมื่ออิเล็กตรอนจากแผ่นเพลทนี้ถูกผลักให้หลุดออกไปจึงเหลือประจุบวกมากกว่าประจุลบ ยิ่งอิเล็กตรอนถูกผลักออกไปมากเท่าไร แผ่นเพลทนั้นก็จะเป็นบวกมากขึ้นเท่านั้น (เมื่อเทียบกับอีกด้าน)

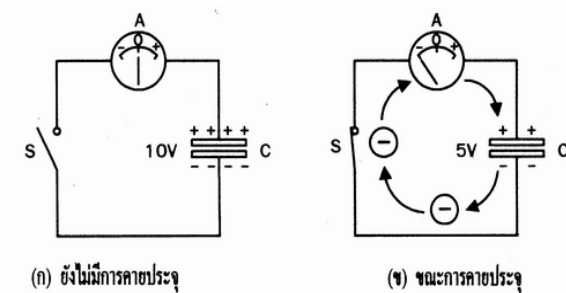


รูป 2.25 ขั้นตอนการประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ [35]

2.3.3.2 การคายประจุ

ตัวเก็บประจุที่ถูกประจุแล้ว ถ้าเรายังไม่นำขั้วตัวเก็บประจุมาต่อกัน (ดังในรูป 2.26) อิเล็กตรอนก็ยังคงอยู่ที่แผ่นเพลท แต่ถ้ามีการต่อครบวงจรระหว่างแผ่นเพลททั้งสองของตัวเก็บประจุ

อิเล็กตรอนก็จะวิ่งจากแผ่นเพลตทางด้านลบ ไปครบวงจรที่แผ่นเพลตบวกทันที เราเรียกเหตุการณ์นี้ว่า การคายประจุ



รูป 2.26 ขั้นตอนการคายประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ [35]

2.4 พลังงานจากแสงอาทิตย์

2.4.1 รังสีอาทิตย์บนพื้นโลก

รังสีจากดวงอาทิตย์เมื่อเดินทางมาถึงโลกได้ผ่านกระบวนการดูดกลืนและการแผ่รังสีแสงอาทิตย์ เมื่อผ่านชั้นบรรยากาศของโลกจะถูกโมเลกุลของแก๊สหรือฝุ่นละอองในอากาศทำให้เกิดการกระจาย (Scatter) และสะท้อน (Reflect) ก่อให้เกิดเปลี่ยนแปลงความรังสีโดยรวม ความเข้มรังสีองค์ประกอบและทิศทาง [36]

โดยทั่วไปรังสีบนพื้นโลกมี 3 ประเภท

1. รังสีตรง (Direct radiation) คือรังสีที่มาจากดวงอาทิตย์โดยตรงและตกลงบนผิวรับแสงที่แน่นอน ซึ่งทิศทางของรังสีอยู่ในแนวของแสงอาทิตย์ เนื่องจากเป็นรังสีตรงและมีทิศทางที่แน่นอนจึงสามารถรวมแสงได้
2. รังสีกระจาย (Diffused radiation) คือรังสีส่วนที่ถูกสะท้อนและกระจายโดยแก๊สและฝุ่นละอองซึ่งอยู่ระหว่างทางเดินของแสงทำให้เกิดการกระจายทุกทิศทาง จึงไม่สามารถรวมแสงได้
3. รังสีรวม (Global radiation) คือผลรวมของรังสีตรงและรังสีการกระจายซึ่งจำกัดเฉพาะคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นสั้น (น้อยกว่า 4 ไมโครเมตร) ไม่รวมพลังงานคลื่นยาวจากการแผ่รังสีของพื้นโลกและบรรยากาศ

2.4.2 ตำแหน่งดวงอาทิตย์และมวลอากาศ

บรรยากาศของโลกมีอิทธิพลต่อสเปกตรัมของแสงอาทิตย์เมื่อลำแสงผ่านบรรยากาศในทิศทางต่างกันเป็นผลทำให้สเปกตรัมแสงอาทิตย์ทั้งพลังงานรวมและความเข้มต่างกันโดยแสดงด้วยดัชนีมวลอากาศ (Air mass; AM)

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (\text{สมการ 2.6})$$

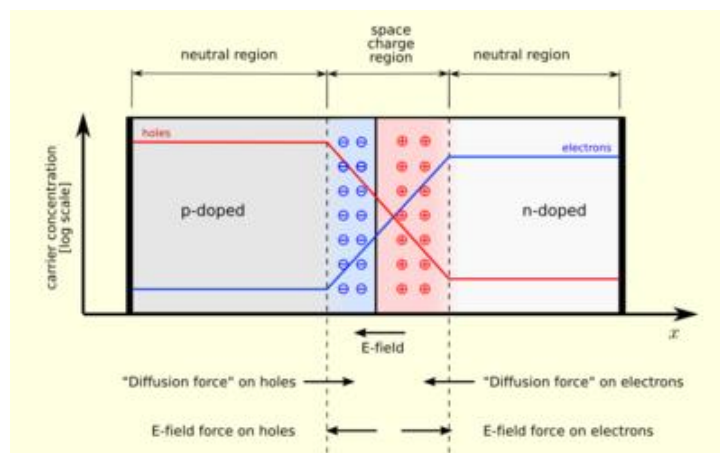
2.4.3 เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) [37]

2.4.3.1 ลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าทำจากสารกึ่งตัวนำ มีหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยอาศัยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) ซึ่งเกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำมีค่าแตกต่างกัน เมื่อได้รับแสงปริมาณมากพอจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระ โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วยรอยต่อระหว่างวัสดุสารกึ่งตัวนำสองชนิด คือ สารกึ่งตัวนำชนิดพีเป็นขั้วบวก และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นเป็นขั้วลบ

2.4.3.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ทั่วไป

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนพื้นฐาน ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดพีผลิตขึ้นจากผลึกของซิลิคอนใช้สารเจือปน คือ โบรอน เพื่อทำให้เป็นวัสดุขาดอิเล็กตรอนอิสระ ทำให้เกิดช่องว่าง คือ โฮล (Hole) เป็นประจุบวก ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นใช้สารเจือปน คือ ฟอสฟอรัส ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระส่วนเกิน โดยมีจุดเชื่อมต่อ คือ รอยต่อพี-เอ็น (P-N junction) ในการเชื่อมต่อสารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติที่ต่างกันจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุลบ



รูป 2.27 รอยต่อพี-เอ็นในเซลล์แสงอาทิตย์ซิลิคอน [38]

2.4.3.3 ประเภทของเซลล์แสงอาทิตย์

ปัจจุบันเทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อลดต้นทุนด้านวัสดุของเซลล์และพัฒนาประสิทธิภาพให้สูงขึ้นโดยสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มตามเทคโนโลยีการผลิต [37]

1. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดผลึก (Crystalline Solar cells) มีความแตกต่างกันตามชนิดของสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอน (Si) และ แกลเลียม อาร์เซไนด์ (GaAs) เป็นต้น โดยเซลล์แสงอาทิตย์ผลึกซิลิคอนมีวิธีการผลิตหลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์การใช้งาน ได้แก่ แบบผลึกเดี่ยว (Monocrystalline silicon cells) แบบแผ่นฟิล์มบาง (Silicon ribbon cells) แบบหลายผลึก (Polycrystalline silicon cells) แบบแผ่นบางหลายผลึก (Polycrystalline thin film silicon cells) เป็นต้น ซึ่งเซลล์แสงอาทิตย์กลุ่มนี้ได้รับการยอมรับในเชิงพาณิชย์ มีประสิทธิภาพ 10-15 เปอเซ็นต์ แต่มีต้นทุนของวัสดุค่อนข้างสูง
2. เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง (Thin film solar cells) ประกอบด้วยเซลล์ที่ผลิตจากซิลิคอนอสัณฐาน เซลล์ที่ผลิตจากแคดเมียมเทลลูไรด์ (CdTe) และเซลล์ที่ผลิตจากคอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมเซลไนด์ (CIGS) มีการใช้งานในเชิงพาณิชย์โดยมีประสิทธิภาพ 6-10 เปอเซ็นต์ ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพจะน้อยกว่าเซลล์ชนิดผลึก แต่ราคาถูกกว่า ซึ่งการใช้งานในสภาวะจริง อายุการใช้งานในระยะยาวยังอยู่ในการศึกษาวิจัย
 - เซลล์พัฒนา (Develop solar cells) เซลล์แสงอาทิตย์ที่พัฒนาจากชนิดผลึกและชนิดฟิล์มบางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ลดการก่อกมลพิษ และเพิ่มอายุการใช้งาน ได้แก่ เซลล์แสงอาทิตย์ทรงกลม (Spherical Micro Solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง (Dye-sensitized solar cell) ควอนตัมดอท (Quantum dot solar cell) และ เซลล์เพอรอฟสไกต์ (Perovskite solar cell)
 - เซลล์แสงอาทิตย์ทรงกลมจะสามารถรับแสงได้สามมิติจึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรับแสง และมีน้ำหนักที่เบากว่าแบบแผ่นราบเมื่อประกอบเป็นแผงเซลล์แสงอาทิตย์จึงลดต้นทุนได้ มีการใช้งานเชิงพาณิชย์แต่ยังไม่แพร่หลาย
 - เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง มีจุดเด่นในความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยการออกแบบเซลล์ใช้แนวคิดเกี่ยวกับการสังเคราะห์แสงของพืช กล่าวคือ การเคลือบผิววัสดุกึ่งตัวนำด้วยไททานเนียมออกไซด์ มีการใช้ในเชิงพาณิชย์เล็กน้อย
 - เซลล์แสงอาทิตย์ควอนตัมดอท ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนผลทางเทอร์โมไดนามิกส์ของโฟตอนให้มีความมากที่สุดโดยเป็นการพัฒนาจากขีดจำกัดของเซลล์ชนิดผลึก ยังไม่มีการใช้งานเชิงพาณิชย์

- เซลล์แสงอาทิตย์เพอรอฟสไกต์ เป็นเซลล์แสงอาทิตย์มีจุดเด่นเนื่องจากเป็นเซลล์ที่มีองค์ประกอบเป็นของแข็งทั้งหมด ใช้วัสดุราคาถูก กระบวนการขึ้นรูปง่าย และมีแนวโน้มของประสิทธิภาพเซลล์สูง

2.4.3.4 ลักษณะกระแสและแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

โดยทั่วไปสมบัติทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ เริ่มต้นที่วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ดังแสดงในรูป 2.27 เป็นการต่อขนานระหว่างแหล่งกำเนิดแสง ไดโอด (รอยต่อพี-เอ็น) และความต้านทานชั้นที่และต่ออนุกรมกับความต้านทานอนุกรมตามลำดับ เขียนเป็นดังสมการ 2.7 นั่นคือผลลัพธ์ของกระแสที่ได้จากเซลล์แสงอาทิตย์เกิดมาจากแหล่งพลังงานแสงที่ไหลผ่านไดโอดและผ่านความต้านทานชั้นที่ ขณะกระแสไฟฟ้าไหลผ่านทำให้เกิดค่าแรงดันไฟฟ้าในแต่ละจุดขึ้นสมการ 2.6 แสดงแรงดันไฟฟ้า ณ จุดใดๆ เท่ากับไฟฟ้าที่ขาออกบวกด้วยผลคูณระหว่างกระแสไฟฟ้ากับความต้านทานอนุกรม

$$I = I_L - I_D - I_{SH} \quad (\text{สมการ 2.7})$$

$$V_j = V + IR_s \quad (\text{สมการ 2.8})$$

โดยที่	I	แทนกระแสไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นแอมแปร์
	I_L	แทนกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากแหล่งพลังงานแสง มีหน่วยเป็นแอมแปร์
	I_D	แทนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด มีหน่วยเป็นแอมแปร์
	I_{SH}	แทนกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านความต้านทานชั้นที่มีหน่วยเป็นแอมแปร์
	I	แทนกระแสไฟฟ้าขาออก มีหน่วยเป็นแอมแปร์
	R_s	แทนความต้านทานอนุกรม มีหน่วยเป็นโอห์ม

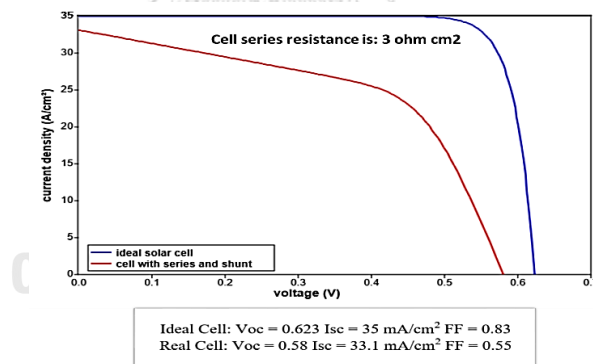
พารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย กระแสลัดวงจร (I_{sc}) แรงดันวงจรเปิด (V_{oc}) และค่าฟิลแฟกเตอร์ (FF) รูป 2.30 แสดงกระแสลัดวงจรและแรงดันวงจรเปิดคือกระแสไฟฟ้าขณะที่แรงดันเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าเป็นศูนย์ เป็นค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุด และแรงดันไฟฟ้าขณะไม่มีกระแสเป็นค่าแรงดันไฟฟ้าสูงสุด ส่วนฟิลแฟกเตอร์เป็นสัดส่วนระหว่างผลคูณแรงดันกับกระแสที่จุดทำงานสูงสุดและผลคูณของกระแสลัดวงจรกับแรงดันวงจรเปิดซึ่งมีค่าน้อยกว่าหนึ่ง นอกจากนี้มีพารามิเตอร์เกี่ยวกับความต้านทานในเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นประโยชน์ต่อการติดตามพฤติกรรมของเซลล์แสงอาทิตย์และการพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ โดยคิดจากสัดส่วนระหว่างค่า

แรงดันที่จุดสูงสุดต่อกระแสทำงานสูงสุดหรืออาจใช้สัดส่วนระหว่างค่าแรงดันวงจรเปิดต่อกระแสลัดวงจร

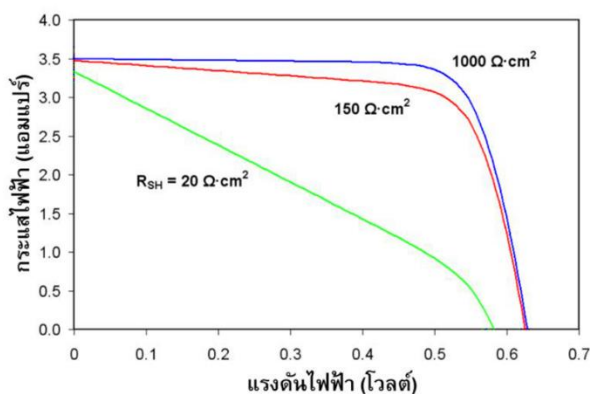
2.4.3.5 ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นกับทั้งปัจจัยภายนอกและสมบัติของเซลล์ ได้แก่ อุณหภูมิ ความเข้มแสงอาทิตย์ ความต้านทานชั้นันท์ และความต้านทานอนุกรม เป็นต้น โดยที่ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นั่นคือ สภาวะที่อุณหภูมิสูงระยะห่างระหว่างชั้นของแถบพลังงานจะลดลงเป็นผลให้แรงดันขาออกของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยลงแต่ไม่ทำให้กระแสลัดวงจรเปลี่ยนมากนัก ทั้งนี้กระแสลัดวงจรหรือกระแสสูงสุดจะลดลงเมื่อความเข้มแสงมีค่าน้อย เช่น ในวันที่ท้องฟ้ามีดครึ้ม มีเมฆบัง หรือเงาจากต้นไม้ เป็นต้น

ความต้านทานอนุกรมเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันขาออกมีค่าลดลงแต่ไม่มีผลต่อแรงดันวงจรเปิดหรือกล่าวได้ว่า ความต้านทานอนุกรมทำให้ค่าฟิลต์แฟกเตอร์ลดลง หากค่านี้มีมากๆจะทำให้กระแสลัดวงจรลดลงและกราฟกระแส-แรงดัน (IV-curve) เป็นเส้นตรงดังแสดงในรูป 2.28 ค่าความต้านทานชั้นันท์ลดลงมากจะเป็นผลทำให้แรงดันวงจรเปิดและกระแสลัดวงจรมีค่าลดลงดังรูป 2.29 และค่าฟิลต์แฟกเตอร์ลดลงเช่นเดียวกับกรณีของความต้านทานอนุกรม



รูป 2.28 ผลของความต้านทานอนุกรมต่อกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ [36]



รูป 2.29 ผลของความต้านทานชั้นต่อกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ [36]

2.4.3.6 ข้อจำกัดของไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์

1. ความเข้มของพลังงานขาเข้าต่ำ

แม้ว่าพลังงานของดวงอาทิตย์ไม่มีวันหมด แต่ความเข้มของพลังงานนั้นไม่สูง ทำให้กรณีที่ต้องการพลังงาน มากจำเป็นต้องใช้จำนวนเซลล์แสงอาทิตย์มาก และพื้นที่มากตามไปด้วย

2. ปริมาณไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตามสภาพอากาศ

เนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ (ความเข้มแสงอาทิตย์) ดังนั้นปริมาณไฟฟ้าจึงแปรผันตามไปด้วย

3. เก็บไฟฟ้าไว้ไม่ได้

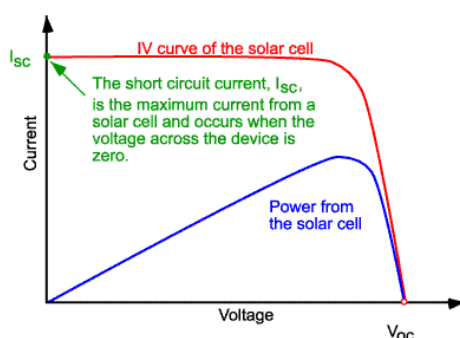
ไฟฟ้าจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีแสง และตัวมันเองไม่สามารถเก็บไฟได้ ดังนั้น การออกแบบระบบ หากจำเป็น จะต้องมีการผสมกับไฟฟ้าปกติหรือแบตเตอรี่เพื่อใช้ในเวลาที่ระบบเซลล์แสงอาทิตย์ไม่จ่ายกระแสไฟฟ้า

2.4.3.7 กระแสและแรงดันไฟฟ้า

เซลล์แสงอาทิตย์ผลิตไฟฟ้าเป็นกระแสตรง โดยที่แรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ผลิตขึ้นกับความเข้มของแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิของเซลล์แสงอาทิตย์ รูป 2.30 แสดงกราฟกระแสกับแรงดันไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อเทียบกับโหลดที่แปรค่าได้ตั้งแต่สภาวะวงจรถัด (Short circuit) ถึงสภาวะวงจรเปิด (Open circuit) โดยค่าที่ตัดแกนตั้งที่แรงดันเท่ากับศูนย์ จะได้กระแสที่สภาวะวงจรถัด (Short circuit current : I_{sc}) ส่วนค่าที่ตัดกับแกนนอนที่กระแสเท่ากับศูนย์จะได้ค่าแรงดันขณะวงจรถัดเปิด (Open circuit voltage : V_{oc}) เมื่อนำค่ากระแสคูณกับแรงดันจะได้กำลังไฟฟ้าสูงสุดของเซลล์แสงอาทิตย์ (Power at maximum point : P_{MP}) ส่วนกระแสกับแรงดันที่จุดนี้เรียกว่า กระแสที่จุด

กำลังไฟฟ้าสูงสุด (Current at maximum point : I_{MP}) กับแรงดันที่จุดไฟฟ้าสูงสุด (Voltage at maximum power point : V_{MP})

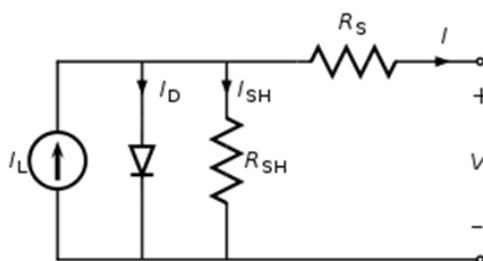
การระบุค่าสมรรถนะทางไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ได้จากการทดสอบ (I-V curve) โดยต่อโหลดทางไฟฟ้าที่สามารถแปรค่าได้ตั้งแต่สภาวะวงจรเปิดไปจนถึงสภาวะวงจรลัด โดยควบคุมสภาพแวดล้อมที่สภาวะมาตรฐาน (Standard test condition, STC) คือความเข้มแสงอาทิตย์ 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร สเปกตรัมของแสงที่ Air mass (AM) 1.5



รูป 2.30 กราฟเอกลักษณ์กระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ [36]

2.4.3.8 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์

วงจรสมมูล (Equivalent circuit) ดังรูปประกอบด้วย แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อขนานกับ ไดโอด และ R_{sh} แล้วจึงต่ออนุกรมกับ R_s โดยกำหนดให้แหล่งจ่ายกระแสเป็นแบบกระแสคงที่ซึ่งแปรผันตามความเข้มแสง ความต้านทานอนุกรมกับ (R_s) เป็นค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากจุดเชื่อมต่อ (Wiring contact) ระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับเซลล์ ส่วนความต้านทานชั้นที่ (R_{sh}) เกิดขึ้นเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าไบแอสย้อนกลับให้กับไดโอด



รูป 2.31 วงจรสมมูลของเซลล์แสงอาทิตย์ [39]

ในทางอุดมคติจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลย้อนกลับตรงข้ามกับความเนจจริงที่จะมีกระแสไหลย้อนกลับในระดับต่ำนั้นแสดงว่ามีเส้นทางที่กระแสสามารถไหลผ่านได้จึงแทนด้วยความต้านทานชั้นที่ซึ่งจะมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับความต้านทานอนุกรม สมการ.2.9 เป็นสมการที่มีพื้นฐานมาจากทฤษฎีโพลิตสเตรฟิสิกส์ (Solid-state physic theory)

$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{e(V - IR_s)}{kT} \right] - 1 \right\} - \frac{IR_{series}}{R_{SH}} \quad (\text{สมการ 2.9})$$

2.4.3.9 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [39]

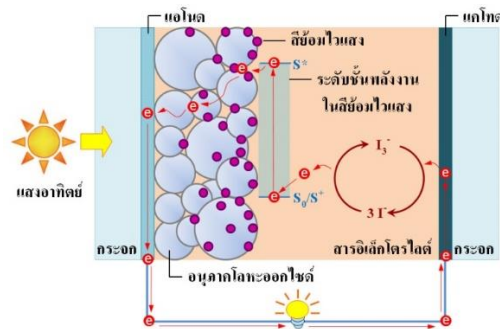
2.4.3.9.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

1. สีย้อมไวแสง ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์และส่งผ่านอิเล็กตรอนให้กับอนุภาคโลหะออกไซด์
2. อนุภาคโลหะออกไซด์ ทำหน้าที่รับและส่งผ่านอิเล็กตรอน และเป็นพื้นผิวในการยึดเกาะของอนุภาคสีย้อมไวแสง
3. สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำหน้าที่ชดเชยอิเล็กตรอนให้กับโมเลกุลสีย้อมไวแสง
4. ขั้วไฟฟ้าโปร่งแสง ประกอบด้วยขั้วแอโนดทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอนไปสู่วงจรภายนอก ขั้วไฟฟ้าวร่วมทำหน้าที่ให้อิเล็กตรอนกลับคืนสู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์

2.4.3.9.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงมีกลไกการทำงานดังนี้

1. แสงตกกระทบโมเลกุลสีย้อมไวแสงภายในเซลล์แสงอาทิตย์ สีย้อมเกิดการดูดกลืนแสงทำให้อิเล็กตรอนในสถานะพื้น (S_0) กระตุ้นขึ้นไปอยู่สถานะเร้า (S^*)
2. อิเล็กตรอนในสถานะเร้า (S^*) ถูกส่งผ่านไปสู่แถบนำไฟฟ้า (Conduction band) ของสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์
3. อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านจากสารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ไปยังขั้วไฟโตแอโนดบนกระจกนำไฟฟ้าออกสู่วงจรภายนอก
4. ณ ขั้วไฟฟ้าวร่วมสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยให้อิเล็กตรอนกับสีย้อมไวแสงที่สูญเสียอิเล็กตรอน (S^+) ทำให้โมเลกุลสีย้อมกลับสู่สถานะพื้น (S_0) และสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะรับอิเล็กตรอนคืนจากขั้วไฟฟ้าวร่วม



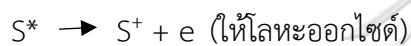
รูป 2.32 กลไกการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง [39]

โดยมีปฏิกิริยา ดังนี้

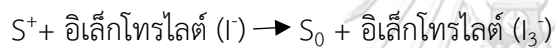
ขั้นโฟโตแอโนด



: การดูดกลืนแสง



: การส่งผ่านอิเล็กตรอน



: การสร้างใหม่ของสีย้อม

ขั้นไฟฟ้าร่วม



2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lv และคณะ [40] ได้ศึกษาการเตรียมกราฟีนออกไซด์ความพรุนระดับนาโน (NHGO) ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method) ร่วมกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) สำหรับตัวเก็บประจุวดยิ่ง พบว่ากราฟีนออกไซด์ที่เตรียมได้มีขนาดของรูพรุน 1-2 นาโนเมตรและมีการกระจายตัวของรูพรุนอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กัดเซาะพื้นผิวของกราฟีนออกไซด์ทำให้มีรูพรุนเกิดขึ้น ผลวิเคราะห์พื้นที่ผิวด้วยเทคนิคไอโซเทอรั่มของการดูดซับพบว่า NHGO มีพื้นที่ผิว 425 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม มากกว่ากราฟีนออกไซด์ที่มีพื้นที่ผิว 174 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ผลวิเคราะห์ไซคลิกโวลตาเมตรีพบว่า NHGO มีความจุมากกว่า GO เนื่องจากพื้นที่ผิวที่มากขึ้นทำให้อิเล็กโทรไลต์เข้าไปเติมในระหว่างรูพรุนได้เกิดการแลกเปลี่ยนไอออนบริเวณผิวสัมผัสได้ดี

Caihui และคณะ [41] ได้ศึกษาการเตรียมนาโนคอมโพสิตของนิกเกิล-อะลูมิเนียมระดับเบิลเลเยอร์ไฮดรอกไซด์ (NiAl-LDH) กับท่อคาร์บอนนาโน (CNTs) ด้วยวิธีการตกตะกอนเป็นเนื้อเดียวกันอย่างง่าย (Homogeneous precipitation) เปรียบเทียบระหว่างระบบ NiAl-LDH กับ CNTs/NiAl-LDH พบว่านาโนคอมโพสิต CNTs/NiAl-LDH มีค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ 649 ฟารัดต่อกรัมที่กระแส

1 แอมแปร์ต่อกรัมและรักษาเสถียรภาพของความจุอยู่ที่ 92 เปอร์เซ็นต์หลังจาก 3000 รอบของการประจุซึ่งมากกว่าระบบที่มี NiAl-LDH อย่างเดียวเนื่องจากวิธีตกตะกอนเป็นเนื้อเดียวกันทำให้ต่อคาร์บอนนาโนแทรกอยู่ในระหว่างชั้นของไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ความจุไฟฟ้าจำเพาะมีค่าเพิ่มขึ้น

Yayun และคณะ [42] ได้ศึกษาวัสดุคอมพอสิตของกราฟีนออกไซด์ (GO) กับโคบอลต์-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (CoAl-LDH) เตรียมด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล (Hydrothermal method) ซึ่งกราฟีนออกไซด์กับโคบอลต์-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จะยึดติดกันด้วยแรงไฟฟ้าสถิต ผลการทดลองพบว่าปริมาณการเติมกราฟีนออกไซด์ส่งผลต่อปริมาณความจุไฟฟ้าโดยการผสมกราฟีนออกไซด์ 12 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักมีค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ 825 ฟารัดต่อกรัมที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมแปร์ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวทางไฟฟ้าสถิตระหว่างวัสดุทั้งสองชนิดสามารถป้องกันการรวมตัวกันเองระหว่างได้จึงทำให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้นแต่เมื่อผสมกราฟีนออกไซด์ปริมาณ 14 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักพบว่าความจุไฟฟ้าจำเพาะมีค่าลดลง ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณกราฟีนออกไซด์ที่มากเกินไปทำให้เกิดการรวมตัวกันเอง ทำให้พื้นผิวสัมผัสของอิเล็กโทรไลต์กับวัสดุคอมพอสิตลดลง การถ่ายโอนอิเล็กตรอนและการแลกเปลี่ยนไอออนบริเวณผิวสัมผัสเกิดขึ้นได้ไม่ดี ส่งผลให้ความจุไฟฟ้าจำเพาะของวัสดุลดลง

Xiaobao และคณะ [43] ได้ศึกษาผลของการนำ Polypyrrole-based supercapacitor ต่ออนุกรมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดเพอรอฟไกต์ ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ -based solar cell) พบว่าความต่างศักย์ขาออกของอุปกรณ์สูงถึง 1.45 โวลต์เมื่อตั้งรับแสงมาตรฐานความเข้ม 1000 วัตต์ต่อตารางเมตร ทั้งนี้เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่ต่อกับตัวเก็บประจุควดยังสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้อย่างต่อเนื่องลดผลกระทบจากความเข้มของแสงอาทิตย์ในช่วงระหว่างวัน

Jiantao Zai. [44] ทำการศึกษาโครงสร้าง 3 มิติของโคบอลต์-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ระดับแผ่นนาโนบางโดยสังเคราะห์ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำผสมกับบิวทิลแอลกอฮอล์ซึ่งโครงสร้างลำดับชั้นจะเป็นเอกลักษณ์จากการเติมบิวทิลแอลกอฮอล์สามารถปรับปรุงสมบัติทางเคมีไฟฟ้า การถ่ายโอนมวลและประจุ โดยค่าความจุจำเพาะของโคบอลต์-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีค่า 838 ฟารัดต่อกรัม ที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมแปร์ต่อกรัม

Yasodine W. [45] และคณะ ทำการศึกษาการแยกออกเป็นชั้นของนิเกิล-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์กับกราฟีนเป็นโครงสร้างระดับชั้นสำหรับใช้เป็นวัสดุในขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุควดยิ่ง ด้วยวิธีการแบบใหม่โดยผสมวัสดุสองระนาบทั้งสองชนิดที่มีประจุต่างกันโดยทำการสังเคราะห์นิเกิล-อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลโดยการใช้ยูเรีย ซึ่ง

สามารถควบคุมโครงสร้างระดับนาโนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพทางไฟฟ้าเคมีในด้านของตัวเก็บประจุยวดยิ่ง ทั้งกราฟีนและนิกเกิล-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สามารถกั้นการรวมตัวระหว่างสารชนิดเดียวกันเองได้ ทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมาก และการมีอยู่ของอะตอมนิกเกิลในคอมพอสิตสามารถเพิ่มอิเล็กตรอนในระหว่างปฏิกิริยารีดอกซ์ นอกจากนี้การใช้น้ำเป็นตัวกลางในการกระจายตัวของสารยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและสามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์ทางด้านอื่นได้อีก จากนั้นทำการแยกออกเป็นชั้นๆโดยใช้วิธีอัลตราโซนิกและทำการผสมรวมกับกราฟีนที่สังเคราะห์ได้จากวิธีของฮัมเมอร์ กราฟีนออกไซด์และชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ในตัวกลางเกิดการโตของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์บนแผ่นกราฟีนระดับนาโน กราฟีนสามารถเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าของนิกเกิล-อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สามารถขัดขวางการรวมตัวกันของแผ่นกราฟีน โครงสร้างไฮบริดผสมนี้ทำให้เกิดสมบัติทางเคมีไฟฟ้าที่ดีเนื่องจากมีคุณสมบัติจากผลของตัวความจุเทียมจากเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และความจุแบบเลเยอร์สองชั้นของกราฟีน กราฟีน/นิกเกิล-อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ให้ค่าความจุสูงสุดที่ 915 ฟารัดต่อกรัม ที่ความหนาแน่นกระแส 2 แอมแปร์ต่อกรัม

Guoping Wang [46] และคณะทำการศึกษาคอมพอสิตนิกเกิล/โคบอลต์ดับเบิลไฮดรอกไซด์กับกราฟีน(Ni/Co-DH-RGO) โดยใช้วิธีไฮโดรเทอร์มอลแบบ 1 ชั้นโดยใช้สาร เฮกซะเมททิลีนเตตระเอมีน (HMT) เป็นสารตกตะกอนและไฮโดรไลซิสสำหรับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ พบว่าความจุจำเพาะของคอมพอสิตที่ 2120 ฟารัดต่อกรัม ที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมแปร์ต่อกรัม

Chih-Yu Hsu [47] และคณะทำการศึกษารวมกันของเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงกับตัวเก็บประจุยวดยิ่ง (Photo-supercapacitor, or PSC) โดยใช้สีย้อม N3 ดูดซับลงบนไททานเนียมไดออกไซด์เป็นขั้วโพโตแอโนดและใช้ PProDOT-Et₂ เป็นฟิล์มพอลิเมอร์สำหรับตัวเก็บประจุยวดยิ่ง อุปกรณ์ PSC สามารถสะสมประจุที่ได้จากพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า โดย PProDOT-Et₂ ฟิล์มความหนา 0.5 มิลลิเมตร มีค่าความจุจำเพาะ 6.5 ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร ตัวเก็บประจุยวดยิ่งแบบสมมาตร (p/p) ถูกนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์ก่อนทำการประกอบเป็นเซลล์ PSC เครื่องประดิษฐ์ PSC นำไปทดสอบภายใต้สภาวะความเข้มแสง 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร มีค่าการชาร์จด้วยแสง 0.75 V และคายความหนาแน่นพลังงาน 21.3 ไมโครวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร

