



การใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อเตรียมซิงค์ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์และ
คอปเปอร์(II)ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นวัสดุเชิงประกอบผสมเพื่อเพิ่ม
ศักยภาพตัวเก็บประจุยิ่งยวด

สันติ รัตนวีรนนท์
บรรจง แก้ววิเศษกุล

สนับสนุนงบประมาณโดย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ประจำปีงบประมาณ 2561

Efficiency Development of Hybrid Supercapacitors Using Reduced Graphene Oxide (rGO)/ZnO and Reduced Graphene Copper (II) Oxide (CuO) for High-Power Batteries

Santi Rattanaveeranon
Bunjong Keawwisutkul

Granted by Rajamangala University of Technology Rattanakosin
Fiscal 2018



กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จล่วงจนถึงวันนี้ได้เพราะได้รับความอนุเคราะห์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ที่สนับสนุนทุนวิจัยและเครื่องมือวิจัยขั้นสูงในการศึกษาวิจัยในโครงการจนสำเร็จล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคุณวราภรณ์ โปร่งมณี นักศึกษาปริญญาเอก สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้การคำปรึกษาเทคนิคต่าง ๆ ในการทำวิจัยจนโครงการวิจัยนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำ
สิงหาคม 2562



บทคัดย่อ

รหัสโครงการ	KNO-13/2561
ชื่อโครงการ	การใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อเตรียมซิงค์ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์และคอปเปอร์(II)ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นวัสดุเชิงประกอบผสมเพื่อเพิ่มศักยภาพตัวเก็บประจุยิ่งยวดการใช้คลื่นไมโครเวฟเพื่อเตรียมซิงค์ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์และคอปเปอร์(II)ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เป็นวัสดุเชิงประกอบผสมเพื่อเพิ่มศักยภาพตัวเก็บประจุยิ่งยวด
ชื่อผู้วิจัย	นายสันติ รัตน์วีรนนท์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บรรจง แก้ววิเศษกุล

จุดประสงค์ของโครงการนี้เพื่อนำเอาคุณสมบัติที่ดีของวัสดุประกอบผสมระหว่าง ZnO/rGO และ CuO/rGO มาประดิษฐ์เป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อใช้เป็นแบตเตอรี่ประสิทธิภาพสูง การตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของแกรฟีนออกไซด์(GO) rGO ZnO/rGO และ CuO/rGO ถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี (X-ray diffractometer : XRD) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องดูคลื่นรังสีอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectroscopy : FT-IR) เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวเชิงความร้อน (Thermogravimetry analyzer : TGA) และเครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer, Emmett and Teller : BET) สมบัติทางไฟฟ้าเคมีของวัสดุผสมนี้มีความจุไฟฟ้าจำเพาะเท่ากับ ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะเท่ากับ 460.26 ± 4.25 F/g ค่าความหนาพลังงานเท่ากับ 18.36 kWh/kg และค่ากำลังไฟฟ้า 25.23 kW/kg นับว่าวัสดุผสมนี้เหมาะสำหรับการผลิตเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อใช้เป็นแบตเตอรี่ได้ในอนาคต

คำสำคัญ: แกรฟีนออกไซด์ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/ซิงออกไซด์ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/คอปเปอร์ออกไซด์ สมบัติทางไฟฟ้าเคมี

E-mail Address : santi.r@rmutr.ac.th
ระยะเวลาโครงการ : ตุลาคม 2560 – กันยายน 2562

Abstract

Code of project: Efficiency Development of Hybrid Supercapacitors Using Reduced Graphene Oxide(rGO)/ZnO and Reduced Graphene Copper(II) Oxide(CuO) for High-Power Batteries

Research name: Mr.Santi Rattanaveeranon
Asst. Prof. Bunjong Keawwisutkul

The purpose of this project is to bring the good features of the composite materials between ZnO/rGO and CuO/rGO to create a supercapacitor for use as a high performance battery. Detection of characteristics of graphene oxide (GO) rGO ZnO/rGO and CuO/rGO were analyzed with a chemical analysis instruments such as X-ray diffractometer (XRD) scanning electron microscope (SEM), Infrared absorption spectrometer (FT-IR) and thermal decomposition analyzer (thermogravity analyzer: TGA) and specific surface area measuring instruments (Brunauer, Emmett and Teller: BET). The electricalchemistry properties of this composite materials have a specific capacitance equal to 460.26 ± 4.25 F / g. The energy density is 18.36 kWh/kg and the power value is 25.23 kW/kg. This composite materials are suitable for producing supercapacitors for use as batteries in the future.

แกรฟีนออกไซด์ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/ซิงออกไซด์ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/คอปเปอร์ออกไซด์ สมบัติทางไฟฟ้าเคมีมี

Keyword: Graphene oxide, reduce graphene oxide/zinc oxide, reduce graphene oxide/copper oxide, electrochemical

E-mail Address : santi.r@rmutr.ac.th

Period of project : October 2017 - September 2019

สารบัญ

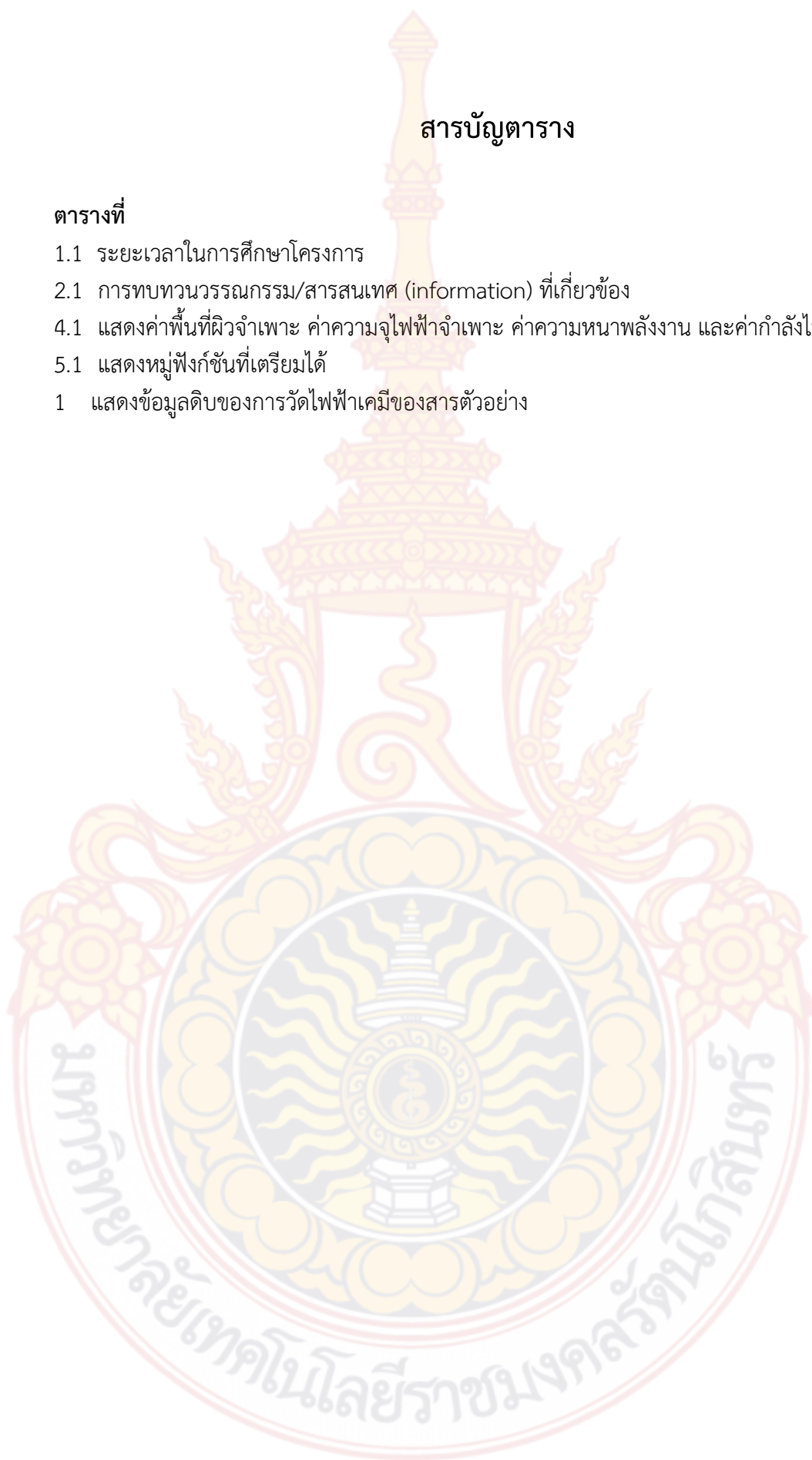
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการโครง	5
1.3 ขอบเขตของโครงการ	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
1.5 การดำเนินงานของโครงการ	6
1.6 ระยะเวลาในการดำเนินงานโครงการ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	8
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	8
2.7 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการ	28
3.1 วิธีการเตรียมสารตัวอย่าง	28
3.1.1 วิธีการสังเคราะห์แกรฟีนออกไซด์	29
3.1.2 วิธีการสังเคราะห์วัสดุรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์	29
3.1.3 วิธีการสังเคราะห์วัสดุผสมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์อนุภาคระดับนาโนเมตร	30
3.1.4 วิธีการสังเคราะห์วัสดุผสมคอปเปอร์ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์	31
3.1.5 การเตรียมฟิล์มบางชั้นแอคทีฟ (active film layer)	33
การเตรียมฟิล์มบนขั้วไฟฟ้า (แผ่นสแตนเลส)	
การศึกษาพฤติกรรมทางไฟฟ้า (electrochemistry) ของสารตัวอย่างเมื่ออยู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์	35
3.2 สถานที่ทำการทดลอง	35
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลอง	36
4.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันแกรฟีนออกไซด์ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ วัสดุคอมโพสิต ZnO/rGO และ CuO/rGO	36

4.2 การศึกษาองค์ประกอบของโลหะออกไซด์-แกรฟีนด้วยเทคนิคการสลายเชิงความร้อน	36
4.3 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะเฉพาะของแกรฟีนออกไซด์	37
4.4 การศึกษาสารประกอบทางเคมีและความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD	37
4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมี	37
บทที่ 5 การอธิบายผลและข้อสรุป	41
5.1 การอธิบายผลและข้อสรุป	41
5.2 ข้อเสนอแนะ	44
บรรณานุกรม	46
ประวัติผู้วิจัย	53
ภาคผนวก	54
ภาคผนวก ก	55
ภาคผนวก ข	58



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาในการศึกษาโครงการ	6
2.1 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง	15
4.1 แสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ ค่าความหนาพลังงาน และค่ากำลังไฟฟ้า	40
5.1 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่เตรียมได้	41
1 แสดงข้อมูลดิบของการวัดไฟฟ้าเคมีของสารตัวอย่าง	55



สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	กราฟของราโณเนเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นกำลังงานและความหนาแน่นพลังงานของตัวเก็บพลังงานชนิดต่างๆ	2
2.1	(a) รูปวาดและภาพถ่ายแสดงลักษณะทางกายภาพของแกรไฟต์และแกรฟีน (b) โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลของแผ่นแกรฟีนที่ถ่ายจากกล้อง scanning tunnelling microscope, SEM (c) โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลของรังผึ้ง (d) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของแกรฟีน (e) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) ของแกรฟีน	7
2.2	(a) และ (b) ภาพถ่ายของสารละลายแกรฟีนออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน (c) ภาพจาก atomic force microscope, AFM, แสดงลักษณะของแผ่นแกรฟีนตามภาพ height image	9
2.3	(a) ภาพถ่ายของสารละลายแกรฟีนออกไซด์ (b) ภาพถ่ายจากกล้อง transmission electron microscope, TEM, ของแกรฟีน (c) และ (d) ภาพจาก atomic force microscope, AFM, แสดงลักษณะของแผ่นแกรฟีนตาม height image โดยกราฟด้านล่างของแต่ละภาพแสดง height profile ของแผ่นแกรฟีนตามเส้นสีดำที่ลากผ่านซึ่งพบว่ามีความหนาของแกรฟีนประมาณ 1-2 nm	10
2.4	(a) และ (b) แสดงเส้นสเปกตรัมที่ได้จาก Raman spectroscopy ของแกรฟีนและแกรไฟต์ที่มีจำนวนชั้นของแกรฟีนที่แตกต่างกัน (a) ในช่วงสแกน $1250-1650\text{ cm}^{-1}$ และ (b) ในช่วงสแกน $2500-2800\text{ cm}^{-1}$	10
2.5	(a) ภาพถ่ายแสดงการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยการใช้สก็อตเทป (b) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของแกรไฟต์ที่มีจำนวนชั้นของแกรฟีนที่ต่างกันและแกรฟีนซึ่งสามารถคัดแยกความหนาของแกรฟีนได้ดีให้เห็น	11
2.6	(a) และ (b) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ที่เตรียมด้วยวิธีการปลูกแกรฟีน (c) ภาพจาก AFM แสดงลักษณะของแผ่นแกรฟีนตาม height image ลูกศรสีขาวแสดงรอยต่อของแผ่น แกรฟีนแต่ละแผ่นที่โตขึ้น (d) ภาพถ่ายของฟิล์มแกรฟีนบนกระจกสไลด์แสดงถึงความโปร่งใส	12
2.7	แสดงตัวอย่างการปลูกผลึกของอนุภาค Bi ลงบนแผ่นริตซ์แกรฟีนออกไซด์เพื่อใช้เป็นวัสดุวงจรวในการตรวจปริมาณไอเคมีของไฮดรอกซิน	13
2.8	ตัวอย่างไซคลิกโวลแทมเมตริกที่สังเคราะห์ขึ้นตามลำดับ (ก) การเรียงตัวของคาร์บอนแบบมีลำดับชั้นและ (B) $\text{MnO}_2/\text{C}-240$ ที่อัตราการสแกนต่างๆตั้งแต่ 2 ถึง 100 mVs^{-1} ที่แรงดันตัดเป็น 1.0 และ 0.0 V เทียบขั้วไฟฟ้า SCE	14
2.9	ตัวอย่างกัลวานอสแตติกของ $\text{MnO}_2/\text{C}-240$ ที่มีแรงดันไฟเปิด 1.0 และ 0.0 เทียบกับ SCE ที่ความหนาแน่นของกระแสต่างๆตั้งแต่ 0.2 ถึง 5.0 Ag^{-1} เทียบขั้วไฟฟ้า	15

3.1	แสดงการผสมระหว่างกรดซัลฟิวริกเข้มข้นกับโซเดียมไนโตรทเทรทไรต์และผงโปรแทสเซียมเปอร์แมงกาเนส (ใน ice bath)	28
3.2	การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างผงแกรไฟต์กับกรดซัลฟิวริกเข้มข้นกับโซเดียมไนโตรทเทรทและผงโปรแทสเซียมเปอร์แมงกาเนส	29
3.3	แสดงการเตรียมรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ด้วยวิธีการรีฟลักซ์เป็นเวลา 12 ชั่วโมง	30
3.4	การเตรียมซิงค์ออกไซด์/รีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ	31
3.5	แสดงการกรองสารตัวอย่างด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ	31
3.6	การเตรียมคอปเปอร์ออกไซด์/รีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ	32
3.7	แสดงการกรองสารตัวอย่างด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ	32
3.8	แสดงรูปตัวอย่างขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัยนี้ a) ขั้วไฟฟ้าที่ใช้ทดลอง b) ขั้วไฟฟ้าแกรฟไฟต์คาร์บอนที่เคลือบด้วยวัสดุวงว (active material)	33
3.9	แสดงรูปตัวอย่างการเคลือบด้วยฟิล์ม a) ZnO/rGO NPs และ b) CuO/rGO แต่ละชั้น	34
3.10	แสดงตัวอย่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดต้นแบบ	35
4.1	แสดงหมู่ฟังก์ชันแกรไฟน์ออกไซด์ รีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ วัสดุคอปเปอร์ออกไซด์ ZnO/rGO และ CuO/rGO	36
4.2	แสดงองค์ประกอบของโลหะออกไซด์-แกรไฟน์ด้วยเทคนิคการสลายเชิงความร้อน	36
4.3	a) รีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์กำลังขยาย 30000 เท่า b) รีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์กำลังขยาย 30000 เท่า c) การปลูกผลึกคอปเปอร์ออกไซด์บนแผ่นรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์ d) การปลูกผลึกซิงค์ออกไซด์บนแผ่นรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์	37
4.4	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กับความเข้มรังสีเอกซ์เพื่อยืนยันสารประกอบในสารตัวอย่าง	37
4.5	แสดงกราฟไซคลิกโวลทแกรมของวัสดุคอปเปอร์ออกไซด์ GO, rGO, ZnO/rGO และ CuO/rGO	38
4.6	แสดงควมมีเสถียรภาพของกราฟไซคลิกโวลทแกรมในช่วงความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด CuO/rGO และ ZnO/rGO ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบลูกผสม	38
4.7	แสดงการชาร์จประจุและการคายประจุของตัวต้นแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด CuO/rGO และ ZnO/rGO ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบลูกผสมซึ่งแปรค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวเก็บประจุต้นแบบ	39
4.8	แสดงควมมีเสถียรภาพของวัสดุคอปเปอร์ออกไซด์CuO/rGO และ ZnO/rGO ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบลูกผสม	39

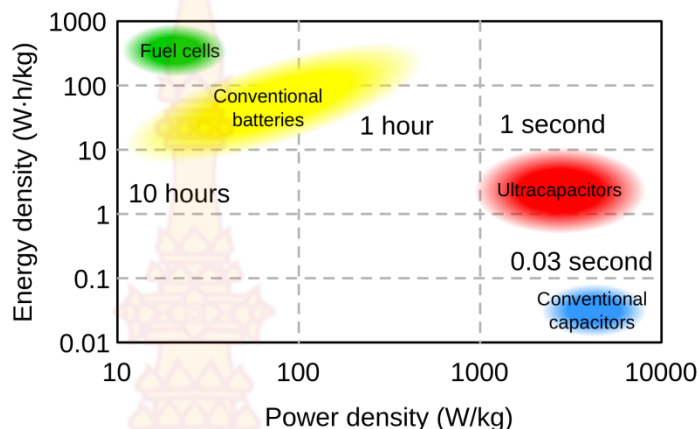
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นประเทศผู้นำเข้าพลังงานโดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันดิบถึง 816 พันบาร์เรล/วัน [1] ซึ่งพลังงานฟอสซิลนี้จะก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนและการขาดแคลนน้ำมันจากฟอสซิลทำให้ภาครัฐหันไปสนใจพลังงานทางเลือกที่ยั่งยืน ลดการปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์สู่สิ่งแวดล้อม เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานลม กำลังได้รับความสนใจอย่างมาก เพื่อนำพลังงานทางเลือกเหล่านั้นมาใช้จำเป็นต้องมีตัวเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อเก็บพลังงานมาในช่วงเวลาที่ไม่มีแสงอาทิตย์ และไม่มีลม เป็นต้น ตัวเก็บพลังงานชนิดตัวเก็บ ประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด มีข้อดีเหนือกว่าแบตเตอรี่ คือสามารถบรรจุและคายพลังงานได้อย่างรวดเร็วในบทความนี้จะเปรียบเทียบคุณสมบัติ และกลไกการเก็บพลังงานของตัวเก็บ ประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดกับตัวเก็บพลังงานชนิดอื่น ความก้าวหน้าด้านงานวิจัยและพัฒนาของไทยเทียบกับต่างชาติและมูลค่าเชิงพาณิชย์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด เช่น แกร์ฟีน แมงกานีสออกไซด์ และพอลิอะนิลีน ที่กำลังได้รับความสนใจ และถูกใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด

เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดได้รับความสนใจจากประชาคมวิจัยเป็นอย่างมาก เพราะสามารถเก็บพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักของตัวเก็บประจุได้สูง เนื่องจากเก็บประจุไฟฟ้าเคมีที่พื้นผิวของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้าของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวด นอกจากนั้นอายุการใช้งานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดยังยาวนานกว่าแบตเตอรี่ เนื่องจากในการบรรจุพลังงานแต่ละครั้งไม่มีปฏิกิริยาเคมีข้างเคียงเกิดขึ้น อีกทั้งอัตราเร็วในการบรรจุพลังงาน และคายพลังงานของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดยังสูงกว่าแบตเตอรี่อีกด้วยเพราะว่าไม่ขึ้นกับจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมี [2] รูปที่ 1 เปรียบเทียบความหนาแน่นกำลังงาน (Power density) และความหนาแน่นพลังงาน (Energy density) ของอุปกรณ์ตัวเก็บพลังงานชนิดต่างๆ [3] พบว่าตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมียิ่งยวดจะมีค่าความหนาแน่นกำลังงานสูงกว่าเซลล์เชื้อเพลิงและแบตเตอรี่ โดยเซลล์เชื้อเพลิงถือเป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีที่เก็บไว้ในพันธะเคมีของเชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้าอาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีของเชื้อเพลิงบนผิวหน้าของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นของแข็ง [4, 5] เมื่อพันธะเคมีของโมเลกุลเชื้อเพลิงแตกออกให้อิเล็กตรอนหรือพลังงานไฟฟ้า โดยข้อดีของเซลล์เชื้อเพลิงคือมีความหนาแน่นของพลังงานสูงสุด เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ตัวเก็บพลังงานชนิดอื่น แต่อย่างไรก็ตามการทำให้พันธะเคมีของโมเลกุลเชื้อเพลิงแตกออกจะต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น โลหะ พลาตินัม ที่มีราคาแพงและจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นบนผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาค่อนข้างช้า ส่งผลให้ความหนาแน่นของกำลังงานต่ำ ส่งผลให้การนำเซลล์เชื้อเพลิงมาใช้เชิงพาณิชย์ยังไม่คุ้มค่า และไม่แพร่หลายมากนัก



รูปที่ 1.1 กราฟของราโกเนเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกำลังงานและความหนาแน่นพลังงานของตัวเก็บพลังงานชนิดต่างๆ [2]

แบตเตอรี่เป็นอุปกรณ์ที่เก็บพลังงานโดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ เช่น ลิเทียมไอออนแบตเตอรี่ เมื่อบรรจุพลังงาน ปฏิกิริยารีดอกซ์จะเกิดขึ้นโดยลิเทียมไอออนที่อยู่ในผลึกของโลหะออกไซด์ เช่น โคบอลต์ออกไซด์ เป็นต้น จะรับอิเล็กตรอนกลายเป็นโลหะลิเทียมในขั้วไฟฟ้าของแกรไฟต์ เป็นต้น ในขณะที่ยกจ่ายพลังงานจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน คือ โลหะลิเทียมสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นลิเทียม ไอออนกลับไปยังขั้วไฟฟ้าที่มีโลหะออกไซด์อยู่ถึงแม้ว่าแบตเตอรี่จะให้ความหนาแน่นพลังงานสูงแต่ความหนาแน่นกำลังงานยังค่อนข้างต่ำ ส่งผลให้ใช้เวลาในการบรรจุพลังงานช้า เพราะจลนศาสตร์ของปฏิกิริยารีดอกซ์ที่เกิดขึ้นยังค่อนข้างช้านอกจากนั้นแบตเตอรี่ยังมีเสถียรภาพต่ำ บ่อยครั้งพบปัญหาการระเบิดของแบตเตอรี่ [6]

ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดเป็นที่รู้จักกันในนามตัวเก็บประจุเคมีไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์เก็บพลังงานไฟฟ้าเคมีสำหรับการใช้งานในระบบสำรองพลังงาน, อุปกรณ์พลซกล้องถ่ายภาพ, อุปกรณ์พกพาสำหรับผู้บริโภคและรถยนต์ไฟฟ้า/ไฮบริด[1-4] ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาความพยายามในการวิจัยจำนวนมากได้รับการชี้แนะให้พัฒนาโนสตาปัตยกรรมของวัสดุสำหรับตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดโดยอาศัยคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ของพวกมันเช่นพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ความจุในตัวเก็บประจุเคมีไฟฟ้าสามารถเกิดขึ้นได้จากการชาร์จและการคายประจุของชั้นไฟฟ้าชนิดสองชั้นหรือจากปฏิกิริยารีดอกซ์ฟาราเดอิกที่เรียกว่าเป็น ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดเสมือน (pseudocapacitance) วัสดุคาร์บอนพื้นฐาน เช่น ถ่านกัมมันต์, คาร์บอนนาโนทิวบ์, และแกรฟีน) ได้รับการยอมรับว่าเป็นวัสดุที่มีแนวโน้มสำหรับตัวเก็บประจุสองชั้นด้วยไฟฟ้าเคมีเนื่องจากมีต้นทุนต่ำ [7, 10] แต่มีความจุต่ำ จึงใช้โลหะออกไซด์บางชนิดผสมเข้าไปเช่น RuO_2 และ IrO_2 ของวัสดุออกไซด์ของโลหะมีตระกูลถูกใช้เป็นวัสดุอิเล็กโทรดแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดเสมือนที่มีประสิทธิภาพที่น่าทึ่ง [11, 12] อย่างไรก็ตามการใช้โลหะดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายสูง (RuO_2 และ IrO_2) จะคอยขัดขวางการใช้งานที่กว้างขวาง ดังนั้นจึงมีความสนใจมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเร็วๆ นี้มุ่งเน้นไปที่การเปลี่ยนแปลงโลหะออกไซด์ราคาถูกเช่นนิกเกิลออกไซด์ (NiO) [13], โคบอลต์ออกไซด์ (Co_3O_4) [14],

วาเนเดียมออกไซด์ (V_2O_5) [15], แมงกานีสออกไซด์ (MnO_2) [16] และคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO) [17] อย่างไรก็ตามขนาดเล็กของโครงสร้างนาโนไม่เหมาะสำหรับการแพร่กระจายของไอออนที่ถูกละลาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการใช้ความหนาแน่นกระแสไหลขนาดใหญ่ ดังนั้นพื้นที่ผิวทั้งหมดไม่สามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพ ในขณะที่วัสดุในกลุ่มเมโซพอร์ัส (Mesoporous > 2 nm) เป็นที่นิยมสำหรับการแพร่กระจายของไอออนด้วยความเร็วสูงในรูพรุนดังกล่าว ซึ่งจะทำให้ความหนาแน่นกระแสไหลสูง จากนั้นก็ยังคงเป็นความท้าทายในการสังเคราะห์โครงสร้างนาโนออกไซด์ของโลหะทรานซิชันสำหรับตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดที่มีสัณฐานวิทยาแบบเมโซพอร์ัส

การใช้โลหะอนุภาคระดับนาโนเมตรทำให้สมบัติทางกายภาพดีขึ้น ไม่ว่าจะเป็นสมบัติทางแสง สมบัติทางไฟฟ้า สมบัติเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี (electrocatalytic) สมบัติเหล่านี้สามารถทำให้ศักยภาพทางด้านไฟฟ้าเคมีด้านเซ็นเซอร์ (sensor) และด้านไบโอเซ็นเซอร์ (biosensor) ดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามโลหะอนุภาคระดับนาโนเมตรที่อยู่เดี่ยวไม่มีความเสถียรบนขั้วไฟฟ้า ดังนั้นจึงมีการพัฒนาวิธีการต่างเพื่อให้โลหะระดับนาโนเมตรที่เตรียมได้มีความเสถียรเพื่อสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้น ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการใช้คาร์บอนนาโนทิวป์เป็นฐานรองให้โลหะระดับนาโนได้เกาะยึด เมื่อเร็วๆนี้แกรฟีนเป็นวัสดุนาโนสองมิติ (2D-nanomaterial) ซึ่งเป็นวัสดุที่เป็นแผ่นบางของคาร์บอนอะตอม เป็นวัสดุที่มีสมบัติทางไฟฟ้าที่เคมีที่ตีเยี่ยมซึ่งได้รับความสนใจอย่างมาก สมบัติหนึ่งของแกรฟีนคือมีพื้นที่ผิวสูงมาก(เปรียบเทียบกับคาร์บอนนาโนทิวป์) ดังนั้นแกรฟีนซึ่งอยู่กลุ่มตระกูลคาร์บอนจึงเป็นวัสดุที่เหมาะสมอย่างยิ่ง (วัสดุที่มีความเสถียรสูง) ในการปลูกผลึกโลหะอนุภาคนาโนเมตรบนพื้นผิวของแกรฟีน แกรฟีนออกไซด์ (graphene oxide) คือหมู่อนุพันธ์ของออกซิเจนที่เกาะพื้นผิวของแกรฟีน ถูกใช้เป็นสารตั้งต้นของการเตรียมวัสดุผสมแกรฟีน-โลหะอนุภาคระดับนาโนเมตร ซึ่งข้อดีของการเตรียมด้วยวิธีการนี้คือมีค่าใช้จ่ายที่ไม่แพง ขั้นตอนการเตรียมที่ไม่ยุ่งยากซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในรูปสารละลายที่มีหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนเกาะอยู่ กล่าวโดยสรุปสมบัติทางไฟฟ้าของแกรฟีนสามารถควบคุมได้ง่ายด้วยอนุภาคโลหะระดับนาโนเมตรบนแผ่นแกรฟีนทำให้สมบัติทางไฟฟ้าที่ยอดเยี่ยมเป็นผลประสานกันระหว่างแกรฟีนกับอนุภาคโลหะระดับนาโนเมตรที่กระจายตัวอยู่บนแผ่นแกรฟีน

ในการทบทวนวรรณกรรมในอดีต อนุภาคโลหะระดับนาโนเมตรที่นำมาปลูกผลึก ตัวอย่างเช่น ทอง (Au) เฟิลเลเดียม (Pd) โรเดียม (Rh) เงิน (Ag) ทองคำขาว (Pt) คอปเปอร์ (Co) เป็นธาตุที่มีราคาแพง ที่มีใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมีสำหรับการออกซิเดชันของไฮดราซีน[18] บางวารสารได้นำเสนออนุภาคโลหะระดับนาโนเมตรที่ใช้เซ็นเซอร์ตรวจวัดไฮดราซีน คือ อะภาคทองระดับนาโน-คาร์บอนนาโนทิวป์ชนิดผนังชั้นเดียว โลหะสองชนิดระหว่างอนุภาคทอง-เฟิลเลเดียมระดับนาโนเมตรบนแผ่นแกรฟีน อนุภาคโรเดียมระดับนาโนเมตรที่เกาะอยู่บนแท่งคาร์บอนไฟเบอร์ การปลูกผลึกอนุภาคทองบนคาร์บอน

นาโนทิวบ์ชนิดผนังหลายชั้น การปลูกผลึกอนุภาคทองคำขาวบนคาร์บอนนาโนทิวบ์ อนุภาคคูปอลท์ที่มี
 สันฐานเป็นรูปดอกไม้บนแผ่นแกรฟีน เป็นต้น

นอกจากนี้ผลของผลประจุไฟฟ้าแบบเสมือน (pseudocapacitance) สำหรับการปรับปรุงกำลัง
 การผลิตรวมของวัสดุคาร์บอนรวมกันทำวัสดุพอลิเมอร์ไฮบริดโดยปฏิกิริยาฟาราเดอิก (Faradaic) อย่าง
 รวดเร็วได้รับการตระหนักโดยการแทรกของออกไซด์โลหะการเปลี่ยนแปลงที่ใช้งานไฟฟ้า เช่น การใช้
 ZnO Co_2O_3 RuO_2 MnO_2 TiO_2 และ Fe_2O_3 เป็นต้น [6] Co_2O_3 และ ZnO เป็นออกไซด์ของโลหะ
 ทรานซิชันที่รู้จักกันดี ZnO ไม่ได้มีความสำคัญเพียงอย่างเดียวเนื่องจากคุณสมบัติตัวเร่งปฏิกิริยาทาง
 อิเล็กโทรนิคส์, แสง, ไฟฟ้าและเคมี, แต่ยังมีคุณสมบัติทางความร้อน-ไฟฟ้าด้วยเช่นกัน [7, 8] Co_2O_3 -
 คอมโพสิตตามได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่ดีในด้านของตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดต่างกันตัวเร่งปฏิกิริยา
 เช่น เซอร์ไฟฟ้าเคมีและแบตเตอรี่แบบลิเทียม(Li-ion) [9-13] อย่างไรก็ตาม ZnO มักจะให้อัตรา
 ความสามารถที่ไม่ดีและการพลิกกลับได้ในระหว่างกระบวนการชาร์จจำหน่วยเนื่องจากมันเป็นผลึกขนาดใหญ่
 ใหญ่ดังนั้นการปรับเปลี่ยนคริสตัลขนาดของ ZnO และเพิ่มการนำไฟฟ้าของอิเล็กโทรดทั้งเป็นที่ต้องการ
 อย่างสูงมีความพยายามมากขึ้นถูกใช้เพื่อแก้ไขขนาดผลึกโดยกลไกการเติมและเพิ่มการนำไฟฟ้าโดยการ
 รวมเข้าด้วยกันพวกมันเป็นวัสดุที่มีคาร์บอนและนำโพลิเมอร์ เช่น แกรฟีนและพอลิอะนิลีน
 (polyaniline:PANI) ในปีที่ผ่านมา นักวิจัยหลายคนสนใจการสังเคราะห์คอมโพสิตที่แตกต่างกันโดย
 ใช้RGO,ออกไซด์ของโลหะและวัสดุที่ใช้ทำจากพอลิอะนิลีน เช่น rGO-ZnO, [14] rGO- Co_2O_3 [15]
 $Co-ZnO$ [16] ซัลเฟอร์-พอลิอะนิลีน-แกรฟีน(sulfur-polyaniline-graphene) [17] rGO- Co_2O_3 , [18]
 $PANI-Co_2O_3$, [19] rGO-SnO₂-PANI [20] rGO- Fe_2O_3 -PANI [21] และPANI-TiO₂-GO [22] ใน
 บริบทนี้วัสดุ คอมโพสิตประกอบไปด้วยส่วนประกอบที่ทำจากคาร์บอนประกอบด้วยเชื่อมประสาน
 ระหว่างพอลิเมอร์และโลหะทรานซิชันออกไซด์ได้รับการศึกษาและแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงใน
 พฤติกรรมทางเคมีไฟฟ้าที่สังเกตทางใหม่สำหรับการผลิตของรุ่นต่อไปที่มีประสิทธิภาพสูงsupercapacitor
 อย่างไรก็ตามตามรายงานวรรณกรรมทั้งหมดมุ่งเน้นไปที่ออกไซด์โลหะเดี่ยวแทรกกระหว่างการดำเนินการวัสดุ
 โพลีเมอร์และคาร์บอนอย่างสุดความสามารถความรู้ของเราลด แกรฟีนออกไซด์โคบอลต์ เจือ ZnO
 คอมโพสิตพอลิอะนิลีนไฮบริดสำหรับการประยุกต์ใช้ตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดยังคงไม่ได้รับรายงาน

ในโครงการนี้ เป็นการพัฒนาตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดให้มีความจุไฟฟ้าสูงขึ้น การชาร์จประจุ
 ไฟฟ้าได้เร็วขึ้น โดยพัฒนาแบบไฮบริดจลุ่มผสมของขั้วไฟฟ้าที่มีด้านหนึ่งเป็นขั้วของ rGO/ ZnO และอีก
 ขั้วไฟฟ้าเป็นขั้วของ rGO/ CuO ในขั้นตอนสุดท้ายจะนำเอาข้อมูลทางไฟฟ้าเคมีมาออกแบบเป็นตัวเก็บ
 ประจุไฟฟ้ายิ่งยวดเพื่อใช้เป็นแบตเตอรี่ใช้งานต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1.2.1 เพื่อศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมวัสดุประกอบผสม เช่น ระยะเวลาใน
 เกิดปฏิกิริยา ปริมาณของแกรฟีนออกไซด์:ซิงค์คลอไรด์และแกรฟีนออกไซด์:คอปเปอร์ (II)
 คลอไรด์ เช่น ปริมาณความเข้มข้นของซิงค์คลอไรด์ คอปเปอร์คลอไรด์ ระยะเวลาการทำเป็น
 ปฏิกิริยา เป็นต้น

1.1.2 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้าจำเพาะกับค่าความตักย์และค่าการชาร์จประจุ และการคายประจุของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

1.1.3 เพื่อศึกษาพฤติกรรมของกระแสไฟฟ้า-ความต่างศักย์ (I-V characteristic) ของฟิล์มบาง วัสดุประกอบ rGO/ZnO และ rGO/CuO อนุภาคระดับนาโนเมตรอนุภาคระดับนาโนเมตรบน ขั้วไฟฟ้าแบบ 3 ขั้ว (three electrode) และตัวเก็บประจุไฟฟ้าต้นแบบ (prototype)

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 เตรียมสารวัสดุประกอบผสมระหว่างซิงค์ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีน และคอปเปอร์ (II) ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนวัสดุประกอบผสมระดับนาโนเมตรให้มีปริมาณมาก

1.3.2 ขึ้นรูปชิ้นงานตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดโดยนำสารในข้อ 1.3.1 มาเคลือบบนขั้วไฟฟ้าแล้วประกบ ขั้วไฟฟ้าโดยให้ด้านบนเป็นซิงค์ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนและด้านล่างเป็นคอปเปอร์(II) ออกไซด์/รีดิวซ์แกร ฟีน(ใช้เยื่อเลือกผ่านไมโครไฟเบอร์เป็นตัวกั้นกลางระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง) แล้ววัดไฟฟ้าเคมีของตัว เก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด

1.3.3 นำข้อมูลที่ได้จากข้อ 1.3.2 มาจัดทำบทความทางวิชาการระดับชาติและนำเสนอผลต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์วัสดุประกอบ ZnO/rGO และ CuO/rGO อนุภาคระดับนาโนเมตรได้

1.4.2 สามารถทราบเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการวัดค่าทางไฟฟ้าเคมีของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ยิ่งยวดได้

1.4.3 สามารถนำผลงานไปเผยแพร่และตีพิมพ์ผลงานระดับชาติได้

1.5 การดำเนินงานของโครงการ

ในการศึกษาโครงการ มีวิธีการดำเนินงาน ดังต่อไปนี้

1. รวบรวมข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2. จัดเตรียมวัสดุและอุปกรณ์
3. จัดเตรียมตัวอย่างที่จะใช้ทดสอบ
4. ทดสอบและบันทึกผลการทดสอบ
5. วิจัยผลสรุปผลการทดสอบ

1.6 ระยะเวลาในการดำเนินงานโครงการ

ระยะเวลาในการศึกษาโครงการรวมทั้งสิ้น 12 เดือน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการศึกษาโครงการ

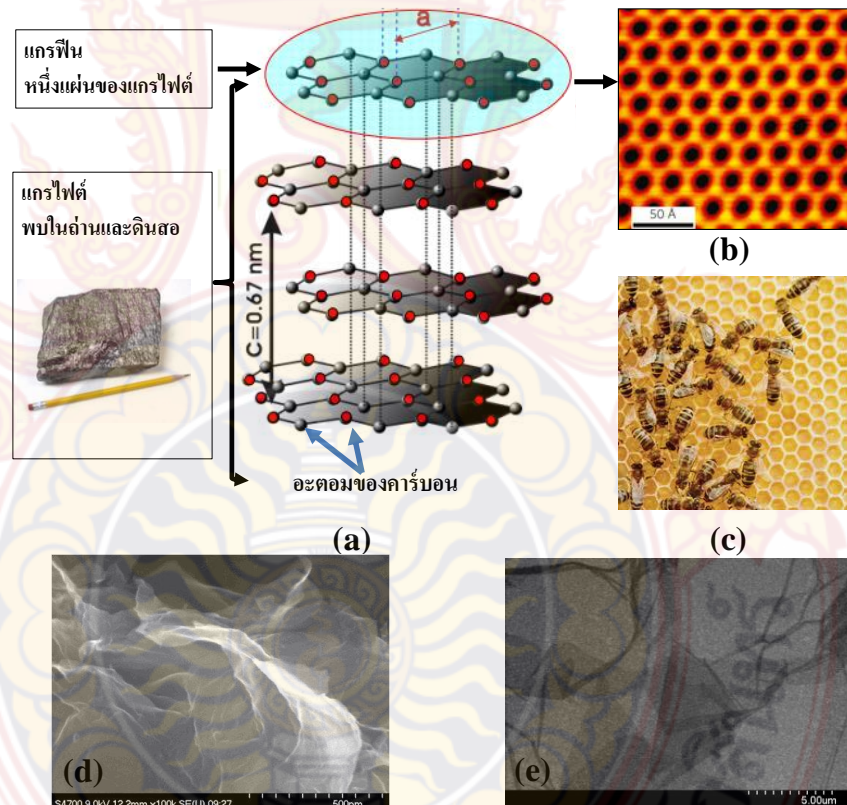
กระบวนการวิจัย	ระยะเวลา											
	ต.ค. 60	พ.ย. 60	ธ.ค. 60	ม.ค. 61	ก.พ. 61	มี.ค. 61	เม.ย. 61	พ.ค. 61	มิ.ย. 61	ก.ค. 61	ส.ค. 61	ก.ย. 61
1.ศึกษาค้นคว้าเอกสาร - วางแผนการวิจัย	←→											
2. เตรียมสารละลายแกรฟีน ไดออกไซด์ให้มีปริมาณมาก เพียงพอ	←→			→								
3.เตรียมตัวอย่างรีดิวซ์แกรฟีน ออกไซด์และสารประกอบ rGO/ZnO และ rGO/CuO อนุภาคระดับนาโนเมตร.		←→							→			
4.ขั้นรูปฟิล์มบางบนขั้วไฟฟ้า แล้ววัดค่าทางไฟฟ้าเคมี (cyclic voltagram : CV, charge-discharge, EIS technique เป็นต้น)				←→					→			
5.ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ของซิลิกอนไดออกไซด์ เช่น รูปผลึกของรีดิวซ์แกรฟีน พื้นที่ผิวจำเพาะ ภาพถ่าย สัณฐานของตัวอย่าง ฯลฯ			←→						→			
6.สรุปรายงานวิจัยฉบับ สมบูรณ์ แล้วนำผลงานไป เผยแพร่และตีพิมพ์ผลงาน ระดับนานาชาติ ฯลฯ								←→				→