Magdalena S. Nuckowska และคณะ [48] ได้ทำการศึกษาโฟโตคาร์ปาซิเตอร์ที่ประกอบด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง และรูทีเนียมออกไซด์เป็นตัวเก็บประจุแบบเคมีไฟฟ้า การรวมกันของ 2 ระบบสามารถเก็บพลังงานได้โดยตรงจากการผลิตจากแสงอาทิตย์ภายในอุปกรณ์ชิ้นเดียว โดยภายในอุปกรณ์ประกอบด้วย 3 ระบายประกอบไปด้วยพอลิเมอร์ไฮลด์นำไฟฟ้า (poly-(3-hexylthiophene-2,5-diyl) ระหว่างนั้นมีไททานเนียมออกไซด์เป็นโพโตแอโนดปรับปรุงด้วย D35

และขั้วที่อยู่ตรงกลางเป็นขั้วโลหะเงินที่ประกอบด้วยรูที่นิยมออกไซด์แยกด้วยเยื่อเลือกผ่าน Nafion™ ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ภายใต้สภาวะแสงความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร ได้ค่าความจุจำเพาะ 407 ฟารัดต่อกรัม (3.26 ฟารัดต่อตารางเซนติเมตร) ความหนาแน่นพลังงานและความหนาแน่นกำลังงาน 0.17 มิลลิวัตต์ชั่วโมงต่อตารางเซนติเมตร และ 0.34 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร และประสิทธิภาพคูลอมบ์ร้อยละ 88



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- นิกเกิล (II) ไนเตรต (Nickel (II) nitrate), Ajax Finechem, Australia
- โคบอลต์ (II) ไนเตรต (Cobalt (II) nitrate), Ajax Finechem, Australia
- อะลูมิเนียม (III) ไนเตรต (Aluminum (III) nitrate), Ajax Finechem, Australia
- พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Poly(tetrafluoroethylene)), Aldrich chemistry, Japan
- ผงแกรไฟต์ (Graphite powder), Aldrich chemistry, Switzerland
- ผงคาร์บอนแบล็ค ขนาดอนุภาค 40 นาโนเมตร (Carbon black), Ptt global chemical, Thailand
- โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต Potassium Permanganate, Ajax Finechem, Australia
- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide) AR grade, Qrec.
- ยูเรีย (Urea) reagent grade 99%, Vetec, China
- กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid), RCl labscan, Thailand
- ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide), Chem-Supply Pty Ltd, Australia
- กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid), RCl labscan, Thailand
- น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)
- เอทานอล (Ethanol Absolute), A.R. Grade, Qrec.
- โฟม นิกเกิล (Nickel foam), China
- ที-บิวทิลแอลกอฮอล์ (Tert-Butyl Alcohol), Panreac.
- ไอโซโพรพานอล (2-Propanol), A.R. Grade, Qrec.
- เอทานอล (Ethanol), commercial 96%, Alcoh-A.
- อะซิโตนไนไตรล์ (Acetonitrile), A.R. Grade, Lab-scan, Thailand.
- อะซิโตน (Acetone), Commercial Grade, Lab-scan, Thailand.

- สีย้อมไวแสง [N719 Di-tetrabutylammonium cis-bis(isothiocyanato)bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylato)ruthenium(II)], Dyesol.
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์ [EL-HPE High Performance Electrolyte ($1\text{M}/1^3$)], Dyesol
- ไทเทเนียมไดออกไซด์เพสต์ [90-T Transparent Titania Paste (TiO_2)], Dyesol
- เอทิลเซลลูโลส (Ethyl Cellulose), Sigma Aldrich
- แอลฟา-เทอร์พินอล (α -Terpinol), Sigma Aldrich
- สีพ่นเงิน (Silver paste)

3.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

- กระจกนำไฟฟ้าเคลือบสาร Fluorene-doped tin oxide (FTO)
- โฟมนิเกิล (Nickel foam), China
- แผ่นเทอร์โมพลาสติก (Surlyn), 60 μm thickness., Dyesol
- กระจกปิดสไลด์ (Rectangular Cover Slips), Size 9x9 mm #1, Bellco Brand.

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- ชุดกรองสุญญากาศ
- ชุดเครื่องแก้วในห้องปฏิบัติการ
- เต้าเผา ELF11/6, Carbolite, UK
- ตู้อบความร้อน ED53, Binder, Germany
- PI Tape
- เครื่องปั๊มสุญญากาศ P.V.R., Italy
- เครื่องเป่าลมร้อน (Heat gun) GHG630DCE, Bosch, Germany
- เตาให้ความร้อน (Hot plate) OkWell, ประเทศไทย
- หม้ออบความดัน (Teflon autoclave vessel)
- อ่างอัลตราโซนิก 1860QTD, VGT, China

- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง AB204-S, Mettler Toledo, USA
- เครื่องอัลตราโซนิกไฮโมจีเนสเซอร์
- อุปกรณ์ตัดกระดาษ
- อุปกรณ์พิมพ์สกรีน บริษัท ชัยบูรณ์, ประเทศไทย
- ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter)
- เครื่องระเหยสารแบบลดความดัน (Rotary Evaporator R-124), Büchi, Switzerland
- เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

3.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.4.1 การสังเคราะห์รีติวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยเทคนิคของฮัมเมอร์ (Hummer's method)

นำผงกราฟไฟต์ 5 กรัม เทใส่ขวดรูปชมพู่ที่มีสารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้นร้อยละ 96 (H_2SO_4) 115 มิลลิลิตร กวนของผสมอย่างรุนแรงเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ในภาชนะอ่างน้ำแข็ง จากนั้นเติมโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ($KMnO_4$) 30 กรัม อย่างช้าๆ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง กวนของผสมและควบคุมอุณหภูมิภายในภาชนะไม่ให้เกิน 5 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไป 1 ชั่วโมงโดยกวนของผสมตลอดเวลาและควบคุมอุณหภูมิภายในตลอดเวลา จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของของผสมเป็น 40 องศาเซลเซียส ปล่อยให้ปฏิกิริยาดำเนินไปเป็นเวลา 1 ชั่วโมงจนสารละลายเป็นสีน้ำตาลอ่อน จากนั้นค่อยๆ หยดน้ำปราศจากไอออนลงในของผสม อุณหภูมิในภาชนะจะเพิ่มสูงเป็น 98 °C โดยควบคุมอุณหภูมิให้คงที่เป็นเวลา 1 ชั่วโมง (การควบคุมอุณหภูมิขั้นตอนนี้ทำได้โดยหยดน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) ลงในภาชนะต่อเนื่อง) หลังจากนั้นทำการเติมน้ำปราศจากไอออน จนทำให้ของผสมภายในภาชนะมีปริมาตรเป็น 400 มิลลิลิตรจนอุณหภูมิของผสมลดลงเป็น 60 องศาเซลเซียส แล้วค่อยเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ปริมาณ 15 มิลลิลิตร หรือในปริมาณที่ไม่ทำให้เกิดฟองก๊าซขึ้นในของผสม (เพื่อหยุดการเกิดปฏิกิริยา) ทำการกรองสุญญากาศเพื่อแยกตะกอนออกจากของเหลว ล้างตะกอนที่ได้ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตรตามด้วยการล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน ล้างซ้ำอย่างน้อย 3 รอบ แล้วจึงนำผงกราฟีนออกไซด์ไปปั่นเหวี่ยงที่ 7500 รอบต่อนาที เพื่อทำความสะอาดอีกครั้งแล้วจึงนำตะกอนที่ได้ไปอบจนแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง นำไปบดไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส จะได้ กราฟีนออกไซด์ จากนั้นนำกราฟีนออกไซด์ละลายในน้ำปราศจากไอออน จากนั้นเติม

สารละลายไฮดรารซีน (3 ไมโครลิตร/มิลลิลิตร) นำสารละลายไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จะได้ตะกอนสีดำของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ นำไปล้างและอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 12 ชั่วโมง

3.4.2 การสังเคราะห์รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอล

นำผงรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ละลายในน้ำปราศจากไอออน 300 มิลลิลิตร (0.5 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) โดยใช้อ่างอัลตราโซนิก จากนั้นเติมอะลูมิเนียมไนเตรต, นิกเกิลไนเตรต และโคบอลต์ไนเตรต ตามอัตราส่วนโดยโมลโลหะประจุ 2+ ของนิกเกิล : โคบอลต์ เป็น 5:1, 3:1, 1:1, 1:3 และ 1:5 ตามลำดับ หลังจากนั้นเติมยูเรีย 6 กรัม กวนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน เทสารละลายผสมลงในหม้ออบความดัน (Teflon autoclave vessel) นำเข้าตู้อบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำสารผสมที่ได้ไปกรองสูญญากาศล้างด้วยน้ำและเอทานอล จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืน



รูป 3.1 ภาชนะหม้ออบความดัน (Teflon autoclave vessel)

3.4.3 การเตรียมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตเพสต์

นำผงรีดิวซ์กราฟีน/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิต, ผงคาร์บอนแบล็ก และ พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน ในอัตราส่วนร้อยละ 80:15:5 โดยน้ำหนัก เติมน้ำหนัก เติมน้ำหนักในเอทานอลผสมด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กและอัลตราโซนิกไฮโมจีไนส์เซอร์สลับกัน โดยให้ความร้อน 40-50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จนสารผสมเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำคอมพอสิตเพสต์ที่ได้ไปปาดลงนิกเกิลโพลีเมอร์ขนาด 1 ตารางเซนติเมตร เพื่อวิเคราะห์สมบัติเชิงเคมีไฟฟ้าต่อไป

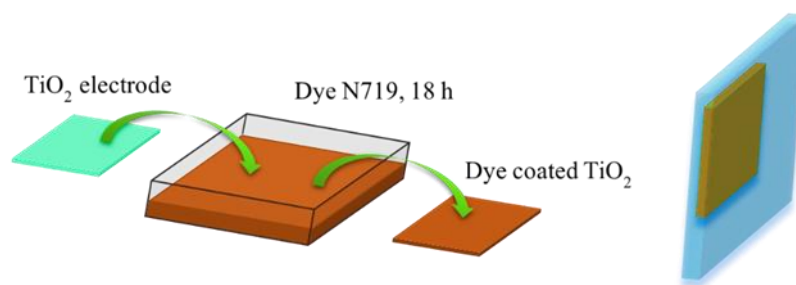
หมายเหตุ : การเตรียม ริตวิซกราฟีนออกไซด์เฟลสด์ และเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีวิธีทำเช่นเดียวกับคอมพอสิตเฟลสด์

3.4.4 เซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสง

ประกอบเซลล์สุริยะมาตรฐานชนิดสีย้อมไวแสง เพื่อนำไปเป็นส่วนประกอบร่วมกับตัวเก็บประจุยวดยิ่ง โดยส่วนประกอบที่สำคัญมีดังต่อไปนี้

3.4.4.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง (Photoanode)

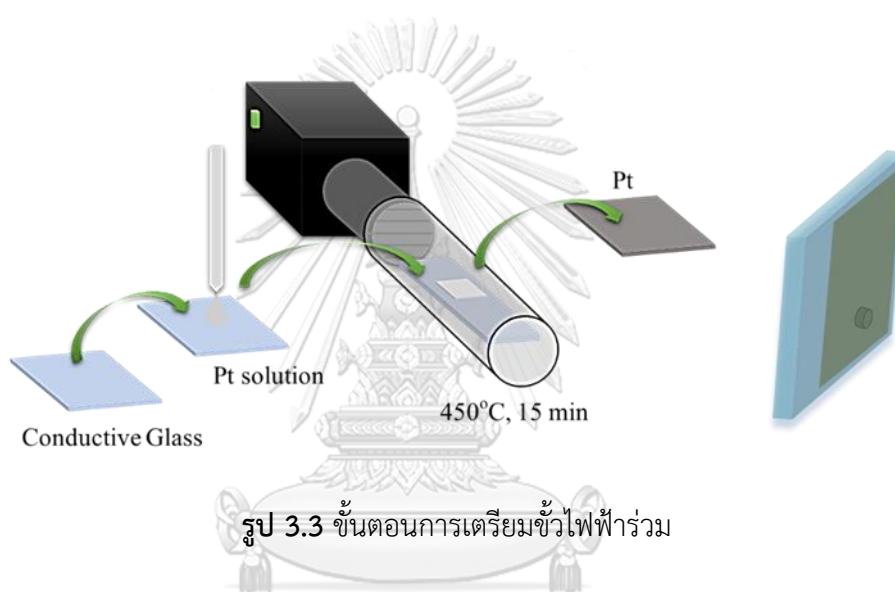
นำกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า (Fluorene-doped tin oxide: FTO) ขนาด 1×1.5 ตารางเซนติเมตร นำไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาด โดยการสั่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonication) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดคราบสกปรกออกจากกระจก จากนั้นทำความสะอาดกระจกอีกครั้งด้วยน้ำปราศจากไอออนและเอทานอล ตามลำดับ หลังจากนั้นนำกระจกแช่ลงในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ความเข้มข้น 40 มิลลิโมลต่อลิตร นำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นล้างทำความสะอาดกระจกด้วยน้ำปราศจากไอออน พิมพ์สกรีนไทเทเนียมไดออกไซด์ขนาดอนุภาค 20 นาโนเมตร (Titania paste 20 nm) พื้นที่ขนาด 0.25 ตารางเซนติเมตร ตั้งทิ้งไว้แห้งเป็นเวลา 3 นาที แล้วนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น ทำการพิมพ์สกรีนไททาเนียมไดออกไซด์จนครบ 3 ครั้ง หลังจากนั้นนำกระจกที่เคลือบด้วยไททาเนียมไดออกไซด์เผาที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที, 375 องศาเซลเซียส เวลา 5 นาที, 450 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที และ 500 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที จากนั้นนำกระจกไปแช่ในสารละลายไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ 40 มิลลิโมลต่อลิตร ให้ความร้อนอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำออกมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปแช่ในสารละลายสีย้อมไวแสง N719 เป็นเวลา 18 ชั่วโมงในที่ที่บับแสง จากนั้นนำออกมาล้างด้วยตัวทำละลายอะซิโตนไทรล เพื่อกำจัดสีย้อมไวแสงที่ไม่ถูกดูดกลืน



รูป 3.2 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้ารับแสง

3.4.4.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม (Counter electrode)

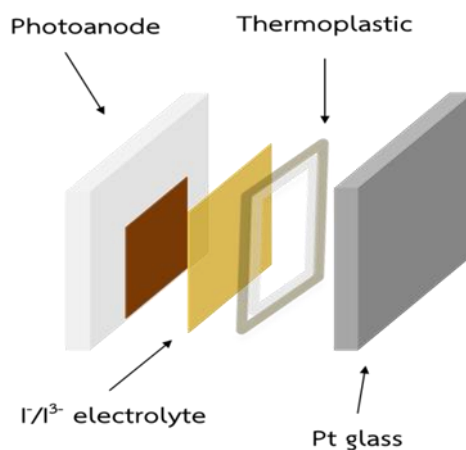
ตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า ขนาด 1×1.5 ตารางเซนติเมตร เจาะรูบริเวณมุมของกระจกนำไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาดกระจกโดยการสั่นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดคราบสกปรกออก จากนั้นทำความสะอาดกระจกอีกครั้งด้วยน้ำปราศจากไอออนและเอทานอล ตามลำดับ จากนั้นนำกระจกมาเคลือบด้วยสารละลายแพลทินัมที่เตรียมจากกรดเฮกซะคลอโรแพลทินิกในตัวทำละลายไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ความเข้มข้น 8 โมลต่อลิตร โดยการหยดลงไปที่กระจกด้านนำไฟฟ้า แล้วนำไปให้เผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที



รูป 3.3 ขั้นตอนการเตรียมขั้วไฟฟ้าร่วม

3.4.4.3 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ดำเนินการประกอบเซลล์โดยเริ่มจากนำขั้วไฟฟ้ารับแสงที่แช่ในสารละลายสีย้อมไวแสงออกมาล้างด้วยตัวทำละลายอะซิโตนไนด์รล์ เพื่อกำจัดสีย้อมไวแสงส่วนเกินออก รอจนขั้วไฟฟ้ารับแสงแห้ง แล้วนำมาประกอบเข้ากับขั้วไฟฟ้าร่วมที่เตรียมไว้ โดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 วินาทีโดยใช้แผ่นฟิล์มเทอร์โมพลาสติก (Surlyn, DUPONT) เพื่อเชื่อมให้กระจกทั้งสองแผ่นติดกัน จากนั้นบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านที่เจาะเตรียมไว้บนขั้วไฟฟ้าร่วมโดยใช้ระบบปั๊มสุญญากาศและปิดรูด้วยกระจกสไลด์ นำเซลล์ที่เตรียมได้ เพิ่มหน้าสัมผัสด้วยสีพ่นท์เงิน (Silver paste) โดยทาบริเวณปลายกระจกทั้งสองด้านจะได้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง ดังแสดงในรูป 3.4



รูป 3.4 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

3.4.5 ตัวเก็บประจุวดยิ่ง

3.4.5.1 การเตรียมขั้วไฟฟ้าในตัวเก็บประจุวดยิ่งสำหรับทดสอบเอกลักษณ์ของ

วัสดุ

ตัดโพนิกเกิลขนาด 1.5 x 2 ตารางเซนติเมตร นำไปทำความสะอาดด้วยเอทานอลโดยการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดคราบสกปรกออก ทำการหยสารคอมพอสิตเพสต์ลงบนโพนิกเกิลพื้นที่ขนาด 1 ตารางเซนติเมตร



รูป 3.5 ขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุวดยิ่ง

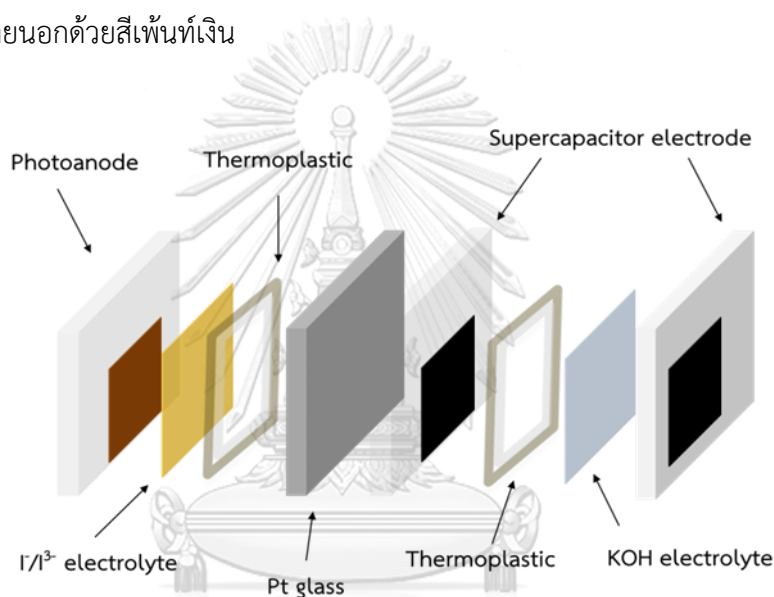
3.4.5.2 การเตรียมขั้วไฟฟ้าในตัวเก็บประจุวดยิ่งสำหรับประกอบเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง

ตัดกระจกเคลือบสารนำไฟฟ้า ขนาด 1 x 1.5 ตารางเซนติเมตร เจาะรูบริเวณมุมของกระจก นำไปทำความสะอาดด้วยน้ำยาทำความสะอาดกระจกโดยการล้างด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที เพื่อกำจัดคราบสกปรกออก จากนั้นทำความสะอาดกระจกอีกครั้งด้วย

น้ำปราศจากไอออนและเอทานอล ตามลำดับ พิมพ์สกรีนด้วยคอปเปอร์ออกไซด์/เรซินออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ พื้นที่ขนาด 1 ตารางเซนติเมตร ตั้งทิ้งไว้ให้แห้งเป็นเวลา 3 นาที รอให้แห้งเป็นเวลา 3 นาที จากนั้นนำกระจกไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 คืนเพื่อระเหยตัวทำละลายออก โดยทำแบบเดียวกันนี้กับขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ด้าน

3.4.6 การประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงเข้ากับตัวเก็บประจุยวดยิ่ง

เตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงขนาดพื้นที่รับแสง 0.25 ตารางเซนติเมตรโดยติดกาวที่ด้านขั้วไฟฟาร่วมจากนั้นนำตัวเก็บประจุยวดยิ่งพื้นที่ 1 ตารางเซนติเมตรประกบเข้ากันโดยทำการต่อวงจรภายนอกด้วยสี่พันท์เงิน



รูป 3.6 เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงร่วมกับตัวเก็บประจุยวดยิ่ง

3.5. วิธีการวิเคราะห์

3.5.1 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของกราฟีนออกไซด์, ไรดิออกไซด์, เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์, ไรดิออกไซด์-เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิต

- วิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray diffraction จากเครื่อง X-ray diffraction spectrometer, Bruker D8 Advance ใช้ผงสังเคราะห์บดละเอียดปริมาณประมาณ 1 กรัม ใส่ลงภาชนะรับวัดสเปกตรัมรังสีเอ็กซ์ในช่วงมุม 2-theta เท่ากับ 10 - 80 องศา

3.5.2 การวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์, เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์, รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิต

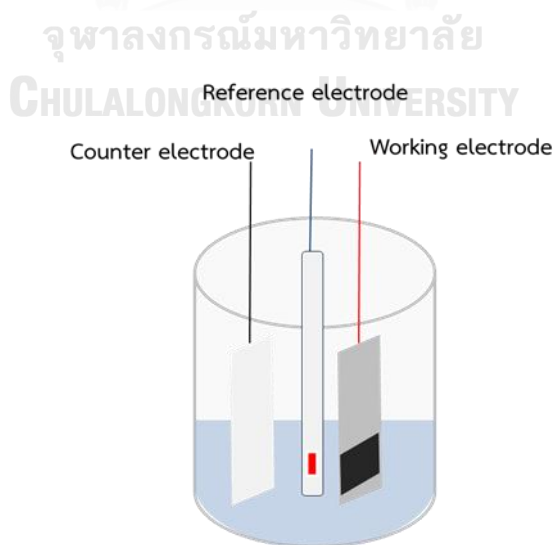
- วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) ใช้ผงสังเคราะห์บดละเอียดโรยลงบนแท่นรองรับ เคลือบด้วยไอระเหยจากทองคำ วิเคราะห์ในโหมด GB-High ที่กำลังขยาย 20000x

3.5.3 การวิเคราะห์การกระจายตัว องค์ประกอบธาตุในเชิงคุณภาพ และปริมาณของธาตุในวัสดุคอมพอสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

- วิเคราะห์การกระจายตัว และองค์ประกอบธาตุที่ใช้ในวัสดุคอมพอสิตด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS) โดยใช้ผงสังเคราะห์บดละเอียดโรยลงบนแท่นรองรับ เคลือบด้วยไอระเหยจากทองคำ และวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์

3.5.4 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์, เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์, รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์-เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิต

- วิเคราะห์สมบัติทางเคมีไฟฟ้าของสารคู่ปฏิกิริยารีดอกซ์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry) การอัดและคายประจุของสารด้วยเทคนิค Galvanostatic charge and discharge และวิเคราะห์ความต้านทานระหว่างผิวหน้าสัมผัสระหว่างสารและขั้วไฟฟ้าด้วยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเซิงเคมีไฟฟ้า (EIS) จากเครื่อง, Potentiostat Galvanostat, Model Auto lab PGSTAT, Ger.



รูป 3.7 อุปกรณ์สำหรับทดสอบสมบัติทางเคมีไฟฟ้า

3.5.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์ร่วมกับตัวเก็บประจุวดยิ่ง

- วิเคราะห์เอกลักษณ์และประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบกับตัวเก็บประจุวดยิ่งด้วยเทคนิคการวัดค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า (IV characteristic, SMU, Keithley, USA.) และ Galvanostatic charge and discharge



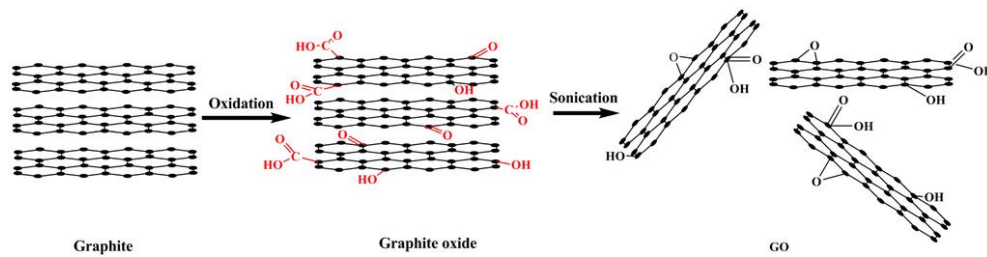
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาและพัฒนาวัสดุคอมพอสิตเพื่อนำมาใช้สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าในตัวเก็บประจุวดยิ่งโดยทำการสังเคราะห์เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์และศึกษาผลของสัดส่วนโดยโมลของโลหะคือ นิกเกิล โคบอลต์ และอะลูมิเนียม ในโครงสร้างเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ หาค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะจากนั้นเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงในนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ในสัดส่วนที่ดีที่สุดเป็นคอมพอสิตสำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุวดยิ่ง โดยทำการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการของฮัมเมอร์จากนั้นทำการรีดิวซ์เป็นกราฟีนออกไซด์โดยใช้ไฮดราซีนโมโนไฮเดรต ทำการศึกษาโครงสร้างผลึก ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสมบัติทางเคมีไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ต่อไป

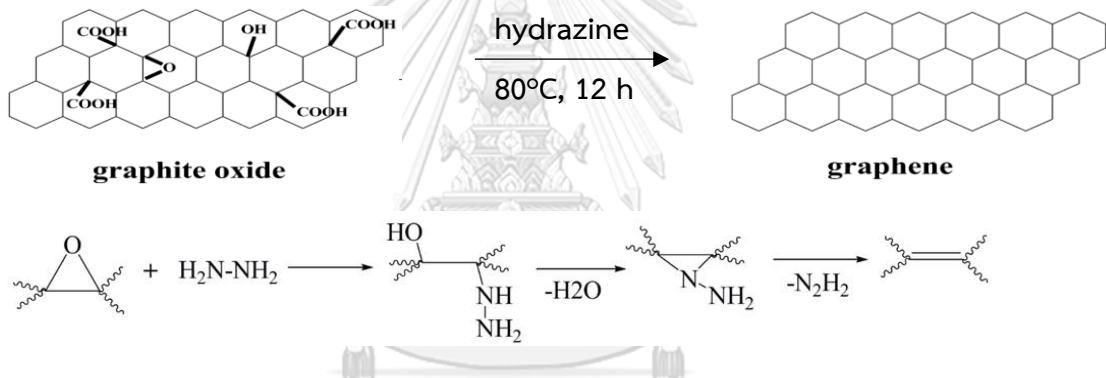
4.1 การวิเคราะห์โครงสร้างและลักษณะทางสัณฐานวิทยารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีการของฮัมเมอร์

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาการใช้กราฟีนออกไซด์เป็นสารเติมแต่งในเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นคอมพอสิตสำหรับใช้เป็นวัสดุในขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุวดยิ่ง ซึ่งกราฟีนออกไซด์ที่ใช้ในงานวิจัยสังเคราะห์ด้วยวิธีการของฮัมเมอร์ซึ่งเป็นกระบวนการที่กราฟไฟต์จะถูกทำให้แตกตัวและหลุดออกเป็นแผ่นที่มีความหนาในระดับนาโนเมตรโดยใช้สารละลายกรด และตัวออกซิไดซ์ โดยในงานวิจัยนี้ใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น 96 เปอร์เซ็นต์ และโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสารออกซิไดซ์ ซึ่งเป็นการเติมหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนลงบนแผ่นกราฟไฟต์กลายเป็นกราฟไฟต์ออกไซด์ และใช้อ่างอัลตราโซนิกทำการโซนิเคชันจะได้เป็นกราฟีนออกไซด์ ซึ่งสามารถสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ได้ผลผลิตประมาณ 63 เปอร์เซ็นต์ ที่มีลักษณะโครงสร้างคล้ายกราฟไฟต์ แต่มีจำนวนชั้นที่น้อยกว่าบนระนาบบะซอลที่มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลหรือคาร์บอนิล ทำให้กราฟีนออกไซด์มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) และสามารถกระจายตัวเป็นเนื้อเดียวในน้ำหรือตัวทำละลายมีขั้วได้ซึ่งจะทำให้ง่ายต่อการเตรียมเป็นคอมพอสิตในขั้นถัดไป



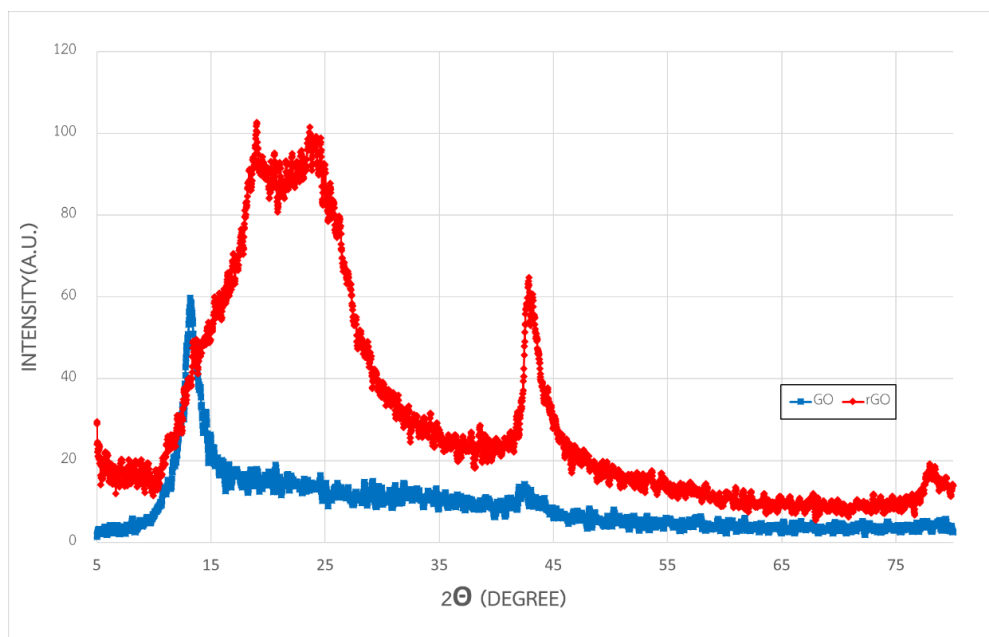
รูป 4.1 การโซนิเคชันของกราฟไฟต์ออกไซด์สู่กราฟีนออกไซด์ [49]

แต่การปรากฏหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้างของกราฟีนออกไซด์ส่งผลให้สมบัติการนำไฟฟ้าลดลง จึงต้องทำการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เพื่อลดหมู่ฟังก์ชันบนโครงสร้าง [19] โดยในงานวิจัยได้ใช้ไฮดราซีนโมโนไฮเดรตเป็นตัวรีดิวซ์โดยกลไกของการเกิดปฏิกิริยาจะแสดงในรูป 4.2 ซึ่งข้อดีของกระบวนการนี้คือไม่เกิดแก๊สพิษ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย และสามารถผลิตในระดับอุตสาหกรรมได้



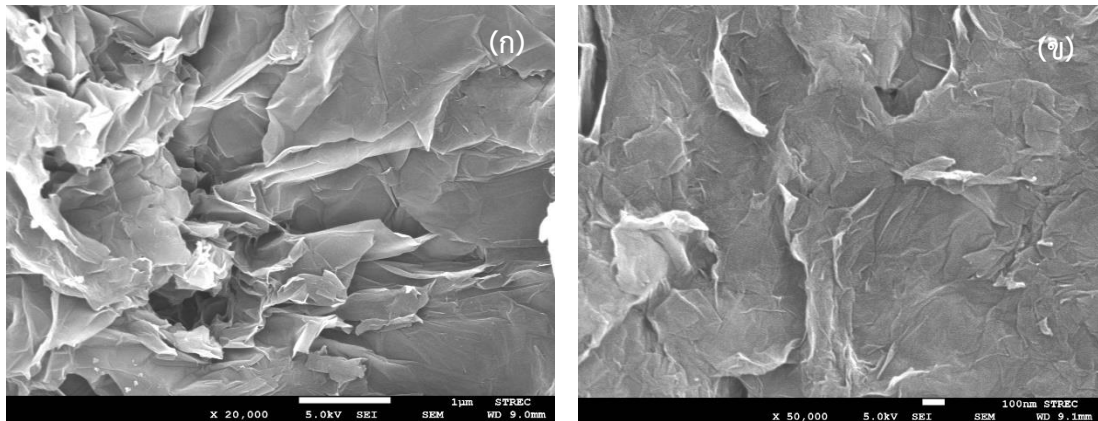
รูป 4.2 เส้นทางของการเกิดปฏิกิริยาของกราฟไฟต์ออกไซด์ด้วยไฮดราซีนไปสู่กราฟีน [19]

โดยกราฟีนออกไซด์ที่ได้จากการสังเคราะห์ในงานวิจัยนี้มีค่าความเข้มของยอดกราฟอยู่ในตำแหน่ง 2θ เท่ากับ 13.247 องศาและ 42.536 องศา บ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของออกซิเจนบนแผ่นของกราฟไฟต์กลายเป็นกราฟีนออกไซด์โดยกราฟีนออกไซด์ที่มีระยะห่างระหว่างชั้นประมาณ 0.82 นาโนเมตร ซึ่งคำนวณจากสมการของ Bragg's law โดยยอดกราฟที่ตำแหน่ง 42.536 องศาเป็นยอดกราฟที่เกิดขึ้นเนื่องจากในปฏิกิริยาการออกซิเดชันบนแผ่นกราฟไฟต์นั้นไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึกในกราฟีนออกไซด์



รูป 4.3 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของกราฟีนออกไซด์ (GO) และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (RGO)