หมายเหตุ: แผนการดำเนินงาน อาจเปลี่ยนแปลงตามความเหมาะสม

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

แกรฟีน (graphene) คือ วัสดุ 2 มิติ ที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมของคาร์บอนอย่างเป็นระเบียบเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอล (hexagonal structure) ที่มีลักษณะคล้ายกับรวงผึ้ง ความกว้างและความยาวของแกรฟีนมีตั้งแต่ระดับหลายสิบนาโนเมตรจนถึงมากกว่า 1 เมตร แต่ความหนาของแกรฟีนนั้นเท่ากับขนาดของคาร์บอนอะตอม (ประมาณ 0.34 nm) [20] รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างจำลองของแกรฟีนและแกรไฟต์ ทั้งนี้ในแกรไฟต์ที่มีความหนาประมาณ 1 mm จะประกอบด้วยแกรฟีนมากถึงสามล้านแผ่น แกรฟีนถือว่าเป็นวัสดุ 2 มิติอย่างแท้จริงที่พบได้ในธรรมชาติ ณ เวลานี้เนื่องจากในอดีตนักวิทยาศาสตร์คาดว่าวัสดุ 2 มิติ ไม่สามารถคงรูปการจัดเรียงของอะตอมอย่างเป็นระเบียบได้ที่อุณหภูมิห้องหรือแม้กระทั่งอุณหภูมิที่เข้าใกล้ศูนย์สัมบูรณ์ (0 K หรือ -273°C) เพราะเมื่อวัสดุมีขนาดใหญ่การจัดเรียงอะตอมจะเสียไปและวัสดุนั้นจะหลอมเนื่องจากพลังงานความร้อนและความผันผวนทางความร้อน (thermal fluctuation)



รูปที่ 2.1 (a) รูปวาดและภาพถ่ายแสดงลักษณะทางกายภาพของแกรไฟต์และแกรฟีน (b) โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลของแผ่นแกรฟีนที่ถ่ายจากกล้อง scanning tunnelling microscope, SEM (c) โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลของรังผึ้ง (d) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ของแกรฟีน (e) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (transmission electron microscope, TEM) ของแกรฟีน

แกรฟีนถือว่าเป็นแถบพลังของสารกึ่งตัวนำเป็นศูนย์ (zero gap semiconductor) ซึ่งอิเล็กตรอนบนแผ่นแกรฟีนประพฤติตัวแตกต่างไปจากวัสดุอื่นๆ คือ ประพฤติตัวเป็นไปตามทฤษฎีสัมพัทธภาพ (relativistic behaviour) โดยอิเล็กตรอนบนแกรฟีนถือว่าไม่มีมวล (massless) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนมี

ความเร็วเข้าใกล้ความเร็วแสง (มีความเร็วน้อยกว่าแสงประมาณ 300 เท่า) ซึ่งอนุภาคที่เร็ววานั้นมีเฉพาะแสง (photon) และ นิวตริโน (neutrino) จากเหตุผลข้างต้นทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่บนแกรฟีนได้เร็วกว่าซิลิกอนประมาณ 100 เท่า ที่อุณหภูมิห้อง และเนื่องจากโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลที่เป็นระเบียบของแกรฟีนทำให้โฟนอนสามารถเคลื่อนที่ได้ดีบนแกรฟีนจึงทำให้ค่าการนำความร้อน (thermal conductivity) ของแกรฟีนนั้นมีค่าประมาณ $5000 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ซึ่งมากกว่าทองแดงประมาณ 10 เท่า ที่อุณหภูมิห้อง [21, 22]

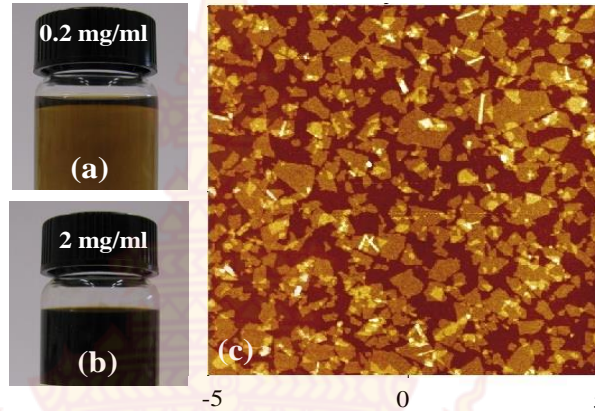
แกรฟีนยังมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีมาก มีความคงทนต่อการแตกหัก (breaking strength) ประมาณ 42 N/m ซึ่งมากกว่าเหล็กประมาณ 100 เท่า และสามารถทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ได้มากถึง 130 GPa ซึ่งในทางทฤษฎีได้กล่าวไว้ว่ามีเปลอนอนทำจากแกรฟีนขนาด $1\text{m}\times 1\text{m}$ แขนงอยู่ระหว่างต้นไม้อาจสามารถนำแมวซึ่งมีน้ำหนักประมาณ 4 kg ไปบางบนเปลนี้ได้โดยน้ำหนักของเปลนั้นน้อยกว่า 1 mg และไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเนื่องจากความหนาของเปลในระดับอะตอมทำให้มีลักษณะโปร่งใส (transparency) โดยแสงในช่วงที่ตามองเห็นสามารถส่องผ่านแกรฟีนได้มากกว่า 97% [23-26]

2.1.1 การสังเคราะห์แกรฟีน

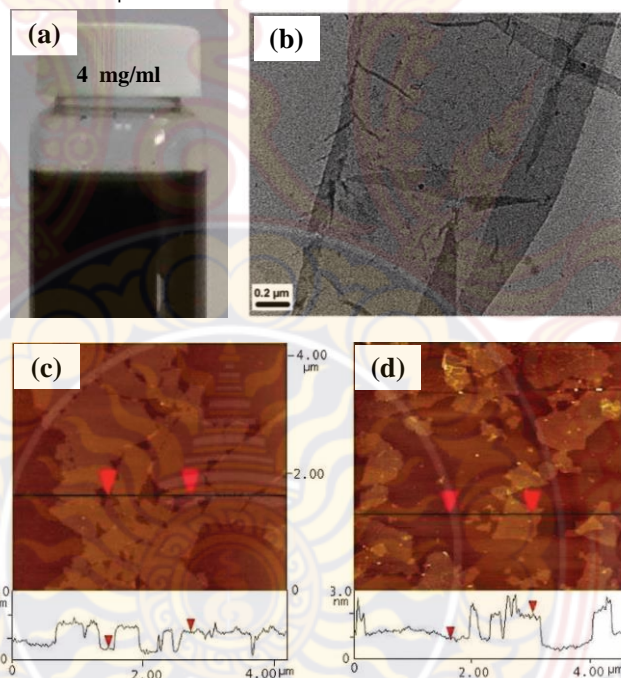
การสังเคราะห์แกรฟีนมีหลายวิธี แต่งานวิจัยนี้ใช้วิธีเตรียมเป็นแกรฟีนออกไซด์ ดังนั้นผู้ทำการวิจัยจะให้ความสนใจในการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีนี้ มากกว่าวิธีอื่นๆ [27-31]

1 การสังเคราะห์แกรฟีนจากแกรไฟต์ด้วยวิธีโซนิเคชัน (sonication): โดยทั่วไป กระบวนการโซนิเคชัน นั้นเกี่ยวข้องกับคลื่นอัลตราซาวด์ (ultrasound) ซึ่งเป็นคลื่นเสียงที่อยู่เหนือการได้ยินตามปกติของมนุษย์ (18,000 Hz หรือมากกว่า) ส่วนมากที่ใช้ประมาณ 40 kHz หรือมากกว่า เมื่อคลื่นเสียงผ่านของเหลวหรือน้ำที่มีแกรไฟต์ละลายอยู่ด้วยพลังที่เหมาะสมโมเลกุลของน้ำจะเกิดการสั่นทำให้เกิดปฏิกิริยาเชิงกลจากความกดอัดของของเหลวที่เปลี่ยนไปอย่างฉับพลันที่เรียกว่า การระเบิดเย็น (cavitation) ขบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องทำให้เกิดความผันผวนในของเหลวและในแกรไฟต์ทำให้เกิดการขูดและเกิดการแยกตัว (exfoliation) ของแกรฟีนออกจากแกรไฟต์เนื่องจากแต่ละแผ่นของแกรฟีนที่วางซ้อนทับเรียงตัวกันเป็นแกรไฟต์นั้นยึดเกาะกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals force) ซึ่งมีค่าประมาณ 5.9 kJ/mol ดังนั้นถ้าแรงเนื่องมาจากการโซนิเคชันจึงมากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ก็จะทำให้แกรฟีนหลุดออกมา ดังนั้นการหลุดร่อนของแกรฟีนยังขึ้นอยู่กับชนิดของแกรไฟต์, ของเหลว, สารเคมี, ความถี่ของคลื่น และอุณหภูมิ อีกด้วย โดยทั่วไปแกรไฟต์ไม่สามารถละลายในน้ำได้ ดังนั้น การสังเคราะห์แกรฟีนจากแกรไฟต์ด้วยวิธีโซนิเคชันจำเป็นต้องแปรสภาพแกรไฟต์สารตั้งต้นให้เป็นแกรไฟต์ออกไซด์ (graphite oxide) ก่อนเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำ [32-39] ซึ่งจะทำให้กระบวนการโซนิเคชันมีประสิทธิภาพในการแยกแกรไฟต์ได้ดีมากขึ้น ดังนั้นทุกงานวิจัยในปัจจุบันที่สังเคราะห์แกรฟีนจึงต้องแปรสภาพแกรไฟต์เป็นแกรไฟต์ออกไซด์เสมอ แกรไฟต์สามารถเปลี่ยนเป็นแกรไฟต์ออกไซด์ได้ด้วยการปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) โดยวิธี Hammer's method ซึ่งใช้สารผสมระหว่างกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4), โซเดียมไนโตรท (NaNO_3) โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) และ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จึงทำให้มีกลุ่มฟังก์ชันต่าง ๆ เกาะอยู่บนแกรฟีนออกไซด์ เช่น กลุ่มออกไซด์ (bridging oxygen atoms), คาร์บอนิล (= CO), ไฮดรอกซิล (-OH) และ ฟีนิล (phenyl, C_6H_5) ซึ่งกลุ่มฟังก์ชันเหล่านี้ทำให้คุณสมบัติของแกรฟีนที่แท้จริงเปลี่ยนไป เช่น การนำไฟฟ้า ดังนั้นหลังจากการโซนิเคชันตามระยะเวลาที่กำหนดแกรฟีนออกไซด์จะถูกเปลี่ยนสภาพเป็นแกรฟีนด้วยกระบวนการรีดักชัน (reduction reaction) เช่น ใช้สารเคมี, ความร้อน หรือ แสงยูวี (UV-assisted approach) หลังจากการปั่นเหวี่ยง (centrifugation) แกรฟีนที่ผ่านการรีดักชัน (reduced graphene) มาแล้ว สารละลายแกรฟีนมีเหลืองแกมน้ำตาล เมื่อมีแกรฟีนละลายในน้ำด้วยความเข้มข้น 0.2 mg/ml เมื่อความเข้มข้นของแกรฟีนเป็น 2 mg/ml

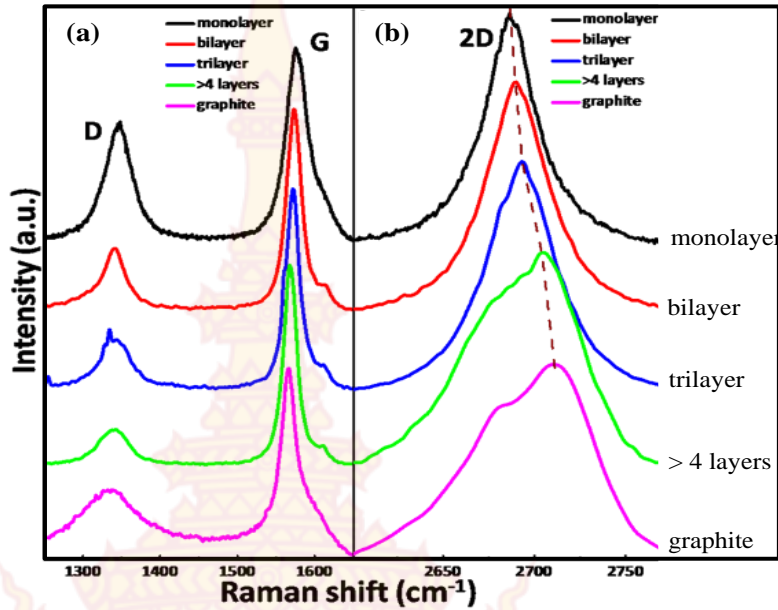
สารละลายมีสีเทาดำดังรูปที่ 2 แกรฟีนที่สังเคราะห์ได้ถูกตรวจสอบด้วย TEM และ Raman spectroscopy ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ ซึ่งลักษณะของพีค (peak) ที่ได้จาก Raman นั้นจะแตกต่างกับของแกรไฟต์ การสังเคราะห์แกรฟีนด้วยวิธีนี้เป็นวิธีทำให้ได้แกรฟีนในปริมาณมาก ซึ่งเหมาะสมในระดับการทำวิจัยและระดับอุตสาหกรรม



รูปที่ 2.2 (a) และ (b) ภาพถ่ายของสารละลายแขวนยอกเซตพหุเมฆเข้มข้นต่างๆ กัน (c) ภาพจาก atomic force microscope, AFM, แสดงลักษณะของแผ่นแกรฟีนตามภาพ height image

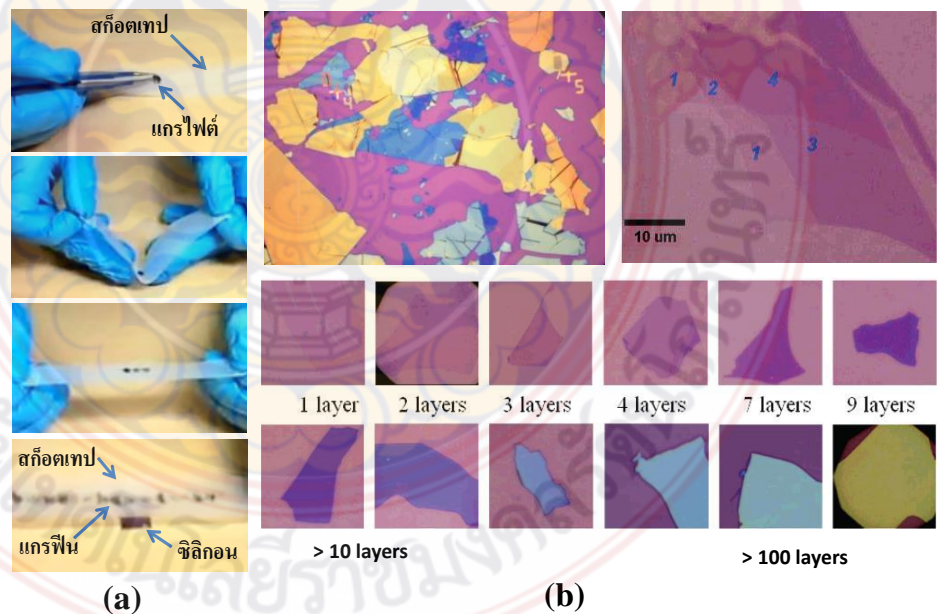


รูปที่ 2.3 (a) ภาพถ่ายของสารละลายแกรฟีนออกไซด์ (b) ภาพถ่ายจากกล้อง transmission electron microscope, TEM, ของแกรฟีน (c) และ (d) ภาพจาก atomic force microscope, AFM, แสดงลักษณะของแผ่นแกรฟีนตาม height image โดยกราฟด้านล่างของแต่ละภาพแสดง height profile ของแผ่นแกรฟีนตามเส้นสีดำที่ลากผ่านซึ่งพบว่ามีความหนาของแกรฟีนประมาณ 1-2 nm



รูปที่ 2.4 (a) และ (b) แสดงเส้นสเปกตราที่ได้จาก Raman spectroscopy ของแกรฟีนและแกรไฟต์ที่มีจำนวนชั้นของแกรฟีนที่แตกต่างกัน (a) ในช่วงสแกน 1250-1650 cm⁻¹ และ (b) ในช่วงสแกน 2500-2800 cm⁻¹

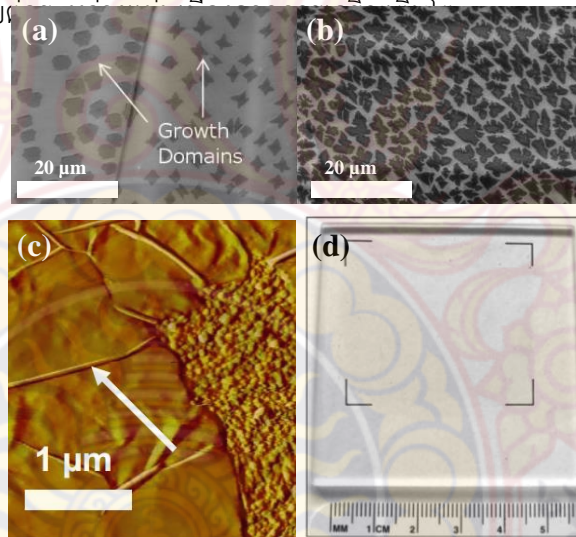
2.2 การสังเคราะห์แกรฟีนจากแกรไฟต์โดยใช้สก๊อตช์เทป(scotch tape): โดยนำชิ้นแกรไฟต์มาวางบนสก๊อตเทปแล้วปิดแกรไฟต์ด้วยอีกด้านหนึ่งของสก๊อตเทปแล้วค่อยๆ ดึงออกไปหลายๆ รอบแล้วนำแกรไฟต์นั้นไปติดบน ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ดังรูปที่ 5 วิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ต้นทุนต่ำและง่ายต่อการสังเคราะห์โดยแกรฟีนที่ได้บนซิลิกอนจะมีสีม่วงเมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์เนื่องจากการแทรกสอดของคลื่นแสง อย่างไรก็ตามวิธีนี้เหมาะสำหรับการสาธิต แต่ไม่เหมาะสำหรับในระดับงานวิจัยหรือระดับอุตสาหกรรมที่ต้องการ แกรฟีนปริมาณมากในเวลาจำกัด



รูปที่ 2.5 (a) ภาพถ่ายแสดงการสังเคราะห์แกรฟีนด้วยการใช้สก๊อตเทป (b) ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของแกรไฟต์ที่มีจำนวนชั้นของแกรฟีนที่ต่างกันและแกรฟีนซึ่งสามารถคัดแยกความหนาของแกรฟีนได้ดีสีที่เห็น