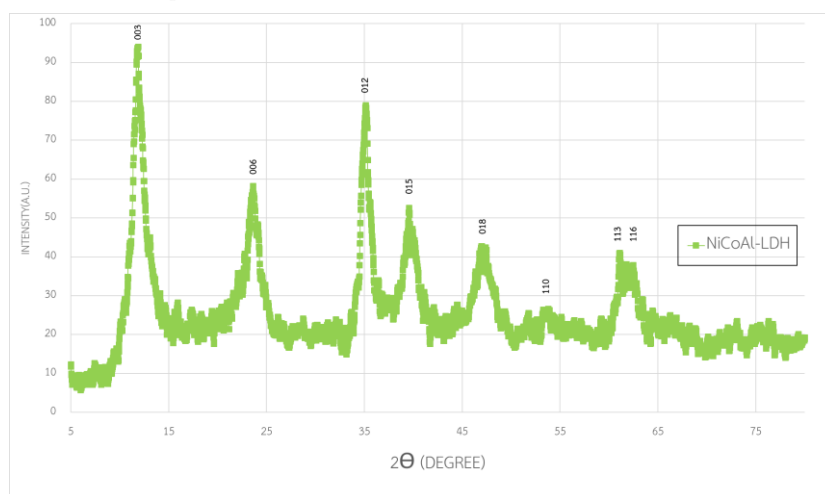
หลังจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยไฮดรอกซิลแล้วพบการปรากฏว่ายอดกราฟของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีช่วงกว้างกว่ากราฟีนออกไซด์ (Broad peak) เนื่องจากการลดลงของโครงสร้างผลึกของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เมื่อเทียบกับกราฟีนออกไซด์และเกิดการลดลงของหมู่ฟังก์ชันออกซิเจน [50] บนโครงสร้างปรากฏที่ตำแหน่ง 2θ ประมาณ 15-26 องศา และ 44 องศา จะเห็นว่าเมื่อทำการคำนวณระยะห่างระหว่างชั้นด้วยสมการ $n\lambda = 2d\sin\theta$ (Bragg's law) พบว่าระยะห่างของคาร์บอนอะตอมในกราฟีนออกไซด์มีระยะห่างของชั้นที่กว้างกว่าเนื่องจากการปรากฏหมู่โครงสร้างของไฮดรอกซิลทำให้เกิดการถ่างออกระหว่างชั้นคาร์บอน หลังจากนั้นเมื่อทำการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยไฮดรอกซิลแล้วจึงทำให้เกิดการหลุดออกของหมู่ไฮดรอกซิล และเกิดพันธะพาย-พาย ระยะห่างระหว่างชั้นจึงลดลง (0.37 นาโนเมตร) ทำให้สเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์มุมปรากฏตำแหน่งของ 2θ มากกว่าเดิม และเมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (รูป 4.4) เห็นลักษณะที่เป็นรอยย่นเป็นแผ่นบาง และเกาะกลุ่มกันเองเป็นชั้นด้วยแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (แรงแวนเดอร์วาลส์) [51] เนื่องจากเกิดอันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชัน (อีพอกไซด์, ไฮดรอกซิล, คาร์บอนิล และคาร์บอกซิลิก) บนพื้นผิวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์โดยกราฟีนออกไซด์และกราฟีนออกไซด์ ซึ่งเมื่อทำการคำนวณขนาดผลึกจากรูป 4.3 โดยใช้สมการของ Scherrer พบว่า กราฟีนออกไซด์และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีขนาดผลึก เท่ากับ 16.71 นาโนเมตรและ 8.41 นาโนเมตรตามลำดับ



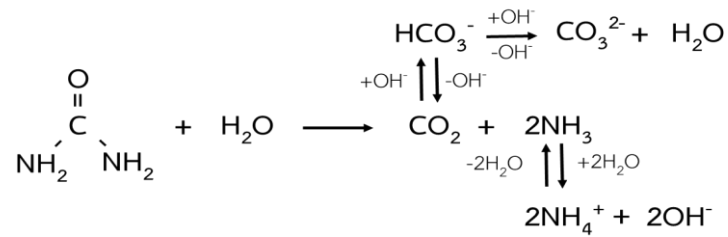
รูป 4.4 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 20000 เท่าและ 50000 เท่า

4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม-เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ถูกสังเคราะห์ด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลพบว่าปรากฏยอดกราฟจากสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ 5 ตำแหน่งหลัก 2θ ได้แก่ 12 องศา 23.8 องศา 35 องศา 40 องศา 47 องศา 62 องศา ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นระนาบของไฮดรอกไซด์เลเยอร์ที่ระนาบสะท้อน (003), (006), (012), (015), (018), (110), (113) และ (116) ตามงานวิจัยก่อนหน้านี้ [52] (JCPDS No.15-0087) บอกการเปลี่ยนโครงสร้างสู่เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ $\text{Ni}_6\text{Al}_2\text{Co}_3(\text{OH})_{16}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ โดยมีระยะห่างระหว่างชั้นประมาณ 0.765 นาโนเมตร เกิดจากการแทรกตัวของคาร์บอนไดออกไซด์จากการแตกตัวของยูเรียรูป 4.6 ภายในชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ [53] จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

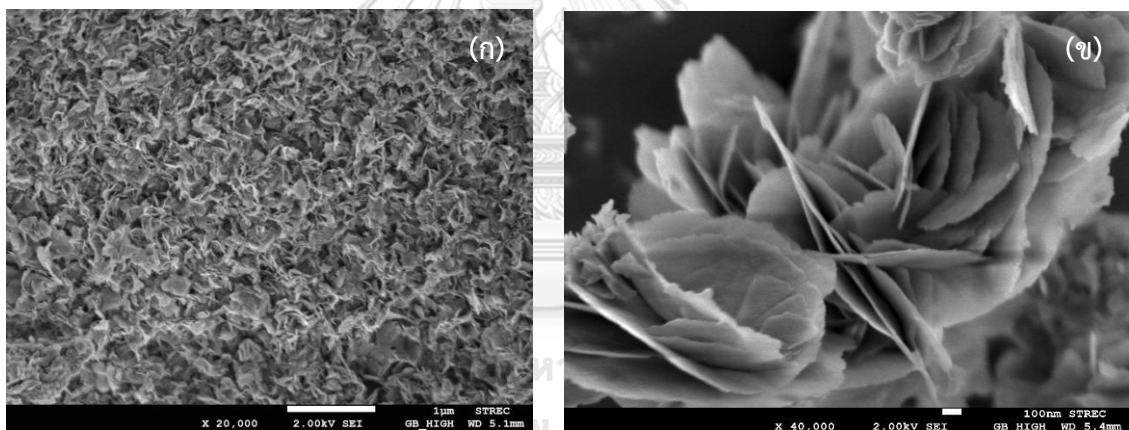


รูป 4.5 สเปกตรัมการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (อัตราส่วนโดยโมล Ni : Co : Al = 1:1:1)



รูป 4.6 ปฏิกิริยาการแตกตัวของยูเรียในน้ำ

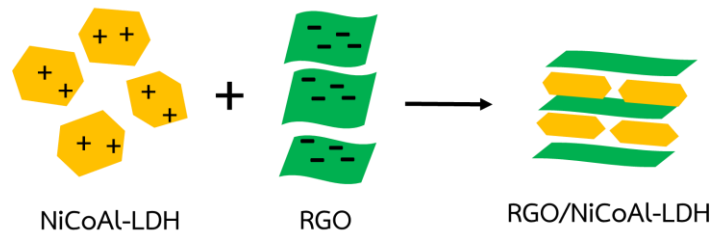
จากรูป 4.7 แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ด้วยภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีลักษณะเป็นแผ่นระดับนาโนกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบ และเมื่อเพิ่มกำลังขยายจะเห็นเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เรียงตัวซ้อนกันคล้ายรูปดอกไม้ดังแสดงในรูป 4.7 และมีขนาดผลึกเท่ากับ 16.69 นาโนเมตร [43]



รูป 4.7 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (อัตราส่วนโดยโมล Ni : Co : Al = 1:1:1)

4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึกและลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิลโคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ถูกสังเคราะห์เป็นคอมพอสิตด้วยวิธีการไฮโดรเทอร์มอลเพียงครั้งเดียว (In-situ process) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ตะกอนคอลลอยด์สีม่วงอยู่ในสารละลาย โดยใช้แรงดึงดูดระหว่างประจุในรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ซึ่งเป็นประจุลบและเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่เป็นประจุบวกตามรูป 4.8



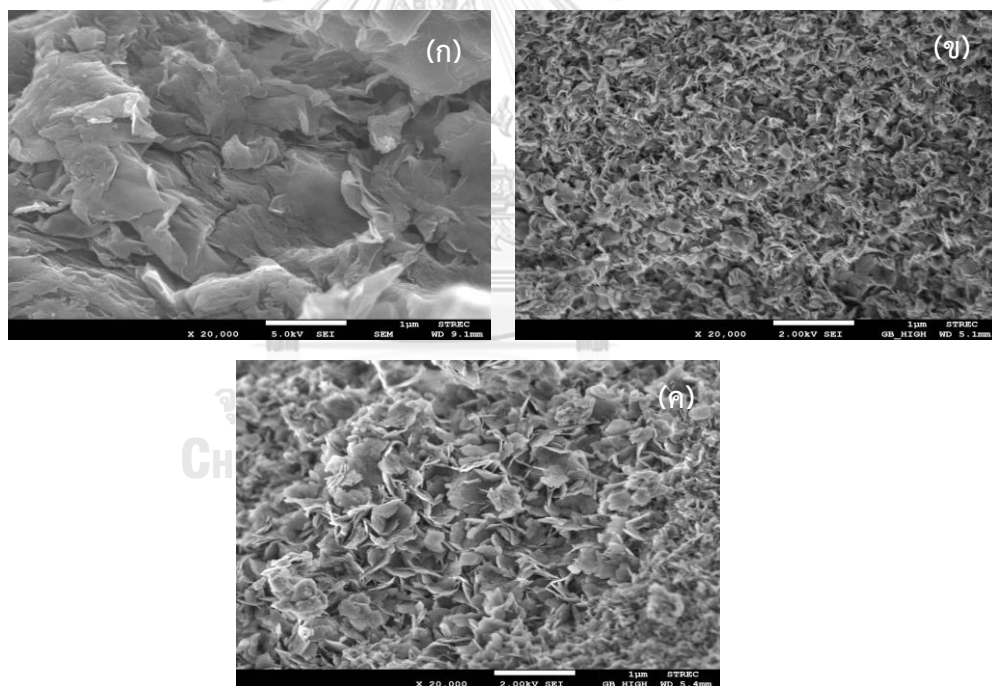
รูป 4.8 แผนภาพการแทรกสอดระหว่างชั้นของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์
กับ นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

เมื่อทำการพิจารณาผลของการเลี้ยวเบนสเปกตรัมรังสีเอ็กซ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ในรูป 4.9 พบว่ายอดกราฟเอกลักษณะมีลักษณะคล้ายกับเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวซึ่งจะไม่ปรากฏยอดกราฟเอกลักษณะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ในยอดกราฟของคอมพอสิตเนื่องจากเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สามารถป้องกันการคืนกลับสู่สภาพเดิมของแผ่นกราฟีนทำให้เกิดการกระจายตัว (Exfoliation) ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ (เส้นสีเขียว) แต่จะสังเกตเห็นความเข้มของยอดกราฟคอมพอสิตมีค่าที่ต่ำลงเนื่องจากรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์นั้นได้เข้าไปแทรกสอดในชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จึงทำให้ความเป็นผลึกนั้นต่ำกว่าเดิมด้วย [45]



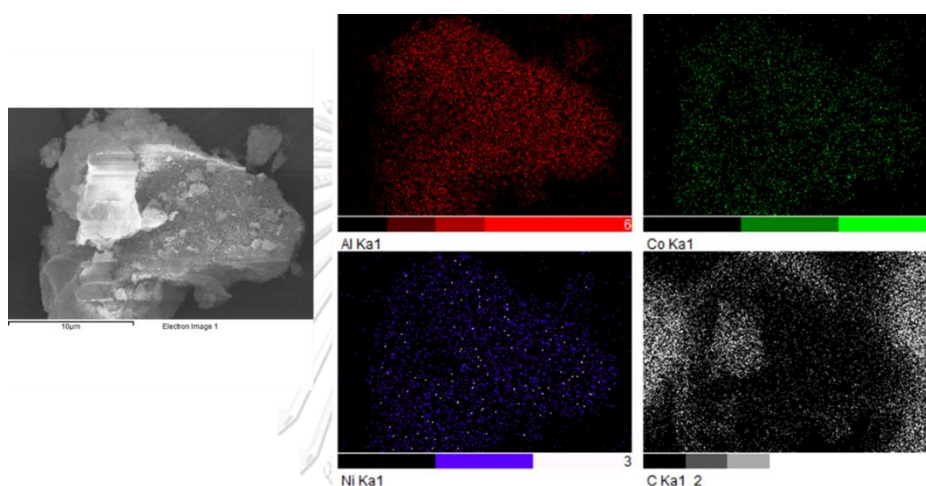
รูป 4.9 การเปรียบเทียบสเปกตรัมการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์, นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

เมื่อพิจารณาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุทั้งสามชนิดเปรียบเทียบกับคือ รีติวซ์กราฟีน ออกไซด์, นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ และรีติวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ในรูป 4.10 พบว่าลักษณะทางสัณฐานวิทยาของวัสดุทั้งสามชนิดมีรูปร่างที่แตกต่างกันดังที่กล่าวไปข้างต้น เมื่อพิจารณาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของคอมพอสิตในรูป 4.10ค จะสังเกตเห็นว่าพบกราฟีนออกไซด์แทรกตัวอย่างกระจุกกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบอยู่ในเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ลดการรวมตัวของแผ่นกราฟีน (Accumulation) เนื่องจากเกิดการดึงดูดกันของไฟฟ้าสถิตของประจุจึงก่อให้เกิดระนาบเป็นลำดับชั้นนาโนของวัสดุคอมพอสิต ส่งผลให้พื้นผิวสัมผัสมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะกราฟีนออกไซด์มีค่าความชอบน้ำสูงเนื่องจากการมีอยู่ของประจุลบของหมู่ฟังก์ชันของออกซิเจนและเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่เป็นประจุบวก เมื่อสารสองชนิดที่มีประจุตรงข้ามกันผสมรวมกัน ส่งผลต่อพื้นผิวที่เพิ่มมากขึ้นทั้งของรีติวซ์กราฟีนออกไซด์และเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ในคอมพอสิตนี้



รูป 4.10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเปรียบเทียบระหว่าง รีติวซ์กราฟีนออกไซด์, นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ และ รีติวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ (อัตราส่วนโดยโมล Ni :Co:Al = 1:1:1) ที่กำลังขยาย 20000 เท่า

จากรูป 4.11 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์ (Energy-dispersive X-ray spectroscopy ; EDS) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการกระจายตัวของธาตุนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม และ คาร์บอน ในวัสดุรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิต ซึ่งจะเห็นการปรากฏแค่ธาตุนิกเกิล โคบอล และ อะลูมิเนียมในเฉพาะเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ และเห็นการกระจายตัวของคาร์บอนอันเนื่องมาจากการปรากฏของอะตอมคาร์บอนในกราฟีนกระจายตัวในคอมพอสิตอย่างสม่ำเสมอด้วย



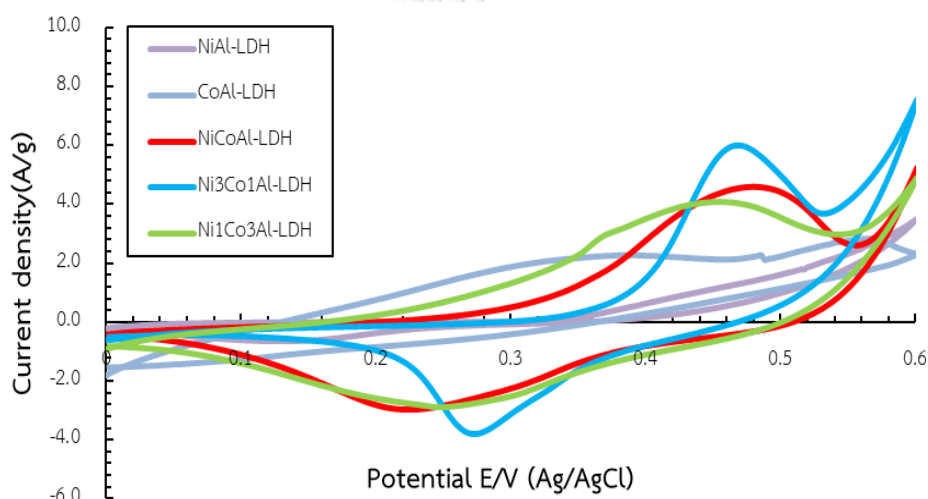
รูป 4.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิต ในอัตราส่วนโดยโมลของนิกเกิล: โคบอลต์:อะลูมิเนียมเท่ากับ 1:1:1 และผลวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงานด้วยเทคนิคจุลวิเคราะห์

4.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีไฟฟ้า

การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางเคมีไฟฟ้าในตัวเก็บประจุยวดยิ่งของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (Cyclic voltammetry; CV) การอัดและคายประจุ (Galvanostatic charge discharge measurement) และการวัดความต้านทานระหว่างพื้นผิวสัมผัสด้วยอิมพีแดนซ์สเปกโทรเซิงไฟฟ้า (Electrochemical impedance spectroscopy : EIS) โดยงานวิจัยนี้ต้องการรวมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และ นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นวัสดุในการสร้างขั้วไฟฟ้าสำหรับ ตัวเก็บประจุยวดยิ่งแบบผสม (Hybrid supercapacitor) เพื่อเพิ่มค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ โดยทำการ การศึกษาสมบัติทางเคมีไฟฟ้าที่กล่าวไปข้างต้นของวัสดุคอมพอสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ โดยในงานวิจัยนี้ทำการเติมวัสดุรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/

นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตปริมาณ 80 เปอร์เซ็นต์, คาร์บอน ปริมาณแบล็ค 15 เปอร์เซ็นต์ และพอลิเตตระฟลูออโรเอทีลินปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์เป็นสารเชื่อมประสานตามลำดับ โดยทำการทดสอบประสิทธิภาพโดยเครื่อง Potentiostat Galvanostat, Model Auto lab PGSTAT, Ger. ใช้ขั้วอิเล็กโทรดคือโพลีนิกเกิลเคลือบด้วยคอมพอสิตจุ่มลงในสารละลาย อิเล็กโทรไลต์โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 โมลต่อลิตรโดยมีกระจกแพลตตินัมเป็นขั้วไฟฟ้า ร่วมเปรียบเทียบกับรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว

4.4.1 การทดสอบค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี



รูป 4.12 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของนิกเกิล-อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์, โคบอลต์-อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์, นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ สัดส่วนโดยโมล (Ni:Co:Al = 1:1:1 , 3:1:1, 1:3:1)

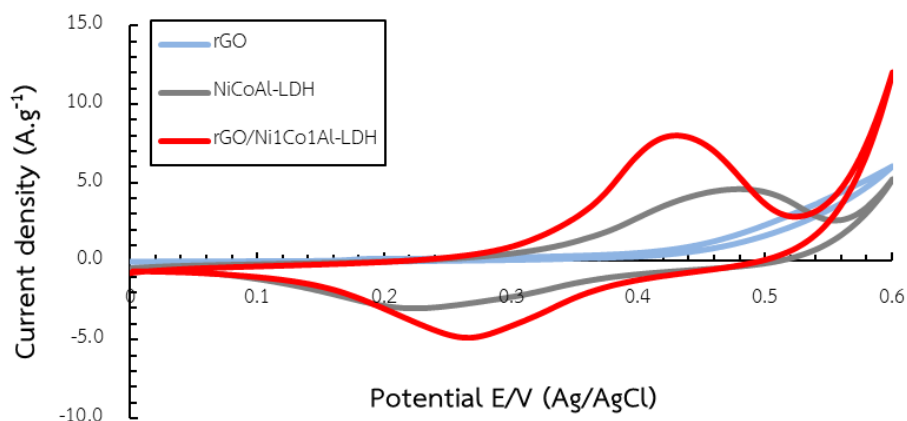
จากรูป 4.12 เป็นการเปรียบเทียบไซคลิกโวลแทมโมแกรมของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ต่างชนิดกันโดยแบ่งเป็นโลหะเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ 2 ชนิดและ 3 ชนิดในสัดส่วนที่แตกต่างกันพบว่าเลเยอร์ไฮดรอกไซด์ที่มีโลหะ 3 ชนิด คือ นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียมจะเห็นกระแสออกซิเดชันและกระแสรีดักชันของกราฟที่ชัดเจนกว่าโลหะ 2 ชนิดเนื่องจากสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันที่ดีกว่า มีความสูงของยอดกราฟออกซิเดชันและรีดักชันชัดเจน เนื่องจากเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ที่ผันกลับได้บนขั้วไฟฟ้า และสัดส่วนของโลหะนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม ในส่งผลต่อตำแหน่งของยอดกราฟอย่างชัดเจน [53] โดยพื้นที่ใต้กราฟสามารถบ่งบอกถึงค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific capacitance) ของวัสดุนี้ด้วยโดยปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันของสารแสดงในปฏิกิริยาด้านล่างนี้ [42, 44]



ตาราง 4.1 แสดงผลค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของสารเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด และ 3 ชนิดตามลำดับ

สาร	ความจุไฟฟ้าจำเพาะ (ฟารัด/กรัม)	ความหนาแน่นพลังงาน (กิโลวัตต์ชั่วโมง/กิโลกรัม)
NiAl-LDH	289.81	23.18
CoAl-LDH	444.59	35.57
Ni ₁ Co ₁ Al-LDH	839.85	77.64
Ni ₃ Co ₁ Al-LDH	375.74	33.14
Ni ₁ Co ₃ Al-LDH	458.11	40.40

จากตาราง 4.1 เป็นการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของสารโดยทำการเปรียบเทียบโลหะร่วมสองชนิดระหว่างนิกเกิลกับโคบอลต์ในสารประกอบเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จะเห็นว่าโคบอลต์-อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะที่สูงกว่านิกเกิล-อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เนื่องจากโคบอลต์มีการนำไฟฟ้าที่ดีกว่านิกเกิล และมีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยามีค่าต่ำกว่านิกเกิล เมื่อทำการปรับค่าสัดส่วนโมลของโลหะผสมโลหะเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่อัตราส่วนโดยโมลของนิกเกิล : โคบอลต์ : อะลูมิเนียม ที่ 1:1:1, 1:3:1 และ 3:1:1 พบว่าสัดส่วนโดยโมลที่โลหะสามชนิดให้ค่าความจุจำเพาะสูงสุดที่ 839.85 ฟารัดต่อกรัม และให้ค่าความหนาแน่นพลังงานที่ 77.64 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อกิโลกรัม คือสัดส่วน 1:1:1 เนื่องมาจากสัดส่วนในการเติมที่เหมาะสมของสารในเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จึงทำให้เกิดความสมบูรณ์ภายในโครงสร้าง



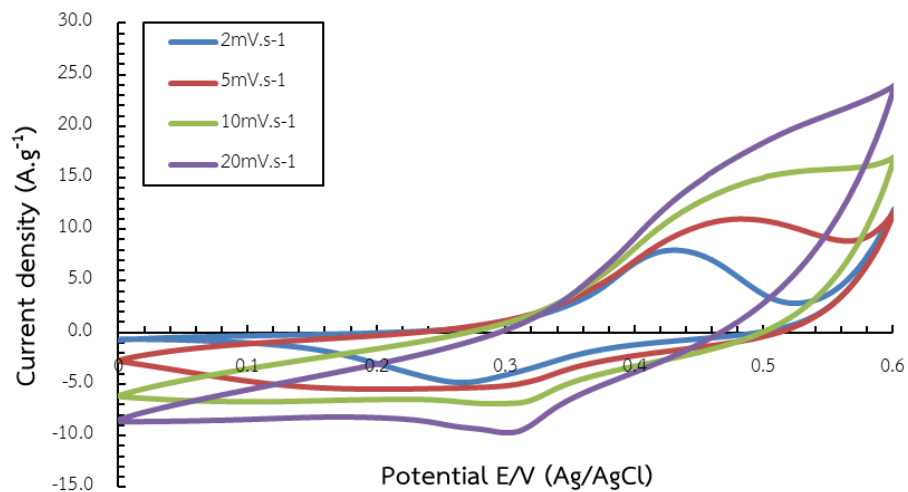
รูป 4.13. ไชคลิกโวลแทมโมแกรมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์, นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ในสัดส่วนโมล นิกเกิลต่อโคบอลต์ 1:1:1 และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ

จากรูป 4.13 เมื่อทำการเติมกราฟีนออกไซด์ลงไปในตัวละลายเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์พบว่าค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของคอมพอสิตมีค่าที่เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงไปจะช่วยให้เพิ่มพื้นที่ผิวหน้าสัมผัสของพื้นที่กัมมันต์ (Active site) โดยการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงไป ในเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์นั้นไอออนลบบนผิวของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์จะเข้าไปแทรกอยู่ในช่องว่างระหว่างชั้นของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ทำให้เพิ่มช่องว่างระหว่างชั้นและลดการรวมกลุ่มกันเองของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์เนื่องจากพันธะโควาเลนต์ในโครงสร้างจึงส่งผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 839.85 ฟารัดต่อกรัมเป็น 1,030.80 ฟารัดต่อกรัม [52]

ตาราง 4.2 แสดงผลค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์, เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ และรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิต

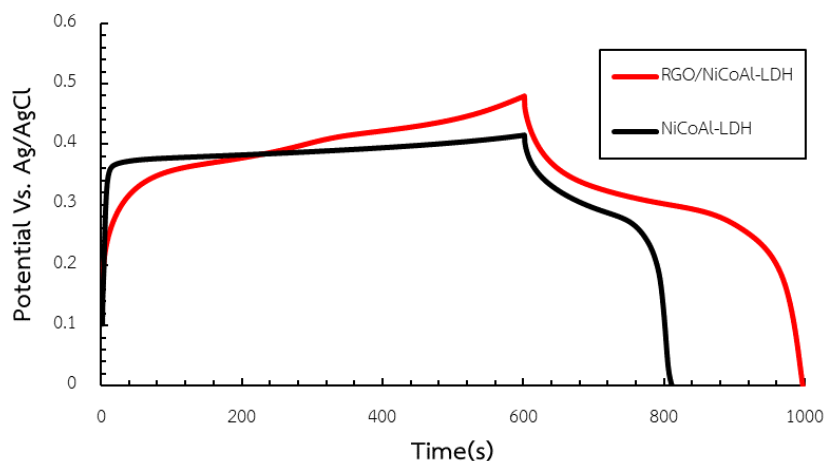
สาร	ความจุไฟฟ้าจำเพาะ (ฟารัด/กรัม)	ความหนาแน่นพลังงาน (กิโลวัตต์ชั่วโมง/กิโลกรัม)
rGO	460.55	82.89
NiCoAl-LDH	839.85	77.64
rGO/Ni ₁ Co ₁ Al ₁ -LDH	1,050.39	106.35

จากนั้นทำการปรับค่าอัตราการสแกนของไซคลิกโวลแทมโมแกรมในรูป 4.14 อยู่ในช่วง 2- 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาทีพบว่าเมื่อทำการปรับอัตราการสแกนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของความหนาแน่นกระแสมีค่าเพิ่มขึ้นและรูปกราฟจะมีลักษณะที่กว้างขึ้นเนื่องมาจากจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาที่อัตราที่สูงขึ้นแต่จะเห็นความชัดของยอดกราฟของกระแสที่ต่ำลงเนื่องจากกลไกของการทำงานต่างกันในขณะที่ปรับอัตราสแกนในช่วงต่ำไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์มีเวลาพอที่จะสามารถเข้าสู่ช่องว่างรูพรุนของวัสดุคอมพอสิตได้ และมีเวลาพอในการเกิดปฏิกิริยาจึงทำให้ปรากฏยอดกราฟที่ชัดเจนในช่วงสแกนต่ำ ส่วนเมื่อเพิ่มอัตราการสแกนสูงขึ้นไอออนในสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกิดการกระตุ้นอย่างรุนแรงและชนกันบริเวณพื้นผิวหน้าสัมผัสของวัสดุคอมพอสิตไม่สามารถเข้าไปในช่องว่างรูพรุนได้จึงทำให้การเกิดปฏิกิริยาไม่ดีจึงทำให้ความชัดของยอดกราฟที่ปรากฏลดต่ำลงไปด้วย [53]



รูป 4.14 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่อัตราการสแกนต่างกัน

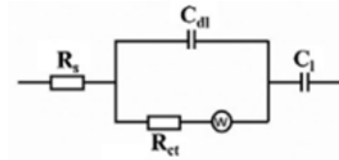
4.4.2 การทดสอบค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิค Galvanostatic charge and discharge



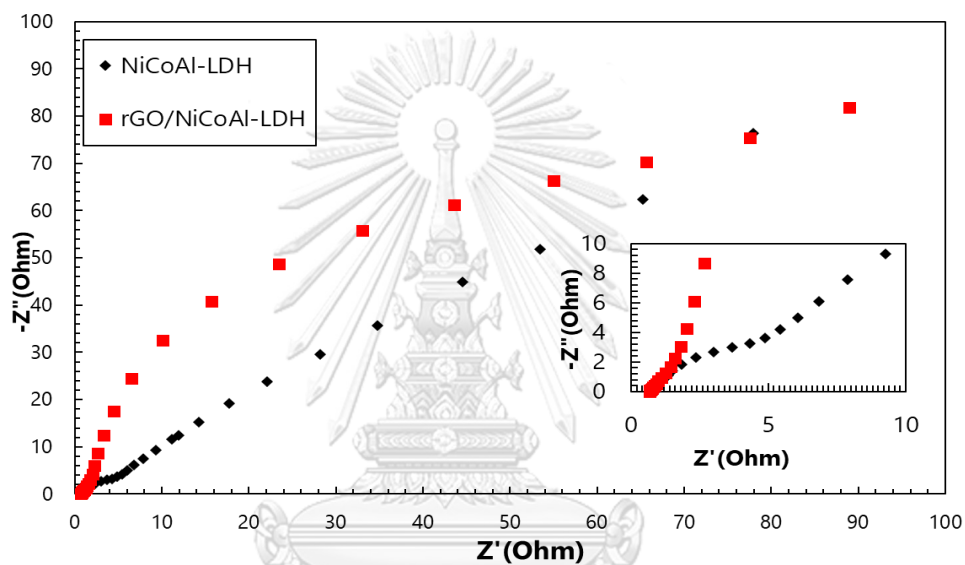
รูป 4.15 Galvanostatic charge and discharge ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับ นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

จากรูป 4.15 เป็นการแสดง Galvanostatic charge and discharge ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ เปรียบเทียบกับนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ ที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมแปร์ต่อกรัม ช่วงของความต่างศักย์ 0-0.5 โวลต์ พฤติกรรมของปฏิกิริยารีดอกซ์มีค่าสอดคล้องกับกราฟไซคลิกโวลแทมโมแกรม จะสังเกตเห็นความแตกต่างของการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์เนื่องจากการใส่รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงไปอย่างมีนัยสำคัญ และจะเห็นการขึ้นของกราฟจากการอัดประจุและกราฟขาลงการคายประจุมีลักษณะที่ไม่เป็นเส้นตรงเนื่องจากความต้านทานภายในและช่วงหลังเกิดจากอิทธิพลของการเก็บประจุแบบเทียมที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยารีดอกซ์ของนิกเกิลและโคบอลต์ในคอมพอสิต โดยจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ความต่างศักย์ (~0.5-0.37 โวลต์) และลดอย่างช้าที่ความต่างศักย์ (0.37-0 โวลต์) โดยจากผลของ Galvanostatic charge and discharge มีความสอดคล้องกับไซคลิกโวลแทมโมแกรมที่กล่าวไปข้างต้น [45]

4.4.3 การทดสอบค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ด้วยเทคนิคการวัดความต้านทานบริเวณผิวหน้าสัมผัสด้วยเทคนิค อิมพีแดนซ์สเปกโทรเชิงเคมีไฟฟ้า



รูป 4.16 แผนภาพแสดงวงจรสมมูลของตัวเก็บประจุควอดริง



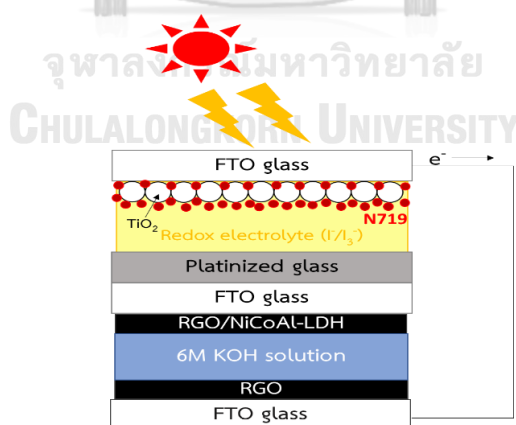
รูป 4.17 Nyquist plots ของ รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตเทียบกับนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์

การเพิ่มประสิทธิภาพทางเคมีไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์สามารถยืนยันด้วยการวิเคราะห์ความต้านทานบริเวณผิวหน้าสัมผัสของวัสดุโดยเทคนิคอิมพีแดนซ์สเปกโทรเชิงเคมีไฟฟ้า Nyquist plot ในรูป 4.16 แสดงการตอบสนองต่อความถี่ของนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ที่เติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงไปเทียบกับที่ไม่เติมนั้นพบว่ากราฟมีลักษณะคล้ายกันคือลักษณะกราฟประกอบไปด้วยลักษณะครึ่งวงกลมในช่วงความถี่สูงและตามด้วยส่วนของเส้นตรงในช่วงความถี่ที่ต่ำ จุดตัดแกน X (Real axis) ที่ความถี่สูง (R_s) แสดงถึงการรวมกันของความต้านทานไอออนิกของอิเล็กโทรไลต์กับความต้านทานแท้จริงของวัสดุ และความต้านทานที่ผิวสัมผัสของวัสดุกับบริเวณพื้นผิวของตัวสะสม ในช่วงความถี่สูงนั้นจะเกิดรูปครึ่งวงกลมเนื่องจากเกิด Charge transfer resistance (R_{ct}) และการเก็บประจุของชั้นในรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ซึ่งมีส่วนร่วมในกระบวนการจลนศาสตร์เคมี ในช่วงความถี่กลางนั้น