2.3 การปลูกผลึกของแกรฟีนแบบสลายตัวเชิงความร้อน (thermal decomposition growth): เป็นการปลูกผลึกของแกรฟีนบนแผ่นฐาน (substrate) ที่มีโครงสร้างเป็นผลึกเชิงเดี่ยว โดยทั่วไปนิยมใช้ ซิลิกอนคาร์ไบด์ (SiC) โดยการให้ความร้อนแก่ซิลิกอนคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 1100 °C หรือมากกว่า [31] โดยความร้อนจะไปสลายพันธะระหว่างซิลิกอนและคาร์บอน เมื่อถูกความร้อน คาร์บอนโมเลกุลจะแพร่ออกมาที่ผิวหน้าของซิลิกอนซิลิกอนคาร์ไบด์ เกิดเป็นนิวเคลียสของแกรฟีนและเจริญเติบโตเป็นแผ่นแกรฟีน ข้อดีของวิธีนี้คือขั้นตอนไม่ยุ่งยาก แต่ต้องใช้เตาอบที่มีอุณหภูมิสูง การเกิดของแกรฟีนนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิตั้งนั้นการควบคุมอุณหภูมิจึงเป็นสิ่งสำคัญและแกรฟีนที่ได้ส่วนมากจะมีตั้งแต่ 1-10 ชั้นของแกรฟีนซึ่งยังยากต่อการควบคุม

2.4 การปลูกผลึกของแกรฟีนแบบไอระเหยทางเคมี (chemical vapour deposition) : เป็นการปลูกผลึกของแกรฟีนบนแผ่นฐาน (substrate) โดยใช้แผ่นฐานเป็น ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) [28] เช่น นิกเกิล (nickel) หรือใช้วัสดุอื่นบนแผ่นฐานดังรูปที่ 6 ซึ่งส่วนมากใช้ทองแดงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งนี้ปฏิกิริยาทั้งหมดเกิดขึ้นในรีแอกชันแชมเบอร์ (reaction chamber) ในระบบสุญญากาศ และใช้ก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นแหล่งของคาร์บอน ข้อดีของวิธีนี้คือ สามารถสังเคราะห์แกรฟีนในปริมาณมากแต่เป็นที่ยากต่อการควบคุม โดยมักจะมีการเกิดขึ้นของแกรฟีนหลายชั้นและยังมีจุดบกพร่อง (defect) ที่เกิดขึ้นระหว่างแกรฟีนกับแผ่นฐานเมื่อแกรฟีนถูกย้ายไปยังแผ่นฐานชนิดอื่น และยังพบว่าแกรฟีนที่เกิดขึ้นยังมีรอยต่อ



รูปที่ 2.6 (a) และ (b) ภาพถ่ายจากกล้อง SEM ที่เตรียมด้วยวิธีการปลูกแกรฟีน (c) ภาพจาก AFM แสดงลักษณะของแผ่นแกรฟีนตาม height image ลูกศรสีขาวแสดงรอยต่อของแผ่น แกรฟีนแต่ละแผ่นที่โตขึ้น (d) ภาพถ่ายของฟิล์มแกรฟีนบนกระดาษจกสไลด์แสดงถึงความโปร่งใส

2.5 การปลูกผลึกแกรฟีนแบบการฝังไอออน (ion implantation) ที่ผิวของวัสดุ: เป็นกระบวนการใหม่ในการปลูกผลึกของแกรฟีนบนผิวหน้าวัสดุ เดิมกระบวนการนี้ใช้สำหรับปรับผิวหน้าของวัสดุให้มีสมบัติเชิงกายภาพดีขึ้น เหมาะสำหรับนำไปใช้ในงานพิเศษด้านต่าง ๆ ไอออนจะฝังลึกลงไปบนผิวหน้าประมาณ 0.1 μm กระบวนการทั้งหมดดำเนินไปในห้องที่มีความดันบรรยากาศต่ำ การปลูกผลึกแกรฟีนแบบการฝังไอออนเป็นเทคนิคของการเคลือบแข็งแบบใหม่ที่มีลักษณะโดดเด่นเฉพาะตัว คือ เคลือบวัสดุ โดยไม่เปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุนั้น, ไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการติดแน่นของสารเคลือบกับวัสดุ, ไม่มีปัญหา thermal distortion ผิวชิ้นงานได้รับการขัดไปในตัว การฝังตัวของอะตอมเป็นกระบวนการระดับจุลภาค แกรฟีนที่ได้ส่วนมากจะมีตั้งแต่ 1-10 ชั้นของแกรฟีนซึ่งยังยากต่อการควบคุม

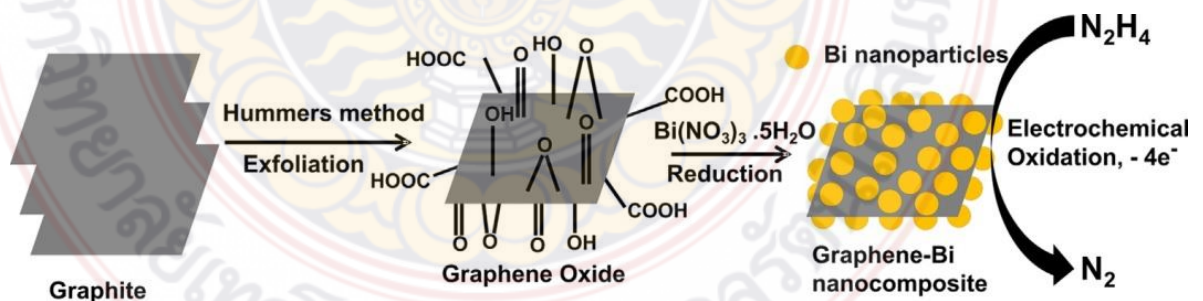
2.6 การประยุกต์ใช้แกรฟีน

เนื่องจากคุณสมบัติพิเศษทางด้านต่างๆของแกรฟีนดังที่กล่าวข้างต้น ทำให้มีงานวิจัยที่น่าสนใจ แกรฟีนไปประยุกต์ใช้ใน ทรานซิสเตอร์, อุปกรณ์ทางการแพทย์, ตัวนำไฟฟ้า, ตัวนำความร้อน, วัสดุผสมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกล และเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ [39-53] งานวิจัยนี้ผู้วิจัยให้ความสำคัญกับการนำแกรฟีนมาประยุกต์ใช้ในเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ เนื่องจากการตรวจจับโมเลกุลของสารเคมี, สารพิษ, ก๊าซพิษ หรือ ไวรัส ที่พบได้ในโรงงานอุตสาหกรรม, ห้องปฏิบัติการวิจัยและสิ่งแวดล้อมรอบๆตัวเราเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็นมากขึ้นทุกวันเพื่อช่วยป้องกันการสูญเสียเนื่องมาจากการสัมผัสหรือได้รับสิ่งเหล่านั้น โดยผู้วิจัยเน้นการสร้างเซ็นเซอร์ตรวจจับแบบปฏิกิริยาตอบสนอง (responsive sensor) ซึ่งเป็นหลักการเดียวกับแอกชูเอเตอร์ (actuator) ดังนั้นในรายงานนี้จะเน้นบทความงานวิจัยเกี่ยวกับเซ็นเซอร์ตรวจจับแบบปฏิกิริยาตอบสนองและแอกชูเอเตอร์

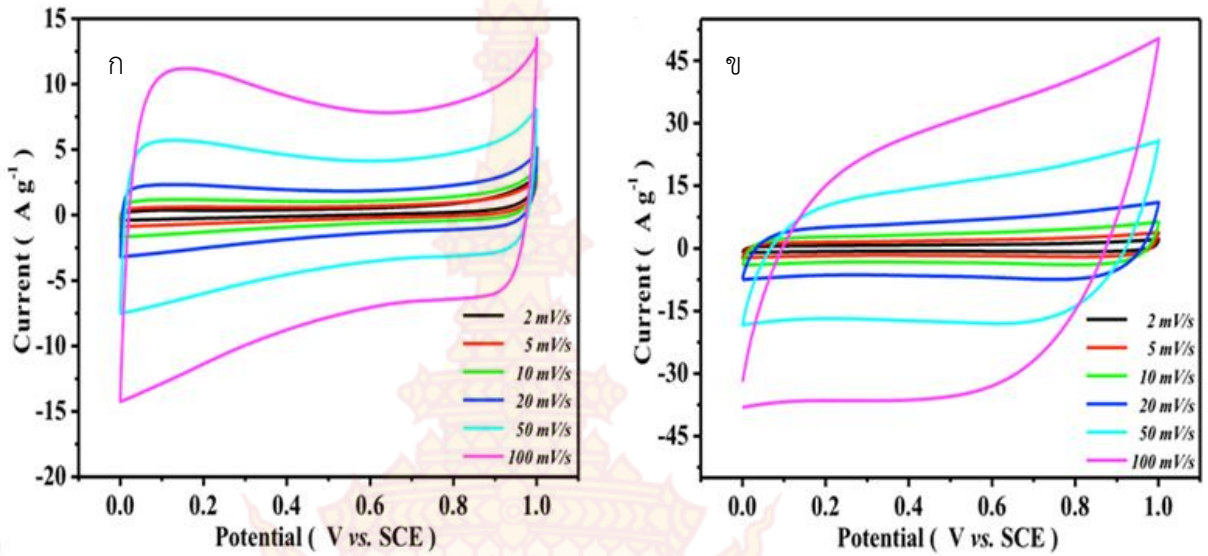
ความสามารถในการตรวจจับสารเคมีของแกรฟีนนั้นเนื่องมาจากพื้นที่ผิวของแกรฟีนที่มีมากถึง 1,300 m²/g และสมบัติทางด้านไฟฟ้า นอกจากจะใช้แผ่นเดี่ยวของแกรฟีน (single graphene) ในการพัฒนาเป็นเซ็นเซอร์ที่พบเห็นได้ทั่วไปแล้ว พิล์มแกรฟีน (graphene film) ที่เกิดจากการรวมตัวของแผ่นแกรฟีนหลายๆแผ่น (graphene assembly) [54-56] และวัสดุผสมของแกรฟีน (graphene-based composite material) [57-59] ยังสามารถนำมาประยุกต์เป็นเซ็นเซอร์ได้เช่นกัน ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสมแกรฟีนสามารถถูกเจือด้วยโมเลกุลของสารที่ให้หรือรับอิเล็กตรอนที่ดูดซับแก่คาร์บอนอะตอมของแผ่นแกรฟีน [39-53]

ปฏิกิริยาตอบสนอง (response) หรือการเคลื่อนไหวแบบแอกชูเอชัน (actuation) ของแผ่นฟิล์มแกรฟีน (graphene film) นั้นเนื่องจากกระบวนการหลายอย่างรวมกัน ได้แก่ กระบวนการทางไฟฟ้าเคมี (electrochemistry) ของสารเคมีที่ดูดซับบนแกรฟีน, การนำไฟฟ้าของแต่ละแกรฟีนในฟิล์มแกรฟีน และสมบัติเชิงกลของแต่ละแกรฟีนในฟิล์มแกรฟีนในการตรวจจับไอระเหยของสารเคมี สิ่งสำคัญของงานวิจัยนี้คือสารเคมีที่ดูดซับบนแต่ละแกรฟีนทั้งหมดในฟิล์มแกรฟีนที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาตอบสนองในภาพรวม [60-63]

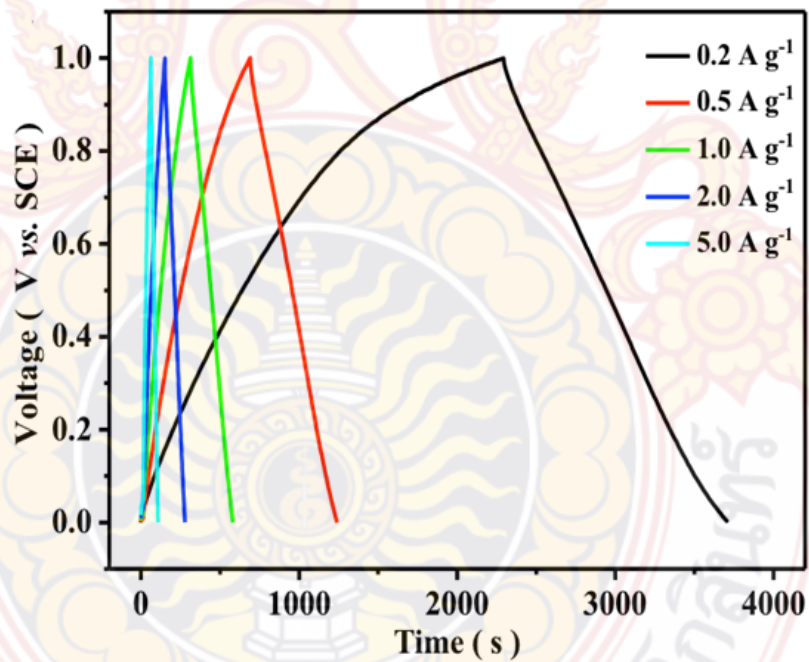
การใช้แกรฟีนเป็นวัสดุพื้นในการปลูกผลึกอนุภาคโลหะระดับนาโนลงไปแผ่นแกรฟีนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของแผ่นแกรฟีนให้ดีขึ้น มีความว่องไว (active) ที่สูงขึ้น สามารถตรวจจับปริมาณไอสารเคมีได้ดียิ่งขึ้น ใช้เป็นตัวตรวจวัดปริมาณไอระเหยสารเคมีที่สัมผัสกับพื้นผิวบริเวณพื้นที่ว่องไวสูง จะมีการถ่ายเทอิเล็กตรอนระหว่างผิวสัมผัสของวัสดุที่ใช้เป็นพื้นที่ยว่องไวกับไอระเหยเคมี ซึ่งจะทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้เป็นพื้นที่ยว่องไวเปลี่ยนไป จากหลักการนี้เองทำทราบถึงปริมาณของไอระเหยทางเคมีที่สัมพันธ์กับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้ โดยพิจารณาจากกราฟ CV (cyclic voltagram) ของวัสดุนั้นๆที่ใช้เป็นพื้นผิวสัมผัสกับไอเคมีได้



รูปที่ 2.7 แสดงตัวอย่างการปลูกผลึกของอนุภาค Bi ลงบนแผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์เพื่อปรับปรุงแกรฟีนออกไซด์ให้มีสมบัติทางไฟฟ้าเคมีดีขึ้น [40]



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างไซคลิกโวลแทมเมตริกที่สังเคราะห์ขึ้นตามลำดับ (ก) การเรียงตัวของคาร์บอนแบบมีลำดับชั้นและ (ข) $MnO_2/C-240$ ที่อัตราการสแกนต่างๆตั้งแต่ 2 ถึง 100 mVs^{-1} ที่แรงดันตัดเป็น 1.0 และ 0.0 V เทียบขั้วไฟฟ้า SCE [41]



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างกัลวานอสเตติกของ $MnO_2/C-240$ ที่มีแรงดันไฟปิด 1.0 และ 0.0 เทียบกับ SCE ที่ความหนาแน่นของกระแสต่างๆตั้งแต่ 0.2 ถึง 5.0 Ag^{-1} เทียบขั้วไฟฟ้า SCE [42]

2.1 การทบทวนวรรณกรรม/สารสนเทศ (information) ที่เกี่ยวข้อง

No.	Year of Publication	Title/Journal	Materials used	Specific Capacitance ($F \cdot g^{-1}$)	Highlight	Calculation of C_{sp}
1.	2016	-Straight forward synthesis of hierarchical $Co_3O_4@CoWO_4/rGO$ core-shell arrays on Ni as hybrid electrodes for asymmetric supercapacitors - Ceramics International (2016)42 p.10719-10725	$Co_3O_4@CoWO_4/rGO$ core-shell arrays on Ni	enhanced specific capacitance of $386 F \cdot g^{-1}$ at $0.5 A \cdot g^{-1}$	Hierarchical core/shell was used to prepare of $Co_3O_4@CoWO_4/rGO$ nanoneedles materials were successfully grown on a 3D Ni foam substrate via a simple hydrothermal approach	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$
2.	2016	- Synthesis of CZTS/RGO composite material	Cu_2ZnSnS_4 (CZTS)/reduced graphene oxide (RGO) composite	The specific capacitance for CZTS/RGO in 3 M KOH aqueous electrolyte was as	To obtain that the high conductivity and large surface area of RGO	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$

		as supercapacitor electrode - Ceramics International (2016) 42, p.10452-10458.		high as $591 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at a current density of $0.25 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$	resulted in the lower charge transfer and ion diffusion resistance in CZTS/RGO composite, which synergistically enhanced the capacitive performance of composite material.	
3.	2016	- Synthesis of mesoporous RGO@ $(\text{Co},\text{Mn})_3\text{O}_4$ nanocomposite by microwave-assisted method for supercapacitor application - Electrochimica Acta (2016) 210, p.240-250.	Mesoporous RGO@ $(\text{Co},\text{Mn})_3\text{O}_4$ nanocomposite	A high capacitance of $1004 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at $3 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ in a 6 M KOH electrolyte solution	- The one-pot synthesis using microwave irradiation. - A well distributed mesoporous layer along with the reduction of graphene oxide.	$C_s = \Delta t/m\Delta V$

4.	2016	<p>- NiO mesoporous nanowalls grown on RGO coated nickel foam as high performance electrodes for supercapacitors and biosensors</p> <p>- Electrochimica Acta (2016) 192,p.205-215.</p>	NiO mesoporous nanowalls grown on RGO coated nickel foam	high specific capacitance of about $950 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at a current density of $5 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ with excellent cycling stability.	A novel and simple procedure is developed to fabricate well aligned NiO mesoporous nanowalls on the porous RGO coated Ni foam substrate.	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$
5.	2015	<p>-Facile synthesis of $\text{Cu}_2\text{O}/\text{RGO}/\text{Ni}(\text{OH})_2$ nanocomposite and its double synergistic effect on supercapacitor performance</p> <p>-Electrochimica Acta (2015) 165,p.314-322.</p>	$\text{Cu}_2\text{O}/\text{RGO}/\text{Ni}(\text{OH})_2$	$923.1 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at $7.0 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$	<ol style="list-style-type: none"> 1. $\text{Cu}_2\text{O}/\text{RGO}/\text{Ni}(\text{OH})_2$ nanocomposite can synthesize through a facial one-pot hydrothermal method. 2. Specific capacity for Cu_2O is compensated and improved so that 	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$

					the CRNN nanocomposite shows superior supercapacitor performance: 3969.3 mF·cm ⁻² (923.1 F·g ⁻¹) at 30 mA·cm ⁻² (7.0 A·g ⁻¹)	
6.	2015	-Solid-type supercapacitor of reduced graphene oxide-metal organic framework composite coated on carbon fiber paper -Electrochimica Acta (2015) 157, p.69-77.	reduced graphene oxide-metal organic framework composite	high specific capacitance of 385 F·g ⁻¹ at 1 F·g ⁻¹	1. Using a solid method for synthesized an active material. 2. To obtain a high specific capacitance of 385 F·g ⁻¹ at 1A·g ⁻¹	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$
7.	2015	- Asymmetric and symmetric supercapacitors based on	- <i>Cladophora algae</i> derived cellulose+pyrrole - activated carbon electrodes	high specific capacitance of 211 F·g ⁻¹	1. Using the <i>Cladophora sp.</i> algae cellulose (CAC) solution was	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$

		<p>polypyrrole and activated carbon electrodes</p> <p>- Synthetic Metals, 203 (2015) p.192-199.</p>			<p>mixed with pyrrole conductive polymer.</p> <p>2. To obtain a capacitance loss of 5% was seen after 14300 cycles</p>	
8.	2015	<p>- High-performance supercapacitors using graphene/polyaniline composites deposited on kitchen sponge</p> <p>- Nanotechnology 26 (2015), p.1-11.</p>	<p>The both graphene platelets (GnPs) and polyaniline (PANi) nanorods were deposited on commercial grade kitchen sponge</p>	<p>To exhibit a specific capacitance of $965.3 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at a scan rate of $10 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ in $1.0 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ solution</p>	<p>This simple method holds promise for high-performance yet low-cost electrodes for supercapacitors.</p>	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$
9.	2014	<p>-Direct synthesis of rGO/Cu₂O composite films on Cu foil for supercapacitors</p> <p>-Journal of Alloys and</p>	<p>Reduced graphene oxide/cuprous oxide(rGO/ Cu₂O)</p>	<p>To exhibit a specific capacitance 98.5 at $1 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$</p>	<p>1.To improve capacitance performance is realized by the hydrothermal treatment of</p>	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$