(เส้นโค้งความชัน 45°) โดยในช่วงความถี่นี้ เรียกว่า Waburg region และช่วงอิมพีแดนซ์เรียกว่า Waburg impedance (Z_w) โดยช่วงของความถี่นี้เกี่ยวข้องกับการแพร่ของไอออนและการเคลื่อนที่ของไอออนในขั้วไฟฟ้า และในช่วงความถี่ต่ำแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมความจุเพียงอย่างเดียว จาก Nyquist plots สามารถยืนยันว่าการตอบสนองต่อความถี่ของนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์จะเกิด Waburg impedance โดยเกิดการแพร่ของไอออนเป็นตัวควบคุมการเกิดกระบวนการหลักเป็นสำคัญ [43, 52]

ส่วนรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คือเกิดส่วนโค้งเนื่องจากผลของการเก็บประจุแบบเคมีไฟฟ้าสองชั้นเนื่องจากผลของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และส่วนของเส้นตรงเนื่องจากผลของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ร่วมกันซึ่งมีค่าเนื่องจากการนำไฟฟ้าของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ทำให้ค่าความต้านทานผิวลดต่ำลง และมีลักษณะของครึ่งวงกลมวงเล็กกว่าเนื่องจากมีค่า R_{ct} ที่ต่ำกว่าทำให้ง่ายต่อการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเนื่องจากคอมพอสิตสามารถลดการรวมกลุ่มกันและเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสที่มากขึ้นและมีการแพร่ของไอออนที่ดีภายในขั้วไฟฟ้า ซึ่งจากผลของอิมพีแดนซ์สเปกโทรเซียมไฟฟ้าสามารถสรุปได้ว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้สำหรับทำตัวเก็บประจุยิ่งยวด [45]

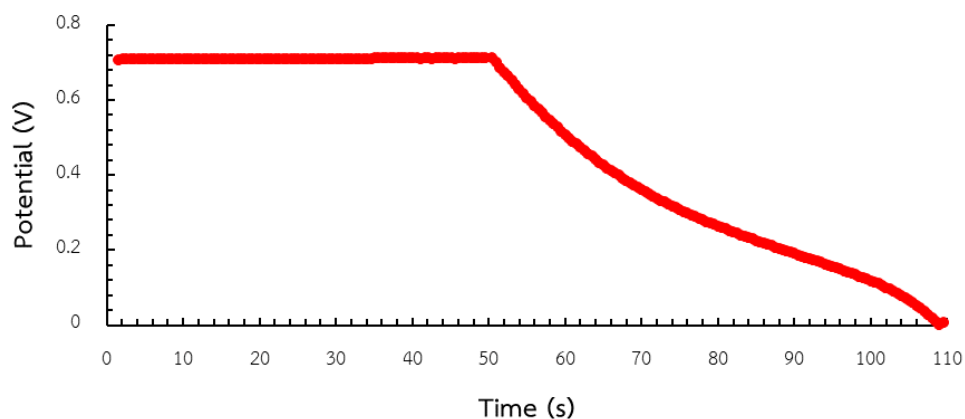
4.5 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการทำงานของตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีการต่อวงจรร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง



รูป 4.18 แผนภาพเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงต่อวงจรร่วมกับตัวเก็บประจุยิ่งยวด

จากรูป 4.18 แผนภาพแสดงการประกอบเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงร่วมกับตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่มีรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียมเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตเป็นขั้วไฟฟ้า โดยในการทดลองใช้เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง โดยส่วนประกอบของ

เซลล์ประกอบด้วย กระจกนำไฟฟ้า (FTO) เคลือบไททาเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งโลหะตัวนำ ประเภทของสีย้อมคือ N719 กระจกแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าร่วม และมีโซเดียมไอโอดेटเป็น สารละลายอิเล็กโทรไลต์ และส่วนของตัวเก็บประจุวดยิ่งนั้นประกอบด้วยวัสดุคอมพอสิตเคลือบลง บนกระจกนำไฟฟ้า มีสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 6 โมลต่อลิตรเป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ มีกระดาษกรองแก้วเป็นเยื่อเลือกผ่าน โดยเซลล์ประกอบรวมนี้มีลักษณะดังแสดงในรูป 4.18 โดยการทดสอบจะอัดประจุเข้าไปในตัวเก็บประจุวดยิ่งจากการต่อวงจรเข้ากับเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งกระบวนการอัดประจุด้วยเซลล์แสงอาทิตย์นั้นจะใช้แหล่งกำเนิดแสงจำลองความเข้ม 100 มิลลิวัตต์ ฉายลงบนเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงที่มีพื้นที่รับแสงขนาด 0.25 ตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 50 วินาทีจากนั้นจะทำการวัดความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุวดยิ่ง โดยเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่ระหว่างการอัดประจุด้วยเซลล์แสงอาทิตย์ คือโฟตอนจากแหล่งกำเนิดแสงจะเข้าไปกระตุ้นอิเล็กตรอนในสีย้อมจากสถานะพื้นไปสู่สถานะกระตุ้น และปล่อยอิเล็กตรอนไปสู่ชั้นนำไฟฟ้า (Conduction band) ของไททาเนียมไดออกไซด์จากนั้นจะเคลื่อนที่บนผิวของกระจกนำไฟฟ้า (FTO) ส่องจรภายนอกเข้าสะสมประจุในตัวเก็บประจุ (ชั้นด้านล่าง) ในขณะเดียวกันจะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ระหว่างอิเล็กโทรไลต์เพื่อฟื้นฟูอิเล็กตรอนภายในเซลล์ ส่วนอิเล็กตรอนที่ออกมาส่องจรภายนอกจะไปสะสมในตัวเก็บประจุวดยิ่ง จากรูป 4.19 จะเห็นกระบวนการคายประจุของตัวเก็บประจุวดยิ่งหลังจากทำการอัดประจุเป็นเวลา 50 วินาที โดยความต่างศักย์จะค่อยลดลงตามเอกลักษณะตามเอกลักษณะของตัวเก็บประจุยึ่งยวดเทียม (Pseudocapacitor) เมื่อทำการปิดแหล่งกำเนิดแสงจำลองและวัดความต่างศักย์คร่อมตัวเก็บประจุวดยิ่งจากการทดลองพบว่าตัวเก็บประจุวดยิ่งสามารถกักเก็บพลังงานไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงได้ภายในช่วงเวลา 60 วินาที [54, 55]



รูป 4.19 การคายประจุของตัวเก็บประจุวดยิ่งที่มีการต่อวงจรร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงภายใต้แหล่งกำเนิดแสงจำลอง (100 มิลลิวัตต์ต่อตารางเซนติเมตร)

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาการใช้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เพื่อพัฒนาเป็นวัสดุที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นขั้วไฟฟ้าในตัวเก็บประจุวดยิ่งโดยปรับปรุงค่าความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ (Specific capacitance) โดยทำการสังเคราะห์กราฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการของฮัมเมอร์โดยใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้นร่วมกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตเป็นสารออกซิไดซ์แล้วทำการรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ด้วยไฮดราซีนโมโนไฮเดรต จากนั้นทำการโดยศึกษาสัดส่วนโดยโมลของนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม ในอัตราส่วน 1:1:1, 1:3:1, 3:1:1 ตามลำดับ โดยทำการเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะกับนิกเกิล อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ และโคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ โดยพบว่าสัดส่วนโมลของ นิกเกิล : โคบอลต์ : อะลูมิเนียม ในเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์ คือ 1:1:1 ให้ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 839.85 ฟารัดต่อกรัม จากนั้นจึงทำการเติมรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์ลงในเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เป็นคอมพอสิตด้วยวิธีไฮโดรเทอร์มอลโดยใช้หม้ออบความดันสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะของคอมพอสิตรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีค่า 1,050.39 ฟารัดต่อกรัมที่ความหนาแน่นกระแส 1 แอมแปร์ต่อกรัม ซึ่งสูงกว่ารีดิวซ์กราฟีนออกไซด์และนิกเกิล โคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียวเนื่องจากในคอมพอสิตนั้นรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์มีประจุลบบนแผ่นโครงสร้าง และในส่วนของเลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์มีประจุบวกเมื่อทำการโซนิเคชันให้แผ่นทั้งสองแตกออกจากกันเมื่อนำสารมาผสมกันแล้วจะเกิดแรงดึงดูดกันระหว่างประจุบวกและลบ (Electrostatic self-assembly) ภายในคอมพอสิตทำให้เกิดการแทรกสอดกันระหว่างชั้นของวัสดุทั้งสอง ลดการรวมกลุ่มกันเอง จึงทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวที่มีผลต่อการเกิดจลนศาสตร์เพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะเพิ่มขึ้นตามด้วย จากนั้นได้ทำการศึกษาการอัดและคายประจุของวัสดุคอมพอสิตพบว่าผลสอดคล้องกับผลการทดลองจากไซคลิกโวลแทมโมแกรม จากนั้นทำการวัดความต้านทานระหว่างพื้นผิวของวัสดุด้วยอิมพีแดนซ์สเปกโทรสโคปีจากกราฟของ Nyquist พบว่าวัสดุคอมพอสิตสามารถเกิดการส่งผ่านของอิเล็กตรอนและไอออนภายในเนื้อสารที่ดี เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าตัวเก็บประจุวดยิ่ง

ประสิทธิภาพการทำงานร่วมกันของตัวเก็บประจุวดยิ่งที่ใช้รีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/นิกเกิลโคบอลต์ อะลูมิเนียม เลเซอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิตเป็นขั้วไฟฟ้าต่อวงจรร่วมกับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงพบว่าตัวเก็บประจุวดยิ่งสามารถรับและบรรจุพลังงานไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์เก็บไว้ในตัวเองได้เป็นเวลา 60 วินาทีและสามารถสนับสนุนการส่งพลังงานไฟฟ้าเมื่อความเข้มแสงอาทิตย์เปลี่ยนแปลงได้ภายในช่วงระยะเวลาหนึ่ง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การต่อวงจรร่วมกันระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสงกับตัวเก็บประจุวดยิ่งอาจจะมี ความไม่เป็นเนื้อเดียวกันเนื่องจากเกิดช่องว่างระหว่างแผ่นกระจกทั้งสองที่ประกบกัน (Air gap) ส่งผลต่อค่าความต้านทานอนุกรมภายในเซลล์จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการเก็บพลังงานของวัสดุร่วมระหว่างเซลล์แสงอาทิตย์กับตัวเก็บประจุวดยิ่งนี้ยังไม่สามารถเก็บพลังงานไฟฟ้าได้มากพอซึ่งจะต้องหาวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าทั้ง 2 ด้านเพื่อที่สามารถบังคับการส่งผ่านอิเล็กตรอนจากเซลล์แสงอาทิตย์เข้าสู่ตัวเก็บประจุวดยิ่งได้มากขึ้นและทำการขยายขนาดไปสู่อุตสาหกรรมต่อไป

รายการอ้างอิง

1. สว่างพฤกษ์, ม., นาโนเทคโนโลยีนวัตกรรมของตัวเก็บพลังงาน. วิศวกรรมสาร มก., 2556. 85: p. 9-26.
2. กอปรสิริพัฒน์, ด.ว., ตัวเก็บประจุยิ่งยวด (Supercapacitors) อุปกรณ์กักเก็บพลังงานไฟฟ้าที่กำลังมาแรง. TEMCA magazine, 2014. 21(2).
3. วิเศษสุวรรณภูมิ, ด.ศ., แกรฟีนวัสดุ 2 มิติ เพื่ออนาคต. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2560.
4. แต่ง แซ่แป้, ร.แ., การเตรียมสารประกอบดับเบิลไฮดรอกไซด์จากแมกนีเซียมและอะลูมิเนียม. 2549.
5. Gu, Z., J.J. Atherton, and Z.P. Xu, Hierarchical layered double hydroxide nanocomposites: structure, synthesis and applications. Chem Commun (Camb), 2015. 51(15): p. 3024-36.
6. Chartarrayawadee, W., Graphene (Part 2): Properties and some of its applications. Naresuan Phayao 2014. 7(1).
7. Papageorgiou, D.G., I.A. Kinloch, and R.J. Young, Graphene/elastomer nanocomposites. Carbon, 2015. 95: p. 460-484.
8. Jiang, L., et al., Study of water adsorption on graphene edges. RSC Advances, 2018. 8(20): p. 11216-11221.
9. Qahtani, s.a. Basic concept of Energy Bands. 2011 4/1/11 [cited 2018 18]; Available from: <http://phys4030.blogspot.com/2011/04/basic-concept-of-energy-bands.html>.
10. Yan, J., et al., Graphene homojunction: closed-edge bilayer graphene by pseudospin interaction. Nanoscale, 2016. 8(17): p. 9102-6.
11. Ray, S.C., Application and Uses of Graphene. 2015: p. 1-38.
12. Han, T.-H., et al., Graphene-based flexible electronic devices. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2017. 118: p. 1-43.
13. Chen, T. and L. Dai, Carbon nanomaterials for high-performance supercapacitors. Materials Today, 2013. 16(7-8): p. 272-280.

14. Kuilla, T., et al., Recent advances in graphene based polymer composites. *Progress in Polymer Science*, 2010. 35(11): p. 1350-1375.
15. Ray, S.C., Application and Uses of Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide. 2015: p. 39-55.
16. Saeed Bastani, M.K.D., Graphene-based UV-curable nanocomposite coatings, in *Carbon Nanotechnology*. 2014.
17. Yang, H., et al., Simple Synthesis of Graphene Oxide Using Ultrasonic Cleaner from Expanded Graphite. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014. 53(46): p. 17878-17883.
18. Sun, J., et al., One-step synthesis of magnetic graphene oxide nanocomposite and its application in magnetic solid phase extraction of heavy metal ions from biological samples. *Talanta*, 2015. 132: p. 557-63.
19. Pei, S. and H.-M. Cheng, The reduction of graphene oxide. *Carbon*, 2012. 50(9): p. 3210-3228.
20. Ali Gharib, L.V.F., Nader Noroozi Pesyan, Mina Roshani, A New Application of Nano-Graphene Oxide (NGO) as a Heterogeneous Catalyst in Oxidation of Alcohols Types. *American Institute of Science*, 2015. 1(4): p. 9.
21. Ellenbogen, M.S.H.J.C., Supercapacitors: A Brief Overview. MITRE Nanosystems Group, 2006: p. 1-41.
22. Nanotechnology, N.a. Self-Assembly and Multiple Phases of Layered Double Hydroxides Part 1 Available from: <http://what-when-how.com/nanoscience-and-nanotechnology/self-assembly-and-multiple-phases-of-layered-double-hydroxides-part-1-nanotechnology/>.
23. Xuefeng. A Revelation from the Structure of Graphite and Diamond. 2018 [cited 2018 20 May]; Available from: <https://www.lifechanyuan.org/2018/06/25/a-revelation-from-the-structure-of-graphite-and-diamond/>.
24. Maina, E., H. Wanyika, and A. Gacanja, Natural Pyrethrum Extracts Photo-stabilized with Organo Clays. *Journal of Scientific Research and Reports*, 2016. 9(7): p. 1-20.

25. Jensen, J., TRANSITION metal LDH for energy storage. 2015, Faculty Queensland University of Technology: Physics and Mechanical Engineering Science and Engineering
26. Tonelli, D., E. Scavetta, and M. Giorgetti, Layered-double-hydroxide-modified electrodes: electroanalytical applications. *Anal Bioanal Chem*, 2013. 405(2-3): p. 603-14.
27. Khan, A.I. and D. O'Hare, Intercalation chemistry of layered double hydroxides: recent developments and applications. *J. Mater. Chem.*, 2002. 12(11): p. 3191-3198.
28. Martina Meyn, K.B., and Gerhard Lagaly, Anion-Exchange Reactions of Layered Double Hydroxides. *Institut für Anorganische Chemie*, 1990. 29: p. 7.
29. Theiss, F.L., G.A. Ayoko, and R.L. Frost, Synthesis of layered double hydroxides containing Mg²⁺, Zn²⁺, Ca²⁺ and Al³⁺ layer cations by co-precipitation methods—A review. *Applied Surface Science*, 2016. 383: p. 200-213.
30. J. Rocha, M.d.A., V. Rives and M. A. Ulibarri, Reconstruction of layered double hydroxides from calcined precursors: a powder XRD and ²⁷Al MAS NMR study. *J. Mater. Chem.*, 1999. 9: p. 5.
31. Li, X., et al., Layered double hydroxides toward high-performance supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017. 5(30): p. 15460-15485.
32. Nitiwat. ตัวเก็บประจุ (Capacitor). [cited 2018 18 May]; Available from: <https://sites.google.com/site/nithwat023new/taw-keb-pracu-capacitors>.
33. EkriirkeE. Supercapacitor. 2018 [cited 2018 8 June]; Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>.
34. Jost, K., G. Dion, and Y. Gogotsi, Textile energy storage in perspective. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014. 2(28): p. 10776.
35. บุญยธรรมมา, จ. การทำงานของตัวเก็บประจุ. [cited 2018 8 June]; Available from: <http://www.rmutphysics.com/charud/specialnews/2/hydraulic-pump/hydraulic-pump11.htm>.
36. ไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์, in กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. กระทรวงพลังงาน.
37. Solar cell คืออะไร. p. 1-19.