		Compounds,(2014)58 6 p745-753.			graphene oxides with Cu foils. 2. RGO/Cu ₂ O/Cu- 200 composites exhibit the largest specific capacitance of 98.5 F·g ⁻¹ at 1 A·g ⁻¹	
10.	2014	-Nanostructured CuO/reduced graphene oxide composite for hybrid supercapacitors -The Royal Society of Chemistry,(2014) 4, 23485	Nanostructured CuO/reduced graphene oxide composite	To obtain a high specific capacitance of 326 F·g ⁻¹ at a current density of 0.5 A·g ⁻¹	1. To obtain a nanostructured CuG hybrid composite material has been synthesized by a simple and an inexpensive hydrothermal method 2. A high specific capacitance	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$

					of $326 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at a current density of $0.5 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$.	
11.	2014	-Facile synthesis of hierarchical CuO nanorods arrays on carbon nanofibers for high performance supercapacitors - Ceramics International 40(2014), p.15973-15979.	CuO nanorods arrays on carbon	high capacitance of $398 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at $1\text{A}\cdot\text{g}^{-1}$	1.To synthesize one-dimensional hierarchical hybrid nanostructure composed of CuO nanorods grown on carbon nanofibers 2. To obtain a high electrochemical performance including high capacitance ($398 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at $1\text{A}\cdot\text{g}^{-1}$) high-rate capability and high-power density (10kWkg^{-1})	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$

12.	2014	Nanostructured CuO/reduced graphene oxide composite for hybrid supercapacitors - The Royal Society of Chemistry 4(2014), p.23485-23491.	CuO/reduced graphene oxide (RGO) nanocomposite electrodes	high specific capacitance of $326 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at a current density of $0.1 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$	simple, low cost hydrothermal method	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$
13.	2014	Facile synthesis of nickel network supported three dimensional graphene gel as a lightweight and binder-free electrode for high rate performance supercapacitor application - Nanoscale, 6(2014), p.2426-2433.	three-dimensional graphene gel on nickel foam	high rate capability of $152 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at $0.36 \text{ A}\cdot\text{g}^{-1}$ and $107 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ at $90.9 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$, good cycle stability	To improve the rate capability performance, greatly reduce the mass of the electrode, and lower the fabrication cost of supercapacitors	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$
14.	2014	Scalable synthesis of hierarchically structured carbon	hierarchically structured carbon nanotube - graphene fibres	A specific volumetric capacity of 305 F cm^{-3} in H_2SO_4 (at	- large specific surface area	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$

		nanotube–graphene fibres for capacitive energy storage - Nature nanotechnology, 9 (2014), p.555-562.		73.5 mA·cm ⁻³ , in a three-electrode cell) and 300 F cm ⁻³ in PVA/H ₃ PO ₄ (at 26.7 mA·cm ⁻³ , in a two-electrode cell).	(396 m ² ·g ⁻¹) and high electrical conductivity (102 S·cm ⁻²) - flexible capacitive energy storage	
15.	2013	-Hierarchical Nanocomposites of Polyaniline Nanowire Arrays on Reduced Graphene Oxide Sheets for Supercapacitors - Scientific reports (2013) 3, p.1-9.	hierarchical nanocomposite (PANI-frGO) of polyaniline (PANI) nanowire arrays	high capacitance of 590 F·g ⁻¹ at 0.1 A·g ⁻¹ , had no loss of apacitance after 200 cycles at 2 A·g ⁻¹ .	To improve electrochemical performance suggests promising application of the PANI-frGO nanocomposites in high-performance supercapacitors.	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$
16.	2013	-Fabrication of anchored copper oxide nanoparticles on graphene oxide nanosheets via an electrostatic coprecipitation and	anchored copper oxide nanoparticles on graphene oxide nanosheets	To obtain specific capacitance of 245 F·g ⁻¹ at current density of 0.1 A·g ⁻¹	1. Synthesis of copper oxide nanoparticles were anchored on graphene oxide nanosheets through a simple	$C_s = 4(I\Delta t/m\Delta V)$

		its application as supercapacitor - Electrochimica Acta 88 (2013) p.347-357.			electrostatic coprecipitation 2. This composite material showed enhanced specific capacitance of 245 $F \cdot g^{-1}$ more than those of pure CuO of 125 $F \cdot g^{-1}$ and GO of 120 $F \cdot g^{-1}$	
17.	2013	Copper nanocrystal modified activated carbon for supercapacitors with enhanced volumetric energy and power density - Journal of Power Sources 236 (2013) p.215-223.	Copper nanocrystals homogeneously dispersed in activated carbon (AC)	resulting in the highest specific and volumetric capacity at 79 $F \cdot g^{-1}$ and 62 $F \cdot cm^{-3}$	1. Cu modified activated carbon for supercapacitor was synthesized by in situ solution-based absorption reduction method 2. Copper nanocrystals in AC has little effect on the surface area and porosity of activated carbon.	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$

18.	2013	<p>- One-step solution-phase synthesis of a novel RGO-Cu₂O-TiO₂ ternary nanocomposite with excellent cycling stability for supercapacitors</p> <p>- Journal of Alloys and Compounds (2013) 581, p. 303-307</p>	RGO-Cu ₂ O-TiO ₂ ternary nanocomposite	<p>specific capacitance of 80 F·g⁻¹ at a current density of 0.2 A·g⁻¹</p>	<p>1. The novel RGO-Cu₂O-TiO₂ ternary nanocomposite using one-step solution-phase method</p> <p>2. This excellent cycling stability is exactly a requirement for supercapacitors.</p>	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$
19.	2013	<p>- High-Performance Asymmetric Supercapacitor Based on Nanoarchitected Polyaniline/Graphene/Carbon Nanotube and Activated Graphene Electrodes</p> <p>- <i>Appl. Mater. Interfaces</i>, 2013, 5 (17), pp 8467-8476.</p>	<p>1.graphene nanosheet (Negative electrode)</p> <p>2. carboxylated multiwalled carbon nanotube/polyaniline (sGNS/cMWCNT/PANI) (Positive electrode)</p>	<p>To exhibit a preferable specific capacitance of 107 F·g⁻¹ at a current density of 1 A·g⁻¹.</p> <p>The remarkable energy density of 20.5 Wh·kg⁻¹ (25 kW·kg⁻¹) and the stable cycling performance with 91%</p>	<p>appropriate negative electrode with suitable potential and matchable capacitance will further improve the performance of as-assembled asymmetric supercapacitor (ASC).</p>	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$

20.	2012	-Polyaniline grafted reduced graphene oxide for efficient electrochemical supercapacitors - American Chemical Society (2012) 6, p. 1715-1723.	Conducting polyaniline-grafted reduced graphene oxide (PANI-g-rGO) composite	Electrical conductivity as high as $8.66 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ and capacitance of $250 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ with good cycling stability.	PANI can improve specific capacitance of g-rGO composite as a highest specific and volumetric capacity at $250 \text{ F}\cdot\text{g}^{-1}$ and high electrical conductivity of $8.66 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$	$C_s = I\Delta t/m\Delta V$
-----	------	--	--	--	---	-----------------------------



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีการเตรียมสารตัวอย่าง

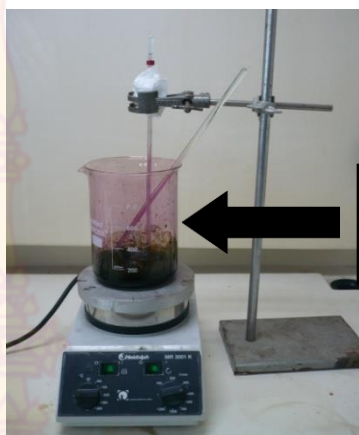
3.1.1 วิธีการสังเคราะห์แกรไฟีนออกไซด์

1. แกรไฟต์สามารถเปลี่ยนเป็นแกรไฟต์ออกไซด์ได้ด้วยการปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation reaction) โดยวิธี Hummer's method ซึ่งนำผงแกรไฟต์จำนวน 3 กรัมผสมระหว่างกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) ปริมาตร 69 ml, โซเดียมไนเตรท (NaNO_3) จำนวน 3 กรัม และผงโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนส (KMnO_4) จำนวน 9 กรัม ในภาชนะซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส แล้วคนส่วนผสมนาน 30 นาที (รักษาอุณหภูมิไม่ให้เกิน 35 องศาเซลเซียส)



รูปที่ 3.1 แสดงการผสมระหว่างกรดซัลฟิวริกเข้มข้นกับโซเดียมไนเตรท ผงแกรไฟต์และผงโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนส (ใน ice bath)

2. จากนั้นนำสารผสมดังกล่าวมา จากนั้นเติมน้ำปอดไอออน 138 ml (ค่อยๆเติมทีละน้อย เนื่องจากปฏิกิริยาค่อนข้างจะคายความร้อนอย่างมาก) แล้วปรับอุณหภูมิให้ได้ 80 องศาเซลเซียส พร้อมคนส่วนผสมนาน 30 นาที ของผสมที่ได้จะเปลี่ยนสีเป็นสีน้ำตาล จากนั้นนำของผสมดังกล่าวมาแช่ในอ่างน้ำเย็นทิ้งไว้ 10 นาที นำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้น 30 % โดยปริมาตร จำนวน 3 ml เติมลงในของผสมนี้ จะเกิดการแยกตัวของชั้นแกรไฟีนออกไซด์ จะมีสีเหลืองอ่อน และชั้นของ MnO_2 ซึ่งเป็นตะกอนสีน้ำตาลตกตะกอนที่ก้นของบีกเกอร์ วางบีกเกอร์ไว้หนึ่งคืนเพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์



รักษาอุณหภูมิไม่เกิน 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

รูปที่ 3.2 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างผงแกรไฟต์กับกรดซัลฟิวริกเข้มข้นกับโซเดียมไนโตรทและผงโปรแทสเซียมเปอร์แมงกาเนส

3. คูดสารละลายแกรไฟน์ออกไซด์(สารละลายสีเหลือง) ด้วยปิเปตแล้วกรองด้วยระบบสุญญากาศ(vacuum filtration) ล้างหลายครั้งด้วยน้ำปอดไอออน จนน้ำที่ใช้ล้างมีค่า pH ประมาณ 7 แล้วล้างด้วยเมทานอลและตามด้วยสารละลายอะซิโตน ขั้นตอนสุดท้ายอบแห้งในด้วยระบบสุญญากาศ(vacuum drying) นาน 3 ชั่วโมง

3.1.2 วิธีการสังเคราะห์วัสดุรีดิวซ์แกรไฟน์ออกไซด์

4. นำผงแกรไฟน์ออกไซด์จำนวน 0.5 กรัม ละลายในน้ำปอดไอออนปริมาตร 250 ml แล้วเขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ความถี่ 40 kHz เป็นเวลา 20 นาที แล้วเติมสารละลายไฮดราซีนโมโนไฮเดรต ($\text{NH}_2\text{NH}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ด้วยอัตราส่วน $\text{GO} : \text{NH}_2\text{NH}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} = 3 : 1$ %v/v โดยใช้วิธีรีฟลักซ์ (reflux method) ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง



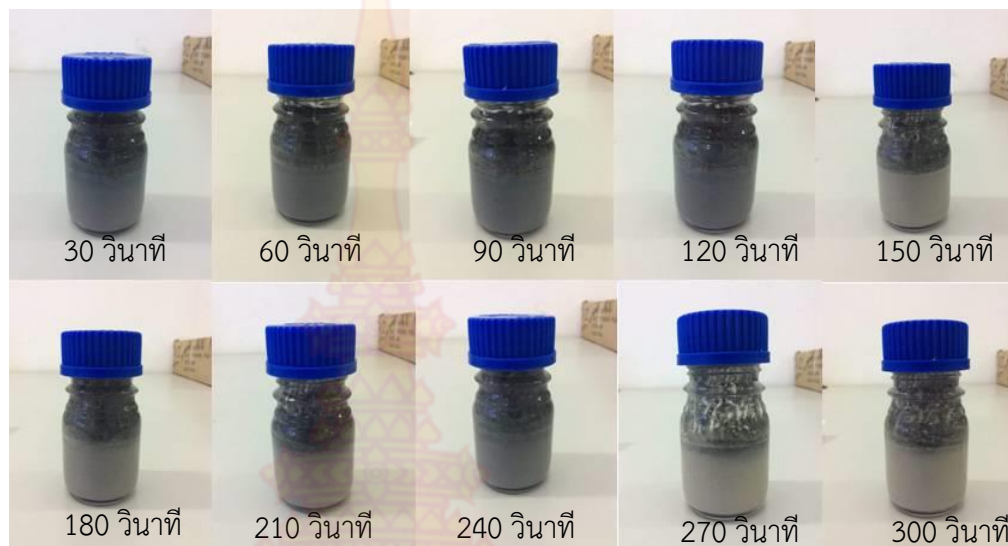
รูปที่ 3.3 แสดงการเตรียมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยวิธีการรีฟลักซ์ เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

5. นำตัวอย่างที่เตรียมได้ในข้อ 4 มากรองด้วยกรองสุญญากาศ (vacuum filtration) โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 40 ล้างด้วยน้ำปลอดไอออนหลายครั้งจนค่า pH ของน้ำที่ใช้ล้างตัวอย่างมีค่าประมาณ 7 จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยเมทานอลและอะซิโตนตามลำดับ

3.1.3 วิธีการสังเคราะห์วัสดุผสมรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์/ซิงค์ออกไซด์อนุภาคระดับนาโนเมตร (reduced graphene oxide/zinc oxide nanoparticles: rGO/ZnO NPs)

6. นำผงแกรฟีนออกไซด์ จำนวน 0.5 กรัม ละลายในน้ำปลอดไอออนปริมาตร 250 ml เติมผงซิงค์คลอไรด์ต่อแกรฟีนออกไซด์ในอัตราส่วน 1 : 3 เปรอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สารละลายโซเดียมความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 30 ml และสารละลายไฮดราซีนโมโนไฮเดรต 5 ml เขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ความถี่ 40 kHz เป็นเวลา 20 นาที

7. นำของผสมในหัวข้อ 6 มาบรรจุในขวดแก้ว ขนาด 250 ml แล้วใส่ในเครื่องไมโครเวฟ ตั้งกำลังไฟฟ้าที่ 420 วัตต์ ครั้ง 30 วินาที พักครั้งละ 10 วินาที จนครบ 5 นาที



รูปที่ 3.4 การเตรียมซิงค์ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

8. นำตัวอย่างที่เตรียมได้ในข้อ 7 มากรองด้วยกรองสุญญากาศ (vacuum filtration) โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 40 ล้างด้วยน้ำปลอดไอออนหลายครั้งจนค่า pH ของน้ำที่ใช้ล้างตัวอย่างมีค่าประมาณ 7 จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยเมทานอลและอะซิโตนตามลำดับ

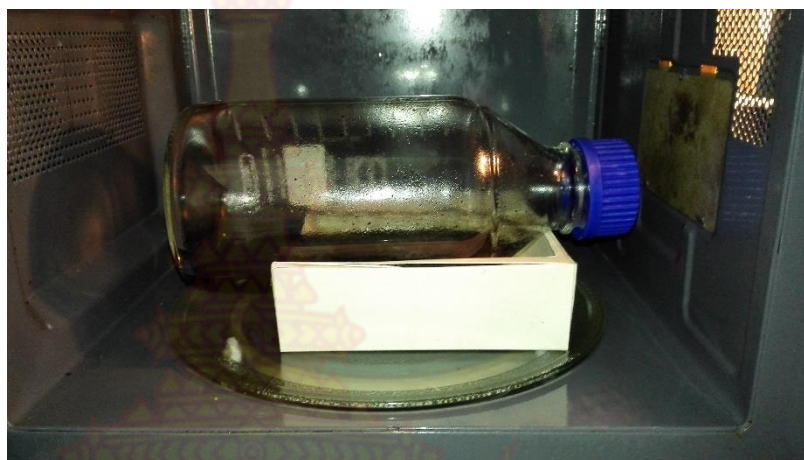


รูปที่ 3.5 แสดงการกรองสารตัวอย่างด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ

3.1.4 วิธีการสังเคราะห์วัสดุผสมคอปเปอร์ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (copper oxide nanoparticles/reduced graphene oxide: CuO/rGO NPs)

1. นำผงแกรฟีนออกไซด์ จำนวน 0.5 กรัม ละลายในน้ำปลอดไอออนปริมาตร 250 ml เติมผงคอปเปอร์ซัลเฟตต่อแกรฟีนออกไซด์ในอัตราส่วน 1 : 2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สารละลายโซเดียมความเข้มข้น 1 M ปริมาตร 30 ml และสารละลายไฮดราซีนโมโนไฮเดรต 5 ml เขย่าด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ความถี่ 40 kHz เป็นเวลา 20 นาที

2. นำของผสมในหัวข้อ 1 มาบรรจุในขวดแก้ว ขนาด 250 ml แล้วใส่ในเครื่องไมโครเวฟ ตั้งกำลังไฟฟ้าที่ 420 วัตต์ ครั้ง 30 วินาที พักครั้งละ 10 วินาที จนครบ 5 นาที



รูปที่ 3.6 การเตรียมคอปเปอร์ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ

8. นำตัวอย่างที่เตรียมได้ในข้อ 2 มากรองด้วยกรองสุญญากาศ (vacuum filtration) โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 40 ล้างด้วยน้ำปilotไอออนหลายครั้งจนค่า pH ของน้ำที่ใช้ล้างตัวอย่างมีค่าประมาณ 7 จากนั้นล้างตัวอย่างด้วยเมทานอลและอะซิโตนตามลำดับ



รูปที่ 3.7 แสดงการกรองสารตัวอย่างด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ

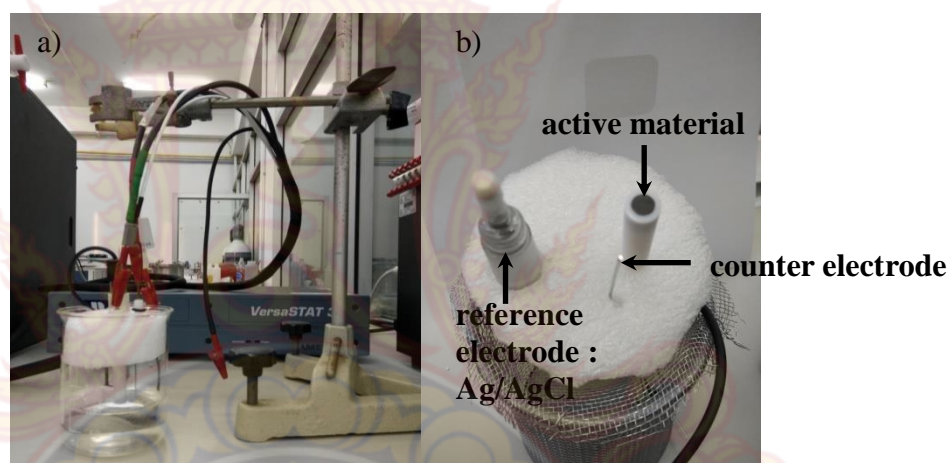
9. ตรวจสอบคุณลักษณะเฉพาะของสารตัวอย่างแกรฟีนออกไซด์ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (GO) รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ (rGO) ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซิงค์ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ คอปเปอร์ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ด้วยเครื่องมือดังต่อไปนี้

9.1 เครื่องวิเคราะห์สารประกอบทางเคมี (X-ray diffractometer : XRD) ในช่วงสแกน 5° - 80° (2theta) ความเร็วในการสแกน 0.2 ดีกรี/วินาที

- 9.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM)
- 9.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope : TEM)
- 9.4 เครื่องดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Fourier transform infrared spectroscope : FT-IR)
- 9.5 เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวเชิงความร้อน (Thermogravimetry analyzer : TGA) ในช่วงอุณหภูมิ 50 °C -1000 °C อัตราการขึ้นของอุณหภูมิ 10 °C/min.
- 9.6 เครื่องวัดพื้นที่ผิวจำเพาะ (Brunauer, Emmett and Teller : BET)

3.1.5 การเตรียมฟิล์มบางชั้นแอคทีฟ (active film layer)

1. นำสารตัวอย่าง GO rGO ZnO/rGO และ CuO/rGO แล้วนำขั้วไฟฟ้าชนิดสามขั้ว โดยใช้แกรชซีคาร์บอน (glassy carbon) เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 mm. เป็นขั้วไฟฟ้าทำงาน (working electrode) ลวดแพลตตินัมเป็นเคาเตอร์อิเล็กโทรด และใช้ขั้วไฟฟ้า Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (reference electrode) ตามลำดับ ดังแสดงดังรูปที่ 3.8

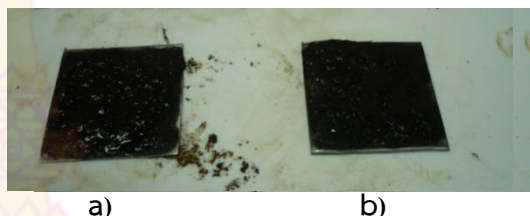


รูปที่ 3.8 แสดงรูปตัวอย่างขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการวิจัยนี้ a) ขั้วไฟฟ้าที่ไข่ทดลอง b) ขั้วไฟฟ้าแกรชซีคาร์บอนที่เคลือบด้วยวัสดุวงวไว (active material)

2. การเตรียมฟิล์มบนขั้วไฟฟ้า (แผ่นสแตนเลส)

1. ตัดแผ่นสแตนเลสขนาด 2.5x2.5 ตารางเซนเมตร ล้างทำความสะอาดพื้นผิวชิ้นงานด้วยเมธานอลบริสุทธิ์และอะซิโตนแล้วอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที
2. นำสารประกอบในข้อ 6.13 และข้อ 6.14 มาบดละเอียดด้วยอาเกตมอร์ตา (agate mortar) แล้วเตรียมสารละลายพอลิอะนิลีน (Polyaniline, PANI) ในสารละลาย DMF โดยใช้อัตราส่วน 1 mg PANI ต่อ 10 ml DMF แล้วให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แล้วกวนตลอดเวลาจนกระทั่งเกิดเป็นสารละลายสีเขียว
3. นำสารละลายในข้อ 2 ผสมกับสารประกอบ rGO/ZnO NPs และ rGO/CuO NPs โดยอัตราส่วนของสารประกอบต่อสารละลายพอลิอะนิลีนเท่ากับ 0.5 g : 3 ml มา

เคลือบลงบนแผ่นสแตนเลสในข้อ 1 ในเครื่อง doctor blade ให้มีความหนาของฟิล์ม 1 mm แล้วอบตัวอย่างในบรรยากาศไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง

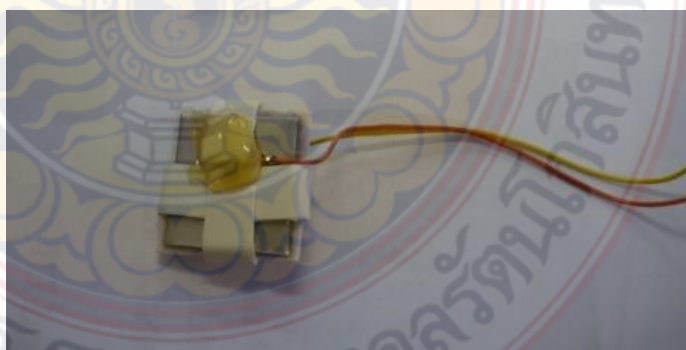


รูปที่ 3.9 แสดงรูปตัวอย่างการเคลือบด้วยฟิล์ม a) ZnO/rGO NPs และ b) CuO/rGO แต่ละชั้น

4. ประกอบตัวอย่างในข้อ 3 แล้วกั้นด้วยแผ่นพอลิโพรพิลีน (polypropylene membrane : PP membrane) ซึ่งทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่านให้อิออนของ KOH (ความเข้มข้นที่ใช้ 2 M) สามารถเลือกเปลี่ยนระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองได้ จากนั้นต่อขั้วไฟฟ้า

3. การศึกษาพฤติกรรมทางไฟฟ้า (electrochemistry) ของสารตัวอย่างเมื่ออยู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์

1. วัดทางไฟฟ้าเคมี ได้แก่ค่า CV (cyclic voltagramm) และค่าการอัดประจุและค่าการคายประจุ (charge/discharge) เป็นต้น เป็นการวัดพฤติกรรมทางไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยขั้วไฟฟ้าในข้อ 3.1.3-3.1.4 ถึง โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง 0.5 โวลต์ โดยใช้สารละลาย KOH ความเข้มข้น 2 M
2. เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างตัวเก็บประจุยิ่งยวดที่ใช้แกรฟีนออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์/รีดิวซ์แกรฟีนและคอปเปอร์(I)ออกไซด์/แกรฟีนออกไซด์ เพียงอย่างเดียวกับค่าไฟฟ้าเคมีกับข้อที่ 3.1.3-3.1.4 แล้ววิเคราะห์ผลที่ได้จากผลทางไฟฟ้าเคมีมาออกแบบเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดต้นแบบแล้วนำข้อมูลทั้งหมดมาแปรผลแล้วหาเงื่อนไขที่เหมาะสม เป็นข้อมูลในการประดิษฐ์เป็นตัวเก็บประจุยิ่งยวดต้นแบบ



รูปที่ 3.10 แสดงตัวอย่างตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดต้นแบบ

3.2 สถานที่ทำการทดลอง

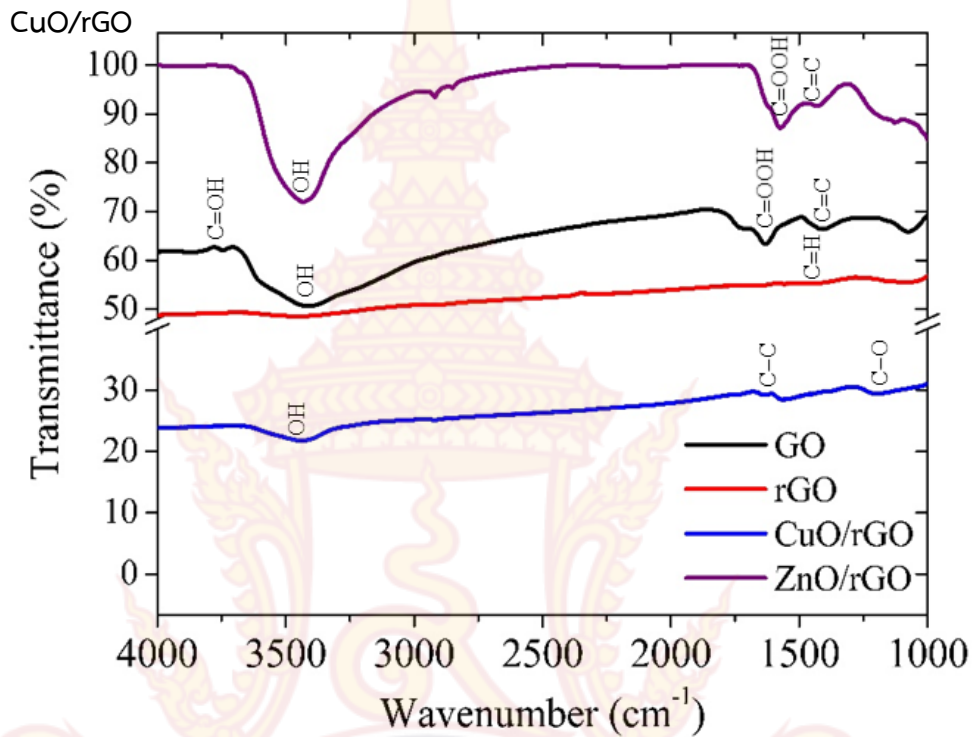
- ห้องปฏิบัติการฟิสิกส์วัสดุ สาขาวิชาศึกษาทั่วไป-วิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์ พื้นที่ศาลายา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ 96 หมู่ 3 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170



บทที่ 4

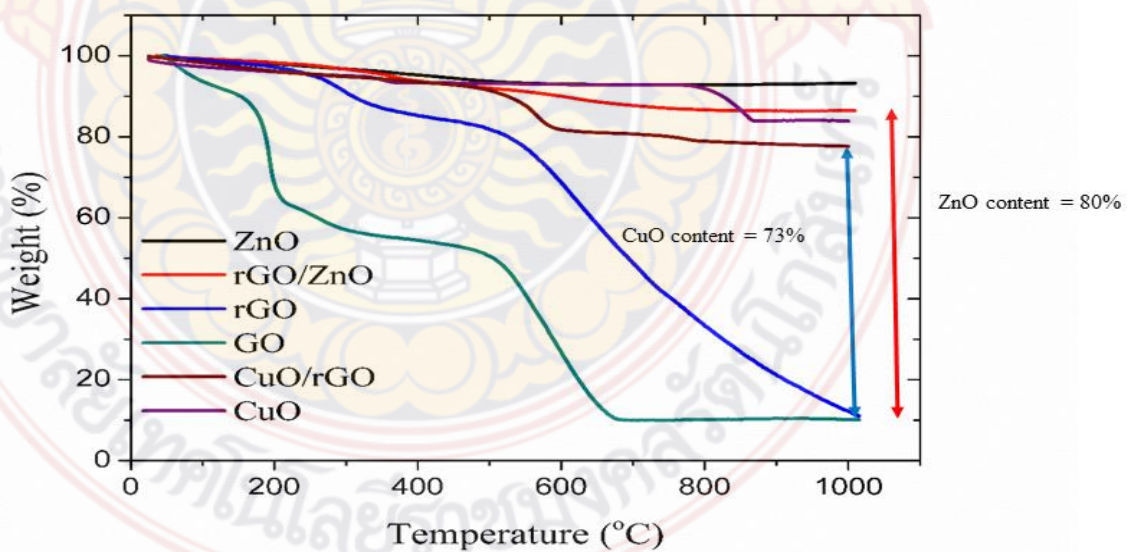
ผลการศึกษาและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันแกรฟีนออกไซด์ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ วัสดุคอมโพสิต ZnO/rGO และ



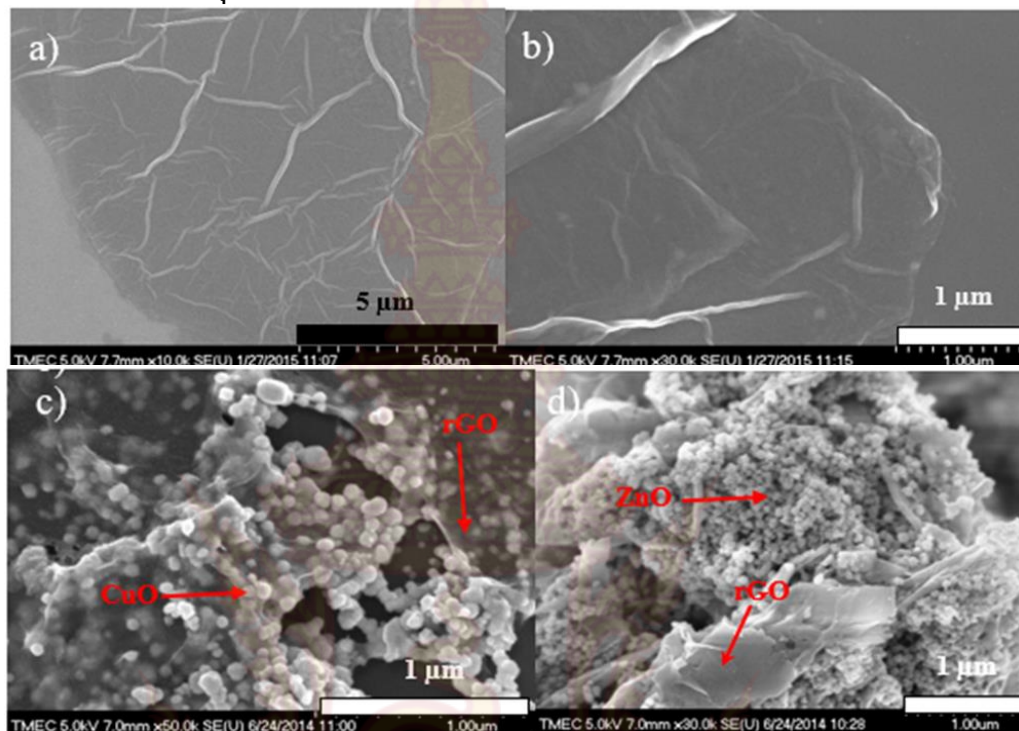
รูปที่ 4.1 แสดงหมู่ฟังก์ชันแกรฟีนออกไซด์ รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ วัสดุคอมโพสิต ZnO/rGO และ CuO/rGO

4.2 การศึกษาองค์ประกอบของโลหะออกไซด์-แกรฟีนด้วยเทคนิคการสลายเชิงความร้อน



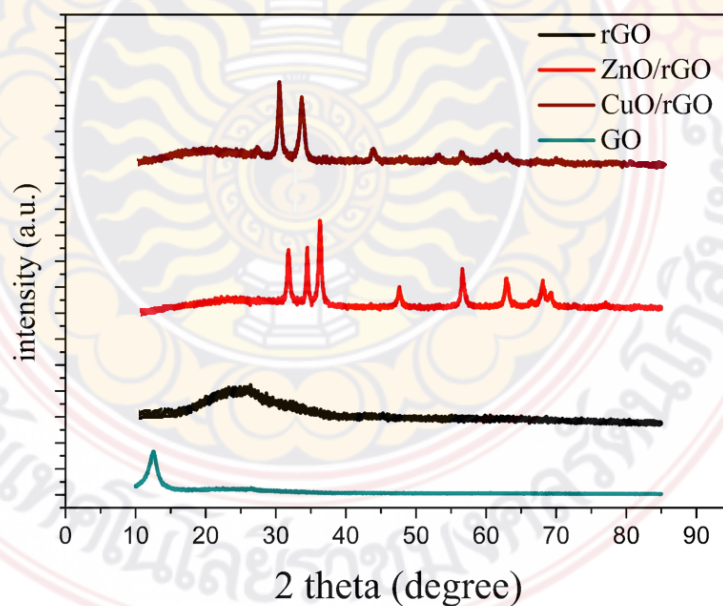
รูปที่ 4.2 แสดงองค์ประกอบของโลหะออกไซด์-แกรฟีนด้วยเทคนิคการสลายเชิงความร้อน

4.3 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะเฉพาะของแกรฟีนออกไซด์



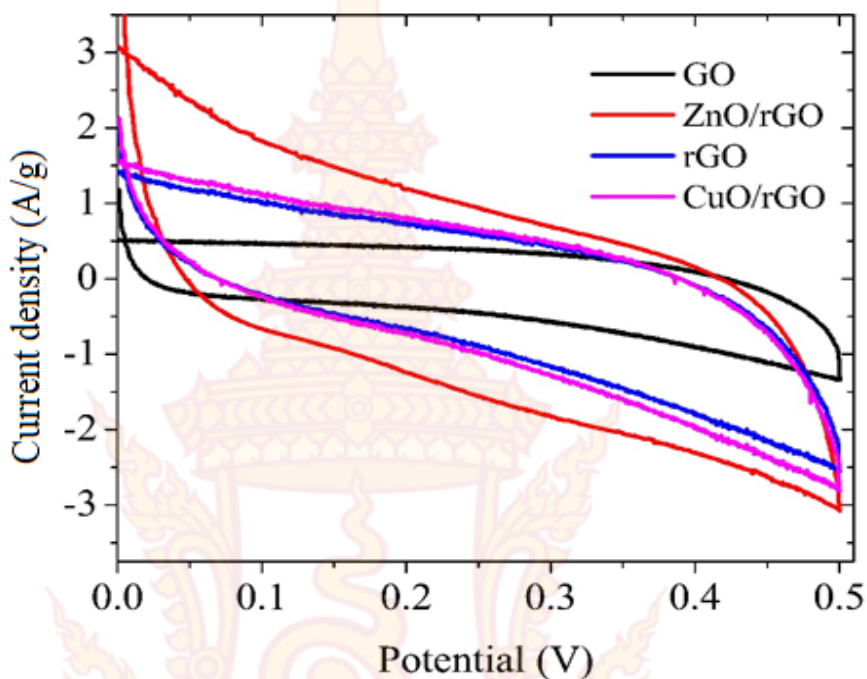
รูปที่ 4.3 a) รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์กำลังขยาย 30000 เท่า b) รีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์กำลังขยาย 30000 เท่า c) การปลูกผลึกคอปเปอร์ออกไซด์บนแผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ d) การปลูกผลึกซิงค์ออกไซด์บนแผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์

4.4 การศึกษาสารประกอบทางเคมีและความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD ของวัสดุคอมโพสิต GO rGO ZnO/rGO และ CuO/rGO

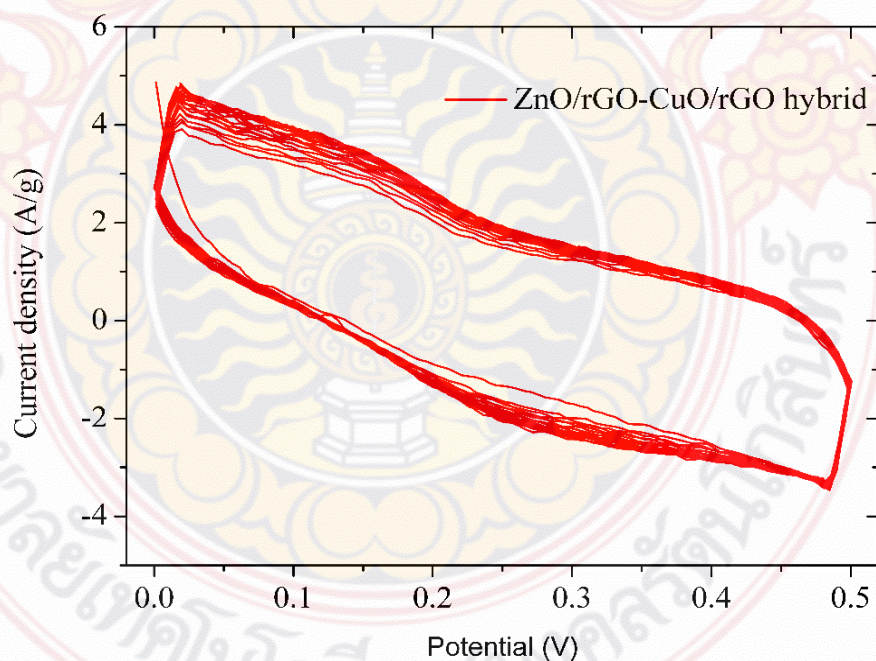


รูปที่ 4. แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์กับความเข้มรังสีเอกซ์เพื่อยืนยันสารประกอบในสารตัวอย่าง

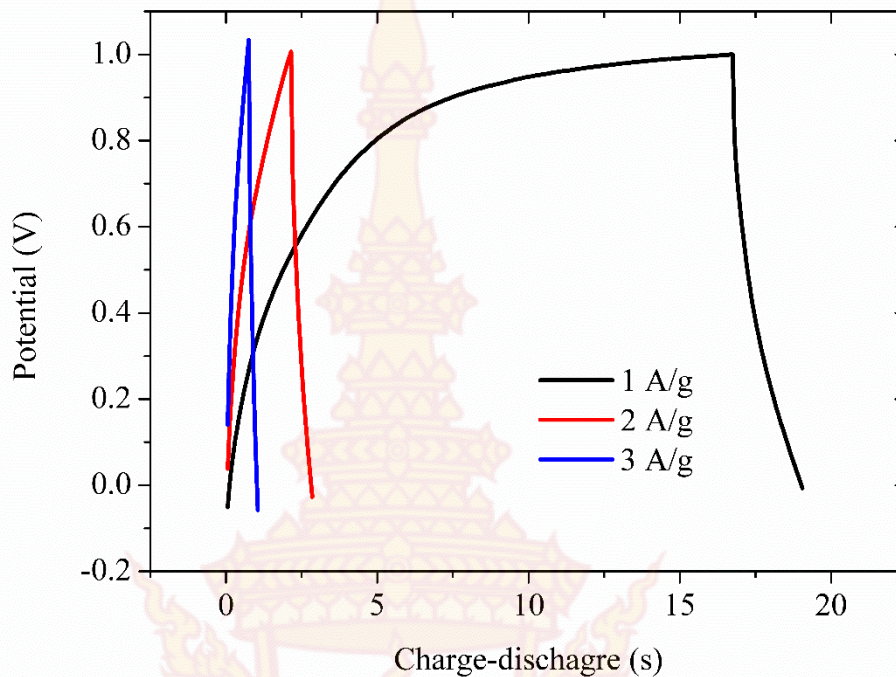
4.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมี



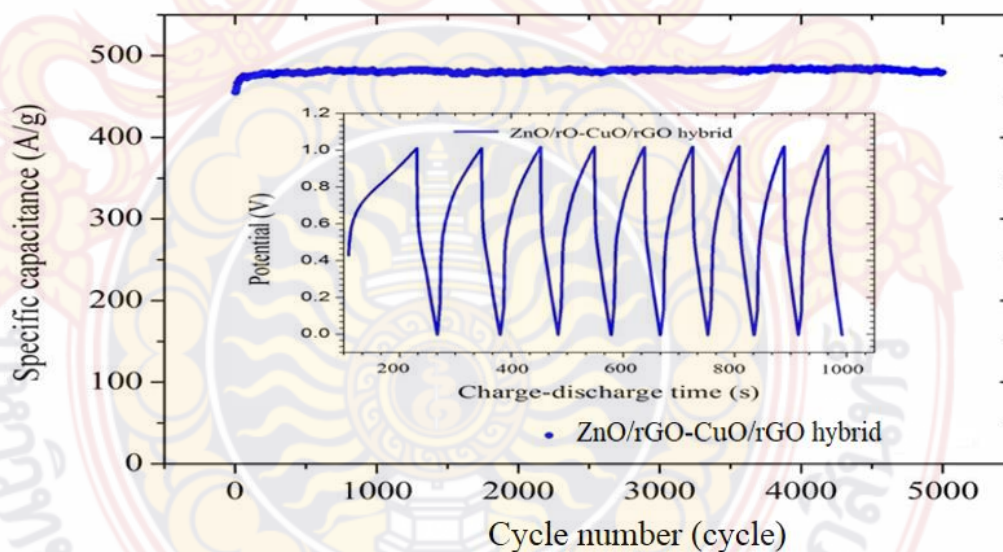
รูปที่ 4.5 แสดงกราฟไซคลิกโวลตาแกรมของวัสดุคอมโพสิต GO, rGO, ZnO/rGO และ CuO/rGO



รูปที่ 4.6 แสดงความมีเสถียรภาพของกราฟไซคลิกโวลตาแกรมในช่วงความต่างศักย์ของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ยาวนาน CuO/rGO และ ZnO/rGO ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ยาวนานแบบลูกผสม



รูปที่ 4.7 แสดงการชาร์จประจุและการคายประจุของตัวต้นแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด CuO/rGO และ ZnO/rGO ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบลูกผสมซึ่งแปรค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวเก็บประจุต้นแบบ



รูปที่ 4.8 แสดงความมีเสถียรภาพของวัสดุคอมโพสิต CuO/rGO และ ZnO/rGO ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบลูกผสม

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะ ค่าความหนาพลังงาน และค่ากำลังไฟฟ้า

Sample	Specific surface area (m ² /g)	C _{sp} (F/g)	E(kWh/kg)	P (kW/kg)
Raw graphite annealed at 300 °C for 2 h	109.16	55.86±2.52	5.23	7.66
rGO	625.89	205.66±4.04	14.20	19.90
ZnO/rGO composite	94.25	314.06±4.00	14.58	21.51
CuO/rGO composite	645.33	180.22±3.21	12.26	17.58
ZnO/rGO : CuO/rGO	655.32	460.26±4.25	18.36	25.23



บทที่ 5 การอธิบายผลและข้อสรุป

5.1 การอธิบายผล

5.1.1 การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารเตรียมที่เตรียมได้

เทคนิค FTIR ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบการมีอยู่ของออกซิเจนที่มีฟังก์ชันและการเปลี่ยนแปลงหลังจากการให้ความร้อนขึ้น ในรูปที่ 1 แสดงสเปกตรัม GO FTIR จุดยอดที่สังเกตได้ที่ 1717.5 cm^{-1} และ 1586 cm^{-1} อาจเกิดจากกลุ่ม $\text{C}=\text{O}$ และกลุ่มอะโรมาติก $\text{C}=\text{C}$ กลุ่มไฮดรอกซิล ($-\text{OH}$) แสดงวงกว้างเป็นศูนย์กลาง รอบ 3235.5 cm^{-1} สเปกตรัม FTIR ของคอมโพสิต ZnO/rGO สังเกตได้ในรูปที่ 1 (เส้นสีม่วง) และยอดฟีด $\text{C}=\text{O}$ จะหายไป และ $\text{C}-\text{O}$ ลดลงซึ่งบ่งชี้ว่าการกำจัดกลุ่มทำงานที่ประกอบด้วยออกซิเจนและการลดลงบางส่วน of GO นำไปสู่การก่อตัวของกราฟีนออกไซด์ลดลงเป็น rGO ในคอมโพสิต ซึ่งพิสูจน์แล้วว่า ชั้น rGO ตามลำดับ พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันของสารตัวอย่างที่เตรียมได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.1 แสดงหมู่ฟังก์ชันที่เตรียมได้

ลำดับที่	สารตัวอย่าง	เลขคลื่น(cm^{-1})	หมู่ฟังก์ชัน
1.	GO	1230-1320, 1500-1600, 1650-1750, 3530 และ 3050-3800	C-O-C, C=C, COOH C-OH, C-OH,
2.	rGO	1430, 980	C-H, C=C
3.	ZnO/rGO	1600, 980	C=C aromatic, C=C bending
4.	CuO/rGO	3400, 3200, 1600, 1250, 980	O-H, C-H บน C---C, C-O, C=C bending

5.1.2 การศึกษาการสลายตัวเชิงความร้อนด้วยเทคนิค TGA

จากรูปที่ 4.2 เป็นการศึกษาการสลายตัวเชิงความร้อนของสารตัวอย่าง GO rGO ZnO/rGO CuO/rGO เพื่อหาปริมาณของ ZnO ที่จับอยู่บนพื้นผิวของวัสดุรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์กรณี GO ที่อุณหภูมิ $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีการสลายตัวของออกซิเจนที่อยู่สารตัวอย่างสลายตัวไป 15% เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีการระเหยของน้ำและความชื้นและสลายตัวขึ้นอีก 10% เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ คาร์บอนที่อยู่ในสารตัวอย่างเกิดความไม่เสถียรจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในสารตัวอย่าง เกิดการสลายตัวเป็น CO หรือ CO_2 สลายตัวเชิงความร้อนเป็น 77%ในส่วนของ rGO เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ มีการสลายตัวของออกซิเจนที่อยู่สารตัวอย่างสลายตัวไป 12% เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ คาร์บอนที่อยู่ในสารตัวอย่างเกิดความไม่เสถียรจะเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในสารตัวอย่าง เกิดการสลายตัวเป็น CO

หรือ CO₂ สลายตัวเชิงความร้อนเป็น 40% เมื่อพิจารณาตัวอย่างที่เป็น CuO อนุภาคระดับนาโนเมตร มีการสลายตัวเชิงความร้อนในระดับต่ำ ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 190-250°C และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 250 °C มีการสลายตัวของหมู่ไฮดรอกซิล (OH) ที่อยู่ในสารตัวอย่าง [77] ส่วนตัวอย่าง

5.1.3 ผลการตรวจวัดคุณลักษณะเฉพาะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากรูปที่ 4.3 a) แสดงสัญญาณของแผ่นออกไซด์ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีลักษณะเป็นแผ่นคล้ายใบผักคะน้า ส่วนรูป b) แสดงรูปสัญญาณของแผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์บนแผ่นซิลิกอน รูป c) แสดงการปลูกผลึกของอนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์บนพื้นผิวของแผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มีขนาดอนุภาคของคอปเปอร์ออกไซด์จับอยู่บนพื้นผิวของแผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ การที่อนุภาคคอปเปอร์ออกไซด์จับที่พื้นผิวของแผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์จะช่วยให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนให้แผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์สามารถถ่ายโอนประจุในปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ดีขึ้น มีขนาดอนุภาคของคอปเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 75.21 ± 6.36 นาโนเมตร รูป d) แสดงการปลูกผลึกของอนุภาคซิงค์ออกไซด์บนพื้นผิวของแผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์มีขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์จับอยู่บนพื้นผิวของแผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์ ในทำนองเดียวกันการที่อนุภาคซิงค์ออกไซด์จับที่พื้นผิวของแผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์จะช่วยให้การถ่ายโอนอิเล็กตรอนให้แผ่นรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์สามารถถ่ายโอนประจุในปฏิกิริยารีดอกซ์ได้ดีขึ้น ในการปลูกผลึกครั้งนี้มีขนาดอนุภาคของซิงค์ออกไซด์เท่ากับ 85.22 ± 4.39 นาโนเมตร

5.1.4 การศึกษาสารประกอบทางเคมีและความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD

รูปแบบ XRD ของแกรฟีนที่ออกซ์, แกรฟีนออกไซด์และคอมโพสิต (G-ZnO) แสดงในรูปที่ 4.4 จุดสูงสุดที่สำคัญของรีดิวซ์แกรฟีนออกไซด์อยู่ที่ $2\theta = 25.5^\circ$ การคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบผลึกของแกรฟีนโดยใช้สมการของ Scherrer's equation

$$\tau = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

เมื่อ k คือ ระยะเฉลี่ยของบริเวณระนาบผลึก k คือ ค่าสัมประสิทธิ์รูปร่างของผลึก (sharp factor) λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่ใช้วิเคราะห์ตัวอย่าง β คือ ความกว้างที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงที่สุด (full width half maximum : FWHM) θ คือ มุมของแบร็ก (Bragg's angle) โดยมีระยะห่างระหว่างระนาบผลึกเท่ากับ 1.43 \AA หลังจากออกซิเดชันค่าสูงสุดจะถูกสังเกตที่ $2\theta = 10^\circ$ ใน GO เพื่อแสดงการออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์แบบ ระยะทางระหว่างชั้นที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลมาจากกลุ่มหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนในระหว่างกระบวนการออกซิเดชันมีจุดสูงสุดห้าจุดในวัสดุคอมโพสิต G-ZnO ที่ค่า $2\theta = 31.8^\circ, 34.4^\circ, 36.2^\circ, 47.5^\circ$ และ 56.5° ซึ่งสอดคล้องกับ (100), (002), (101), (102) และ (110) ของผลึกระนาบของ ZnO ตามลำดับ ระนาบผลึกเหล่านี้ถูกจัดอยู่ในโครงสร้างของ wurtzite ของอนุภาค ZnO ที่สอดคล้องกับ JCPDS No.36-1451 ขนาดผลึก ZnO เฉลี่ยที่คำนวณจากสูตร Scherer คือ 2.1 นาโนเมตร นอกเหนือจากจุดสูงสุด rGO สามารถเห็นได้ที่ $2\theta = 24.5^\circ$ มันแสดงให้เห็นว่าระยะทางระหว่างชั้น

ระหว่างแผ่นกราฟีนคือ 1.6 nm ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าระยะทางชั้นของแกรไฟท์ธรรมชาติเล็กน้อยซึ่งบ่งชี้ว่ากลุ่มของฟังก์ชันการทำงานของออกซิเจนอาจมีอยู่ในแผ่นกราฟีนเส้นสีน้ำตาลแสดงการเลี้ยวเบนของฟิล์มบางเอกซ์เรย์ (LXRD) รูปแบบของผลึกของ CuO แสดงตำแหน่งและความเข้มของสัมพัทธ์ของยอดเขาที่เลี้ยวเบนเข้ากันได้ดีด้วยรูปแบบมาตรฐานของ CuO มีแก๊จูดยอดพีคที่ตำแหน่ง 2θ ตรงกับการปลูกผลึกของ CuO เป็นแบบ monoclinic (JCPDS 05-0661) ซึ่งบ่งชี้ว่าผลึก Cu_2O สามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็น CuO คือ สังเกตโดยปกติแล้วในบรรดายอดเขาเหล่านี้ มียอดพีคสองตัวที่สูงสุดอยู่ที่ค่า 2θ ที่ตำแหน่ง 35.51 และ 38.61 ที่สอดคล้องกับ (1-1 1) และ (111) ซึ่งสอดคล้องกับคุณลักษณะเฉพาะของผลึก CuO แบบ monoclinic มาตรฐาน [22]

5.1.5 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าเคมีของเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด

จากรูปที่ 4.5 เป็นการศึกษาเปรียบเทียบวัสดุคอมโพสิตได้แก่ GO rGO ZnO/rGO และ CuO/rGO พบว่า ZnO/rGO มีประสิทธิภาพสูงสุด รองลงมาคือ CuO/rGO rGO และ GO ตามลำดับ จึงเลือกใช้วัสดุคอมโพสิตสองชนิด คือ ZnO/rGO และ CuO/rGO เป็นวัสดุที่ใช้เคลือบลงบนแผ่นโลหะ

จากรูปที่ 4.6 แสดงกราฟโวลตาแกรมของวัสดุคอมโพสิต ZnO/rGO และ CuO/rGO ซึ่งทำการแปรค่าการประจุไฟฟ้าในช่วง 0 ถึง 0.5 โวลต์ ในการทดลองนี้ใช้จำนวนรอบของการประจุไฟฟ้า 20 รอบ พบว่าวัสดุคอมโพสิตดังกล่าว มีเสถียรภาพที่ต่อประจุไฟฟ้าสูง ซึ่งคุณสมบัติเด่นของแกรไฟท์ที่ปลูกผลึกด้วยโลหะออกไซด์ที่มีอนุภาคระดับนาโนเมตร

จากรูปที่ 4.7 แสดงการชาร์จประจุและการคายประจุของตัวต้นแบบตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวด CuO/rGO และ ZnO/rGO ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบลูกผสมซึ่งแปรค่าความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าที่ป้อนให้กับตัวเก็บประจุต้นแบบ เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้สูงขึ้นจะทำให้การชาร์จประจุได้เร็วขึ้น ช่วงเวลาของการเก็บประจุจะสั้นลง

จากรูปที่ 4.8 แสดงความเสถียรภาพของวัสดุคอมโพสิต CuO/rGO และ ZnO/rGO ชนิดตัวเก็บประจุไฟฟ้ายิ่งยวดแบบลูกผสมจากการทดลองพบว่าความจุไฟฟ้าของตัวต้นแบบมีค่าเท่ากับ 460.26 ± 4.25 F/g และจากกราฟของความจุไฟฟ้าจำเพาะกับค่าเวลาชาร์จ-คายประจุไฟฟ้าพบว่ามีเสถียรภาพสูง

5.1.6 การศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวอย่างที่สัมพันธ์กับความจุไฟฟ้ายิ่งยวดของวัสดุ

จากตารางที่ 1. เป็นการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะของสารตัวอย่างเป็นข้อมูลที่เติมเต็มงานวิจัยให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น เพราะพื้นที่ผิวของวัสดุที่มีค่าสูง จะบ่งบอกถึงพื้นที่ที่สามารถให้ประจุอิสระได้มากขึ้นหรือสามารถกักเก็บประจุอิสระไว้ในสารตัวอย่างได้สูงขึ้น จากการทดลองพบว่า rGO มีพื้นที่ผิวเจาะสูงสุด เนื่องจากการแผ่น แกรฟีนที่นักวิทยาศาสตร์ได้คำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะเชิงทฤษฎีจะมีค่าเท่ากับ $2600 \text{ m}^2/\text{g}$ แต่ rGO เป็นแผ่นแกรฟีนที่นำเอาผงแกรไฟต์มาทำปฏิกิริยาเคมีเพื่อออกซิไดส์ให้ชั้นระหว่างแกรไฟต์ขยับออก(แต่ละชั้นของแกรไฟต์ห่างกัน 0.34 nm) เป็นสองเท่าของระยะห่างแกรไฟต์ปกติ และเมื่อได้รับการสั่นด้วยคลื่น อัลตราโซนิค (ultrasonic wave) ชั้นแกรไฟต์เหล่านี้จะหลุดออกมาแผ่นๆ (exfoliate) ในขั้นสุดชั้น แกรฟีนออกไซด์จะถูกรีดิวซ์เพื่อกำจัดหมู่ไฮดรอกซิล (OH) และหมู่คาร์บอกซิลิก

(-C=O)-OH) บางส่วนออกไป ทำให้พื้นที่ผิวของ rGO มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ $625.89 \text{ m}^2/\text{g}$ แต่เมื่อปลูกผลึก ZnO อนุภาคระดับนาโนเมตรเข้าไปบนพื้นผิวของ rGO อนุภาค ZnO จะเข้าไปอุดช่องว่างของ rGO ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะลดลงเท่ากับ $94.25 \text{ m}^2/\text{g}$ แต่อย่างไรก็ตาม แทนสมบัติทางไฟฟ้าเคมีจะลดต่ำแต่กลับเพิ่มความแน่นกระแสไฟฟ้าเคมีให้สูงขึ้น เนื่องจากอนุภาค ZnO จะให้ประจุไฟฟ้าอิสระ (อิเล็กตรอน) ในทางตรงกันข้ามการปลูกผลึก CuO ขนาดอนุภาค 75.21 ± 6.36 นาโนเมตร จะเกาะอยู่ที่ผิวของแผ่นแกรไฟีนหรือเข้าแทรกช่องว่างแผ่นแกรไฟีนออกไซด์ทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะมีค่าสูงขึ้น ($645.33 \text{ m}^2/\text{g}$) ให้ค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ $180.22 \pm 3.21 \text{ F/g}$ (ค่าที่ได้คำนวณได้จากสูตรในตารางที่ 2.7) แต่เมื่อนำสารชีวไฟฟ้า ZnO/rGO และ CuO/rGO จะเกิดการเสริมกันทำให้สมบัติทางไฟฟ้าเคมีดีเด่นยิ่งขึ้น ให้ค่าความจุไฟฟ้าจำเพาะเท่ากับ $460.26 \pm 4.25 \text{ F/g}$ ค่าความหนาพลังงานเท่ากับ 18.36 kWh/kg และค่ากำลังไฟฟ้า 25.23 kW/kg นับการผสมผสานระหว่างชีวไฟฟ้าที่มี rGO เป็นวัสดุแล้วปลูกผลึกโลหะออกไซด์อนุภาคระดับนาโนเมตร ZnO/rGO และ CuO/rGO จะทำให้สมบัติทางไฟฟ้าเคมีของตัวเก็บประจุไฟฟ้าเคมีดียิ่งขึ้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. หากได้รับการสนับสนุนทางงบประมาณสามารถนำเอาวัสดุนี้มาต่อยอดเป็นตัวประจุไฟฟ้าที่ยืดอายุขัยทางด้านแบตเตอรี่ได้ในอนาคต
2. ข้อเสนอแนะในการเตรียมผลึกโลหะออกไซด์อนุภาคระดับนาโนเมตร ZnO/rGO และ CuO/rGO ไม่ควรใช้กำลังไฟฟ้าสูงมากและยาวนานเกินอาจทำให้ภาชนะที่ใส่สารตัวอย่างระเบิดได้ ควรพักให้ปฏิกิริยาเย็นตัวสักระยะ แล้วค่อยเริ่มปฏิกิริยาขึ้นมาใหม่



บรรณานุกรม

1. J.E. Troyan, Properties, Production, and Uses of Hydrazine., Eng. Chem. Res. 1953, 45, 2608–2612.
2. Y.Wang, Y.Wan, D.Zhang, Reduced graphene sheets modified glassy carbon electrode for electrocatalytic oxidation of hydrazine in alkaline media, Electrochem. Commun. 2010, 12, 187-190.
3. E.H. Vernet, J.D. Mac Ewen, R. H. Bruner, C. C. Haun, E. R. Kinkead, D. E. Prentice, A. Hall, R. E. Schmidt, R. L. Eason, G. B. Hubbard, J. T. Young, Fundam. Appl. Toxicol. 1985, 5, 1050-1064.
4. World Health Organization, Environmental Health Criteria 68 : Hydrazine, Geneva, Switzerland, 1987, 1-89.
5. P. V. K. Rao, G. G. Rao, Talanta, Hydrazine sulphate as reagent for titrimetric determination of vanadium(V) and chromium(VI) 1973, 20, 907-910.
6. F. Dias, A. S. Olojola, B. Jaselskis, Spectrophotometric determination of micro amount of hydrazine and hydroxylamine alone and in the presence of each other, Talanta, 1979, 26, 47-49.
7. C.M. Morenoa, T. Stadler, A. A. Silva, L. C. A. Barbosa, M. E. L. R. Queiroz, Farication of Silver Hexacyanoferrate and Functionized MWCNT with Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) Hybrid Film Modified Electrode for Selectively Determination of Ascorbic Acid And Hydrazine, Talanta, 2012, 89, 369-376.
8. M. Sun, L. Bai, D. Q. Liu, A generic approach for the determination of trace hydrazine in drug substances using *in situ* derivatization-headspace GC–MSJ. Pharm. Biomed. Anal. . 2009, 49, 529-533.
9. S. K. Kim, Y. N. Jeong, M. S. Ahmed, J. M. You, H. C. Choi, S. Jeon, Electrocatalytic determination of hydrazine by a glassy carbon electrode modified with PEDOP/MWCNTs–Pd nanoparticles. Sens. Actuators B 2011, 153, 246-251.
10. C. Wang, L. Zhang, Z. Guo, J. Xu, H. Wang, K. Zhai, X. Zhuo, Graphene Oxide Dispersed Carbon Nanotube and Iron Phthalocyanine Composite Modified Electrode for the Electrocatalytic Determination of Hydrazine Microchim. Acta, 2010, 169, 1-6.
11. V. Singh, D. Joung, L. Zhai, S. Das, S. I. Khondaker, S. Seal, Prog. Graphene based materials: Past, present and future, Mater. Sci. 2011, 56, 1178-1271.
12. D. R. Dreyer, S. Park, C. W. Bielawski, R. S. Ruoff, The chemistry of graphene oxide, Chem. Soc. Rev. 2010, 39, 228-240.
13. C. Xu, X. Wang, J. Zhu, Graphene - Metal particle nanocomposites J. Phys. Chem. C 2008, 112, 19841-19845.

14. Y. He, J. Zheng, S. Dong, Ultrasonic-electrodeposition of hierarchical flower-like cobalt on petalage-like graphene hybrid microstructures for hydrazine sensing, *Analyst* 2012, 137, 4841-4848.
15. P. V. Dudin, P. R. Unwin, J. V. Macpherson, Electro-oxidation of hydrazine at gold nanoparticle functionalised single walled carbon nanotube network ultramicroelectrodes, *Phys.Chem.Chem.Phys.* 2011,13, 17146-17152.
16. Y. Wang, Y. Wan, D. Zhang, Reduced graphene sheets modified glassy carbon electrode for electrocatalytic oxidation of hydrazine in alkaline media, *Electrochem. Commun.* 2010, 12, 187-190.
17. G. Hua, Z. Zhou, Y. Guo, H. Hou, S. Shao, Electrochemical Determination of Ascorbic Acid Using Poly(Xanthurenic Acid) and Multi-Walled Carbon Nanotubes, *Electrochem. Commun.* 2010,12, 422-426.
18. G. Gao, D. Guo, C. Wang, H. Li, Electrocrystallized Ag nanoparticle on functional multi-walled carbon nanotube surfaces for hydrazine oxidation *Electrochem. Commun.* 2007, 9, 1582–1586.
19. S. Chakraborty, C. R. Raj, Carbon nanotube supported platinum nanoparticles for the voltammetric sensing of hydrazine, *Sens. Actuators B* 2010,147, 222–227.
20. A.K. Geim, K.S. Novoselov, The rise of graphene, *Nat. Mater.*, 2007, 6, 183-191
21. R. Mas-Ballest, C. Gomez-Navarro, J. Gomez-Herrero, F. Zamora, 2D materials: to graphene and beyond, *Nanoscale*, 2011, 3, 20-30.
22. L. Gong, I.A. Kinloch, R.J. Young, I. Riaz, R. Jalil, K.S. Novoselov, Interfacial stress transfer in a graphene monolayer nanocomposite, *Adv. Mater.*, 2010, 22, 2694-2697.
23. C. Lee, X. Wei, J. Kysar, J. Hone, Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene, *Science*, 2008, 321, 385-388.
24. N. Ferralis, Probing mechanical properties of graphene with Raman spectroscopy, *J. Mater. Sci.*, 2010, 45, 5135-5149.
25. A. K. Geim, Graphene: Status and Prospects, *Science*, 2009, 324, 1530-1534.
26. S. Stankovich, R. Piner, S.T. Nguyen, R.S. Ruoff, Synthesis and exfoliation of isocyanate-treated graphene oxide nanoplatelets, *Carbon*, 2006, 44, 3342-3347.
27. N. Liu, F. Luo, H. Wu, Y. Liu, C. Zhang, J. Chen, One-step ionic-liquid-assisted electrochemical synthesis of ionic-liquid-functionalized graphene sheets, directly from graphite, *Adv. Funct. Mater.*, 2008, 18, 1518-1525.
28. S. Stankovich, D.A. Dikin, R. Piner, K.M. Kohlhaas, A. Kleinhammes, Y. Jia, Y. Wu, S.T. Nguyen, R.S. Ruoff, Synthesis of graphene-based nanosheets via chemical reduction of exfoliated graphite oxide, *Carbon*, 2007, 45, 155-1565.

29. G. Wang, J. Yang, J. Park, B. Wang, H. Liu, J. Yao, Facile synthesis and characterization of graphene nanosheets, *J. Phys. Chem. C*, 2008, 112, 8192-8195.
30. M.J. McAllister, J.L. Li, D.H. Adamson, H.C. Schniepp, A.A. Abdala, J. Liu, M. Herrera-Alonso, D.L. Milius, R. Car, R.K. Prud'homme, I.A. Aksay, Single sheet functionalized graphene by oxidation and thermal expansion of graphite, *Chem. Mater.*, 2007, 19, 4396-4404.
31. S. Park, J. An, I. Jung, R. D. Piner, S. J. An, X. Li, A. Velamakanni, R. S. Ruoff, Colloidal suspensions of highly reduced graphene oxide in a wide variety of organic solvents, *Nano Lett.*, 2009, 9, 1593-1597.
32. V. Chandra, J. Park, Y. Chun, J. W. Lee, I. Hwang, K. S. Kim, Water-dispersible magnetite-reduced graphene oxide composites for arsenic removal, *ACS Nano*, 2010, 4, 3979-3986.
33. S. Niyogi, E. Bekyarova, M.E. Itkis, M.A. Hamon, R.C. Haddon, R. C., Solution properties of graphite and graphene, *J. Am. Chem. Soc.*, 2006, 128, 7720-7721.
34. S. Stankovich, R. Piner, X. Chen, N. Wu, S.T. Nguyen, R.S. Ruoff, Stable aqueous dispersions of graphitic nanoplatelets via the reduction of exfoliated graphite oxide in the presence of poly(sodium 4-styrenesulfonate), *J. Mater. Chem.*, 2006, 16, 155-158.
35. J.I. Paredes, S. Villar-Rodil, A. Martinez-Alonso, J.M.D. Tascon, Graphene oxide dispersions in organic solvents, *Langmuir*, 2008, 24, 10560-10564
36. S. Park, J. An, R.D. Piner, I. Jung, D. Yang, A. Velamakanni, S.T. Nguyen, R.S. Ruoff, Aqueous suspension and characterization of chemically modified graphene sheets, *Chem. Mater.*, 2008, 20, 6592-6594.
37. D. Li, M.B. Muller, S. Gilje, R.B. Kaner, G.G. Wallace, Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets, *Nat. Nanotechnol.*, 2008, 3, 101-105.
38. Y. Hernandez, V. Nicolosi, M. Lotya, F.M. Blighe, Z. Sun, S. De, I.T. McGovern, B. Holland, M. Byrne, J.J. Boland, P. Niraj, G. Duesberg, S. Krishnamurthy, R. Goodhue, J. Hutchison, V. Scardaci, A.C. Ferrari, J.N. Coleman, High-yield production of graphene by liquid-phase exfoliation of graphite, *Nat. Nanotechnol.*, 2008, 3, 563-568.
39. K.S. Novoselov, A. K. Geim, S.V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S.V. Dubonos, I.V. Grigorieva, A.A. Firsov, Electric field effect in atomically thin carbon films, *Science*, 2004, 306, 666-669.
40. H.C. Schniepp, J. -L. McAllister, H. Sai, M. Herrera-Alonso, D.H. Adamson, R.K. Prud'homme, R. Car, D.A. Saville, I.A. Aksay, Functionalized single graphene sheets derived from splitting graphite oxide, *J. Phys. Chem. B*, 2006, 110, 8535-8539.

41. J.E. Jang, S. N. Cha, Y.J. Choi, D.J. Kang, T.P. Butler, D.G. Hasko, J.E. Jung, J.M. Kim, G.A.J. Amaraturanga, Nanoscale memory cell based on a nanoelectromechanical switched capacitor, *Nat. Nanotechnol.*, 2007, 3, 26-30.
42. K. S. Kim, Y. Zhao, H. Jang, S.Y. Lee, J.M. Kim, K.S. Kim, J.H. Ahn, P. Kim, J.Y. Choi, B.H. Hong, Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes, *Nature*, 2009, 457, 706-710.
43. J. Zhao, A. Buldum, J. Han, J.P. Lu, Gas molecule adsorption in carbon nanotubes and nanotube bundles. *Nanotechnology*, 2002, 13, 195-200.
44. J. Kong, N.R. Franklin, C. Zhou, M.G. Chapline, S. Peng, K. Cho, H. Dai, Nanotube molecular wires as chemical sensors. *Science*, 2000, 287, 622-625.
45. J. Suehiro, S. Hidaka, S. Yamane, K. Imasaka, Fabrication of interfaces between carbon nanotubes and catalytic palladium using dielectrophoresis and its application to hydrogen gas sensor. *Sensors and Actuators B*, 2007, 127, 505-511.
46. I. Sayago, E. Terrado, E. Lafuente, M.C. Horrillo, W.K. Maser, A.M. Benito, R. Navarro, E.P. Urriolabeitia, M.T. Martinez, J. Gutierrez, Hydrogen sensors based on carbon nanotubes thin films. *Synthetic Metals*, 2005, 148, 15-19.
47. R.K. Roy, M.P. Chowdhury, A.K. Pal, Room temperature sensor based on carbon nanotubes and nanofibres for methane detection. *Vacuum*, 2005, 77, 223-229
48. P.G. Collins, K. Bradley, M. Ishigami, A. Zettl, Extreme oxygen sensitivity of electronic properties of carbon nanotubes. *Science*, 2002, 287, 1801-1804.
49. L. Valentini, C. Cantalini, I. Armentano, J. Kenny, M. Lozzi, L.S. Santucci, Highly sensitive and selective sensors based on carbon nanotubes thin films for molecular detection. *Diamond and Related Materials*, 2004, 13, 1301-1305
50. L. Grigorian, K.A. Williams, S. Fang, G.U. Sumanasekera, A.L. Loper, E.C. Dickey, S.J. Pennycook, P.C. Eklund, Reversible intercalation of charged iodine chains into carbon nanotube ropes. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 80, 5560-5563
51. R.S. Lee, H.J. Kim, J.E. Fischer, A. Thess, R.E. Smalley, Conductivity enhancement in single-walled carbon nanotube bundles doped with K and Br. *Nature*, 1997, 388, 255-257
52. A.M. Rao, S. Bandow, A. Thess, R.E. Smalley, Evidence for charge transfer in doped carbon nanotube bundles from Raman scattering. *Nature*, 1997, 388, 257-259
53. J. Fraysse, A.I. Minett, O. Jaschinski, G.S. Duesberg, S. Roth, Carbon nanotubes acting like actuators. *Carbon*, 2002, 40, 1735-1739.
54. Y. Xu, H. Bai, G. Lu, C. Li, G. Shi, Flexible Graphene films via the filtration of water-soluble noncovalent functionalized graphene sheets, *J. Am. Chem. Soc.*, 2008, 130, 5856- 5857

55. W. Bao, F. Miao, Z. Chen, H. Zhang, W. Jang, C. Dames, C.N. Lau, Controlled ripple texturing of suspended graphene and ultrathin graphite membranes, *Nat. Nanotechnol.*, 2009, 4, 562-566.
56. Y. Lee, S. Bae, H. Jang, S. Jang, S.E. Zhu, S.H. Sim, Y.I. Song, B.H. Hong, J. H. Ahn, Wafer-Scale Synthesis and Transfer of Graphene Films, *Nano Lett.*, 2010, 10, 490-493.
57. R. Muszynski, B. Seger, P.V. Kamat, Decorating graphene sheets with gold nanoparticles, *J. Phys. Chem. C*, 2008, 112, 5263-5266.
58. T. Ramanathan, A.A. Abdala, S. Stankovich, D.A. Dikin, M. Herrera-Alonso, R.D. Piner, D.H. Adamson, H.C. Schniepp, X. Chen, R.S. Ruoff, S.T. Nguyen, I.A. Aksay, R.K. Prud'homme, L.C. Brinson, Functionalized graphene sheets for polymer nanocomposites, *Nat. Nanotechnol.*, 2008, 3, 327-331.
59. S. Stankovich, D.A. Dikin, G.H.B. Dommett, K.M. Kohlhaas, E.A. Stach, R. Piner, S.T. Nguyen, R.S. Ruoff, Graphene-based composite materials, *Nature*, 2006, 442, 282-286.
60. J.J. Liang, Y.F. Xu, Y. Huang, L. Zhang, Y. Wang, Y.F. Ma, F.F. Li, T.Y. Guo, Y.S. Chen, Infrared-triggered actuators from graphene-based nanocomposites. *J. Phys. Chem. C*, 2009, 113, 9921-9927.
61. J.S. Bunch, A.M. van der Zande, S.S. Verbridge, I.W. Frank, D.M. Tanenbaum, J.M. Parpia, H.G. Craighead, P.L. McEuen, Electromechanical resonators from graphene sheets. *Science*, 2007, 315, 490-493.
62. S.E. Zhu, R. Shabani, J. Rho, Y. Kim, B.H. Hong, J.H. Ahn, H.J. Cho, Graphene-based bimorph microactuators, *Nano Lett.*, 2011, 11, 977-981.
63. X.J. Xie, L.T. Qu, C. Zhou, Y. Li, J. Zhu, H. Bai, G.Q. Shi, L.M. Dai, An asymmetrically surface-modified graphene film electrochemical actuator, *ACS Nano*, 2010, 4, 6050-6054.
64. S. V. Ahir, E.M. Terentjev, Photomechanical actuation in polymer nanotube composites. *Nat. Mater.*, 2005, 4, 491-495.
65. A.M. Fennimore, T.D. Yuzvinsky, W.Q. Han, M.S. Fuhrer, J. Cumings, A. Zettl, Rotational actuators based on carbon nanotubes, *Nature*, 2003, 424, 408-410.
67. R.H. Baughman, C. Cui, A.A. Zakhidov, Z. Iqbal, J.N. Barisci, G.M. Spinks, G.G. Wallace, A. Mazzoldi, D. De Rossi, A.G. Rinzler, Carbon nanotube actuators, *Science*, 1999, 284, 1340-1344.
68. Y.F. Lian, Y.X. Liu, T. Jiang, J. Shu, H.Q. Lian, M.H. Cao, Enhanced electromechanical performance of graphite oxide-nafion nanocomposite actuator, *J. Phys. Chem. C*, 2010, 114, 9659-9663.
69. K. Mukai, K. Asaka, T. Sugino, K. Kiyohara, I. Takeuchi, N. Terasawa, D.N. Futaba, K. Hata, T. Fukushima, T. Aida, Highly conductive sheets from millimeter-long single-walled

carbon nanotubes and ionic liquids: application to fast-moving, low-voltage electromechanical actuators operable in air, *Adv. Mater.*, 2009, 21, 1582-1585.

70. F.P. Du, C.Y. Tang, X.L. Xie, X.P. Zhou, L. Tan, Carbon nanotube enhanced gripping in polymer-based actuators, *J. Phys. Chem. C*, 2009, 113, 7223.

71. S. Ashley, Artificial muscles, Solvent-Induced Phase-Inversion and Electrical Actuation of Dielectric Copolymer Films, *Sci. Am.*, 2003, 289, 52-59.

72. G. Gu, M. Schmid, P.W. Chiu, A. Minett, J. Fraysse, G.T. Kim, S. Roth, M. Kozlov, S.M. Munoz, Y. Hara, T. Sakai, R. Yoshida, S. Hashimoto, Self-walking gel, *Adv. Mater.*, 2007, 19, 3480-3484.

73. R. H. Baughman, Conducting polymer artificial muscles, *Synth. Met.*, 1996, 78, 339-353.

74. S. Bong, Y.R. Kim, I. Kim, S. Woo, S. Uhm, J. Lee, H. Kim, *Electrochem. Commun.* 2010, 12, 129-131.

75. R. Karthik, S. Thambidurai, Synthesis of RGO-Co doped ZnO/PANI hybrid composite for supercapacitor application, *Mater. Electron*, 2017, 28, 9836-9851.

76. M. .N. Nuraimi, H. Anuar, M. Maizirwan, S.M. Sapuan, M.U. Wahit , S. Zakaria, Preparation of Durian Skin Nanofibre (DSNF) and Its Effect on the Properties of Polylactic Acid (PLA) Biocomposites, *Sains Malaysiana*, 2015, 44(11), 1551-1559.

77. S. Charoenvai, Durian peels fiber and recycled HDPE composites, *Energy Procedia*, 2014, 56, 539-546.

78. D. Sun, M. Wong, L. Sun, Y. Li, N. Miyatake, H. J. Sue, Purification and stabilization of colloidal ZnO nanoparticles in methanol, *J. Sol-Gel Sci. Technol.* 2007, 43, 237-243.



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นายสันติ รัตนวีรนนท์
วัน เดือน ปีเกิด 3 ตุลาคม พ.ศ. 2521



วุฒิการศึกษา

วุฒิ ชื่อสถาบัน
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (ฟิลิกส์) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ปีที่สำเร็จการศึกษา
2547

สถานที่ทำงาน

สาขาศึกษาทั่วไป-วิทยาศาสตร์ (ฟิลิกส์)
คณะศิลปศาสตร์ หน้าที่ศาลายา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ตำบล ศาลายา อำเภอ พุทธมณฑล จังหวัด นครปฐม 73170

สาขาวิจัยที่สนใจ

ฟิลิกส์วัสดุ, วัสดุศาสตร์, พลังงานทางเลือก


บทความที่เสนอในที่ประชุมวิชาการและผลงานวิจัย

1. สันติ รัตนวีรนนท์ สุรพล ศรีแก้ว และ ภารดร ภักดีวานิช. 2545. “เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมซิลิกาจากขี้เถ้าแกลบ” การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 2 บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ 12 มีนาคม 2547, บทความย่อ หน้า 163
2. Santi Rattanaveeranon, Surapol Srikaew and Paradorn Pakdeevanich. Improved method for the preparation of pure silicon from rice husk. The third Thailand materials science and technology conference, 10-11 August 2004 pp. 270-272.
3. S. Rattanaveeranon, R. Ruamnikhom and S. Pangmanayon. Growth of zinc oxide nanoparticles on graphene assembly using to detect of acetone concentrations., Key Engineering Materials., 2016 Vol. 675-676, pp. 125-129.
4. P. Ekabutr, T. Ariyathanakul, S. Chaiyo, P. Niamlang, S. Rattanaveeranon, O. Chailapakul, P. Supaphol, Carbonized electrospun polyvinylpyrrolidone/metal hybrid nanofiber composites for electrochemical applications., Journal. 2017, Applied. Polymer. Sciences., 135, pp. 45639-45639.
5. S. Rattanaveeranon, S. Dumrongsil, K. Jiamwattanapong, Effect of latex rubber and rubber powder as an admixture on bending strength of cement mortars, 2019, Applied. Mech. Mater. 891, pp. 180-186.



ภาคผนวก





ภาคผนวก ข.

ข้อมูลคุณสมบัติไฟฟ้าเคมีของตัวเก็บประจุยิ่งยวด

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลดิบของการวัดไฟฟ้าเคมีของสารตัวอย่าง

Sample	Specific surface area	Total pore volume (cc/g)	Average pore size (nm)	C _{sp1} (F/g)	C _{sp2} (F/g)	C _{sp3} (F/g)	C _{av}	SD(±)	E density (kW/kg)	P density (kW/kg)
Annealing in air (AA)	109.16	0.128	4.37	55.86	60.1	63.1	59.69	3.64	5.23	6.66
rGO	625.89	0.956	6.11	205.33	210.66	213.66	209.88	4.22	14.2	19.9
ZnO/rGO	94.25	0.852	3.54	314.06	318.24	320.24	317.51	3.15	14.58	21.51
ZnO	48.33	0.4398	56.9	90.11	92.22	94.22	92.18	2.06	10.26	19.78
CuO	250.12	0.159	131.4	217.79	219.58	219.58	218.98	1.03	11.94	14.1
CuO/rGO	489.67	0.122	3.47	226.33	228.66	228.66	227.88	1.35	15.56	17.58
ZnO/rGO : CuO/rGO	655.32	0.134	2.27	460.26	465.11	465.11	463.49	2.80	18.36	25.23