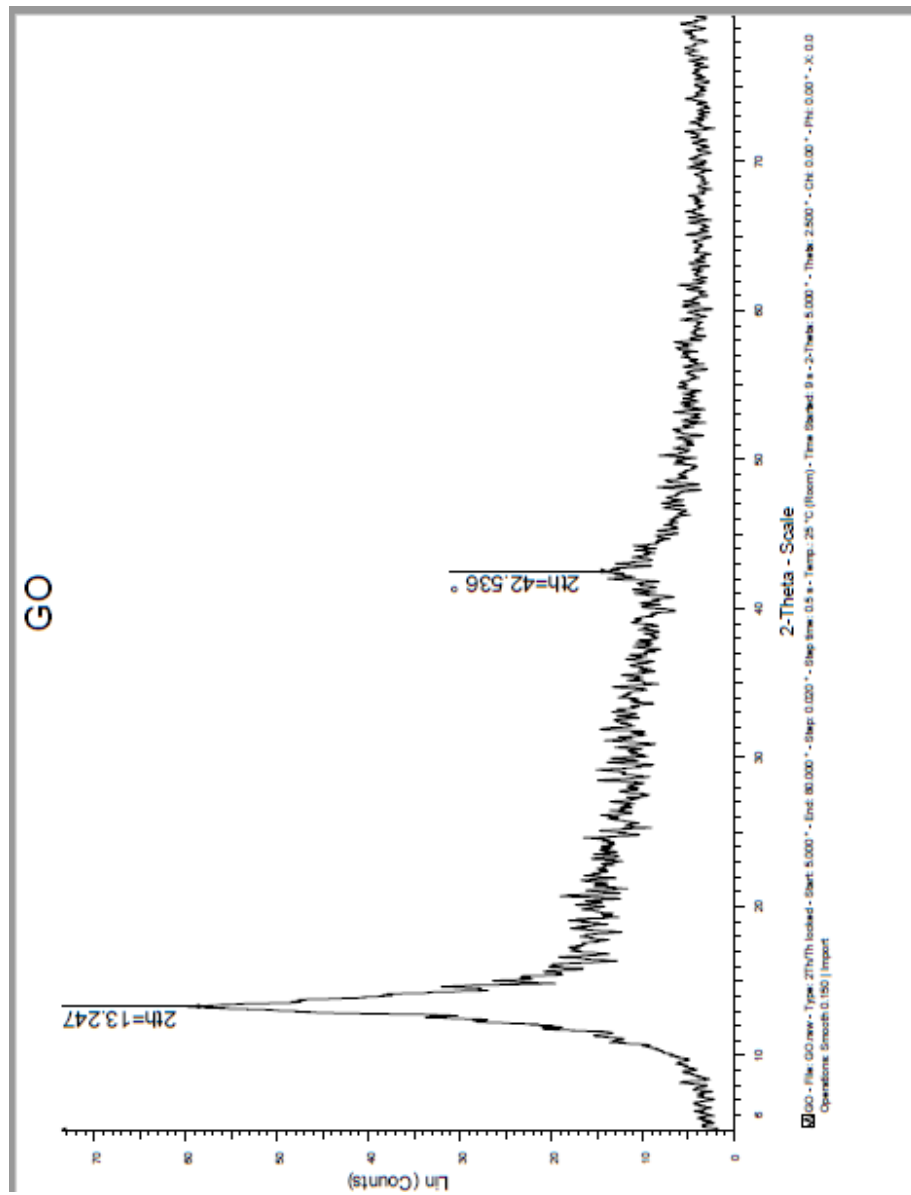
38. Kurayami. P-N Junction. 2014 [cited 2018; Available from: https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B8%A3%E0%B8%AD%E0%B8%A2%E0%B8%95%E0%B9%88%E0%B8%AD_p-n.
39. แก้วอินทร์, ว.พ.ท.ส.ส.แ.แ.ท., เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดสีย้อมไวแสง. วารสารวิชาการ ม.อบ., 2550. 9(2): p. 14-31.
40. Lv, J. and T. Liang, Nanoporous graphene obtained by hydrothermal process in H₂O₂ and its application for supercapacitors. Chemical Physics Letters, 2016. 659: p. 61-65.
41. Zang, X., et al., Nickel hydroxide nanosheets supported on reduced graphene oxide for high-performance supercapacitors. Journal of Alloys and Compounds, 2017. 691: p. 144-150.
42. Bai, C., et al., Facile one-step synthesis of nanocomposite based on carbon nanotubes and Nickel-Aluminum layered double hydroxides with high cycling stability for supercapacitors. J Colloid Interface Sci, 2016. 480: p. 57-62.
43. Zhong, Y., et al., Supercapacitive behavior of electrostatic self-assembly reduced graphene oxide/CoAl-layered double hydroxides nanocomposites. Journal of Alloys and Compounds, 2016. 669: p. 146-155.
44. Huang, Z., et al., Exfoliation-restacking synthesis of coal-layered double hydroxide nanosheets/reduced graphene oxide composite for high performance supercapacitors. Electrochimica Acta, 2015. 152: p. 117-125.
45. Wimalasiri, Y., et al., Assembly of Ni-Al layered double hydroxide and graphene electrodes for supercapacitors. Electrochimica Acta, 2014. 134: p. 127-135.
46. Wang, G., One-Step Hydrothermal Synthesis of Nickel/Cobalt Double Hydroxide Composite Containing Reduced Graphene Oxide as High Performance Electrode Material for Supercapacitor. International Journal of Electrochemical Science, 2017: p. 3589-3596.
47. Hsu, C.-Y., et al., A dye-sensitized photo-supercapacitor based on PProDOT-Et₂ thick films. Journal of Power Sources, 2010. 195(18): p. 6232-6238.

48. Skunik-Nuckowska, M., et al., Integration of solid-state dye-sensitized solar cell with metal oxide charge storage material into photoelectrochemical capacitor. *Journal of Power Sources*, 2013. 234: p. 91-99.
49. Zheng, S., et al., Graphene-based materials for high-voltage and high-energy asymmetric supercapacitors. *Energy Storage Materials*, 2017. 6: p. 70-97.
50. Daud, M., et al., Graphene/layered double hydroxides nanocomposites: A review of recent progress in synthesis and applications. *Carbon*, 2016. 104: p. 241-252.
51. Gao, Z., et al., Graphene Nanosheet/Ni²⁺/Al³⁺+Layered Double-Hydroxide Composite as a Novel Electrode for a Supercapacitor. *Chemistry of Materials*, 2011. 23(15): p. 3509-3516.
52. Su, W., et al., Novel synthesis of RGO/NiCoAl-LDH nanosheets on nickel foam for supercapacitors with high capacitance. *RSC Advances*, 2016. 6(114): p. 113123-113131.
53. Xu, J., et al., Reduced graphene oxide/Ni(1-x)Co(x)Al-layered double hydroxide composites: preparation and high supercapacitor performance. *Dalton Trans*, 2014. 43(30): p. 11667-75.
54. Xiaobao Xu, † Shaohui Li, ^, † Hua Zhang, † Yan Shen, † Shaik M. Zakeeruddin, ‡ Michael Graetzel, ‡ Yi-Bing Cheng, †, § and Mingkui Wang*, †, A Power Pack Based on Organometallic Perovskite Solar Cell and Supercapacitor. *American Chemical Society*, 2015. 9: p. 1782-1787.
55. Bagheri, N., et al., Combination of Asymmetric Supercapacitor Utilizing Activated Carbon and Nickel Oxide with Cobalt Polypyridyl-Based Dye-Sensitized Solar Cell. *Electrochimica Acta*, 2014. 143: p. 390-397.

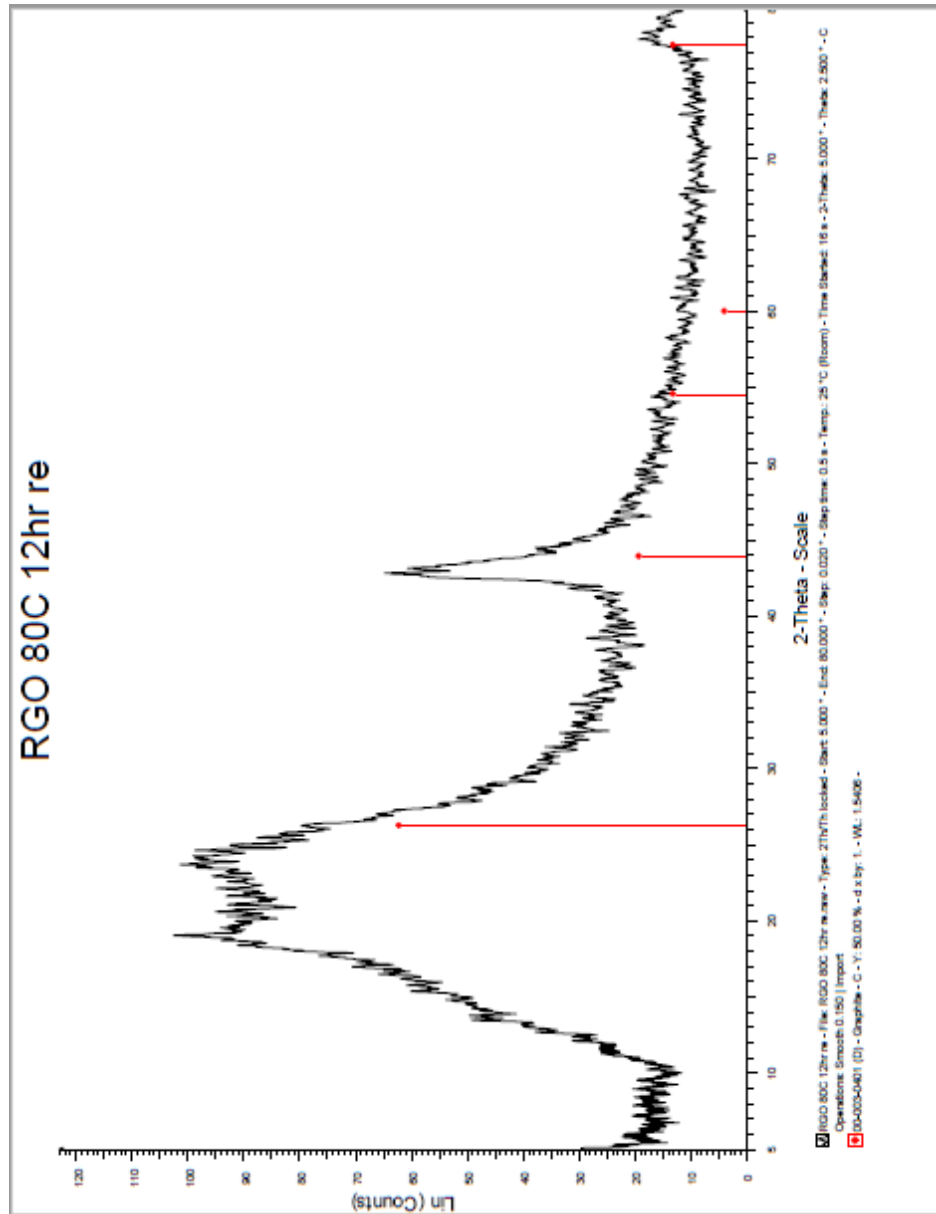
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

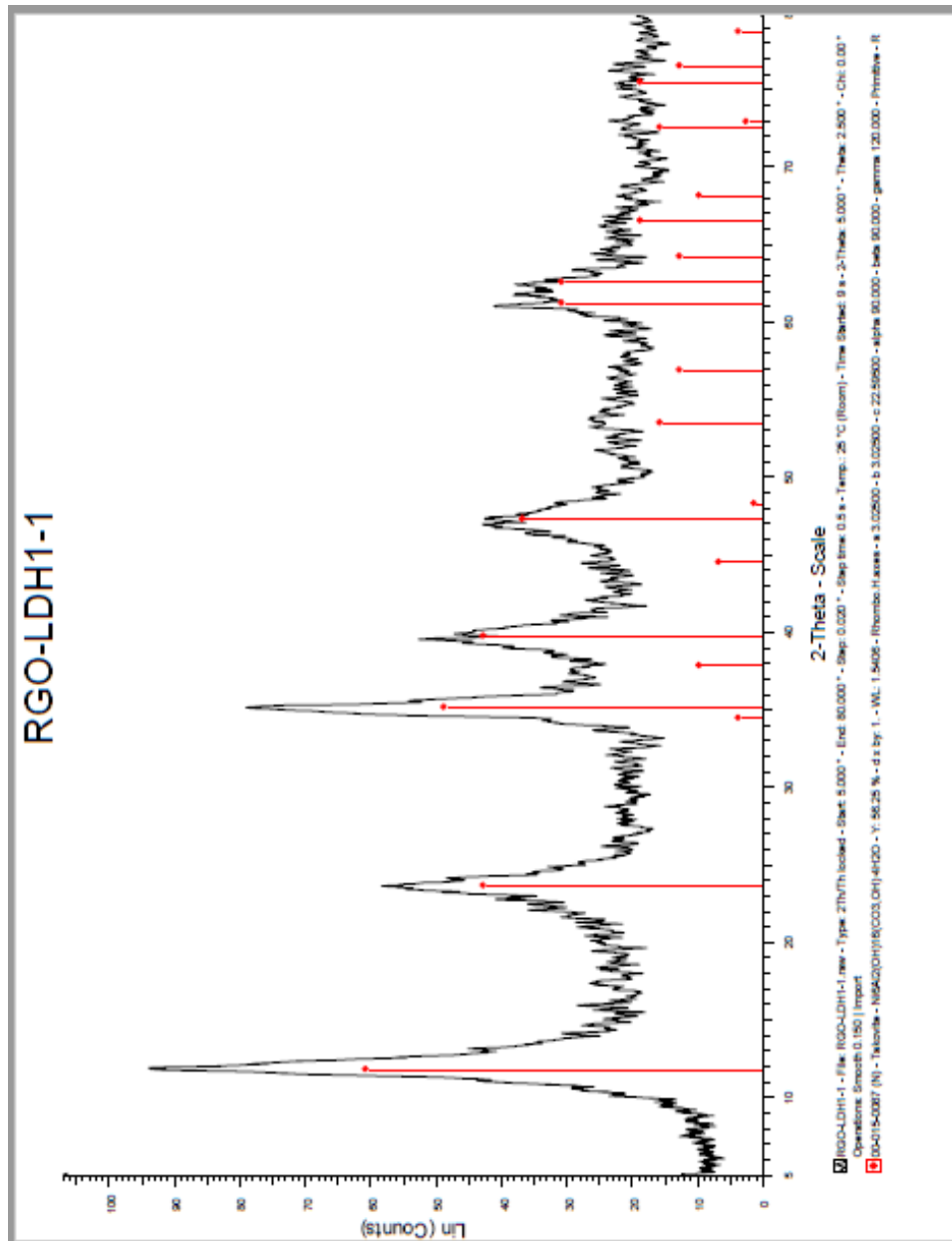
สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของกราฟีนออกไซด์



สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์



สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของรีดิวซ์กราฟีนออกไซด์/เลเยอร์ดับเบิลไฮดรอกไซด์คอมพอสิต



ภาคผนวก ข .

สมการคำนวณความจุไฟฟ้าจำเพาะ

$$c = \frac{\int i v d v}{2 \mu m \Delta V}$$

i คือ กระแสในกราฟไซคลิกโวลแทมโมแกรม

v คือ ความต่างศักย์ในไซคลิกโวลแทมโมแกรม

μ คือ อัตราการสแกน

m คือ มวลของสาร

ΔV คือ ความต่างศักย์ที่เกิดการคายประจุ



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐภพ เกษรเทียน เกิดวันที่ 29 มกราคม พ.ศ.2536 สำเร็จการศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียน เบญจมราชูทิศ ราชบุรี ในปีการศึกษา 2553 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2557 เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2558 และเข้าร่วมประชุมวิชาการ The International Conference on Engineering and Applied Sciences ที่ กรุงเทพมหานคร เมื่อวันที่ 22-24 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2561 นำเสนอผลงานแบบโปสเตอร์ในหัวข้อเรื่อง “ REDUCED GRAPHENE OXIDE/LAYERED DOUBLE HYDROXIDE COMPOSITE AS SUPERCAPACITOR FOR STABLE-VOLTAGE SOLAR CELL ”



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY